

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Construcción, simulación y validación de antena para radiotelescopio MIST

Cinthia Makarena Altamirano Sanhueza

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:

Ingeniera Civil Eléctrica

Profesor Patrocinante:

Dr. Ricardo A. Bustos P.

Profesores Guía:

Dra. Silvia E. Restrepo M.

Dr. Jaime A. Cariñe C.

Concepción, Abril de 2024

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

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Bustos P.

Construcción, simulación y validación de antena para radiotelescopio MIST

Cinthia Makarena Altamirano Sanhueza

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniera Civil Eléctrica

Abril 2024

Resumen

En el presente informe, se detalla el proceso de construcción, simulación y validación de la antena del radiotelescopio MIST que permitirá realizar observaciones desde el norte de Chile.

Se comienza realizando una revisión bibliográfica centrada en la evolución del universo, el corrimiento al rojo, la señal global de 21 cm de hidrógeno neutro, los experimentos que han intentado detectar dicha señal y los principales parámetros que se deben considerar de las antenas, donde se destaca su diagrama de radiación y coeficiente de reflexión. Se expone sobre el radiotelescopio MIST, abordando su importancia y relevancia, así como su potencial contribución a la radio-astronomía a nivel mundial.

Luego, se desglosa el proceso de construcción de la antena, que abarca desde su diseño y la compra de materiales hasta el montaje final, en el que se cumple con las características técnicas establecidas como una inclinación de 0° y una separación de 2 cm entre las placas de aluminio que conforman la antena. Posteriormente, se presentan las mediciones del coeficiente de reflexión de la antena, realizadas en sitios específicos de las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción, de la Provincia de Concepción, Región del Biobío. En los resultados, queda en evidencia la influencia del suelo en el parámetro medido, esto principalmente por los valores de conductividad y permitividad relativa de los respectivos suelos.

Finalmente, se realizó la simulación electromagnética de la antena para el sitio de la comuna de Talcahuano. Al contrarrestar la simulación con la medición, se pueden notar diferencias que radican principalmente en los valores reales de la conductividad y la permitividad relativa. Sin embargo, aun así teniendo en cuenta que los valores del suelo son aproximados, es posible validar la antena y, en consecuencia, es factible realizar observaciones desde el norte del país en un futuro próximo.

“Lo que nos hace grandes es ver
lo pequeños que somos”
-**Carl Sagan.**

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

Agradecimientos

A mis papás y a la mama Sara, gracias por darme tanto amor, por hacer que nunca me faltara nada y que tuviera todo lo necesario para enfocarme en mis estudios. Gracias por los abrazos de felicitaciones y orgullo cuando lograba cosas importantes, pero aún más gracias, por los abrazos de consuelo y comprensión cuando las cosas no salían como esperaba.

A Luis, por elegir convertirse en mi hermano y darme una cuñadita y amiga. Infinitas gracias a ambos por apoyarme siempre y porque sin importar que pueda suceder, siempre están, y no necesito más.

A Cristian, gracias por acompañarme siempre. Gracias por ser mi soporte en los momentos de frustración y por celebrar mis alegrías como si fueran tuyas. Gracias eternas por confiar más en mí que yo misma e impulsarme a ir por más.

A los compañeros de generación que se convirtieron en amigos de la vida, Eve, Mave, Yeyo, Froidsito, Boris y Chino. Gracias por hacer que todo fuera un poco más fácil y porque sin importar que tan estresados podíamos estar, nunca faltaron las risas. Mención especial para mi amigo Lalo, quien me ayudo en algunas mediciones y con quien tuve el placer y honor de compartir gran parte de esta etapa. Gracias por bancarme siempre y por brindarme una de esas amistades que son un regalo del cielo.

Al Dr. Ricardo Bustos, quien aparte de ser mi profesor guía, fue un modelo para elegir la astroingeniería. Gracias por desafiarme académicamente, por la confianza y las oportunidades brindadas.

Gracias a los profesores, al PACE y al CEADE por permitirme realizar ayudantías, mentorías socio-afectivas, tutorías, PINVU y colaborar en un INS. Fueron siete semestres en los que pude desarrollar distintas habilidades y adquirir muchos más conocimientos y compañerismo del que podría entregar.

Gracias a la Dra. Silvia Restrepo y a Roberto Vives, quienes me facilitaron los cubos impresos en 3D. También a Benjamín Fernández quien me ayudó en parte de la construcción y en las mediciones.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	XII
ABREVIACIONES.....	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
1.2. TRABAJOS PREVIOS.....	15
1.2.1 Cosmología, señal global de 21 centímetros y desplazamiento al rojo.	15
1.2.2 Otros instrumentos relacionados con la línea de hidrógeno neutro.....	17
1.2.3 Antenas y radiotelescopios	18
1.2.4 Radiotelescopio MIST	19
1.2.5 Discusión	20
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	21
1.4. OBJETIVOS	21
1.4.1 Objetivo General	21
1.4.2 Objetivos Específicos.....	21
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	21
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	22
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. INTRODUCCIÓN	23
2.2. COSMOLOGÍA	23
2.2.1 Teoría del Big Bang	23
2.2.2 Época Oscura del Universo, Amanecer Cósmico y Reionización	24
2.3. REDSHIFT.....	25
2.4. LÍNEA ESPECTRAL DE 21 CM	25
2.4.1 Transición hiperfina	25
2.4.2 Línea de 21 cm de hidrógeno neutro.....	25
2.4.3 Otros experimentos.....	26
2.5. ANTENAS	27
2.5.1 Directividad	28
2.5.2 Ganancia.....	28
2.5.3 Ancho de banda.....	28
2.5.4 Diagrama de radiación	28
2.6. ANTENAS DIPOLO	30
2.7. PARÁMETROS S.....	30
2.7.1 Vector Network Analyzer	32
2.8. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL SUELO	33
2.8.1 Permitividad relativa.....	33
2.8.2 Conductividad eléctrica.....	33
CAPÍTULO 3. RADIOTELESCOPIO MIST	34
3.1. INTRODUCCIÓN	34
3.2. DISEÑO	34
3.2.1 Antena.....	35
3.2.2 Receptor.....	36
CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN DE ANTENA.....	38
4.1. INTRODUCCIÓN	38
4.2. PERNOS, TUERCAS Y ESPIRALES	38
4.3. PERFILES DE FIBRA DE VIDRIO.....	40

4.4.	PLACAS DE ALUMINIO.....	42
4.5.	CUBOS 3D.....	43
4.6.	MONTAJE.....	46
CAPÍTULO 5. MEDICIONES DE COEFICIENTE DE REFLEXIÓN.....		49
5.1.	INTRODUCCIÓN	49
5.2.	MEDICIONES PRELIMINARES	49
5.3.	MEDICIONES DE S11 EN LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN	53
5.3.1	<i>Ubicaciones.....</i>	53
5.3.2	<i>Incorporación de cable coaxial Rg174 de 20 metros.....</i>	55
5.3.3	<i>Mediciones finales.....</i>	60
CAPÍTULO 6. SIMULACIONES EN FEKO.....		62
6.1.	INTRODUCCIÓN	62
6.2.	ANTENA DE MIST EN FEKO	62
6.3.	SIMULACIONES.....	63
6.3.1	<i>Simulaciones preliminares.....</i>	65
6.3.2	<i>Modificación del suelo en la simulación y proceso de optimización</i>	66
6.3.3	<i>Simulación final</i>	85
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES		90
7.1.	SUMARIO	90
7.2.	CONCLUSIONES	91
7.3.	TRABAJO FUTURO	91
BIBLIOGRAFÍA		92
ANEXO A. CÓDIGO UTILIZADO EN MATLAB.....		94

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Características de absorción esperadas de hidrógeno neutro	26
Tabla 4.1 Materiales adquiridos en MALVAR	39
Tabla 4.2 Materiales adquiridos en FEMOGLAS	40
Tabla 4.3 Materiales adquiridos en ORECAL	42
Tabla 4.4 Filamento para impresora 3D	43
Tabla 5.1 Ubicación de mediciones en la Provincia de Concepción.....	53
Tabla 6.1 Ubicación medición Talcahuano y SEV	64
Tabla 6.2 Sondeo Eléctrico Vertical N°14.....	65
Tabla 6.3 Sondeo Eléctrico Vertical N°15	65
Tabla 6.4 Modificaciones primer estrato de prueba 0	67
Tabla 6.5 Modificaciones segundo estrato de prueba 5	67
Tabla 6.6 Modificaciones de conductividad al primer estrato de prueba 5.....	68
Tabla 6.7 Modificaciones de permitividad relativa al primer estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19.	69
Tabla 6.8 Modificaciones de permitividad relativa al segundo estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19.	71
Tabla 6.9 Modificaciones de conductividad eléctrica al segundo estrato de las pruebas 26, 29, 32 y 35.....	73
Tabla 6.10 Parámetros de prueba 47	75
Tabla 6.11 Modificaciones de espesor al primer estrato de la prueba 47	75
Tabla 6.12 Modificaciones de permitividad de la prueba 49	76
Tabla 6.13 Modificaciones de conductividad de la prueba 60.....	77
Tabla 6.14 Modificaciones de permitividad de la prueba 66	78
Tabla 6.15 Modificaciones de conductividad al segundo estrato de la prueba 66	79
Tabla 6.16 Modificaciones de conductividad al primer estrato de la prueba 73.....	80
Tabla 6.17 Modificaciones de espesor al primer estrato de las pruebas 80, 73 y 81	81
Tabla 6.18 Parámetros de prueba 85	83
Tabla 6.19 Modificaciones de permitividad de la prueba 85	83
Tabla 6.20 Parámetros de prueba 97	84
Tabla 6.21 Parámetros simulación final.....	85
Tabla 6.22 Error cuadrático medio.....	89

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Evolución del universo	24
Fig. 2.2 Perfil de absorción de la señal de 21 cm obtenida por EDGES	27
Fig. 2.3 Ejemplo diagrama de radiación.....	29
Fig. 2.4 Diagrama de radiación de dipolo elemental.....	30
Fig. 2.5 Descripción gráfica de los Parámetros-S en una red de dos puertos	31
Fig. 2.6 NanoVNA	32
Fig. 3.1 MIST durante observaciones científicas realizadas el 2022 en Nevada, CA.....	34
Fig. 3.2 Vista superior de antena MIST	36
Fig. 3.3 Diagrama de bloque del receptor de MIST	36
Fig. 4.1 Diseño 3D de antena de MIST	38
Fig. 4.2 Pernos y tuercas plásticas.....	39
Fig. 4.3 Espirales de nylon	39
Fig. 4.4 Perfiles FRP	40
Fig. 4.5 Ingletadora	41
Fig. 4.6 Cortes de perfiles	41
Fig. 4.7 Diseño placas de aluminio	42
Fig. 4.8 Placas de aluminio	43
Fig. 4.9 Impresora 3D	44
Fig. 4.10 Cubo 3P.....	44
Fig. 4.11 Cubo 4P.....	45
Fig. 4.12 Tapas para los perfiles tipo cajón.....	45
Fig. 4.13 Montaje perfiles y cubos	46
Fig. 4.14 Vista superior antena.....	47
Fig. 4.15 Vista lateral antena.....	47
Fig. 4.16 Inclínómetro sobre la antena.....	48
Fig. 4.17 Separación de 2 cm	48
Fig. 5.1 Mediciones preliminares.....	50
Fig. 5.2 Coeficiente de reflexión de mediciones preliminares	52
Fig. 5.3 Magnitud coeficiente de reflexión de cable en mediciones preliminares	53
Fig. 5.4 Ubicación de mediciones en Google Earth.....	54

Fig. 5.5 Cable coaxial Rg174 de 10 m y núcleo de ferrita	55
Fig. 5.6 Disposición del cable para su medición	56
Fig. 5.7 Coeficiente de reflexión con cable de 20 m.	57
Fig. 5.8 Antena MIST en Talcahuano	58
Fig. 5.9 Antena MIST en Hualpén	59
Fig. 5.10 Antena MIST en Concepción.....	59
Fig. 5.11 Resultados finales coeficiente de reflexión.....	60
Fig. 5.12 Comparación coeficiente de reflexión	61
Fig. 6.1 Antena de MIST en FEKO	63
Fig. 6.2 Ubicación medición Talcahuano y SEV en Google Earth.....	64
Fig. 6.3 Coeficiente de reflexión simulaciones preliminares	66
Fig. 6.4 Coeficiente de reflexión con modificaciones al primer estrato de prueba 0.....	67
Fig. 6.5 Coeficiente de reflexión con modificaciones al primer estrato de prueba 5.....	68
Fig. 6.6 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad al primer estrato de prueba 5	69
Fig. 6.7 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad relativa al primer estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19	70
Fig. 6.8 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad relativa al segundo estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19.	72
Fig. 6.9 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad eléctrica al segundo estrato de las pruebas 26, 29, 32 y 35	74
Fig. 6.10 Coeficiente de reflexión con modificaciones de espesor al primer estrato de la prueba 47	76
Fig. 6.11 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad de la prueba 49	77
Fig. 6.12 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad de la prueba 60.....	78
Fig. 6.13 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad de la prueba 66	79
Fig. 6.14 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad al segundo estrato de la prueba 66	80
Fig. 6.15 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad al primer estrato de la prueba 73.....	81
Fig. 6.16 Coeficiente de reflexión con modificaciones de espesor al primer estrato de las pruebas 80, 73 y 81	82
Fig. 6.17 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad de la prueba 85	84

Fig. 6.18 Coeficiente de reflexión de simulación final	85
Fig. 6.19 Diagrama de radiación de simulación final.....	87
Fig. 6.20 Coeficiente de reflexión con comparación de simulación preliminar y final	88
Fig. 6.21 Coeficiente de reflexión en complejo con comparación de simulación preliminar y final.	88

Nomenclatura

MHz	: Mega Hertz
ν	: Frecuencia
z	: Corrimiento al rojo
$L\alpha$	: Línea espectral de hidrógeno
dB	: Decibels
K	: Kelvin
G	: Ganancia
D	: Directividad
η	: Eficiencia de la antena
S	: Siemens
Ω	: Ohm

Abreviaciones

Mayúsculas

MIST	: Mapper of the IGM Spin Temperature
MARI-UCSC	: Medidor Autónomo de Radio Interferencia
IGM	: Intergalactic Medium
CMB	: Cosmic Microwave Background
PRI ² M	: Probing Radio Intensity at high-z from Marion
LEDA	: Large-aperture Experiment to Detect the Dark Age
EDGES	: Experiment to Detect the Global Epoch of Reionization Signature
CD	: Cosmic Dawn
EoR	: Epoch of Reionization
S	: Scattering
SEV	: Sondeo Eléctrico Vertical
LAIM	: Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas.
VNA	: Vector Network Analyzer
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
FWHM	: Full-Width at Half-Maximum
RFI	: Radio Frequency Interference
PSD	: Power Spectral Density
ADC	: Analog-Digital Conversion
FPGA	: Field Programmable Gate Array
LNA	: Low-Noise Amplifier
SBC	: Single-Board Computer
LVD	: Low Voltage Disconnect
FRP	: Plástico reforzado en fibra de vidrio
ABS	: Acrilonitrilo Butadieno Estireno
PLA	: Ácido Poliláctico
DIE	: Departamento de Ingeniería Eléctrica
ECM	: Error Cuadrático Medio

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

La evolución del universo, desde sus primeras etapas hasta el cosmos actual, abarca miles de millones de años y nos lleva desde los instantes iniciales del Big Bang hasta la formación de estrellas, galaxias y estructuras cósmicas a gran escala. El redshift o corrimiento al rojo, ocurre cuando la luz emitida por objetos astronómicos lejanos se desplaza hacia longitudes de ondas más largas, siendo útil para estudiar la expansión del universo y la distancia a la que se encuentran cuerpos celestes. Según la Teoría del Big Bang, la evolución del universo se divide en varias etapas, algunas de ellas son la época oscura, el amanecer cósmico y la época de reionización. La época de reionización marca la transición de un universo dominado por átomos neutros, especialmente hidrógeno neutro a uno ionizado.

La línea de 21 cm hace referencia a la línea espectral del hidrógeno neutro, por lo que es crucial para investigar y recopilar más información que ayude a obtener una descripción más precisa de la época de reionización y de la evolución del universo. Por este motivo, se ha impulsado la construcción y operación de radiotelescopios de baja frecuencia en distintas partes del mundo, con el objetivo de captar la señal de hidrógeno neutro. Sin embargo, detectar esta señal presenta una serie de desafíos, principalmente por la debilidad de la señal y por interferencias de radiofrecuencia. Al día de hoy, solo hay un instrumento que ha reportado haber detectado la señal, pero no ha podido ser confirmada.

Precisamente el radio telescopio MIST (Mapper of the IGM Spin Temperature) tiene la misión de detectar con alta precisión la señal mencionada en un rango de frecuencias que abarca desde los 25 MHz a los 105 MHz. Por un lado, hasta la fecha, ha realizado observaciones desde distintos sitios de América del Norte. Por otra parte, las condiciones geográficas y climáticas del norte de Chile, que incluyen cielos limpios a altitudes significativas y bajos niveles de radio interferencia, hacen del país un lugar idóneo para este tipo de observaciones. Por lo anterior, construir, simular y validar la antena de MIST permitirá realizar observaciones científicas de la señal de hidrógeno neutro desde el norte del país y así contribuir a una mejor comprensión del amanecer cósmico.

1.2. Trabajos Previos

En este apartado se presenta la revisión bibliográfica realizada, que está directamente relacionada con el objetivo de este trabajo. Se comienza con una exploración de trabajos previos en torno a la cosmología del universo y principalmente, a la señal global de 21 cm, con el fin de poder tener una visión más detallada de cómo ha evolucionado el universo y del por qué es tan relevante poder captar la señal de hidrógeno neutro. Además, se muestran otros instrumentos alrededor del mundo que han intentado (con y sin éxito) detectar la mencionada señal, para finalizar con informes correspondientes al radiotelescopio MIST en cuanto a su diseño y funcionamiento.

1.2.1 Cosmología, señal global de 21 centímetros y desplazamiento al rojo.

- ♣ A. Suárez, “Estudio de RFI en sitios del norte de Chile con MARI-UCSC para instalar un radiotelescopio de baja frecuencia”, Tesis de pregrado, Departamento de física, Universidad de Concepción, Concepción, 2016, [1].

En esta tesis, se comienza presentando las distintas teorías y épocas de la evolución del universo, lo que contribuye de forma significativa a tener una mejor comprensión de la cosmología. Sin embargo, principalmente se muestra el instrumento MARI-UCSC y las campañas realizadas en distintos sectores de la Región de Antofagasta. Este trabajo es sumamente relevante, puesto que es uno de los indicadores que determinó el sitio donde se planea instalar MIST.

- ♣ J. R. Pritchard and A. Loeb, “Constraining the unexplored period between the dark ages and reionization with observations of the global 21 cm signal”, *Physical Review D*, vol. 82, 023006, 2010, [2].

En este artículo se desarrolla un formalismo de la matriz de Fisher para calcular la sensibilidad de los instrumentos a la señal de 21 cm procedente de la reionización y época oscura. Se demuestra que las observaciones en el rango $\nu = 50 - 100 \text{ MHz}$ pueden limitar de buena forma la emisividad de $Ly\alpha$ y rayos x de las primeras estrellas.

- ♣ S. R. Furlanetto, S. Peng Oh and F. H. Briggs, “Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe”, *Phys. Rep.*, vol. 433, pp. 181-301, 2006, [3].

En este trabajo se presenta la relevancia de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro, revisando

la física de la transición de 21 cm y los procesos a altos redshift. Hace referencia a la formación de la red cósmica, las primeras fuentes luminosas y el mapeo de la reionización del medio intergaláctico como algunos de los conocimientos que se pueden adquirir con estas observaciones. Por otro lado, se discuten los retos experimentales que implica la detección de esta señal, a los cuales también nos veremos enfrentados en un futuro.

- ♣ C. Cain, A. D’Aloisio, N. Gangolly and G.D. Becker, “A Short Mean Free Path at $z = 6$ Favors Late and Rapid Reionization by Faint Galaxies”, *Astrophysical J. Lett.*, vol. 917, no. 2, p. L37, 2021, [4].

En este trabajo, se emplean simulaciones de transferencia radiativa para investigar las implicaciones en relación con la reionización. También, se presenta un modelo de sumideros de fotones ionizantes a subresolución, fundamentado en simulaciones de hidrodinámica radiativa de agrupamientos de IGM a pequeña escala. Por otro lado, se demuestra que la reionización fue predominantemente impulsada por las galaxias menos intensas entre sus fuentes. Uno de los resultados más significativos para este trabajo consiste en la restricción de la temperatura del IGM en $z \sim 5.5$.

- ♣ Y. Qin, A. Mesinger, S. E. I. Bosman and M. Viel, “Reionization and galaxy inference from the high-redshift $\text{Ly}\alpha$ ”, *MNRAS*, vol. 506, no. 2, pp. 2390-2407, 2021, [5].

En esta investigación se aborda la importancia de $\text{Ly}\alpha$ de alto redshift para el estudio, tanto de las etapas tardías de la época de reionización como para las fuentes que la impulsan. Mediante observaciones previas de galaxias y del CMB, se demuestra que las etapas en que más del 95% del volumen estaba ionizado, es decir, las etapas finales de superposición de la época de reionización deben ocurrir a $z < 5.6$ para reproducir las fluctuaciones de opacidad a gran escala observadas en los espectros.

- ♣ J. R. Pritchard and A. Loeb, “Evolution of the 21 cm signal throughout cosmic history”, *Physical Review D*, vol. 78, no. 10, 2008, [6].

En este documento, se realiza un intento por describir la evolución completa del desplazamiento al rojo de la señal de 21 cm en el rango de $0 < z < 300$. El análisis aborda las contribuciones a la señal de 21 cm derivadas de las fluctuaciones en la densidad del gas y la temperatura. Este enfoque proporciona una base valiosa para optimizar y perfeccionar el diseño de

futuros arreglos cuyo propósito es distinguir la física de partículas y la astrofísica. Esto puede lograrse mediante la investigación de la distorsión de velocidad del espectro de potencia de 21 cm o expandiendo el horizonte de 21 cm a $z \gtrsim 25$ o a $z \lesssim 6$.

- ♣ S. R. Furlanetto, “The global 21-centimeter background from high redshifts”, *MNRAS*, vol. 371, no. 2, pp. 867-878, 2006, [7].

En este artículo, se examina la evolución del fondo de 21 cm promediado en el cielo durante las fases iniciales de la formación de estructuras. Se calculan las historias térmicas y de ionización, asumiendo que los fotones estelares son predominantes en el fondo de radiación. Los resultados espectrales de 21 cm pueden restringir las características de las primeras generaciones de estrellas y cuásares. De este modo, el fondo de 21 cm atraviesa un periodo marcado de absorción, seguido por una emisión más tenue que se desvanece durante la reionización.

1.2.2 Otros instrumentos relacionados con la línea de hidrógeno neutro

- ♣ L. Philip et al, “Probing radio intensity at high- z from marion: 2017 instrument”, *Journal of Astronomical Instrumentation*, vol. 8, no 2, 1950004, 2019, [8].

En este artículo se introduce el Probing Radio Intensity at high- z from Marion (PRI²M) ubicado en Isla Marion en el subantártico, el cual es un experimento reciente diseñado para medir el brillo promedio global del cielo, incluyendo la absorción del hidrógeno neutro de 21 cm desplazado al rojo. PRI²M está compuesto de dos antenas de doble polarización que operan a frecuencias centrales de 70 y 100 MHz. Igualmente, se entregan detalles de su diseño y configuración, y datos preliminares que evidencian el limpio entorno de observación que ofrece la Isla Marion.

- ♣ J. Bowman, A. E. E. Rogers, R. A. Monsalve, T. J. Mozdzen and N. Mahesh, “An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum”, *Nature*, vol. 555, no.7694, pp. 67-70, 2018, [9].

Este trabajo describe la detección con el instrumento EDGES en Australia de un perfil de absorción en el espectro de radio promediado en el cielo, centrado en una frecuencia de 78 MHz y con una amplitud de 0.5 K. Uno de los resultados clave que se entregan en este artículo, es que la amplitud es al menos el doble de lo esperado para la señal de 21 cm inducida por las primeras estrellas. Esto crea dos posibilidades: o bien el gas era más frío, o la temperatura de radiación del fondo era más

alta de lo previsto.

- ♣ D. C. Price et al, “Design and characterization of the Large-aperture Experiment to Detect the Dark Age (LEDA) radiometer systems”, *MNRAS*, vol. 478, no. 3, pp. 4193-4213, 2018, [10].

En este trabajo se expone el diseño del sistema LEDA, el enfoque de calibración y los avances en la caracterización hasta enero de 2016. LEDA está situado en el Observatorio de Radio del Valle de Owens, California e incluye el correlador de la estación, así como cinco radiómetros de doble polarización y electrónica de respaldo. Estos radiómetros funcionan como parte de un interferómetro más grande, abarcando un rango de frecuencias de 30 a 85 MHz. El propósito de LEDA es verificar la característica de absorción informada por Bowman et al, que está centrada en 78 MHz.

- ♣ R. Subrahmanyam et al, “SARAS 3 CD/EoR radiometer: design and performance of the receiver”, *Experimental Astronomy*, vol. 51, pp. 193-234, 2021, [11].

En este trabajo se presenta el experimento SARAS que tiene como objetivo detectar la señal global de 21 cm desplazada al rojo que se espera durante el CD y EoR y sus principales desafíos. El diseño del radiómetro SARAS 3 incorpora características como la conmutación Dicke, la diferencia doble y el aislamiento óptico, con el fin de mejorar la calibración y reducir los errores sistemáticos. En conjunto a lo anterior, se exhiben las ecuaciones de medición y los resultados de las pruebas de laboratorio. Por último, en 2022, SARAS 3 reportó sus observaciones no encontrando la señal obtenida por EDGES.

1.2.3 Antenas y radiotelescopios

- ♣ A. Cardama, L. Jofre, J. M. Rius, J. Romeu and S. Blanch, M. Ferrado, *Antenas*. 2da ed. Barcelona: Edicions UPC, 2002, [12].

Este libro ofrece una amplia gama de contenidos sobre antenas, que abarcan desde conceptos básicos tales como; diagrama de radiación y polarización e incluye temas complementarios, como los métodos numéricos, que son usados en el cálculo de antenas. Siendo este libro completamente relevante en lo que respecta a las principales características de diseño y operación de la antena de MIST.

- ♣ T. L. Wilson, K. Rohlfs and S. Hüttemeister, *Tools of Radio Astronomy*. Germany: Springer, 2009, [13].

En 16 capítulos, este libro se encarga de brindar contenido detallado en materia de radio astronomía. En particular, los capítulos de interés y que resultan de utilidad para este trabajo son los que tratan sobre sistemas receptores, fundamentos de la teoría de antenas, fundamentos de las líneas espectrales y radiación lineal del hidrógeno neutro.

- ♣ 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, [14].

En este artículo, se detalla la relevancia de los parámetros-S en la creación de modelos de simulación que pueden prever con precisión el rendimiento de circuitos reales. Este enfoque, que no solo reduce el tiempo si no también costos, permite respaldar de manera sustancial el diseño de amplificadores de microondas mediante simulación. En particular, este artículo ayuda a una mejor comprensión acerca de los parámetros S y principalmente, del coeficiente de reflexión.

- ♣ J. Bará, *Ondas electromagnéticas en comunicaciones*. Barcelona: Edicions UPC, 1999, [15].

En este libro se encuentra valiosa información sobre las ondas electromagnéticas, donde se destaca el enfoque en comunicaciones. Este enfoque resulta realmente útil para poder comprender los fenómenos de reflexión y refracción de ondas, y como la permitividad relativa y la conductividad eléctrica del suelo influyen en la propagación de ondas.

1.2.4 Radiotelescopio MIST

- ♣ R. A. Monsalve et al, “Mapper of the IGM Spin Temperature (MIST): Instrument Overview”, 2023, doi:10.48550/arXiv.2309.02996. [16].

Esta publicación describe el diseño y la caracterización de MIST, lo que incluye la etapa de los instrumentos, la electrónica y calibración del receptor, rendimiento de la antena, el consumo y las baterías necesarias. Se menciona el rango de frecuencias que observa y a que redshift corresponde. Además, se reportan mediciones celestes de observaciones realizadas en California, Nevada y el Ártico Canadiense, junto a mediciones de laboratorio y simulaciones electromagnéticas que fueron necesarias para la caracterización de los instrumentos.

- ♣ R. Monsalve, “Mini-MIST Blade Antenna Frame Dimensions” Memo 58, 2021, [17].

En este trabajo se presentan las dimensiones y el diseño del frame de la antena de MIST utilizadas durante pruebas en Uapishka en agosto del 2021. Donde se entregan detalles sobre los tipos de materiales utilizados; aluminio, fibra de vidrio, nylon y plástico ABS, y sus correspondientes medidas. Todo esto, desde una vista lateral, frontal y superior.

- ♣ R. Monsalve, “Blade Dipole Antenna Above Soil Optimized at 50 MHz” Memo 33, 2020, [18].

En este memo se exponen los progresos logrados en la optimización del diseño de la antena dipolo, con el objetivo de mejorar su desempeño en frecuencias más bajas. Se presentan los resultados de S_{11} y los cortes de la ganancia tras simulaciones electromagnéticas con FEKO.

- ♣ G. Figueroa, “Caracterización hidrogeológica de Talcahuano entre los 26°44’S y 73°08’W, Región del Biobío, Chile”, Tesis de pregrado, Departamento de ciencias de la tierra, Universidad de Concepción, Concepción, 2020, [19].

Si bien el objetivo de este trabajo es caracterizar hidrogeológicamente un sitio delimitado que abarca parte de las comunas de Talcahuano, Hualpén y Concepción, como base para aquello, se interpretan y presentan 22 sondeos eléctricos verticales. Hay dos que son de interés para esta tesis, puesto que se realizaron en lugares cercanos a las mediciones de coeficiente de reflexión efectuadas.

1.2.5 Discusión

La literatura muestra que la línea redshift de 21 cm de hidrógeno neutro ofrecerá una visión única sobre las primeras fases de formación del universo, específicamente la época de reionización y el amanecer cósmico, la que ha sido compleja de obtener [1], [3]. Además, brinda las principales características de la señal, como un rango de frecuencia óptimo entre los 50-100 MHz [2] y un corrimiento al rojo mayor a 6 [4], [5], [6], [7].

Por otro lado, el estado del arte en lo que respecta a antenas [12] y a radioastronomía [13], permite tener claridad sobre el funcionamiento de la antena y el radiotelescopio, pudiendo conocer sus principales propiedades, la relevancia de las ondas electromagnéticas y que se debería obtener como resultado. [15].

Si bien MIST [16] tiene similitudes con otros radiómetros como PRIZM [8], EDGES [9],

LEDA [10] y SARAS [11], también tiene diferencias. Una de ellas es su capacidad de traslado, lo que permite que MIST fácilmente observe desde lugares remotos de la tierra [17]. Otra diferencia tiene relación con su funcionamiento, puesto que la antena de MIST está sobre el suelo sin un plano de tierra metálico. Finalmente, de los 4 instrumentos mencionados, solo EDGES ha detectado la señal, la que no ha podido ser confirmada por sus pares.

1.3. Hipótesis de Trabajo

- Al realizar mediciones del coeficiente de reflexión de la antena de MIST construida en el Laboratorio y comparar los valores de conductividad eléctrica y permitividad relativa del suelo con simulaciones en el software FEKO es posible validar el comportamiento de la antena en suelos donde los valores exactos de sus parámetros eléctricos no son conocidos.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Validar antena construida en Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas (LAIM) para radiotelescopio MIST.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Construir la antena y verificar sus principales características.
- Medir el coeficiente de reflexión de la antena con VNA en distintos tipos de suelo.
- Simular la antena de MIST en el software FEKO.
- Comparar las mediciones del coeficiente de reflexión adquiridas en terreno y obtener valores de conductividad eléctrica y permitividad relativa del suelo con simulaciones realizadas en FEKO.

1.5. Alcances y Limitaciones

El principal alcance de este trabajo se basa en tener la antena del radiotelescopio MIST de forma operativa en Chile, de tal manera, que a futuro se pueda agregar el receptor y los equipos electrónicos que conforman MIST y así, realizar observaciones desde el país.

Para lograr lo anterior, se utilizaron los software Matlab y FEKO para graficar, comparar y simular el coeficiente de reflexión de la antena.

Una de las limitaciones en el desarrollo de esta tesis, 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. Este trabajo no contempla obtener la conductividad ni la permitividad puesto que la creación de un instrumento capaz de medir estos parámetros, está siendo desarrollado en el proyecto de título de otro estudiante. Sin embargo, con simulaciones se podrán obtener valores lo más aproximados posibles.

Por último, dado el tiempo y cronograma establecido, en este informe no se incluirán mediciones con el radiotelescopio en terreno, tales como observaciones científicas desde el norte de Chile, la Antártica u otros sitios.

1.6. Temario y Metodología

La metodología utilizada comienza con una revisión bibliográfica. Posteriormente, se construyó la antena de MIST en el LAIM para luego realizar mediciones del coeficiente de reflexión en distintos sitios, simular la antena en el software FEKO y comparar las mediciones versus simulaciones a través de Matlab.

El informe se estructura en seis capítulos que abarcan diferentes aspectos del estudio. El segundo capítulo se dedica a presentar el marco teórico necesario para comprender el contexto del tema. El tercer capítulo, se centra en el radio telescopio MIST, su relevancia y principales características. El cuarto capítulo detalla el proceso completo de construcción de la antena de MIST, desde la compra de los materiales hasta el montaje final. El quinto capítulo presenta las mediciones del coeficiente de reflexión de la antena, tanto las que se realizaron dentro del Campus San Andrés de la UCSC, como las de distintas comunas de la provincia de Concepción. El sexto capítulo muestra la simulación de la antena en el software FEKO y los ajustes de los parámetros eléctricos del suelo que se implementaron. El séptimo y último capítulo, presenta el sumario, conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Introducción

Este capítulo busca proporcionar un marco teórico que contextualice el trabajo realizado y resalte su relevancia. A través de una revisión de la literatura científica y de teorías fundamentales como la Teoría del Big Bang, se abordarán los conceptos necesarios para comprender la evolución del universo y su relación con la línea espectral de 21 cm del hidrógeno neutro. Se mencionarán otros experimentos que buscan detectar la señal de hidrógeno neutro. Además, se examinará parte de la teoría de antenas, junto con sus parámetros principales, así como los que se medirán posteriormente y el instrumento que se utilizará para este propósito.

2.2. Cosmología

La cosmología es una rama interdisciplinaria que combina la física, la astronomía y la matemática, que se ocupa del estudio y comprensión del universo en su conjunto, incluyendo su origen, evolución, estructura y contenido.

2.2.1 Teoría del Big Bang

La Teoría del Big Bang es un modelo cosmológico ampliamente aceptado que propone que el origen del universo fue una gran explosión hace aproximadamente 13.7 mil millones de años. De acuerdo con esta teoría, al inicio, toda la materia, energía y espacio estaban concentrados en un punto extremadamente caliente y denso. Desde ese punto de partida, el universo experimentó una expansión acelerada enfriándose, dando lugar a la formación de partículas subatómicas, átomos, estrellas, galaxias y estructuras cósmicas a lo largo del tiempo.

Dentro de la evidencia que respalda la teoría está el descubrimiento de la radiación de fondo cósmico de microondas que antes de ser descubierta había sido predicha por la teoría.

Como se muestra en la figura 2.1, la evolución del universo se estructura según el paso del tiempo en épocas. Dentro de estas épocas, se encuentran la época oscura, el amanecer cósmico y la época de la reionización [1].

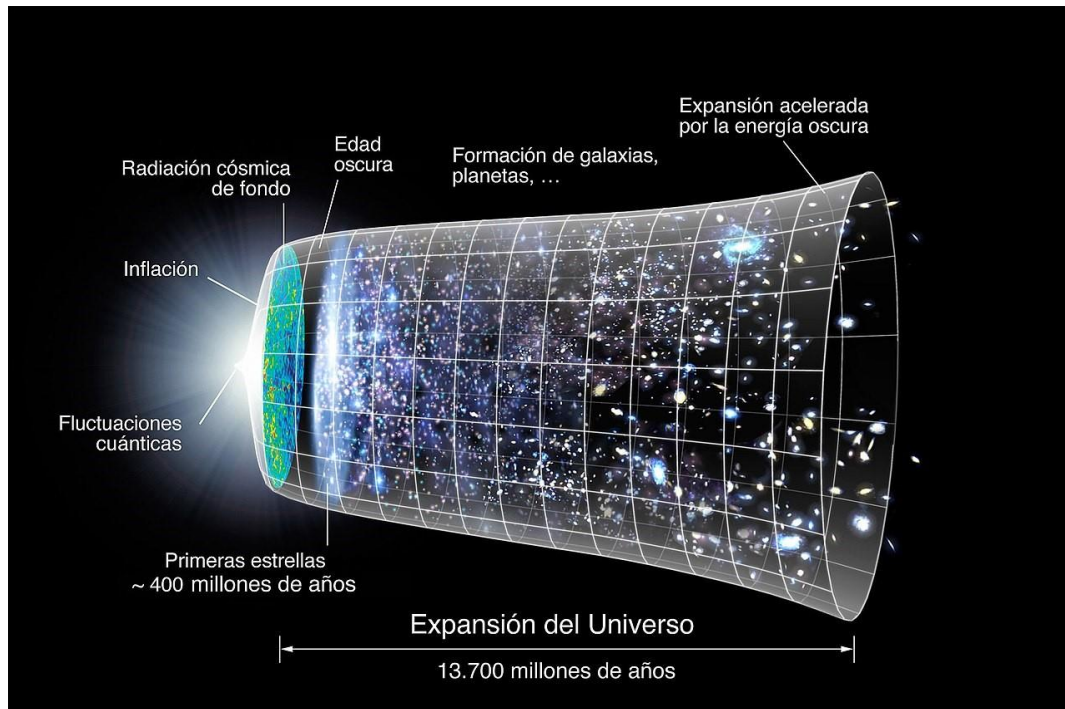


Fig. 2.1 Evolución del universo

Fuente: [1]

2.2.2 Época Oscura del Universo, Amanecer Cósmico y Reionización

A medida que el universo se expandía y enfriaba, los electrones comenzaron a combinarse para formar átomos neutros de hidrógeno y helio, esta etapa lleva el nombre de recombinación en la que disminuyó la densidad del universo.

La época oscura del universo ocurre entre la recombinación y la formación de las primeras estrellas y galaxias. Durante este lapso, predominaba el hidrógeno neutro en el cosmos junto con ligeras variaciones en la densidad de la materia que resultaban insuficientes para formar estructuras cósmicas de mayor envergadura.

En el amanecer cósmico, esas pequeñas fluctuaciones eventualmente empezaron a densificarse gracias a la fuerza gravitacional. Con el paso del tiempo, se convirtieron en los cimientos para la creación de estructuras de mayor escala. Este periodo es crucial en la evolución del universo, ya que es donde las estrellas, los cúasares y otras fuentes de radiación comenzaron a formarse y a emitir una cantidad considerable de luz ultravioleta.

Durante la reionización, la radiación ionizante interactuó con el hidrógeno neutro presente en el espacio intergaláctico, liberando electrones y generando átomos ionizados.

El proceso de reionización fue gradual y demandó un tiempo significativo. A medida que más regiones del espacio se ionizaban, la luz pudo viajar a través de ellas, lo cual propició una mayor transparencia en el universo [1].

2.3. Redshift

El corrimiento al rojo es un fenómeno que se puede observar en la luz emitida por objetos distantes en el universo. Hace referencia al desplazamiento hacia longitudes de onda superiores (frecuencias inferiores) que experimenta la luz emitida por esos objetos. Este fenómeno de desplazamiento es un resultado del efecto Doppler y está estrechamente ligado a la expansión del universo, lo que lo convierte en un elemento esencial para el desarrollo y comprensión de la teoría del Big Bang y la cosmología.

Cuando un objeto se aleja de nosotros (como en el caso de la expansión del universo), la longitud de onda de la luz se desplaza hacia el extremo rojo del espectro. Mientras mayor sea la velocidad de alejamiento, mayor será el desplazamiento al rojo observado y, en consecuencia, la frecuencia será menor. El redshift se representa con la letra z y sus valores son positivos cuando es corrimiento al rojo [1].

2.4. Línea espectral de 21 cm

2.4.1 Transición hiperfina

El spin es una propiedad inherente que poseen las partículas subatómicas, que puede tener dos posibles orientaciones. En un átomo de hidrógeno, se tiene un estado de mayor energía cuando el protón y el electrón tienen el mismo sentido de giro. Si el electrón cambia su orientación de spin, se emite un fotón de longitud de onda de 21 cm. Aunque la probabilidad de emisión espontánea es baja, puesto que un átomo de hidrógeno se mantiene por 11 millones de años en promedio en estado superior, esto se compensa con la abundancia de átomos de hidrógeno neutro en el espacio [1][2].

2.4.2 Línea de 21 cm de hidrógeno neutro.

La línea de 21 cm del hidrógeno neutro es una transición que ocurre a una frecuencia de 1420 MHz. Esta línea es de suma importancia en la astronomía y la cosmología, debido a su utilidad para estudiar diversos aspectos del universo.

No solo ha sido reconocida como una estrategia prometedora para mapear la estructura cósmica y estudiar la formación estelar, sino que también como la única forma de observar la época oscura y el proceso de formación de las primeras estrellas en $z \geq 20$ [2] [3].

No obstante, la tarea de medir esta señal se vuelve complicada debido a la existencia de interferencias de radiofrecuencia terrestre y a la presencia de contaminantes astrofísicos que son mucho más brillantes en temperatura.

Por un lado, las mediciones del hidrógeno neutro se deben realizar a una frecuencia $\nu < 220 \text{ MHz}$ puesto que la época de reionización se estima en $z \sim 5.5$ [4] [5].

Por otro lado, se esperan dos características de absorción que se asemejan a una distribución gaussiana en el espectro de temperatura de brillo, tanto en la época oscura [3] [6], como en el amanecer cósmico [2] [7].

Tabla 2.1 Características de absorción esperadas de hidrógeno neutro

Época	Frecuencia	Redshift	Amplitud
Edad oscura	17 MHz	80	40 mK
Amanecer Cósmico	50 - 110 MHz	27-12	250 mK

2.4.3 Otros experimentos

Como se ha evidenciado en este documento, el interés global por captar la señal de hidrógeno neutro ha llevado a la realización de diversos experimentos enfocados en este objetivo.

PRI²M se encuentra en la Isla Marion y consta de dos antenas de doble polarización que operan a frecuencias de 70 y 100 MHz, con el propósito de medir la absorción del hidrógeno neutro de 21 cm desplazado al rojo. La Isla Marion está situada a aproximadamente 2000 km del continente africano, lo que proporciona un entorno limpio y libre de RFI [8].

EDGES está conformado por un receptor de radio y una antena dipolo de polarización única que apunta al cenit. Hasta la fecha, EDGES es el único experimento que ha afirmado haber detectado la característica de absorción del amanecer cósmico. La señal reportada que se observa en la figura 2.2 posee una forma gaussiana aplanada, centrada en $78 \pm 1 \text{ MHz}$ con un ancho en frecuencia de 19^{+4}_{-2} MHz y con una amplitud de $0.5^{+0.5}_{-0.2} \text{ K}$ [9].

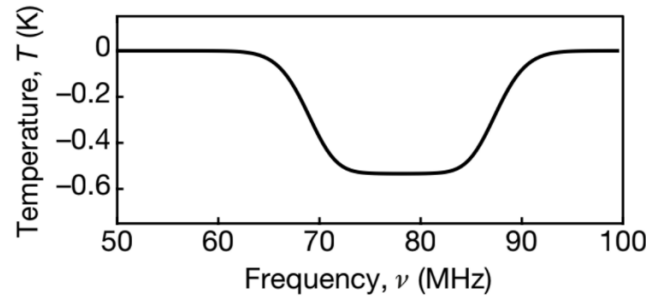


Fig. 2.2 Perfil de absorción de la señal de 21 cm obtenida por EDGES

Fuente: [9]

LEDA está compuesto por cinco radiómetros de doble polarización y busca corroborar la señal reportada por EDGES. Para eso, han adquirido filtros rechaza banda con una caída más pronunciada que permiten el acceso a frecuencias de hasta 87.5 MHz, mientras atenúan de manera significativa la banda FM. La eficacia de este filtro rechaza banda se hace significativa por encima de los 83 MHz. No obstante, aún se están implementando mejoras con el objetivo de ampliar el límite de la ventana de observación [10].

Recientemente, el experimento SARAS 3 informó que en mediciones realizadas con una antena monopolo vertical flotante en un lago, no detectó la señal de EDGES. Esto crea una mayor necesidad de investigar el origen de la señal de EDGES (independientemente si proviene del cosmos), por ende, será necesario realizar mediciones con diferentes experimentos para detectar y confirmar la señal global de 21 cm proveniente del amanecer cósmico [11].

2.5. Antenas

Teniendo como base la definición realizada por la IEEE, una antena es aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Las antenas son esenciales para facilitar la comunicación inalámbrica en distintos campos, ya sea en el ámbito de las telecomunicaciones, navegación por satélite, transmisión de datos, etc. Dependiendo de si es una antena transmisora o receptora, permitirá la transición de ondas electromagnéticas desde el transmisor hacia el espacio libre o viceversa hacia un receptor, respectivamente.

Una antena isotrópica es una antena ideal que radia la misma intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio y que no tiene pérdidas por disipación de calor. Sin embargo, en la práctica,

no existe este tipo de antena. No obstante, es realmente útil al funcionar como referencia para evaluar algunos parámetros, como la directividad.

Las características constructivas de las antenas y sus respectivos parámetros son los que especificarán su funcionamiento, indicando, por ejemplo, cuán directivas son o a qué frecuencia operan de forma óptima [12].

2.5.1 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 radiaría a esa misma distancia, emitiendo la misma potencia que la antena en cuestión.

2.5.2 Ganancia

Se define de forma similar a la directividad, pero en este caso, la comparación se realiza con la potencia entregada a la antena. Así, la ganancia es la razón entre la potencia que hay que alimentar una antena isotrópica y la potencia de alimentación de la antena para producir el mismo campo de radiación, a la misma distancia, en la dirección de máxima radiación. Esto permite que se consideren las posibles pérdidas en la antena puesto que no toda la potencia entregada es radiada. Ahora bien, si la antena no posee pérdidas, ambos parámetros son equivalentes.

En consecuencia, la directividad y ganancia están relacionadas por la eficiencia de la antena [12].

$$\eta = \frac{G}{D} \quad (2.1)$$

2.5.3 Ancho de banda

Debido a las características geométricas y de construcción, las antenas tienen algunas limitaciones. Una de ellas, es la de operar en un determinado margen de frecuencias. De forma simple, el ancho de banda es el rango de frecuencias en las que la antena opera de forma óptima y sus parámetros satisfacen determinadas especificaciones [12].

2.5.4 Diagrama de radiación

Sabemos que una antena no radia de manera uniforme en todas las direcciones. Este diagrama representa de manera gráfica la capacidad de una antena de irradiar en las distintas direcciones del

espacio. Dependiendo del interés, utilidad y propósito que se desee, el diagrama se puede presentar en tres dimensiones o en cortes bidimensionales, ya sea en coordenadas cartesianas o polares. A continuación, se muestra un ejemplo de un diagrama de radiación en sus tres formas de visualización.

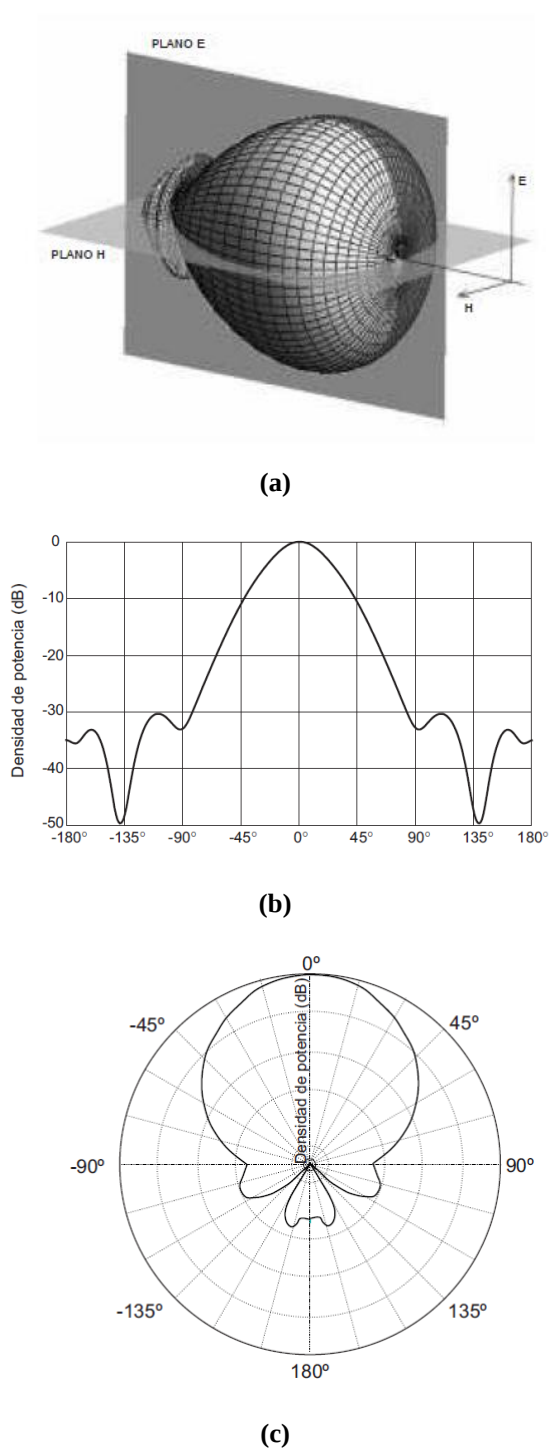


Fig. 2.3 Ejemplo diagrama de radiación

(a) Tridimensional (b) Cartesiano (c) Polar

Fuente: [12]

2.6. Antenas dipolo

En su forma más básica, una antena dipolo está conformado por dos conductores alineados, de igual longitud y alimentados en el centro. Aunque puede tener múltiples usos, se utiliza principalmente para la transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia. Esto se debe a sus principales características, como su patrón de radiación omnidireccional, su diseño sencillo que no resulta costoso de construir, y su tendencia a tener niveles bajos de ruido. Esto último, provoca que las señales recibidas presenten menos interferencias en comparación con otras antenas [12] [13].

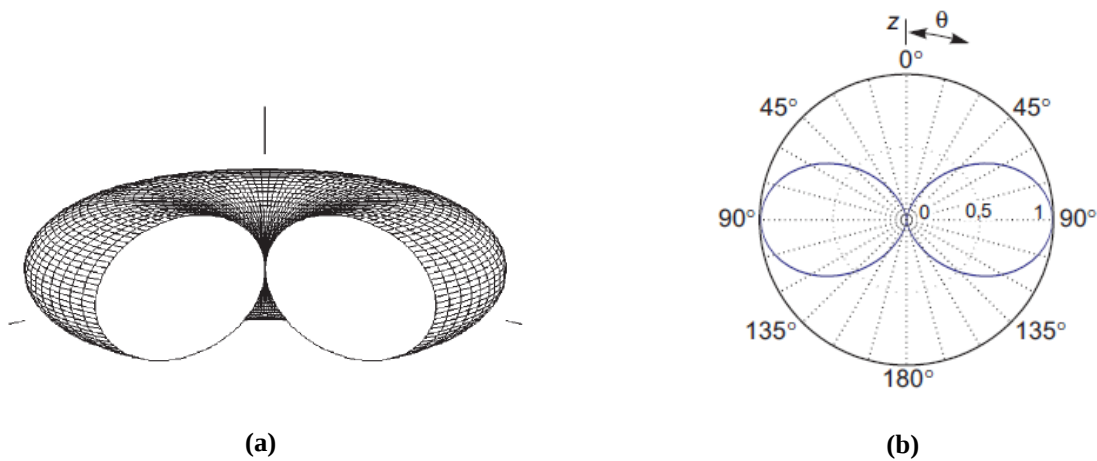


Fig. 2.4 Diagrama de radiación de dipolo elemental

(a) Tridimensional (b) Polar

Fuente: [12]

Como se indicó previamente y se observa en la fig. 2.4, al ser omnidireccional en un plano, la antena dipolo puede recibir señales de forma uniforme en todas direcciones, proporcionando una cobertura de 360°.

2.7. Parámetros S

Los parámetros de dispersión o Scattering, también conocidos como coeficientes de reflexión y transmisión, representan la relación entre la onda incidente y la onda reflejada. Estos parámetros caracterizan el comportamiento de un dispositivo cuando funciona linealmente dentro de un intervalo específico de frecuencia, lo que los convierte en herramientas valiosas para evaluar el rendimiento de una antena.

De manera similar a muchos circuitos electrónicos y como se observa en la figura 2.5, las antenas pueden ser representadas como una red de dos puertos debido a su interacción con el entorno y al sistema/receptor al que están conectadas. En el contexto de una antena, el puerto 1 o puerto de entrada, se asocia con la señal que llega a la antena, mientras que el puerto 2 o puerto de salida, se encuentra vinculado con la señal que se transmite hacia el receptor [1] [14].

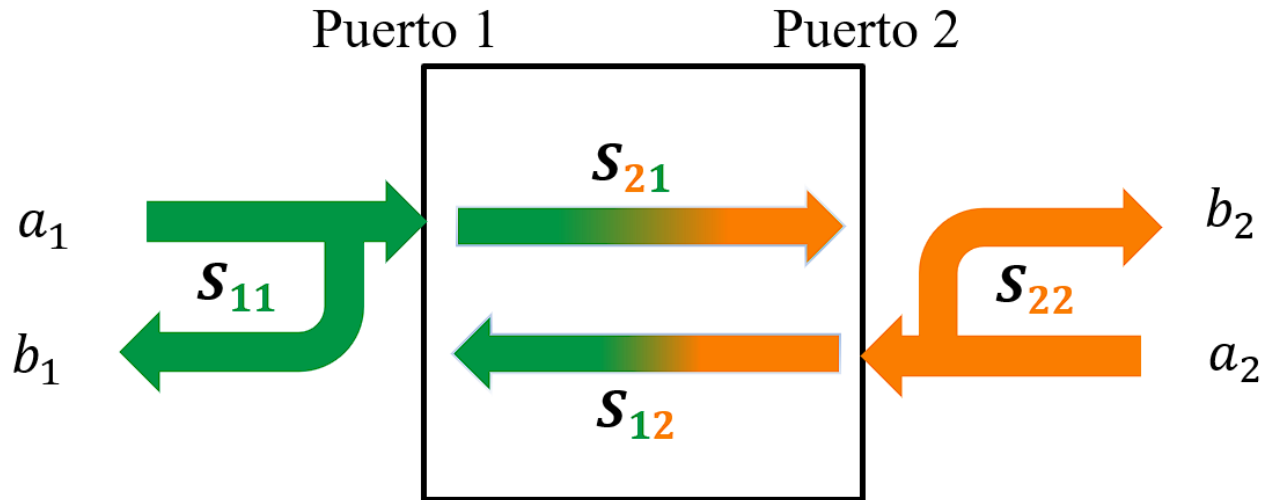


Fig. 2.5 Descripción gráfica de los Parámetros-S en una red de dos puertos

Las ondas a son ondas incidentes y las ondas b son ondas reflejadas y transmitidas, y los subíndices indican el puerto en el que actúan [14].

Cada parámetro se caracteriza en magnitud (decibeles) y fase, y la descripción de cada uno de ellos es la siguiente:

S_{11} : Coeficiente de reflexión de entrada

S_{12} : Coeficiente de transferencia inversa

S_{21} : Coeficiente de transferencia directa

S_{22} : Coeficiente de reflexión de salida.

Así, los parámetros S_{11} y S_{22} representan la cantidad de energía reflejada en los puertos y los parámetros S_{12} y S_{21} afectan la energía transferida entre puertos [14].

Es posible determinar el S_{11} con un instrumento de medición conectado a la antena, el que se presenta en el siguiente apartado.

2.7.1 Vector Network Analyzer

Las mediciones de los parámetros S se realizan con un analizador de redes vectoriales o también conocido por sus siglas en inglés como VNA. Este instrumento es ampliamente utilizado en radiofrecuencia y microondas para caracterizar, diseñar, y analizar amplificadores de alta potencia y filtros para este tipo de señales [1].

En el caso particular de este trabajo, las pruebas se harán con el nanoVNA que se muestra a continuación.



Fig. 2.6 NanoVNA

Si bien en el LAIM se tiene acceso a un VNA, se optó por elegir el nanoVNA para las mediciones debido a su tamaño, peso y facilidad de manejo. Esta elección se realiza teniendo en cuenta que a futuro las mediciones se desarrollaran en lugares con condiciones climáticas adversas.

Después de establecer el rango de frecuencias deseado, es necesario efectuar un proceso de calibración utilizando componentes llamados open, short y load, que corresponden a una red abierta, red en corto circuito y red en carga, respectivamente.

2.8. Parámetros eléctricos del suelo

Para el caso de antenas, los parámetros eléctricos del suelo que son más relevantes y que influyen de forma significativa en el desempeño de las antenas son la permitividad relativa, conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Sin embargo, para efectos de este trabajo, solo nos concentraremos en los primeros dos parámetros puesto que son los que influyen en el coeficiente de reflexión.

2.8.1 Permitividad relativa

También conocida como constante dieléctrica, es una propiedad que describe la capacidad de un material para polarizarse en respuesta a un campo eléctrico. En cuanto a antenas, la permitividad relativa del suelo afecta la eficiencia de la radiación y la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Mientras mayor sea la permitividad relativa, menor será la velocidad de propagación. Se representa con ϵ_r y dentro de los valores que se pueden tener como referencia, esta la permitividad del aire $\epsilon_r = 1$ y la del agua $\epsilon_r = 80$.

2.8.2 Conductividad eléctrica

Es una propiedad que indica la capacidad de los materiales de conducir corriente eléctrica. En lo que respecta al suelo, la conductividad eléctrica se ve influenciada por la cantidad de sales disueltas en el suelo. En temas de antenas y específicamente en radiofrecuencia, esta propiedad interviene en la atenuación de las ondas electromagnéticas. A medida que un suelo tenga mayor conductividad, menos energía absorbe, lo que puede incidir en reducir las pérdidas de la señal y mejorar la eficiencia de la antena. La conductividad eléctrica se representa con la letra σ y su unidad de medida es $\frac{S}{m}$ [15].

En consecuencia, la interacción de la permitividad relativa y la conductividad eléctrica en el suelo son factores clave, que afectan la propagación de ondas electromagnéticas, y, por lo tanto, influyen en el coeficiente de reflexión de una antena.

Capítulo 3. Radiotelescopio MIST

3.1. Introducción

MIST es un radiómetro de potencia total que consta de una antena individual. Observa en el rango de 25 a 105 MHz, lo que para la señal de 21 cm equivale a redshifts $55.5 > z > 12.5$. Se ha limitado a 25 MHz por la presencia significativa de RFI de onda corta y porque la respuesta del amplificador no es la adecuada en esas frecuencias. El FWHM del haz de la antena en su rango de observación es de aproximadamente de 85° y el consumo máximo de energía de MIST es de 17 W, siendo alimentado por cuatro baterías de 12 V y 18 Ah. En el año 2022, se realizaron las primeras observaciones en California, Nevada y el Ártico Canadiense [16].

Como se ha mencionado a través de este documento, el rango mencionado abarca la época oscura y el amanecer cósmico.



Fig. 3.1 MIST durante observaciones científicas realizadas el 2022 en Nevada, CA.

Fuente: [16]

3.2. Diseño

El diseño que se observa en la fig. 3.1, claramente está enfocado en lograr el rendimiento necesario para la detección de la señal de hidrógeno neutro, pero a la vez, para que sea portátil y así poder trasladarlo fácilmente a lugares remotos libres de RFI.

El diseño está basado en una antena dipolo tipo blade horizontal de 2.42 m, fabricada con paneles sólidos de aluminio operando a 50 cm sobre el suelo. La mayoría de los componentes electrónicos del instrumento están contenidos en una caja receptora de aluminio, exceptuando por un balun. La antena y la caja son soportadas por un marco hecho de tubos y ángulos de fibra de vidrio, codos de ABS y varillas, tornillos y tuercas de plástico [16].

Así, el diseño se basa en los siguientes puntos:

1. La antena de dipolo horizontal presenta un peak en la ganancia en el cenit y disminuye gradualmente hacia el horizonte.
2. Al no utilizar un plano de tierra de metal, se disminuye la posibilidad de resonancias y se elimina la presencia de reflexiones causadas por la diferencia eléctrica entre el plano de tierra y el suelo.
3. Al consumir poca potencia y ser portátil, se puede observar con el radiotelescopio desde los lugares más remotos de la tierra.
4. Dado que todos los componentes están en la caja receptora, se evita que los cables produzcan pérdidas en el rendimiento de la antena y se reduce al mínimo la potencial emisión de RFI generado internamente.

3.2.1 Antena

Como se ha mencionado previamente, la elección de la antena dipolo tipo blade horizontal se basó en su geometría simple y en el hecho de que su patrón de radiación apunta hacia el cenit. Si bien, esta antena fue inicialmente utilizada para mediciones globales de 21 cm por EDGES, es importante destacar que las dimensiones de la antena del instrumento MIST son completamente distintas, además recalcar que a diferencia de EDGES, MIST no tiene un plano de tierra.

En la figura 3.2, se muestra un esquema de la antena y sus dimensiones en cm [17].

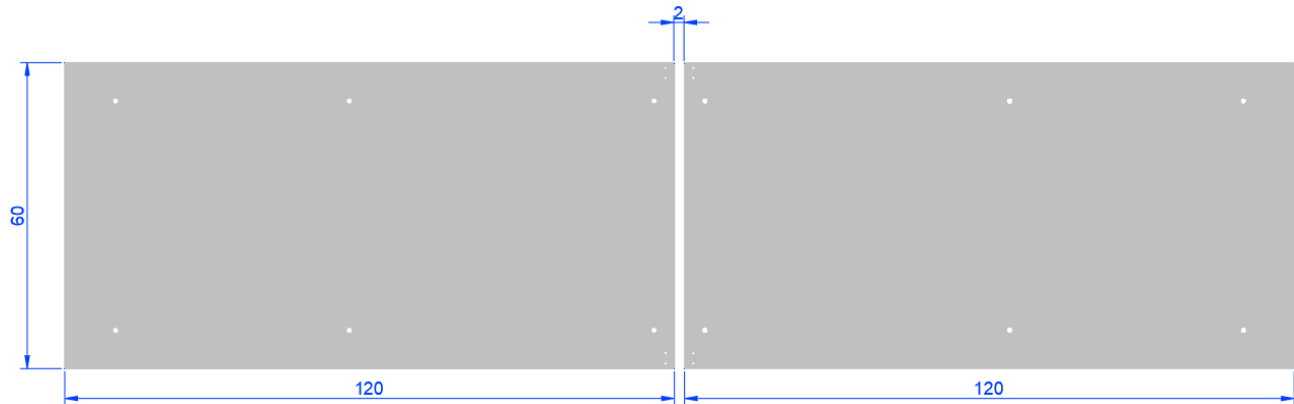


Fig. 3.2 Vista superior de antena MIST

3.2.2 Receptor

En términos sencillos, un receptor tiene la tarea de captar y medir la emisión en radio de fuentes celestes. Usualmente, se divide en dos partes: el front-end y back-end. En lo que respecta al front-end, es la parte que está ubicada más cerca de la antena y se encarga de las primeras tareas de preprocesamiento, como amplificar la señal. En cuanto al back-end, recibe las señales provenientes del front-end y realiza un procesamiento más sofisticado, que puede incluir operaciones como filtrado y corrección de errores.

En la figura 3.3 se muestra el diagrama de bloques del receptor del radiotelescopio MIST.

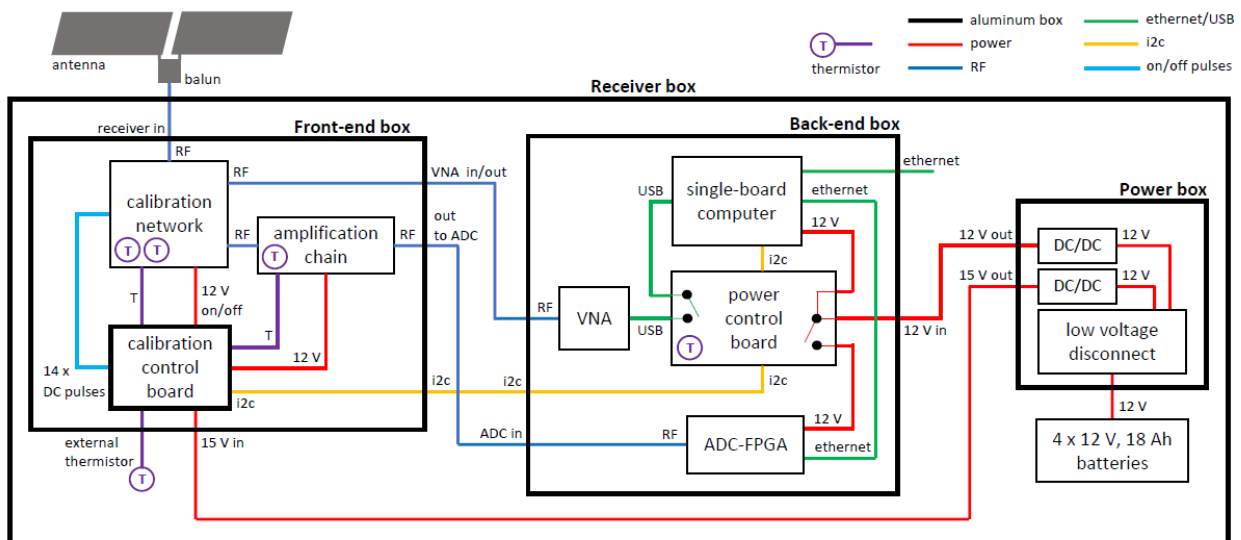


Fig. 3.3 Diagrama de bloque del receptor de MIST

Fuente: [15]

Como se puede observar, el sistema electrónico está dividido en tres compartimientos, el front-end, el back-end, y el último destinado a la alimentación.

En el front-end, la primera etapa “Calibration Network” contiene los estándares de calibración correspondientes para llevar a cabo la calibración del receptor. Sus dos salidas se utilizan para permitir la medición de las densidades espectrales de potencia y los coeficientes de reflexión requeridos. La señal de salida de PSD experimenta una amplificación antes de pasar al back-end, a diferencia de la salida de reflexión que va de forma directa. Adicionalmente, hay una placa de control de calibración que suministra las señales de control requeridas para la red de calibración.

En el back-end, la señal procedente de la salida de PSD (Power Spectral Density) se digitaliza a través de un ADC y se transforma al dominio de frecuencias mediante un FPGA, ambas labores se realizan en una misma placa. La señal de la salida de reflexión se mide en un VNA. Tanto la placa de VNA como la de ADC-FPGA son controladas independientemente por el “power control board”. Una SBC (Single-Board Computer) coordina las mediciones de PSD y del coeficiente de reflexión, así como almacena los datos. Además, se utiliza un cable ethernet para comunicarse con la SBC desde fuera del back-end

En lo que respecta a la “Power Box”, durante las observaciones se emplean cuatro baterías de tamaño pequeño de 12V y 18 Ah. Además de las baterías, dentro de esta caja se encuentran dos convertidores DC/DC encargados de estabilizar el voltaje de las baterías a 15V y 12V. También, incluye un LVD (Low Voltage Disconnect) para evitar la descarga de las baterías por debajo de niveles seguros. Esta configuración ayuda a que el instrumento sea fácilmente transportable y evita la necesidad de cables largos que podrían tener un impacto negativo en el rendimiento [16].

Capítulo 4. Construcción de Antena

4.1. Introducción

En el presente capítulo se detalla el proceso que se llevó a cabo para la construcción, los materiales que fueron adquiridos, las empresas con las que se trabajó y los costos de estos. A excepción del aluminio, el principal requisito es que sean dieléctricos para que no interfieran con la antena propiamente tal.

La antena de MIST consiste en un dipolo de aluminio sólido de 1.20 m de longitud por 0.6 m de ancho cada uno, separados a 2 cm y posicionado a una altura de 50 cm sobre el suelo. La antena es sostenida por una estructura compuesta de perfiles cuadrados “tipo cajón” de fibra de vidrio, codos, pernos y tuercas de plástico. A continuación, se presenta una vista 3D de la antena a construir [16] [17].

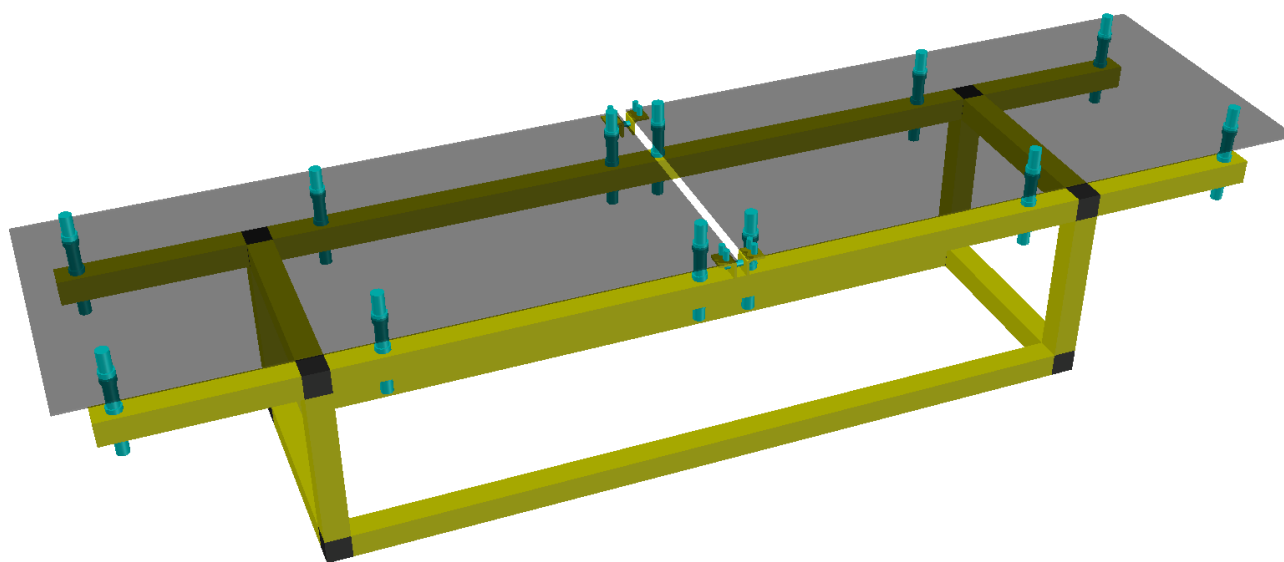


Fig. 4.1 Diseño 3D de antena de MIST

4.2. Pernos, tuercas y espirales

Estos elementos fueron encargados a la empresa MALVAR SPA. Si bien en un principio, se pretendía que todos fueran de nylon, esto no fue posible, debido al stock disponible, debiendo trabajar con polipropileno, acetal y nylon (todos dieléctricos). En cuanto a las medidas, se necesitaban pernos y tuercas M12 y M6. Al no contar con pernos M12 del largo requerido, se optó por adquirir espirales M12 de 1 metro y posteriormente cortarlos.

El detalle de la cantidad, tipo de material y costo correspondiente, se presenta en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Materiales adquiridos en MALVAR

	Medida	Material	Cantidad	Costo
Perno	M6	Polipropileno	25	\$ 8.750
Perno	M12	Polipropileno	30	\$ 33.000
Tuerca	M6	Acetal	50	\$ 10.000
Tuerca	M12	Polipropileno	100	\$ 30.900
Espiral	M6	Nylon	1	\$ 14.740
Espiral	M12	Nylon	8	\$ 139.040

En las siguientes figuras se pueden apreciar los materiales mencionados

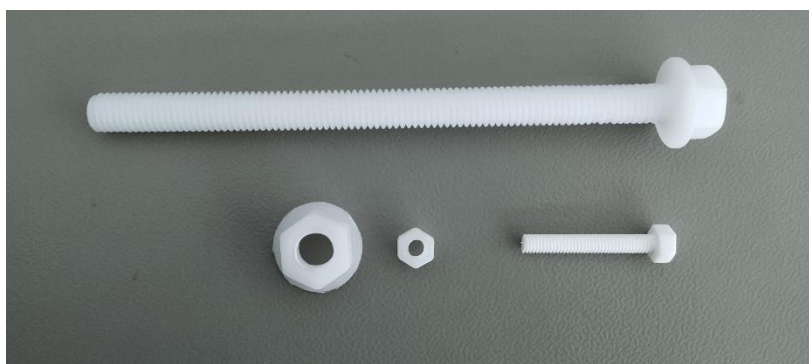


Fig. 4.2 Pernos y tuercas plásticas



Fig. 4.3 Espirales de nylon

Los espirales de la fig. 4.3 posteriormente fueron cortados a 20 cm usando un Dremel en el LAIM.

4.3. Perfiles de fibra de vidrio

Estos perfiles son fundamentales debido a que son la estructura y el soporte de la antena, por tanto, no solo importaba que fueran dieléctricos, sino que, en lo posible, tuvieran propiedades pertinentes al uso que se les dará como un peso relativamente ligero y capaces de soportar condiciones climáticas adversas. La mejor opción que se encontró en el mercado fueron los perfiles tipo cajón y tipo L de FRP, fabricados por Femoglas. Además de ser dieléctricos, cuentan con alta durabilidad y un peso específico 70% más liviano que el acero, punto que es destacable considerando la necesidad de armar, desarmar y trasladar la antena a distintos puntos. En la tabla 4.2 se muestra el detalle de los perfiles que se compraron.

Tabla 4.2 Materiales adquiridos en FEMOGLAS

Perfil	Medidas	Material	Cantidad	Costo
Tipo Cajón	50x50x5 mm	FRP	5	\$ 429.810
Tipo L	35x35x5 mm	FRP	1	\$ 34.494



Fig. 4.4 Perfiles FRP

Previo coordinación con el académico Edwin Behrens del Departamento de Ingeniería Civil, los perfiles fueron trasladados al edificio San José Obrero haciendo uso del camión eléctrico del DIE. En dicho lugar, se cortaron usando una ingletadora como se muestra en la figura 4.5, que fue facilitada por el Laboratorio de Estructuras del departamento mencionado.



Fig. 4.5 Ingletadora

Como resultado, se obtuvieron cortes de los perfiles tipo cajón y tipo L de 33 cm, 35 cm, 40 cm, 120 cm y 4 cm, 50 cm, 70 cm respectivamente, que se observan en la figura 4.6.

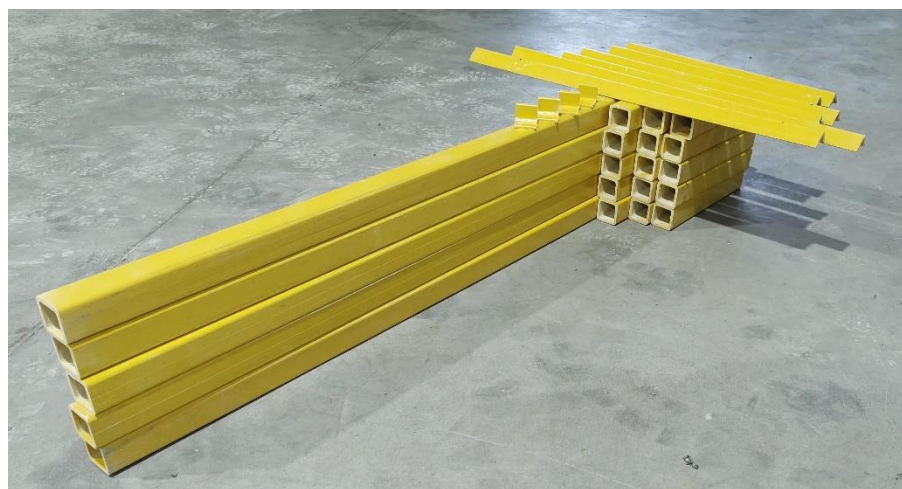


Fig. 4.6 Cortes de perfiles

4.4. Placas de aluminio

En este caso, se necesitaban dos placas de 3 mm de espesor. Al ser imprescindible que los cortes fueran totalmente precisos, incluyendo los diámetros de los agujeros, se seleccionó la maestranza Orecal, quienes disponían de planchas del espesor mencionado y ofrecían el servicio de corte. Por esta razón, al encargar las placas con sus respectivos cortes, se les envió la fig. 4.7 en formato dwg para evitar confusiones respecto a las medidas [17].

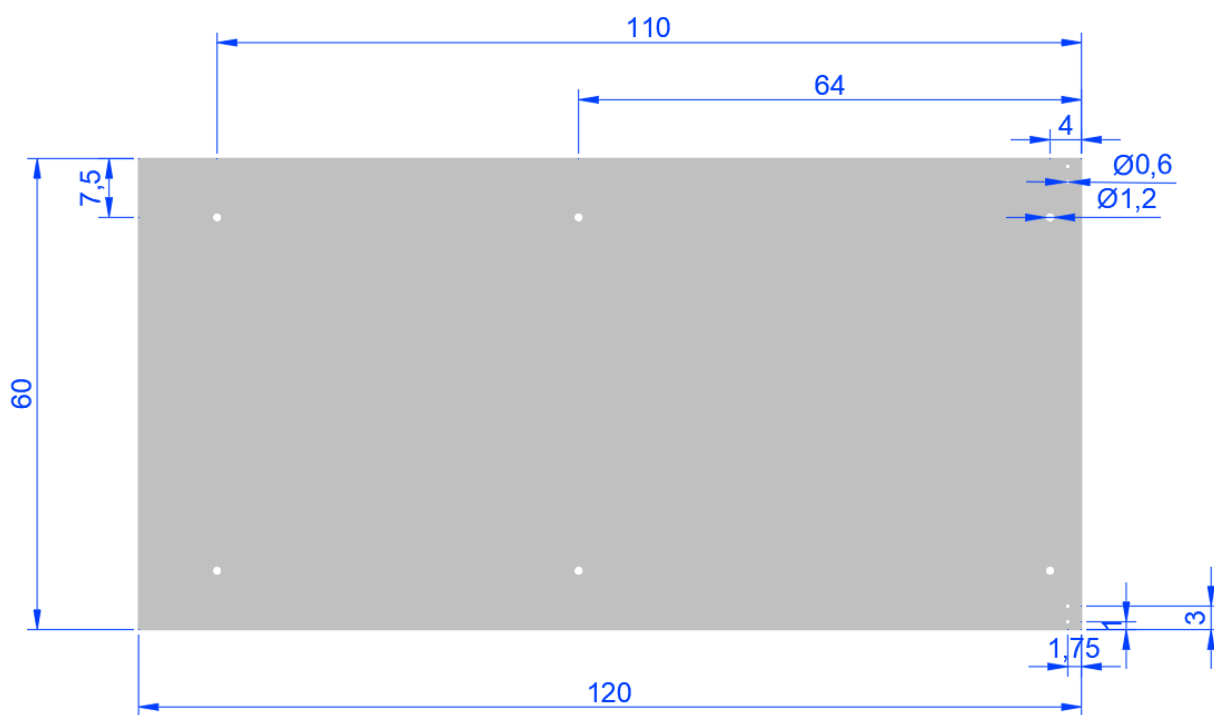


Fig. 4.7 Diseño placas de aluminio

Como se mencionó, se solicitaron dos placas iguales como se ve en la figura 4.8.

Tabla 4.3 Materiales adquiridos en ORECAL

Servicio	Medidas	Espesor	Cantidad	Costo
Corte placas aluminio	120x60 cm	3 mm	2	\$ 300.000



Fig. 4.8 Placas de aluminio

4.5. Cubos 3D

A pesar de que en el diseño original se indicaba que el material de los filamentos para imprimir los cubos debía ser ABS, se decidió cambiarlo por PLA, principalmente por dos razones. La primera de ellas es la compatibilidad y configuración con la impresora 3D a la que se tenía acceso, y la segunda es el alto nivel de toxicidad del ABS, lo que exigía trabajar en un ambiente bien ventilado. En la tabla 4.4 se presenta el filamento adquirido para esta tarea.

Tabla 4.4 Filamento para impresora 3D

Material	Peso	Diámetro	Cantidad	Costo
PLA	1 kg	1.75 mm	6	\$ 101.340

En lo que respecta a la impresión en 3D, se utilizó la impresora Ender 3 S1 Creality de la figura 4.9. Dicha impresora pertenece al Laboratorio de Redes y Sistemas Inteligentes de la Dra. Silvia Restrepo y fue manipulada por el estudiante Roberto Vives, quien también adaptó los diseños originales a las medidas de los perfiles FRP.

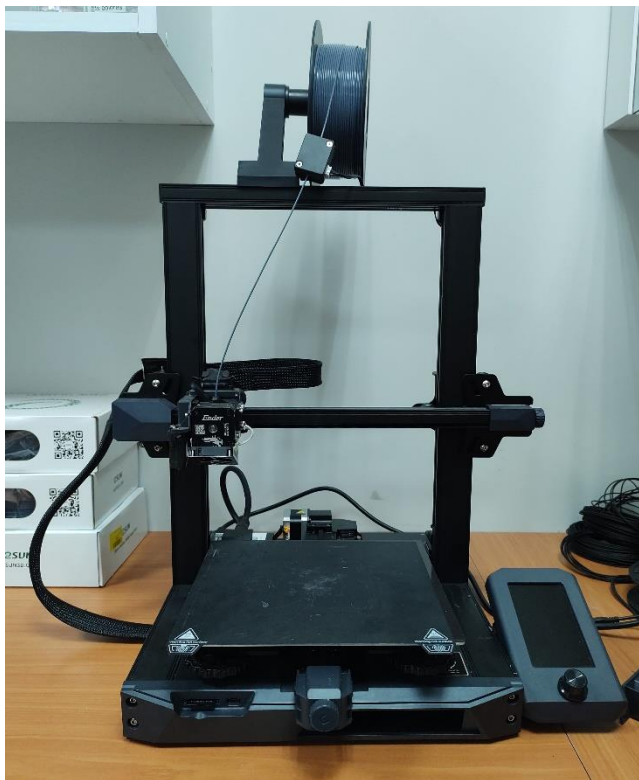


Fig. 4.9 Impresora 3D

Inicialmente, los cubos se habían impreso con 60% de relleno, esto quiere decir, 40% aire y 60% PLA. Posteriormente se modificó, imprimiendo a un 80% con el fin de otorgar mayor firmeza y seguridad a la antena. Los cubos 3P que se visualizan en la figura 4.10, son los que están ubicados en la parte inferior del frame, y los 4P de la figura 4.11, están en la parte superior.

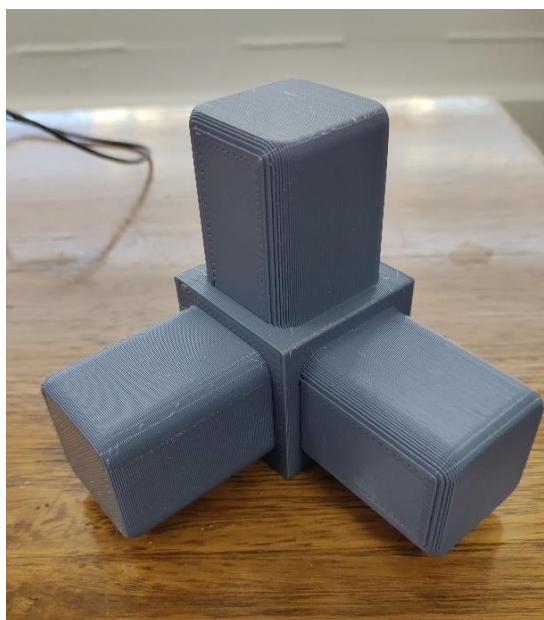


Fig. 4.10 Cubo 3P



Fig. 4.11 Cubo 4P

Adicionalmente, se imprimieron 4 tapas que se muestra en la figura 4.12, para los extremos del frame, las que tienen como finalidad impedir la entrada de arena u otros elementos no deseados a los perfiles.



Fig. 4.12 Tapas para los perfiles tipo cajón

4.6. Montaje

Teniendo todos los materiales necesarios, se comenzó a armar el frame ensamblando los perfiles FRP en los cubos. Se etiquetaron tanto los perfiles como los cubos, con letras del abecedario para tener claridad de la correspondencia entre ellos. El resultado de esta etapa, se muestra en la figura 4.13.



Fig. 4.13 Montaje perfiles y cubos

Luego, se procedió a realizar los agujeros de 12 mm y 6 mm, siguiendo las medidas del memo 58 y de la figura 4.7 respectivamente. En dichos agujeros, fueron puestos los pernos y tuercas descritas en la sección 4.2 [17].



Fig. 4.14 Vista superior antena



Fig. 4.15 Vista lateral antena

Dentro de los requisitos más importantes a cumplir por la antena, está que la inclinación debe ser lo más cercana a 0° y la separación entre las placas de aluminio debe ser de 2 cm. Se ocupó un inclinómetro y una regla para verificar ambas condiciones.

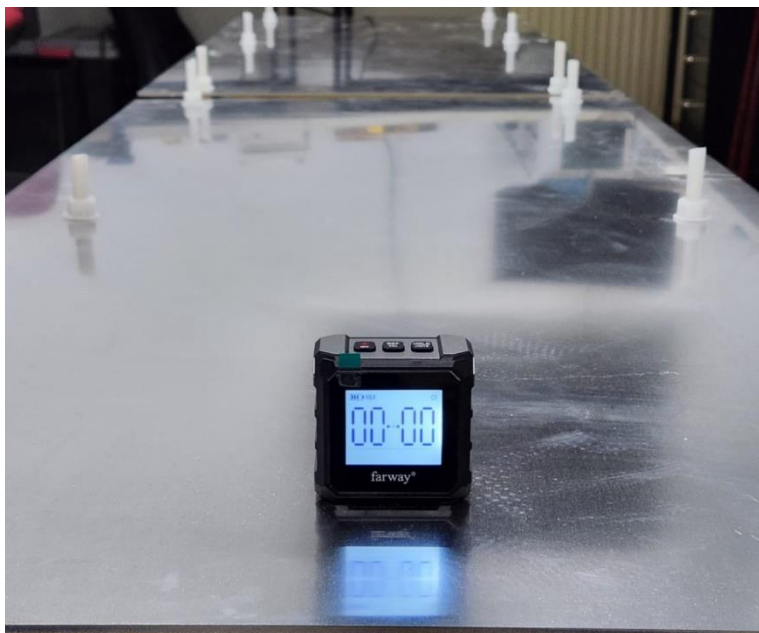


Fig. 4.16 Inclinómetro sobre la antena

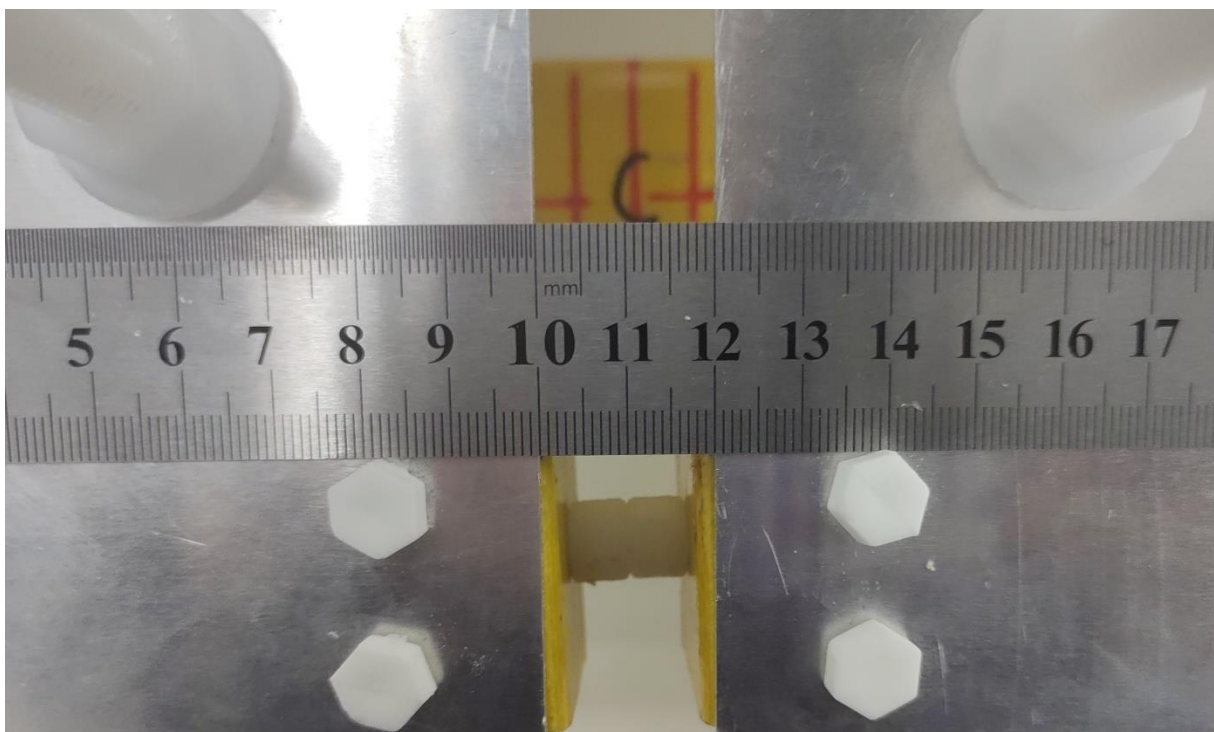


Fig. 4.17 Separación de 2 cm

Capítulo 5. Mediciones de coeficiente de reflexión

5.1. Introducción

En este capítulo se mostrará el procedimiento realizado y los resultados que se obtuvieron de las mediciones del coeficiente de reflexión (S_{11}) de la antena. En primera instancia, se decidió realizar mediciones dentro del Campus San Andrés de la UCSC, Concepción y en Caleta Lenga, Hualpén, de manera preliminar. Posteriormente, y luego de descubrir la forma correcta de calibrar el nano VNA, se efectuaron las mediciones finales en tres sitios de la Provincia de Concepción.

5.2. Mediciones preliminares

La finalidad de realizar estas mediciones preliminares, no fue obtener los datos del coeficiente de reflexión, si no, el poder tener experiencia en el proceso de medición en sí y lo que conlleva.

Dentro del proceso, se pueden destacar dos puntos importantes. El primero, es el montaje de la antena, donde el aspecto crítico es ajustar la inclinación de las placas de aluminio en 0° y su separación en 2 cm. El segundo, es la calibración del instrumento de medición y su operación para poder efectuar las mediciones.

Se escogieron cuatro lugares distintos para efectuar estas mediciones. Los primeros tres, dentro de la UCSC, específicamente el estacionamiento de hormigón ubicado frente al Edificio Central, las áreas verdes del mismo lugar y la azotea del Edificio Central. El cuarto sitio, fue la playa de Caleta Lenga de la Comuna de Hualpén.

Si bien los resultados no eran relevantes, de igual manera se guardaron los datos, tanto para mejorar la manipulación del nanoVNA como para conocer el formato en el que se guardaban las mediciones y posteriormente graficarlas en Matlab.

Es importante mencionar que la primera vez que se armó la antena dentro del LAIM, el proceso de armado duró cerca de 60 minutos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.1 Mediciones preliminares

(a) Estacionamiento **(b)** Área verde **(c)** Azotea **(d)** Lenga

En la figura 5.1 se puede apreciar la antena armada en los distintos sitios en los que se realizaron las mediciones preliminares. De estas cuatro experiencias se obtuvieron los siguientes aprendizajes.

En primer lugar, se logró optimizar la forma de armado de la antena, logrando montarla en un tiempo de 30 minutos. Es decir, se redujo en un 50% el tiempo destinado solo al montaje de la antena, lo que es un punto favorable teniendo en cuenta que el lugar donde se va a situar el radiotelescopio MIST está ubicado a 4380 metros sobre el nivel del mar.

En segundo lugar y también relacionado al montaje, con el pasar de las mediciones preliminares se pudo adquirir experiencia y descubrir la mejor forma de ajustar la inclinación en cero grados. Dependiendo de la inclinación y la orientación que marcaba el inclinómetro, se tenía una idea de qué lado de la antena subir o bajar.

En tercer lugar, se pudo establecer cuál era la mejor forma de trasladar las partes de la antena y que repuestos extras era necesario llevar, en caso de pérdida u otro imprevisto. Las placas de aluminio y los perfiles de fibra de vidrio de 120 cm se trasladaron de forma separada, mientras que los otros elementos tales como, los perfiles de fibra de vidrio de menor longitud, los cubos 3D, los pernos y tuercas plásticas, el nanoVNA y el inclinómetro, fueron dispuestos en una caja plástica para facilitar el traslado.

En cuarto lugar, estas mediciones sirvieron para familiarizarse con el nanoVNA, sobre todo en lo que respecta a la calibración del instrumento y a como guardar de forma correcta los datos. Mencionar que, para estos casos, se utilizó un cable coaxial Rg174 de aproximadamente 15 cm, que viene incluido con el nanoVNA y que era el encargado de conectar el instrumento de medición con la antena. Específicamente, en cuanto a la medición propiamente tal, se midió tanto la antena junto al cable, como solo el cable, con la finalidad de posteriormente restar ambas mediciones y obtener el resultado efectivamente solo de la antena y sin influencia del cable.

En quinto y último lugar, se pudo crear un script en Matlab para cargar y procesar los datos. El formato de los archivos es S1P y los datos vienen dados en dos columnas, una con los valores reales y otra con los imaginarios. En cuanto a los gráficos, se optó por graficar la magnitud y fase del S_{11} como se muestra en la siguiente figura.

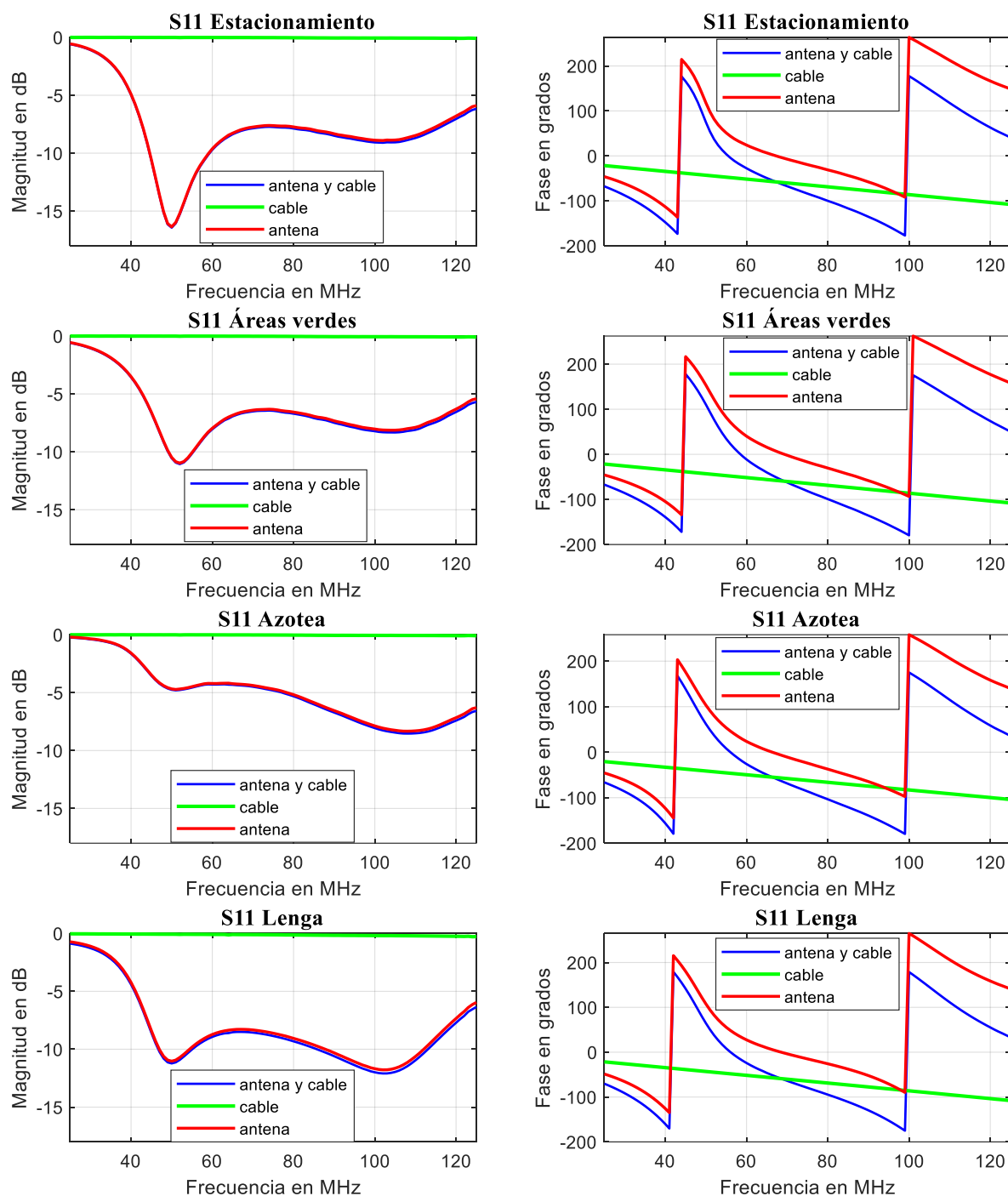


Fig. 5.2 Coeficiente de reflexión de mediciones preliminares

Para apreciar de mejor forma las magnitudes de los cables correspondiente a las curvas de color verde de la figura 5.2, se optó por visualizar en un solo gráfico todos los cables.

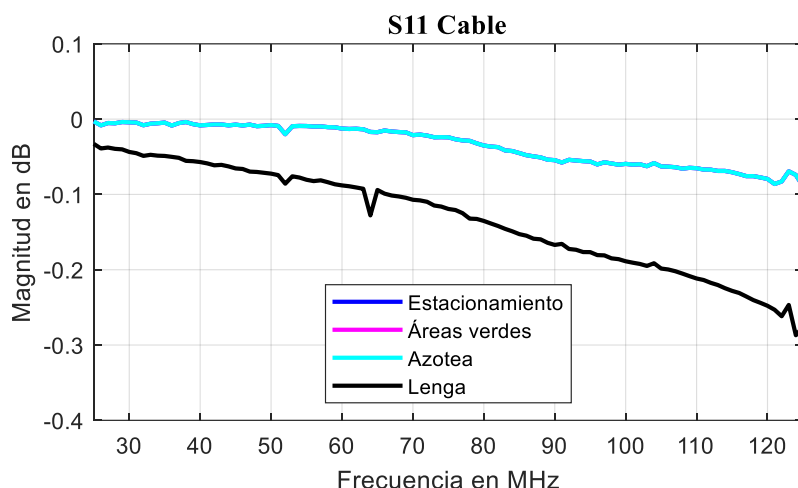


Fig. 5.3 Magnitud coeficiente de reflexión de cable en mediciones preliminares

Como se nombró anteriormente y como se observa en la figura 5.2 y 5.3, se midió el cable por separado para que el S_{11} de la antena no estuviera interferida por él. Se observa, que debido a que el cable es relativamente pequeño, su magnitud también lo es y no causa mayor influencia en la magnitud, no así en la fase. En cuanto a la magnitud del coeficiente de reflexión, se aprecian notorias diferencias entre los distintos sitios, lo que es causado por los parámetros eléctricos del suelo.

5.3. Mediciones de S_{11} en la Provincia de Concepción

5.3.1 Ubicaciones

Luego de realizar las mediciones preliminares, se determinó medir en tres lugares distintos de la Provincia de Concepción, los que se detallan en la siguiente tabla e imagen.

Tabla 5.1 Ubicación de mediciones en la Provincia de Concepción

Comuna	Sector	Coordenadas	Simbología
Talcahuano	Ruta interportuaria	36°43'56.3'' S 73°04'14.9'' W	M. THNO 
Hualpén	Cuatro canchas	36°47'34.2'' S 73°05'45.2'' W	M. HPN 
Concepción	Parque Bicentenario	36°49'53.5'' S 73°03'45.2'' W	M. CCP 



Fig. 5.4 Ubicación de mediciones en Google Earth

Los lugares mostrados en la tabla 5.1 y figura 5.4 fueron seleccionados por dos razones principales.

La primera de ellas, es que corresponden a tres comunas distintas de la provincia, con terrenos completamente diferentes y con una distancia considerable entre los puntos de medición. Por un lado, la medición tomada en la playa de la ruta interportuaria en Talcahuano fue a unos 25 metros aproximadamente del mar. Por otro lado, la medición del sector cuatro canchas de Hualpén, fue prácticamente en el centro de la comuna. Por último, la medición en el parque Bicentenario de Concepción, que está ubicado a un costado del Río Biobío. Dado lo anterior y considerando la

diversidad de los tres suelos, estos deberían tener valores distintos de conductividad y permitividad relativa y, por ende, se deberían obtener resultados diversos en las mediciones por la influencia de los parámetros mencionados.

La segunda razón, es porque en los tres sitios, había a lo menos un radio de 20 metros despejados. Es decir, sin personas, autos, edificios u otros elementos que pudieran causar una distorsión o interferencia en las mediciones.

5.3.2 Incorporación de cable coaxial Rg174 de 20 metros.

En esta ocasión se cambió el cable coaxial Rg174 de 0.15 m por dos cables del mismo tipo, pero de 10 m. Esto para que, al tomar las mediciones, efectivamente no hubiera nada ni nadie en un radio de 20 m alrededor de la antena. Debido a la longitud de los cables y para intentar reducir el ruido que pueden provocar, se usaron un total de 18 ferritas supresoras de ruidos RFI distribuidas en ambos cables.



Fig. 5.5 Cable coaxial Rg174 de 10 m y núcleo de ferrita

Inicialmente, se siguió el mismo procedimiento que en las mediciones preliminares. Es decir, calibrar el nanoVNA, medir la antena y el cable, y medir solo el cable. Para esto último, el cable fue dispuesto con un cubo y un perfil FRP en la misma posición y altura como si estuviera conectado a la antena, tal como se muestra en la figura 5.6.



Fig. 5.6 Disposición del cable para su medición

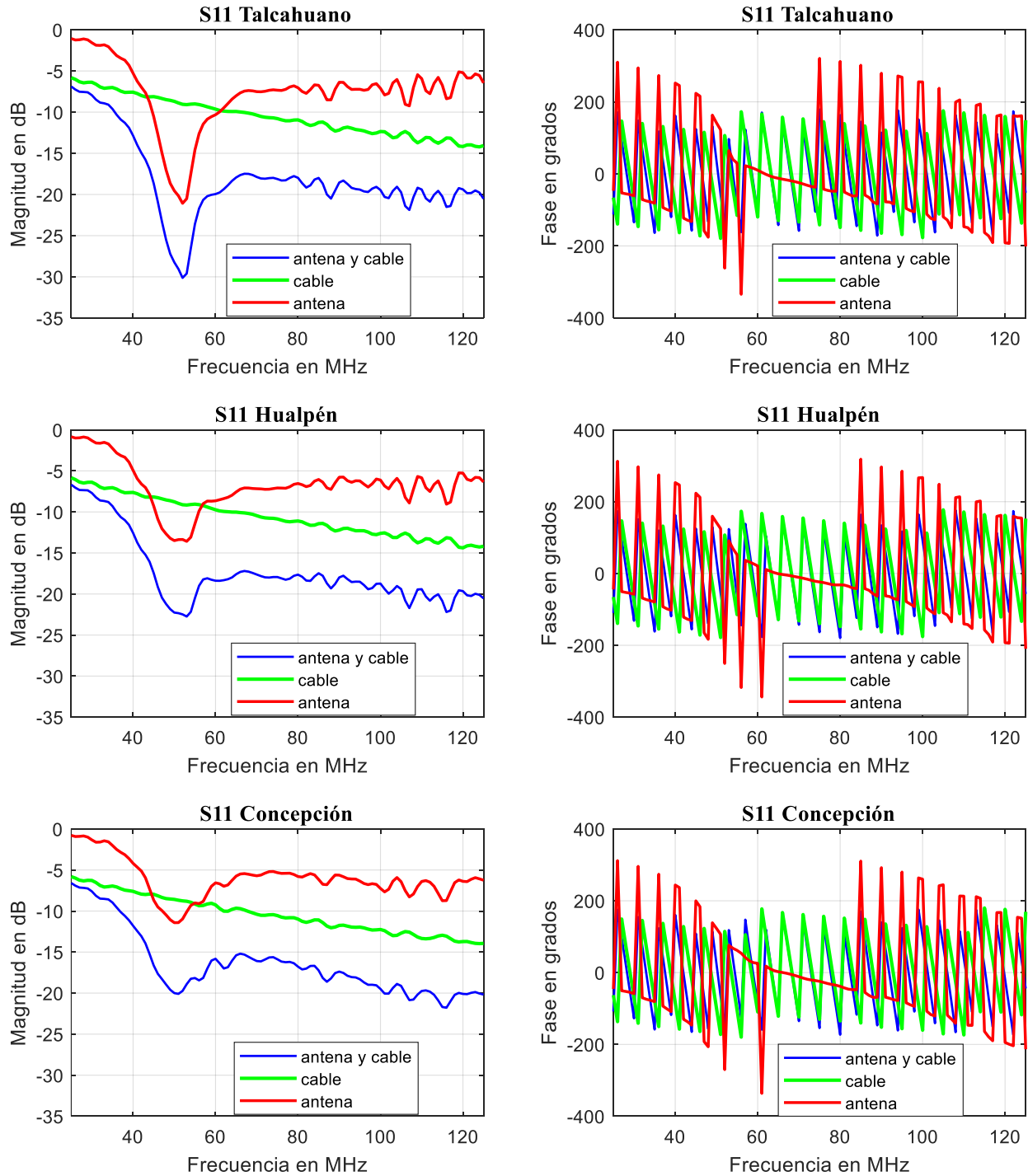


Fig. 5.7 Coeficiente de reflexión con cable de 20 m.

Como queda en evidencia en la figura 5.7, el ruido producido por el cable es notoriamente mayor que en la figura 5.2 debido su longitud. Aún con el uso de ferritas supresoras de ruido, se produce una distorsión significativa en el S_{11} , tanto en la magnitud como en la fase.

Luego de realizar distintas pruebas, se llegó a la conclusión que, debido a la longitud del cable, no era el procedimiento correcto para efectuar las mediciones. El proceso adecuado es incluir los cables desde un inicio al nano VNA, y así, calibrar el instrumento con el cable conectado a él. Es decir, ubicar los conectores open, short y load cuando corresponda a un extremo del cable de 20 m que está conectado al nano VNA. Posterior a realizar la calibración de dicha forma, se pudo corroborar que era la correcta puesto que, con el cable conectado, la magnitud del coeficiente de reflexión estaba completamente en 0 dB. A continuación, se muestran imágenes de la antena con el instrumento calibrado de forma adecuada y con la inclinación ajustada en 0° o lo más cercano posible.



Fig. 5.8 Antena MIST en Talcahuano



Fig. 5.9 Antena MIST en Hualpén



Fig. 5.10 Antena MIST en Concepción

5.3.3 Mediciones finales

Teniendo el instrumento y el cable calibrado, la inclinación ajustada en 0° y la separación entre las placas de aluminio fijadas en 2 cm, se pudo proceder con las mediciones finales en las que se obtuvieron los siguientes resultados.

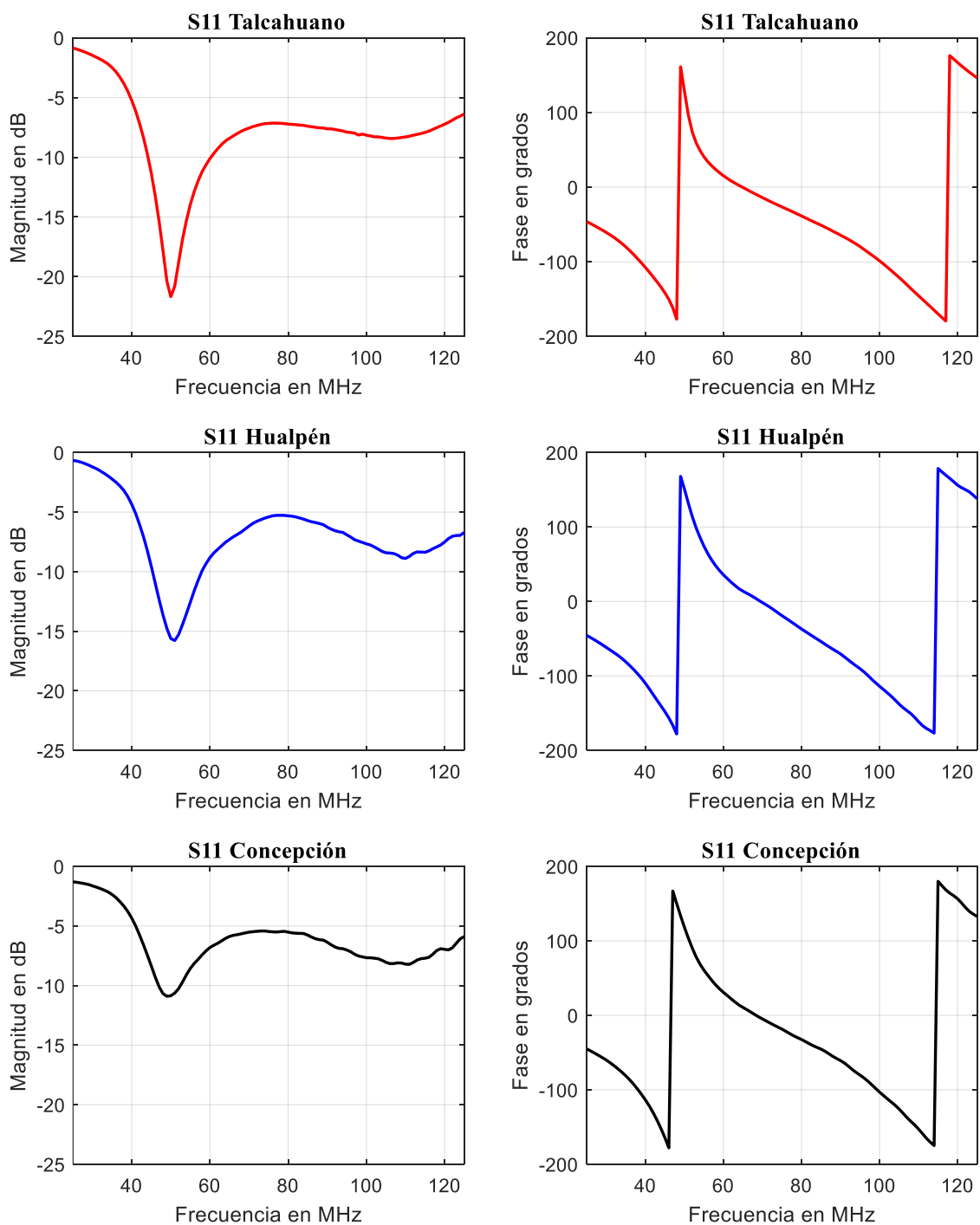


Fig. 5.11 Resultados finales coeficiente de reflexión

Al contrastar los resultados de la figura 5.11 con los de la figura 5.7, se puede apreciar una notoria mejora en la distorsión de las curvas, en donde queda en evidencia lo importante de calibrar de manera correcta los instrumentos de medición.

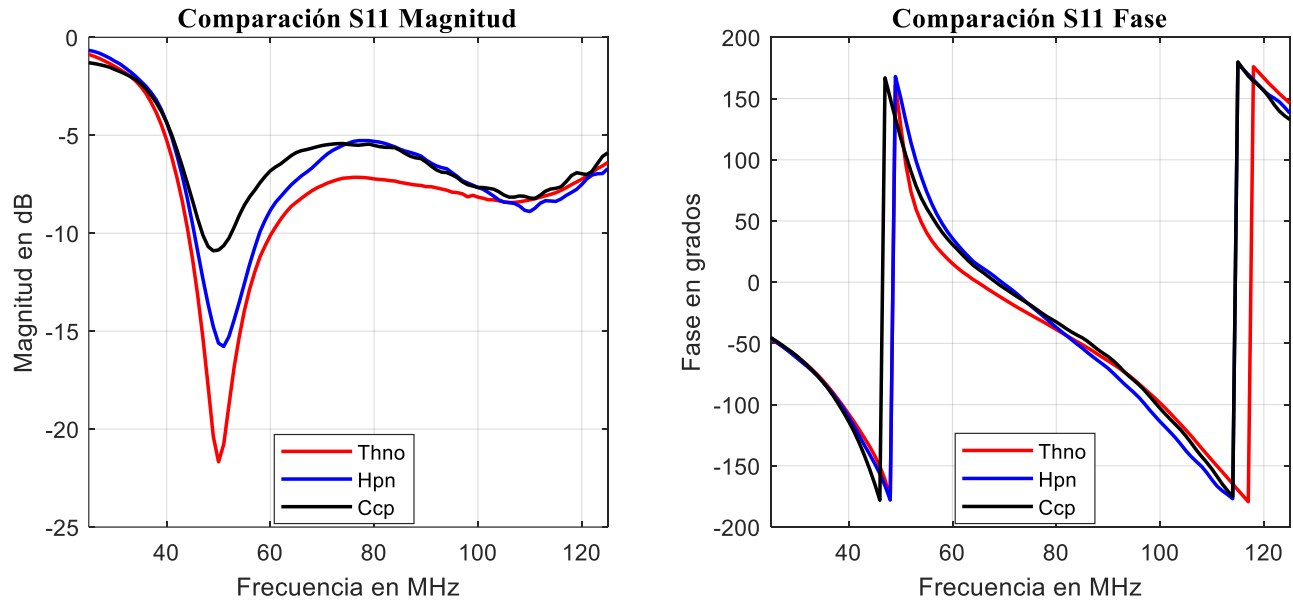


Fig. 5.12 Comparación coeficiente de reflexión

En la figura 5.12 se puede destacar que la principal característica resonante ocurre alrededor de los 50 MHz en los tres casos, lo que es similar a lo reportado de las observaciones realizadas por MIST en norte América [16].

Por otro lado, queda demostrado el efecto de la permitividad relativa y conductividad eléctrica del suelo en el coeficiente de reflexión. Donde la característica resonante varía su magnitud de acuerdo al suelo donde fue efectuada la medición. Se aprecia claramente, que Talcahuano presenta el coeficiente de reflexión más bajo en casi todo el rango de frecuencia, esto es debido a la cercanía de la antena con el mar y a que muy probablemente, debajo del estrato de arena, exista agua de mar con la característica de ser eléctricamente conductora. Además, el comportamiento entre los 100-120 MHz es prácticamente idéntico para los tres sitios, esto puede ser en consecuencia de que, si bien son suelos distintos, los tres son arenosos.

Por último, al igual que en lo indicado por MIST, todos los coeficientes de reflexión son valores negativos, independiente del lugar. Es decir, la energía de las ondas incidentes es transmitida con bajas pérdidas significativas.

Capítulo 6. Simulaciones en FEKO

6.1. Introducción

La simulación electromagnética de la antena y de su coeficiente de reflexión se hizo en el software FEKO. Este programa es ampliamente utilizado para diseñar diversos tipos de antenas debido a su capacidad de resolver una amplia gama de problemas electromagnéticos. En lo que respecta al trabajo de esta tesis, FEKO permite crear la antena junto a los estratos del suelo e ir modificando los parámetros eléctricos del suelo según se desee. Conjuntamente, es posible visualizar el coeficiente de reflexión, la directividad, el diagrama de radiación, entre otros, de la antena.

En este apartado, se intentará determinar la conductividad eléctrica y la permitividad relativa del suelo a través de iteraciones de forma manual en las simulaciones. Debido a que cada simulación demanda un tiempo aproximado de 6 horas, se decidió realizarlas solo para el sitio de Talcahuano.

6.2. Antena de MIST en FEKO

Para efectos de la simulación, solo fue necesario hacer la antena en sí y no incorporar el soporte. Es decir, no se incluyeron los perfiles FRP, los cubos impresos 3D ni los pernos y tuercas plásticas, debido a que todos estos materiales son dieléctricos.

Las placas de aluminio se hicieron como rectángulos de aluminio y posteriormente se le modificó el espesor al material por 3 mm. Además, se agregaron todos los agujeros indicados en la figura 4.7. En cuanto a la conexión de las placas, se añadió un cable de 1mm que las conecta y en el centro de él, una fuente de voltaje como puerto de excitación.

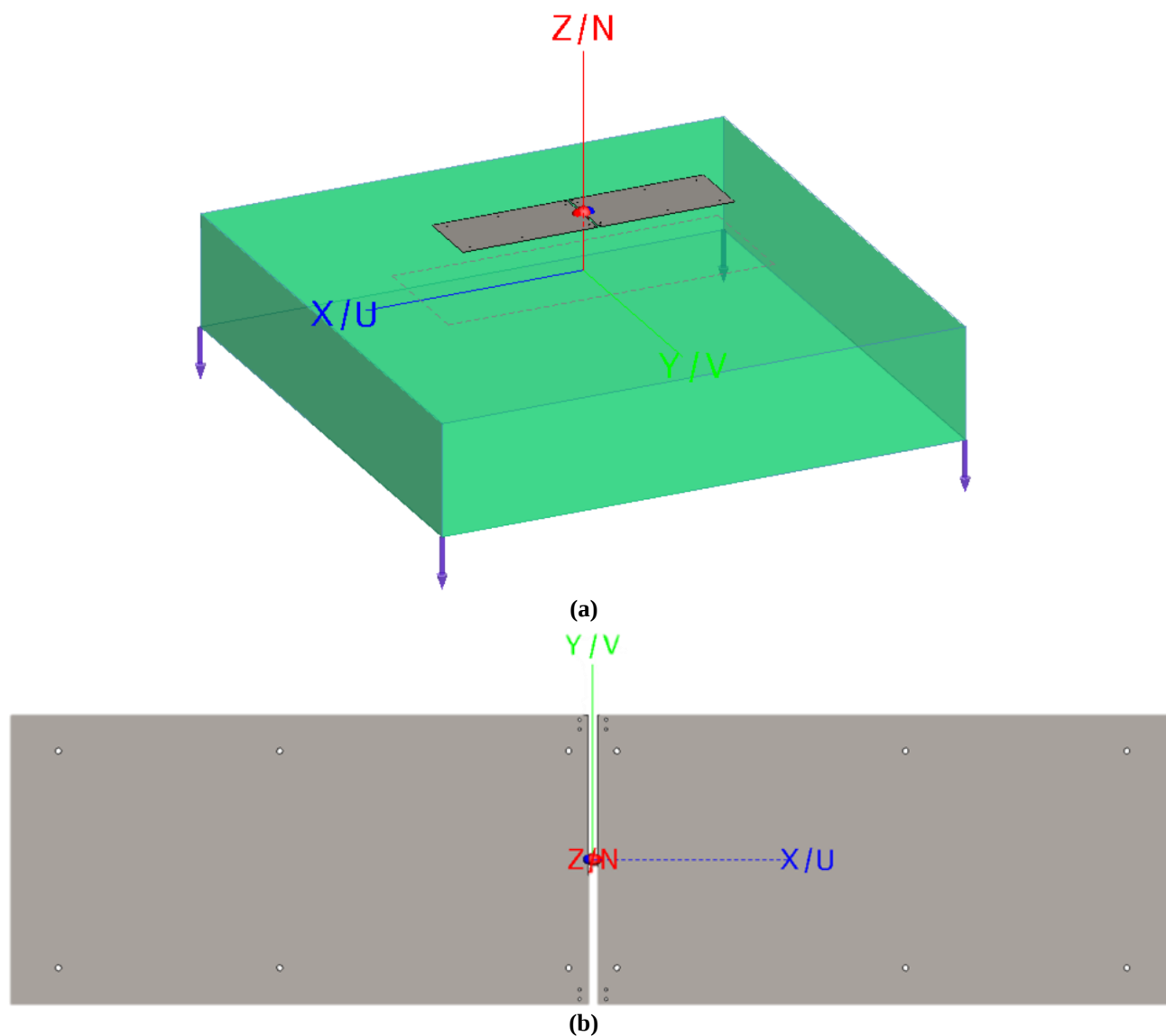


Fig. 6.1 Antena de MIST en FEKO

(a) Vista isométrica (b) Vista superior

6.3. Simulaciones

De los tres sitios en los que se realizaron mediciones del coeficiente de reflexión, se optó por elegir la de Talcahuano para realizar las simulaciones. Esta decisión se tomó en base a que existen sondeos eléctricos verticales en puntos cercanos al lugar, los que pueden ser utilizados como referencia para los valores de conductividad del suelo [19].

Tabla 6.1 Ubicación medición Talcahuano y SEV

Nombre	Coordenadas	Simbología
Medición Talcahuano	36°43'56.2'' S 73°04'14.9'' W	M. THNO 
Sondeo Eléctrico Vertical N°14	36°44'3.3'' S 73°03'50.4''W	SEV 14 
Sondeo Eléctrico Vertical N°15	36°44'1.7''S 73°04'55.8''W	SEV 15 

**Fig. 6.2 Ubicación medición Talcahuano y SEV en Google Earth**

Como se observa en la figura 6.2, si bien los SEV se pueden considerar cercanos al punto de medición, estos se realizaron en sitios más alejados del agua de mar. Además, teniendo en consideración la influencia de la humedad en la resistividad, estos pueden ser utilizados solo como punto de inicio en los valores a estimar de la conductividad. A continuación, se presentan los modelos de cada SEV.

Tabla 6.2 Sondeo Eléctrico Vertical N°14

Estrato	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Conductividad (S/m)	Espesor (m)
Primer estrato	418	0.00239	0.72
Segundo estrato	7.5	0.133	5.4
Tercer estrato	0.84	1.19	90

Fuente: [19]

Tabla 6.3 Sondeo Eléctrico Vertical N°15

Estrato	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Conductividad (S/m)	Espesor (m)
Primer estrato	319	0.00313	1.7
Segundo estrato	0.59	1.695	65

Fuente: [19]

De las tablas 6.2 y 6.3, se tiene que la primera capa pertenece a arena gruesa y arena media respectivamente. Luego, en el tercer estrato del SEV N°14 y el segundo estrato del SEV N°15, se aprecian bajas resistividades (o altas conductividades) debido a la intrusión salina. [20].

6.3.1 Simulaciones preliminares

Teniendo la información de las tablas 6.2 y 6.3 como referencia se realizaron las primeras simulaciones, en las que se buscó ajustar el peak de resonancia que ocurre en los 50 MHz y que tiene un valor de -21.7 dB. Se optó por asignar un espesor de 1m al primer estrato.

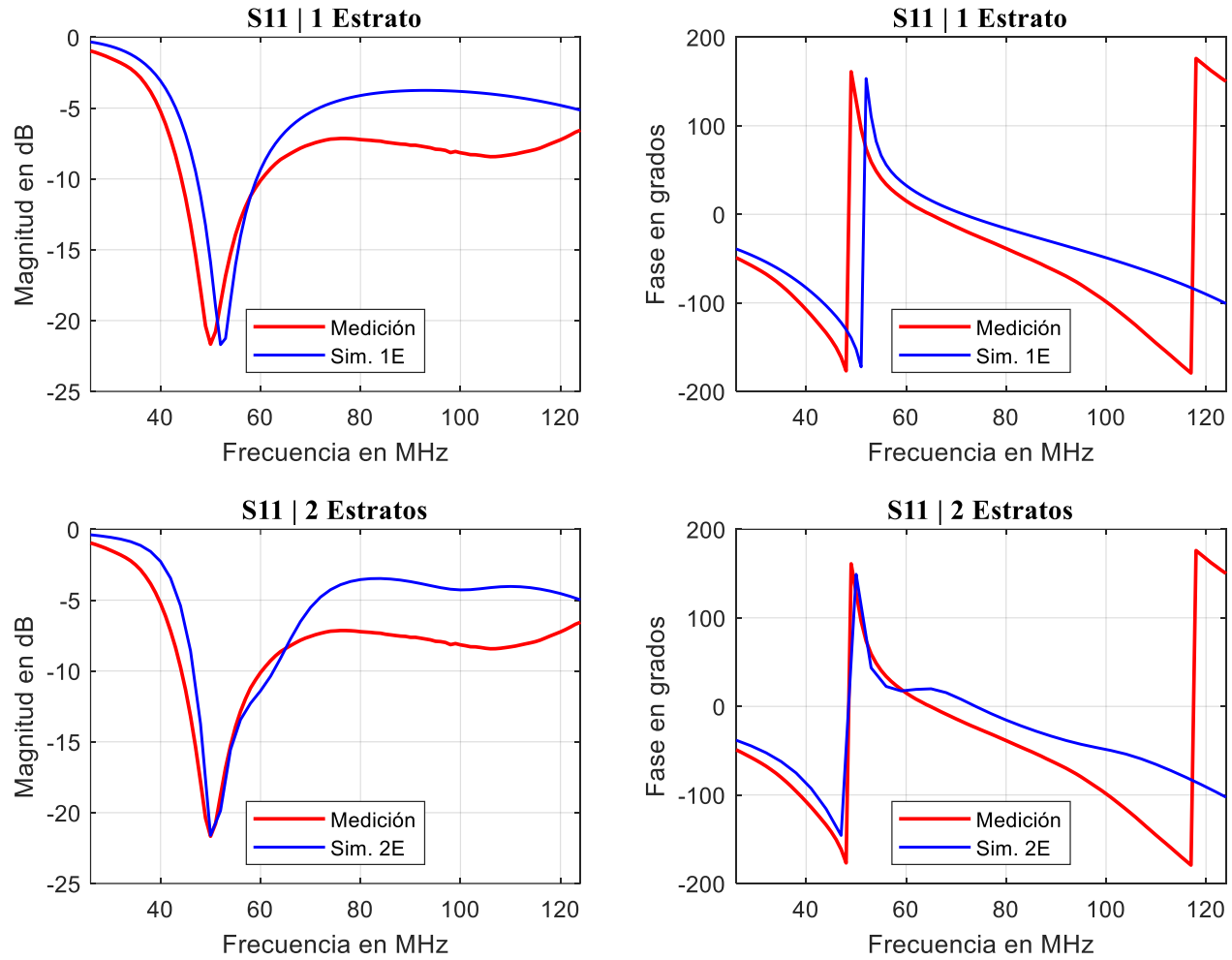


Fig. 6.3 Coeficiente de reflexión simulaciones preliminares

Para el caso de un estrato, se utilizó un valor de $0.003 \frac{S}{m}$ de conductividad y 13 de permitividad relativa. Mientras que, para dos estratos, el primero tuvo un valor de $0.002 \frac{S}{m}$ y 13.5 de conductividad y permitividad, respectivamente, y el segundo, $0.1538 \frac{S}{m}$ de conductividad eléctrica y 30 de permitividad relativa. De la figura 6.3, se observa que, al ocupar una capa, la magnitud y la fase se desplazan aproximadamente 2 MHz respecto de la medición. Al implementar dos estratos, se soluciona el desfase que ocurre en el caso anterior, pero se nota una mayor distorsión de las curvas.

6.3.2 Modificación del suelo en la simulación y proceso de optimización

De aquí en adelante, se realizan distintas pruebas y modificaciones de los parámetros eléctricos del suelo, con el fin de llegar a un resultado lo más cercano posible a la medición. Sin embargo, debido a que solo se tienen referencias de estos parámetros y no los valores exactos, es probable que el

resultado no sea idéntico al obtenido en la simulación por la gran influencia que ejercen sobre el coeficiente de reflexión. Estas modificaciones serán llamadas pruebas, representadas con la letra P y se enumerarán desde el 1 en adelante, teniendo como prueba 0, la mostrada en la figura 6.3

Se comenzó haciendo pruebas en el primer estrato. Se plantearon 6 casos, en los que se aumentaban y disminuían los parámetros eléctricos del suelo como se muestra a continuación.

Tabla 6.4 Modificaciones primer estrato de prueba 0

Parámetro	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Permitividad relativa	13.5	25	1	13.5	25	1	13.5
Conductividad eléctrica (S/m)	0.002	1	1	1	0.0002	0.0002	0.0002

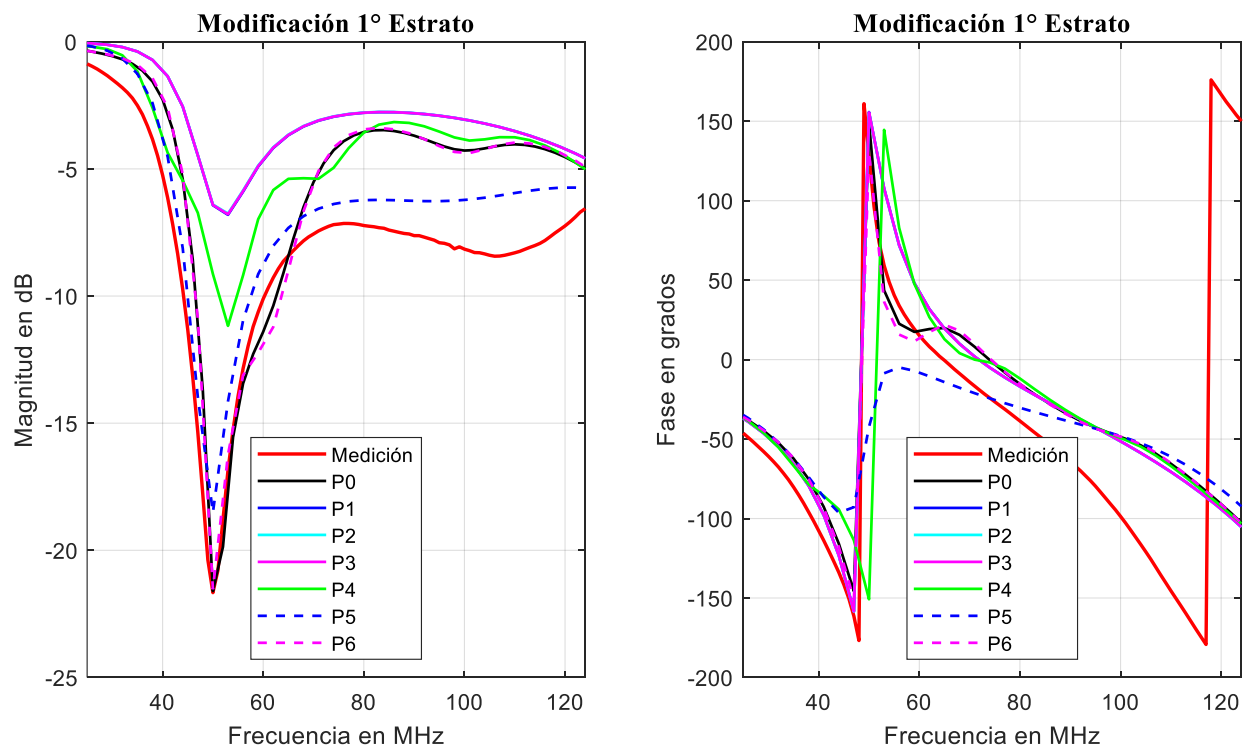


Fig. 6.4 Coeficiente de reflexión con modificaciones al primer estrato de prueba 0

En la figura 6.4 se exhibe, que el mejor resultado de la magnitud es la prueba 5. Es decir, tanto una permitividad como conductividad más bajas que las iniciales en el primer estrato. Por tanto, se mantiene el primer estrato de la prueba 5 y se realizan modificaciones en el segundo estrato.

Tabla 6.5 Modificaciones segundo estrato de prueba 5

Parámetro	P5	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Permitividad relativa	30	45	1	30	45	1	30
Conductividad eléctrica (S/m)	0.1538	1.5	1.5	1.5	0.001538	0.001538	0.001538

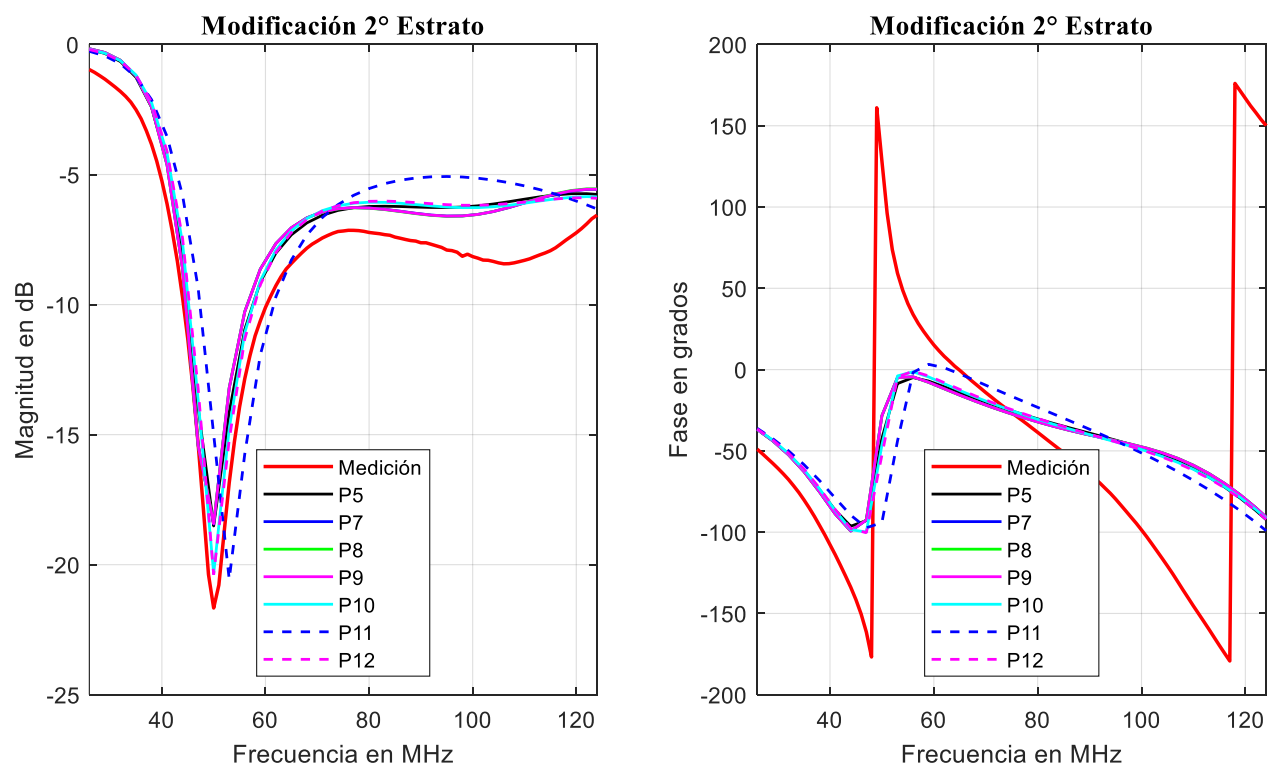


Fig. 6.5 Coeficiente de reflexión con modificaciones al primer estrato de prueba 5

En la figura 6.5, se puede descartar la prueba 11. Esto significa que el segundo estrato debe tener una mayor conductividad y permitividad que el primero, lo que es consecuencia de la cercanía con el mar y de que muy probablemente, la segunda capa tenga alta presencia de agua de mar. En lo que respecta a la fase, esta se aleja bastante del resultado esperado. Sin embargo, esto es porque aún no se han realizado las iteraciones suficientes y se deben seguir modificando los valores de los parámetros. Hasta el momento, el mejor resultado en cuanto a la magnitud del coeficiente de reflexión, sigue siendo la prueba 5, y por ende, se seguirán haciendo modificaciones sobre ella.

Luego, se realizaron pruebas modificando la conductividad del primer estrato de la prueba 5.

Tabla 6.6 Modificaciones de conductividad al primer estrato de prueba 5

Parámetro	P5	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
Conductividad eléctrica (S/m)	0.0002	0.002857	0.002	0.001538	0.001	0.000666	0.0004	0.0003333

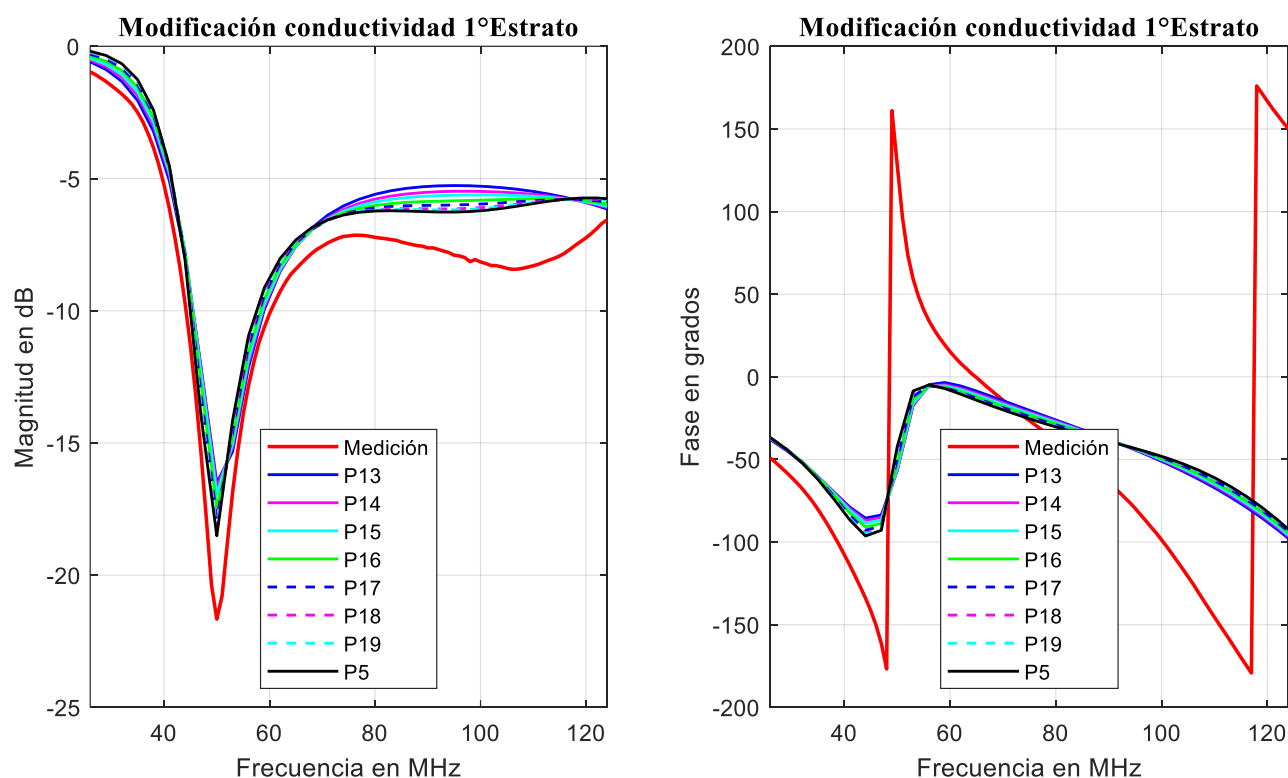


Fig. 6.6 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad al primer estrato de prueba 5

En la tabla y figura recién presentadas, las pruebas fueron ordenadas de mayor a menor conductividad eléctrica. Donde se observa que, a menor conductividad en el primer estrato, menor es el coeficiente de reflexión en los 50 MHz. Además, se desprecian las pruebas 13,14 y 15.

Posteriormente, se realizaron pruebas aumentando en una unidad la permitividad relativa del primer estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19.

Tabla 6.7 Modificaciones de permitividad relativa al primer estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19.

Parámetro	P16	P20	P17	P21	P18	P22	P19	P23
Permitividad relativa	1	2	1	2	1	2	1	2
Conductividad eléctrica (S/m)	0.001		0.000666		0.0004		0.0003333	

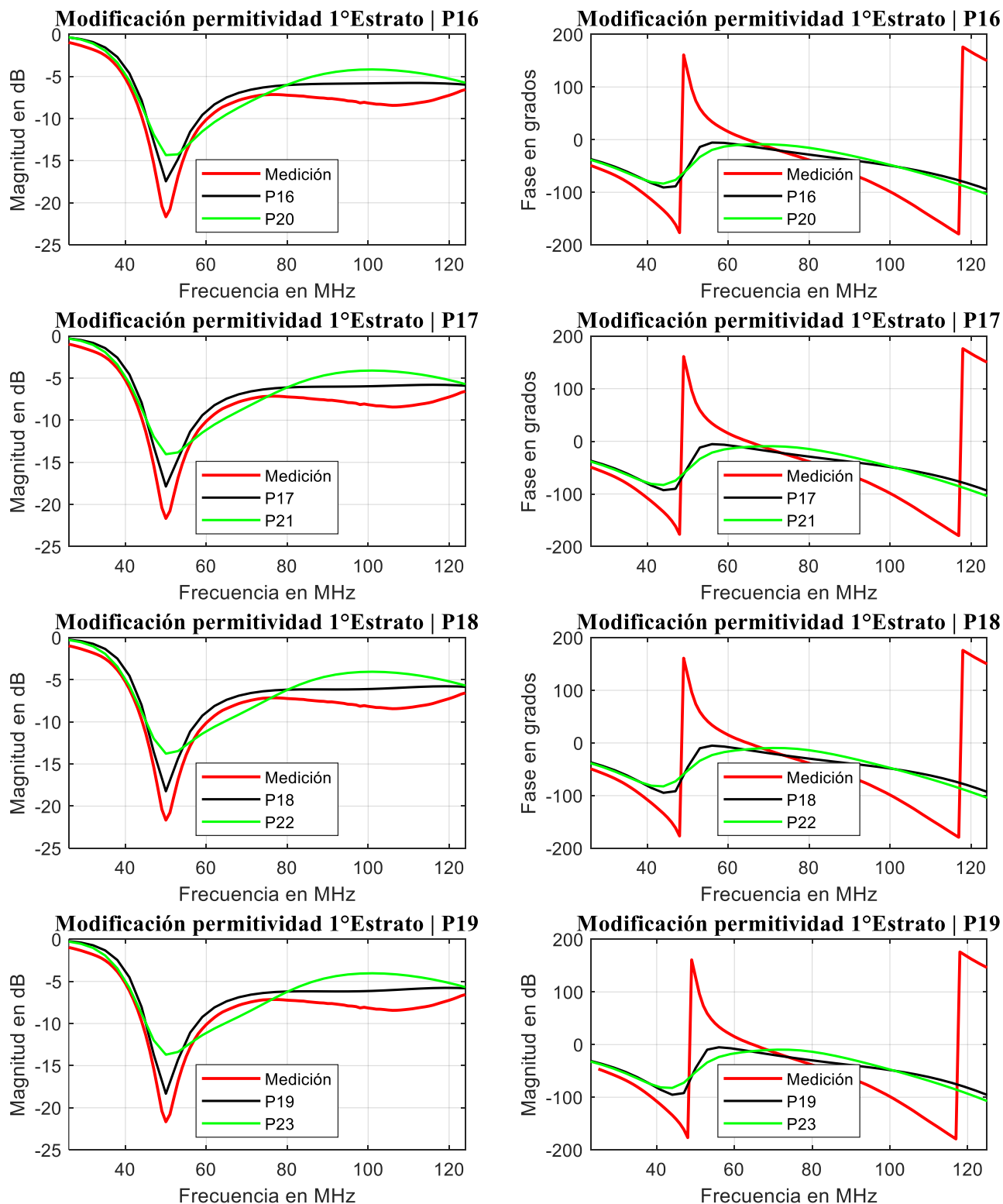


Fig. 6.7 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad relativa al primer estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19

De la figura 6.7 se distingue claramente, que aún con distintos valores de conductividad correspondiente a las pruebas 16, 17, 18 y 19, la mejor opción en la primera capa es una permitividad de una unidad.

Se continúa, modificando la permitividad del segundo estrato de las mismas pruebas. Específicamente, con valores de 15, 45 y 75 en los cuatro casos.

Tabla 6.8 Modificaciones de permitividad relativa al segundo estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19.

Pruebas	Permitividad relativa Segundo estrato	Conductividad eléctrica Primer estrato (S/m)
P16	30	0.001
P24	15	
P25	45	
P26	75	
P17	30	0.000666
P27	15	
P28	45	
P29	75	
P18	30	0.0004
P30	15	
P31	45	
P32	75	
P19	30	0.0003333
P33	15	
P34	45	
P35	75	

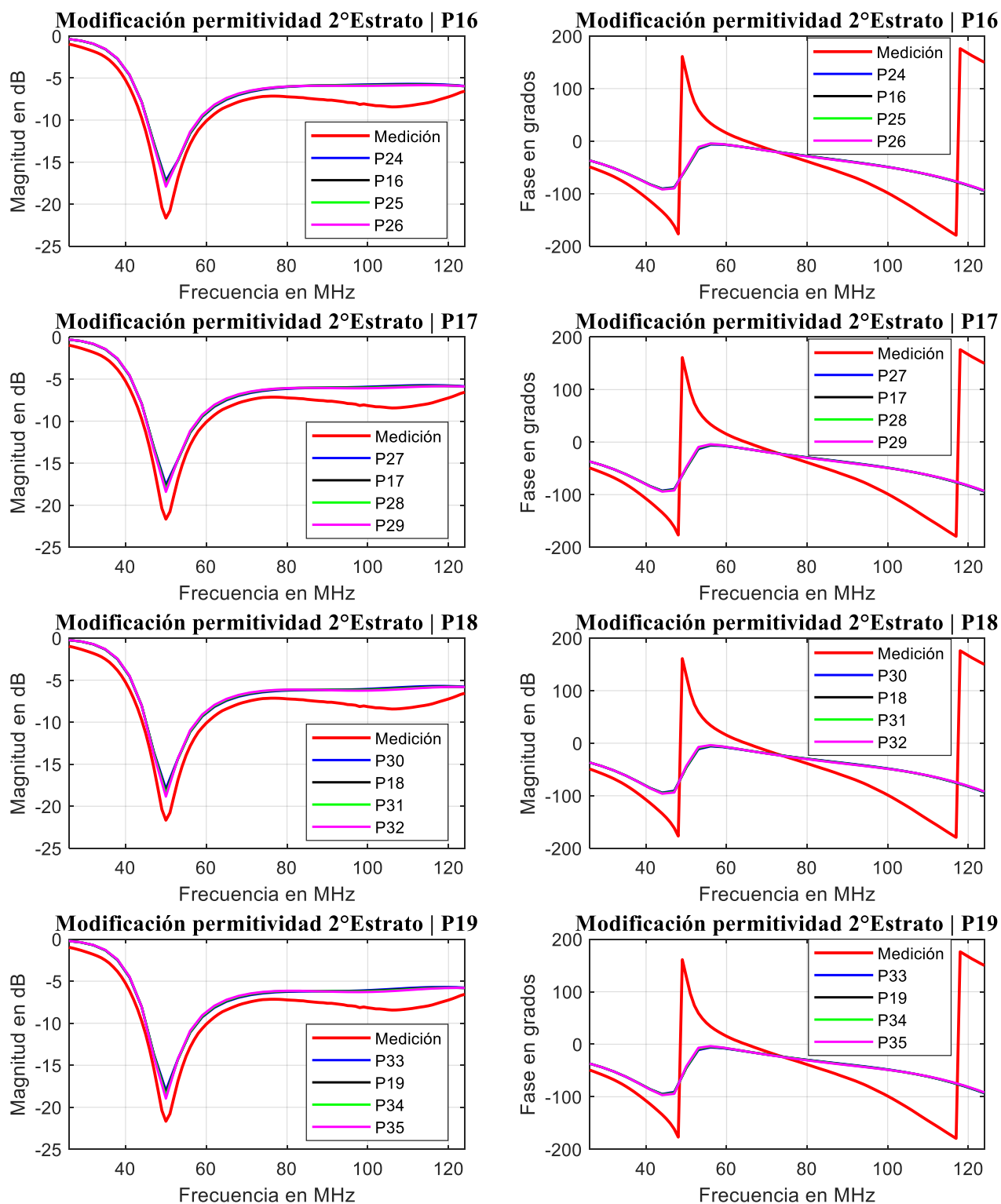


Fig. 6.8 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad relativa al segundo estrato de las pruebas 16, 17, 18 y 19.

En la figura 6.8 se aprecia que mientras mayor es la permitividad relativa del segundo estrato, menor es el coeficiente de reflexión en los 50 MHz. Por tanto, en los cuatro casos, la mejor opción es con una permitividad relativa de 75, lo cual indicaría que prácticamente el segundo estrato es agua. Así, se conservan las pruebas 26, 29, 32 y 35 y en ellas, se procede a modificar la conductividad del segundo estrato.

Tabla 6.9 Modificaciones de conductividad eléctrica al segundo estrato de las pruebas 26, 29, 32 y 35

Pruebas	Conductividad eléctrica Segundo estrato (S/m)	Conductividad eléctrica Primer estrato (S/m)
P26	0.1538	
P36	1	0.001
P37	0.01	
P38	0.00125	
P29	0.1538	
P39	1	0.000666
P40	0.01	
P41	0.00125	
P32	0.1538	
P42	1	0.0004
P43	0.01	
P44	0.00125	
P35	0.1538	
P45	1	0.0003333
P46	0.01	
P47	0.00125	

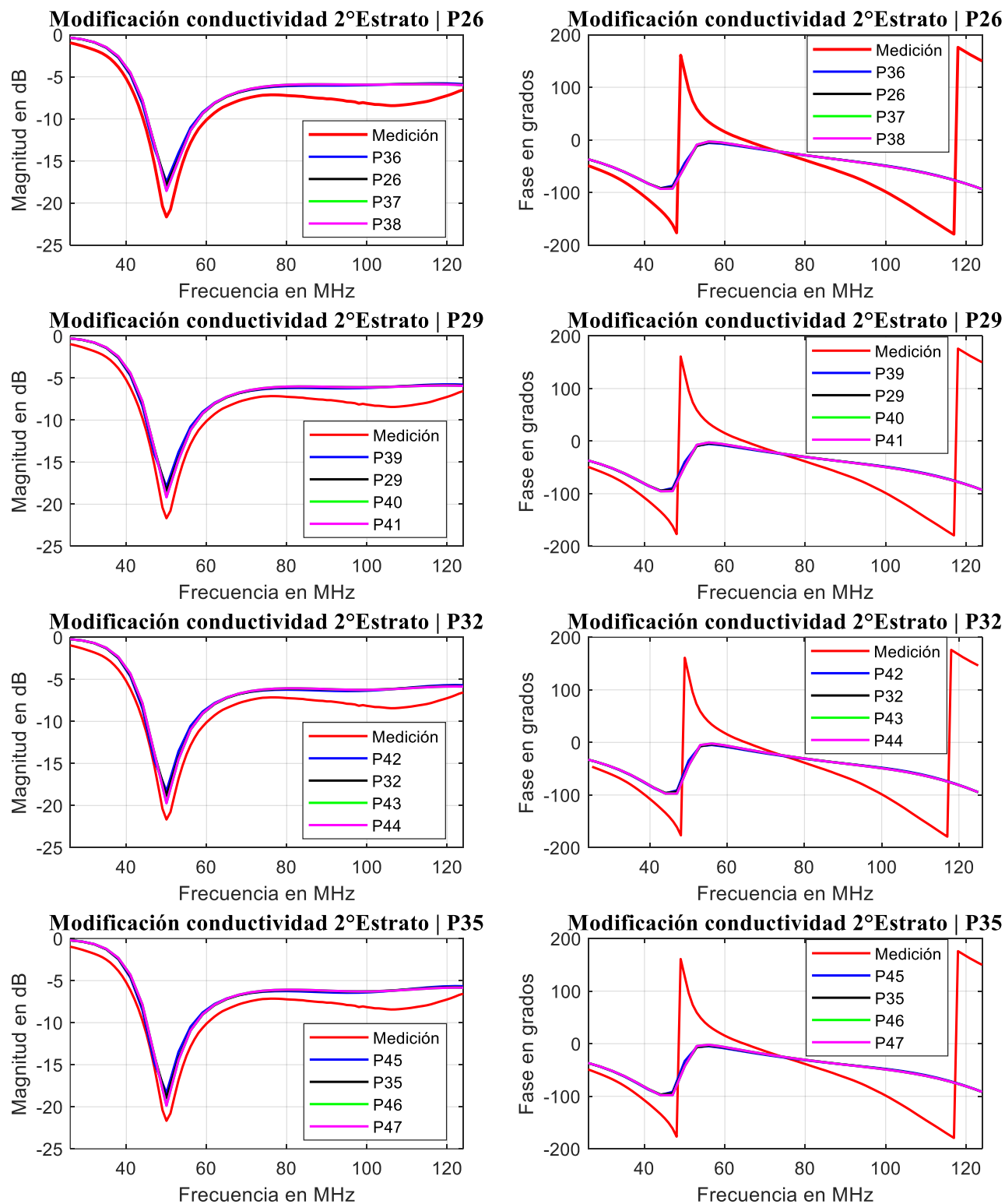


Fig. 6.9 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad eléctrica al segundo estrato de las pruebas 26, 29, 32 y 35

En la figura 6.9 se aprecia que el coeficiente de reflexión en los 50 MHz disminuye a medida que la conductividad del segundo estrato lo hace. También se observa que la prueba 47 es la más cercana al valor de -21.7 dB de la medición, con un valor en el peak de -19.88 dB. A continuación, se presentan los valores de la mencionada prueba que corresponde a la seleccionada para seguir ajustando.

Tabla 6.10 Parámetros de prueba 47

Parámetro	Primer Estrato	Segundo Estrato
Permitividad relativa	1	75
Conductividad eléctrica (S/m)	0.0003333	0.00125
Espesor (m)	1	∞

Hasta ahora, se han modificado la conductividad eléctrica y permitividad relativa de ambos estratos, obteniendo como mejor resultado la prueba 47 en lo que respecta a la magnitud. Sin embargo, en cuanto a la fase, incluso con todas las modificaciones realizadas, no se ha logrado optimizarla de buena manera. Esto significa que los valores usados del suelo no son los correctos. Por ende, se modificará el espesor del primer estrato.

Tabla 6.11 Modificaciones de espesor al primer estrato de la prueba 47

Prueba	Espesor primer estrato (m)
P47	1
P48	0.2
P49	0.3
P50	0.4
P51	0.5
P52	0.6
P53	0.7
P54	0.8
P55	0.9
P56	1.1
P57	1.2

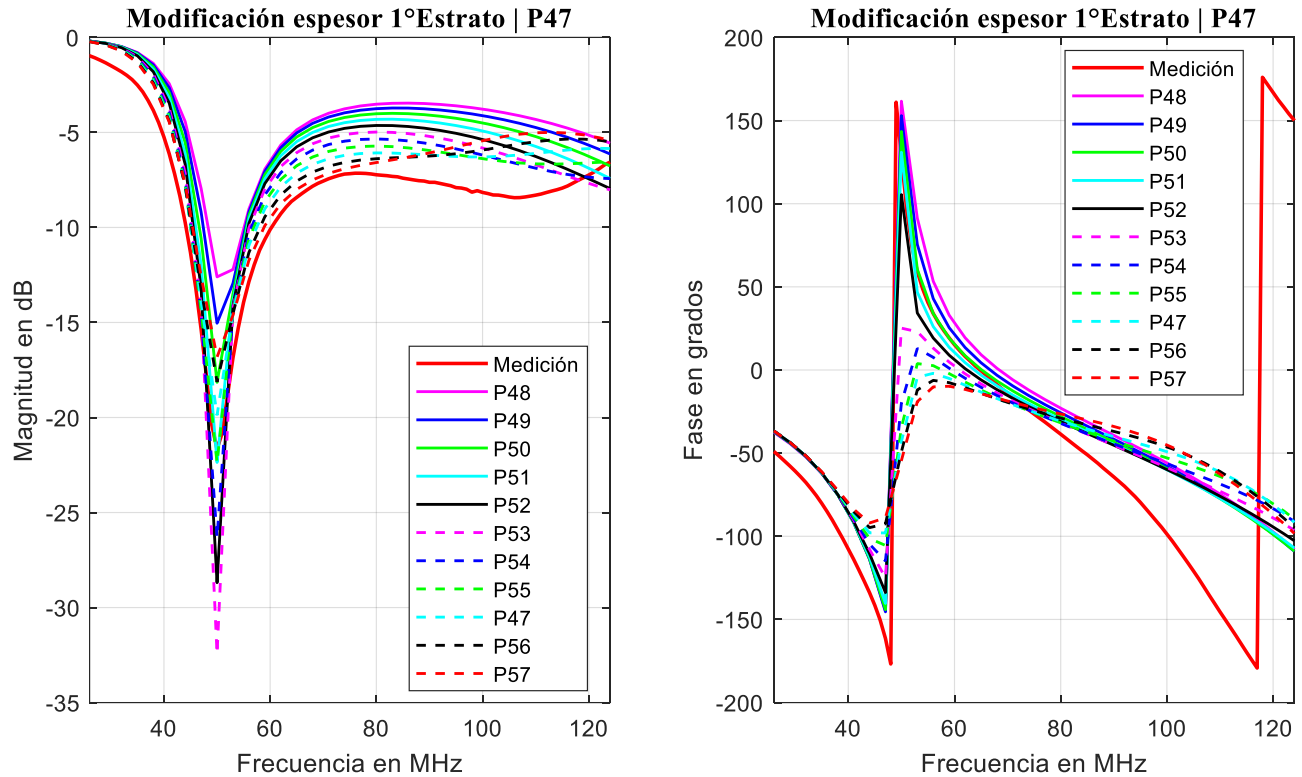


Fig. 6.10 Coeficiente de reflexión con modificaciones de espesor al primer estrato de la prueba 47

De la figura 6.10 complementada con la tabla 6.11, se tiene que para valores del espesor entre 0.2 m y 0.5 m (P48 a P51), la fase se ajusta de mejor manera la medición. Esto quiere decir, que el espesor del primer estrato es a lo menos un 50% menor de lo que se estipuló, desde las simulaciones preliminares. En cuanto a la forma de la magnitud y la fase, la mejor aproximación es la prueba 49 con un espesor de 0.3 m. Sin embargo, el peak de la magnitud del coeficiente de reflexión se aleja bastante de lo esperado, por tanto, se deben volver a ajustar los parámetros eléctricos del suelo.

Dado que los valores de la permitividad relativa de la prueba 47 mostrados en la tabla 6.10, son extremos (recordando que la permitividad del aire es 1 y del agua es 80), se probaran distintas combinaciones de permitividad.

Tabla 6.12 Modificaciones de permitividad de la prueba 49

Prueba	Permitividad relativa Primer Estrato	Permitividad relativa Segundo Estrato
P49	1	75
P58	5	75
P59	1	30
P60	5	30
P61	5	50
P62	10	30

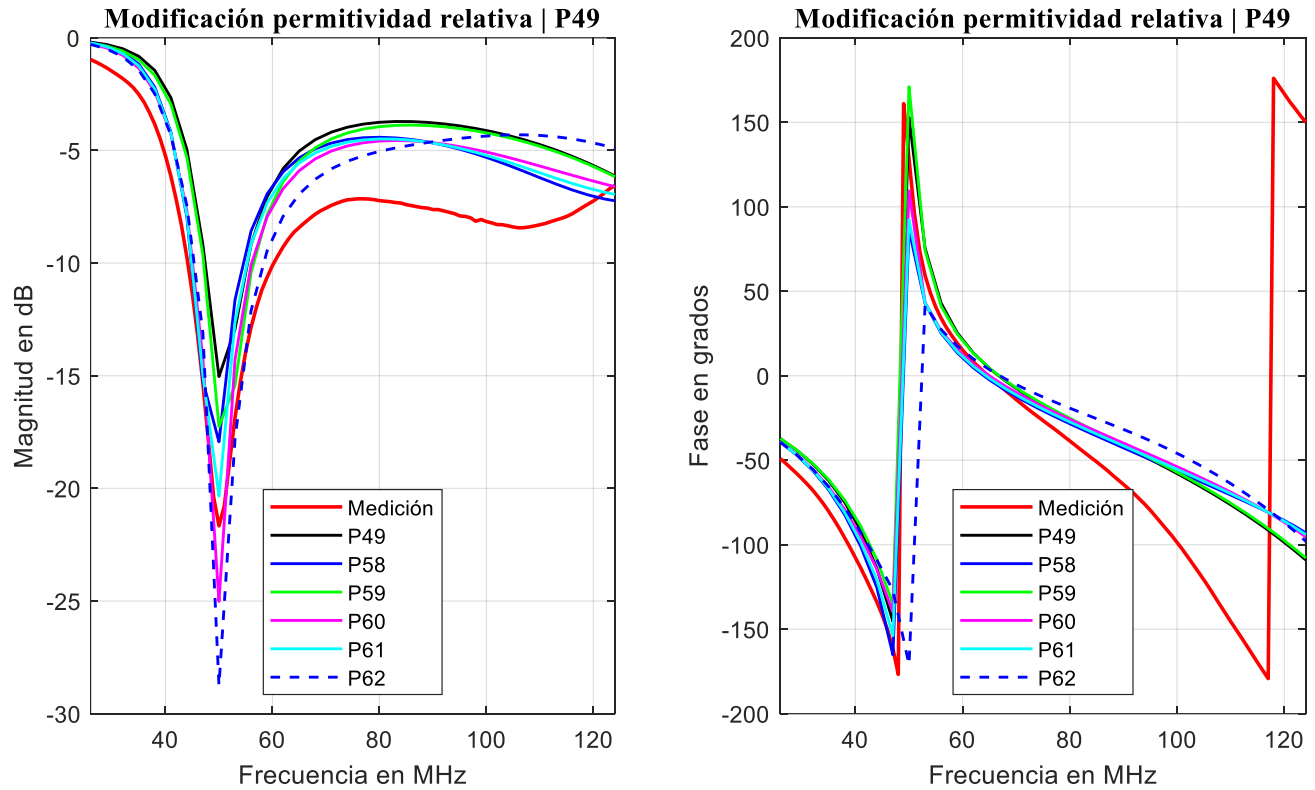


Fig. 6.11 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad de la prueba 49

De la figura anterior, se tiene que la opción que mejor se ajusta a la magnitud y fase del coeficiente de reflexión es la prueba número 60. Además, al comparar las pruebas 58, 60 y 61, que tienen la misma permitividad relativa del primer estrato, pero varía la del segundo, se aprecia que mientras mayor es la permitividad relativa del segundo estrato, el peak del coeficiente de reflexión aumenta en los 50 MHz. Lo anterior, es lo inverso a lo presentado en la figura 6.8. En consecuencia, el efecto de la permitividad relativa en el coeficiente de reflexión, se comporta de diferentes formas dependiendo del espesor del primer estrato.

A continuación, se realizan modificaciones en la conductividad de la prueba 60.

Tabla 6.13 Modificaciones de conductividad de la prueba 60

Prueba	Conductividad eléctrica Primer Estrato (S/m)	Conductividad eléctrica Segundo Estrato (S/m)
P60	0.0003333	0.00125
P63	0.003	0.00125
P64	0.0003333	0.0125
P65	0.003	0.0125
P66	0.003	1

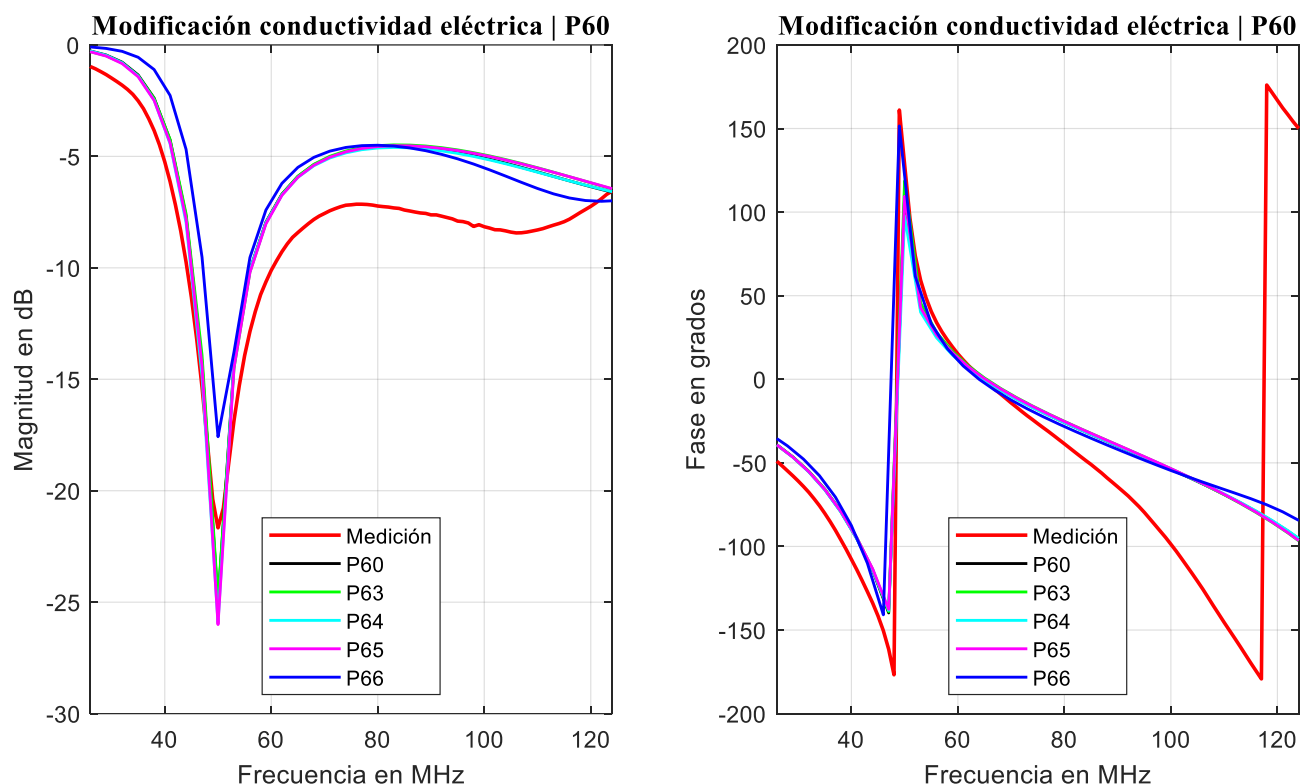


Fig. 6.12 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad de la prueba 60

En la figura 6.12 se aprecia que la curva que más se aproxima a la medición, tanto en magnitud como en fase, corresponde a la prueba 66. Por otro lado, al analizar las pruebas 63, 65 y 66 de la tabla 6.13 y la reciente figura, no se presenta una relación en el coeficiente de reflexión producida por la modificación de la conductividad del segundo estrato, como si ocurría con la figura 6.9 donde la magnitud decrecía si la conductividad lo hacía.

Posteriormente, se realizan ajustes en la permitividad, tanto del primer como del segundo estrato, a la prueba 66.

Tabla 6.14 Modificaciones de permitividad de la prueba 66

Prueba	Permitividad relativa Primer Estrato	Permitividad relativa Segundo Estrato
P66	5	30
P67	3	30
P68	8	30
P69	10	30
P70	5	20
P71	5	40
P72	5	50

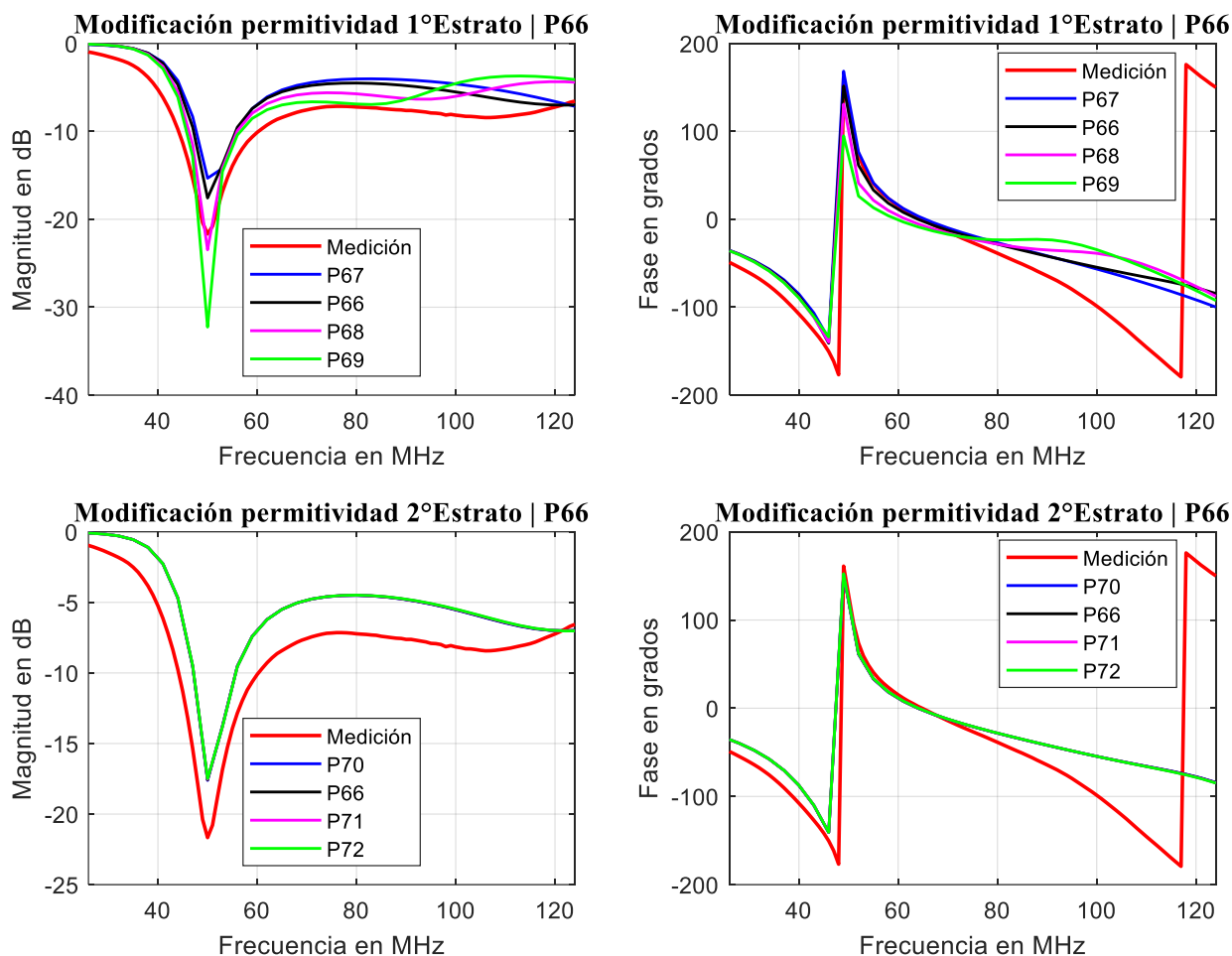


Fig. 6.13 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad de la prueba 66

Por un lado, se observa el gran efecto en el coeficiente de reflexión que genera la permitividad relativa del primer estrato, generando curvas totalmente distintas, aunque se aumente y/o disminuya en una o dos unidades. Por otro lado, la permitividad del segundo estrato no presenta diferencias significativas en un rango de valores entre 20 y 50. En consecuencia, en la mejor opción se mantiene la prueba 66 y se procede con realizar modificaciones en la conductividad del segundo estrato.

Tabla 6.15 Modificaciones de conductividad al segundo estrato de la prueba 66

Prueba	Conductividad eléctrica Segundo Estrato (S/m)
P66	1
P73	0.5
P74	1.5
P75	2

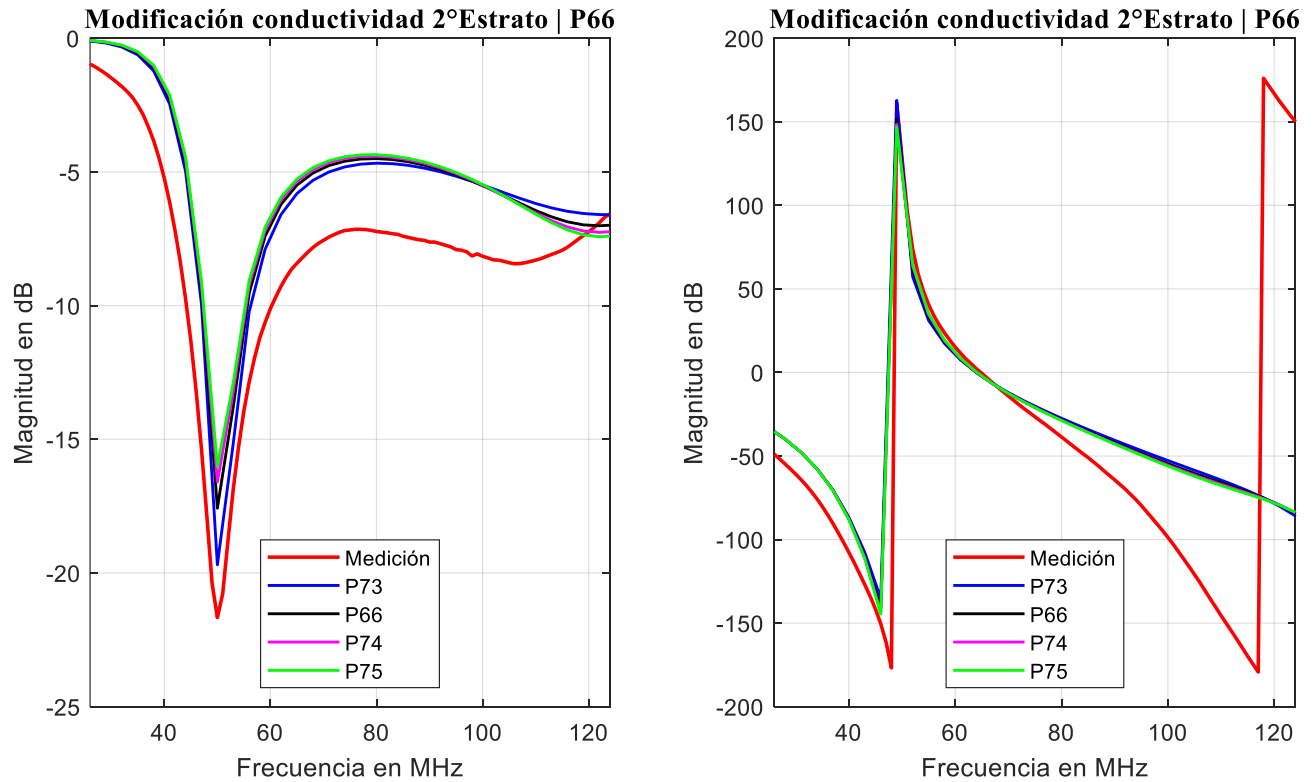


Fig. 6.14 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad al segundo estrato de la prueba 66

En la figura 6.14 se aprecia que la mejor opción es la que posee menor conductividad, correspondiendo a la prueba 73. Se observa la misma relación que en la figura 6.9 y teniendo en cuenta los resultados de la figura 6.12, se tiene que no es posible establecer un patrón que se vea reflejado en el coeficiente de reflexión al modificar la conductividad del segundo estrato, si no, que esto varía dependiendo de los valores del resto de los parámetros eléctricos del suelo.

En las figuras 6.13 y 6.14 se modificó la permitividad de ambos estratos y la conductividad del segundo, respectivamente, por tanto, queda ajustar la conductividad del primero.

Tabla 6.16 Modificaciones de conductividad al primer estrato de la prueba 73

Prueba	Conductividad eléctrica Primer Estrato (S/m)
P73	0.003
P76	0.00034
P77	0.0005
P78	0.001
P79	0.002
P80	0.0025

P81	0.005
P82	0.01
P83	0.03

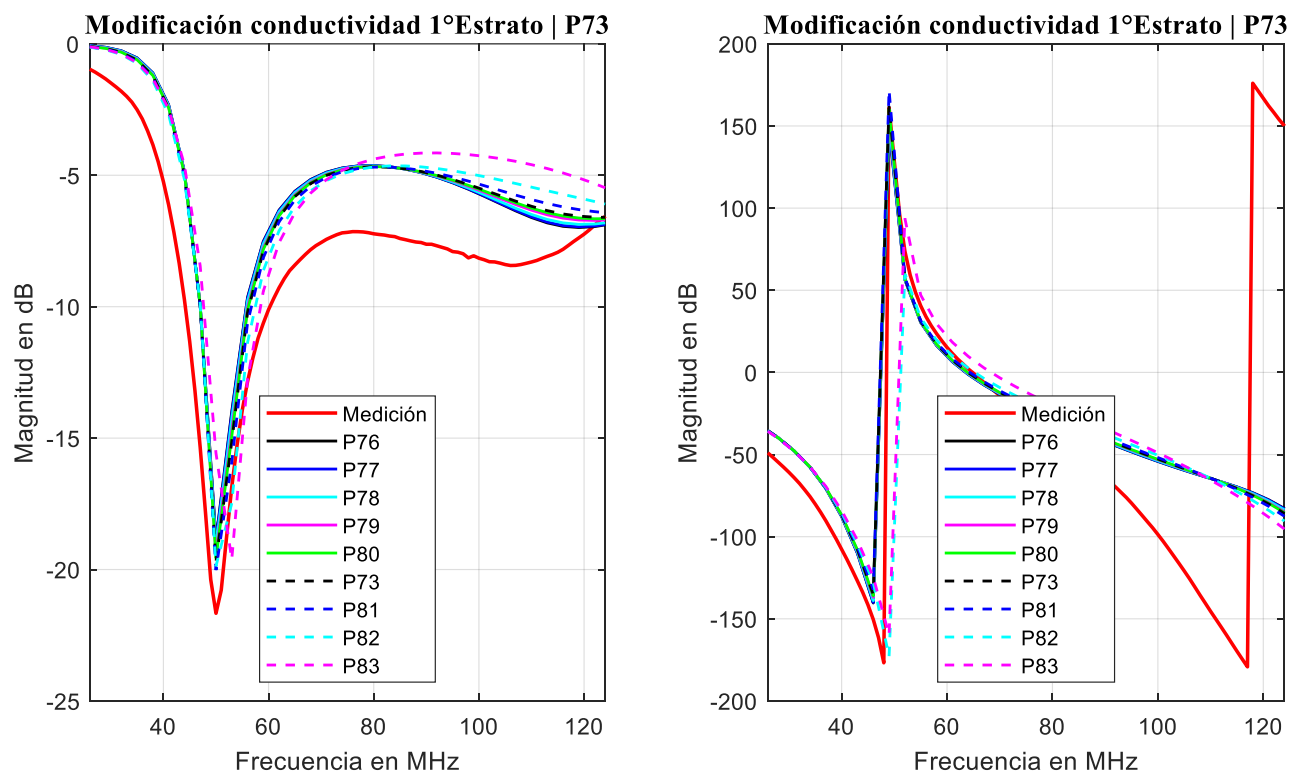


Fig. 6.15 Coeficiente de reflexión con modificaciones de conductividad al primer estrato de la prueba 73

De la reciente figura, se rescatan las pruebas 80 y 81, además se mantiene la prueba 73 como una buena opción. Al haber modificado la conductividad y permitividad de ambos estratos, se opta por ajustar de forma más minuciosa el espesor de la primera capa que estaba fijado en 0.3 m.

Tabla 6.17 Modificaciones de espesor al primer estrato de las pruebas 80, 73 y 81

Prueba	Espesor primer estrato (m)
P80	0.3
P84	0.25
P85	0.32
P86	0.35
P73	0.3
P87	0.25
P88	0.32
P89	0.35

P81	0.3
P90	0.25
P91	0.32
P92	0.35

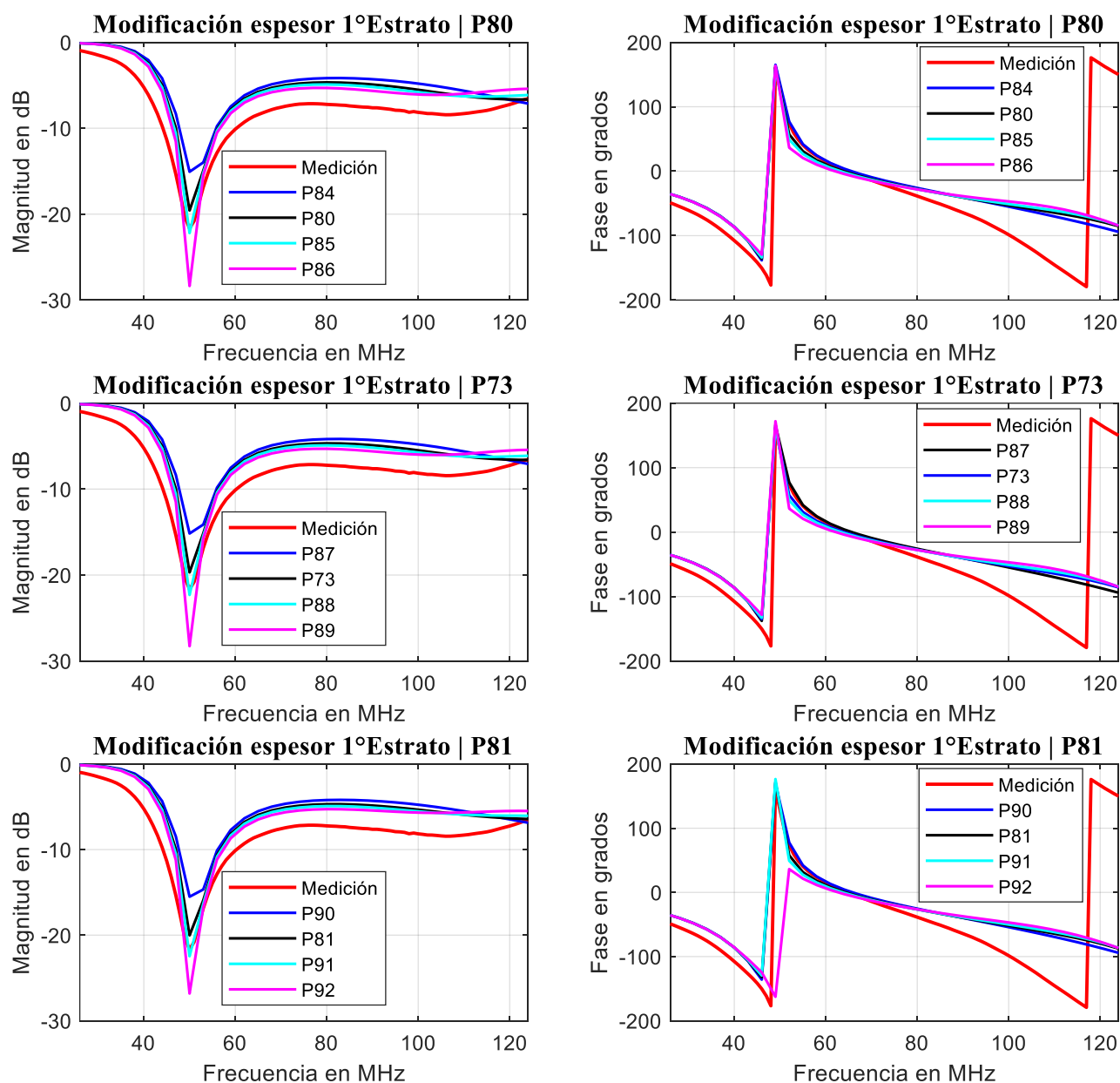


Fig. 6.16 Coeficiente de reflexión con modificaciones de espesor al primer estrato de las pruebas 80, 73 y 81

En la figura 6.16 se exhibe que, para las 3 pruebas, las cuales tienen distinto valor en la conductividad del primer estrato, el mejor ajuste ocurre con un espesor de 0.32 m, lo que corresponde

a las pruebas 85, 88 y 91. Sin embargo, de ellas, la prueba 85 es la que se acerca más a los peak, tanto de la magnitud como de la fase.

A modo de resumen, luego de realizar 92 pruebas, la opción que mejor se ajusta a la medición y que describiría de forma más cercana las características del suelo, es la prueba 85 que tiene los siguientes valores en sus parámetros.

Tabla 6.18 Parámetros de prueba 85

Parámetro	Primer Estrato	Segundo Estrato
Permitividad relativa	5	30
Conductividad eléctrica (S/m)	0.0025	0.5
Espesor (m)	0.32	∞

Como se ha visto a través de este capítulo, si el espesor del primer estrato es distinto, también lo es la respuesta del coeficiente de magnitud ante cambios en la permitividad y conductividad. Por lo tanto, con el nuevo espesor se comenzará con modificar la permitividad relativa de ambos estratos.

Tabla 6.19 Modificaciones de permitividad de la prueba 85

Prueba	Permitividad relativa Primer Estrato	Permitividad relativa Segundo Estrato
P85	5	30
P93	4	30
P94	6	30
P95	5	25
P96	5	35
P97	5	40

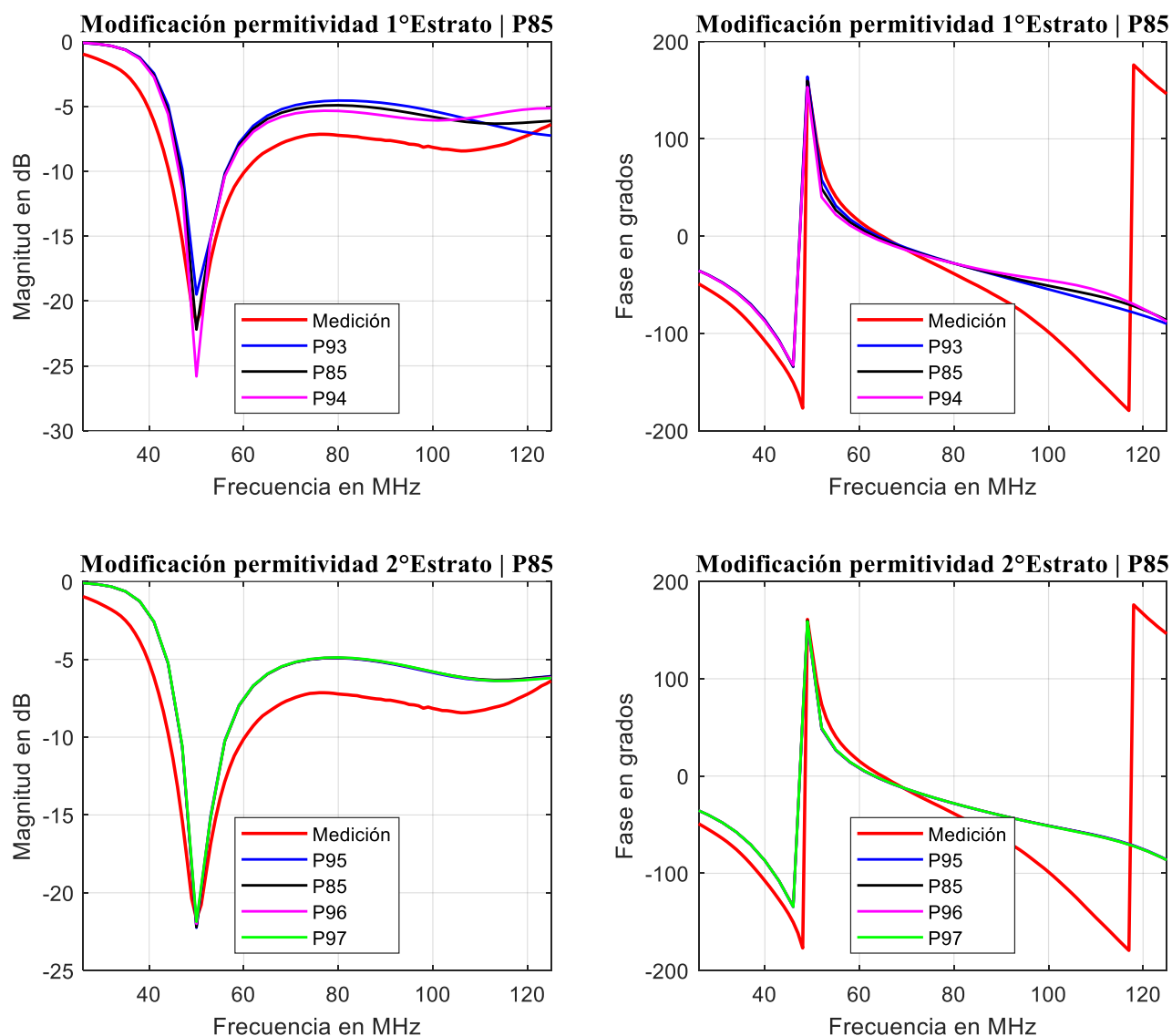


Fig. 6.17 Coeficiente de reflexión con modificaciones de permitividad de la prueba 85

Al igual que en la figura 6.13, la permitividad del primer estrato causa un mayor cambio en el coeficiente de reflexión, aún cuando esta se acrecentó y disminuyó solo una unidad versus la permitividad del segundo estrato que se aumentó hasta 10 unidades, pero produciendo variaciones leves. A pesar de los pequeños cambios que genera la permitividad del segundo estrato, la mejor opción es la prueba 97, en la que su magnitud está a 0.13 dB de la medición.

Tabla 6.20 Parámetros de prueba 97

Parámetro	Primer Estrato	Segundo Estrato
Permitividad relativa	5	40
Conductividad eléctrica (S/m)	0.0025	0.5
Espesor (m)	0.32	∞

6.3.3 Simulación final

Si bien tras realizar los cambios en la permitividad de la tabla 6.19 que se vieron reflejados en la figura 6.17, la prueba 97 se acerca a lo deseado, se continuó ajustando levemente las conductividades de la primera y segunda capa con el fin de disminuir la brecha de 0.13 dB. De donde se obtuvieron los siguientes valores como los finales de los parámetros eléctricos del suelo.

Tabla 6.21 Parámetros simulación final

Parámetro	Primer Estrato	Segundo Estrato
Permitividad relativa	5	40
Conductividad eléctrica (S/m)	0.0022	0.53
Espesor (m)	0.32	∞

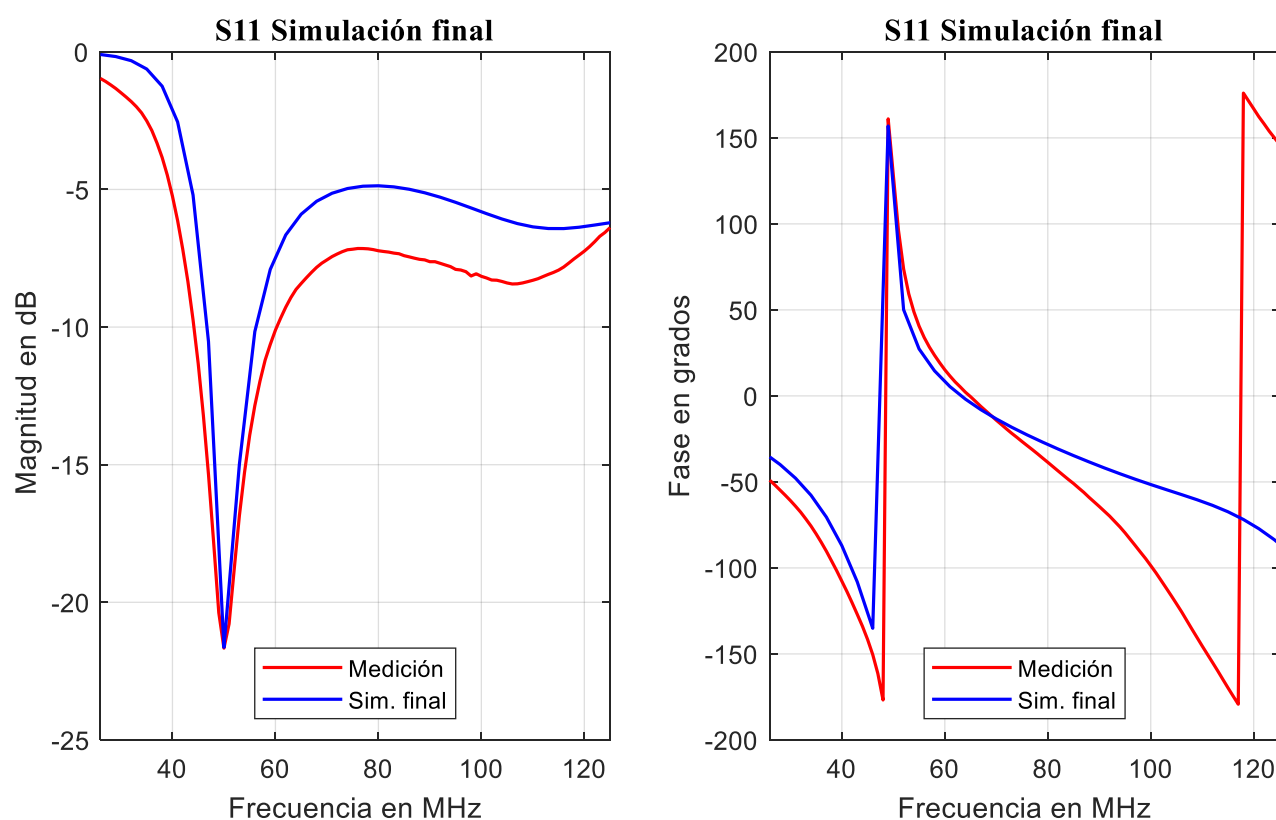


Fig. 6.18 Coeficiente de reflexión de simulación final

En la simulación de la figura 6.18, la diferencia con la medición en el peak de la magnitud es de solo 0.03 dB.

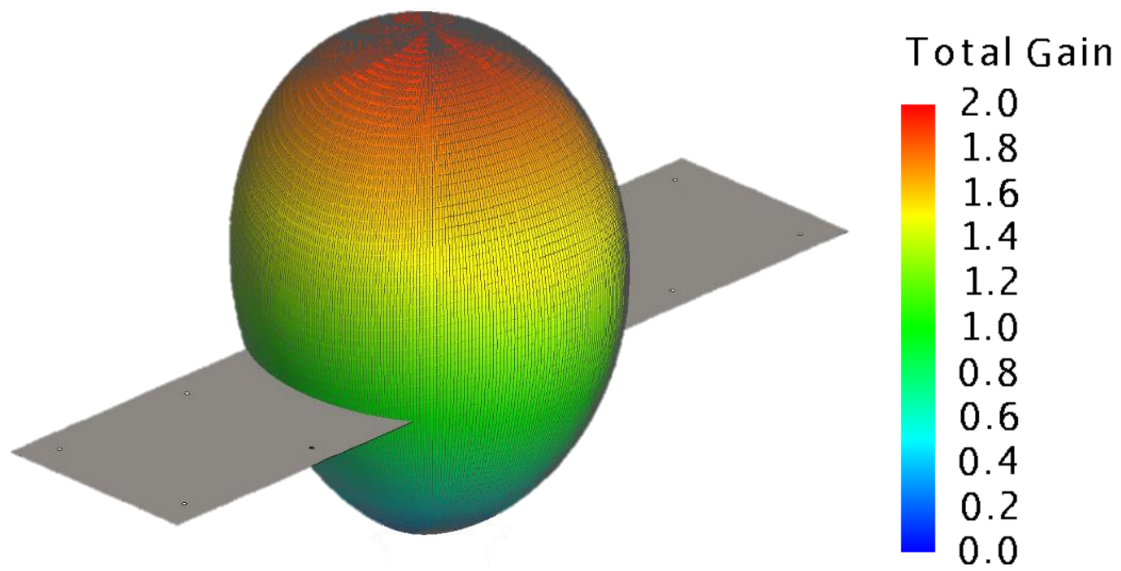
De la tabla 6.21 se tiene un primer estrato que se puede contemplar como relativamente seco de acuerdo a sus valores de conductividad y permitividad, y un segundo estrato mucho más conductor, lo que puede indicar que el suelo de esta segunda capa, está más húmedo debido a la presencia o

cercanía con agua de mar. Sin embargo, en la realidad, es posible que exista un tercer estrato que tenga mucha más intrusión salina o que efectivamente sea agua, esto recordando que el punto donde se realizó la medición está a unos 20 metros aproximadamente del mar.

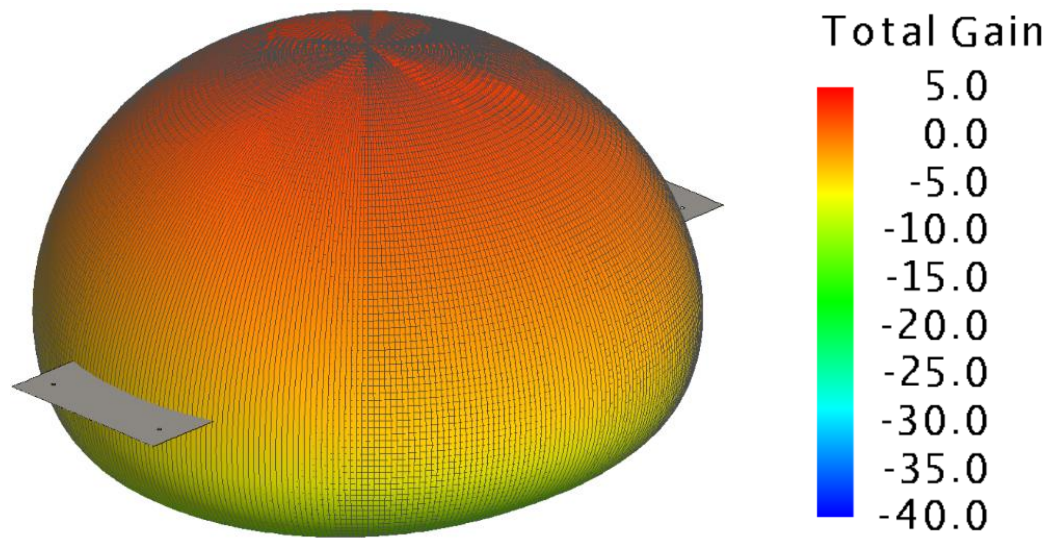
Por otro lado, el valor de la conductividad del primer estrato de la simulación final tiene un valor similar al reportado en el SEV 14 en la tabla 6.2. Si bien, los sondeos eléctricos verticales sirvieron como punto de inicio y también para realizar una comparación final en cuanto a la resistividad, en lo que respecta a la permitividad relativa, la información sobre sus valores es desconocida hasta ahora. Como se ha reportado en este capítulo, la permitividad del primer estrato genera cambios considerables en las curvas del coeficiente de reflexión.

Por lo anterior y sabiendo que los valores presentados en la tabla 6.21 fueron resultado de un intento de optimizar el coeficiente de reflexión de forma manual y que muy probablemente sean una aproximación de los valores reales del suelo, es que se puede considerar al resultado de la figura 6.18 como correcto.

A continuación, se presenta el diagrama de radiación de la antena en veces y en decibeles obtenido con la simulación final.



(a)



(b)

Fig. 6.19 Diagrama de radiación de simulación final

(a) En veces (b) En decibels

Para visualizar de mejor forma el cambio en el coeficiente de reflexión, se compara la simulación final con la preliminar de dos estratos.

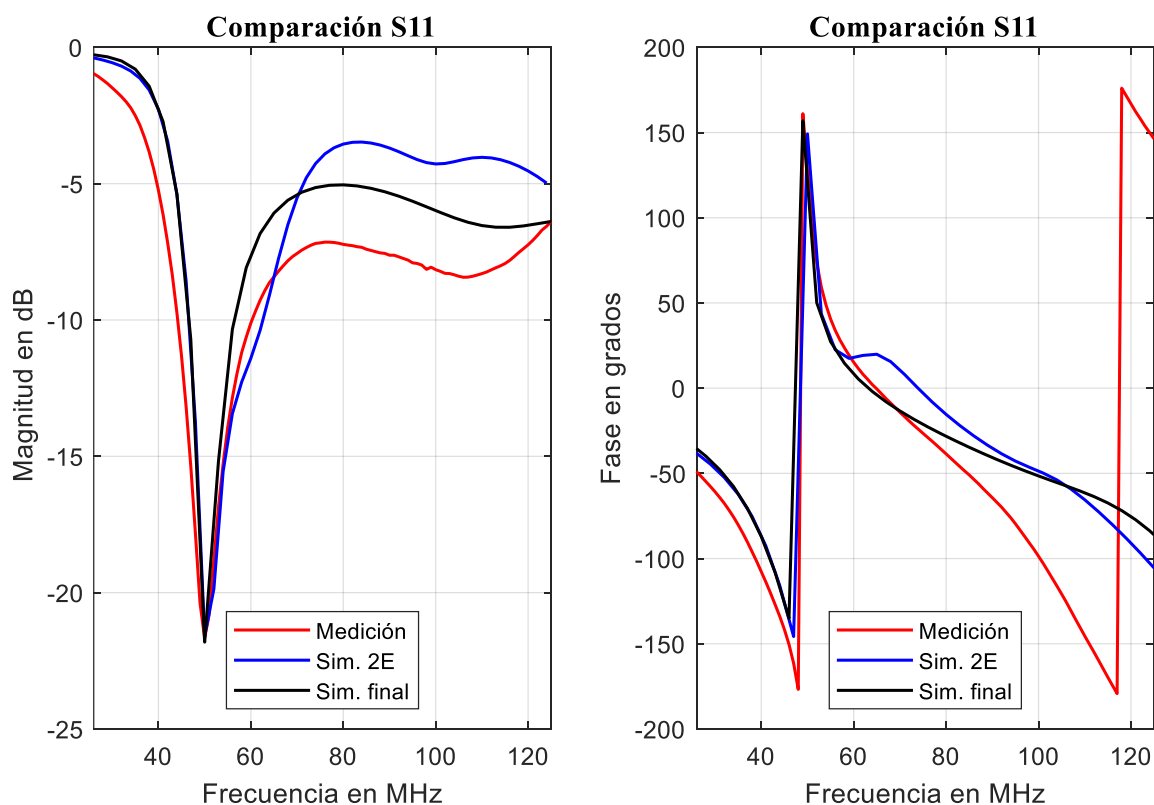


Fig. 6.20 Coeficiente de reflexión con comparación de simulación preliminar y final

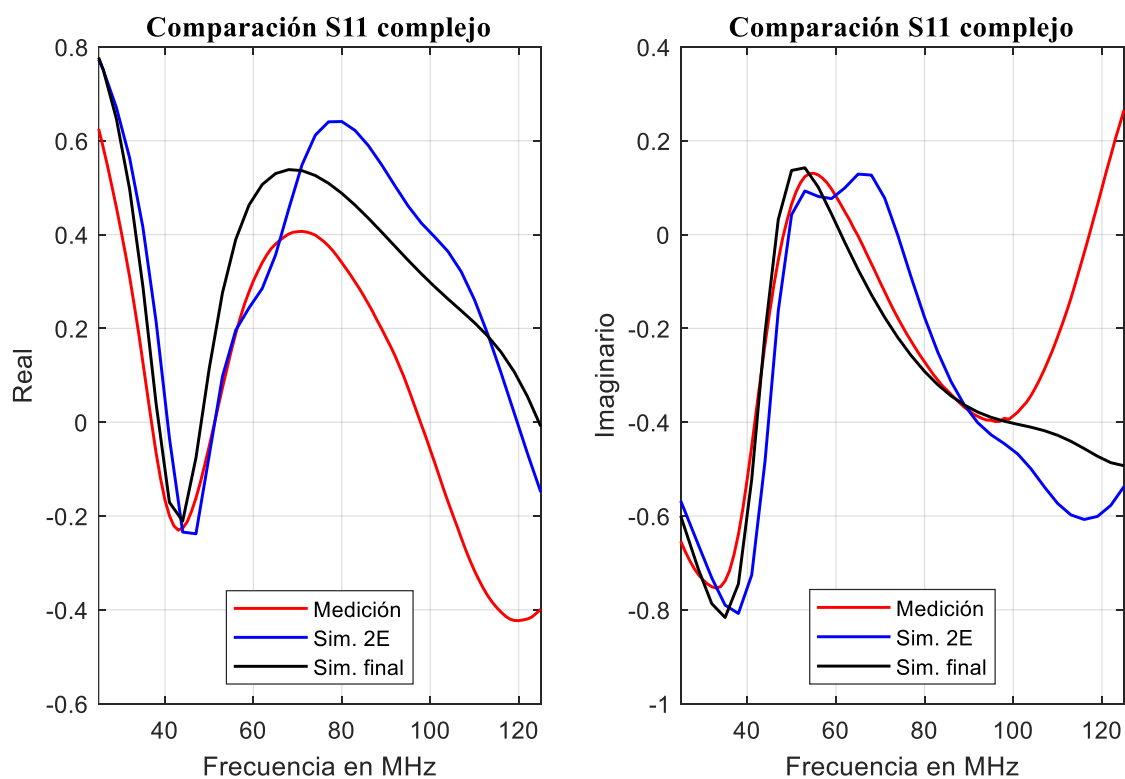


Fig. 6.21 Coeficiente de reflexión en complejo con comparación de simulación preliminar y final

En la figura 6.20 y 6.21 se aprecia una evidente mejora entre la simulación preliminar y la final. Al comparar con la simulación preliminar de dos estratos, las mayores diferencias radican en la permitividad del primer estrato, que paso de ser 13.5 a 5 y el espesor de la primera capa, el cual disminuyo 0.68 m.

Con el fin de obtener un resultado teórico de la evolución de las simulaciones, se decidió calcular el error cuadrático medio (ECM) a través de Matlab. El ECM es una métrica útil para evaluar el rendimiento de un modelo predictivo en comparación con los valores reales. En este caso, se obtendrá el ECM tanto de la simulación preliminar de 2 estratos como de la simulación final con respecto a la medición.

Tabla 6.22 Error cuadrático medio

ECM	Simulación 2 estratos	Simulación final
Real	0.1029	0.0826
Imaginario	0.0810	0.0496

La tabla 6.22 deja en evidencia que con la simulación final se tiene una disminución aproximada del 20% en la parte real y de 39% en la parte imaginaria con respecto a la simulación preliminar de 2 estratos.

Capítulo 7. Conclusiones

7.1. Sumario

Inicialmente, se realizó un análisis bibliográfico, con el fin de comprender de mejor forma la evolución del universo, la relevancia de la línea de 21 cm de hidrógeno neutro, los instrumentos alrededor del mundo que han intentado detectar esta señal y principalmente el funcionamiento y diseño del radiotelescopio MIST.

En lo que respecta a la construcción de la antena, se comenzó con el estudio de su diseño para obtener información detallada sobre los materiales utilizados y sus dimensiones. Posteriormente, se llevó a cabo una búsqueda de empresas en Chile que pudieran cumplir con los requisitos específicos que se necesitaban. Una vez realizadas las compras correspondientes, se procedió con el corte de los materiales que lo necesitaban, como los espirales de plásticos y los perfiles de fibra de vidrio. Luego, se realizó el ensamblaje de todos los componentes adquiridos que conforman la antena.

En cuanto a las mediciones del coeficiente de reflexión, se inició realizando mediciones dentro del Campus San Andrés de la UCSC y en Caleta Lenga de la comuna de Hualpén, con el nanoVNA y el cable que el instrumento tiene por defecto. Luego, se incorporó un cable de 20 m, para lo que fue necesario aprender a calibrar de forma correcta el instrumento. A continuación, se realizaron las mediciones finales en la ruta interportuaria de la comuna de Talcahuano, en el sector cuatro canchas de la comuna de Hualpén y en el Parque Bicentenario de la comuna de Concepción.

Finalmente, las simulaciones se hicieron solo con respecto a la medición de Talcahuano debido al tiempo que demoraba cada una de ellas. En primera instancia, se hicieron teniendo como referencia los valores informados por los SEV. Posteriormente se comenzó a variar los parámetros eléctricos del suelo, optimizando y eligiendo la opción que más se acercara a la medición. Para luego, volver a realizar modificaciones hasta lograr que se ajustara lo más posible, tanto en magnitud como en fase del coeficiente de reflexión.

7.2. Conclusiones

La antena cumple con las especificaciones técnicas establecidas, como una altura de 50 cm, una separación de 2 cm entre las placas de aluminio y una inclinación ajustable a 0° , lo que indica que el proceso de construcción fue exitoso y que la antena satisface los criterios deseados.

Los resultados del coeficiente de reflexión son distintos para cada sitio, lo cual es debido a las diferencias en los parámetros eléctricos de cada suelo donde fueron tomadas las respectivas mediciones y a la influencia que estos generan en el S_{11} . A pesar de ser distintos, tienen dos similitudes. La primera es que la principal característica resonante ocurre alrededor de los 50 MHz. La segunda es que los tres coeficientes de reflexión son negativos, lo que indica que existen bajas pérdidas por reflexión, puesto que una gran parte de las ondas incidentes son transmitidas hacia el receptor. Estos últimos dos puntos también se reportaron de las observaciones que el radiotelescopio MIST ha realizado hasta la fecha en sitios de América del norte.

En lo que respecta a la variación de la permitividad relativa y la conductividad eléctrica de los estratos, no es posible establecer un patrón que se mantenga en el resultado del coeficiente de reflexión como causa/consecuencia. En cuanto a la simulación final, esta se logra acercar a la medición con valores en sus parámetros que tienen coherencia con las características del sitio y con lo indicado en los SEV. Sin embargo, no es idéntica debido a que no son los valores exactos y como se ha demostrado en este informe, la permitividad y conductividad generan un gran efecto en el coeficiente de reflexión, donde en ocasiones al aumentar alguna de ellas en una unidad, cambiaban completamente las curvas.

Del diagrama de radiación de la simulación final se observa que el peak de la ganancia ocurre en el cenit, lo que justamente es una de las características de diseño de la antena.

Finalmente, por los puntos recién mencionados y las semejanzas con la información que ha reportado MIST sobre sus observaciones celestes, es posible validar la antena construida en el LAIM.

7.3. Trabajo Futuro

- Agregar el receptor del radiotelescopio a la antena y realizar observaciones científicas desde el norte de Chile.
- Crear un método de optimización para ajustar los valores de permitividad y conductividad de forma digital en el software FEKO.

Bibliografía

- [1] A. Suárez, “Estudio de RFI en sitios del norte de Chile con MARI-UCSC para instalar un radiotelescopio de baja frecuencia”, Tesis de pregrado, Departamento de física, Universidad de Concepción, Concepción, 2016.
- [2] J. R. Pritchard and A. Loeb, “Constraining the unexplored period between the dark ages and reionization with observations of the global 21 cm signal”, *Physical Review D*, vol. 82, 023006, 2010
- [3] S. R. Furlanetto, S. P. Oh and F. H. Briggs, “Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe”, *Physics Reports*, vol. 433, pp. 181-301, 2006.
- [4] C. Cain, A. D’Aloisio, N. Gangolly and G.D. Becker, “A Short Mean Free Path at $z = 6$ Favors Late and Rapid Reionization by Faint Galaxies”, *Astrophysical J. Lett.*, vol. 917, no. 2, p. L37, 2021.
- [5] Y. Qin, A. Mesinger, S. E. I. Bosman and M. Viel, “Reionization and galaxy inference from the high-redshift Ly α ”, *MNRAS*, vol. 506, no. 2, pp. 2390-2407, 2021.
- [6] J. R. Pritchard and A. Loeb, “Evolution of the 21 cm signal throughout cosmic history”, *Physical Review D*, vol. 78, no. 10, 2008.
- [7] S. R. Furlanetto, “The global 21-centimeter background from high redshifts ”, *MNRAS*, vol. 371, no. 2, pp. 867-878, 2006.
- [8] L. Philip et al, “Probing radio intensity at high- z from marion: 2017 instrument”, *Journal of Astronomical Instrumentation*, vol. 8, no 2, 1950004, 2019.
- [9] J. Bowman, A. E. E. Rogers, R. A. Monsalve, T. J. Mozdzen and N. Mahesh, “An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum”, *Nature*, vol. 555, no.7694, pp. 67-70, 2018.
- [10] D. C. Price et al, “Design and characterization of the Large-aperture Experiment to Detect the Dark Age (LEDA) radiometer systems”, *MNRAS*, vol. 478, no. 3, pp. 4193-4213, 2018.
- [11] R. Subrahmanyan et al, “SARAS 3 CD/EoR radiometer: design and performance of the receiver”, *Experimental Astronomy*, vol. 51, pp. 193-234, 2021.

- [12] A. Cardama, L. Jofre, J. M. Rius, J. Romeu and S. Blanch, M. Ferrado, *Antenas*. 2da ed. Barcelona: Edicions UPC, 2002.
- [13] T. L. Wilson, K. Rohlfs and S. Hüttemeister, *Tools of Radio Astronomy*. Germany: Springer, 2009.
- [14] 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.
- [15] J. Bará, *Ondas electromagnéticas en comunicaciones*. Barcelona: Edicions UPC, 1999.
- [16] R. A. Monsalve et al, “Mapper of the IGM Spin Temperature (MIST): Instrument Overview”, doi:10.48550/arXiv.2309.02996. 2023.
- [17] R. Monsalve, “Mini-MIST Blade Antenna Frame Dimensions” Memo 58, 2021.
- [18] R. Monsalve, “Blade Dipole Antenna Above Soil Optimized at 50 MHz” Memo 33, 2020.
- [19] G. Figueroa, “Caracterización hidrogeológica de Talcahuano entre los 26°44’S y 73°08’W, Región del Biobío, Chile”, Tesis de pregrado, Departamento de ciencias de la tierra, Universidad de Concepción, Concepción, 2020,

Anexo A. Código utilizado en Matlab

```

%% Carga de datos obtenidos con el nanoVNA
[frecuencia,re1,im1] = importfile('Mag_cemento.S1P',3, 103);
[frecuencia,re2,im2] = importfile('Mag_pasto.S1P',3, 103);
[frecuencia,re3,im3] = importfile('Mag_azotea.S1P',3, 103);
[frecuencia,re4,im4] = importfile('Mag_playa.S1P',3, 103);
[frecuencia,re5,im5] = importfile('Mag_T.S1P',3, 103);
[frecuencia,re6,im6] = importfile('Mag_H.S1P',3, 103);
[frecuencia,re7,im7] = importfile('Mag_C.S1P',3, 103);
[frecuencia,re8,im8] = importfile('Mag_T2A.S1P',3, 103);
[frecuencia,re9,im9] = importfile('Mag_H2.S1P',3, 103);
[frecuencia,re10,im10] = importfile('Mag_C2.S1P',3, 103);
[frecuencia,re_ce,im_ce] = importfile('Mag_cableexterior.S1P',3, 103);
[frecuencia,re_ca,im_ca] = importfile('Mag_cableazotea.S1P',3, 103);
[frecuencia,re_ct,im_ct] = importfile('Mag_CT.S1P',3, 103);
[frecuencia,re_ch,im_ch] = importfile('Mag_CH.S1P',3, 103);
[frecuencia,re_cc,im_cc] = importfile('Mag_CC.S1P',3, 103);
[frecuencia,re_ct2,im_ct2] = importfile('Mag_CT2.S1P',3, 103);
[frecuencia,re_cable,im_cable] = importfile('Cable_calibrado.S1P',3, 103);

x = frecuencia/(1*10^6);

%% MEDICIONES PRELIMINARES CON CABLE DE 10 CM
%%Estacionamiento
Mcem = 20.*log10(sqrt(re1.^2+im1.^2)); %antena y cable
Mcem_cable = 20.*log10(sqrt(re_ce.^2+im_ce.^2)); %solo cable
MC = Mcem-Mcem_cable; %solo antenna

Fcem = atan2(im2, re2);
Fcem_cable = atan2(im_ce, re_ce);
FC = rad2deg(Fcem); FC_cable = rad2deg(Fcem_cable);
FCC = rad2deg(Fcem-Fcem_cable);

figure('Name','Parametro S11 Estacionamiento','NumberTitle','off','Color',[1 1 1])
subplot(1,2,1)
plot(x,Mcem,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,Mcem_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,MC,'r','LineWidth',1.5)
title('Magnitud Coeficiente de Reflexión | Estacionamiento','FontName','times new
roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-18 0])
legend('antena y cable','cable','antena')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(x,FC,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,FC_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,FCC,'r','LineWidth',1.5)
title('Fase Coeficiente de Reflexión | Estacionamiento','FontName','times new
roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')

```

```

%%PASTO
Mpas = 20.*log10(sqrt(re2.^2+im2.^2)); %antena y cable
Mcem_cable = 20.*log10(sqrt(re_ce.^2+im_ce.^2)); %solo cable
MP = Mpas-Mcem_cable; %solo antenna

Fpas = atan2(im2, re2);
Fcem_cable = atan2(im_ce, re_ce);
FP = rad2deg(Fpas);
FP_cable = rad2deg(Fcem_cable);
FPP = rad2deg(Fpas-Fcem_cable);

figure('Name','Parametro S11 PASTO','NumberTitle','off','Color',[1 1 1])
subplot(1,2,1)
plot(x,Mpas,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,Mcem_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,MP,'r','LineWidth',1.5)
title('Magnitud Coeficiente de Reflexión | Areas verdes','FontName','times new
roman','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-18 0])
legend('antena y cable','cable','antena')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(x,FP,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,FP_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,FPP,'r','LineWidth',1.5)
title('Fase Coeficiente de Reflexión | Areas verdes','FontName','times new
roman','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')

%%AZOTEA
Maz1 = 20.*log10(sqrt(re3.^2+im3.^2)); %antena y cable
Maz_cable = 20.*log10(sqrt(re_ca.^2+im_ca.^2)); % cable
MAzo1 = Maz1-Maz_cable; %antena

Faz1 = atan2(im3, re3);
Faz_cable = atan2(im_ca, re_ca);
FA1 = rad2deg(Faz1);
FA1_cable = rad2deg(Faz_cable);
FAA1 = rad2deg(Faz1-Faz_cable);

figure('Name','Parametro S11 AZOTEA','NumberTitle','off','Color',[1 1 1])
subplot(1,2,1)
plot(x,Maz1,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,Maz_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,MAzo1,'r','LineWidth',1.5)
title('Magnitud Coeficiente de Reflexión | Azotea','FontName','times new
roman','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')

```

```

xlim([25 125])
ylim([-18 0])
legend('antena y cable','cable','antena')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(x,FA1,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,FA1_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,FAA1,'r','LineWidth',1.5)
title('Fase Coeficiente de Reflexión | Azotea','FontName','times new roman','FontSize',
12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')

%%%% Lenga

Mpl2 = 20.*log10(sqrt(re4.^2+im4.^2)); %antena y cable
Mpl2_cable = 20.*log10(sqrt(re_ce.^2+im_ce.^2)); %cable
MP12 = Mpl2-Mpl2_cable; %antena

Fpl2 = atan2(im4, re4);
Fpl2_cable = atan2(im_ce, re_ce);

FP2 = rad2deg(Fpl2);
FP2_cable = rad2deg(Fpl2_cable);
FPP2 = rad2deg(Fpl2-Fpl2_cable);

figure('Name','Parametro S11 PLAYA 2','NumberTitle','off','Color',[1 1 1])
subplot(1,2,1)
plot(x,Mpl2,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,Mpl2_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,MP12,'r','LineWidth',1.5)
title('Magnitud Coeficiente de Reflexión | Lenga','FontName','times new
roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-18 0])
legend('antena y cable','cable','antena')
grid on
subplot(1,2,2)
plot(x,FP2,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,FP2_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,FPP2,'r','LineWidth',1.5)
title('Fase Coeficiente de Reflexión | Lenga','FontName','times new roman','FontSize',
12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')

%%%% Resumen mediciones preliminares
figure('Name','Parametro S11 RESUMEN','NumberTitle','off','Color',[1 1 1])
subplot(4,2,1)
plot(x,Mcem,'b','LineWidth',1.2)

```

```

hold on
plot(x, Mcem_cable, 'g', 'LineWidth', 1.8)
hold on
plot(x, MC, 'r', 'LineWidth', 1.5)
title('S11 Estacionamiento', 'FontName', 'times new roman', 'FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-18 0])
legend('antena y cable', 'cable', 'antena')
grid on
subplot(4, 2, 2)
plot(x, FC, 'b', 'LineWidth', 1.2)
hold on
plot(x, FC_cable, 'g', 'LineWidth', 1.8)
hold on
plot(x, FCC, 'r', 'LineWidth', 1.5)
title('S11 Estacionamiento', 'FontName', 'times new roman', 'FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable', 'cable', 'antena')
subplot(4, 2, 3)
plot(x, Mpas, 'b', 'LineWidth', 1.2)
hold on
plot(x, Mcem_cable, 'g', 'LineWidth', 1.8)
hold on
plot(x, MP, 'r', 'LineWidth', 1.5)
title('S11 Areas verdes', 'FontName', 'times new roman', 'FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-18 0])
legend('antena y cable', 'cable', 'antena')
grid on
subplot(4, 2, 4)
plot(x, FP, 'b', 'LineWidth', 1.2)
hold on
plot(x, FP_cable, 'g', 'LineWidth', 1.8)
hold on
plot(x, FPP, 'r', 'LineWidth', 1.5)
title('S11 Areas verdes', 'FontName', 'times new roman', 'FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable', 'cable', 'antena')
subplot(4, 2, 5)
plot(x, Maz1, 'b', 'LineWidth', 1.2)
hold on
plot(x, Maz_cable, 'g', 'LineWidth', 1.8)
hold on
plot(x, MAzo1, 'r', 'LineWidth', 1.5)
title('S11 Azotea', 'FontName', 'times new roman', 'FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-18 0])
legend('antena y cable', 'cable', 'antena')
grid on
subplot(4, 2, 6)
plot(x, FA1, 'b', 'LineWidth', 1.2)
hold on
plot(x, FA1_cable, 'g', 'LineWidth', 1.8)

```

```

hold on
plot(x,FAA1,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Azotea','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')
subplot(4,2,7)
plot(x,Mpl2,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,Mpl2_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,MP12,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Lenga','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-18 0])
legend('antena y cable','cable','antena')
grid on
subplot(4,2,8)
plot(x,FP2,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,FP2_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,FPP2,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Lenga','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')

%%% Al agregar el cable de 20 m.
MCABLE = 20.*log10(sqrt(re_cable.^2+im_cable.^2));

%%%TALCAHUANO
MT = 20.*log10(sqrt(re5.^2+im5.^2));
MT_cable = 20.*log10(sqrt(re_ct.^2+im_ct.^2));
M_T= MT-MT_cable;

FT = atan2(im5, re5);
FT_cable = atan2(im_ct, re_ct);

F_T = rad2deg(FT);
F_T_cable = rad2deg(FT_cable);
FTT = rad2deg(FT-FT_cable);

%%%HUALPEN
MH = 20.*log10(sqrt(re6.^2+im6.^2));
MH_cable = 20.*log10(sqrt(re_ch.^2+im_ch.^2));
M_H= MH-MH_cable;

FH = atan2(im6, re6);
FH_cable = atan2(im_ch, re_ch);

F_H = rad2deg(FH);
F_H_cable = rad2deg(FH_cable);
FHH = rad2deg(FH-FH_cable);

%%% Concepcion
MCCP = 20.*log10(sqrt(re7.^2+im7.^2));
MCCP_cable = 20.*log10(sqrt(re_cc.^2+im_cc.^2));
M_CCP= MCCP-MCCP_cable;

```

```

FCCP = atan2(im7, re7);
FCCP_cable = atan2(im_cc, re_cc);

F_C = rad2deg(FCCP);
F_C_cable = rad2deg(FCCP_cable);
F_CCP = rad2deg(FCCP-FCCP_cable);

%%% RESUMEN SIN CALIBRAR
figure('Name','Parametro S11 COMPARACION sin calibrar','NumberTitle','off','Color',[1 1
1])
subplot(3,2,1)
plot(x,MT,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,MT_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,M_T,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Talcahuano','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-35 0])
legend('antena y cable','cable','antena')
grid on
subplot(3,2,2)
plot(x,F_T,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,F_T_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,FTT,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Talcahuano','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')
subplot(3,2,3)
plot(x,MH,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,MH_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,M_H,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Hualpén','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-35 0])
legend('antena y cable','cable','antena')
grid on
subplot(3,2,4)
plot(x,F_H,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,F_H_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,FHH,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Hualpén','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')
subplot(3,2,5)
plot(x,MCCP,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,MCCP_cable,'g','LineWidth',1.8)

```

```

hold on
plot(x,M_CCP,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Concepción','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-35 0])
legend('antena y cable','cable','antena')
grid on
subplot(3,2,6)
plot(x,F_C,'b','LineWidth',1.2)
hold on
plot(x,F_C_cable,'g','LineWidth',1.8)
hold on
plot(x,F_CCP,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Concepción','FontName','times new roman','FontSize', 12)
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
xlim([25 125])
grid on
legend('antena y cable','cable','antena')

MT2A = 20.*log10(sqrt(re15.^2+im15.^2)); %calibrado con cable
FT2 = atan2(im15, re15);
F_TT = rad2deg(FT2);

MH2 = 20.*log10(sqrt(re17.^2+im17.^2)); %Calibrado con cable 20m
FH2 = atan2(im17, re17);
F_HH = rad2deg(FH2);

MCCP2 = 20.*log10(sqrt(re18.^2+im18.^2)); %Calibrado con cable 20m
FCCP2 = atan2(im18, re18);
F_CCP_2 = rad2deg(FCCP2);

%%% RESUMEN CON CABLE CALIBRADO
figure('Name','Parametro S11 Comparación 3ras mediciones','NumberTitle','off','Color',[1
1 1])
subplot(3,2,1)
plot(x,MT2A,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Talcahuano','FontName','times new roman','FontSize', 12)
grid on
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-25 0])
subplot(3,2,2)
plot(x,F_TT,'r','LineWidth',1.5)
title('S11 Talcahuano','FontName','times new roman','FontSize', 12)
grid on
xlim([25 125])
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
subplot(3,2,3)
plot(x,MH2,'b','LineWidth',1.5)
title('S11 Hualpén','FontName','times new roman','FontSize', 12)
grid on
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-25 0])
subplot(3,2,4)
plot(x,F_HH,'b','LineWidth',1.5)
title('S11 Hualpén','FontName','times new roman','FontSize', 12)

```

```

grid on
xlim([25 125])
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')
subplot(3,2,5)
plot(x,MCCP2,'k','LineWidth',1.5)
title('S11 Concepción','FontName','times new roman','FontSize', 12)
grid on
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
ylim([-25 0])
subplot(3,2,6)
plot(x,F_CCP_2,'k','LineWidth',1.5)
title('S11 Concepción','FontName','times new roman','FontSize', 12)
grid on
xlim([25 125])
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')

%%COMPARACION FINAL
figure('Name','Parametro S11 Comparación 3ras mediciones','NumberTitle','off','Color',[1
1 1])
subplot(1,2,1)
plot(x,MT2A,'r','LineWidth',1.5)
hold on
plot(x,MH2,'b','LineWidth',1.5)
hold on
plot(x,MCCP2,'k','LineWidth',1.5)
title('Comparación S11 Magnitud','FontName','times new roman','FontSize', 12)
legend('Thno','Hpn','Ccp')
grid on
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Magnitud en dB')
xlim([25 125])
subplot(1,2,2)
plot(x,F_TT,'r','LineWidth',1.5)
hold on
plot(x,F_HH,'b','LineWidth',1.5)
hold on
plot(x,F_CCP_2,'k','LineWidth',1.5)
title('Comparación S11 Fase','FontName','times new roman','FontSize', 12)
legend('Thno','Hpn','Ccp')
grid on
xlim([25 125])
xlabel('Frecuencia en MHz')
ylabel('Fase en grados')

```