

MODELO FUNCIONAL DE UNA ANTENA DE RECEPCIÓN PARA  
COMUNICACIÓN EN BANDA S CON EL SATÉLITE DE LA MISIÓN ESPACIAL  
LEOPAR/ANFA

Cristian Mauricio Ortega Martínez y David Alejandro Gonzalez Mateus

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

Director

Julián Gustavo Rodríguez Ferreira  
Doctorado en Física, Especialidad Astrofísica

Co-Director

Efrén Darío Acevedo Cárdenas  
Maestría en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingenierías  
Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

Este trabajo viene dedicado a cada una de las personas que a lo largo del desarrollo de este proyecto de investigación aportaron tiempo, esfuerzo y conocimiento a nuestro equipo. Dedicamos este logro como estudiantes a nuestros directores de proyecto, Julián Rodríguez y Efrén Acevedo, por el tiempo, conocimiento y habilidades que nos permitieron crecer como próximos profesionales. A la red tecnoparque nodo del SENA de Bucaramanga por permitirnos formar parte de su equipo y brindarnos los espacios para la ejecución del proyecto que fueron de vital importancia para el cumplimiento total de los objetivos. Además, a cada uno de los miembros de la Universidad Industrial de Santander, tanto como docentes y laboratoristas que nos brindaron los espacios para desarrollar el proyecto.

## **Agradecimientos**

En aquel y lejano 2017, cuando ponía un pie por primera vez en la universidad y veía un camino interminable, lleno de retos, pero también lleno de ilusiones y sueños, después de tanto empeño y dedicación puedo afirmar que se logró. No fue nada fácil llegar hasta este punto de mi vida y cumplir esta meta y no hubiese sido posible sin el apoyo de cada una de las personas que han estado en mi camino durante todos estos años. Quiero agradecer a mi familia por el apoyo incondicional que me han dado durante toda mi vida, a mi madre por todos los consejos cuando más los necesitaba y a mi padre por el apoyo incondicional para poder lograr mi sueño.

Gracias a todos mis amigos, compañeros y profesores de carrera, especialmente a mi gran amigo David, que durante toda la carrera estuvo ahí, con el cual viví un proceso de crecimiento personal y profesional, a mi mejor amiga Laura, que fue mi ancla y acompañamiento durante estos años, también sin olvidarme de cada una de las personas que conocí durante toda la carrera de las cuales aprendí muchas cosas, también de cada uno de los docentes que tuve el placer de tener, por sus enseñanzas llenas de sabiduría y experiencias.

Gracias de nuevo por su valioso apoyo.

**Cristian Mauricio Ortegon Martinez**

Aún recuerdo los primeros días en la universidad y era inimaginable llegar a este punto, después de tanto esfuerzo, desvelos y compromiso puedo decir que se logró. No ha sido tarea fácil cumplir esta meta y no hubiese podido sin el apoyo de cada persona que se ha cruzado en mi camino a lo largo de este proceso, por eso quiero aprovechar este pequeño espacio para agradecer primeramente a Dios por las habilidades que me ha regalado, los dones y la sabiduría, a mi familia por el apoyo emocional y económico que me han hecho sentir privilegiado. A mi padre que ha estado para apoyarme en cada parte de mi vida y ha entregado todo de sí para bendecir mi vida.

Gracias a mis amigos y compañeros de carrera, a mi novia Andrea, que a lo largo de estos años en la universidad estuvo a mi lado acompañándome en el proceso, me brindó sus consejos y cariño en todo momento, en especial a mi amigo de vida, carrera y tesis Cristian, con el que vivimos un proceso increíble y siempre estuvo para apoyarme y darme ánimo para continuar. Gracias a cada uno de los miembros de la universidad con los que tuve la dicha de compartir en algún momento de mi carrera, a los profesores que me enseñaron más allá de la ingeniería, los cuales me aportaron parte de su vida y experiencias para crecer como un profesional integral.

**David Alejandro Gonzalez Mateus**

## Tabla de Contenido

Introducción . . . . .	13
1 Objetivos. . . . .	15
1.1 Objetivo General . . . . .	15
1.2 Objetivos Específicos . . . . .	15
2 Introducción a las antenas . . . . .	16
2.1 Principales parámetros de las antenas . . . . .	16
2.1.1 <i>Patrón de radiación</i> . . . . .	16
2.1.2 <i>Ancho de banda</i> . . . . .	17
2.1.3 <i>Directividad</i> . . . . .	17
2.1.4 <i>Eficiencia</i> . . . . .	19
2.1.5 <i>Ganancia de la antena</i> . . . . .	19
2.1.6 <i>Impedancia de la antena</i> . . . . .	20
2.1.7 <i>Polarización</i> . . . . .	20
2.2 Antena Yagi-Uda . . . . .	20
2.2.1 <i>Caraterísticas y aplicaciones de la antena Yagi-Uda</i> . . . . .	21
2.2.2 <i>Geometría de la antena Yagi-uda</i> . . . . .	23
2.2.3 <i>Características de diseño de la antena yagi-Uda</i> . . . . .	24
2.2.4 <i>Componentes de la antena yagi-Uda</i> . . . . .	25
2.2.5 <i>Relación entre la ganancia y el ancho de haz de la antena yagi-Uda</i> . . . . .	26
2.2.6 <i>Consideraciones sobre la ganancia de una antena Yagi-Uda</i> . . . . .	26
2.3 Antena Helicoidal . . . . .	27
2.3.1 <i>Caraterísticas y aplicaciones de la antena helicoidal</i> . . . . .	28
2.3.2 <i>Estructura de la antena Helicoidal</i> . . . . .	29
2.3.3 <i>Modos de operación de la antena helicoidal</i> . . . . .	30
2.3.4 <i>Principales parámetros de la antena helicoidal</i> . . . . .	31
2.3.5 <i>Ganancia</i> . . . . .	32
2.3.6 <i>Impedancia</i> . . . . .	33
2.3.7 <i>Aplicaciones de la antena helicoidal</i> . . . . .	33
2.4 Antena Bocina . . . . .	34
2.4.1 <i>Características y aplicaciones de la antena bocina</i> . . . . .	35
2.4.2 <i>Características de la antena bocina cónica</i> . . . . .	36
2.4.3 <i>Estructura y geometría de la antena bocina cónica</i> . . . . .	37
3 Diseño y simulación de las antenas . . . . .	39
3.1 Diseño y simulación de la Yagi-Uda . . . . .	39
3.1.1 <i>Diseño teórico de la antena Yagi-uda</i> . . . . .	39

3.1.2	<i>Simulación de la antena yagi-Uda</i> . . . . .	42
3.1.3	<i>Parametrización de la antena yagi-Uda</i> . . . . .	42
3.2	Diseño y simulación de la antena helicoidal . . . . .	47
3.2.1	<i>Diseño teórico de la antena helicoidal</i> . . . . .	47
3.2.2	<i>Simulación de la antena helicoidal</i> . . . . .	49
3.2.3	<i>Estudio Paramétrico de la antena helicoidal</i> . . . . .	49
3.3	Diseño y simulación de la antena bocina . . . . .	55
3.3.1	<i>Diseño teórico de la antena bocina</i> . . . . .	55
3.3.2	<i>Simulación de la antena bocina</i> . . . . .	57
3.3.3	<i>Estudio paramétrico de la antena bocina</i> . . . . .	57
4	Construcción, caracterización y análisis de la Antena. . . . .	61
4.1	Elección de la antena para la construcción del prototipo . . . . .	61
4.2	Construcción de la antena helicoidal . . . . .	62
4.3	Proceso de caracterización . . . . .	65
4.3.1	Caracterización del prototipo sin el acoplador de impedancias . . . . .	66
4.3.2	Acoplador de impedancias . . . . .	69
4.3.3	Caracterización del prototipo con el acoplador de impedancias . . . . .	73
4.4	Análisis de resultados . . . . .	76
5	Conclusiones . . . . .	80
6	Recomendaciones . . . . .	82
7	Trabajo Futuro . . . . .	83
	Referencias Bibliográficas . . . . .	86
	Apéndices . . . . .	87

**Lista de Tablas**

1	Especificaciones de diseño . . . . .	39
2	Resumen de los valores teóricos . . . . .	41
3	Variación de la separación Reflector-Dipolo . . . . .	44
4	Variación de la separación directores . . . . .	45
5	Variación de la longitud del dipolo . . . . .	46
6	Especificaciones finales antena yagi . . . . .	46
7	Especificaciones antena yagi . . . . .	46
8	Especificaciones de diseño . . . . .	47
9	Resumen de los valores teóricos . . . . .	49
10	Variación de la separación de espiras . . . . .	52
11	Variación del diámetro de la hélice . . . . .	53
12	Variación del diámetro del conductor . . . . .	54
13	Variación del número de vueltas . . . . .	55
14	Especificaciones de diseño . . . . .	56
15	Resumen de los valores teóricos . . . . .	56
16	Variación del diámetro de la bocina . . . . .	58
17	Variación de la longitud de la bocina . . . . .	59
18	Variación del diámetro de la guía de onda . . . . .	60
19	Especificaciones finales antena yagi . . . . .	60
20	Resultados de diseño antena bocina . . . . .	60
21	Medidas para la construcción de la antena . . . . .	62
22	Resumen de medidas del prototipo inicial de antena helicoidal . . . . .	68
23	Valores de acople de las antenas con los stub . . . . .	73
24	Valores de impedancia de las antenas con los stub . . . . .	74
25	Valores del VSWR de las antenas con los stub . . . . .	75
26	Resumen de medidas del prototipo final de antena helicoidal . . . . .	76
27	Costos de construcción de la antena helicoidal . . . . .	97

### Lista de Figuras

1	<i>Patrón de radiación (Fuente: [Wikipedia, 2022b])</i> . . . . .	18
2	Ancho de banda (Fuente:[Wikipedia, 2022a]) . . . . .	18
3	Antena Yagi-uda (Fuente:[Bevelacqua, 2020]) . . . . .	21
4	Antena Monopolo (Fuente:[Bevelacqua, 2020]) . . . . .	22
5	Antena Dipolo (Fuente:[Wikipedia, 2022d]) . . . . .	23
6	Antena Yagi-uda (Fuente:[Bevelacqua, 2020]) . . . . .	23
7	Geometría Yagi-Uda . . . . .	24
8	Componentes Yagi-Uda (Fuente:[Rodríguez et al., ]) . . . . .	25
9	Estructura básica de la antena helicoidal (Fuente:[Rodríguez Páez, 2013])	27
10	Estructura de la antena helicoidal (Fuente:[Moreno, 2016]) . . . . .	29
11	Geometría Antena Helicoidal (Fuente:[Moreno, 2016]) . . . . .	30
12	Modos de operación antena helicoidal (Fuente:[Moreno, 2016]) . . . . .	31
13	Patrones de ancho de haz (Fuente:[Kraus, 2000]) . . . . .	32
14	Ganancia Helicoidal (Fuente:[Kraus, 2000]) . . . . .	32
15	Antena bocina (Fuente:[Iturri-Hinojosa et al., 2017]) . . . . .	34
16	Tipos de antenas bocinas (Fuente:[Wikipedia, 2022c]) . . . . .	35
17	Antena bocina cónica (Fuente:[Iturri-Hinojosa et al., 2017]) . . . . .	37
18	Geometría Antena bocina cónica (Fuente:[Iturri-Hinojosa et al., 2017]) .	38
19	Tabla para diseño antena yagi (Fuente:[Balanis, 2015]) . . . . .	40
20	Parámetro K (Fuente:[Balanis, 2015]) . . . . .	43
21	Simulación Antena Yagi CST . . . . .	43
22	Parámetros S . . . . .	43
23	Patrón de Radiación . . . . .	44
24	Antena Helicoidal en CST . . . . .	49
25	Parámetro S antena helicoidal . . . . .	50
26	Patrón de radiación antena helicoidal . . . . .	50
27	Carta de diseño de la antena helicoidal (Fuente:[Soria, 2013]) . . . . .	52
28	Antena bocina cónica . . . . .	57
29	Parámetro S antena bocina cónica . . . . .	60
30	Patrón de radiación antena bocina cónica . . . . .	61
31	Parámetro S de la antena a construir . . . . .	63
32	Ganancia de la antena a construir . . . . .	63
33	Antena simulada en CST . . . . .	63
34	Prototipo sin acoplador de impedancias . . . . .	64
35	Prototipo con acoplador de impedancias . . . . .	64

36	Prototipos construidos . . . . .	65
37	Montaje de laboratorio . . . . .	66
38	Gráfica del parámetro S sin acople . . . . .	67
39	Gráfica de la carta de smith sin acople . . . . .	67
40	Gráfica del vswr sin acople . . . . .	68
41	Dimensiones del stub en amanogawa solución uno . . . . .	70
42	Dimensiones del stub en amanogawa solución dos . . . . .	70
43	Ancho de la pista del stub en amanogawa . . . . .	71
44	Circuito del stub en ADS . . . . .	71
45	Parámetro s del stub en ADS . . . . .	72
46	Vista del software de la CNC . . . . .	72
47	Corte del stub en la CNC . . . . .	73
48	Parámetro S del prototipo Final . . . . .	74
49	Impedancia del prototipo Final . . . . .	75
50	VSWR del prototipo Final . . . . .	76
51	Comparación de parámetros S . . . . .	78
52	Comparación de parámetros VSWR . . . . .	78
53	Separación de espiras de 1.632 (cm) . . . . .	90
54	Separación de espiras de 2.04 (cm) . . . . .	91
55	Separación de espiras de 2.448 (cm) . . . . .	91
56	Diámetro de la hélice 3.89 (cm) . . . . .	92
57	Diámetro de la hélice 4.33 (cm) . . . . .	92
58	Diámetro de la hélice 4.76 (cm) . . . . .	93
59	Diámetro del conductor 0.1 (cm) . . . . .	93
60	Diámetro del conductor 0.11 (cm) . . . . .	94
61	Diámetro del conductor 0.12 (cm) . . . . .	94
62	Antena de 11 espiras . . . . .	95
63	Antena de 12 espiras . . . . .	95
64	Antena de 13 espiras . . . . .	96
65	Simulación de la antena parabólica . . . . .	96
66	Error en la simulación de CST . . . . .	96
67	Parámetro S de la antena con el stub 1 . . . . .	98
68	Parámetro S de la antena con el stub 2 . . . . .	98
69	Impedancia de la antena con el stub 1 . . . . .	99
70	Impedancia de la antena con el stub 2 . . . . .	99
71	VSWR de la antena con el stub 1 . . . . .	100
72	VSWR de la antena con el stub 2 . . . . .	100

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Cálculos teóricos Antena Yagi-Uda . . . . .	87
Apéndice B. Simulaciones de la antena helicoidal . . . . .	90
Apéndice C. Información sobre la construcción del prototipo de antena . . . . .	95
Apéndice D. Ampliación sobre los resultados en laboratorio . . . . .	97

### Glosario

**Antena** es un dispositivo generalmente metálico, utilizado para recibir o radiar ondas electromagnéticas [Balanis, 2015].

**Parámetro de dispersión** es un parámetro de las antenas utilizado en cualquier rango de frecuencias, basado en los niveles de potencia que perciben los terminales de la misma [Bevelacqua, 2020].

**Relación de onda estacionaria (ROE)** es la medida que expresa el grado de adaptación entre la antena y la impedancia del propio circuito [Balanis, 2015].

**Banda S** se define por un estandar de la IEEE para ondas de radio con frecuencias que van de 2 a 4 GHz, utilizada para radar meteorológico, radar de buques de superficie y algunos satélites de comunicaciones [Soria, 2013].

**VNA** es un instrumento que mide los parámetros de las redes eléctricas, esencial para la radiofrecuencia y el análisis de componentes de microondas de varios dispositivos pasivos y activos, incluidos filtros, antenas y amplificadores de potencia [KEYSIGHT, 2023].

## Resumen

**Título:** Modelo funcional de una antena de recepción para comunicación en banda S con el satélite de la misión espacial LEOpar/ANFA <sup>1</sup>

**Autor:** Cristian Mauricio Ortegon Martinez, David Alejandro Gonzalez Mateus.<sup>2</sup>

**Palabras Clave:** Antena satelital, banda S, caracterización de antenas, acople de impedancia.

**Descripción:** El presente trabajo de investigación forma parte del sistema de comunicación de la estación terrena de la misión espacial LEOpar/ANFA. El proyecto está enfocado en el estudio teórico, paramétrico y de simulación de tres antenas (yagi-Uda, helicoidal y bocina) en conjunto con la implementación de un prototipo de antena helicoidal operando en banda S. A lo largo del desarrollo del proyecto se realizó una selección de tres antenas, con el objetivo de encontrar una antena con las características más apropiadas para una aplicación de comunicación satelital y la implementación de un prototipo funcional para realizar estudios prácticos en el desarrollo de antenas. Además, se llevó a cabo la caracterización en laboratorio del prototipo con ayuda de un analizador de redes vectoriales, equipo especial en el estudio de dispositivos para radiofrecuencia, con el fin de obtener los parámetros  $v_{swr}$ , impedancia y  $S$  de la antena construida.

Al tener el prototipo construido se diseñaron e implementaron tres stub simple como acopladores de impedancia en la frecuencia de 2.2 GHz. Se realizó el estudio en las medidas de la antena al variar las dimensiones del stub y el efecto en el acople de la misma. Al finalizar todo el proceso se logró obtener un prototipo funcional de una antena helicoidal en banda S. Con los resultados obtenidos en simulación y las pruebas de laboratorio, se logró una documentación importante para desarrollar prototipos de antenas en áreas de diseño, simulación y construcción.

---

<sup>1</sup>Trabajo de grado

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Julián G. Rodríguez Ferreir. Doctor en Física, Especialista en Astrofísica. Codirector: Efrén Darío Acevedo Cardenas, Maestría en Ingeniería Electrónica.

### Abstract

**Título:** Functional model of a receiving antenna for S-band communication with the LEOpar/ANFA space mission satellite. <sup>3</sup>

**Autor:** Cristian Mauricio Ortegon Martinez, David Alejandro Gonzalez Mateus. <sup>4</sup>

**Keywords:** Satellite antenna, S-band, antenna characterization, impedance coupling.

**Description:** This research work is part of the communication system of the Earth Station of the LEOpar/ANFA space mission. The project is focused on the theoretical, parametric and simulation study of three antennas (yagi-Uda, helical and horn) together with the implementation of a prototype helical antenna operating in S-band. During the development of the project, a selection of three antennas was made, with the aim of finding an antenna with the most appropriate characteristics for a satellite communication application and the implementation of a functional prototype to carry out practical studies in the development of antennas. In addition, laboratory characterization of the prototype was carried out with the help of a vector network analyzer, special equipment for the study of radiofrequency devices, in order to obtain the vswr, impedance and S parameters of the antenna built.

With the prototype built, three single stub couplers were designed and implemented as impedance couplers at 2.2 GHz. The study was carried out on the measurements of the antenna by varying the dimensions of the stub and the effect on the coupling of the same. At the end of the whole process, a functional prototype of an S-band helical antenna was obtained. With the results obtained in simulation and laboratory tests, important documentation was obtained for the development of antenna prototypes in the areas of design, simulation and construction.

---

<sup>3</sup>Trabajo de grado

<sup>4</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Julián G. Rodríguez Ferreir. Doctor en Física, Especialista en Astrofísica. Codirector: Efrén Darío Acevedo Cardenas, Maestría en Ingeniería Electrónica.

## Introducción

La historia de la comunicación satelital se remonta a la década de 1950, cuando se lanzaron los primeros satélites artificiales con fines científicos y militares. En 1957, el Soviet Union lanzó el satélite Sputnik, que fue el primer satélite artificial en orbitar la Tierra. Durante la década de 1960, se desarrollaron satélites de comunicación para el uso civil, como Telstar, que fue el primer satélite comercial en ser lanzado en 1962 [Rodríguez et al., 2002]. A medida que los satélites se volvieron más sofisticados, se ampliaron las aplicaciones de la comunicación satelital, incluyendo la televisión de transmisión, los servicios de telecomunicaciones y la navegación, junto a este avance se desarrollaron las primeras antenas para captar y transmitir señales de satélites. Estas primeras antenas eran grandes y de baja ganancia, A principios de la década de 1980, se desarrollaron antenas de panel plano, que eran mucho más pequeñas y ligeras que las antenas parabólicas tradicionales [Victoria Velasco et al., 2016]. Con el tiempo, las antenas de panel plano se hicieron cada vez más populares en aplicaciones móviles y personales, como satélites de banda ancha y teléfonos móviles. Actualmente, existen diferentes tipos de antenas para comunicaciones satelitales, como antenas parabólicas, antenas de panel plano y antenas no redundantes, cada una de las cuales se utiliza en diferentes industrias.

El presente proyecto encaja dentro de los objetivos propuestos a mediano plazo por el grupo de investigación CEMOS, en cabeza de su director, donde ha planteado la necesidad de motivar al estudiante por las ciencias aeroespaciales con aplicaciones sencillas que involucren la ingeniería electrónica en sus diferentes áreas de aplicación. Dentro de estas aplicaciones satelitales se establece la necesidad de mejorar las estrategias de construcción, caracterización y validación de antenas que operan en banda S. Por esta razón se desarrolla el trabajo de investigación “Modelo funcional de una antena de recepción para comunicación en banda s con el satélite de la misión espacial LEOpar/ANFA”. Con el objetivo de realizar un aporte a la comunidad científica enfocada a las ciencias aeroespaciales y al programa de ingeniería electrónica de la Universidad Industrial de Santander, en las asignaturas de Comunicaciones I, Comunicaciones II y Medios de Transmisión, mediante el diseño y ejecución de estrategias de enlaces e instrumentación para radiofrecuencia.

En este documento se describe el estudio teórico y paramétrico de tres antenas: Yagi-Uda, helicoidal y bocina, en el software cst studio. Además, se describe el proceso de simulación, construcción y caracterización de un prototipo de antena helicoidal en banda S, junto al diseño e implementación de un stub simple como acoplador de impedancias

en la frecuencia de 2.2 GHz. El documento está compuesto de 6 capítulos, los cuales se describen a continuación: En el capítulo 1 se exponen los objetivos que busca cumplir el proyecto. En el capítulo 2, se realiza una breve definición de algunos conceptos sobre antenas, además de una introducción a las características, aplicaciones y parámetros de las tres antenas estudiadas. En el capítulo 3, se presenta el diseño y simulación de cada una de las antenas, donde se hace un enfoque en la parametrización de las dimensiones de la antena para cumplir los requisitos de ganancia, ancho de banda, acople y frecuencia de resonancia. En el capítulo 4, se evidencia el proceso de construcción y caracterización del prototipo de antena helicoidal, además del diseño e implementación de un stub simple como acoplador de impedancias. Por último, en los capítulos 5 y 6, se presentan las recomendaciones, trabajo futuro y conclusiones del proyecto.

## 1 Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Implementar y validar una antena funcional para la recepción de datos de satélites en órbita baja(LEO) operando en banda S.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar la antena correcta que permita un enlace satelital en banda S bajo los requisitos impuestos por la misión espacial LEOpar.
- Verificar los parámetros de diseño para una preselección de tres antenas candidatas por medio de un modelo computacional basado en el software de diseño de antenas CST.
- Construir y caracterizar en laboratorio la antena seleccionada.

## 2 Introducción a las antenas

La teoría de las antenas surge en 1865 a partir de los planteamientos matemáticos de James C. Maxwell, corroborados posteriormente por los experimentos de Heinrich R. Hertz, y el primer sistema de radiocomunicación de Guillermo Marconi.

Las primeras antenas de alambre surge en 1842, por Joseph Henry físico estadounidense, inventor de la telegrafía de hilos. Joseph realizó varios experimentos con antenas, observando que al generar una descarga en una antena que uso como transmisor era posible magnetizar agujas situadas en el sótano, dos pisos más abajo. En otro experimento realizado, utilizando un hilo vertical logro detectar rayos a una distancia de unos 12 km. Henry habría descubierto las ondas electromagnéticas. La fundamentación teórica para el análisis de las antenas está basado en los planteamientos matemáticos de James C. Maxwell(1831-1880), logrando unificar la teoría eléctrica y magnetismo en una sola teoría conocida como Electromagnetismo.

### 2.1 Principales parámetros de las antenas

#### 2.1.1 *Patrón de radiación*

El parámetro de radiación de una antena es una medida de la cantidad de energía electromagnética que se emite por unidad de tiempo y por unidad de área por la antena. Esta medida es importante porque determina la eficiencia de la antena y su capacidad para transmitir o recibir señales electromagnéticas [Subías et al., 2004].

El parámetro de radiación de una antena es un factor clave en la elección de una antena para una aplicación específica, ya que determina su capacidad para transmitir o recibir señales en diferentes direcciones y distancias. Es importante tener en cuenta que la radiación electromagnética de una antena puede afectar a otros dispositivos electrónicos cercanos, por lo que es importante evaluar cuidadosamente el parámetro de radiación al elegir una antena [Aznar et al., 2004].

- **Patrón de radiación omnidireccional:** Un patrón de radiación omnidireccional es un gráfico que representa la distribución de la energía de una señal de radio emitida por una antena en todas las direcciones. En un patrón de radiación omnidireccional, la energía se distribuye de manera uniforme en todas las direcciones en el espacio, formando una esfera alrededor de la antena. Antenas omnidireccionales son utilizadas en una variedad de aplicaciones, como la comunicación de radio, la navegación, y sistemas de posicionamiento global (GPS).
- **Patrón de radiación bidireccional:** Un patrón de radiación bidireccional es un gráfico que representa la distribución de la energía de una señal de radio emitida por una antena en dos direcciones opuestas. En un patrón de radiación bidireccional,

la energía se concentra en dos direcciones principales opuestas, y es muy débil o nula en direcciones intermedias. Esto se logra utilizando antenas direccionales como las antenas de yagi o las antenas de panel plano. Estas antenas son utilizadas en aplicaciones de comunicación de radio y televisión, en las que se necesita una señal fuerte en una dirección específica.

- **Patrón de radiación direccional:** Un patrón de radiación direccional es un gráfico que representa la distribución de la energía de una señal de radio emitida por una antena en una dirección específica. En un patrón de radiación direccional, la energía se concentra en una dirección específica, y es muy débil o nula en direcciones opuestas o intermedias. Esto se logra utilizando antenas direccionales como las antenas de haz, antenas de reflector, antenas de lóbulo principal, entre otras. Estas antenas son utilizadas en aplicaciones de comunicación de radio y televisión, en las que se necesita una señal fuerte en una dirección específica, también en radar, sistemas de posicionamiento y telecomunicaciones.

### 2.1.2 *Ancho de banda*

Todos los dispositivos de transmisión, debido a su geometría finita, están limitadas para funcionar satisfactoriamente en una banda de frecuencias. Este intervalo, en el que un parámetro determinado no sobrepasa los límites fijados, se conoce como Ancho de Banda (BW) de la antena. Se puede especificar como la relación entre el margen de frecuencias en que se cumplen satisfactoriamente los parámetros de la antena y la frecuencia central. La relación se puede expresar: (1)(2) [Aznar et al., 2004].

$$BW = \frac{f_1 - f_2}{f_c} \quad (1)$$

Donde  $f_1$  Y  $f_2$  delimitan el rango de frecuencias donde se tiene el mejor comportamiento 1.

### 2.1.3 *Directividad*

El parámetro de radiación de una antena es una medida de la cantidad de energía electromagnética que se emite por unidad de tiempo y por unidad de área por la antena. Esta medida es importante porque determina la eficiencia de la antena y su capacidad para transmitir o recibir señales electromagnéticas. El parámetro de radiación de una antena se puede medir en diferentes formas, como el diagrama de radiación, el ángulo de apertura y el índice de ganancia. El diagrama de radiación es una representación gráfica que muestra la distribución de la energía electromagnética emitida por la antena

Figura 1: Patrón de radiación (Fuente: [Wikipedia, 2022b])

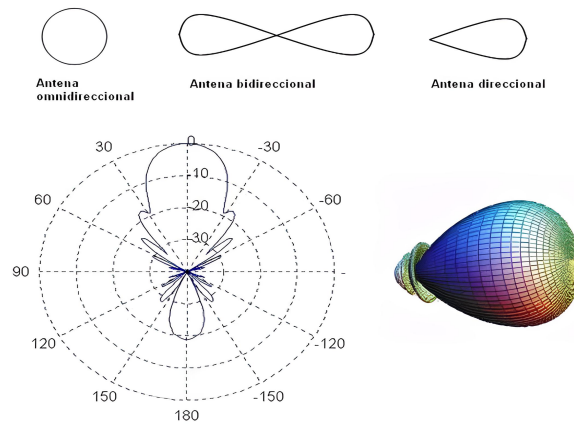
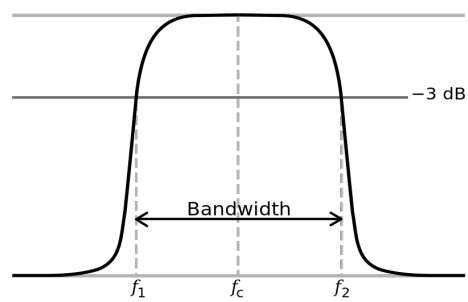


Figura 2: Ancho de banda (Fuente:[Wikipedia, 2022a])



en diferentes direcciones 2 [Aznar et al., 2004].

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi * U}{P_{rad}} \quad (2)$$

Donde:

- **D**=Directividad
- **U**=Intensidad de radiación
- $U_o$ =Intensidad de radiación de la fuente
- **P**=Potencia total radiada

#### 2.1.4 *Eficiencia*

La eficiencia de una antena se refiere a su capacidad para transmitir o recibir señales electromagnéticas de manera eficiente. Una antena con alta eficiencia es capaz de transmitir o recibir una gran cantidad de energía con poca pérdida, mientras que una antena con baja eficiencia tiende a perder gran parte de la energía que se le proporciona.

En general, la eficiencia de una antena es un factor importante a considerar al elegir una antena para una aplicación específica, ya que puede afectar significativamente la calidad y el rendimiento de la comunicación [Aznar et al., 2004].

#### 2.1.5 *Ganancia de la antena*

La característica principal de una antena es su ganancia. Esto sería la potencia de amplificación de la señal. La ganancia es la razón entre la intensidad de campo producido por una antena en un punto y la intensidad producida por una antena isotrópica en el mismo punto e igual condiciones. Se define con la siguiente ecuación (3) o (4) [Aznar et al., 2004].

$$G = 4 * \pi \frac{U}{P_{ent}} \quad (3)$$

- $P_{ent}$  = Potencia de entrada (W).
- **U** = Intensidad de radiación (W).

$$G = n * D \quad (4)$$

- **n**= eficiencia de la antena.
- **D** = Directividad.

### 2.1.6 *Impedancia de la antena*

La antena debe conectarse a un transmisor y radia a su máxima potencia, posible con una mínima cantidad de pérdidas. Normalmente, el transmisor se ubica alejado de la antena y la conexión transmisor-antena se hace mediante una guía de onda, que participa también en esa adaptación, haciendo que se deba considerar su impedancia característica, su atenuación y su longitud.

La impedancia de una antena se define como la impedancia presente en la terminal de la antena, representada como una razón de voltaje/corriente, la cual dependerá de las propiedades de los campos. La impedancia de una antena está definida por (5):

$$z = R + jX \quad (5)$$

Donde R es la resistencia (ohmios) y X es la reactancia(ohmios) de la antena. La impedancia total de una antena depende de su geometría, tamaño y la frecuencia de operación [Aznar et al., 2004].

### 2.1.7 *Polarización*

La polarización de una antena se refiere a la orientación del campo eléctrico de las ondas electromagnéticas que emite o recibe la antena. Las antenas pueden tener polarización vertical, horizontal o circular.

La polarización vertical se refiere a una antena cuya onda electromagnética tiene un campo eléctrico que se mueve de arriba hacia abajo. Por otro lado, la polarización horizontal se refiere a una antena cuya onda electromagnética tiene un campo eléctrico que se mueve de izquierda a derecha. La polarización de una antena es importante porque las ondas electromagnéticas sólo pueden ser recibidas por una antena con polarización compatible [Aznar et al., 2004].

## 2.2 **Antena Yagi-Uda**

La antena Yagi-Uda es el diseño de antena más simple y brillante. Posee una construcción simple y una alta ganancia, generalmente tiene una ganancia superior a 10dB, las antenas Yagi suelen funcionar alrededor de 3MHz a 3GHz, pero su ancho de banda suele ser muy pequeño. Es de las antenas más comunes y más usadas en la vida cotidiana. La antena Yagi fue inventada en 1926 por Shintaro Uda inventor japonés [Huidobro, 2013] .

La geometría de una antena Yagi-Uda que se observa en la figura (7), esta antena consta de un único elemento de alimentación normalmente un dipolo o dipolo plegado. Siendo el único elemento de la estructura que está conectado a una fuente de voltaje o corriente aplicada. Los demás elementos son parásitos o reflector que ayudan a transmitir

Figura 3: Antena Yagi-uda (Fuente:[Bevelacqua, 2020])



las ondas en una dirección. La longitud del elemento conductor que se observa en la figura (7) como  $F$ . El elemento de alimentación está ubicado de izquierda a derecha. Este elemento de alimentación se modifica en tamaño para que resuene en presencia de elementos parásitos.

El primero elemento en la figura(7) es el elemento reflectante o reflector. La longitud de dicho elemento está dada como  $R$  y la distancia entre el elemento de alimentación(Dipolo) y el reflector es  $SR$ . Normalmente el reflector posee una longitud 5% superior al dipolo o superior. Tener un reflector un poco más largo que el dipolo tiene un propósito. Es que entre mayor sea el elemento, mejor se convierte en un reflector físico. La mayoría de antenas Yagi solo posee un elemento reflector, pero se puede poner más de uno mejorando ligeramente los parámetros de rendimiento.

Los demás elementos se conocen como elementos directores, Puede haber cualquier número de directores  $N$ , que suelen variar entre 1 y 20 elementos directores. Cada director tiene una longitud  $D$  y una separación entre directores de  $SD$ , Las longitudes de los elementos directores deben ser menores a las del elemento resonante para favorecer una mayor propagación de ondas en la dirección de los directores [Balanis, 2015].

### 2.2.1 Características y aplicaciones de la antena Yagi-Uda

#### Características

Una antena Yagi es un tipo de antena direccional que se utiliza a menudo en la recepción y transmisión de señales de radiofrecuencia. Está diseñada para tener una alta ganancia en una dirección determinada y para reducir la recepción de señales en otras direcciones.

Las características de una antena Yagi incluyen:

- **Ganancia:** La ganancia de una antena Yagi es la medida de su capacidad para aumentar la intensidad de la señal recibida o transmitida. Una antena Yagi tiene una alta ganancia en la dirección en la que está apuntando, lo que la hace ideal

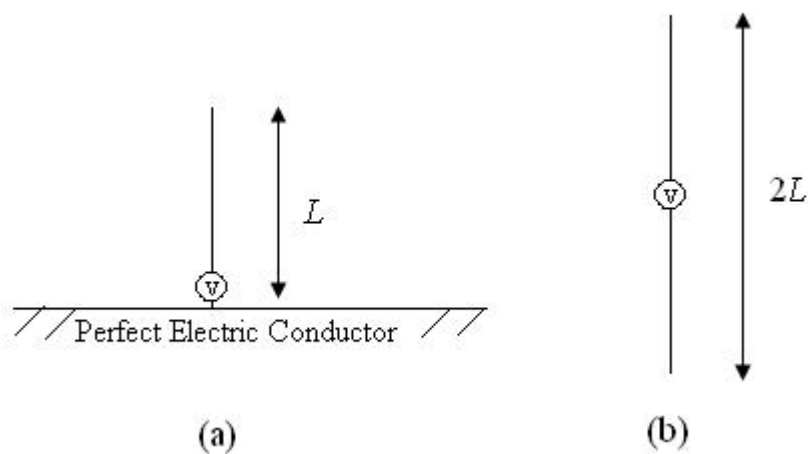
para aumentar la potencia de la señal en una dirección específica.

- **Frente de onda:** El frente de onda de una antena Yagi es el patrón de radiación que se produce cuando se transmite una señal a través de la antena. Una antena Yagi tiene un frente de onda más estrecho en comparación con otras antenas, lo que significa que la señal se transmite con mayor intensidad en una dirección específica y con menor intensidad en otras direcciones.
- **Tamaño:** Una antena Yagi tiene un tamaño relativamente pequeño en comparación con otras antenas direccionales, lo que la hace adecuada para su uso en áreas con espacio limitado.
- **Frecuencia:** Una antena Yagi se puede utilizar en un rango de frecuencias específico, que depende del tamaño y la disposición de los elementos conductor. Por lo general, se utilizan antenas Yagi en las bandas de VHF y UHF.

Tipos de antenas dipolo

- **Antena Monopolo:** Es la antena mas sencilla que se puede encontrar y utilizar en todos los servicios de telecomunicaciones especialmente a bajas frecuencias, se monta en direccion vertical parecida a una varilla, aterrizada a traves de una red de acoplamiento de la antena 4.

Figura 4: Antena Monopolo (Fuente:[Bevelacqua, 2020])



- **Antena dipolo:** Las antenas dipolo se suele encontrar en prácticamente todos los servicios que existen actualmente, principalmente en arreglos de antenas para transmisores de radio FM y también en transmisores de TV y servicios de radio móvil para servicios de despacho, seguridad como la policía y emergencias, bomberos y ambulancias. 5

Figura 5: Antena Dipolo (Fuente:[Wikipedia, 2022d])



- **Antena Yagi-uda:** Es una antena direccional compuesta por varios elementos parásitos y un solo elemento activo, los elementos parásitos pueden ser reflectores o directores que definen la máxima radiación y la dirección 6.

Figura 6: Antena Yagi-uda (Fuente:[Bevelacqua, 2020])

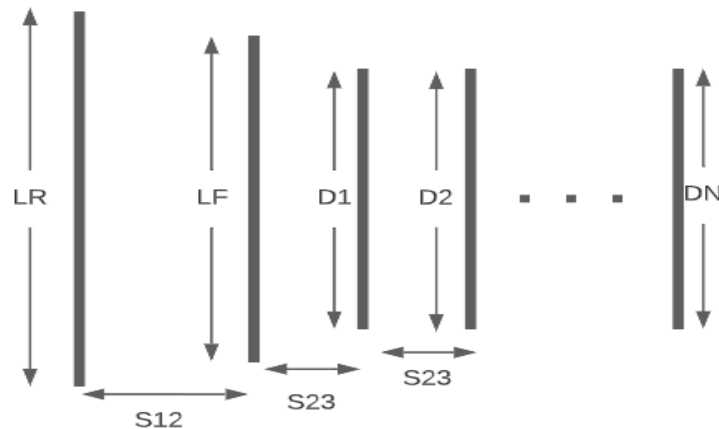


### 2.2.2 Geometría de la antena Yagi-uda

La antena Yagi-Uda, es un dispositivo radiante muy útil en un amplio rango del espectro electromagnético. Se utiliza en HF (3-30MHz), VHF(30-300MHz) y en UHF (300-3000MHz). La geometría de una antena Yagi-Uda se basa en el uso de varios elementos conductor posicionados de manera estratégica para enfocar la energía electromagnética en una dirección determinada. Los elementos conductor incluyen el dipolo, los elementos reflectores y los elementos directores<sup>7</sup>.

- **LR**= longitud del elemento reflector [mm]
- **LF**=longitud del dipolo [mm]

Figura 7: Geometría Yagi-Uda



- **D1**=longitud del elemento parasito [mm]
- **S12**=distancia entre el reflector y el dipolo [mm]
- **S23**=distancia entre el LF y D2 [mm]

Los elementos parásitos en la dirección del haz son un poco más pequeños en longitud que el dipolo. Típicamente el dipolo es resonante con una longitud ligeramente menor a  $\lambda/2$ , La longitud del reflector es algo mayor que la del elemento dipolo, mientras que las longitudes de los otros elementos parásitos será aproximadamente entre  $0.4-0.45 \lambda$ . mediante experimentación se ha demostrado que una antena Yagi-Uda con una longitud de  $6 \lambda$ , la ganancia no dependerá de la separación entre los elementos directores hasta cerca de los  $0.3 \lambda$ . Para dicha antena la ganancia también es independiente del grosor de los directores. Además, la separación entre el dipolo y reflector, suele ser algo inferior que el espacio entre el dipolo y el director inmediatamente a continuación de él [Polanco Torres et al., 2017]

La geometría de la antena Yagi-Uda se ajusta cuidadosamente para optimizar la ganancia y el patrón de radiación en la dirección deseada.

### 2.2.3 Características de diseño de la antena yagi-Uda

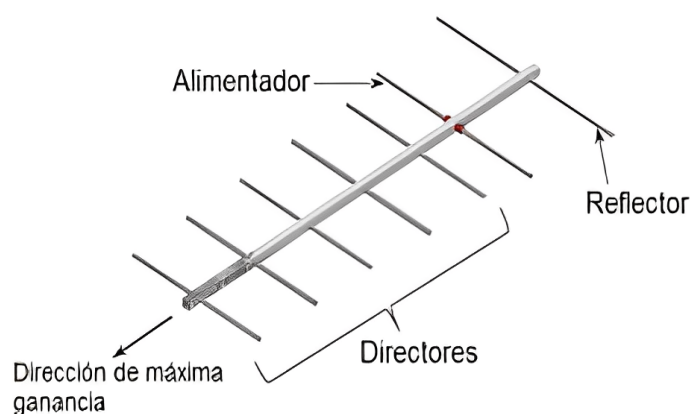
Las antenas Yagi-Uda son un tipo de antena direccional que se utilizan a menudo en aplicaciones de comunicación de radiofrecuencia. Algunas de sus características de diseño comunes incluyen:

- Un elemento conductor principal llamado dipolo, que es el elemento activo de la antena y que transmite y recibe las señales de radiofrecuencia.

- Elementos reflectores, que se sitúan detrás del dipolo y reflejan las señales de radiofrecuencia hacia adelante para enfocar la energía en una dirección específica.
- Elementos directores, que se sitúan delante del dipolo y también reflejan las señales de radiofrecuencia hacia adelante para aumentar la ganancia de la antena en la dirección deseada.
- Una estructura de soporte que mantiene los elementos conductor en su lugar y proporciona un medio para montar la antena.
- Una longitud de onda resonante, que es la longitud de onda de las señales de radiofrecuencia a las que la antena está diseñada para operar de manera óptima.
- Una ganancia, que es la medida de la eficiencia de la antena en la transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia en una dirección específica. Las antenas Yagi-Uda tienen una ganancia relativamente alta en comparación con otras antenas direccionales.
- Un patrón de radiación, que es la distribución de la energía electromagnética transmitida o recibida por la antena en diferentes direcciones. Las antenas Yagi-Uda tienen un patrón de radiación en forma de cono, con la mayor parte de la energía concentrada en la dirección principal de la antena.

#### 2.2.4 Componentes de la antena yagi-Uda

Figura 8: Componentes Yagi-Uda (Fuente:[Rodríguez et al., ])



- El dipolo es el elemento conductor principal y se encuentra en el centro de la antena. Es un conductor recto y es el elemento activo de la antena, es decir, es

el que transmite y recibe las señales de radiofrecuencia. El dipolo está formado por dos ramas conductoras iguales y paralelas, conectadas por un conductor en su centro. La longitud del dipolo se ajusta para resonar a la longitud de onda de las señales de radiofrecuencia a las que la antena está diseñada para operar de manera óptima.

- Los elementos reflectores se sitúan detrás del dipolo y tienen una longitud mayor que el dipolo. Su función es reflejar las señales de radiofrecuencia hacia adelante para enfocar la energía en una dirección determinada.
- Los elementos directores se sitúan delante del dipolo y tienen una longitud menor que el dipolo. Su función es también reflejar las señales de radiofrecuencia hacia adelante, pero además aumentan la ganancia de la antena en la dirección deseada.

### **2.2.5 Relación entre la ganancia y el ancho de haz de la antena yagi-Uda**

Entre la gran cantidad de factores que logran afectar la ganancia de una antena Yagi. El más importante es el vínculo entre la ganancia y el ancho de haz. Si la ganancia de yagi aumenta, entonces el ancho de haz disminuye. Esto se puede entender con la potencia disponible, como existe una cantidad limitada de energía, para generar la ganancia, la energía se distribuye en la dirección para convertirse en el haz principal.

Lo que significa que para las antenas de muy alta ganancia son muy directivas. Por lo tanto, en algunas ocasiones es necesario un equilibrio entre la alta ganancia y el ancho de haz angosto para un mejor rendimiento

### **2.2.6 Consideraciones sobre la ganancia de una antena Yagi-Uda**

Siempre es tentador querer buscar una máxima ganancia directa en el diseño de una antena. Sin embargo, esta puede no ser siempre la mejor opción. Hay varias características del diseño de una antena Yagi-Uda que afectan su ganancia [Musa et al., 2014].

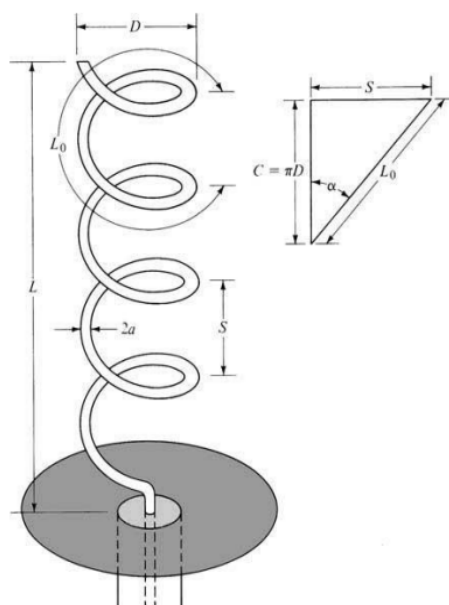
- **La longitud de onda de la antena:** La ganancia de una antena Yagi-Uda aumenta a medida que la longitud de onda de las señales se acerca a la longitud de onda resonante de la antena.
- **el numero y posicion de los elementos conductores de la antena:** La ganancia de una antena Yagi-Uda aumenta a medida que se añaden más elementos conductores y se optimiza su disposición para enfocar la energía electromagnética en una dirección.

- **La frecuencia de operación de la antena:** La ganancia de una antena Yagi-Uda varia según la frecuencia de operación, ya que la eficiencia de la antena cambia a medida que se aleja de la frecuencia resonante.

### 2.3 Antena Helicoidal

La antena helicoidal fue inventada en 1947 por el físico estadounidense John Krauss. La antena es un solenoide (Cualquier dispositivo físico capaz de crear una zona de campo magnético uniforme), como lo puede ser el bobinado de un hilo conductor sobre un cilindro de diámetro constante[Gómez, 2019]. La antena tiene como base un plato reflector de forma rectangular o circular, además de un conector coaxial sobre el reflector, el diagrama básico de la antena se puede ver en la figura (9).

Figura 9: Estructura básica de la antena helicoidal (Fuente:[Rodríguez Páez, 2013])



La antena tiene diferentes parámetros de diseño de su estructura, principalmente son, el número de espiras, diámetro de las espiras, sentido de giro de las espiras, diámetro del hilo conductor, separación del plano de tierra y diámetro del reflector. Un parámetro importante en el diseño de las antenas helicoidales se basa en el sentido de giro de las espiras. Por la configuración geométrica la antena cuenta con una polarización circular y el sentido de giro indica el tipo de polarización, los cuales pueden ser RHCP (Polarización derecha) o LHCP (Polarización izquierda). Este tipo de polarización circular hace que la antena sea menos sensible a fenómenos atmosféricos, además de una excelente calidad en los enlaces respecto de la orientación angular de las antenas debido a que es equivalente en todas las posiciones, razón por la que es muy útil en aplicaciones satelitales y radiocomunicación [Soria, 2013].

### 2.3.1 *Caraterísticas y aplicaciones de la antena helicoidal*

Caraterísticas principales de la antena helicoidal

Las antenas helicoidales presentan la gran ventaja en cuanto a fabricación, debido a su bajo costo con respecto a otros tipos de antenas para aplicaciones similares. Además, se pueden tener diferentes antenas con valores de ganancia más altos, solo aumentando el número de espiras de la hélice [Gengqi Zheng, 2018].

La antena helicoidal según la perspectiva cuenta con tres formas geométricas, vista desde la parte superior se observa la hélice como un círculo, desde la vista lateral se observa un cilindro y al desenrollar el alambre se tiene una línea recta. La antena helicoidal cuenta con dos modos de operación que se profundizan un poco más en el capítulo la antena helicoidal, los cuales son el modo de operación normal y axial. En el modo de operación normal ocurre cuando el largo de la onda es mucho mayor que las dimensiones de la antena y el modo de operación axial ocurre cuando el perímetro de la circunferencia de la hélice es cercano a la longitud de onda. Las antenas en el modo axial son bastante usadas en aplicaciones espaciales, gracias a la alta directividad que presentan, el buen ancho de banda y la polarización circular que ofrecen.

Aplicaciones de las antenas helicoidales más comunes según su diámetro

- **Diámetro de la hélice ( $\phi < \lambda$ ):** Las antenas diseñadas con estos diámetros están destinadas a aplicaciones de comunicaciones móviles o lejanas de baja frecuencia. Cuentan con una baja ganancia de aproximadamente 500 dB, un buen ancho de banda y polarización circular.
- **Diámetro de la hélice ( $\lambda/4; \phi < \lambda/2$ ):** Las antenas diseñadas en este rango de diámetro son implementadas en aplicaciones entre los 100 MHz y los 3 GHz. Se construyen sobre un reflector y tienen una alta directividad en la línea del eje de la antena, puede variar su ganancia dependiendo del número de espiras con que se construya. Cuentan con una ganancia entre los 7 dB y los 15 dB, ofrecen polarización circular y buen ancho de banda.

La antena Helicoidal es una antena en forma de solenoide capaz de generar un campo magnético uniforme de alta intensidad en su interior y muy débil en su exterior [Moreno, 2016].

Está compuesta de un hilo conductor enrollado en sentido izquierdo o derecho colocado sobre un plano de tierra. Además, cuenta con una línea de alimentación conectada en la parte inferior de la antena y el plano de tierra, normalmente esta conexión se realiza con un conector coaxial.

Las antenas helicoidales son de un gran uso en aplicaciones de alta frecuencia, aplicaciones de radiofrecuencia y comunicación satelital gracias a la polarización circular con la

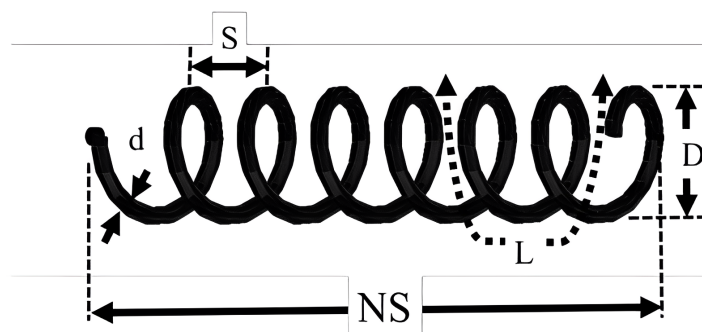
que cuentan. Este tipo de polarización presenta grandes ventajas en la recepción de las señales, debido a que estas inciden con diferentes polarizaciones por causa de las reflexiones en el espacio. Algunas de las ventajas para el uso de antenas helicoidales pueden ser:

- Recibe diferentes señales sin importar como estén polarizadas, vertical u horizontalmente.
- Cuenta con dos modos de operación, normal y axial.
- Una ganancia media.
- Buena directividad.
- Fácil fabricación y bajo costo.

### 2.3.2 Estructura de la antena Helicoidal

La antena helicoidal combina tres formas geométricas en su estructura. El alambre conductor de la hélice es un cilindro uniforme que se convierte en un alambre recto al desenrollarse sobre una superficie plana. Desde una perspectiva superior se puede observar la antena como un círculo. Los parámetros que definen la estructura de la hélice están dados por la figura (10).

Figura 10: Estructura de la antena helicoidal (Fuente:[Moreno, 2016])

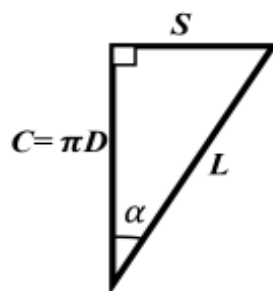


La configuración geométrica está dada por el número de vueltas  $N$ , el diámetro de la hélice  $D$  y la separación entre las vueltas de  $S$ . Estos valores ayudan a definir la longitud o altura de la hélice dado por:

$$L = N * S \quad (6)$$

Otros parámetros importantes en la estructura de la antena se observan en la figura (11)

Figura 11: Geometría Antena Helicoidal (Fuente:[Moreno, 2016])



- **C:** Perímetro de la circunferencia de la hélice
- **α:** Ángulo de paso

El ángulo de paso está definido por la separación entre vueltas  $S$ , la circunferencia  $C$  y el diámetro de la hélice, la ecuación se define como:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{S}{\pi * D}\right) = \arctan\left(\frac{S}{C}\right) \quad (7)$$

Las características de radiación de la antena helicoidal se pueden variar controlando los valores de su estructura geométrica. La impedancia está sujeta al ángulo de paso y el diámetro del cable conductor y se puede controlar modificando estos valores.

Una herramienta importante en el diseño de una antena helicoidal es la carta de diseño (27). Para el uso de la carta de diseño se deben utilizar las dimensiones en función del sufijo  $\lambda$ , para representar las medidas en longitudes de onda en el espacio libre. Las dimensiones están representadas en coordenadas rectangulares ( $C_\lambda$  y  $D_\lambda$ ). El eje de ordenadas representa las espiras y el eje de abscisas representa los conductores lineales [Moreno, 2016].

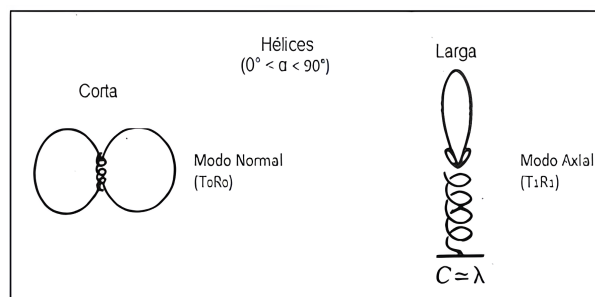
### 2.3.3 Modos de operación de la antena helicoidal

La antena helicoidal cuenta con múltiples modos de operación, pero se tienen dos modos principales, los cuales son (12):

- **Modo normal:** También conocido como broadside, en este modo se irradia de manera perpendicular al eje de la hélice. El patrón tiene una forma similar a la de un pequeño dipolo o bucle circular. Es usado en aplicaciones donde el tamaño es de alta relevancia. Debido al pequeño tamaño de la hélice en este modo, se puede asumir una corriente de magnitud y fase constante. Una hélice opera en el modo normal cuando la longitud total del hilo empleado para el bobinado es mucho menor que  $\lambda$ .

- **Modo axial:** Los lóbulos principales del patrón de radiación son a lo largo del eje de la hélice, en ambos extremos. En el modo axial, el sentido de giro del cable conductor define el tipo de polarización: Una hélice con giro a la izquierda irradia con una polarización circular levógira (función de las manecillas del reloj) y una hélice con giro a la derecha irradia con una polarización circular dextrógira (en contra de las manecillas del reloj). [Moreno, 2016]

Figura 12: Modos de operación antena helicoidal (Fuente:[Moreno, 2016])



#### 2.3.4 Principales parámetros de la antena helicoidal

La antena helicoidal es una antena fácil de construir, pero tiene unos parámetros que al controlar se puede maximizar el funcionamiento de esta. Los principales parámetros son:

- Relación axial y polarización circular.
- Ancho de haz.
- Ganancia.
- Impedancia.

Relación axial y polarización circular Los parámetros de una antena helicoidal están en función del número de vueltas de la hélice, ángulo de paso, frecuencia y separación entre vueltas. Dependiendo de estos parámetros se obtiene un ancho de banda útil. La frecuencia central de este ancho de banda corresponde a una circunferencia de hélice de ( $C=1$ ).

Los parámetros de la hélice también están en función del plano de tierra, diámetro del conductor, la estructura y el soporte de la hélice. El plano de tierra puede ser redondo o cuadrado con un diámetro de al menos  $\frac{3\lambda}{4}$ . [Kraus, 2000]

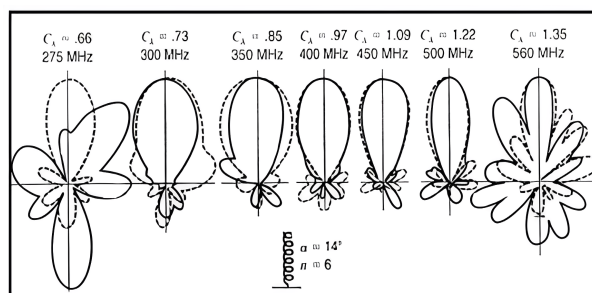
Para obtener un modo axial en la antena helicoidal, el parámetro S (separación entre las espiras) y D (Diámetro de la hélice) deben ser grandes fracciones de longitud de onda. Para obtener polarización circular, principalmente en el lóbulo principal, la circunferencia

de la hélice debe estar en el rango de  $\frac{3\lambda}{4} < C < \frac{4\lambda}{3}$  (dónde  $C=1$ , es el valor ideal). La separación entre las espiras debe ser aproximadamente  $\frac{\lambda}{4}$  y ángulo de paso usualmente de  $12^\circ$  a  $14^\circ$ .

Ancho de haz

En la figura (13) se observan los patrones de radiación de una antena helicoidal de 6 vueltas en función de la frecuencia, con un ángulo de paso de  $14^\circ$ , con patrones caracterizados de  $0.73$  a  $1.22\lambda$ . Muestran que al mantener un ángulo de paso constante y aumentar la circunferencia, el ancho de haz se hace mayor [A. chapari, ].

Figura 13: Patrones de ancho de haz (Fuente:[Kraus, 2000])

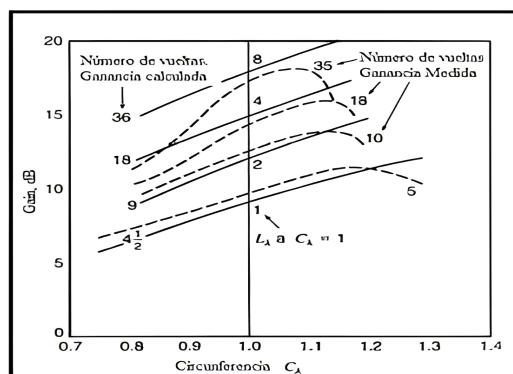


Se puede observar que aumentando el número de vueltas y manteniendo un ángulo de paso constante, el ancho del haz varía.

### 2.3.5 Ganancia

En las antenas helicoidales a medida que se aumenta el número de vueltas, el valor de la ganancia aumenta, pero se reduce el ancho de banda de la antena. Altas ganancias ocurren cuando se tiene de 10 a 20 por ciento por encima de la frecuencia central, para la cual  $C_\lambda = 1$  [Chapari et al., 2009].

Figura 14: Ganancia Helicoidal (Fuente:[Kraus, 2000])



Kraus indica que los ángulos de paso pueden ser tan pequeños como  $2^\circ$  y tan grandes

como  $25^\circ$ , pero los ángulos entre  $12^\circ$  y  $14^\circ$  ( $S=0.21\lambda$  a  $0.25\lambda$  y  $\frac{C}{\lambda} = 1$ ) son los óptimos [Kraus, 2000](14).

### 2.3.6 Impedancia

La impedancia nominal de una antena helicoidal que funciona en modo axial, calculada usando 8, se encuentra entre 100 a 200 ohmios. Sin embargo, muchas líneas de transmisión prácticas (coaxial) tienen una impedancia característica de aproximadamente 50 ohmios [Gómez, 2019]. Para estos casos se debe buscar la forma de realizar un acople correcto y maximizar el rendimiento de la antena.

Con alimentación axial, la terminal de impedancia (resistiva) se da por:

$$R = 140 * C_\lambda \quad \Omega \quad (8)$$

Con alimentación periférica da un valor de:

$$R = \frac{150}{\sqrt{C_\lambda}} \quad \Omega \quad (9)$$

Las ecuaciones funcionan para  $0.8; C; 1.2$ ,  $12^\circ; \lambda; 14^\circ$  y  $N; 4$  La hélice está separada del plano de tierra y gradualmente se va aplanando hasta que esté completamente pegada al plano de tierra, donde la hélice está separada del plano de tierra por una hoja de dieléctrico, la altura apropiada o espesor está dada por:

$$h = \frac{w}{\frac{377}{e_r Z_0} - 2} \quad m \quad (10)$$

Dónde:

- **h** = Altura del conductor encima del plano de tierra o espesor de la hoja.
- **w** : ancho de conductor en la terminación.
- $e_r$ : Permitividad relativa de la hoja de dieléctrico.
- $z_0$  : Impedancia característica de la hoja de dieléctrico.

### 2.3.7 Aplicaciones de la antena helicoidal

Las antenas helicoidales tienen una alta demanda en diferentes sectores de la comunicación gracias a sus características de polarización y su bajo costo de implementación, de forma breve algunas de sus aplicaciones son:

- **Antenas para walkie-talkies:** La antena helicoidal es ampliamente usada en estos sistemas de radios portátiles, la antena se encuentra recubierta con un caucho

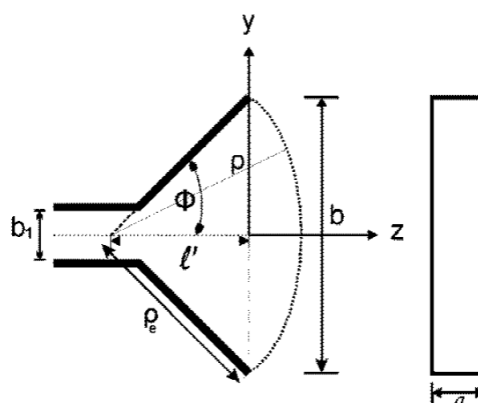
que la protege y la hace flexible a movimientos. El monopolo de estos radios se enrolla en forma de hélice y esto reduce el tamaño de la antena para tener medidas razonables en estos equipos.

- **Antenas para recepción satelital:** La antena helicoidal es utilizada como receptor de señales satelitales gracias a la polarización circular que ofrecen, lo cual las hace inmunes a fenómenos atmosféricos que puedan entorpecer la señal. Son fabricadas con una separación entre las espiras menor al diámetro mismo de la hélice.
- **Antenas Halo:** Son antenas helicoidales utilizadas en VHF debido a su buena directividad y su buen ancho de banda, haciéndolas bastante útiles para estas aplicaciones.

## 2.4 Antena Bocina

Una antena bocina es un tipo de antena de radiofrecuencia que se utiliza para mejorar la recepción de señales de radio y televisión. Estas antenas se caracterizan por tener una forma alargada y por tener una "bocina" o cono en la parte superior, que se utiliza para concentrar la señal de radiofrecuencia y mejorar la recepción. Las antenas bocina se utilizan a menudo en lugares donde la señal de radio y televisión es débil o difícil de captar debido a obstáculos físicos, como montañas o edificios. También se utilizan en sistemas de comunicación inalámbricos para mejorar la transmisión y recepción de señales de radio. [Iturri-Hinojosa et al., 2017]

Figura 15: Antena bocina (Fuente:[Iturri-Hinojosa et al., 2017])



Una antena bocina se alimenta mediante una guía de onda por donde se propagan uno o varios modos. Las dimensiones aumentan progresivamente hasta que la apertura equivalente tenga unas dimensiones suficientes para conseguir la directiva necesaria.

### 2.4.1 Características y aplicaciones de la antena bocina

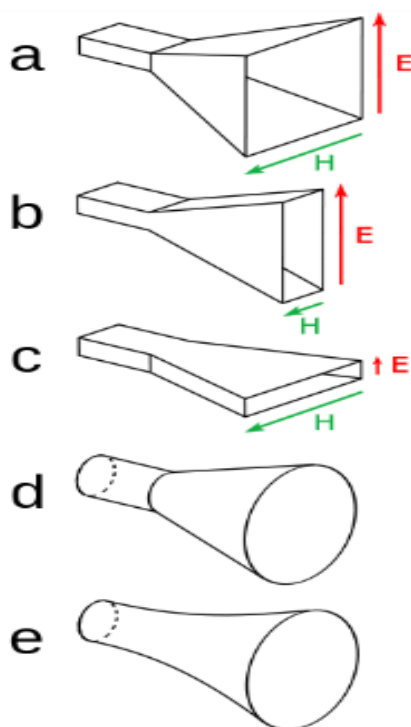
Características principales de la antena bocina

Las características de una antena bocina pueden variar dependiendo del tipo de antena y de su uso. Algunas de las características más comunes de las antenas bocina son:

- **Direccionalidad:** Muchas antenas bocina tienen un patrón de radiación direccional, lo que significa que tienen una mayor ganancia en una dirección determinada.
- **Ganancia:** Las antenas bocina tienen una alta ganancia y son eficientes para la recepción de señales débiles o en áreas con obstáculos.
- **Tamaño y peso:** El tamaño y el peso de una antena bocina pueden variar dependiendo del tipo y del uso previsto. Las antenas bocina más grandes suelen tener una mayor ganancia y una mayor direccionalidad, pero también son más pesadas y difíciles de instalar.

Tipos de antena bocina

Figura 16: Tipos de antenas bocinas (Fuente:[Wikipedia, 2022c])



- **Bocina rectangular tipo pirámide:** Las bocinas rectangulares se alimentan con una guía rectangular que se orienta normalmente para su análisis con la cara ancha

horizontal. El modo dominante en la guía tiene el campo eléctrico vertical (plano E) y el campo magnético horizontal (plano H).

- **Bocina rectangular plano E:** La bocina sectorial plano E se alimenta desde una guía de onda rectangular de dimensiones A y B. Siendo A la dimensión de la cara ancha y B la cara delgada. La apertura tiene un ancho A en el plano H y una altura B en el plano E.
- **Bocina rectangular Plano H :** La bocina sectorial plano H se alimenta desde una guía de onda rectangular de dimensiones A y B. Siendo A la dimensión de la cara ancha y B la cara delgada. La apertura tiene un ancho A en el plano H y una altura B en el plano E. Se forma ensanchando la guía en el plano E como indica la figura.
- **Bocina cónica :** Las guías de onda cónicas son las que se propagan en el modo fundamental TE<sub>11</sub>. Estas antenas se pueden analizar como aperturas, suponiendo que las distribuciones de los campos es aproximadamente la misma que los modos de las guías rectangulares o circulares.

Una antena bocina cónica es un tipo de antena bocina que se caracteriza por tener una forma alargada y una conicidad en la parte superior. La conicidad se utiliza para concentrar la señal de radiofrecuencia y mejorar la recepción. Las antenas bocina cónicas se utilizan a menudo en lugares donde la señal de radio y televisión es débil o difícil de captar debido a obstáculos físicos, como montañas o edificios. También se utilizan en sistemas de comunicación inalámbricos para mejorar la transmisión y recepción de señales de radio [Illanas Otero, 2018].

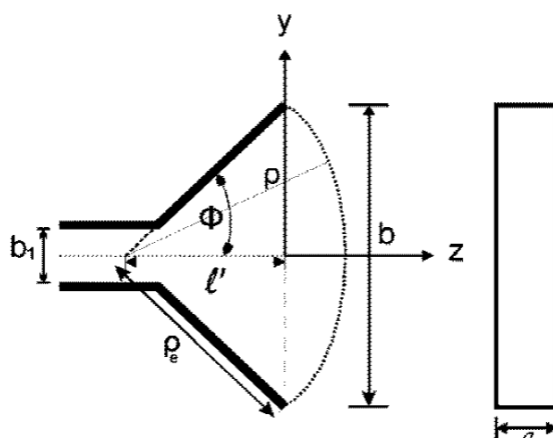
#### 2.4.2 *Características de la antena bocina cónica*

Las antenas bocinas cónicas son comúnmente utilizadas en las bandas de frecuencias de microondas en la excitación de antenas reflectoras y para mediciones de parámetros eléctricos porque proporcionan ganancia media, baja razón de onda estacionaria, ancho de banda relativamente grande y son fáciles de construir en la práctica [18].

La bocina cónica está formada por una guía de onda circular, que propaga el modo fundamental TE<sub>11</sub>, que se abre en forma cónica y termina en forma de apertura circular, estas antenas se pueden analizar como aperturas, suponiendo que la distribución de los campos es aproximadamente la misma que los modos de las guías rectangulares o circulares.

Según su modo de propagación transmisión, las antenas de bocina cónicas se clasifican como:

Figura 17: Antena bocina cónica (Fuente:[Iturri-Hinojosa et al., 2017])



- **Bocinas de Modo Dominante:** Se sintoniza al modo predominante de la guía de onda circular, el modo TE<sub>11</sub>.
- **Bocina Multimodo:** se sintoniza en modo de propagación TE<sub>11</sub> de la onda que se propaga por la guía de onda, junto al modo TM<sub>11</sub> que es el siguiente modo de propagación.
- **Bocinas Corrugadas o Híbridas:** Se ajusta en un modo híbrido HE<sub>11</sub>, con lo que se logra conseguir un ancho de haz amplio y simétrico, además con este tipo de bocinas se consigue una polarización más pura.

### 2.4.3 Estructura y geometría de la antena bocina cónica

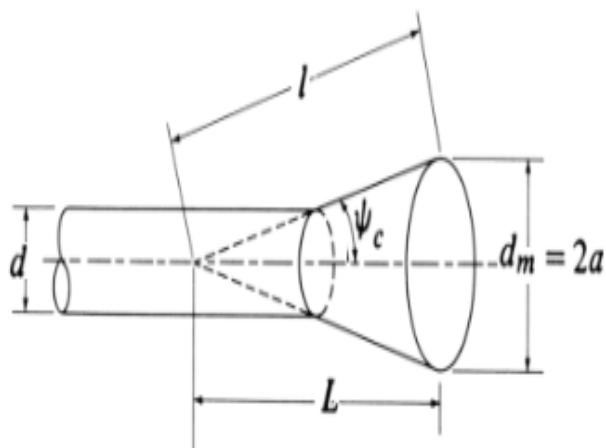
La geometría de una antena bocina cónica depende del tipo de antena y de su uso. Algunas antenas bocina cónicas tienen una forma alargada y una conicidad en la parte superior, mientras que otras tienen una forma más compacta y redondeada. En general, la geometría de una antena bocina cónica se diseña para concentrar la señal de radiofrecuencia y mejorar la recepción.

La antena cónica está alimentada por una guía de onda circular en el modo dominante TE<sub>11</sub>. Este tipo de onda permite orientar el campo eléctrico en cualquier dirección y de esta manera obtener la polarización de la antena.

Dimensiones de la bocina cónica:

- **dm:** diámetro de la antena cónica
- **a:** radio de apertura de la antena cónica
- **L:** longitud axial de la antena cónica

Figura 18: Geometría Antena bocina cónica (Fuente:[Iturri-Hinojosa et al., 2017])



- **d**: diámetro de la guía de onda
- **l**: longitud inclinada del cuerno
- **ψ c**: Ángulo de apertura

La directividad de la antena se puede determinar de manera teórica como 11:

$$D(dB) = 10 \log_{10} \left[ \varepsilon_{ap} \frac{4\pi}{\lambda^2} * (\pi a^2) \right] = 10 \log_{10} \left( \frac{C}{\lambda} \right)^2 - L(s) \quad (11)$$

Donde  $a$  es el radio de apertura de la antena y  $L(s)$  ecuacion12 es un factor de pérdida relacionado con la apertura de la antena.

$$L(s) = -10 \log_{10} \varepsilon_{ap} \quad (12)$$

Este factor de pérdida se puede aproximar como:

$$L(s) = (0.8 - 1.71s + 26.25s^2 - 17.79s^3) \quad (13)$$

Donde  $s$  es la desviación máxima de fase o error cuadrático de fase, determinado por:

$$s = \frac{d_m^2}{8\lambda l} \quad (14)$$

La directividad de la bocina cónica óptima cuando su diámetro se puede aproximar como:

$$d_m = \sqrt{3\lambda l} \quad (15)$$

que corresponde con un máximo de la desviación de fase de  $s = 3^{\frac{8}{}}$  y un factor de pérdidas de unos 2.9dB (o una eficiencia en la apertura sobre el 51%) [Ruiz González, 2013].

### 3 Diseño y simulación de las antenas

#### 3.1 Diseño y simulación de la Yagi-Uda

En el proceso de diseño de una antena se lleva a cabo un trabajo de investigación y en programas de simulación que permitan observar las características y comportamiento del dispositivo. En este capítulo se muestra el diseño de la antena Yagi-Uda para una frecuencia de operación de 2.2 GHz.

Este estudio se realiza en el software de simulación CST (Computer simulation technology Microwave Studio) [Solvers and Compatibility, 2020] estudio suite versión 2022, el software es una herramienta especializada en el análisis de dispositivos electromagnéticos en altas frecuencias.

##### 3.1.1 *Diseño teórico de la antena Yagi-uda*

Antes de iniciar el desarrollo matemático se debe definir las especificaciones que debe satisfacer la antena, las cuales están resumidas en el cuadro 1:

Tabla 1: Especificaciones de diseño

Parámetro	Requisito
Banda de operación	Banda S
Frecuencia de operación	2.2 GHz
Ancho de banda	¿50 MHz
Ganancia	¿10 dBi
Polarización	Circular izquierda

Para diseñar una antena Yagi-Uda, es necesario calcular la longitud de los elementos conductor y su posición relativa utilizando fórmulas específicas y herramientas de diseño como programas de diseño de antenas o hojas de cálculo [19]. También es importante tener en cuenta factores como la resistencia del aire y la impedancia de la antena al calcular estos parámetros.

Para determinar las dimensiones de una antena yagi se aplican diferentes estrategias útiles. En este proyecto se plantea la siguiente metodología:

- $\lambda$ : Longitud de onda
- $c$ : Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s)
- $f$ : Frecuencia de operación (GHz)

Figura 19: Tabla para diseño antena yagi (Fuente:[Balanis, 2015])

**TABLE 10.6** Optimized Uncompensated Lengths of Parasitic Elements for Yagi-Uda Antennas of Six Different Lengths

$d/\lambda = 0.0085$		Length of Yagi-Uda (in wavelengths)					
		0.4	0.8	1.20	2.2	3.2	4.2
LENGTH OF REFLECTOR ( $l_1/\lambda$ )		0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.475
LENGTH OF DIRECTORS, $\lambda$							
	$l_3$	0.442	0.428	0.428	0.432	0.428	0.424
	$l_4$		0.424	0.420	0.415	0.420	0.424
	$l_5$		0.428	0.420	0.407	0.407	0.420
	$l_6$			0.428	0.398	0.398	0.407
	$l_7$				0.390	0.394	0.403
	$l_8$				0.390	0.390	0.398
	$l_9$				0.390	0.386	0.394
	$l_{10}$				0.390	0.386	0.390
	$l_{11}$				0.398	0.386	0.390
	$l_{12}$				0.407	0.386	0.390
	$l_{13}$					0.386	0.390
	$l_{14}$					0.386	0.390
	$l_{15}$					0.386	0.390
	$l_{16}$					0.386	
	$l_{17}$					0.386	
SPACING BETWEEN DIRECTORS ( $s_d/\lambda$ )		0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.308
DIRECTIVITY RELATIVE TO HALF-WAVE DIPOLE (dB)		7.1	9.2	10.2	12.25	13.4	14.2
DESIGN CURVE (SEE FIGURE 10.27)		(A)	(B)	(B)	(C)	(B)	(D)

(SOURCE: Peter P. Vezibicke, *Yagi Antenna Design*, NBS Technical Note 688, December 1976).

1. Determinar la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 m/s}{2.2 \times s^{-1}} = 0.136 m \quad (16)$$

2. Radio del dipolo:

$$R = 0.001 * \lambda \quad (17)$$

3. Longitud del dipolo: Debido a que estamos trabajando en un conductor existe un parámetro k que nos permite tener en cuenta el factor del conductor.

$$K = 0.9787011 + \frac{-10.88627 - 0.9787011}{\left[1 + \left(\frac{R \frac{l}{d}}{0.0004490702}\right)^{1.792529}\right]^{0.33004597}} \quad (18)$$

Con el fin de facilitar el cálculo del parámetro k se usa una calculadora online [Zolotkov, 2017].

$$L = K * \frac{c}{2 * f} \quad L = 66 \text{ mm} \quad (19)$$

4. Gap:

$$Gap = \frac{L}{200} \quad Gap = 0.33 \text{ mm} \quad (20)$$

Una vez calculado el dipolo, se inicia el diseño de la antena Yagi-Uda para eso se utilizará la tabla de diseño que nos facilitará el proceso 19.

5. Diámetro de los elementos parásitos:

$$d = 0.0085 * \lambda \quad d = 1.15 \text{ mm} \quad (21)$$

6. Longitud de los elementos parásitos:

$$l1 = 0.475 * \lambda \quad l1 = 64.77 \text{ mm} \quad (22)$$

En el anexo A 4.4 encontrar el calculo de los demas elementos parasitos para este diseño.

7. Separación entre los elementos parasitos:

$$S_{12} = 0.2 * \lambda \quad S_{12} = 27.27 \text{ mm} \quad (23)$$

$$S = 0.308 * \lambda \quad S = 42 \text{ mm} \quad (24)$$

Resumen de los valores obtenidos en el cuadro 2:

Tabla 2: Resumen de los valores teóricos

Parámetro	Valor obtenido(mm)
R	0.136
L	66
Gap	0.33
d	1.15
l1	64.77
l3,14	57.81
l5	57.27
l6	55.5
l7	54.95
l8	54.27
l9	53.7
l10,l11,l12,l13,l14,l15	53.18
$S_{12}$	27.27
S	42

En el Apendice 4.4 encontra de manera mas detallada y profunda los calculos teoricos de la antena yagi.

### 3.1.2 *Simulación de la antena yagi-Uda*

Para llevar a cabo la simulación de una antena Yagi, es necesario utilizar herramientas de simulación o modelado, programas de diseño de antenas u hojas de cálculo. para esta simulación se usó la herramienta CST studio suite [Solvers and Compatibility, 2020].

- **Parámetro S 22:**
- **Patrón de radiación 30:**

### 3.1.3 *Parametrización de la antena yagi-Uda*

La parametrización de una antena Yagi se refiere a la forma en que se diseña y ajusta la antena para optimizar su rendimiento en términos de ganancia, directividad y ancho de banda. Esto se logra ajustando las dimensiones y la posición de los diferentes elementos de la antena.

Algunos de los parámetros más importantes que se pueden ajustar en una antena Yagi incluyen:

- Longitud del dipolo
- Separación entre elementos
- Tamaño de los elementos reflectores y directores

Separación entre elementos

La separación entre el elemento reflector y el elemento dipolo afecta la ganancia de la antena.

Para optimizar la separación de los elementos, se tomará los siguientes valores base:

- **Separación reflector-dipolo:** 27.27 mm
- **Separación directores:** 42 mm
- **Longitud del dipolo:** 64.77 mm

Se hará una variación desde 24mm hasta 28 mm, en el cuadro 6 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización.

En conclusión, en este paso de parametrización, al aumentar el valor de la separación Reflector-Dipolo, el parámetro S se desplaza de manera muy leve a la frecuencia de resonancia y la ganancia se va haciendo mayor. se obtuvo que la separación que presenta los mejores resultados es la 27.66 mm

Separación directores

La separación entre los elementos reflectores y directores afecta la ganancia de la antena.

Figura 20: Parámetro K (Fuente:[Balanis, 2015])

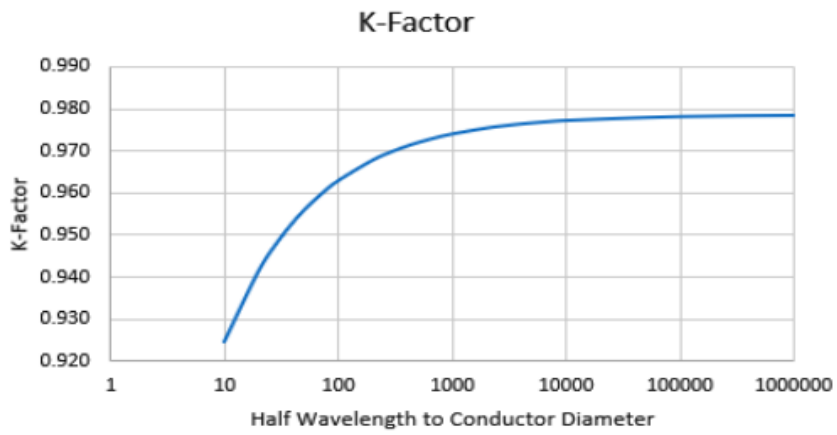


Figura 21: Simulación Antena Yagi CST

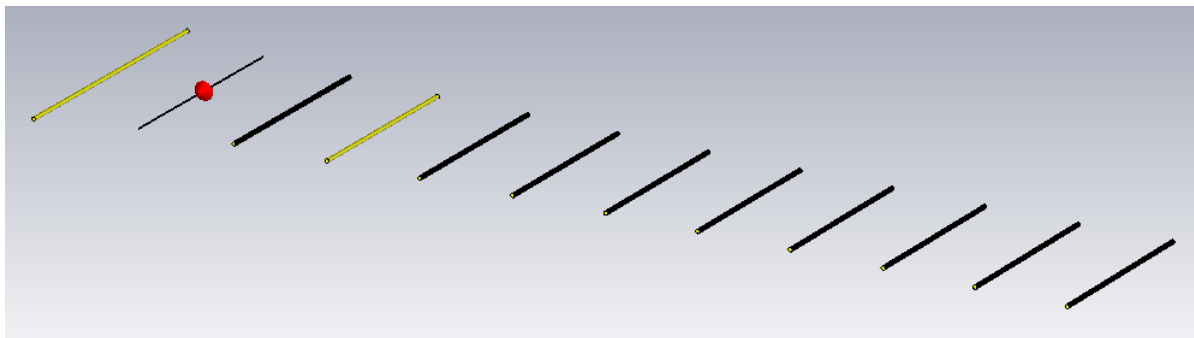


Figura 22: Parámetros S

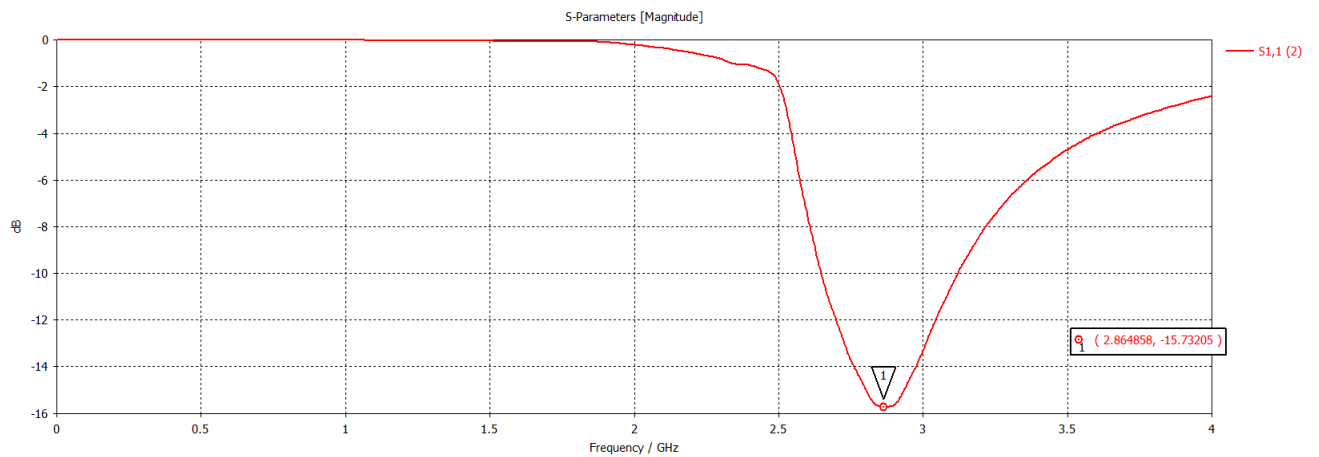


Figura 23: Patrón de Radiación

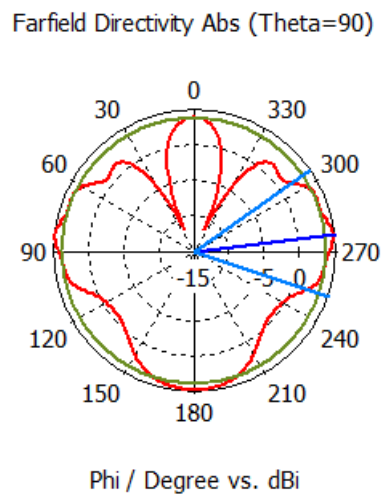


Tabla 3: Variación de la separación Reflector-Dipolo

Separación Reflector-Dipolo (mm)	Parametro S(dB)	Ganancia(dBi)
24.86	-4.04	17.31
26.2	-4.37	17.29
27.27	-4.65	17.24
27.36	-4.70	17.23
27.66	-4.76	17.22

- **Separación reflector-dipolo:** 27.66 mm
- **Separación directores:** 42 mm
- **Longitud del dipolo:** 64.77 mm

Se hará una variación desde 35 mm hasta 45 mm, en el cuadro 4 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización.

Tabla 4: Variación de la separación directores

Separación Directores (mm)	Parametro S(dB)	Ganancia(dBi)
37.16	-6.69	17.29
38.16	-7.31	17.10
40.5	-6.28	17.12
43.16	-4.52	17.08
44.16	-4.67	16.86

En conclusión, en este paso de parametrización, al aumentar el valor de la separación de los directores, el parámetro S va disminuyendo mediante se incrementa la separación y la ganancia presenta el mismo comportamiento. se obtuvo que la separación que presenta los mejores resultados es la 37.16 mm

Longitud del dipolo

La longitud del dipolo afecta la frecuencia de resonancia de la antena y, por lo tanto, el ancho de banda y la ganancia.

Para optimizar la longitud del dipolo, se tomará los siguientes valores base:

- **Separación reflector-dipolo:** 27.66 mm
- **Separación directores:** 38.16 mm
- **Longitud del dipolo:** 64.77 mm

Se hará una variación desde 61mm hasta 63 mm, en el cuadro 5 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización.

En conclusión, en este paso de parametrización, al disminuir el tamaño del dipolo tanto la ganancia como el parametro S no presentan una gran variacion llegando a un punto de estancamiento. se obtuvo que la separación que presenta los mejores resultados es la 62.2 mm

Tabla 5: Variación de la longitud del dipolo

Longitud del dipolo (mm)	Parametro S(dB)	Ganancia(dBi)
63.1	-7.18	17.13
62.8	-7.22	17.11
62.5	-7.31	17.14
62.2	-7.33	17.14
61.9	-7.30	17.14

Tabla 6: Especificaciones finales antena yagi

Separación Reflector-Dipolo (mm)	Separacion directores (mm)	Longitud del dipolo (mm)
27.66	38.16	62.2

Tabla 7: Especificaciones antena yagi

Parámetro	Requisito
Ancho de banda	110 MHz
Parametro S	-12 dB
Ganancia	5.25 dBi
Polarización	Lineal

### 3.2 Diseño y simulación de la antena helicoidal

En el proceso de diseño y construcción de una antena se lleva a cabo un trabajo previo en programas de simulación que permitan observar las características y comportamiento de los dispositivos antes de la implementación de un prototipo. En este capítulo se muestra el diseño de la antena para una operación en la frecuencia de 2.2 GHz. Además, se desarrolla el estudio paramétrico de la antena, con el fin de analizar el rendimiento de la antena al modificar cada parámetro geométrico, con el objetivo de obtener los valores que permitan el mejor rendimiento de la antena.

Los parámetros principales para optimizar de la antena son: La separación de las espiras, el diámetro de la hélice, diámetro del conductor y número de vueltas.

Este estudio se realiza en el software de simulación CST (Computer simulation technology Microwave Studio) studio suite versión 2022, el software es una herramienta especializada en el análisis de dispositivos electromagnéticos en altas frecuencias.

#### 3.2.1 *Diseño teórico de la antena helicoidal*

Antes de comenzar el desarrollo de cada uno de los cálculos se debe definir las especificaciones que debe satisfacer la antena, las cuales están resumidas en el cuadro 8:

Tabla 8: Especificaciones de diseño

Parámetro	Requisito
Banda de operación	Banda S
Frecuencia de operación	2.2 GHz
Ancho de banda	¿50 MHz
Ganancia	¿10 dBi
Polarización	Circular izquierda

Una vez definidas las especificaciones se inicia el diseño de la antena helicoidal, para esto se debe obtener cada uno de los parámetros geométricos que componen la estructura de la antena:

- **D:** Diámetro de la hélice (Centro a centro del conductor)
- **C:** Perímetro de la circunferencia de la hélice
- **S:** Espacio entre las vueltas (Centro a centro del conductor)
- **N:** Número de vueltas
- **L:** Longitud de una vuelta

- **d**: Diámetro del conductor de la hélice
- **A**: Longitud axial
- $\alpha$ : Ángulo de paso

Dónde:

- $\lambda$ : Longitud de onda
- **c**: Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s)
- **f**: Frecuencia de operación (2.2 GHz)

1. Determinar la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.2 \times 10^9 \text{ s}^{-1}} = 0.136 \text{ m} \quad (25)$$

2. Para obtener un modo de transmisión de primer orden, la circunferencia de la hélice tiene que ser  $1\lambda$ , obteniendo:

$$C_\lambda = 1\lambda = 13.6 \text{ cm} \quad (26)$$

3. Para obtener el diámetro de la hélice:

$$D_\lambda = \frac{C_\lambda}{\pi} = 4.33 \text{ cm} \quad (27)$$

4. Kraus determinó que los valores ideales del ángulo de paso para el diseño de una antena helicoidal en modo axial se encuentran entre los  $12^\circ$  y  $14^\circ$  [Kraus, 2000], a partir de esto se tiene:

$$S_1 = C_\lambda * \tan(\alpha) = 13.6 * \tan(12) = 2.89 \text{ cm} \quad (28)$$

$$S_2 = C_\lambda * \tan(\alpha) = 13.6 * \tan(14) = 3.39 \text{ cm} \quad (29)$$

5. El plano de tierra (PT) debe tener por lo menos  $\frac{3\lambda}{4}$  de diámetro, con el fin de cubrir la antena en totalidad por cada lado, a partir de esto se tiene:

$$PT = \frac{3\lambda}{4} = \frac{3(13.6)}{4} = 10.2 \text{ cm} \quad (30)$$

Resumen de los valores obtenidos en el cuadro 9:

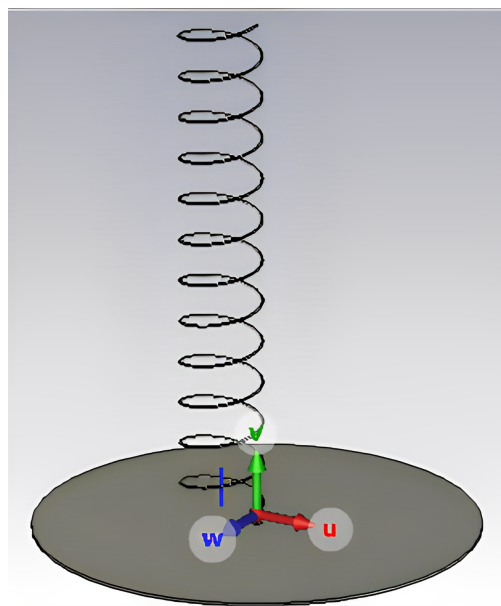
Tabla 9: Resumen de los valores teóricos

Parámetro	Valor obtenido(cm)
$\lambda$	13.6
$C_\lambda$	13.6
$D_\lambda$	4.33
$S_1$	$j2.89$
$S_2$	$j3.39$
PT	10.2

### 3.2.2 Simulación de la antena helicoidal

Para llevar a cabo la simulación de una antena helicoidal, es necesario utilizar herramientas de simulación o modelado, programas de diseño de antenas u hojas de cálculo. Para esta simulación se usó la herramienta CST studio suite [Solvers and Compatibility, 2020].

Figura 24: Antena Helicoidal en CST



- **Parámetro S:**
- **Patrón de radiación:**

### 3.2.3 Estudio Paramétrico de la antena helicoidal

Para realizar el diseño de la antena se debe realizar un estudio paramétrico con el fin de modificar las medidas: Diámetro de la hélice, separación de las espiras, número de espiras y diámetro del conductor. Los pasos para realizar el diseño son los siguientes:

Figura 25: Parámetro S antena helicoidal

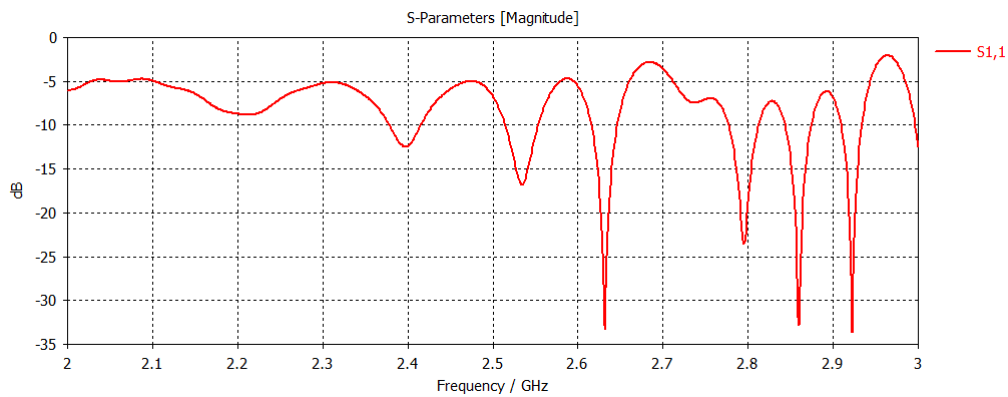
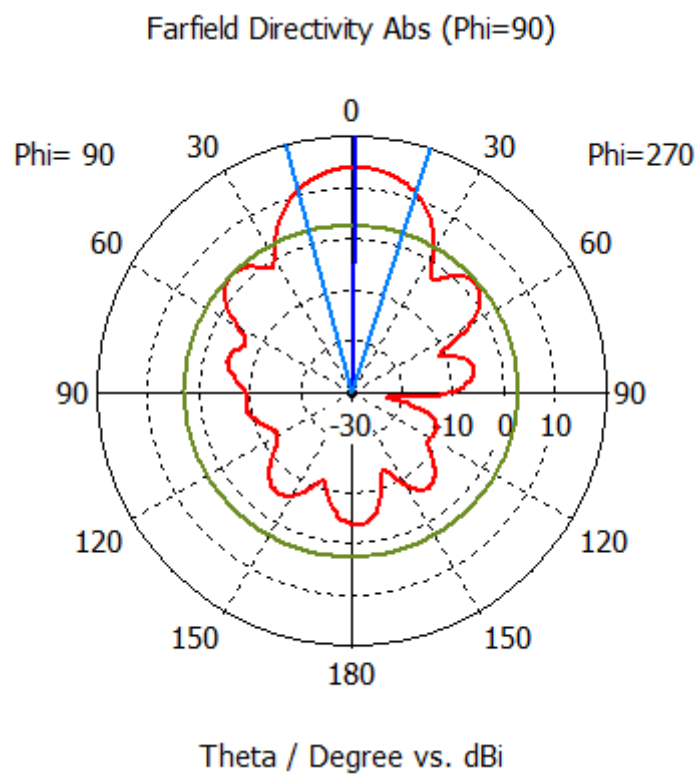


Figura 26: Patrón de radiación antena helicoidal



**1. Separación de espiras:**

- Diámetro de la hélice constante (Calculado para radiación axial)
- Diámetro del conductor constante (Calculado para radiación axial)
- Número de espiras constante (Elegido para radiación axial)

**2. Diámetro de la hélice:**

- Separación de las espiras (Previamente optimizado)
- Diámetro del conductor constante (Calculado para radiación axial)
- Número de espiras constante (Elegido para radiación axial)

**3. Diámetro del conductor:**

- Diámetro de la hélice (Previamente optimizado)
- Separación de las espiras (Previamente optimizado)
- Número de espiras constante (Elegido para radiación axial)

**4. Número de vueltas:**

- Diámetro de la hélice (Previamente optimizado)
- Separación de las espiras (Previamente optimizado)
- Diámetro del conductor (Previamente optimizado)

Separación entre espiras

Con ayuda de la carta de diseño de la figura 27:

Para optimizar esta separación de las espiras, se tomará los siguientes valores base:

- **Diámetro de la hélice:** 4.3 cm
- **Número de vueltas:** 11
- **Diámetro del plano de tierra:** 11 cm
- **Diámetro del conductor:** 0.12 cm

Figura 27: Carta de diseño de la antena helicoidal (Fuente:[Soria, 2013])

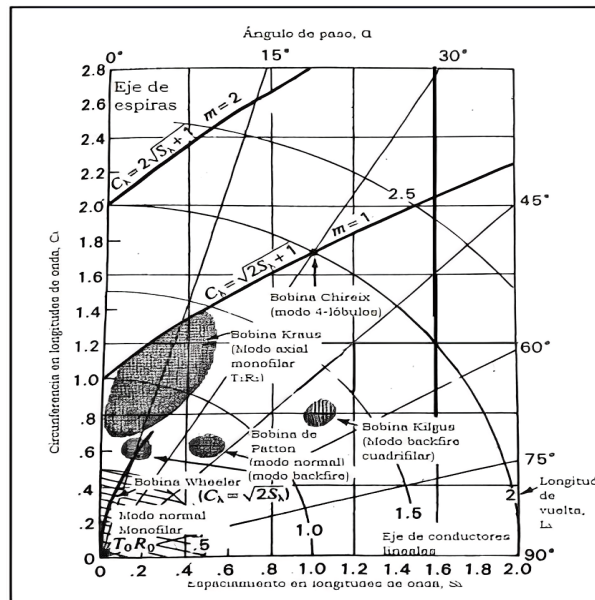


Tabla 10: Variación de la separación de espiras

Separación de espiras (cm)	Separación de espiras( $\lambda$ )	Ganancia(dBi)
1.63	0.12	11.38
2.04	0.15	12.33
2.45	0.18	12.91

Se hará una variación de  $0.03\lambda$  entre cada medida, desde  $0.12\lambda$  hasta  $0.18\lambda$  dónde se encuentra el área de radiación axial [Soria, 2013]. En el cuadro 10 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización y en el Anexo B (53) se muestran las imágenes de simulación de cada variación.

En conclusión, en este paso de parametrización, al aumentar el valor de la separación entre las espiras, el parámetro S se desplaza a frecuencias más bajas y mayor es la ganancia. Una vez revisadas todas las simulaciones se obtuvo que la separación que presenta los mejores resultados es la 2.04 cm.

Diámetro de la hélice

El análisis paramétrico en el diseño del diámetro de la hélice se basa en la carta de diseño (27) dónde para permanecer en el área de relación axial, se puede variar el valor de  $C_\lambda$  entre  $0.7\lambda$  y  $1.4\lambda$  [Soria, 2013] teniendo en cuenta la ecuación (27) para determinar el valor del diámetro en función de la circunferencia de la hélice ( $C_\lambda$ ).

Para optimizar el diámetro de la hélice, se tomará los siguientes valores base:

- **Separación entre las espiras:** 2.04 cm
- **Número de vueltas:** 11
- **Diámetro del conductor:** 0.12 cm

Se hará una variación de  $0.1\lambda$  entre cada medida, desde  $0.9\lambda$  hasta  $1.1\lambda$ . En el cuadro 11 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización y en el Anexo B (56) se muestran las imágenes de simulación de cada variación.

Tabla 11: Variación del diámetro de la hélice

Diámetro de la hélice (cm)	$C_\lambda(\lambda)$	Ganancia(dBi)
3.89	0.9	13.93
4.33	1	11.93
4.76	1.1	11.93

En conclusión, en este paso de parametrización, al aumentar el valor del diámetro de la hélice, la ganancia de la antena llega a un punto donde empieza a disminuir y el parámetro S comienza a desplazarse a frecuencias más bajas. Una vez revisadas todas las simulaciones se obtuvo que el diámetro que presenta los mejores resultados es el diámetro de 4.33 cm.

Diámetro del conductor

En el análisis paramétrico del diseño del diámetro del conductor se parte de la idea que a mayor diámetro la impedancia de la antena aumenta. Se hace una variación de 0.1cm

hasta 0.12 cm con una variación de 0.01 cm, partiendo de la base de seleccionar un cable de cobre para bobinado disponible en la ciudad donde se realiza el prototipo.

Para optimizar el diámetro del conductor, se tomará los siguientes valores base:

- **Separación entre las espiras:** 2.04 cm
- **Número de vueltas:** 11
- **Diámetro de hélice:** 4.33 cm

En el cuadro 12 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización y en el Anexo B (59) se muestran las imágenes de simulación de cada variación.

Tabla 12: Variación del diámetro del conductor

Diámetro del conductor (cm)	Ganancia(dBi)
0.1	13.89
0.11	12.33
0.12	11.93

En conclusión, en este paso de parametrización, al aumentar el valor del diámetro del conductor, la ganancia empieza a disminuir y se tiene un mejor acople. Una vez revisadas todas las simulaciones se obtuvo que el diámetro de conductor que presenta los mejores resultados es el diámetro de 0.1 cm.

Número de espiras

En el análisis paramétrico del diseño del número de espiras se parte de la idea que a mayor cantidad de vueltas mayor es la ganancia de la antena, aunque esta relación no es lineal, además, se llega al punto en el que seguir aumentando el número de vueltas disminuye la ganancia de la antena. Se hace una variación de 11 a 13 vueltas para analizar el comportamiento de la antena.

Para optimizar el número de vueltas, se tomará los siguientes valores base:

- **Separación entre las espiras:** 2.04 cm
- **Diámetro de hélice:** 4.33 cm
- **Diámetro del conductor:** 0.1 cm

En el cuadro 13 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización y en el Anexo B (62) se muestran las imágenes de simulación de cada variación.

Tabla 13: Variación del número de vueltas

Número de vueltas	Ganancia(dBi)
11	12.33
12	13.89
13	10.93

En conclusión, en este paso de parametrización, al aumentar el número de vueltas de la antena la ganancia también incrementa su valor, además, se llega al punto en el que añadir espiras disminuye la ganancia de la antena. Una vez revisadas todas las simulaciones se obtuvo que el número de vueltas que presenta los mejores resultados son 12.

### 3.3 Diseño y simulación de la antena bocina

En el proceso de diseño de una antena bocina se lleva a cabo en programas de simulación que permitan observar las características y comportamiento del dispositivo en una implementación. En este capítulo se muestra el diseño de la antena Bocina cónica para una frecuencia de operación de 2.2 GHz.

Este estudio se realiza en el software de simulación CST (Computer simulation technology Microwave Studio) suite versión 2022 (Solvers y Compatibility, 2020), el software es una herramienta especializada en el análisis de dispositivos electromagnéticos en altas frecuencias.

#### 3.3.1 *Diseño teórico de la antena bocina*

Antes de iniciar el desarrollo matemático, se definen las especificaciones de diseño, las cuales están resumidas en el cuadro 14.

En las antenas cónicas a medida que aumenta el ángulo de apertura, aumenta el valor de la directividad de un cuerno con longitud dada hasta un valor máximo, que al sobrepasar comienza a disminuir esta directividad. La disminución es el resultado del predominio del error de fase cuadrático en la apertura [Jadhav et al., 2017].

La antena está diseñada para ser usada como alimentador de una antena parabólica. Se diseñará para una frecuencia de 2.4 GHz correspondiente a la banda S. El diseño establece una ganancia aproximada de 14 dB.

Para determinar las dimensiones de una antena bocina se aplican diferentes estrategias útiles. En este proyecto se plantea la siguiente metodología:

Tabla 14: Especificaciones de diseño

Parámetro	Requisito
Banda de operación	Banda S
Frecuencia de operación	2.2 GHz
Ancho de banda	¡50 MHz
Ganancia	¡10 dBi
Polarización	Circular izquierda

1. Determinar el diámetro de la antena:

$$d_m = \sqrt{3\lambda l} = \sqrt{3(0.15)(0.1363)} = 0.2476m \quad (31)$$

Donde l se puede determinar con el apoyo de una calculadora online de antenas cónicas (Link de la calculadora)

2. Determinar el error cuadrático de fase de la antena:

$$s = \frac{d_m^2}{8\lambda l} = \frac{0.2476^2}{8(0.15)(0.1363)} = 0.375 \quad (32)$$

3. Determinar el factor de pérdida L(s):

$$L(s) = (0.8 - 1.71(0.375) + 26.25(0.375)^2 - 17.79(0.375)^3) = 2.917 \quad (33)$$

4. Determinar la directividad de la antena:

$$Dc = 10 \log_{10} \frac{C^2}{\lambda} - L(s) \iff 14.867dB \quad (34)$$

Resumen de los valores obtenidos en el cuadro 15:

Tabla 15: Resumen de los valores teóricos

Parámetro	Valor obtenido
$d_m$	0,2476 m
s	0,374
L(s)	2,917
$D_c$	12,86 dB

Una vez obtenidos los valores del diámetro de apertura de la antena bocina y la

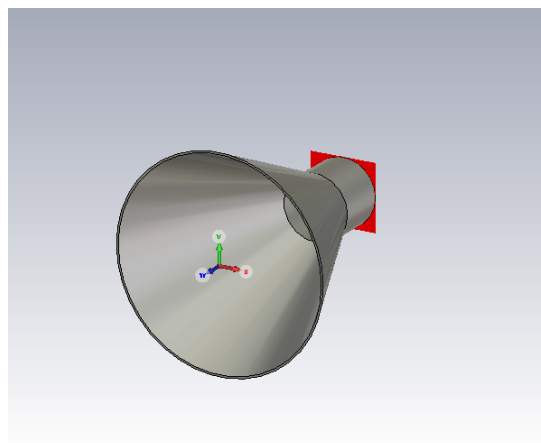
longitud axial de la antena se puede trabajar sobre el simulador de antenas. Pero antes de esto es importante determinar las medidas de la guía de onda que se acoplara a la antena bocina. Para este trabajo se realizó una exhaustiva investigación y se tomó la decisión de trabajar con las dimensiones de dos documentos, donde se realiza el diseño y simulación de antenas cónicas en banda S [Jadhav et al., 2017] y [Nandigam et al., 2018].

### 3.3.2 *Simulación de la antena bocina*

El diseño de una antena bocina cónica requiere tener en cuenta varios factores, como la frecuencia de operación, el tamaño y la forma de la antena, y la resistencia y la impedancia eléctrica.

Para este caso se usaron los valores obtenidos de manera teórica y se implementaron usando la herramienta CST studio suite [Solvers and Compatibility, 2020]. Acá no se explicará a de manera detallada la implementación en la herramienta.

Figura 28: Antena bocina cónica



- **Parámetro S:**
- **Patrón de radiación:**

### 3.3.3 *Estudio paramétrico de la antena bocina*

Para parametrizar una antena bocina cónica, se necesitan conocer algunos de sus parámetros clave, como el tamaño y la forma de la antena. Estos parámetros se pueden ajustar para optimizar el rendimiento de la antena en términos de ganancia, directividad y ancho de banda.

- **Diámetro de la bocina**

- Longitud de la bocina
- Diámetro de la guía de onda

Diámetro de la bocina

El diámetro de la bocina es un factor importante en el parámetro S de una antena bocina cónica. Un diámetro más grande aumenta la resonancia, mientras que un diámetro más pequeño reduce la resonancia.

Para optimizar el diámetro del conductor, se tomará los siguientes valores base:

- **Diámetro de la bocina:** 25 cm
- **Longitud de la bocina:** 15 cm
- **Diámetro de la guía de onda:** 8.33 cm

Se realizara una variacion desde 15 cmm hasta 30 cm con una variacion de 5 cm, en el cuadro 16 se encuetra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización.

Tabla 16: Variación del diámetro de la bocina

Diámetro de la bocina (cm)	Parametro S(dB)	Ganancia(dBi)
25	-9.55	13.74
22.5	-10.65	13.21
20	-12.44	12.84
17.5	-13.06	11.79
15	-13.28	10.70

En conclusión, en este paso de parametrización, al disminuir el valor del diámetro, el parámetro de dispersión aumenta de manera significativa, pero la ganancia disminuye de igual manera. Se obtuvo que el mejor diámetro es el resultado de 15 cm. Longitud de la bocina

La longitud de la bocina también puede afectar la resonancia de una antena bocina cónica. Una bocina más larga proporciona una mayor resonancia, mientras que una bocina más corta reduce la resonancia.

Para optimizar el diámetro del conductor, se tomará los siguientes valores base:

- **Diámetro de la bocina:** 15 cm
- **Longitud de la bocina:** 15 cm

- **Diámetro de la guía de onda:** 8.33 cm

Se realizará un cambio desde 10 cm hasta 30 cm con una variación de 5 cm, en el cuadro 17 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización.

Tabla 17: Variación de la longitud de la bocina

Longitud de la bocina (cm)	Parametro S(dB)	Ganancia(dBi)
10	-13.28	10.70
15	-12.4	10.76
20	-14.56	10.59
25.5	-15	10.63
20	-14.66	10.46

En conclusión, en este paso de parametrización, al aumentar el valor de la longitud de la bocina el Parámetro de dispersión aumenta de manera significativa y la ganancia presenta un estado de estancamiento. Se obtuvo que la mejor longitud es el resultado de 10 cm.

Diámetro de la guía de onda

El diámetro de la guía de onda de la antena también puede afectar la ganancia. Un diámetro más pequeño proporciona una mayor ganancia, mientras que un diámetro más grande reduce la ganancia.

Para optimizar el diámetro del conductor, se tomará los siguientes valores base:

- **Diámetro de la bocina:** 15 cm
- **Longitud de la bocina:** 10 cm
- **Diámetro de la guía de onda:** 8.33 cm

Se realizará un cambio desde 5.33 cm hasta 9.33 cm con una variación de 1 cm, en el cuadro 18 se encuentra el resumen de los valores obtenidos en este paso de la parametrización.

En conclusión, en este paso de parametrización, al disminuir el valor del diámetro de la guía de onda, el parámetro dispersión aumenta de manera muy significativa, presentando grandes cambios con poca variación y la ganancia presenta un estado de estancamiento. Se obtuvo que la mejor longitud es el resultado de 5.33 cm.

En el cuadro 19 se encuentra el resumen de los resultados finales de la antena Bocina y en el Anexo C (62) se muestran las imágenes de simulación del resultado.

Figura 29: Parámetro S antena bocina cónica

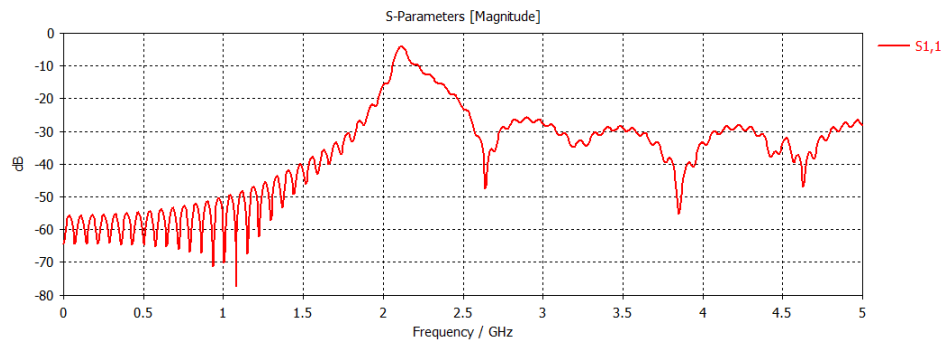


Tabla 18: Variación del diámetro de la guía de onda

Diámetro de la guía de onda (cm)	Parametro S(dB)	Ganancia(dBi)
9.33	-19.83	10.49
8.33	-15.66	10.43
7.33	-25.05	10.56
6.33	-48.2	10.42
5.33	-61.46	10.40

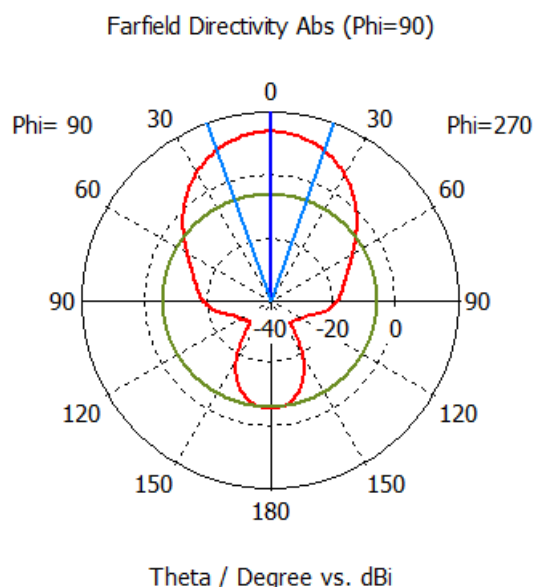
Tabla 19: Especificaciones físicas antena yagi

Diámetro de la bocina (cm)	Longitud de la bocina (cm)	Diámetros de la guía de onda (cm)
15	10	5.33

Tabla 20: Resultados de diseño antena bocina

Parámetro	Resultado
Parámetro S	-56.44 dB
Ancho de banda	~2 GHz
Ganancia	13.48 dBi
Polarización	Circular izquierda

Figura 30: Patrón de radiación antena bocina cónica



## 4 Construcción, caracterización y análisis de la Antena

### 4.1 Elección de la antena para la construcción del prototipo

Una vez realizadas las simulaciones de cada una de las antenas, con su respectivo proceso de parametrización, se logró obtener los mejores resultados para la aplicación en concreto de este proyecto, los cuales se observan en los cuadros 20, 7 y 21, se puede hacer la elección de la antena para implementar el prototipo teniendo en cuenta otras condiciones como: El costo, tiempo y disponibilidad de recursos.

En el caso de la antena yagi se lograron muy buenos resultados en simulación, pero para este proyecto no cumple una condición importante como lo es la polarización circular, la cual es clave para aplicaciones satelitales. Para la antena bocina se lograron cumplir cada una de las condiciones expuestas en la tabla 14, pero debido a que sus aplicaciones están orientadas a ser alimentadores de antenas parabólicas, es descartada, debido a que los costos del proyecto se elevan considerablemente con la construcción del reflector parabólico, además de no contar con un equipo con la suficiente capacidad para realizar una parametrización de la unión de los dos elementos (Antena bocina y reflector parabólico) como se observa en las imágenes en el anexo C 65.

Por eso se toma la decisión de construir el prototipo de antena helicoidal, por las siguientes razones:

- Tiene aplicación sin necesidad de utilizar otros componentes como pasa con la antena bocina.

- Su costo es bajo comparado con las otras dos antenas.
- Se pueden diseñar varios prototipos para realizar un aporte a los laboratorios de comunicaciones de la universidad.

Algo a resaltar en el desarrollo y construcción del prototipo es que no se puede garantizar una ganancia que permita obtener el enlace con el satélite en un primer proyecto. Se conoce que para las aplicaciones satelitales, aspectos como la ganancia y directividad influyen de forma muy significativa, por lo que por decisiones logísticas para permitirnos como grupo trabajar en la construcción y caracterización de prototipos de antenas, la mejor opción es la antena helicoidal, teniendo en cuenta estas limitaciones de los prototipos para una próxima fase del proyecto de la estación terrena.

Además, el desarrollo de este primer prototipo de antena permitirá tener un acercamiento al alimentador final de la antena de la estación terrena, por lo que otros aspectos técnicos como materiales, pesos o resistencia no se evalúan. El objetivo de esta fase del proyecto es documentar información sobre la construcción y caracterización de un prototipo de antena con el analizador de redes vectoriales disponible en la Universidad Industrial de Santander.

## 4.2 Construcción de la antena helicoidal

Para iniciar la etapa de construcción del prototipo de antena helicoidal propuesto en este proyecto se realiza una agrupación de las medidas que presentaron el mejor rendimiento 21.

Tabla 21: Medidas para la construcción de la antena

Dimensión	Símbolo	Valor
Frecuencia	$f(\text{GHz})$	2.2
Longitud de onda	$\lambda(\text{cm})$	13.6
Circunferencia	$C(\text{cm})$	13.6
Espaciamiento	$S(\text{cm})$	2.04
Diámetro de la hélice	$D(\text{cm})$	4.33
Número de vueltas	$N$	12
Diámetro del conductor	$dc(\text{cm})$	0.1
Altura de la antena	$H(\text{cm})$	26
Diámetro del plano de tierra	$D_p(\text{cm})$	11

Una vez resumidos los valores que determinan el mejor rendimiento de la antena en las figuras 31 y 32 se observa el comportamiento en simulación de la antena propuesta para construir.

Figura 31: Parámetro S de la antena a construir

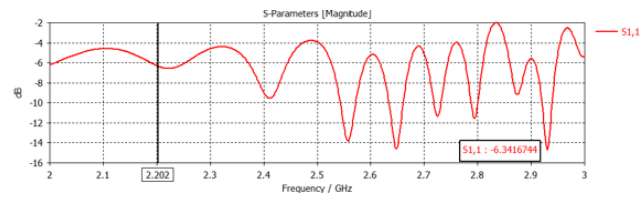


Figura 32: Ganancia de la antena a construir

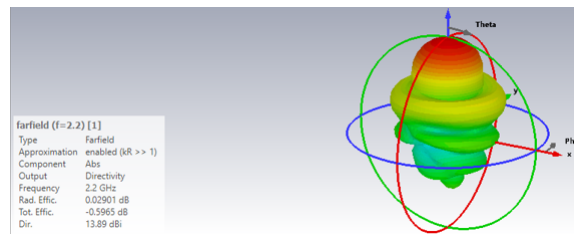
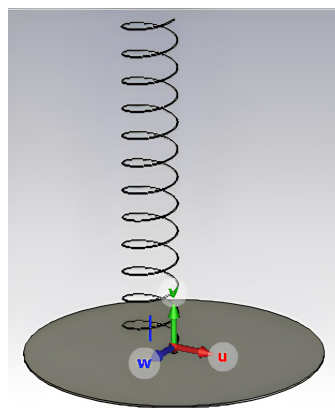


Figura 33: Antena simulada en CST



La estructura utilizada como base de la antena se diseñó en el software de solidworks en la versión 2022, estos archivos se pueden encontrar en un enlace en el anexo C. Una vez hecho el diseño, con ayuda de una cortadora láser se realiza el corte y se arma la estructura.

Este proceso de construcción está compuesto de dos fases:

- **Fase 1:** Construcción del prototipo sin el acoplador de impedancias.

Figura 34: Prototipo sin acoplador de impedancias

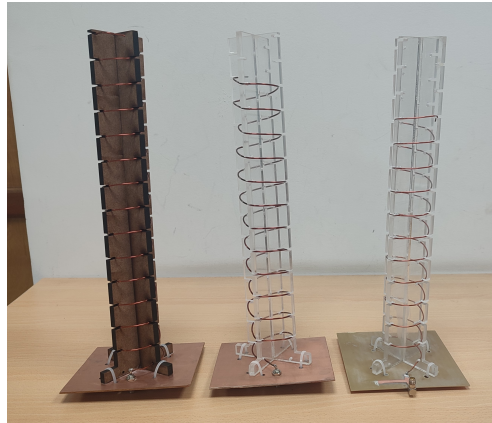


- **Fase 2:** Construcción del prototipo con el acoplador de impedancias.

Figura 35: Prototipo con acoplador de impedancias



Figura 36: Prototipos construidos



Además del prototipo acoplado, se realizó la construcción de dos prototipos más que no cuentan con el acoplador de impedancias 36:

En las siguientes secciones cada una de las fases estará identificada y explicada de forma detallada. La tabla de los materiales utilizados en la construcción de la antena se tiene en el anexo C 27.

### 4.3 Proceso de caracterización

Una vez se tienen los prototipos construidos se realizan las medidas principales de caracterización de la antena con ayuda del VNA (Vector Network Analyzer), las medidas que se determinan son :

- Parámetro de dispersión (Parámetro S)
- Impedancia de la antena
- Relación de onda estacionaria (Parámetro VSWR)

El montaje para la toma de las medidas se observa en la figura 37

El dispositivo utilizado para la toma de las medidas de laboratorio se debe calibrar de forma previa antes de hacer la toma de medidas, con el objetivo de minimizar los errores en la obtención de las gráficas. La antena se conecta al puerto dos del dispositivo a través del conector SMA ubicado en el reflector de la baquelita. Los datos son exportados con una memoria USB y graficados con licencia en MATLAB.

El video de calibración del dispositivo y el video de la toma de datos se encuentra en el enlace al github en el anexo 4.4

Figura 37: Montaje de laboratorio



#### 4.3.1 Caracterización del prototipo sin el acoplador de impedancias

Con el prototipo sin el acoplador de impedancias (34) se hace la toma de gráficas con el VNA. El objetivo es observar las medidas de la antena y comparar el parámetro S obtenido en simulación con el obtenido en laboratorio. Además, obtener el valor de impedancia de la antena para realizar el diseño del acoplador de impedancias.

- **Parámetro de dispersión (Parámetro S):**

Como se observa en la figura 38 la antena cuenta con un acople en  $-4.835$  dB el cuál aún no es suficiente para este tipo de aplicaciones, dónde por conocimientos previos se sabe que debe estar por debajo de los  $-10$  dB [Soria, 2013] .

Realizando la comparación con la figura 31 dónde se observa el parámetro S de la antena simulada, se cuenta con un acople de  $-6.34$  dB. Para mejorar el acople se recurre a una técnica de acople de impedancias, dónde para este proyecto se hizo la implementación de un STUB, del cual se puede observar su diseño en la sección de acoplador de impedancias (41).

- **Impedancia de la antena:**

Como se observa en la figura 39 la antena cuenta con una impedancia de  $42.627 - j77.833 \Omega$  . Este valor de impedancia ocurre debido a que la antena aún no se

Figura 38: Gráfica del parámetro S sin acople

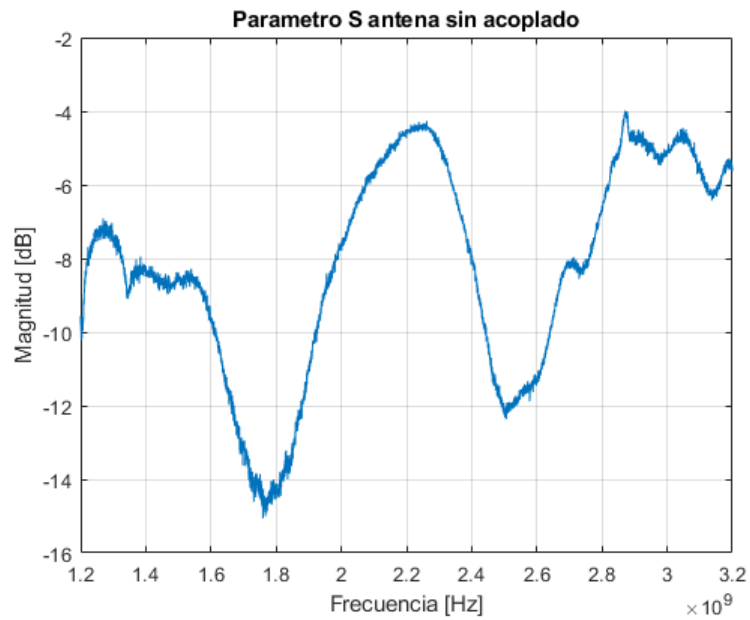
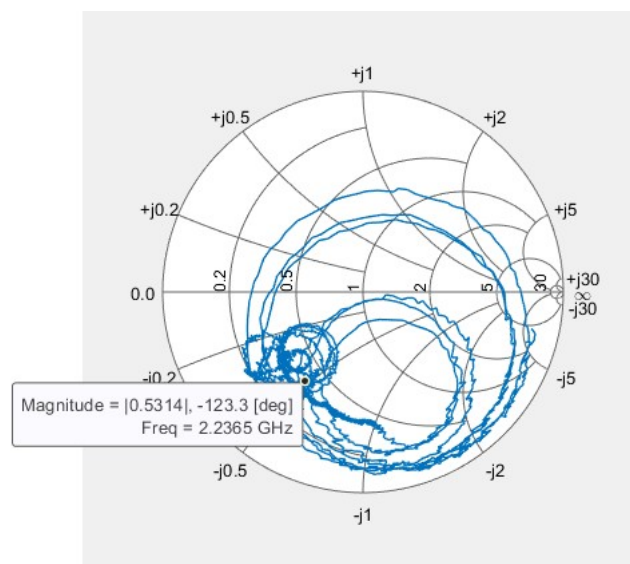


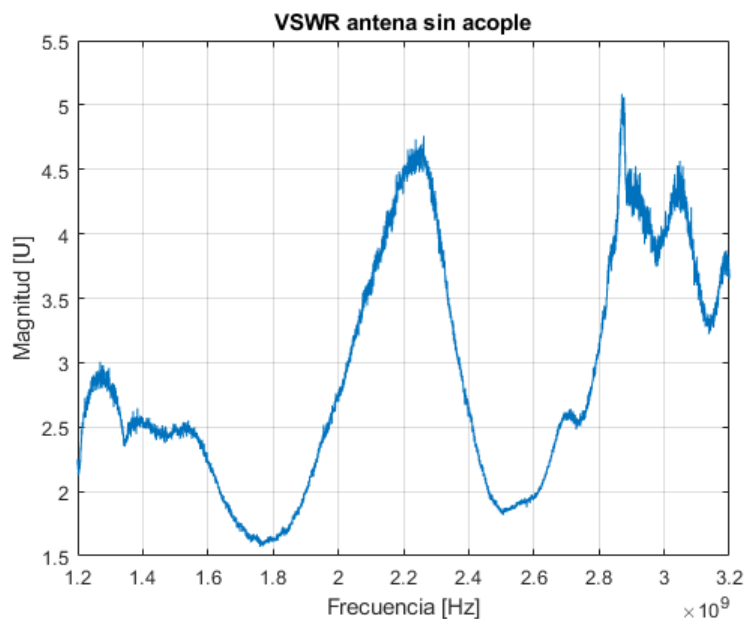
Figura 39: Gráfica de la carta de smith sin acople



encuentra acoplada por debajo de los -10 dB en la frecuencia deseada, que son los 2.2 GHz. Para que el acople sea correcto, la antena debe contar con una impedancia  $50 \Omega$  de forma ideal en la frecuencia deseada para la aplicación. El diseño del acoplador se puede observar en la sección de acoplador de impedancias (41).

- **Relación de onda estacionaria (Parámetro VSWR):**

Figura 40: Gráfica del vswr sin acople



Como se observa en la figura 40 la antena cuenta con un VSWR de 4.548 U. Este valor de VSWR ocurre debido a que la antena aún no se encuentra acoplada por debajo de los -10 dB en la frecuencia deseada, que son los 2.2 GHz. Una vez la antena este acoplada en la frecuencia deseada el VSWR debe ser menor a 2 U.

En la tabla 22 se observa el resumen de las medidas obtenidas en la primera caracterización en el laboratorio.

Tabla 22: Resumen de medidas del prototipo inicial de antena helicoidal

Medida	Valor
Acople	-4.835 dB
Impedancia	$42.627-j77.833 \Omega$
VSWR	4.548 U

### 4.3.2 Acoplador de impedancias

Una técnica sencilla para el acoplamiento de impedancias es el diseño de un stub simple en corto circuito o circuito abierto, conectado en paralelo o serie y a una distancia definida a la carga. La gran ventaja de la implementación de un stub es que no agrega componentes a la estructura y puede ser implementado en el reflector de la antena [Soria, 2013].

Existen varias metodologías para determinar las medidas de los stub, como el cálculo con la ayuda de la carta de smith. En este proyecto se realizó con la ayuda de dos programas: ADS(Advanced Design System) utilizado en software descargable y amanogawa utilizado en software en línea.

La metodología para calcular el stub fue la siguiente:

1. Determinar la impedancia de la antena:

El valor de la impedancia utilizada se puede observar en la figura 39. Este valor será el utilizado en el amanogawa para calcular la longitud del stub y la distancia a la carga.

2. Determinar la longitud del stub y la distancia a la carga:

Con el valor de impedancia ya medida, en el software de amanogawa se introduce la impedancia característica de la línea, la permitividad en el vacío del material donde se imprimirá el stub y la frecuencia de operación donde se requiere hacer el acople. Para este proyecto esos valores son:

- **Impedancia característica ( $Z_0$ ):** 50  $\Omega$
- **Frecuencia de operación ( $f_0$ ):** 2.2 GHz
- **Permitividad en el vacío ( $\epsilon_0$ ):** 2.35

Con cada uno de los valores ya obtenidos se introducen en el programa y se realiza el cálculo de las dimensiones del stub. El programa nos arroja dos soluciones (41 y 42), las cuales serán construidas e implementadas posteriormente.

3. Determinar el ancho de la pista del stub :

Para determinar el ancho de la pista se debe conocer las principales medidas de la base donde se realizara la impresión del stub. Para este proyecto se utilizó baquelita doble cara, donde las medidas solicitadas por el software de amanogawa son:

- **h:**1.5 mm
- **t:**0.02 mm
- **f:**2.2 GHz

Figura 41: Dimensiones del stub en amanogawa solución uno

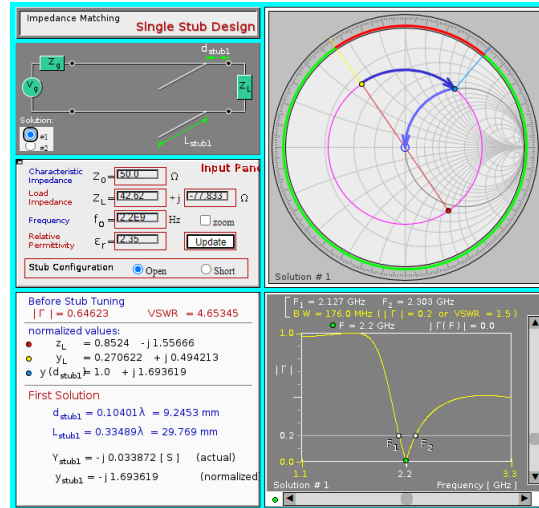
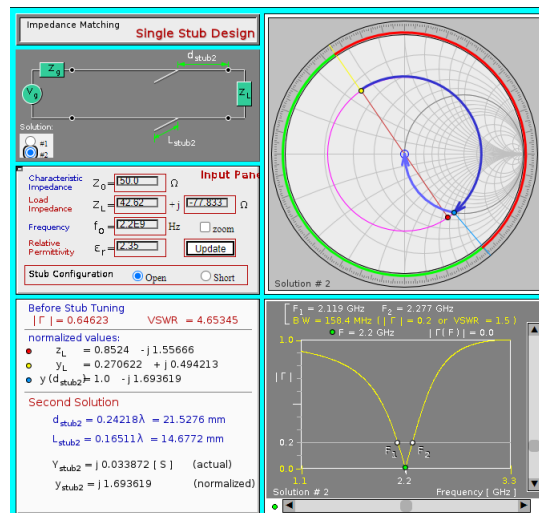
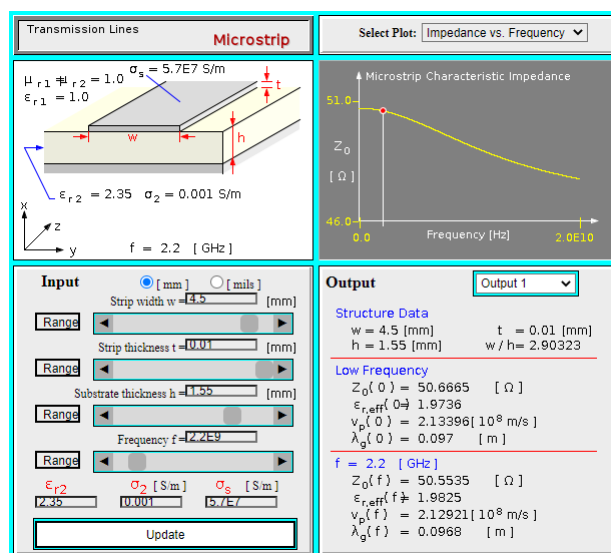


Figura 42: Dimensiones del stub en amanogawa solución dos



Para determinar el valor de  $w$  se realiza un barrido con ayuda del software, el objetivo es encontrar un valor de  $w$  donde el valor de la impedancia característica ( $Z_0$ ) sea de  $50 \Omega$ . El diseño del ancho de la pista se puede ver en la figura 43.

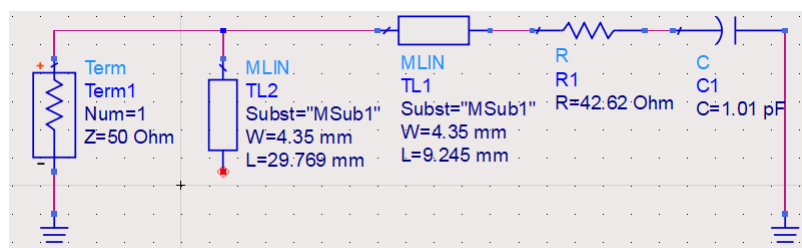
Figura 43: Ancho de la pista del stub en amanogawa



#### 4. Realizar la simulación del stub:

Una vez obtenidas las dimensiones del stub se realiza la simulación del mismo con ayuda del ADS, donde se arma el circuito de un stub simple con la impedancia característica de la línea de acople, como se observa en la figura 44. En la figura 45 se observa el parámetro S de la simulación del circuito (Debido a que el resultado es similar para los dos stub, solo se muestra la simulación de una de las soluciones).

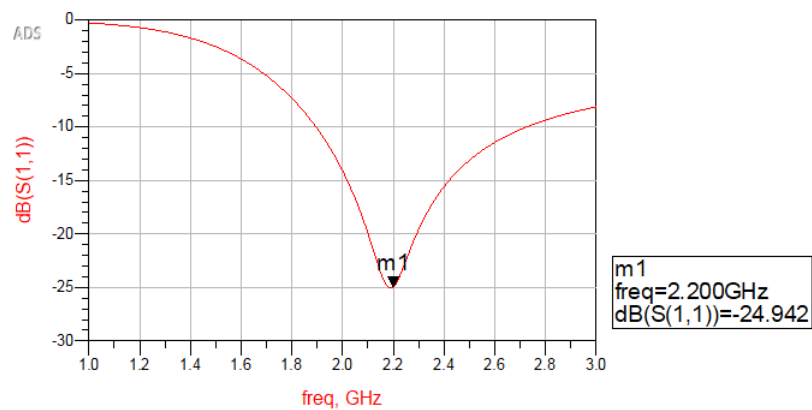
Figura 44: Circuito del stub en ADS



Como se observa en la figura 45 la solución del stub funciona adecuadamente en la frecuencia de operación de 2.2 GHz. Dónde el acople teóricamente está en -24.942 dB y cuenta con un ancho de banda de aproximadamente 900 MHz.

#### 5. Impresión del stub

Figura 45: Parámetro s del stub en ADS



Las dimensiones del stub determinadas para tener un acople por debajo de los -10 dB en la antena se pueden ver en la tabla ???. El diseño se realizó en el software de solidworks versión 2022, cuyos archivos se pueden encontrar en un enlace en el anexo C. Una vez diseñados los planos se realizó el corte con la ayuda de una cortadora CNC como se observa en las figuras (46) y (47).

Medida	Valor
W	4.35 mm
dsutb1	9.25 mm
Lsutb1	29.77 mm
dsutb2	21.53 mm
Lsutb2	14.68 mm

Figura 46: Vista del software de la CNC

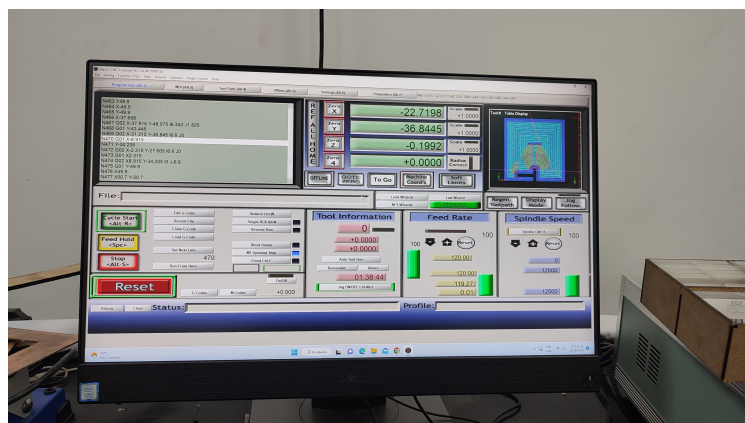
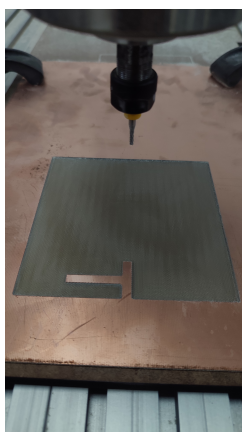


Figura 47: Corte del stub en la CNC



### 4.3.3 Caracterización del prototipo con el acoplador de impedancias

Una vez construido el stub la antena fue ubicada en la parte superior de la baquelita cortada y conectada a un extremo del acoplador, como se observa en la figura 35.

El objetivo de la toma de gráficas en este paso es observar la antena acoplada por debajo de los -10 dB. Además, una impedancia con tendencia a un valor resistivo y un parámetro VSWR menor a las 2 U.

- **Parámetro de dispersión (Parámetro S):**

Tabla 23: Valores de acople de las antenas con los stub

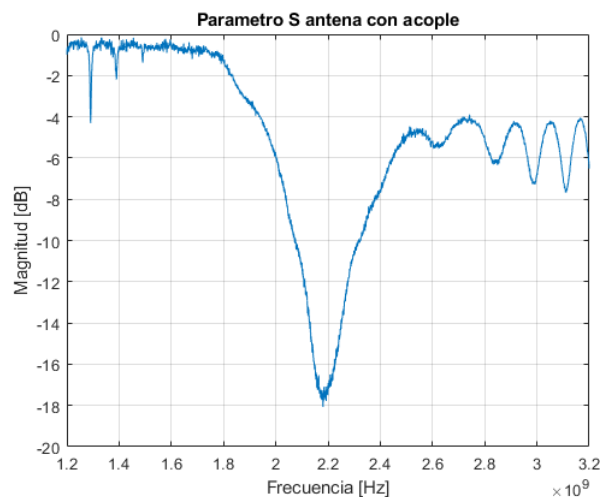
Stub	Acople
1	-13.85 dB
2	-8.593 dB
3	-16.581 dB

Las medidas observadas en la tabla 23 corresponde al valor del parámetro de dispersión las antenas con los acopladores de impedancias diseñados (41 y 42) en la frecuencia de 2.2 GHz. El stub 3 es una adaptación del stub 1, donde en la actividad de caracterización del laboratorio se disminuyo su longitud (aproximadamente 1 mm) con el objetivo de correr el pico de frecuencia de resonancia y obtener un mejor acople.

En la figura 48 se puede observar la gráfica del mejor parámetro de dispersión obtenido en el proyecto, correspondiente a la antena acoplada con el stub 3, con un acople de -16.581 dB y un ancho de banda de aproximadamente 240 MHz.

Las imágenes de las gráficas obtenidas para los otros dos stub se pueden observar en el anexo D (67).

Figura 48: Parámetro S del prototipo Final



- **Impedancia de la antena:**

Tabla 24: Valores de impedancia de las antenas con los stub

Stub	Impedancia
1	$36.045 + j11.991 \Omega$
2	$33.630 + j28.461 \Omega$
3	$36.175 + j3.346 \Omega$

Las medidas observadas en la tabla 24 corresponde al valor de la impedancia de las antenas con los acopladores de impedancias diseñados en la frecuencia de 2.2 GHz.

En la figura 49 se puede observar la gráfica de la mejor impedancia conseguida en el desarrollo del prototipo de antena, correspondiente a la antena acoplada con el stub 3. La impedancia lograda es de  $36.175 + j3.346 \Omega$ , la impedancia cuenta con una parte imaginaria que para esta aplicación se puede aproximar a cero, dejando una impedancia con valor real (Resistencia) de  $36 \Omega$ . Lo ideal para mejorar el acople es lograr una impedancia con valor real de  $50 \Omega$ , en este proyecto debido a los materiales con los que se diseñó el prototipo no se obtuvo un valor más cercano al ideal, tarea a mejorar en posteriores implementaciones de la antena diseñada.

Las imágenes de las gráficas obtenidas para los otros dos stub se pueden observar en el anexo D (69).

Figura 49: Impedancia del prototipo Final

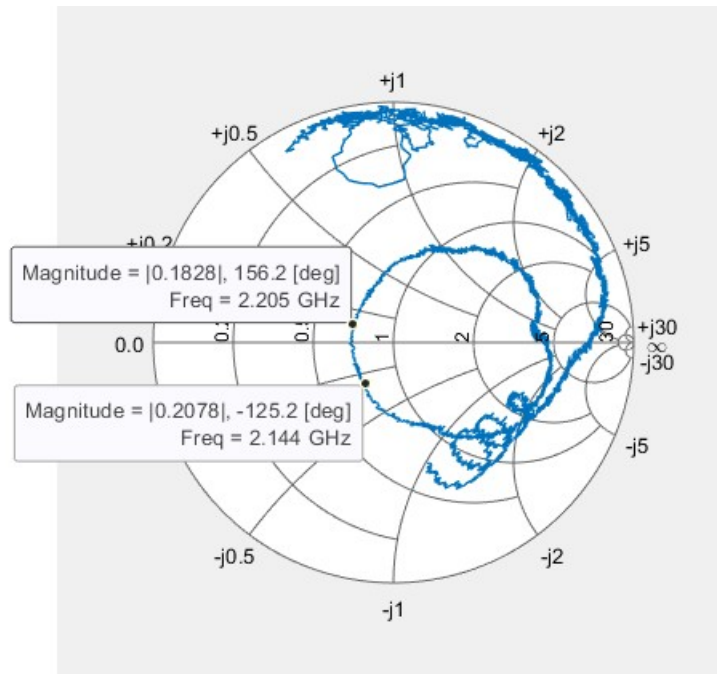


Tabla 25: Valores del VSWR de las antenas con los stub

Stub	VSWR
1	1.548 U
2	2.171 U
3	1.392 U

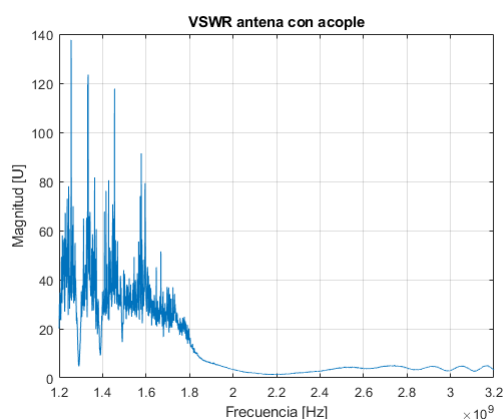
- **Relación de onda estacionaria (Parámetro VSWR):**

Las medidas observadas en la tabla 25 corresponde al valor de VSWR de las antenas con los acopladores de impedancias diseñados en la frecuencia de 2.2 GHz.

En la figura 50 se puede observar la gráfica del mejor parámetro VSWR obtenido en el desarrollo del proyecto, correspondiente a la antena acoplada con el stub 3. El valor obtenido de 1.392 U cumple con el objetivo de tener un VSWR menor a las 2 U, lo cual se generó a partir de lograr un acople correcto de la antena por debajo de los -10 dB.

Las imágenes de las gráficas obtenidas para los otros dos stub se pueden observar en el anexo D (71).

Figura 50: VSWR del prototipo Final



#### 4.4 Análisis de resultados

En la tabla 26 se observa las medidas logradas con el prototipo final de la antena. Donde se evidencia que el trabajo realizado a lo largo del proyecto cumplió con los requisitos planteados (8).

Tabla 26: Resumen de medidas del prototipo final de antena helicoidal

Medida	Valor
Acople	-16.581 dB
Impedancia	36.175+j3.346 $\Omega$
VSWR	1.392 U
Frecuencia de resonancia	2.2 GHz
Ancho de banda	240 MHz

Como se pudo observar a lo largo del desarrollo del proyecto, se desarrolló una metodología para obtener el prototipo final de la antena. La cual básicamente consistía en desarrollar una parametrización en simulación para obtener las mejores medidas de la antena, como se ve en la tabla 21.

Una vez realizada la parametrización se realizó la construcción del prototipo y se obtuvo una primera caracterización cuyas medidas se encuentran resumidas en la tabla 22. En esta primera caracterización se evidenció que la antena aún no se encontraba acoplada por debajo de los -10 dB, contaba con una impedancia alejada del valor de ideal de  $50 \Omega$  que se espera tener líneas de transmisión para este tipo de aplicaciones, además quedo en evidencia con el parámetro VSWR mayor a las 2 U la falta de acople de la antena en la frecuencia de 2.2 GHz.

Para solucionar el problema de acople se tomó la decisión de implementar un stub simple en circuito abierto, cuyas medidas se encuentran resumidas en la tabla ???. Una vez cortados los stub por la CNC se realiza la conexión de la antena a uno de los extremos para realizar una segunda caracterización, donde medidas obtenidas se encuentran resumidas en las tablas 23, 24 y 25.

Como se observa en las tablas de la segunda caracterización, se realizó la implementación de tres stub simple. El stub 3 es una pequeña modificación del stub 1, donde se acorta la longitud del stub 1 con el fin de mover la frecuencia de resonancia a frecuencias más altas y mejorar el acople en la frecuencia de 2.2 GHz.

Con los stub 1 y 3 se logró el objetivo de acoplar de forma correcta la antena por debajo de los -10 dB, una impedancia casi resistiva y un parámetro VSWR menor a 2 U. Se pudo evidenciar en el trabajo de laboratorio como al mejorar el acople de la antena y avanzar a valores de acople más negativos cada uno de los parámetros de la antena mejoraban tal como se esperaba.

Además, queda en evidencia como el stub 2 no logro el acople de la antena por debajo de los -10 dB, donde diferentes factores pudieron causar errores en la implementación del prototipo, como errores en los planos, en la precisión del corte o simplemente esa solución no funcionaba para una implementación real a pesar de ser del mismo material de los otros dos stub y dar resultados en simulación muy parecidos, razón por la cual es descartado para una próxima implementación.

En las gráficas 51 y 52 se puede observar el avance de los parámetros S y vswr de la antena, desde el momento de la simulación, la antena sin acoplar y una vez ya acoplada. En estas gráficas se evidencia el proceso de aprendizaje a lo largo del proyecto en el diseño, simulación y construcción de un prototipo funcional de antena helicoidal para operar en banda s.

En la gráfica 51 en el caso de los datos de simulación se observa que no se logró acoplar

Figura 51: Comparación de parámetros S

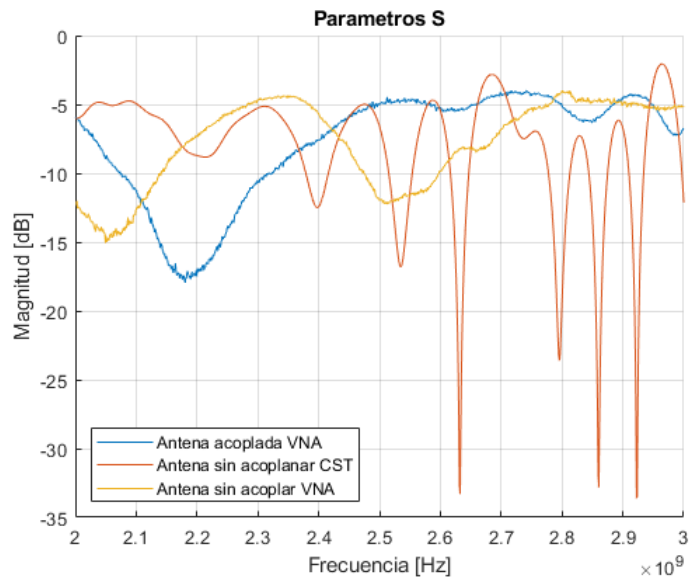
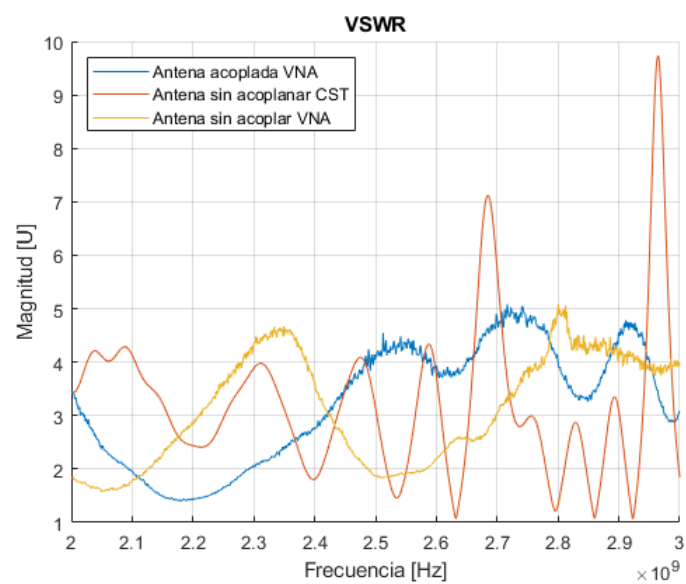


Figura 52: Comparación de parámetros VSWR



la antena en la frecuencia de 2.2 GHz está en -6.34 dB, para los datos experimentales la antena sin acoplar está en -4.835 dB y para la antena acoplada se obtuvo un acople de -16.581 dB con un ancho de banda de 240 MHz. En el análisis desarrollado sobre la diferencia en los datos obtenidos en simulación y el prototipo real se debe a varios factores importantes a resaltar, como lo son: Los materiales que se utilizaron y los disponibles en el programa no se pueden garantizar que sean los mismos, además es de conocimiento en el desarrollo de las aplicaciones de radiofrecuencia que los programas de simulación nos permiten tener un acercamiento a los valores que obtendremos en las aplicaciones reales más no garantizan una gran similitud en cada una de las frecuencias que se analizan.

En la gráfica 52 en el caso de los datos de simulación se observa que debido a que la antena no se encuentra acoplada, tiene un vswr de 2.5 U, para los datos experimentales la antena aun sin acoplar tiene un vswr de 2.95 U y para la antena ya acoplada se obtuvo un vswr de 1.392 U.

Por último, la antena cuenta con la ventaja del uso de un stub simple como acoplador de impedancias, lo que nos permite tener una versatilidad en la elección de la frecuencia de operación que se requiera, debido a que dependiendo de la frecuencia donde se necesite trabajar podemos hacer variaciones a la longitud del stub, dando una facilidad de cambios a lo largo de frecuencias de la banda S.

## 5 Conclusiones

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, es posible enunciar las siguientes conclusiones:

- A partir del estudio paramétrico y teórico de las tres antenas seleccionadas para el proyecto, se logró identificar cada una de las ventajas, desventajas, características y detalles relevantes de cada una de estas, seleccionando la antena helicoidal para realizar el desarrollo del prototipo del proyecto.
- Se realizó la construcción, validación y análisis de un prototipo funcional de antena helicoidal en banda S, la cual cumple los requisitos de frecuencia de resonancia y ancho de banda propuestos en el proyecto. Además, se desarrolló la caracterización en laboratorio, logrando definir los parámetros de dispersión, vswr e impedancia de la antena.
- La elección e implementación del prototipo de antena para este proyecto logró cumplir gran parte de los requisitos de ancho de banda, impedancia y frecuencia de resonancia. Para el cumplimiento total de los requerimientos de la misión como la directividad y ganancia de la antena se hizo la propuesta de la implementación de una antena parabólica donde el alimentador sea la antena helicoidal o bocina diseñadas en este proyecto.
- El diseño en simulación de la antena bocina, helicoidal y yagi-Uda permitió realizar el estudio y análisis de las dimensiones de cada una de las antenas, como afectan los resultados de ganancia, acople, ancho de banda y coeficiente de reflexión, además de lograr una optimización de las dimensiones para cumplir los requisitos impuestos de ancho de banda, impedancia y frecuencia de resonancia.
- En la construcción del prototipo de antena helicoidal debido a la falta de acople en la frecuencia deseada, se realizó la implementación de un stub simple como acoplador de impedancias, con el que se logró mejorar de forma significativa las medidas obtenidas, dando como resultado el cumplimiento de la entrega de un prototipo funcional en banda S.
- A partir del trabajo realizado se logró proporcionar dos prototipos de antenas helicoidales al laboratorio de comunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, las cuales no se encuentran aún acopladas con el objetivo de que los estudiantes realicen prácticas de laboratorios orientados a la caracterización de antenas con y sin acopladores de impedancia, con ayuda de los videos proporcionados en este trabajo de investigación.

- Con el trabajo realizado a lo largo de este proyecto de investigación se desarrolló el conocimiento y habilidades necesarias para diseñar y simular las antenas en el programa CST, por lo que se proporcionan tres manuales de diseño de cada una de las antenas del proyecto como guía para el desarrollo de proyectos paralelos o laboratorios del área de comunicaciones.

## 6 Recomendaciones

- En la construcción de los prototipos para este proyecto se utilizaron materiales que como equipo podíamos costear, además de los proporcionados por la red tecnoparque del SENA en la ciudad de Bucaramanga. Razón por la que no se garantizó que fueran los mejores para este tipo de aplicaciones de radiofrecuencia y comunicación satelital. Por lo que se propone realizar una gestión de compra y recursos para la compra de materiales y componentes que mejoren la calidad de los resultados, implementando los prototipos con materiales especializados en este tipo de aplicaciones.
- Como se puede observar en las imágenes del anexo C (66) al momento de realizar las simulaciones de la antena parabólica los equipos con los que se cuentan no logran correrlas y se dificulta lograr una parametrización de la antena para una posterior implementación de un prototipo. Por lo que se recomienda gestionar la adquisición de un equipo con estas capacidades o buscar una optimización de los archivos de simulación para lograr una parametrización aproximada y así tener unas medidas claras para la construcción de la antena.
- Se recomienda imprimir un STUB 44 idéntico al expuesto en este trabajo y acoplarlo a otra de las antenas helicoidales que se dejara en el laboratorio de comunicaciones y así poder desarrollar las pruebas necesarias para finalizar la caracterización y obtener el patrón de radiación y la ganancia de la antena.

## 7 Trabajo Futuro

Actividades complementarias a los desarrollos presentados:

- Diseño y acople de un paraboloides para la antena helicoidal desarrollada y realizar un análisis comparativo con la antena helicoidal construida en el este proyecto. Además realizar el acople de la antena cónica a un paraboloides y llevar a cabo un análisis de rendimiento de ambas antenas parabólicas y concluir cuál presenta mejor rendimiento.
- Realizar el diseño de un STUB doble para poder realizar una comparación con el STUB desarrollado en este proyecto y así poder analizar si se presenta una mejoría de rendimiento.
- Asimismo, es importante explorar otros tipos de antenas y acopladores de impedancia con el fin de obtener posiblemente mejores rendimientos.

### Referencias Bibliográficas

- [A. chapari, ] A. chapari, z.H.Firouzeh, R. M. S. S. A low weight s- band quadrifilar helical antenna for satellite communication.
- [Aznar et al., 2004] Aznar, Á. C., Robert, J. R., Casals, J. M. R., Roca, L. J., Boris, S. B., and Bataller, M. F. (2004). *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya.
- [Balanis, 2015] Balanis, C. A. (2015). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons.
- [Bevelacqua, 2020] Bevelacqua, P. (2020). The helicoidal antenna.
- [Chapari et al., 2009] Chapari, A., Firouzeh, Z., Moini, R., and Sadeghi, S. (2009). A low weight s-band quadrifilar helical antenna for satellite communication. In *2009 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting*, pages 1–3. IEEE.
- [Gengqi Zheng, 2018] Gengqi Zheng, B. S. (2018). High-gain normal-mode omnidirectional circularly polarized antenna.
- [Gómez, 2019] Gómez, E. (2019). Diseño de una antena helicoidal miniaturizada con estructuras de meandros. Technical report, INAOE.
- [Huidobro, 2013] Huidobro, J. M. (2013). Antenas de telecomunicaciones. *Revista digital de acta*, 4.
- [Illanas Otero, 2018] Illanas Otero, C. F. (2018). Estudio y diseño de bocinas cónicas lisas de tipo spline para iluminación de sistemas compactos de medida de antenas.
- [Iturri-Hinojosa et al., 2017] Iturri-Hinojosa, A., Martynyuk, A. E., and López-Bonilla, J. (2017). Diseño de una antena bocina-lente radant con escaneo electrónico de haz para la banda ka. *Nova scientia*, 9(18):94–117.
- [Jadhav et al., 2017] Jadhav, R. P., Dongre, V. J., and Heddallikar, A. (2017). Design of x-band conical horn antenna using coaxial feed and improved design technique for bandwidth enhancement. In *2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCCUBEA)*, pages 1–6. IEEE.
- [KEYSIGHT, 2023] KEYSIGHT (2023). Analizadores de red.
- [Kraus, 2000] Kraus, J. (2000). *Antennas: John Daniel Kraus*. McGraw-Hill Companies Inc.

- [Moreno, 2016] Moreno, A. (2016). Construcción de un arreglo de antenas helicoidales en la banda s para una estación terrena. Technical report, IPN.
- [Musa et al., 2014] Musa, A. N., Lamas, A. V., Lao, A. H., Soler, B. F., González, D. C., Cuellar, H. P., González, H. C., and González, I. M. (2014). Proyecto final de antenas.
- [Nandigam et al., 2018] Nandigam, L., Gayathri, K., S, T., Sanjeetha, M., and Natara-  
jan, T. (2018). Design analysis of s-band right hand circularly polarized conical horn  
antenna for navic receiver. *International Journal of Engineering Technology*, 7:512–  
515.
- [Polanco Torres et al., 2017] Polanco Torres, R. A. et al. (2017). Diseño y caracterización  
de una antena yagi en la banda uhf.
- [Rodríguez et al., 2002] Rodríguez, D. L. et al. (2002). *Sistemas inalámbricos de comu-  
nicación personal*. Marcombo.
- [Rodríguez et al., ] Rodríguez, T. E. C., Puerto, Y. M., Alcalá, C. E. G., and Hernández,  
R. J. Propuestas de antenas activas para la recepción de la televisión digital terrestre  
en cuba proposals for active antennas for the reception of digital terrestrial television  
in cuba.
- [Rodríguez Páez, 2013] Rodríguez Páez, J. S. (2013). Antena helicoidal cuadrifilar de  
banda ancha para instrumentación.
- [Ruiz González, 2013] Ruiz González, J. (2013). Diseño, implementación y verificación  
de una antena de microondas.
- [Solvers and Compatibility, 2020] Solvers, E. S. and Compatibility, C. (2020). Cst studio  
suite.
- [Soria, 2013] Soria, C. (2013). Antena helicoidal para satélites pequeños. Technical re-  
port, IPN.
- [Subías et al., 2004] Subías, C., Anguera Pros, J., Vicent Safont, L., et al. (2004). Aprox-  
imación a la teoría de antenas mediante un libro electrónico interactivo.
- [Victoria Velasco et al., 2016] Victoria Velasco, F. J. et al. (2016). Historia, evolución  
y utilización de los satélites de telecomunicaciones y su regulación normativa interna-  
cional.
- [Wikipedia, 2022a] Wikipedia (2022a). Ancho de banda — wikipedia, la enciclopedia  
libre. [Internet; descargado 16-diciembre-2022].

[Wikipedia, 2022b] Wikipedia (2022b). Antena — wikipedia, la enciclopedia libre. [Internet; descargado 16-diciembre-2022].

[Wikipedia, 2022c] Wikipedia (2022c). Antena de bocina — wikipedia, la enciclopedia libre. [Internet; descargado 18-diciembre-2022].

[Wikipedia, 2022d] Wikipedia (2022d). Dipolo (antena) — wikipedia, la enciclopedia libre.

[Zolotkov, 2017] Zolotkov, A. (2017). Dipole antenna calculator.

## Apéndices

### Apéndice A. Cálculos teóricos Antena Yagi-Uda

El diseño de una antena Yagi-Uda es muy sencillo, lo primero que tendremos en cuenta es el diseño del elemento de alimentación o dipolo

1. Lo más importante que debemos tener presente son los parámetros geométricos más importantes y relevantes del elemento

- **L:** longitud del dipolo
- **Gap:** Distancia Entre los alambres
- **D:** diámetro del dipolo
- **R:** D/2

2. Se debe elegir la frecuencia en la que queremos trabajar, con la cual se calcula el valor de la longitud de onda.  $f=2.2$  GHz

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (35)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.2 \times 10^9} \quad (36)$$

$$\lambda = 136.36 \text{ mm} \quad (37)$$

3. Una vez calculada la longitud de onda, se calcula el radio del dipolo.

$$R = 0.001 * \lambda \text{ mm} \quad (38)$$

$$R = 0.001 * 136.36 \text{ mm} \quad (39)$$

$$R = 0.136 \text{ mm} \quad (40)$$

4. Con el radio del dipolo se calcula la longitud del dipolo, muchos libros dicen que la forma de calcular la longitud es  $\lambda/2$ , pero esta fórmula sería válida si no se estuviera trabajando en un conductor, sino que se trabajara en el aire. Debido a

que estamos trabajando en un conductor existe un parámetro  $k$  que nos permite tener en cuenta el factor del conductor.

$$K = 0.9787011 + \frac{-10.88627 - 0.9787011}{\left[1 + \left(\frac{R_l}{0.0004490702}\right)^{1.792529}\right]^{0.33004597}} \quad (41)$$

$$K=0.978$$

Con el fin de facilitar el cálculo del parámetro  $k$  se usa una calculadora online [Zolotkov, 2017].

Con ayuda de la herramienta, se calcula el valor de  $k$  para poder determinar el valor de la longitud del dipolo.

$$L = K * \frac{1}{2} * \lambda \quad mm \quad (42)$$

$$L = 66.67 \quad mm \quad (43)$$

5. Con la longitud del dipolo se calcula el valor de Gap.

$$Gap = \frac{L}{200} \quad mm \quad (44)$$

$$Gap = \frac{66.67}{200} \quad mm \quad (45)$$

$$Gap = 0.33 \quad mm \quad (46)$$

Una vez calculado el dipolo, se inicia el diseño de la antena Yagi-Uda para eso se utilizará la tabla de diseño que facilitará el proceso 19.

6. Para diseñar una antena Yagi-Uda primero se calcula el diámetro de las varillas usando la siguiente ecuación.

$$d = \lambda * 0.0085 \quad mm \quad (47)$$

$$d = 136.36(mm) * 0.0085 \quad mm \quad (48)$$

$$d = 1.16 \quad mm \quad (49)$$

7. Después de calcular el diámetro, En la tabla ?? selecciona en que directivita trabajar. En este caso se usará  $D = 14.2$  dB, para este diseño se calculará la longitud de 15 elementos directores.

$$l1 = 0.475 * \lambda \quad mm \quad l1 = 0.75 * 136.36 \quad mm \quad l1 = 64.77 \quad mm \quad (50)$$

$$l3 = 0.424 * \lambda \quad mm \quad l3 = 424 * 136.36 \quad mm \quad l3 = 57.81 \quad mm \quad (51)$$

$$l4 = 0.424 * \lambda \quad mm \quad l4 = 424 * 136.36 \quad mm \quad l3457.81 \quad mm \quad (52)$$

$$l5 = 0.420 * \lambda \quad mm \quad l5 = 0.75 * 136.36 \quad mm \quad l3 = 57.27 \quad mm \quad (53)$$

$$l6 = 0.407 * \lambda \quad mm \quad l6 = 0.407 * 136.36 \quad mm \quad l6 = 55.5 \quad mm \quad (54)$$

$$l7 = 0.403 * \lambda \quad mm \quad l7 = 0.403 * 136.36 \quad mm \quad l7 = 54.95 \quad mm \quad (55)$$

$$l8 = 0.398 * \lambda \quad mm \quad l8 = 0.398 * 136.36 \quad mm \quad l8 = 54.27 \quad [mm] \quad (56)$$

$$l9 = 0.394 * \lambda \quad mm \quad l9 = 0.394 * 136.36 \quad mm \quad l9 = 53.7 \quad mm \quad (57)$$

$$l10 = 0.390 * \lambda \quad mm \quad l10 = 0.390 * 136.36 \quad mm \quad l10 = 53.18 \quad mm \quad (58)$$

$$l_{10} = l_{11} = l_{12} = l_{13} = l_{14} = l_{15} \quad mm \quad (59)$$

8. Una vez calculadas las longitudes de los directores se calcula la separación entre dichos elementos.

$$S_{1,2} = 0.2 * \lambda \quad mm \quad S_{1,2} = 0.2 * 136.36 \quad mm \quad S_{1,2} = 27.27 \quad mm \quad (60)$$

$$S = 0.308 * \lambda \quad mm \quad S = 0.308 * 136.36 \quad mm \quad S = 42 \quad mm \quad (61)$$

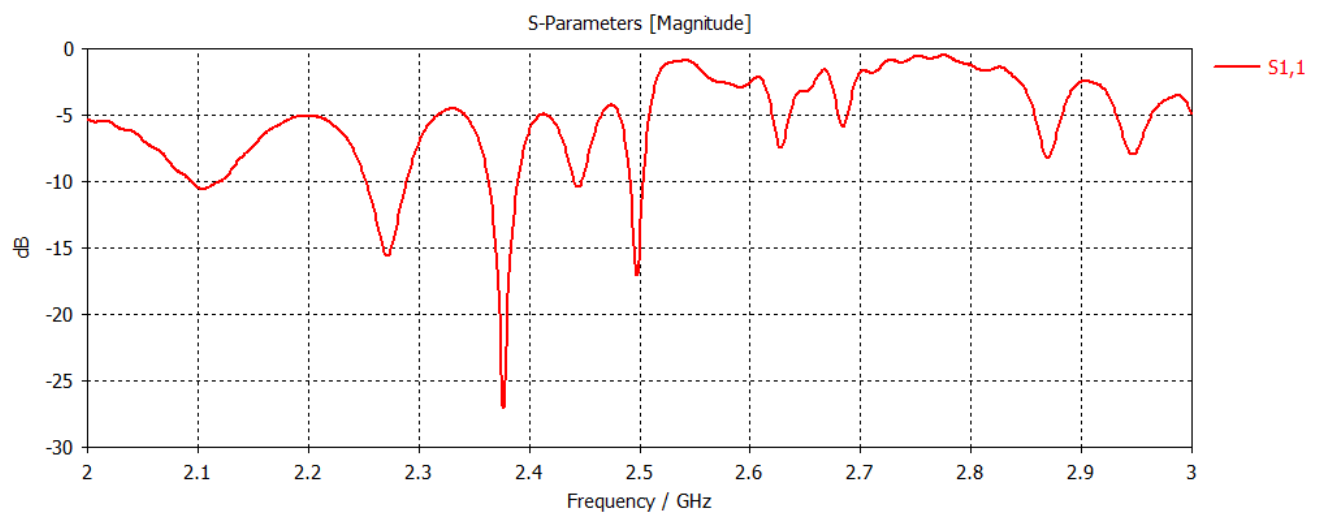
### Apéndice B. Simulaciones de la antena helicoidal

Las siguientes imágenes (53 hasta 64) evidencian el trabajo realizado en el simulador CST en la parametrización de las dimensiones de la antena helicoidal:

1. Simulaciones separación de espiras:

- **Parámetro S:**

Figura 53: Separación de espiras de 1.632 (cm)



2. Simulaciones diámetro de la hélice:

- **Parámetro S:**

3. Simulaciones diámetro del conductor:

Figura 54: Separación de espiras de 2.04 (cm)

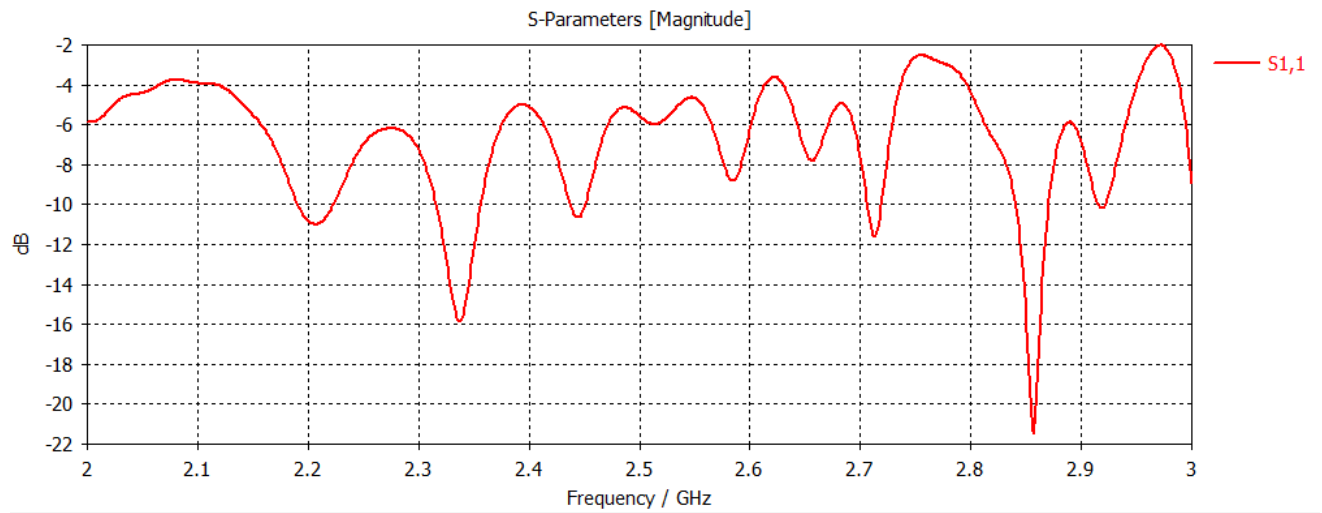


Figura 55: Separación de espiras de 2.448 (cm)

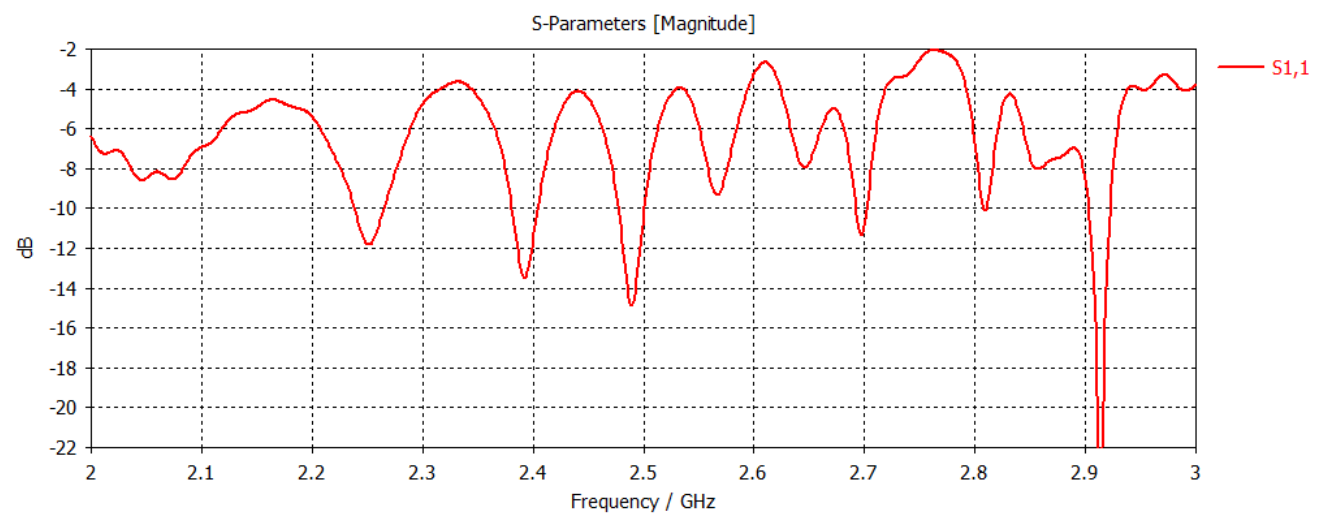


Figura 56: Diámetro de la hélice 3.89 (cm)

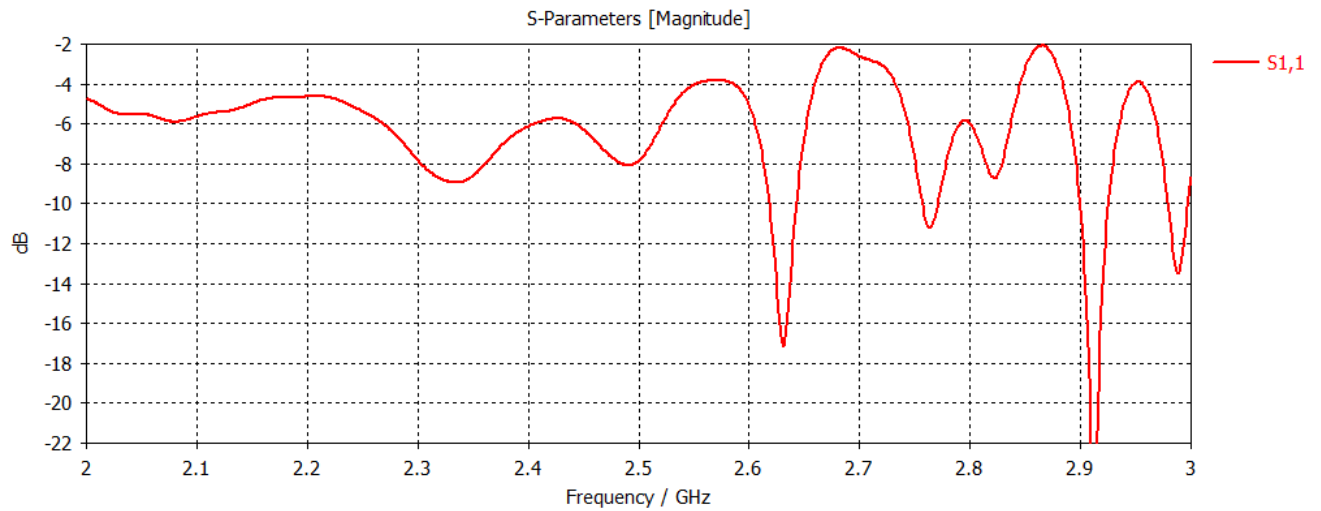


Figura 57: Diámetro de la hélice 4.33 (cm)

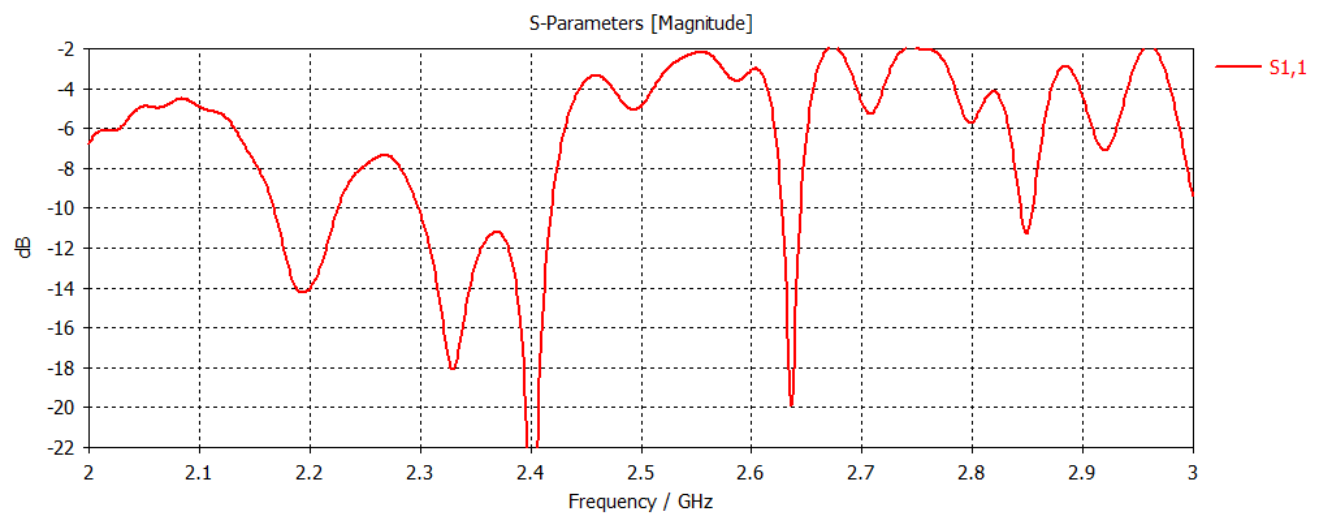


Figura 58: Diámetro de la hélice 4.76 (cm)

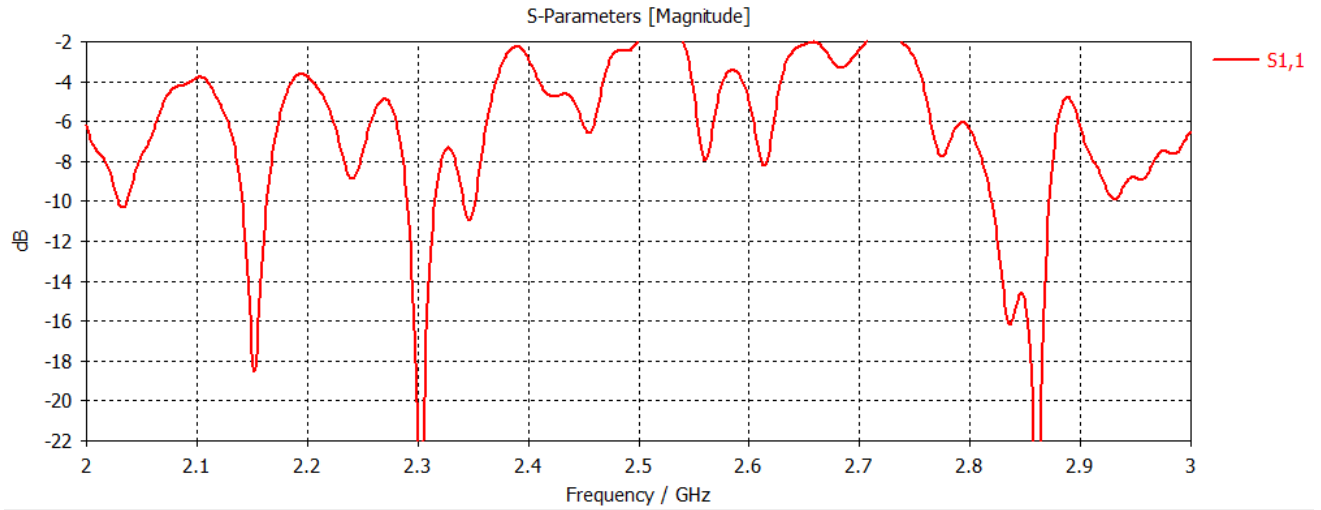


Figura 59: Diámetro del conductor 0.1 (cm)

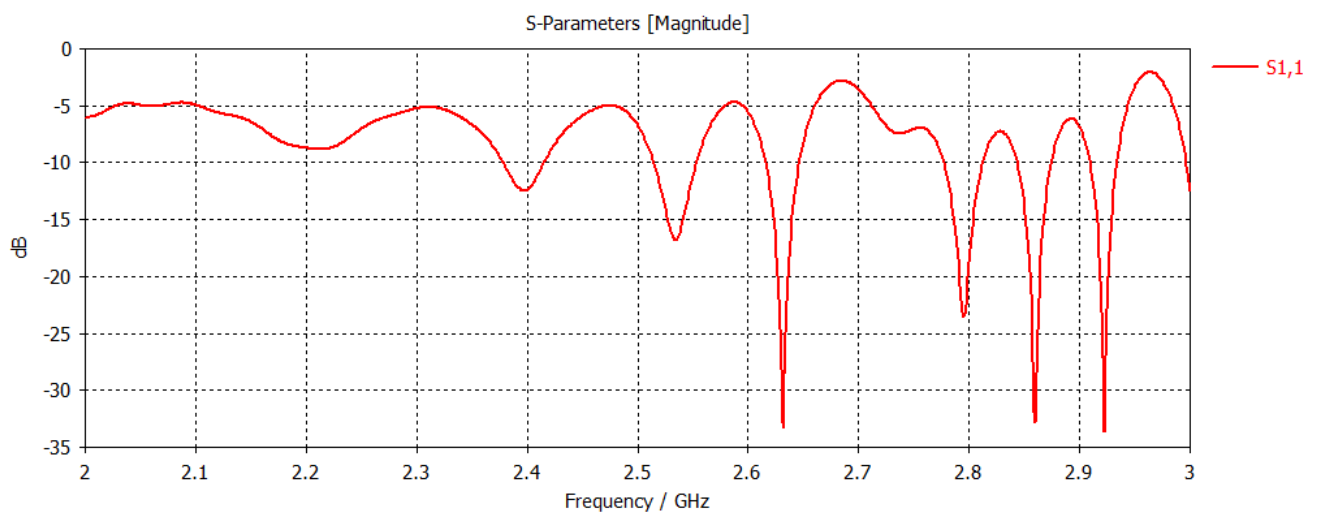


Figura 60: Diámetro del conductor 0.11 (cm)

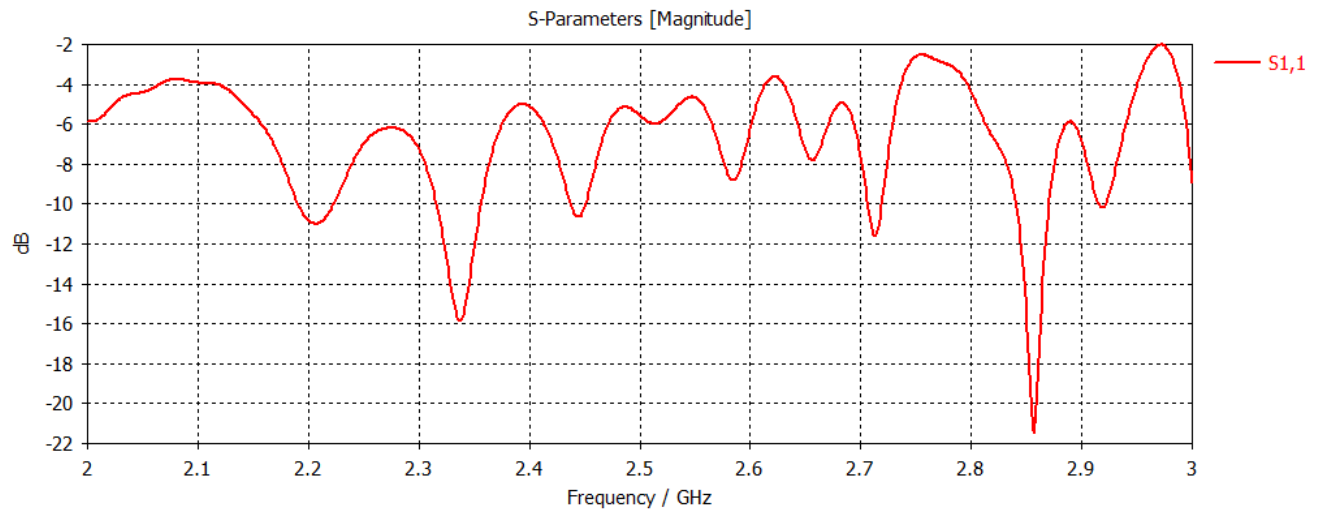
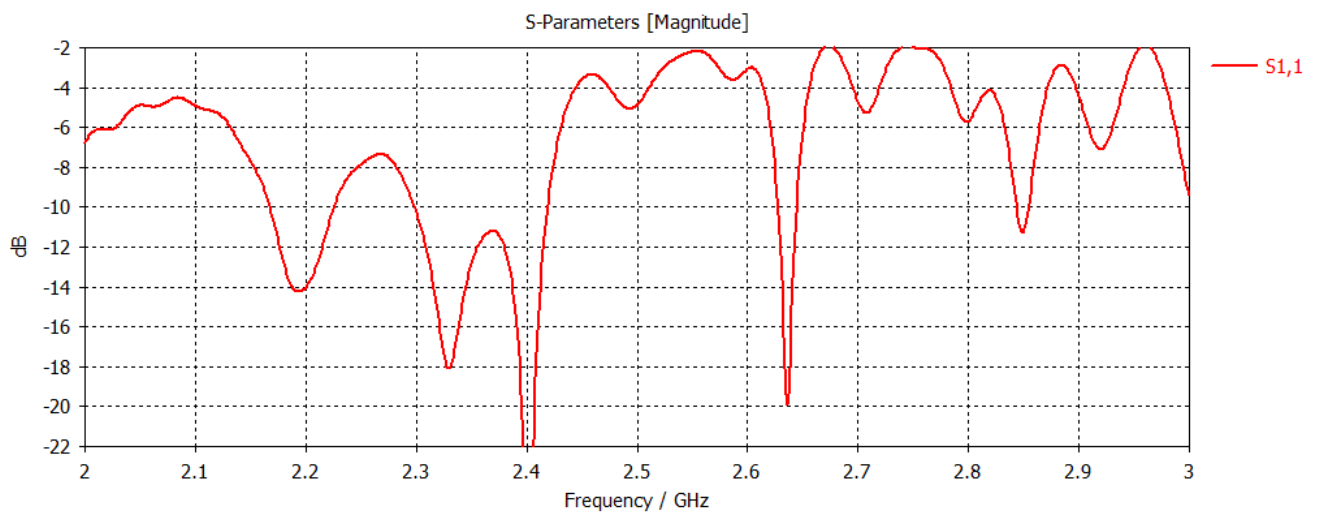


Figura 61: Diámetro del conductor 0.12 (cm)



- **Parámetro S:**

4. Simulaciones del número de vueltas:

- **Parámetro S:**

Figura 62: Antena de 11 espiras

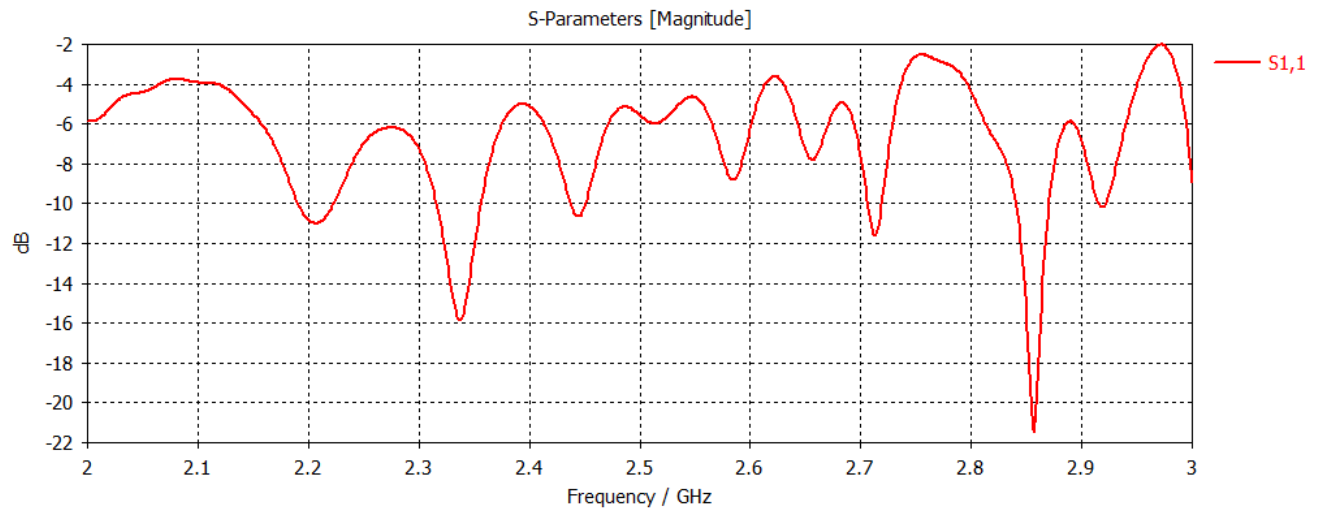
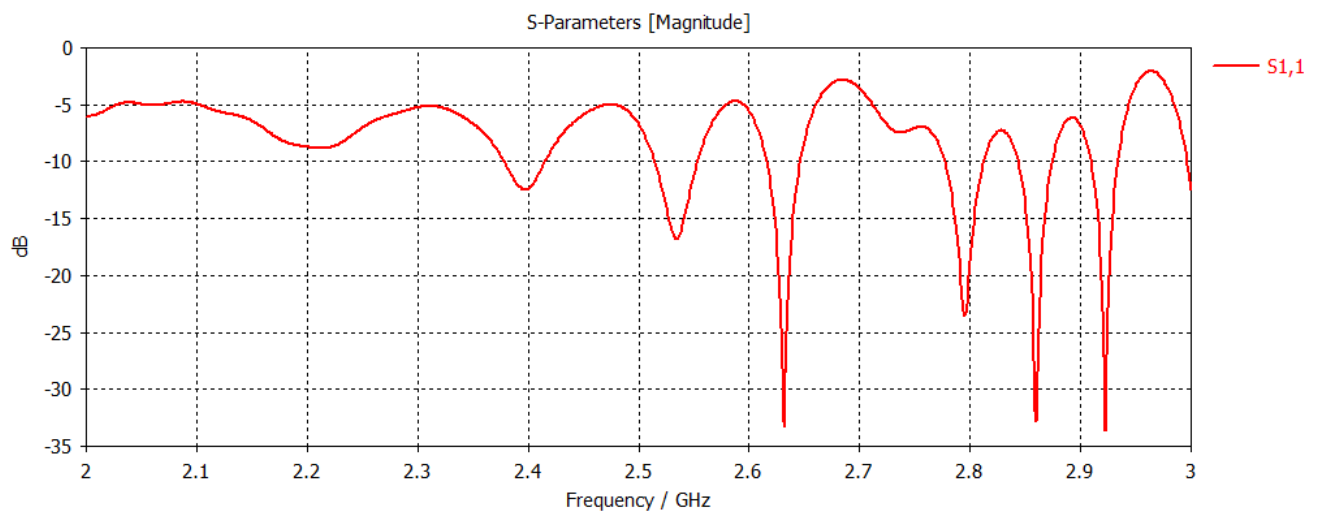


Figura 63: Antena de 12 espiras



### Apéndice C. Información sobre la construcción del prototipo de antena

Las siguientes imágenes (65 y 66) evidencian los problemas presentados en la simulación de la antena parabólica en CST:

Figura 64: Antena de 13 espiras

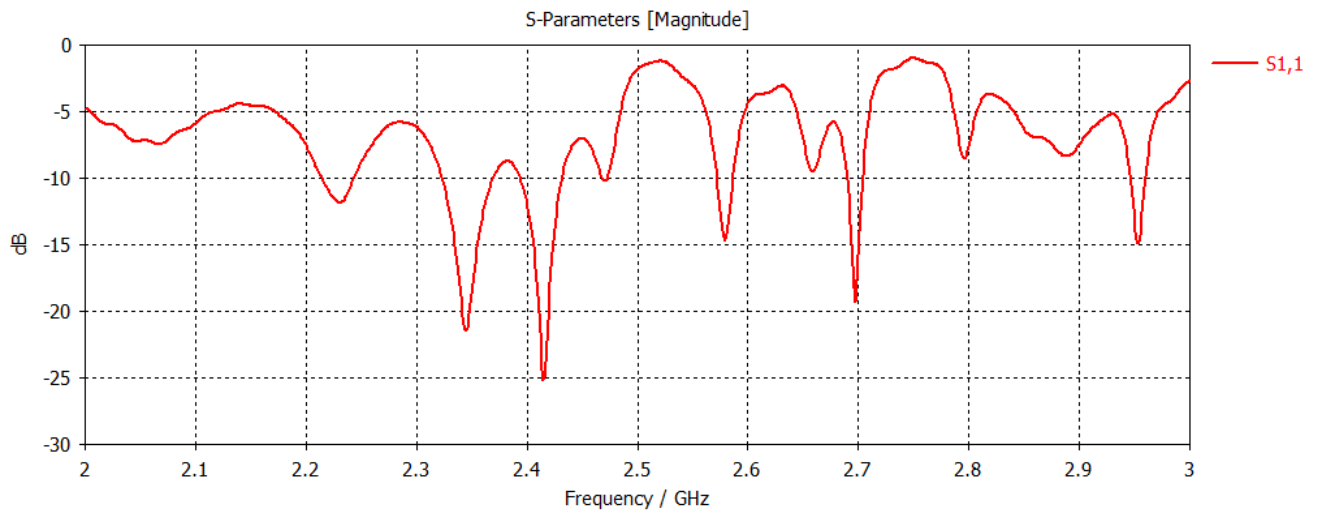


Figura 65: Simulación de la antena parabólica

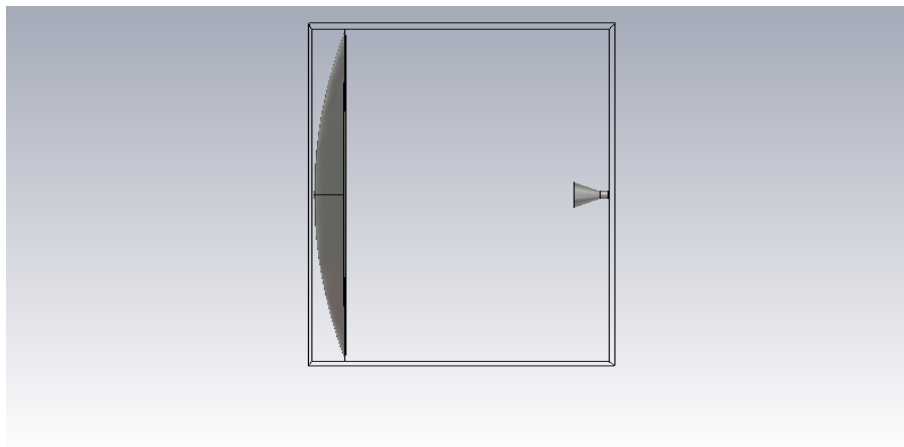


Figura 66: Error en la simulación de CST

- ✘ Your computer does not provide enough RAM to simulate this model. Your example requires at least:
  - core model : 73.5 GByte
  - ff monitors : GByte
  - materials/special features : not considered
 ( Sum: 74.0 GByte )  
 whereas available physical memory is only 11.9 GByte .  
 Please start your example on a computer that provides enough memory.

---

- ✘ 1 error occurred.

---

- i Exported image "D:/#Usuario/Documents/Antena Parabolica.png" successfully.

La siguiente lista indica cada uno de los documentos que del proyecto que se encuentran en el enlace ( <https://github.com/CristianOrtegon/MODELO-FUNCIONAL-DE-UNA-ANTENA-DE-RECEPCION-PARA-COMUNICACION-EN-BANDA-S-CON-EL-SATELITE-DE-LA-MISI->)

- Archivo de solidworks de la base de la antena helicoidal
- Archivo de solidworks de los stub de la antena helicoidal
- Archivos de simulación de las antenas
- Manuales de diseño de las antenas
- Video de calibración del VNA
- Video de la toma de datos de la antena
- Archivos de matlab para la conversión de datos del VNA

En la tabla 27 se observa los materiales utilizados en la construcción del prototipo de antena, la cantidad aproximada que se utilizó y el costo de cada uno:

Tabla 27: Costos de construcción de la antena helicoidal

Descripción	Unidad	Cantidad	V/Unitario	V/Total
Alambre desnudo para bobinado	m	2	\$1000	\$2000
Conector Hembra Coaxial Chasis	und	1	\$12000	\$12000
Baquelita doble cara 11x11 cm	und	1	\$5000	\$5000
Lámina de acrílico 35x15x0.5 cm	und	1	\$12500	\$12500
Abrazaderas de plástico	und	4	\$150	\$600
			TOTAL	\$32100

#### Apéndice D. Ampliación sobre los resultados en laboratorio

Las siguientes imágenes (67 hasta 72) evidencian las medidas del laboratorio que aportan al trabajo realizado a lo largo de la caracterización del prototipo construido:

- **Parámetro S de las antenas acopladas:**
- **Impedancia de las antenas acopladas:**
- **VSWR de las antenas acopladas:**

Figura 67: Parámetro S de la antena con el stub 1

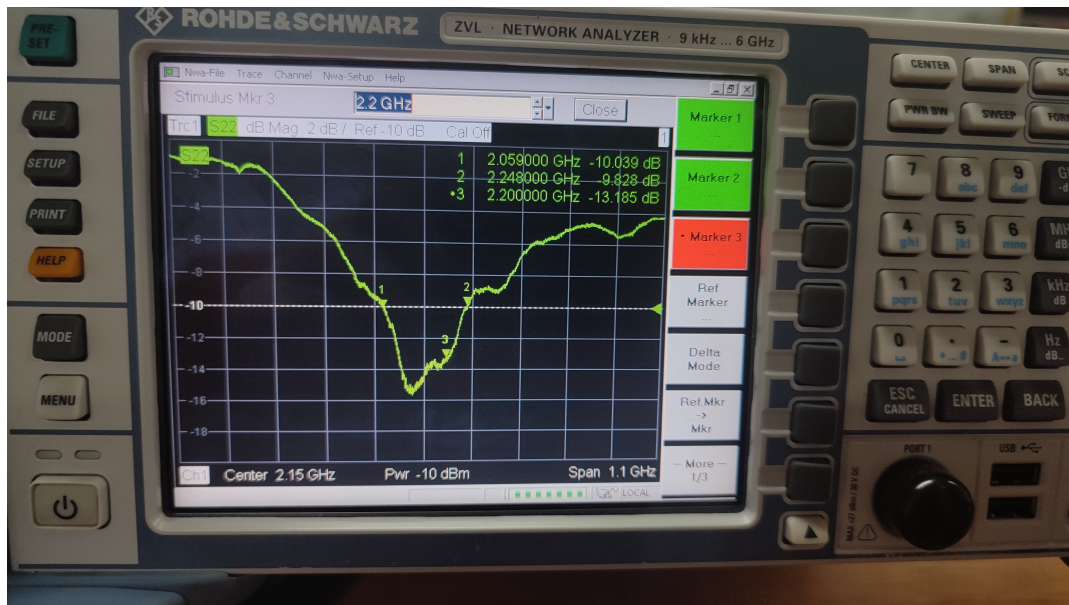


Figura 68: Parámetro S de la antena con el stub 2

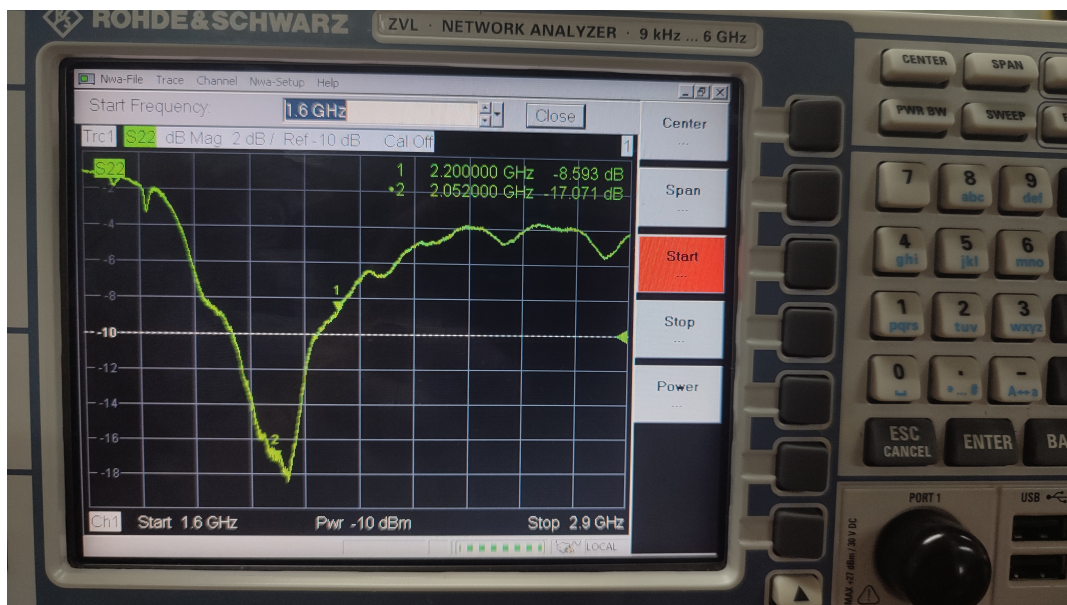


Figura 69: Impedancia de la antena con el stub 1



Figura 70: Impedancia de la antena con el stub 2

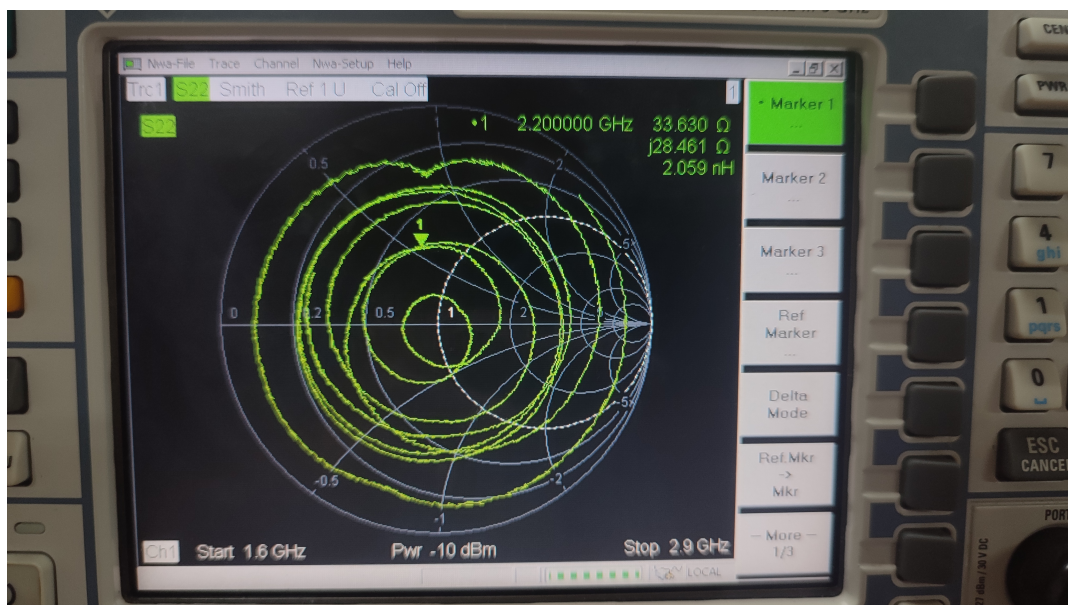


Figura 71: VSWR de la antena con el stub 1

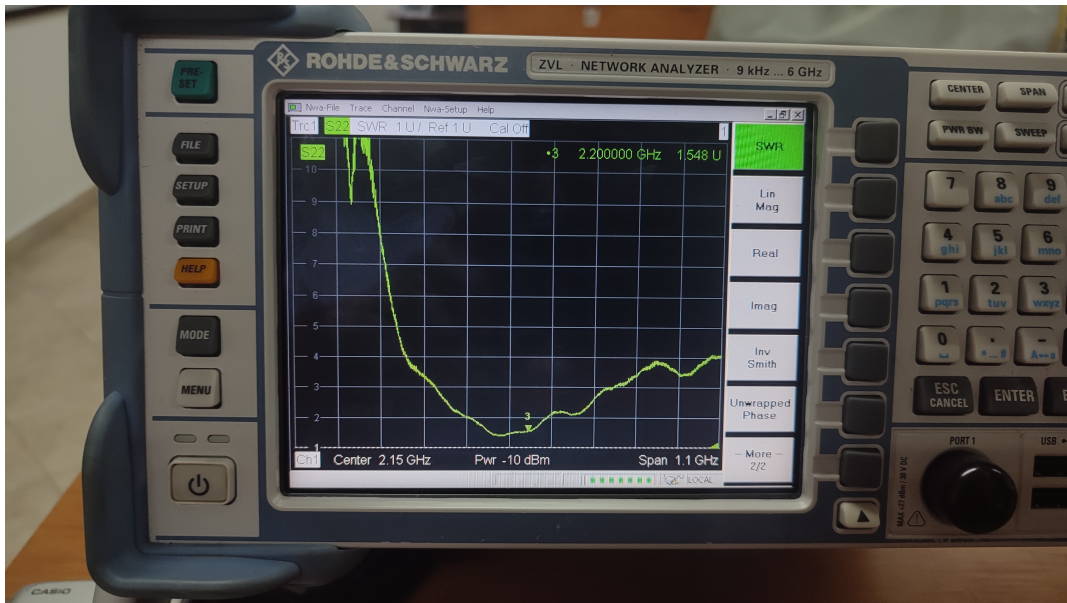


Figura 72: VSWR de la antena con el stub 2

