



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: DISEÑO, ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
RED DE ANTENAS IMPRESAS PARA LA BANDA DE UHF.**

AUTOR:

OÑATE MALES, ANDRÉS ALEJANDRO

DIRECTOR: ING. TINOCO SALAZAR, ALEXIS FABRICIO

SANGOLQUÍ

2020

CERTIFICACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **DISEÑO, ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED DE ANTENAS IMPRESAS PARA LA BANDA DE UHF**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de enero del 2020

Prof. Tinoco Salazar Alexis Fabricio – Dr.
C.C. 1706562178

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA****CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **OÑATE MALES ANDRÉS ALEJANDRO** declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **DISEÑO, ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED DE ANTENAS IMPRESAS PARA LA BANDA DE UHF**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 15 de enero del 2020

Oñate Males Andrés Alejandro
C.C. 1714332135

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, OÑATE MALES ANDRÉS ALEJANDRO autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **DISEÑO, ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RED DE ANTENAS IMPRESAS PARA LA BANDA DE UHF**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi responsabilidad.

Sangolquí, 15 de enero del 2020


Oñate Males Andrés Alejandro
C.C. 171433213

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Rosy y Pablo que desde pequeño me inculcaron los mejores valores y me enseñaron a nunca darme por vencido a siempre seguir adelante a pesar de todas las adversidades que he pasado. Ustedes son mi ejemplo de superación y de trabajo constante donde me encuentro hoy es gracias a ustedes, sin su apoyo incondicional y amor esto no hubiera sido posible.

Querida madre por estar siempre conmigo muchas gracias, porque cuando he sentido que estoy solo tu siempre has estado a mi lado pendiente y preocupada de lo que necesito. Siempre estarás en mi corazón.

Andrés Alejandro Oñate Males

AGRADECIMIENTOS

Expreso infinitamente mis agradecimientos a mi tutor Dr. Alexis Tinoco, que con su sabiduría me supo guiar a lo largo de este trabajo y me animó a seguir adelante y llegar hasta el final del mismo.

A todos mis amigos que durante nuestra etapa universitaria me brindaron su cariño y apoyo a siempre seguir adelante y terminar este reto que un día empezamos y lo estamos concluyendo.

El autor de este trabajo desea expresar agradecimiento al *Centro de Investigación de Aplicaciones Militares – CICTE*, de la *Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE*, por el soporte técnico y acceso a sus instalaciones durante la ejecución de este trabajo de graduación. De la misma forma queremos agradecer al *Laboratório de Antenas e Propagação – LAP*, del *Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA*, por el auxilio prestado en la etapa de simulación de la antena espiral.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
CAPÍTULO I	1
1. DESCRIPCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación e Importancia	2
1.3. Alcance del Proyecto.....	4
1.4. Objetivos del proyecto	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivo Específicos.....	6
1.5. Estructura del trabajo	6
CAPÍTULO II	8
2. ASPECTOS TEÓRICOS	8
2.1. Antenas de Banda Ancha.	8

2.2. Antenas Independientes de Frecuencia.	10
2.3. Antenas Espirales.	15
2.3.1. Antena Espiral Equiangular.	16
2.3.1. Antena Espiral de Arquímedes.	19
2.4. Parámetros que caracterizan el desempeño de una Antena.	22
2.4.1. Impedancia de la antena.	22
2.4.2. Circuito de alimentación Stub-Balun.	23
2.4.3. Polarización.	25
2.4.4. Diagrama de Radiación	26
2.4.5. Ancho de Banda	28
2.4.6. Ganancia y Directividad	29
2.5. Teoría de redes de antenas (Multiplicación de diagramas)	30
CAPÍTULO III	33
3. PROYECTO DE LAS GEOMETRÍAS INICIALES, SIMULACIONES Y OPTIMIZACIONES.	33
3.1. Simuladores.	33
3.1.1. Software FEKO	33
3.1.2. Software ANSYS HFSS	34
3.2. Proyecto de la geometría inicial de la antena Espiral de Arquímedes.	35
3.2.1. Simulación en FEKO.	39

3.3. Proyecto de la geometría del casador / Balun	42
3.4. Simulación / optimización de la antena espiral	51
3.4.1. Resultados de la simulación	52
3.5. Simulación del circuito de alimentación.	56
3.6. Simulación / optimización del conjunto antena tipo Espiral.....	58
CAPÍTULO IV	62
4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO Y RESULTADOS DE MEDIDAS	62
4.1. Construcción del prototipo de la antena espiral y del casador.	62
4.2. Unión del circuito de alimentación con la antena espiral	64
4.3. Medidas del prototipo final (Antena Espiral / circuito de casamiento)	66
CAPÍTULO V	68
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
5.1. Conclusiones	68
5.2. Recomendaciones.....	68
5.3. Trabajos Futuros.....	69
REFERENCIAS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de la antena espiral de arquímedes	36
Tabla 2. Parámetros calculados de la antena	38
Tabla 3. Dimensiones físicas del casador usados para implementar los transformadores de $\lambda/4$..	44
Tabla 4. Dimensiones físicas del casador chebyshev de orden 3.	49
Tabla 5. Características del sustrato	51
Tabla 6. Parámetros de optimización de la antena espiral	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Antena de Hilo de Onda Progresiva	9
Figura 2. Antenas de Banda Ancha.....	10
Figura 3. Antenas Complementarias, con Independencia Teórica de 188Ω	13
Figura 4. Antena Espiral Equiangular	16
Figura 5. Alimentación Antena Espiral Equiangular	17
Figura 6. Alimentación de una Antena Equiangular	18
Figura 7. Antena Espiral	19
Figura 8. Parámetros de la Antena Espiral.....	21
Figura 9. Sistemas Balanceados y Desbalanceados	24
Figura 10. Magnitud del Campo Eléctrico	25
Figura 11. Polarización Circular	26
Figura 12. Patrón de Radiación.....	27
Figura 13. Distribución de corrientes de una agrupación lineal.....	31
Figura 14. Software FEKO	34
Figura 15. Radio medio y anillo medio.....	37
Figura 16. Geometría inicial de la antena espiral.....	40
Figura 17. Patrón de radiación a $F= 1.9\text{GHz}$	41
Figura 18. VSWR de la antena espiral vs frecuencia.....	41

Figura 19. Adaptación con un cuarto de onda.....	43
Figura 20. Topología del circuito de casamiento constituido por tres transformadores de $\lambda/4$,	44
Figura 21. Topología del Circuito de Casamiento	44
Figura 22. Módulo S11 y S22	45
Figura 23. Representación en la carta de Smith de las impedancias in/out	46
Figura 24. Topología del circuito de casamiento simulado en el software Genesys	49
Figura 25. Módulo de S11 y S22	50
Figura 26. Representación de la carta de Smith de las impedancias in/out	50
Figura 27. Optimización de la antena espiral	52
Figura 28. Simulación de la directividad para frecuencias de 05GHz y 0,95 GHz respectivamente	53
Figura 29. Simulación para una frecuencia de 4GHz	53
Figura 30. Simulación del coeficiente de reflexión	54
Figura 31. Simulación de la razón de onda estacionaria (ROE)	54
Figura 32. Impedancia de entrada de la antena espiral	55
Figura 33. Simulación Relación Axial	55
Figura 34. Circuito de alimentación-Casador	56
Figura 35. Coeficiente de reflexión.....	57
Figura 36. Coeficiente de transmisión	57
Figura 37. Carta de Smith puerto del circuito de alimentación.....	58

<i>Figura 38.</i> Razón axial del conjunto	59
<i>Figura 39.</i> Función directividad del conjunto	60
<i>Figura 40.</i> Coeficiente de reflexión del conjunto.....	61
<i>Figura 41.</i> Diseño final del conjunto.....	61
<i>Figura 42.</i> Corte del Substrato con la broca de la prototipadora.....	62
<i>Figura 43.</i> Antena espiral	63
<i>Figura 44.</i> Corte Antena Espiral.....	64
<i>Figura 45.</i> Circuito de alimentación de la antena espiral	65
<i>Figura 46.</i> Diseño final de la antena espiral de Arquímedes.....	65
<i>Figura 47.</i> Coeficiente de reflexión.....	67

RESUMEN

Las antenas independientes de frecuencia han sido ampliamente utilizadas en el campo militar debido a varios factores entre los cuales podemos mencionar: su gran ancho de banda de impedancia y de razón axial, su versatilidad de montaje, entre otros. Eses parámetros innatos a este tipo de elementos irradiadores las hace idóneas para ser usadas en variedad de aplicaciones de defensa como comunicaciones, detección de posicionamiento y seguimiento de objetivos entre otras.

En el presente trabajo de graduación se presentará el diseño, análisis, simulación y construcción de una antena espiral de dos brazos impresa en un substrato tipo FR4. El sistema de alimentación que acopla la impedancia de entrada de la antena espiral, de aproximadamente 188Ω , a una línea de transmisión con impedancia característica de 50Ω también será abordado. En el proceso de análisis y de optimización los softwares de simulación electromagnética FEKOTM, de la empresa Altair[®], y HFSSTM, de la americana ANSYS[®], fueron utilizados. Esas herramientas computacionales nos permitieron estudiar el desempeño de la geometría inicial de la antena espiral y posteriormente proceder a su optimización. El comportamiento del prototipo construido en las instalaciones del laboratorio de Telecomunicaciones del CICTE fue medido y sus resultados fueron comparados con las simulaciones realizadas en HFSS.

PALABRAS CLAVE:

- **ANTENA INDEPENDIENTE DE FRECUENCIA**
- **ANTENA IMPRESA**
- **CASADOR BANDA ANCHA**

ABSTRACT

The independent frequency antennas have been widely used in the military field due to several factors which we can mention: their large impedance bandwidth and axial ratio, their versatility of assembly, and others. These innate parameters to this type of irradiating elements make them suitable to use in a variety of defense applications, such as communications, positioning detection and objective tracking among others. In this graduation work, the design, analysis, simulation and construction of a two-arm spiral antenna printed on a FR4 substrate type. The power system that input the impedance of the spiral antenna, approximately 188 ohms, to a transmission line with a characteristic impedance of 50 ohms will also be explained. In the analysis and optimization process, the electromagnetic simulation software FEKOTM, from Altair®Company, and HFSSTM, from the American ANSYS®, were used. These computational tools allowed us to study the performance of the initial geometry of the spiral antenna and then proceed to its optimization. The behavior of the prototype built in the CICTE Telecommunications laboratory was measured and its results were compared with the simulations performed in HFSS.

KEYWORDS:

- **FREQUENCY INDEPENDENT ANTENNA**
- **PRINTED ANTENNAS**
- **WIDEBAND MATCHING CIRCUIT**

CAPÍTULO I

1. DESCRIPCIÓN

1.1. Introducción

Es un hecho bien conocido que los conflictos armados del último siglo han producido un acelerado desarrollo tecnológico, el mismo que ha obligado a las potencias militares a destinar una buena parte de sus recursos económicos en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. Un ejemplo de esto es que durante el transcurso de, y después de, la II Guerra Mundial se empezaron a desarrollar toda la teoría de las antenas de banda ancha, así como fueron diseñados y construidos sus primeros prototipos. Una derivación de ese tipo de irradiadores son las antenas independientes de frecuencia.

Las primeras topologías de las antenas independientes de frecuencia aparecieron por la creciente necesidad de disponer de una única antena que trabaje en diferentes bandas y tenga un gran ancho de banda (2 a más octavas), en especial para uso militar. Las principales finalidades de estas se orientaron a los campos de: las comunicaciones, altímetros, sistemas de radionavegación, sistemas de detección y seguimiento de objetivos, etc. Otra característica relevante de este tipo de antenas es que pueden ser fácilmente montadas en aeronaves o automóviles militares sin afectar la aerodinámica de estos y ocupando el menor espacio posible.

Una clasificación de las antenas de banda ancha son las denominadas antenas independientes de la frecuencia que, debido a su geometría, basada principalmente en el comportamiento ángulos, cumplen con dos principios fundamentales los cuales son: a) escalabilidad y, b) auto complementación. La correcta aplicación de estos dos factores permite obtener elementos con un gran ancho de banda (de 2 o más octavas).

Los objetivos propuestos en el presente trabajo son: a) el diseño de una antena espiral de Arquímedes de dos brazos cuya banda de operación sea de al menos de 500 MHz a 3,2 GHz, y b) con base al irradiador espiral diseñar una red de antenas para cubrir la banda de operación antes mencionada. Se debe mencionar que para el proyecto de la red se considera que los elementos de la red son bien comportados, siendo así, se dará mayor énfasis al diseño del elemento base de la red en este trabajo.

En el proceso de diseño primero se usará el software FEKOTM [Altair, <https://hyperworks.com.br/product/Feko>] el cual nos permitirá tener un primer acercamiento (*insight*) a la geometría de la antena y sus respectivos parámetros de diseño. Posterior se realizará una optimización de la geometría inicial de la antena con el programa HFSSTM [ANSYS, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>]. En este proceso se incrementó, cuando comparado con el modelo de espacio libre simulado con FEKO, la presencia del substrato de fibra de vidrio FR4, la implementación de una cavidad posicionada en su parte posterior, la terminación de los brazos en espiral para mejorar el casamiento y un circuito de casamiento entre los brazos de la espiral y la línea de 50 ohms. Todas las modificaciones realizadas a la geometría inicial de la antena espiral y al circuito de casamiento con el objetivo de mejorar su desempeño se describen a lo largo de este documento y son sustentadas con las simulaciones realizadas en los programas computacionales anteriormente mencionados.

1.2. Justificación e Importancia

Como es de conocimiento la banda de UHF, actualmente sobre cargada, es utilizada para permitir el acceso a diversos servicios y sistemas que son de uso cotidiano. Una de las sub-bandas

estipuladas por la *International Telecommunication Union* (ITU) como no licenciada es la que se conoce como las siglas ISM (*Industrial, Scientific and Medical frequency band*). Para la banda de UHF el padrón ISM contempla las sub-bandas de: a) de 433,05 MHz a 434,79 MHz, b) de 902 MHz a 928 MHz, y c) de 2400 MHz a 2500 MHz. Por el hecho de no necesitar licencia de funcionamiento muchos dispositivos comercialmente disponible utilizan la banda ISM para su comunicación inalámbrica. Un ejemplo de esos dispositivos son los vehículos aéreos no tripulados UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) o drones. En este punto se debe mencionar que drones de uso militar pueden estar trabajando en la banda de 230 MHz (VHF) [referencia, <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4667/1/BonillaCaballeroJhonEduar2016.pdf>]. Por poner otros ejemplos se reportan, además, drones con piloto automático el cual es un sistema eléctrico y mecánico capaz de guiar una aeronave sin ayuda de un ser humano. Ese dispositivo usa un autopiloto que trabaja en la banda de 902-928 MHz [referencia, <https://www.uavnavigation.com/products/autopilots/ap04>]. Por lo antes expuesto se infiere que es importante diseñar una antena o red de antenas que pueda operar en las bandas de VHF y UHF, ya que como se mencionó existen varios drones que operan en dichas frecuencias.

Dentro de la Ingeniería de Antenas los elementos irradiadores conocidas como antenas independientes de frecuencia son de especial atención para las Fuerzas Armadas debido a las características como la posibilidad de reducir el uso de varias antenas a una única antena debido al gran ancho de banda que estas poseen. Debido a su forma simple y compacta se pueden montar fácilmente en

aeronaves o vehículos terrestres sin ocupar un mayor espacio o peso que pueda afectar el desempeño de las mismas.

Por otro lado, la propuesta de desarrollar un sistema enteramente nacional, del cual este proyecto de investigación forma parte, se basa en la necesidad de generar tecnologías endógenas como motor del desarrollo nacional. En este caso la investigación aplicada e ingeniería inversa son las bases para corregir los inconvenientes de costos elevados y para garantizar una transferencia de tecnología real (al usuario final) dentro de todos los procesos de concepción, diseño, implementación y operación. Adicionalmente, en virtud de su esencia endógena, es de esperarse el mejoramiento del desempeño del sistema como un todo. Finalmente, debido a que el sistema deseado implica desarrollar procedimientos y metodologías para el desarrollo de redes de antenas impresas el presente proyecto justifica ser realizado por un estudiante de graduación

1.3. Alcance del Proyecto

El presente proyecto pretende entregar al CICTE un elemento irradiador de gran ancho de banda que pueda ser usada para los diferentes tipos de aplicaciones militares como: comunicaciones, altímetros, sistemas de radionavegación etc., que así lo requieran las Fuerzas Armadas. Con base en ese elemento el proyecto de una red con características semejantes puede ser implementado en un próximo paso.

El presente proyecto se direcciona al diseño, simulación, construcción y verificación de un elemento irradiador, del tipo impresa, para ser utilizada en un sistema inhibidor de drones que trabajan en

la banda UHF. La metodología que será utilizada es teórico / experimental. Para esto, un prototipo será construido y se verificará su desempeño utilizando la infraestructura disponible en el Laboratorio de Telecomunicaciones que pertenece al Centro de Investigaciones de Aplicaciones Militares – CICTE.

En la actualidad se ha generalizado la comercialización y uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*) ya sea bien para uso recreativo, profesional, militar y experimental. Sus relativos bajos costos, ha permitido que se vendan y se comercialicen de manera acelerada y sin ningún tipo de normativa a cualquier tipo de individuos ya sea que estos tengan o no buenas intenciones. Con los avances tecnológicos los drones han ido evolucionando casi a diario, hasta convertirse en sistemas cada vez más complejos y versátiles, pudiendo llevar sin ningún problema diversos tipos de cargas como explosivas o artefactos que puedan causar algún tipo de problema a un aeropuerto, o recintos militares y así como también realizar espionajes en zonas de acceso restringido o militar.

Por lo antes mencionado, se evidencian los riesgos que en la actualidad podrían presentar los vehículos aéreos no tripulados a las Fuerzas Armadas y a zonas estratégicas del territorio ecuatoriano como presas, hidroeléctricas o aeropuertos, entre otros. Por tal motivo es importante poder contar con un sistema inhibitor de drones, el cual permita parar y resguardar el acceso a cierto tipo de zonas que así lo requieran.

1.4. Objetivos del proyecto

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y construir una red de antenas del tipo impresa para la banda de UHF con el fin de ser utilizada en un sistema inhibidor de drones

1.4.2. Objetivo Específicos

Los objetivos específicos de este proyecto están en concordancia con su objetivo general y fueron escogidos para dar sustento a cada una de las etapas del desarrollo del mismo. Esos objetivos son resumidos a continuación:

- Generar especificaciones básicas de la red de antenas que en un futuro serán usadas por el sistema de inhibición de drones.
- Proponer topologías para el diseño y construcción de la red de tipo impresa que optimicen el ancho de banda de funcionamiento, diagrama de irradiación, peso y tamaño de la red.
- Construir prototipos de redes que se muestren más eficiente en las simulaciones.
- Evaluar parámetros de impedancia de entrada y diagramas de irradiación, en los planos principales, del prototipo construido.

1.5. Estructura del trabajo

La estructura del presente trabajo está constituida de 4 secciones a parte de esta introducción. En la sección dos se exponen los fundamentos teóricos relacionados con las antenas independientes de la frecuencia. Específicamente, el trabajo es direccionado al diseño de antenas

del tipo espiral impresas. Indirectamente varios aspectos del trabajo presentan retos tecnológicos, iniciando con el proyecto de la propia estructura espiral, el sistema de alimentación, el circuito de casamiento y la construcción del prototipo en sí.

El capítulo tres presenta las simulaciones realizadas con dos simuladores electromagnéticos. El primero de ellos se llama FEKOTM (*FEI*dberechnung für Körper mit beliebiger Oberfläche – Altair Engineering) que se basa en el método denominado Método de los Momentos (MoM) y el segundo es el HFSSTM (*High-Frequency Structure Simulator - ANSYS*) el cual tiene como método de análisis el Método de los Elementos Finitos (FEM). Adicionalmente otros softwares menores del tipo GNU fueron usados para realizar cálculos iniciales.

En el capítulo cuatro se presenta todo el proceso de construcción del prototipo. Con ese objetivo se escogió, por su bajo costo, el substrato de microondas denominado FR4 o fibra de vidrio. La infraestructura del Laboratorio de Telecomunicaciones del Centro de Investigación de Aplicaciones Militares - CICTE fue usado durante el proceso de construcción. Específicamente el equipo de prototipaje *Quick Circuit QC5000S-E* fabricado por la empresa T-Tech fue usado en su fabricación [*T-Tech, web: <https://t-tech.com/shop/product/quick-circuit-qc5000/>*]. Las medidas realizadas en el prototipo y el análisis de los resultados son presentadas en el capítulo cuatro. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros son presentados en el capítulo cinco.

CAPÍTULO II

2. ASPECTOS TEÓRICOS

En este capítulo se expondrá aquellos fundamentos teóricos y principios de las antenas de banda ancha y más específicamente de las antenas independientes de frecuencia, que nos servirá de base para la construcción diseño y simulación de una antena independiente de frecuencia en la banda de frecuencia de 500 MHz a 3,2 GHz. Así como también algunos aspectos teóricos y características intrínsecas de las antenas que nos llevarán a un mejor entendimiento del trabajo a realizarse.

2.1. Antenas de Banda Ancha.

Las antenas de Banda ancha son un grupo de antenas que, debido a su forma geométrica, formas de construcción y principios que se explicarán en el desarrollo de este capítulo; permite que sus características como lo son (directividad, patrón de radiación impedancia, etc.) permanezcan constantes o tengan variaciones muy pequeñas en todo el ancho de trabajo para el cual fue diseñada la antena.

Un concepto que define mejor las antenas de banda ancha son las antenas independientes de frecuencia que teóricamente su comportamiento no varía con la frecuencia, siempre y cuando tengan longitud infinita, pero esto es imposible conseguirlo en la práctica. Por lo que al limitar sus

dimensiones obtendremos una antena cuyas variaciones sean mínimas en márgenes de frecuencia de varias décadas (Anguera, 2008).

Las antenas de hilo de onda progresiva fueron las primeras antenas usadas del tipo de antenas de banda ancha, estas están constituidas por un hilo de longitud $L = 3\lambda$, separadas una cierta distancia del suelo. Se utilizó esta disposición de un hilo en lugar de dipolos metálicos ya que en la época en la que aparecieron eran más fáciles de construir.

Una vez construida y para poder eliminar la onda reflejada producida en los extremos de la misma, y que solo exista una onda viajera o progresiva se colocaba una impedancia en los extremos de la misma igual a la de línea de transmisión, de esta manera se elimina la onda reflejada.

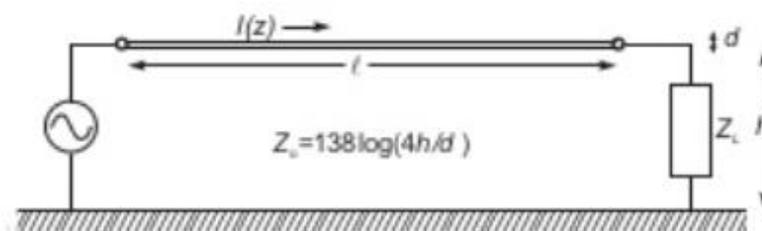


Figura 1. Antena de Hilo de Onda Progresiva

Fuente: (Cardama, 1998)

Así la onda de corriente viajera es constante si las pérdidas de radiación y las pérdidas óhmicas en la línea de transmisión son iguales a cero, y la distribución de corriente en la antena es

$$I(z) = I_0 e^{-j\beta z} \quad (2.1)$$

donde β es la constante de fase en la línea (Cardama, 1998)

Otras antenas de banda ancha pueden considerarse cierto tipo de dipolos, que al aumentar su ancho se convierten en antenas de gran ancho de banda ya que al variar la frecuencia su reactancia permanece constante.

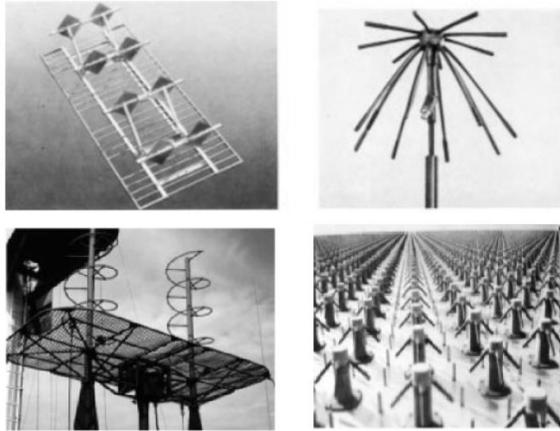


Figura 2. Antenas de Banda Ancha

Fuente: (Cardama, 1998)

Además, podemos clasificar dentro de las antenas de banda ancha a las antenas de Vivaldi, que son utilizados en sistemas de radiodifusión, radares de UHF, para recibir señales satelitales, etc., su uso se ha extendido por su sencillez de montaje.

2.2. Antenas Independientes de Frecuencia.

Las “*Antenas independiente de la frecuencia*” es un término que viene acuñarse a mediados del siglo XX; y cuyo marco analítico fue descrito por primera vez por (Rumsey) describe aquellas antenas que sin importar su escalamiento o truncamiento no dependen de su frecuencia, es decir

sus características intrínsecas como lo es la (directividad, resistividad, polarización) se mantienen constantes en el ancho de banda para el cual fue diseñada la antena.

Este tipo de antenas se caracteriza por tener un gran ancho de banda alrededor de 40:1 lo que significa que la frecuencia superior es 40 veces más grande que la frecuencia inferior, lo cual para la década de los años 50 significó un gran avance en el diseño de antenas ya que hasta la fecha únicamente se alcanzaban anchos de banda en el rango de 2:1 (Balanis, 1997).

Para entender de mejor forma las “*Antenas independientes de frecuencia*” como bien se conoce cuando se diseña una antena su longitud y por ende sus parámetros de (impedancia, directividad, etc.) dependen de la longitud de onda λ , es decir si multiplicamos por un factor K todas las dimensiones de una antena, su comportamiento será el mismo, pero a una frecuencia (f/k), esta propiedad se la conoce como principio de semejanza de Electrodinámica. La geometría de una antena plana expresado en coordenadas polares es: (Cardama, 1998)

$$r = F(\phi) \quad (2.2)$$

será auto escalable si:

$$kF(\phi) = F(\phi + \Delta\phi_0) \quad (2.3)$$

La ecuación anterior nos indica que la geometría de la antena al escalarla por “ K ” será la misma con una cierta rotación, pero sus parámetros intrínsecos como directividad, impedancia, coeficiente de reflexión, etc., se mantendrán inalterables. Un ejemplo de este tipo de antenas son las antenas espirales, que uno de sus brazos se encuentra rotado 180 grados en referencia al otro brazo.

La geometría de las antenas independientes de frecuencia se caracteriza por estar definidas únicamente por ángulos, debido a esto al escalarla por un valor “ k ” su geometría no cambia. Un ejemplo de esto son las antenas equiangulares como la antena bicónica sin embargo para que sea completamente independiente, su longitud debe ser infinita, pero en la práctica es difícil de conseguirlo. En consecuencia, la antena que se obtiene tiene un gran ancho de banda si se consigue que la corriente que viaja desde los terminales a una distancia λ decaiga rápidamente hasta tender a cero conformes se aleja de los puntos de alimentación, ya que al truncarla no se modifica mayormente la distribución de corrientes y sus parámetros prácticamente quedan intactos (Rumsey).

Sin embargo, como ya se puede suponer al querer cumplir con el principio de Rumsey se ve afectado severamente el comportamiento en frecuencia ya que al trabajar con frecuencias altas los terminales de alimentación empiezan a tener longitudes apreciables respecto a la longitud de onda por lo que dejará de comportarse idealmente y por el contrario al trabajar con frecuencias más bajas los extremos de la antena estarán más próximos a los terminales de alimentación y por lo tanto la corriente ya no será despreciable (Anguera, 2008).

Pues bien, con lo expuesto anteriormente al construir y diseñar una antena independiente de frecuencia se puede decir que el desempeño del ancho de banda de la antena viene definido en la frecuencia más alta por las dimensiones de los puntos de alimentación y para bajas frecuencias por la estructura total de la antena. De manera general si requirieríamos construir una antena de dimensión de terminales de 1cm y de longitud 50 cm su ancho de banda sería de razón 1:50.

Otra característica de este grupo de antenas es el principio de auto complementación para que una antena cumpla con este principio, los conductores construidos de la antena se deberían poder reemplazar por una estructura en donde en su interior se encuentre vacía o hueca con la misma forma y ancho de la estructura complementada; de forma que al superponer ambas debería formarse una placa conductora continua.

En otras palabras, son complementarias aquel grupo de antenas que esta y su complementaria tengan la misma forma; y la forma más fácil de obtener este grupo de antenas es rotándolas 0° , 90° , 180° o 270° .

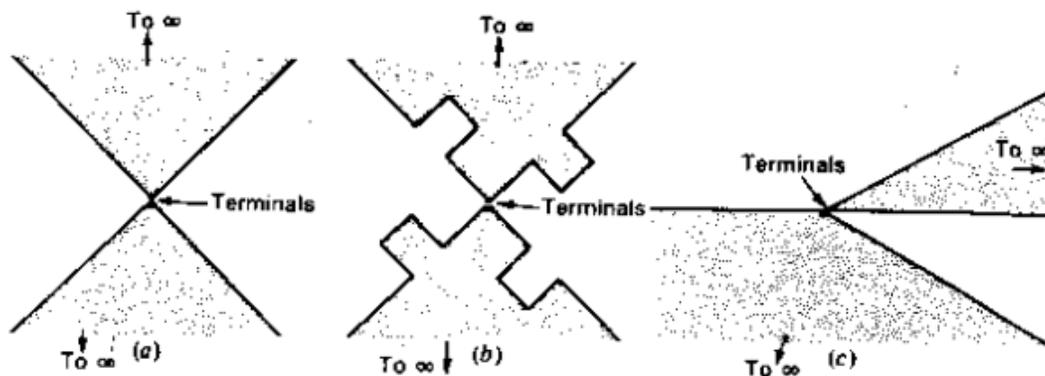


Figura 3. Antenas Complementarias, con Independencia Teórica de 188Ω

Fuente: (Kraus, 1997)

Los conceptos mencionados anteriormente los podemos complementar con la figura2, donde se puede observar con claridad que las antenas auto complementarias deberían tener una longitud infinita para poder ser auténticamente auto complementarias, además las áreas abiertas y

las formadas por metal son congruentes entre si aún al rotarlas cierto ángulo ya que coinciden entre ellas (Kraus, 1997).

Sin embargo, si las 3 figuras son auto complementarias no quiere decir que sean auto escalables, ya que en el caso de la figura b) no cumple con el principio de escalabilidad. En resumen, los conceptos de auto escalabilidad y auto complementarias son independientes.

Las impedancias de las antenas auto complementarias cumplen con el principio de Babinet:

$$Z_{IND}Z_{INCOMP} = \frac{Z_0^2}{4} \quad (2.4)$$

en donde la expresión descrita anteriormente se utiliza para el caso particular de un dipolo.

En el caso de una antena auto complementaria, su impedancia y la de su complementaria son las mismas, por lo tanto:

$$Z_{ind}Z_{incomp} = \frac{n}{2} = 60\pi = 188 \Omega \quad (2.5)$$

Por lo tanto, una antena independiente de frecuencia tiene una impedancia característica cercana a los 188 ohm (Anguera, 2008).

No necesariamente el diseño de una antena independiente de la frecuencia tiene que ser auto complementaria, pero si se consigue se tiene varias ventajas en su construcción como:

- Su impedancia será más constante con el cambio de varias décadas en frecuencia y será más factible y fácil construir un stub de cierta impedancia para acoplar la antena.
- El cálculo de la impedancia no será necesario ya que equivaldría como ya se mencionó anteriormente a una antena independiente de frecuencia y valdría 188 ohm.

2.3. Antenas Espirales.

Las antenas espirales son un tipo de antenas conformadas por dos o más brazos rotados cierto ángulo en forma de espiral, debido a su geometría definida por ángulos y al giro de cada uno de sus brazos cumple con los requerimientos descritos en el apartado anterior para ser independientes de la frecuencia. Sin embargo, para que sean estrictamente independientes de la frecuencia sus dimensiones deberían ser infinitas y además las dimensiones de los puntos de alimentación y su separación deberían ser infinitesimales. Por lo que su comportamiento en frecuencia se ve limitado.

Otra característica de este tipo de antenas es su polarización circular que la convierte en idónea tanto para emitir o recibir señales dentro de las bandas para la cual fue diseñada.

Operan en modo triple; es decir en ondas progresivas, onda rápida y onda de fugas.

- *Onda Progresiva:* Es formada en los brazos de la espiral y permiten un desempeño de antena de banda ancha.
- *Onda Rápida:* Es formada debido al acople mutuo entre los brazos de la espiral.
- *Onda de Fugas:* Se forma a través de los brazos lo cual produce la radiación de la antena.

Son comúnmente usadas en monitorización del espectro, como en equipos analizadores de espectro y SDR, detección remota, sistemas de posicionamiento global, telemetría, radiogoniometría en microondas, etc.

2.3.1. Antena Espiral Equiangular.

Una de las geometrías más usadas en la construcción de antenas espirales es la antena equiangular plana debido a su facilidad de construcción.

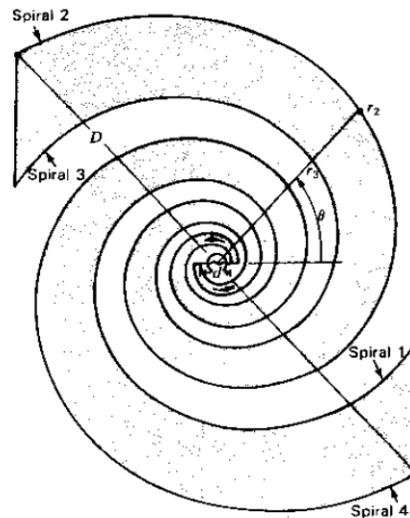


Figura 4. Antena Espiral Equiangular

Fuente: (Kraus, 1997)

Esta se puede definir en coordenadas polares como:

$$r = Ae^{a\phi} \quad (2.6)$$

Donde r es la distancia radial de las espirales, ϕ ángulo de incremento respecto al eje x y A la constante. Además, es un giro auto escalable con cualquier factor de escala k , ya que: (Cardama, 1998)

$$kr(\phi) = kAe^{a\phi} = Ae^{a(\phi + \frac{1}{a} \ln k)} = r(\phi + \Delta\phi) \quad (2.7)$$

Así teniendo en cuenta que $r(\varnothing + 2\pi) = r(\varnothing)e^{a2x}$ al término e^{a2x} se le denomina el factor de expansión de la espiral.

Como se puede observar en la figura 4, la antena espiral puede formarse a partir de 4 espirales, la antena puede ser autocompletaría si el segundo brazo se encuentra rotado 90° respecto al primero. Un inconveniente de este tipo de antenas es acoplar la antena espiral que es un sistema balanceada a un sistema como una línea coaxial desbalanceado. Para poder acoplar este tipo de antenas existen varias formas, una de ellas es la construcción de un Balun proveniente del inglés *balanced-unbalanced* que permite acoplar sistemas balanceados a no balanceados (Cardama, 1998).

Otro método como es conectar la parte externa del cable coaxial continuamente a una de los brazos de la espiral y el otro punto de alimentación conectarlo al conductor interno del cable coaxial como se indica en la figura 5 (Cardama, 1998).

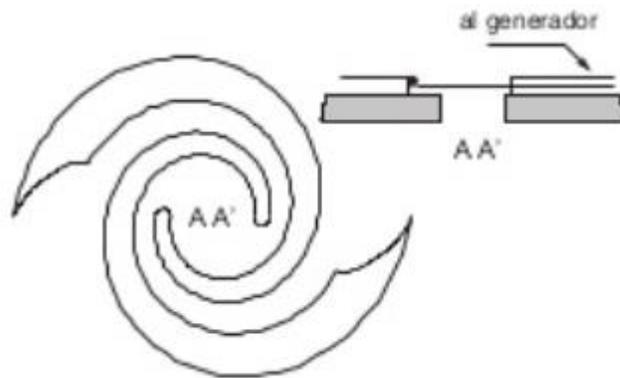


Figura 5. Alimentación Antena Espiral Equiangular

Fuente: (Cardama, 1998)

Al conseguirlo, ahora la corriente que circula por el conector externo del cable coaxial es la misma que circula por el brazo de la espiral, de modo que ya no existirán corrientes residuales circulando por la parte externa del cable coaxial una vez que abandone el brazo de la antena (Cardama, 1998).

De igual forma Kraus en su libro nos menciona que para acoplar antenas espirales y si la frecuencia de operación de la antena espiral no es muy alta ($f < 5\text{GHz}$), se puede acoplar soldando la malla exterior del coaxial a un brazo de la espiral y el central al otro. Adicional al otro brazo se suelda un coaxial parasito (cortocircuitado en sus extremos). Como se indica a continuación: (Kraus, 1997)

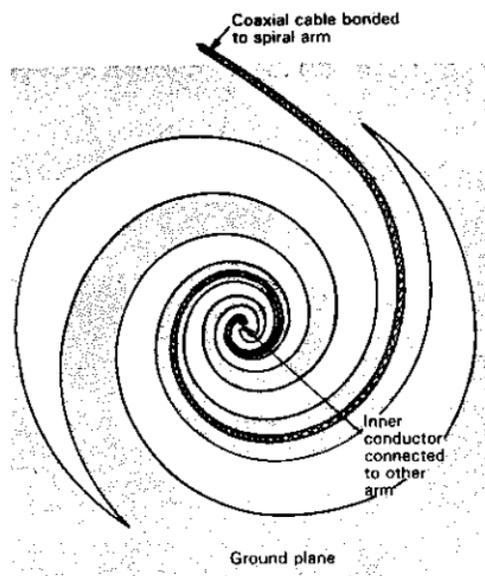


Figura 6. Alimentación de una Antena Equiangular

Fuente: (Kraus, 1997)

De esta forma la corriente que circula por los brazos de la espiral se atenúa y hace que no exista corriente sobre el coaxial de alimentación en toda la banda de trabajo.

Las bandas de frecuencia para la antena espiral se encuentran limitadas por:

$$f_{min} \Rightarrow \lambda_{max} \approx 2\pi r_{max} \qquad f_{max} \Rightarrow \lambda_{min} \geq 10r_{min}$$

2.3.1. Antena Espiral de Arquímedes.

La antena espiral de Arquímedes es la que se va a diseñar y construir en el presente trabajo debido a la respuesta en frecuencia de banda ancha y debido a su facilidad de construcción e impresión adaptándose sobre una variedad de objetos; que, aunque no es estrictamente auto escalable, suele funcionar mejor en cuanto a términos de polarización circularmente perfecta se refiere que las antenas espirales equiángulas.

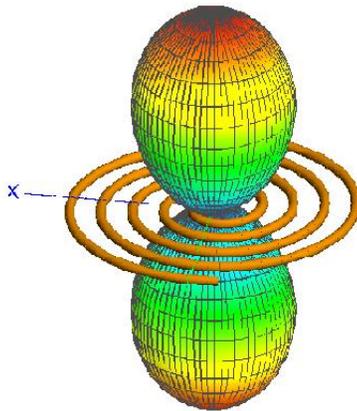


Figura 7. Antena Espiral

Estas pueden ser construidas usando técnicas de circuito impreso y tienen propiedades similares a la antena espiral equiangular plana (Stutzman, 1981).

Las antenas espirales de Arquímedes a diferencia de las espirales que están formadas por brazos crecientes conforme se alejan del centro, estas mantienen el ancho de sus brazos constante desde sus terminales de alimentación hasta el extremo de sus brazos.

Cada espira de la antena espiral es linealmente proporcional al ángulo ϕ y están descritas por las siguientes ecuaciones (Caswell, 2001).

$$r_1 = r_0(\pi + \phi) \qquad r_2 = r_0(2\pi + \phi) \qquad (2.8)$$

Así forman una línea bifilar sobre el plano que están contruidos

Las corrientes progresivas que recorren cada una de las espiras con signo contrario se sitúan en fase a cada frecuencia para un radio $r = \lambda/2\pi$. Esto origina en la antena una zona activa debido a la corriente en forma de espiral de radio “ r ” de forma:

$$I(\phi) = e^{-j\phi/2x} \qquad (2.9)$$

Lo que da lugar a un diagrama bidireccional del tipo $\cos(\theta)$ y polarizaciones circulares de signo contrario (Caswell, 2001).

Ahora bien, para su construcción y diseño es importante conocer de forma detallada los parámetros de su geometría.

Los parámetros para la construcción de la antena espiral son:

- r Radio Exterior
- r_0 Radio Inicial

- w Ancho del camino
- s Separación de los brazos
- N número de vueltas de la espiral

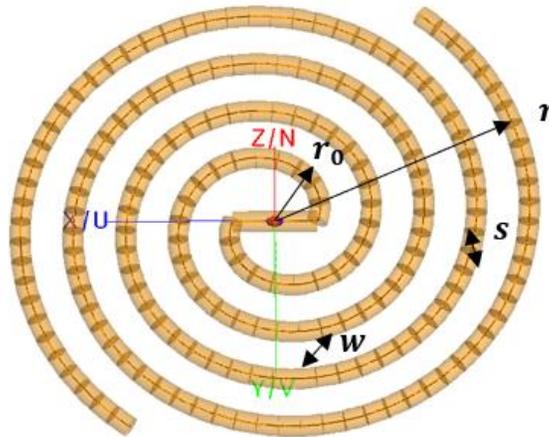


Figura 8. Parámetros de la Antena Espiral

De la ecuación de la antena espiral de Arquímedes, obtenemos la siguiente relación:

$$r = r_0 + a\phi \quad (2.10)$$

Donde con base en el principio de truncamiento y corrientes residuales, la frecuencia máxima y la frecuencia mínima la podemos definir en base al radio inicial (r_0) y exterior (r), respectivamente entonces se puede obtener las siguientes relaciones (Caswell, 2001).

$$f_{max} = \frac{c}{2\pi r_0} \quad (2.11)$$

$$f_{min} = \frac{c}{2\pi r} \quad (2.12)$$

Ahora por la razón de crecimiento, para espirales auto complementarias donde el ancho del brazo y el espaciado entre ellos coinciden, a está dado por: (Caswell, 2001)

$$a = \frac{w+s}{\pi} = \frac{2w}{\pi} \quad (2.13)$$

El ancho del brazo para estructuras auto complementarias puede ser definido por la siguiente ecuación (Caswell, 2001).

$$w = s = \frac{r-r_0}{4*N} \quad (2.14)$$

2.4. Parámetros que caracterizan el desempeño de una Antena.

2.4.1. Impedancia de la antena.

Toda antena dependiendo de su diseño, geometría, materiales de construcción y dimensiones, etc.; tiene una impedancia intrínseca. Aunque está muchas de las veces son extremadamente difícil de calcularla de forma teórica, se suele utilizar valores de impedancia teóricos conocidos con la finalidad de realizar futuras mediciones experimentales.

Una antena muchas de las veces suelen ser expresada como un circuito RLC. Donde su impedancia está definida como la relación entre la corriente y voltaje medidos en sus puntos de alimentación. Esta impedancia de forma general es compleja, compuesta de una parte real denominada resistencia y una parte imaginaria denominada reactancia formada por los fenómenos capacitivos e inductivos.

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a \quad (2.15)$$

La impedancia de la antena es un factor crucial en el diseño de la misma ya que de este depende la eficiencia de transferencia de potencia desde el equipo de transmisión pasando por las líneas de transmisión hasta los puntos de alimentación de la antena, estos deben estar adaptados a una misma impedancia, para así lograr que la antena entre en resonancia (Morbidel, 2017) .

Puesto que las antenas radian energía existe una resistencia de radiación definida por la relación entre la potencia total radiada por la antena y el valor eficaz de la corriente la cuadrado (Morbidel, 2017).

$$R_r = \frac{P_{radiada}}{I^2} \quad (2.16)$$

2.4.2. Circuito de alimentación Stub-Balun.

Al construir una antena con ciertas características y geometría, no siempre se consigue que la línea de transmisión y la impedancia característica de la antena tengan la misma impedancia. Y para poder lograrlo y que la antena tenga máxima transferencia de potencia (ROE=1), se requiere la construcción de pequeños trozos de cable llamados stub, que deben ser conectados a una distancia prudente de la antena utilizando según el diseño de la carta de Smith y que pueden ser terminados en circuito abierto (C.A.) o bien circuito cerrado (C.C.) con la finalidad de acoplar las cargas y lograr (ROE=1) (Morbidel, 2017).

Para el acoplamiento de bajas frecuencias se puede utilizar elementos reactivos como inductancias o capacitancias y para frecuencias más elevadas se requiere de redes de acoplamiento un poco más complejas como son de tipo L, tipo L invertida, tipo pi, etc.

Otro dispositivo utilizado en la construcción de antenas son los balun los cuales son de suma importancia ya que permiten adaptar sistemas balanceados a no balanceados. Por tal motivo es importante definir que es un sistema balanceado y no balanceado.

Un sistema balanceado es aquel que tiene sus terminales de entrada y salida simétricos respecto a tierra, y un sistema desbalanceado como su nombre lo indica es un sistema cuyos terminales de entrada y salida son asimétricos respecto a tierra. En un ejemplo clásico es cuando se tiene una línea de transmisión desbalanceada como un cable coaxial y se requiere adaptar en el otro extremo una antena como por ejemplo una antena dipolo (Anguera, 2008).

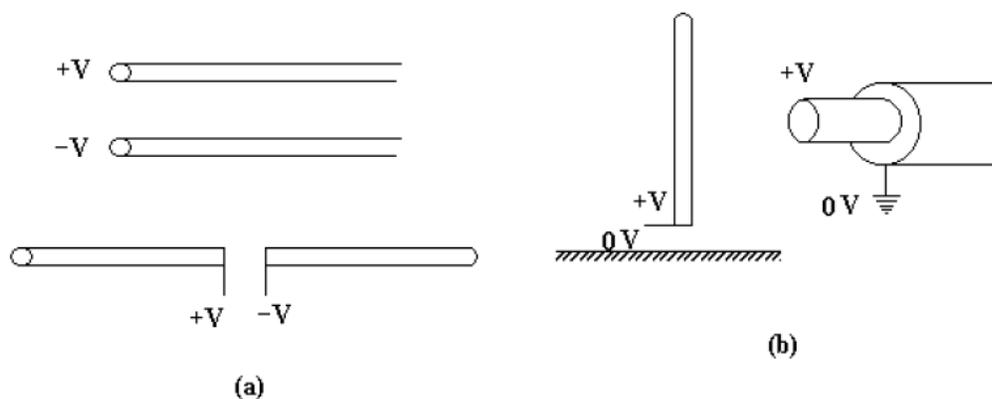


Figura 9. Sistemas Balanceados y Desbalanceados

Fuente: (Macnamara, 2018)

Si se conectará una antena directamente a una línea de transmisión como un cable coaxial, esto ocasionaría que el conductor externo del cable coaxial conectado a un brazo de la antena permitiría que se produzca una inducción de corrientes en la superficie exterior del cable coaxial

ocasionando una radiación innecesaria en la superficie del mismo y cambiando drásticamente la distribución de energía radiada y su vez los parámetros de impedancia y resistencia de radiación (Cardama, 1998).

2.4.3. Polarización.

El término polarización en antenas es utilizado para describir el vector de intensidad de campo eléctrico en el punto de máxima radiación, este viene descrito por el vector de campo $E(r, t)$ el cual describe como varia su amplitud en el tiempo. De este modo el campo eléctrico puede describir una línea recta, una circular o una elipse (Cardama, 1998).

Para el caso de polarización lineal vertical el vector intensidad de campo eléctrico, describe una línea recta en el plano (Y, Z) conforme transcurre el tiempo, con respecto a un observador fijo que se encuentra en el plano Z; conforme se puede observar en la figura. Y para el caso de polarización lineal el vector intensidad de campo eléctrico, se desplaza conforme transcurre el tiempo en el plano (X, Z) para un observador que se encuentre en el plano Z.

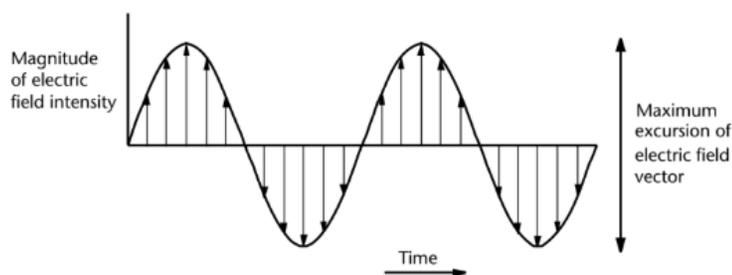


Figura 10. Magnitud del Campo Eléctrico

Fuente: (Macnamara, 2018)

El tipo de polarización circular, se puede decir que es el conjunto de dos componentes de intensidad de vector de campo eléctrico cuyas componentes senoidales varían 90 grados en espacio y tiempo. De este tipo de polarización también se deriva la polarización elíptica, que es un caso particular ya que las dos componentes senoidales del vector intensidad de campo eléctrico, ya no tienen una misma amplitud si no diferentes.

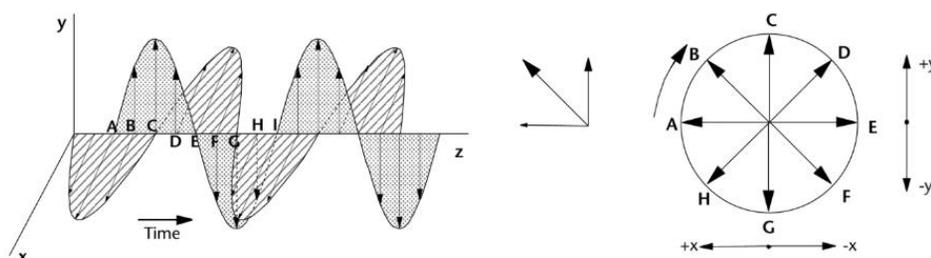


Figura 11. Polarización Circular

Fuente: (Macnamara, 2018)

2.4.4. Diagrama de Radiación

El diagrama de radiación de las antenas es una forma de representar tridimensionalmente el patrón de distribución de la energía radiada de la antena. Generalmente es usado el modelo de representación esférica, con la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia el campo eléctrico en función de las variables angulares (ϕ, θ) (Morbidel, 2017).

Debido a que el campo magnético se deriva directamente del campo eléctrico, la forma más habitual de representar los diagramas es aquellas que se refieren al campo eléctrico.

Al observar una antena a gran distancia, se vería su radiación como si proviniera de un punto, es decir, los frentes de onda serían esféricos. A este punto, centro de curvatura de las superficies de fase constante, se le denomina el centro de fase de la antena (Cardama, 1998).

Los diagramas de radiación pueden representarse de diferentes formas ya sea en planos tridimensionales o en planos bidimensionales; y utilizando diferentes técnicas gráficas o bien programas los cuales nos permiten obtener directamente el patrón de radiación de las antenas diseñadas. La siguiente figura muestra el patrón de radiación tridimensional en los planos E y H. Los niveles de potencia se expresan en decibelios (Cardama, 1998).

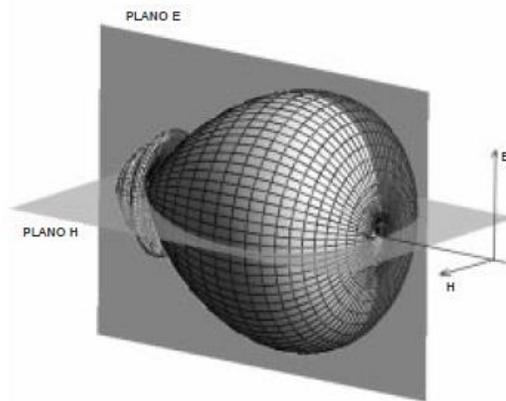


Figura 12. Patrón de Radiación

Fuente: (Cardama, 1998)

Los patrones de radiación más comunes son patrón: direccional, omnidireccional, tipo lápiz, tipo abanico. Uno de los patrones de radiación más utilizados comercialmente es el patrón de

radiación omnidireccional debido a que este radia en todas las direcciones y es usado en APs para brindar acceso de conexión a internet, radiodifusión, etc.

2.4.5. Ancho de Banda

El ancho de banda de una antena es el rango de operación que tiene la antena para emitir o recibir señales sin que sus características intrínsecas como lo son directividad, patrón de radiación, impedancia, etc., se vean mayormente afectados en todo el rango de operación; es decir en lo posible se mantengan iguales o con mínimas variaciones (Morbidel, 2017).

De forma general el ancho de banda es expresado en porcentaje, le cual está definido como la diferencia entre la frecuencia máxima de operación y la mínima, dividido para la frecuencia central.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad (2.17)$$

Además, otra forma de representar el ancho de banda es como una fracción o múltiplo de una octava, que está determinada por una frecuencia y otra que es el doble o la mitad de la primera frecuencia (Morbidel, 2017).

$$BW = \log_2 \left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}} \right) \quad (2.18)$$

El ancho de banda afectara al parámetro más sensible de la antena. Estos pueden clasificarse en dos grupos, en el cual en el primero de ellos se tendrá la directividad, pureza de polarización, ancho de haz, nivel de lóbulo principal a secundario. En el segundo se tendrá la impedancia de la

antena, el coeficiente de reflexión y la relación de onda estacionaria. El o los parámetros que se afecten ya dependen del diseño y construcción de la antena (Cardama, 1998).

2.4.6. Ganancia y Directividad

Una antena radia en todas las direcciones sin embargo es importante poder medir la mayor concentración de energía, en la dirección de máxima radiación. Para esto se utiliza el término directividad el cual define la relación entre la densidad de potencia radiada a una cierta distancia, y la densidad de potencia de una antena teórica conocida como isotrópica que radia la misma intensidad de radiación en todas las direcciones (Morbidel, 2017).

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{W}{4\pi r^2}} \quad (2.19)$$

Generalmente la potencia radiada está definida en la dirección de máxima radiación de la antena

$$D = \frac{P_{Max}}{\frac{W}{4\pi r^2}} \quad (2.20)$$

La ganancia de la antena a diferencia de la directividad tiene en cuenta las pérdidas por radiación de la antena, es decir se puede expresar como la relación de la potencia total entregada a la antena respecto a una antena isotrópica a una misma distancia y dirección.

De este modo se puede definir la eficiencia de la antena que está dada por la diferencia de la ganancia (potencia total entregada a la antena) y la directividad (densidad de potencia total radiada por la antena) (Morbidel, 2017).

$$P_{rad} = \epsilon P_{in} \quad (2.21)$$

Donde la potencia de radiación es igual a la eficiencia ϵ multiplicada por la potencia entregada a la antena. Generalmente suele utilizarse la definición de ganancia debido a que este puede medirse en el laboratorio.

2.5. Teoría de redes de antenas (Multiplicación de diagramas)

Las redes de antenas son utilizadas en aplicaciones donde se requiera que las antenas tengan alta directividad y por ende alta ganancia como por ejemplo las comunicaciones punto a punto; y esto se consigue con agrupaciones de antenas o dipolos ordenados regularmente y alimentados sincrónicamente.

Esto permite que el diagrama de radiación del conjunto se obtenga como la interferencia de los campos producidos por cada una de las antenas, mientras que en la recepción la señal recibida será la combinación lineal de las señales que capta la antena. Es decir el diagrama de radiación es la suma vectorial de cada uno de los campos producidos por las antenas individuales de la agrupación y para su cálculo es importante tomar en cuenta la fase de cada uno de los campos, lo cual a su vez va a depender de la corriente de cada una de las antenas y de la distancia al punto donde se suman (Cardama, 1998).

A continuación, se muestra una imagen de un arreglo de N antenas iguales equidistantes espaciadas una distancia d sobre el eje Z , situadas en las posiciones nd , y alimentadas con corrientes I_n , donde $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$ (Cardama, 1998):

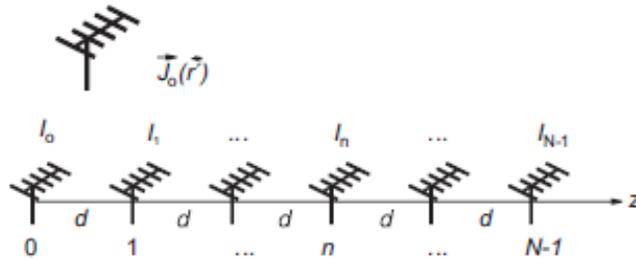


Figura 13. Distribución de corrientes de una agrupación lineal

Fuente: (Cardama, 1998)

En resumen, el diagrama de radiación puede definirse como:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (2.22)$$

Donde ψ (ángulo eléctrico),

$$\psi = k d \cos(\theta) + \alpha \quad (2.23)$$

Puede definirse como la diferencia de fase entre las contribuciones en campo lejano de dos antenas consecutivas. Esta diferencia de fase es igual a la fase progresiva de alimentación α más el desfase por diferencia de caminos $k d \cos(\theta)$ (Cardama, 1998).

Es decir, el diagrama de campo eléctrico radiado es igual al producto del diagrama de la antena básica $\vec{E}_0(\vec{r})$, multiplicado por un factor que toma en cuenta las N ondas generadas por las antenas de la agrupación. Este factor se denomina factor de agrupación y depende únicamente de la frecuencia de trabajo, de la alimentación y de la separación de los elementos de la agrupación (Cardama, 1998).

$$F. A. (\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (2.24)$$

Lo importante de la ecuación del diagrama de radiación radica en que este depende por separado de la antena básica y del factor de agrupación; y este último depende de la localización de la antena en el arreglo y de las amplitudes relativamente complejas de la alimentación.

Esto además enuncia que todas las antenas en el arreglo tienen el mismo patrón de radiación, lo cual no es en todo cierto debido a que la distribución de corriente de una antena es perturbada por los efectos de acoplamiento mutuo con objetos cercanos (el resto de antenas del arreglo). Esto debido a que las antenas de los extremos serán influenciadas de manera distinta que las del centro. A pesar de aquello el patrón de radiación de las antenas individuales es a menudo muy pequeño y despreciable, por tal motivo el principio de multiplicación de patrones es válido (Anguera, 2008).

CAPÍTULO III

3. PROYECTO DE LAS GEOMETRÍAS INICIALES, SIMULACIONES Y OPTIMIZACIONES.

En el presente capítulo se describe el proceso de construcción de una antena espiral de Arquímedes, partiendo primero de la revisión de las bases teóricas del proceso de construcción de la geometría de la antena espiral y después se procederá a realizar la simulación de la geometría construida en el programa FEKO; esto con la finalidad de tener un primer acercamiento a como la variación de la geometría de la antena afecta a los parámetros características de la misma. Así mismo se presenta las pruebas eléctricas de dos circuitos de alimentación para posterior seleccionar el que mejor tenga desempeño con la antena.

Posterior a esta primera simulación y habiendo seleccionado el circuito de alimentación con el mejor desempeño posible, se realizará una optimización de la geometría de la antena con la finalidad de lograr obtener un ancho de banda mayor al planificado de 500 MHz a 3,2 GHz, para lo cual se usará el programa HFSS.

3.1. Simuladores.

3.1.1. Software FEKO

La herramienta que se usará para la primera simulación de la antena espiral de Arquímedes, será el software FEKO, a continuación, se presenta una breve descripción del método utilizado de análisis y solución de problemas.

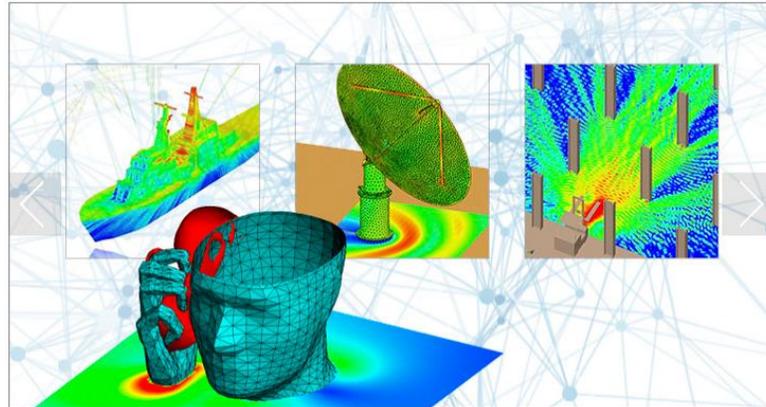


Figura 14. Software FEKO

Fuente: (Putman, 2016)

El método de los momentos es un método numérico, que consiste en dividir la estructura a analizar en varios segmentos o dipolos elementales con la finalidad de calcular la impedancia mutua entre ellos y posteriormente resolver el sistema de ecuaciones resultante. En otras palabras, permite obtener la distribución de corrientes sobre la misma y los objetos metálicos que la rodean.

3.1.2. Software ANSYS HFSS

Finalmente, para la optimización de la antena espiral se usará el software ANSYS HFSS, el cual es fuertemente usado en la industria para simular y diseñar dispositivos electrónicos de alta frecuencia, alta velocidad, campos electromagnéticos de onda completa en 3D, etc.

El método solucionador principal que emplea el HFSS son tecnologías de resolución basadas en los elementos finitos (FEM), ecuaciones integrales o métodos híbridos avanzados que nos permitirán resolver un sin fin de aplicaciones. Además, cuenta con una interfaz gráfica de usuario intuitiva que nos permitirá un óptimo aprovechamiento de la herramienta.

3.2. Proyecto de la geometría inicial de la antena Espiral de Arquímedes.

Para el diseño y construcción de la geometría de la antena espiral, los parámetros que se requerirán con su unidad respectiva de medida son los que se muestran en la Tabla 1, adicional es importante mencionar que esta primera simulación se la realizará en el espacio libre y sin el uso del circuito de alimentación.

Ahora bien, se define las bandas de operación de la antena espiral de Arquímedes, las cuales se establecen las siguientes:

$$f_{max} = 3200 \text{ MHz}$$

$$f_{min} = 500 \text{ MHz}$$

El perímetro de la antena debe ser igual a $L = 1,25 * \lambda_L$, donde λ_L representa la longitud de onda de la antena a la menor frecuencia deseada (Milligan, 1985).

Debido a que las bajas frecuencias son las que limitan el tamaño de la estructura, se calcula la longitud de onda para 500MHz.

$$\lambda_L = \frac{c}{f_{min}} \quad (3.1)$$

$$\lambda_L = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{500 \text{ MHz}} = 0,6 \text{ m} \quad (3.2)$$

La longitud del brazo de la espiral sería

$$L = 1,25 * \lambda_L \quad (3.3)$$

$$L = 1,25 * 0,6 = 750 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Tabla 1.*Parámetros de la antena espiral de arquímedes*

Parámetros	Abreviatura	Unidad de Medida
Frecuencia Máxima	f_{max}	MHz
Frecuencia Mínima	f_{min}	MHz
Longitud del Brazo	L	mm
Velocidad de la Luz	c	m/s
Radio Inicial	r_0	mm
Radio Exterior	r	mm
Calle Conductora	w	mm
Separación	s	mm
Número de vueltas	N	U

Como ya se mencionó en un apartado anterior y en base a principios de las antenas independientes de frecuencia; se pueden establecer las siguientes relaciones, las cuales permiten obtener los radios inicial y exterior de la antena espiral de Arquímedes.

$$f_{max} = \frac{c}{2\pi r_0} \quad (3.5)$$

$$r_0 = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot \pi \cdot 3200 \text{ MHz}} = 14,92 \text{ mm} \quad (3.6)$$

$$f_{min} = \frac{c}{2\pi r} \quad (3.7)$$

$$r = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \pi \cdot 500 \text{ MHz}} = 98,49 \text{ mm} \quad (3.8)$$

Ahora se puede usar el radio medio (r_m), para una aproximación rápida de la longitud de la espira y se calcula como la semisuma de los radios exterior e inicial. Como se muestra en la siguiente figura (Roca, 2009).

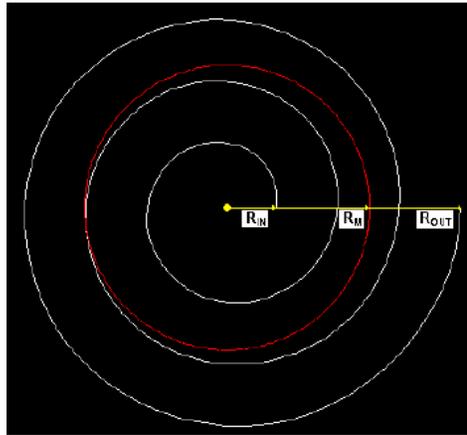


Figura 15. Radio medio y anillo medio.

Fuente: (Roca, 2009)

Con el radio medio se puede obtener la longitud del anillo y multiplicando este por el número total de vueltas (N), también se puede llegar a una ecuación donde se encuentre la longitud del brazo de la espira, como aparece a continuación: (García, 2006).

$$L = N(2\pi)r_m \quad (3.9)$$

Calculando el radio medio (r_m)

$$r_m = \frac{r_0+r}{2} \quad (3.10)$$

$$r_m = \frac{14,92mm+95,49mm}{2} = 55,195 \text{ mm} \quad (3.11)$$

Despejando (N) de la ecuación 2.3, se tiene

$$N = \frac{L}{2 \pi r_m} \quad (3.12)$$

Reemplazando los valores ya calculados

$$N = \frac{750 \text{ mm}}{2 \pi (55,195 \text{ mm})} \quad (3.13)$$

$$N = 2,16 \quad (3.14)$$

Al ser estructuras auto complementarias, la separación de los caminos y el ancho de los mismos deben ser los mismos, y se calculan según la siguiente ecuación:

$$w = s = \frac{r-r_0}{4N} \quad (3.15)$$

$$w = s = \frac{95,49\text{mm}-14,92\text{mm}}{42,16} \quad (3.16)$$

$$w = s = 9,29\text{mm} \quad (3.17)$$

Los parámetros encontrados matemáticamente para la construcción de la antena se presentan resumidos en la tabla 2, con su respectiva unidad de medida.

Tabla 2.

Parámetros calculados de la antena

Parámetro	Abreviatura	Valor
Radio interior	r_0	14,92 mm
Radio exterior	r	95,49 mm
Longitud del brazo de la espiral	L	750 mm
Número de Vueltas	N	2,16
Calle Conductora	W	9,29 mm
Separación	s	9,29 mm

Una vez finalizado el diseño de la geometría de la antena espiral se procederá a realizar su simulación en el programa FEKO para analizar su desempeño.

3.2.1. Simulación en FEKO

Debido a que la antena espiral, se construyó sobre una estructura de alambres que es la que ofrece el software FEKO, para una mejor aproximación es importante poder convertirla a una estructura plana utilizando un radio de alambre de $\frac{1}{4}$ del ancho del brazo de la espiral (Caswell 2011).

$$r_a = \frac{w}{4} \quad (3.18)$$

donde r_a es el radio del alambre

Reemplazando el ancho del brazo se obtiene

$$r_a = \frac{14,92 \text{ mm}}{4} = 3,73 \text{ mm} \quad (3.19)$$

Para la simulación de la antena espiral de Arquímedes en el software FEKO, se usarán los parámetros obtenidos en la Tabla 2.

El resultado de la geometría obtenida en el software FEKO es el mostrado en la figura 16.

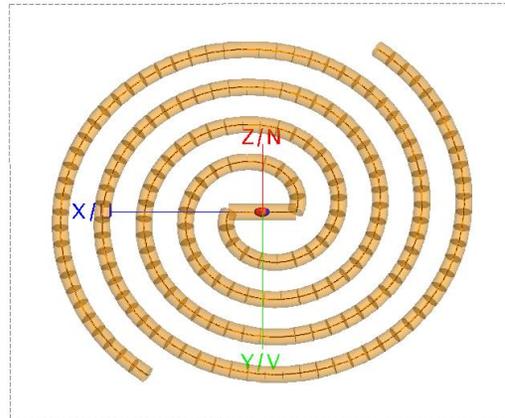


Figura 16. Geometría inicial de la antena espiral

Una vez finalizada la simulación con los parámetros calculados, se procederá a verificar los resultados obtenidos en FEKO, para lo cual se obtuvo el patrón de radiación de la figura 17.

Finalmente, los resultados obtenidos tras la simulación se muestran en la figura 18; para lo cual no se tomó en cuenta el circuito de casamiento y se adaptó la fuente de alimentación a la misma impedancia característica de la antena. Se puede observar que el ancho de banda que se obtuvo para los cálculos realizados son bastante buenos desde los 600 MHz hasta los 3,2 GHz obteniéndose así un VSWR inferior a 2, lo cual nos indica que la mayor cantidad de la potencia transmitida a la antena será irradiada por la misma.

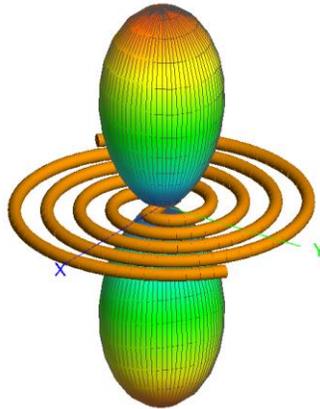


Figura 17. Patrón de radiación a $F= 1.9\text{GHz}$

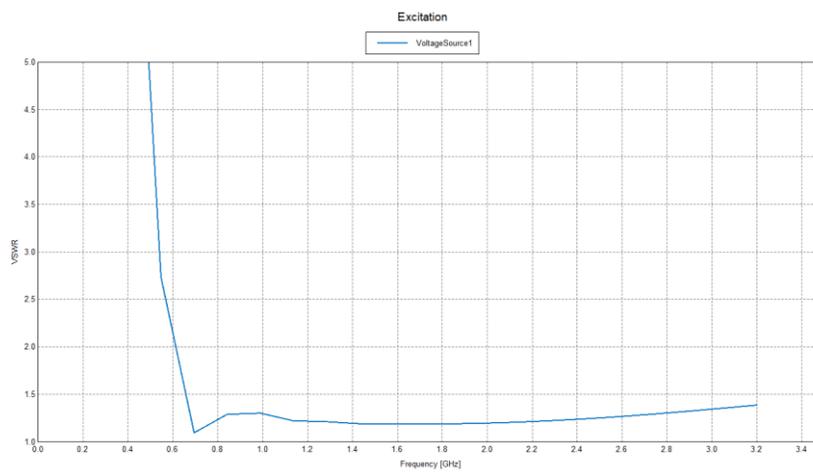


Figura 18. VSWR de la antena espiral vs frecuencia

Es importante mencionar que a priori se usó el método de los momentos (MoM) de FEKO, por ser computacionalmente más rápido y se usó para ganar feeling de cómo cambios en la geometría afecta los parámetros característicos de la antena.

3.3. Proyecto de la geometría del casador / Balun

Para la adaptación de la antena espiral se contempla el diseño de dos circuitos de alimentación y entre los dos se seleccionará al de mejor desempeño para posterior ser usado en la adaptación de la antena espiral.

Circuito de alimentación 1: *Transformador constituido de tres transformadores de $\frac{\lambda}{4}$ en cascada*

Para el diseño del casador entre el conector de alimentación SMA (*SubMiniature version A*) de 50Ω y la impedancia de entrada de la antena espiral de 100Ω aproximadamente, se utilizó el software Genesys.

El modelo a utilizar será un balun con una transición de microcinta para cinta coplanar (CPS). La microcinta consiste en una línea de alimentación que tiene tres transformadores en cascada de $\frac{1}{4} \lambda$ para realizar la adaptación de 50Ω a 100Ω y termina en un stub de $\frac{1}{4} \lambda$.

Para realizarlo nos valdremos del sistema de adaptación de impedancias de un cuarto de onda, lo cual se resumen en la siguiente expresión: $Z_0 \quad Z_i$

$$Z_0 = \sqrt{Z_i * Z_L} \quad (3.20)$$

donde,

Z_0 : Impedancia característica de la línea

Z_i : Impedancia de entrada de la línea

Z_L : Impedancia final de la línea

1er Transformador: $R_L = 60 \Omega$

$$Z_0 = \sqrt{50 * 60} = 54,8 \Omega$$

2do Transformador: $R_L = 75 \Omega$

$$Z_0 = \sqrt{60 * 75} = 67 \Omega$$

3er Transformador: $R_L = 100 \Omega$

$$Z_0 = \sqrt{75 * 100} = 86,70 \Omega$$

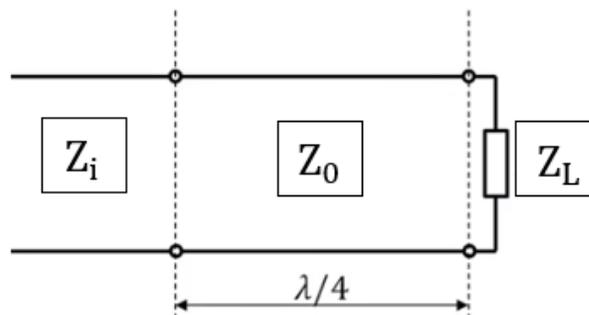


Figura 19. Adaptación con un cuarto de onda

A continuación, la topología de los transformados de $\frac{\lambda}{4}$,

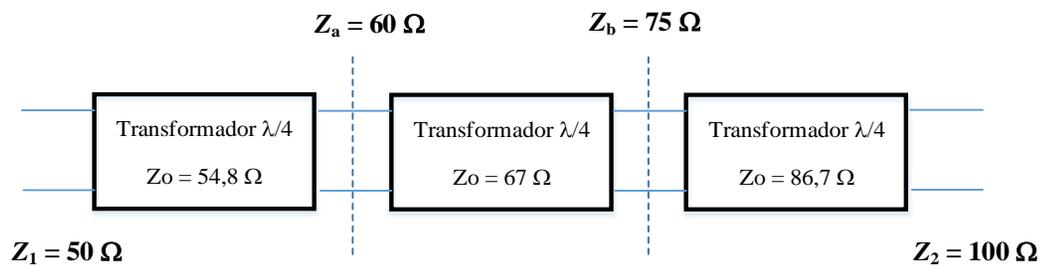


Figura 20. Topología del circuito de casamiento constituido por tres transformadores de

$$\frac{\lambda}{4}$$

Usando el programa TLine, seleccionando la topología de implementación microstrip y con las características del substrato FR4 las dimensiones de ancho y largo de las líneas para cada una de las impedancias se resumen en la tabla 3.

Tabla 3.

Dimensiones físicas del casador usados para implementar los transformadores de $\frac{\lambda}{4}$

Impedancia de los transformadores [Ω]	Ancho W [mm]	Largura L [mm]
54,8	2,33	10,43
67	1,59	10,62
86,7	0,89	10,85

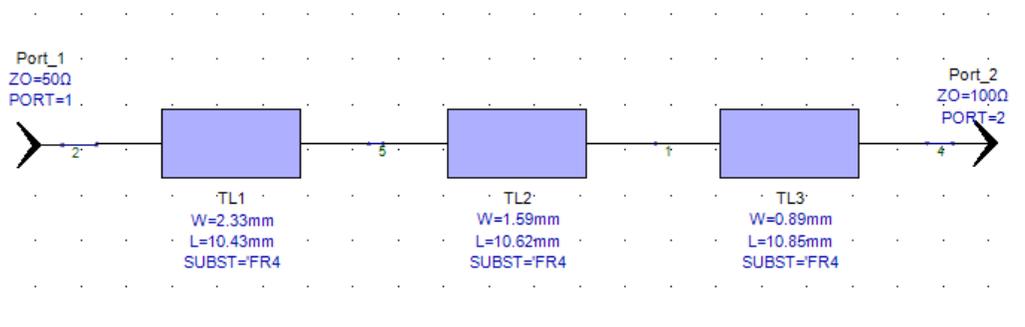


Figura 21. Topología del Circuito de Casamiento

A continuación, se presentan las simulaciones en el software Genesys del acoplador

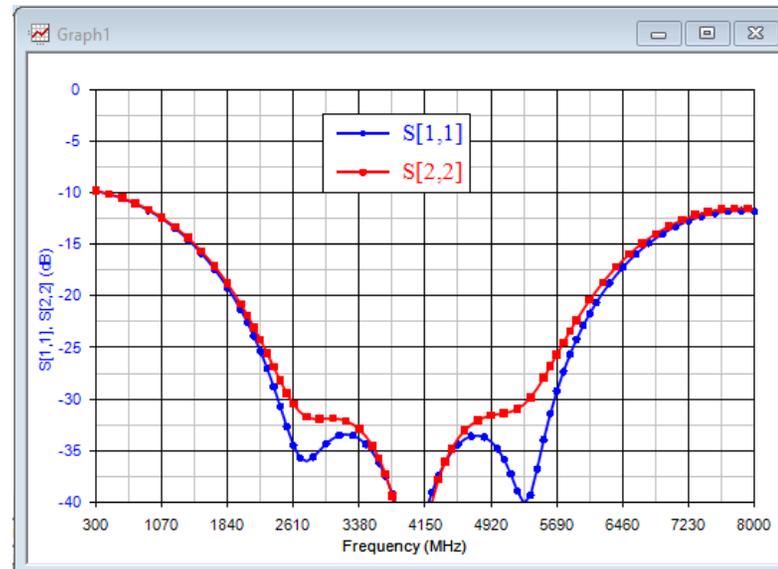


Figura 22. Módulo S_{11} y S_{22}

En la figura 22, tomando como criterio un coeficiente de reflexión inferior a -10 dB lo cual implica una potencia del 10% reflejada en comparación con la inyectada, se puede observar que se cumple en todo el ancho de banda de trabajo de la antena, sin embargo, las impedancias de entrada y salida no se encuentran completamente acopladas, como se puede observar.

Para complementar la aseveración del párrafo anterior se puede observar en la figura 23, que tanto la impedancia de entrada como la de salida en la carta de Smith se encuentran centradas en $ROE=1$.

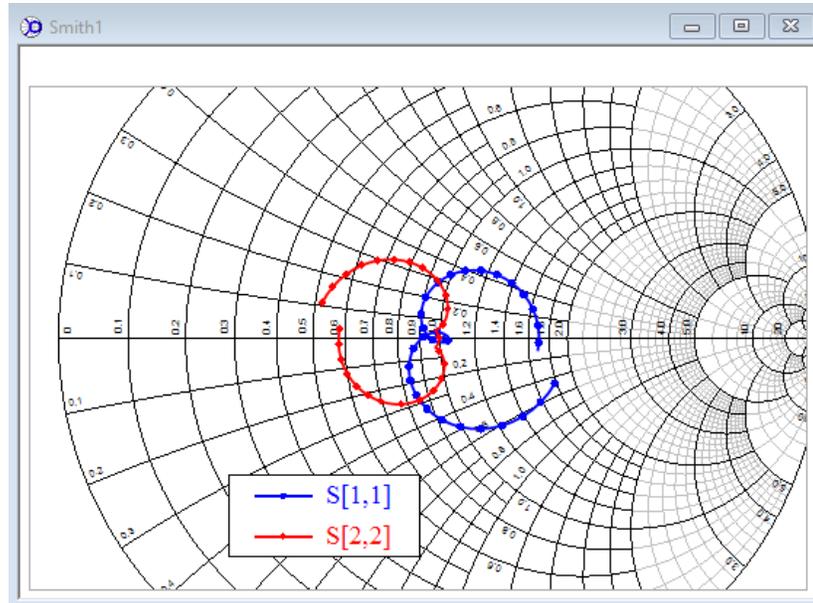


Figura 23. Representación en la carta de Smith de las impedancias in/out

Circuito 2: Casador Chebyshev de orden 3 y ondulación máxima (T_m) igual a 0,05

Para $N=3$, se tiene

$$\Gamma_\theta = 2e^{-j3\theta}(\Gamma_0 \cos 3\theta + \Gamma_1 \cos(3 - 2)\theta)$$

$$\Gamma_\theta = Ae^{-j3\theta}T_3(\sec \theta_m \cos \theta)$$

donde,

$$A = \text{Ripple} = 0,05 = \Gamma_m$$

$$\sec(\theta_m) = \cosh\left(\frac{1}{3} \cosh^{-1}\left(\frac{\ln(Z_0/Z_{in})}{2\Gamma_m}\right)\right)$$

$$\sec(\theta_m) = \cosh\left(\frac{1}{3} \cosh^{-1}\left(\frac{\ln(100/50)}{2 * (0.05)}\right)\right)$$

$$\sec(\theta_m) = \cosh\left(\frac{1}{3}(2.62397)\right)$$

$$\sec(\theta_m) = 1.4075$$

$$\theta_m = \sec^{-1}(1.4075)$$

$$\theta_m = 44.7273$$

De (1) se tiene que,

$$A\Gamma_3(\sec \theta_m \cos \theta) = 2(\Gamma_0 \cos 3\theta + \Gamma_1 \cos \theta)$$

Expandiendo la función de Chebyshev de tercer orden y igualando los coeficientes

$$A\{\sec^3 \theta_m (\cos 3\theta + 3 \cos \theta) - 3A \sec \theta_m \cos \theta\} = 2(\Gamma_0 \cos 3\theta + \Gamma_1 \cos \theta)$$

Se tiene que:

$\cos(3\theta)$:

$$2\Gamma_0 = A \sec^3(\theta_m)$$

$$\Gamma_0 = \frac{(0.05)\sec^3(44.7273)}{2}$$

$$\Gamma_0 = 0.0697$$

$\cos(\theta)$:

$$2\Gamma_1 = 3A \sec^3 \theta_m - 3A \sec \theta_m$$

$$\Gamma_1 = \frac{3A}{2}(\sec^3 \theta_m - \sec \theta_m)$$

$$\Gamma_1 = 0.1036$$

Por simetría

$$\Gamma_0 = \Gamma_3$$

$$\Gamma_1 = \Gamma_2$$

$$\Gamma_0 = 0.0697$$

$$\Gamma_1 = 0.1036$$

$$\Gamma_2 = 0.1036$$

$$\Gamma_3 = 0.0697$$

$n = 1$

$$\ln z_1 = \ln z_0 + 2\Gamma_0$$

$$\ln z_1 = \ln z_0 + 2\Gamma_0$$

$$z_1 = e^{4.0514}$$

$$z_1 = 57.48 \Omega$$

$n = 2$

$$\ln z_2 = \ln z_1 + 2\Gamma_1$$

$$\ln z_2 = \ln(57.48) + 2(0.1036)$$

$$z_2 = e^{4.2586}$$

$$z_2 = 70.7125 \Omega$$

$n = 3$

$$\ln z_3 = \ln z_2 + 2\Gamma_2$$

$$\ln z_3 = \ln(70.7125) + 2(0.1036)$$

$$z_3 = e^{4.4658}$$

$$z_3 = 86.9926$$

Resultados obtenidos con el software Tline

Tabla 4.

Dimensiones físicas del casador chebyshev de orden 3.

Impedancia de las etapas [Ω]	Ancho W [mm]	Largura L [mm]
57,48	2,12	13,99
70,71	1,42	14,23
87,00	0,88	14,46

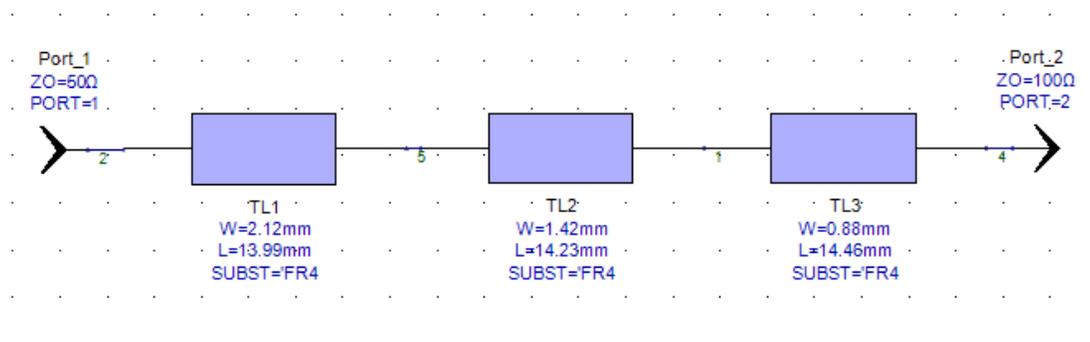


Figura 24. Topología del circuito de casamiento simulado en el software Genesys

En la figura 25, se puede observar como el circuito casador de chebyshev permite acoplar las impedancias de entrada y salida sin variaciones en todo el ancho de trabajo de la antena.

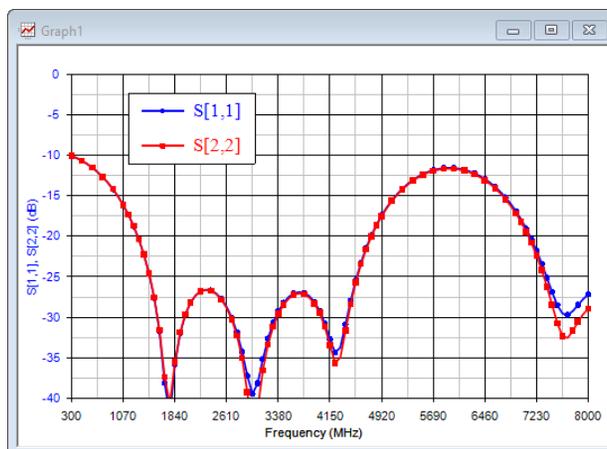


Figura 25. Módulo de S_{11} y S_{22}

De igual forma podemos observar en la carta de Smith como las impedancias se encuentran cercanas a una ROE=1, con lo cual se puede concluir que la mayor cantidad de potencia que llega al circuito de alimentación será irradiada.

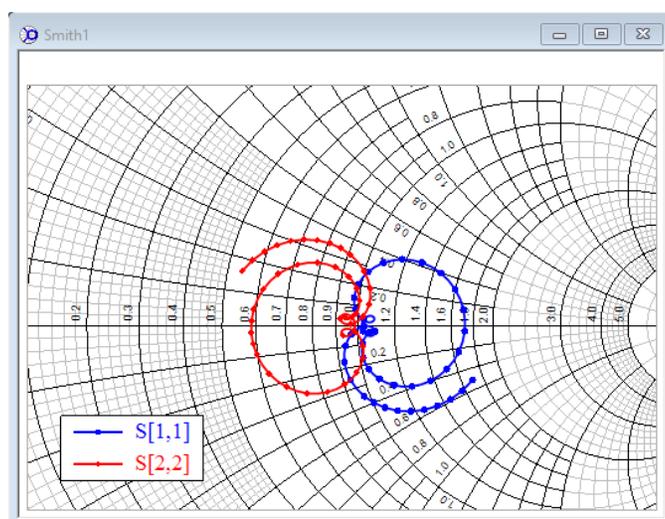


Figura 26. Representación de la carta de Smith de las impedancias in/out

3.4. Simulación / optimización de la antena espiral

Una vez realizada la simulación en el software FEKO y ganando *feeling* con la antena espiral, se procede a mostrar el diseño final de la antena espiral realizada en el programa ANSYS HFSS y sus medidas. Además, cabe recalcar que el sustrato con el que se cuenta en el laboratorio de telecomunicaciones en el CICTE tiene las siguientes características y son las que se han usado en el simulador:

Tabla 5.

Características del sustrato

Características Substrato	Simbología	Valor
Permitividad Eléctrica	ϵ_r	4,23
Tangente de pérdidas	$\tan\delta$	0,06
Espesura del Substrato	h	1,4mm
Espesura del cobre	τ	0,036mm

Tabla 6.

Parámetros de optimización de la antena espiral

Parámetro	Medida
Radio Inicial	1,3 mm
Número de Vueltas	8 u
Espesura brazos	1,57 mm
Radio exterior	60mm

La geometría de la antena optimizada usando las medidas de la tabla 6, se pueden observar en la Figura 27.

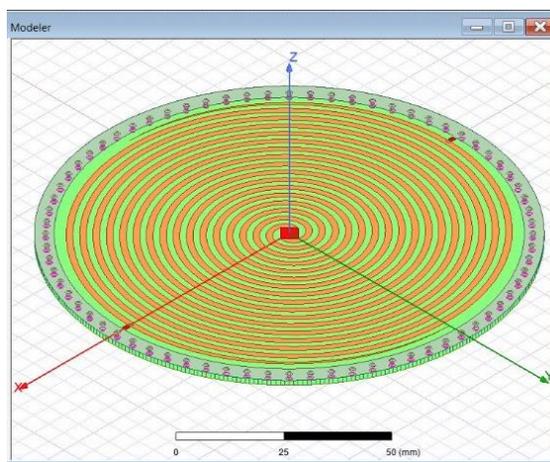


Figura 27. Optimización de la antena espiral

3.4.1. Resultados de la simulación

Los resultados de la Función directividad se muestran en las figuras a continuación para $f = 0,5\text{GHz}$, $f = 0,95\text{GHz}$ y $f = 4\text{GHz}$ respectivamente. Se puede observar en las figuras 28 y 29 que conforme se va aumentando la frecuencia de operación de la antena esta tiende a ser más directiva en la dirección de máxima radiación de la antena, llegando a ser más directiva para la frecuencia de 4GHz donde alcanza una directividad máxima de 6.2 dB.

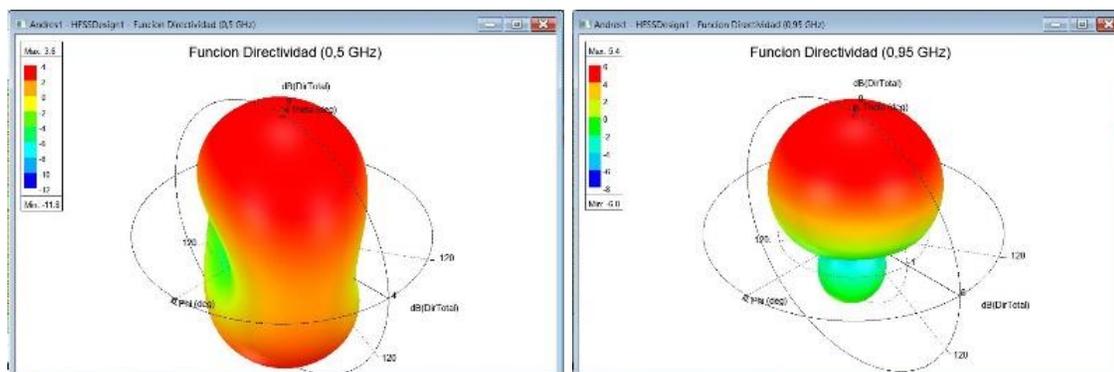


Figura 28. Simulación de la directividad para frecuencias de 05GHz y 0,95 GHz respectivamente

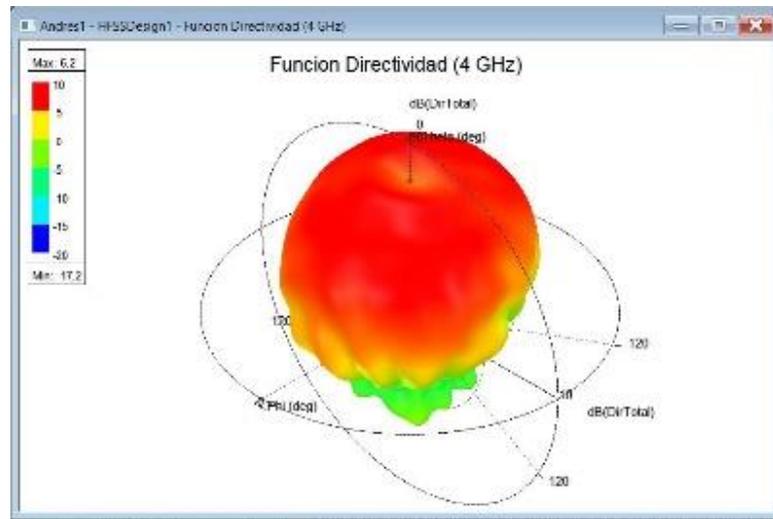


Figura 29. Simulación para una frecuencia de 4GHz

En la figura 30 se puede observar el coeficiente de reflexión (S) medido en el Puerto 11 de la antena espiral, para el cual se observa un desempeño muy bueno obteniéndose un coeficiente de reflexión por debajo de -15dB en todo el ancho de banda planificado inicialmente.

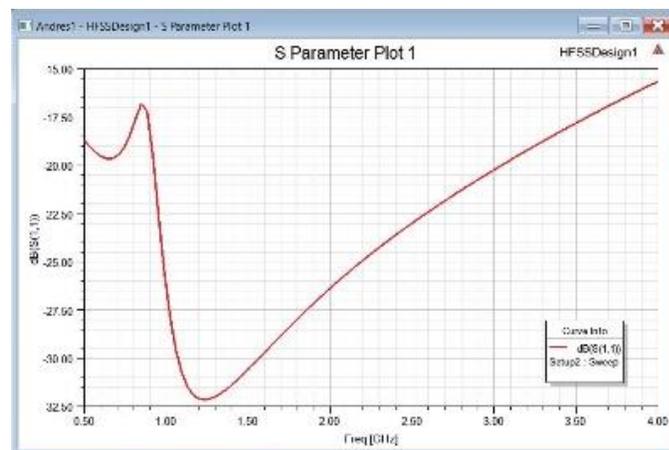


Figura 30. Simulación del coeficiente de reflexión

Se puede contrastar el resultado obtenido en la Figura 31 con el obtenido en la Figura 31 en donde el ROE de la antena se encuentra por debajo de 1,30 en gran parte del ancho de banda de 500MHz a 3200MHz, y solo cerca del rango de 800MHz a 900MHz llega hasta 1,33 para lo cual la potencia reflejada hacía el transmisor es mínima.

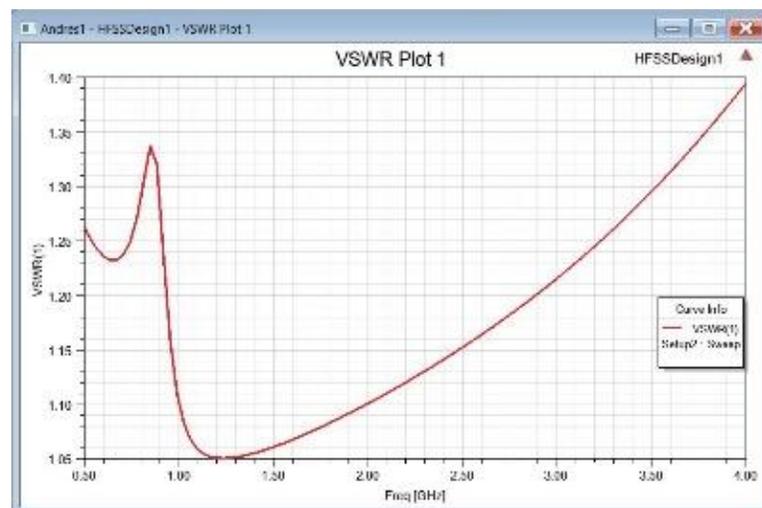


Figura 31. Simulación de la razón de onda estacionaria (ROE)

Como se puede observar en la figura 32, la impedancia característica de la antena se encuentra cercana a los 100 Ω , con una desviación de $\pm 20 \Omega$ para la parte real de la impedancia y para la parte imaginaria cercana a los 0 Ω con una desviación de $\pm 20 \Omega$. Mientras más constante sea la impedancia característica de la antena en todo el ancho de banda deseado el casador se acoplará mejor a la misma.

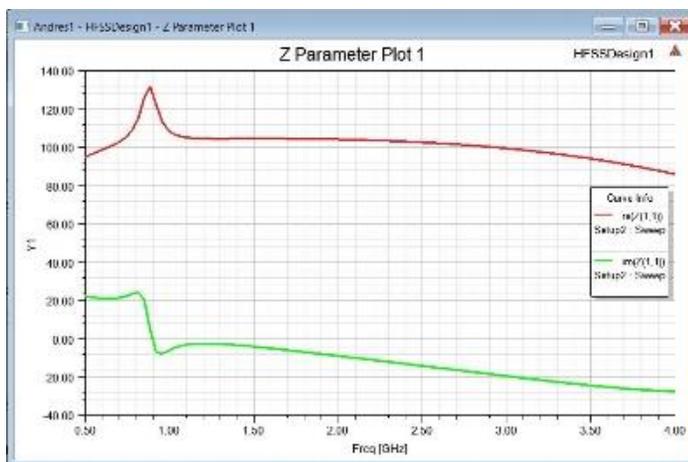


Figura 32. Impedancia de entrada de la antena espiral

Para determinar la polarización de la antena es importante analizar la relación axial. Teóricamente es considerada una polarización circular para valores de 0 dB a 3 dB y superiores a 3dB se considera polarización elíptica, por consiguiente, en la figura 29 aproximadamente en el rango de 800MHz a 3200 MHz se tiene una polarización circular, e inferior a 800MHz se tiene polarización elíptica.

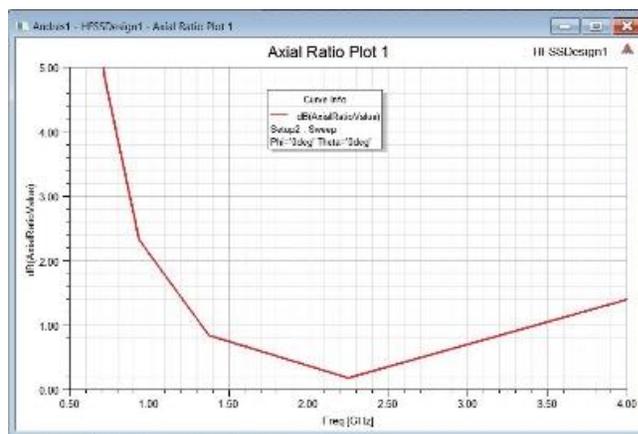


Figura 33. Simulación Relación Axial

3.5. Simulación del circuito de alimentación.

En las simulaciones realizadas con los dos circuitos de alimentación el que mejor logro adaptarse y mostrar un mejor desempeño fue el Circuito de alimentación 2. Casador Chebyshev de orden 3 y ondulación máxima (T_m) igual a 0,05

El diseño final del circuito de alimentación es el que se muestra en la figura 34, el cual consta de un stub con 3 secciones, y por el lado posterior se encuentra el plano de tierra.

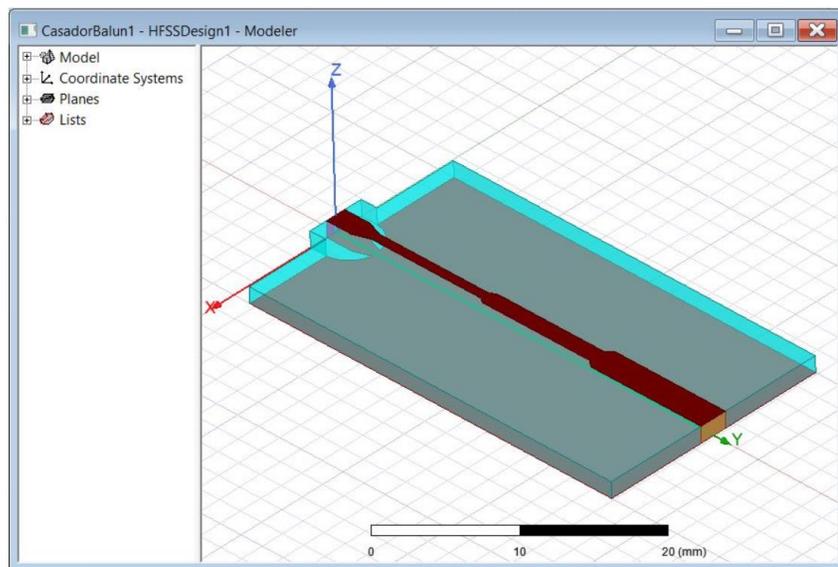


Figura 34. Circuito de alimentación-Casador

En la figura 35, se observa la simulación del del casador y del conjunto, el cual se observa en donde el coeficiente de reflexión es más alto es en las frecuencias bajas.

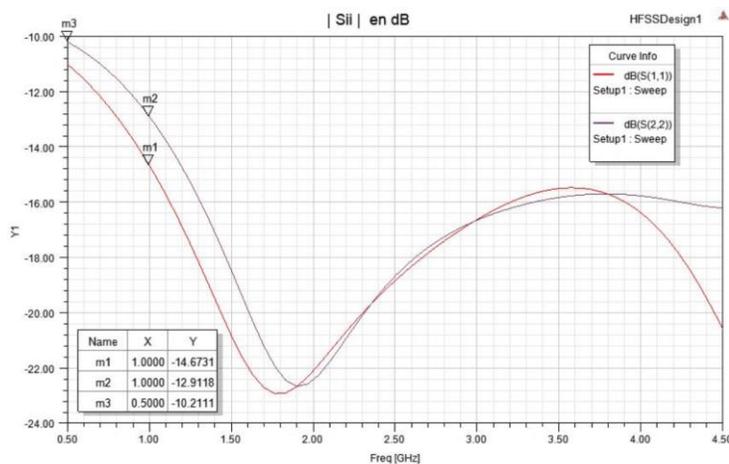


Figura 35. Coeficiente de reflexión

A continuación, se muestra el coeficiente de transmisión el cual mide la potencia de señal recibida en el puerto respecto a la señal que incide, para lo cual se puede observar que a partir de 1,5 GHz hacia frecuencias superiores la señal recibida empieza hacer cada vez menor.

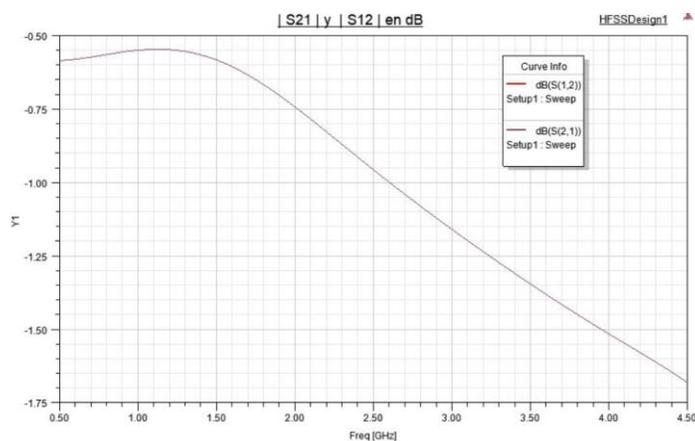


Figura 36. Coeficiente de transmisión

En la figura 37 de la carta de Smith se puede observar la adaptación del circuito de alimentación a 50Ω , en dónde el puerto se acerca bastante bien al punto de normalización $VSWR= 1$.

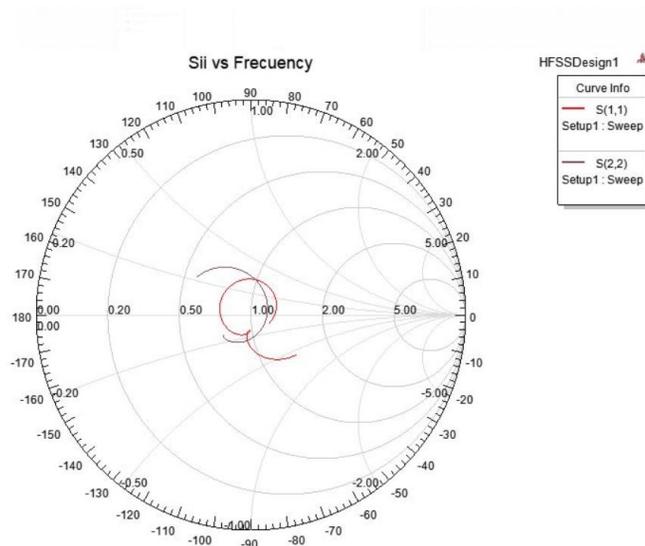


Figura 37. Carta de Smith puerto del circuito de alimentación

3.6. Simulación / optimización del conjunto antena tipo Espiral

En este apartado se presentan las simulaciones en el programa HFSS del conjunto antena espiral y del circuito de alimentación funcionando como un único elemento. Además, se incorporó una cavidad externa soldada a 0.5cm del radio exterior de la espiral para así lograr una mayor directividad.

En la Figura 38, se puede observar la relación axial de la antena la cual para frecuencias superiores a 1,5 GHz la polarización es circular debido a que se encuentra en el rango de 0 a 3dB, e inferior a 1,5 GHz la polarización se vuelve circular debido a que la relación axial es superior a 3 dB.

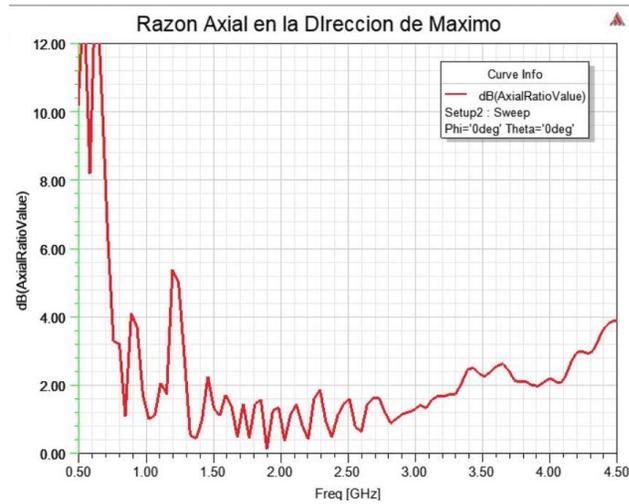


Figura 38. Razón axial del conjunto

Se puede observar en la figura 39 la función directividad en donde se obtuvo una mayor directividad con respecto a la antena simulada inicialmente debido a la cavidad soldada en la circunferencia externa de la espiral pasando de 6.2 dB a 7.4 dB para la frecuencia de 4GHz.

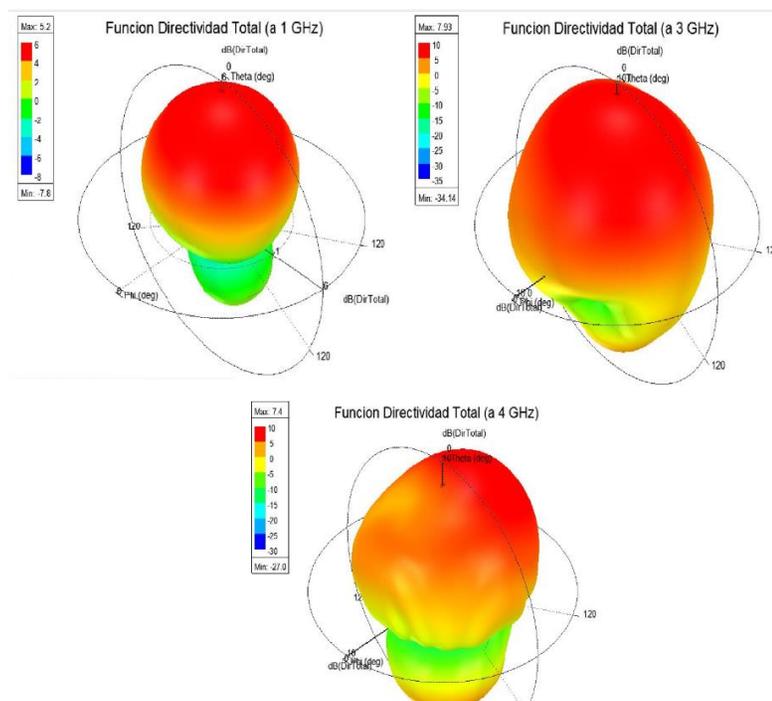


Figura 39. Función directividad del conjunto

En la figura 40, se observa que el ancho de banda se encuentra por debajo de -10db en la totalidad del ancho de banda establecido inicialmente, con excepción de la frecuencia cercana a los 650 MHz en donde se encuentra entre -9,5dB a -10dB. Sin embargo, para el ancho de banda obtenido el resultado es bastante bueno.

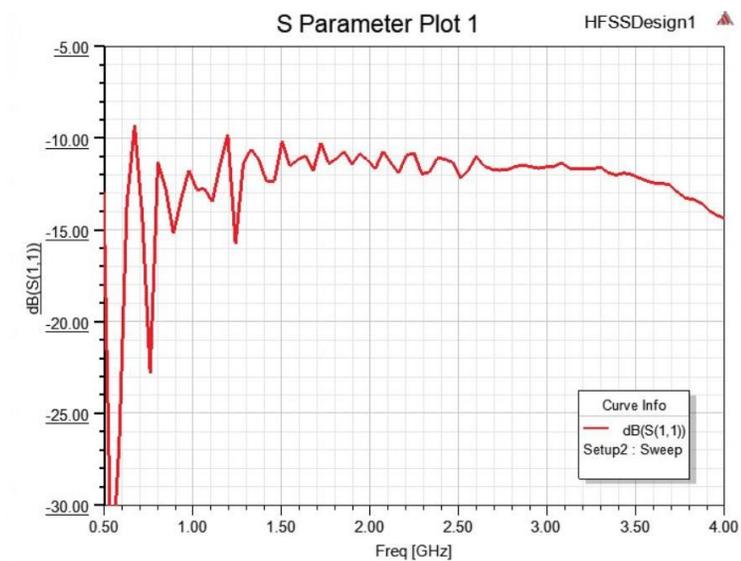


Figura 40. Coeficiente de reflexión del conjunto

El diseño final de la simulación en el programa HFSS se muestra en la Figura 41, el cual consta de la unión del circuito de alimentación y de la antena espiral como un único elemento.

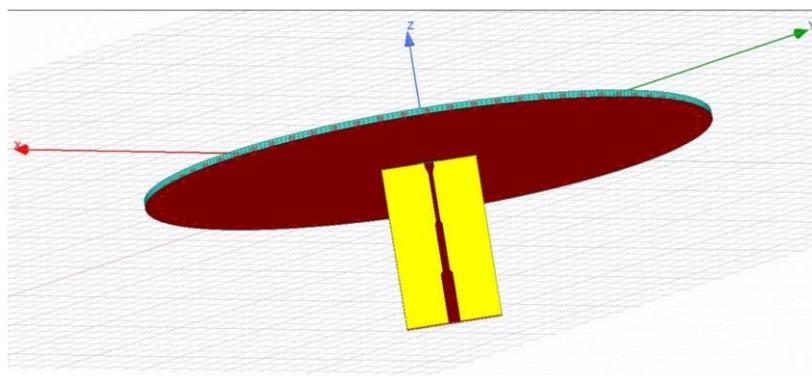


Figura 41. Diseño final del conjunto

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO Y RESULTADOS DE MEDIDAS

4.1. Construcción del prototipo de la antena espiral y del casador.

Una vez terminada la simulación en el programa HFSS y habiendo alcanzado los objetivos planteados se procede a exportar la geometría de la antena y del casador al programa ISOPro, el cual servirá para poder realizar la impresión de la antena espiral en la máquina de control numérico (Prototipadora).

Como se puede observar en la figura 42, la broca empieza a realizar el corte de uno de los brazos de la espiral. Hasta llegar a un espesor del camino de 1.57 mm.



Figura 42. Corte del Substrato con la broca de la prototipadora

Una vez realizado todo el proceso de trazado de los brazos de la antena espiral en el substrato, el resultado obtenido es el que se observa en la figura 43.

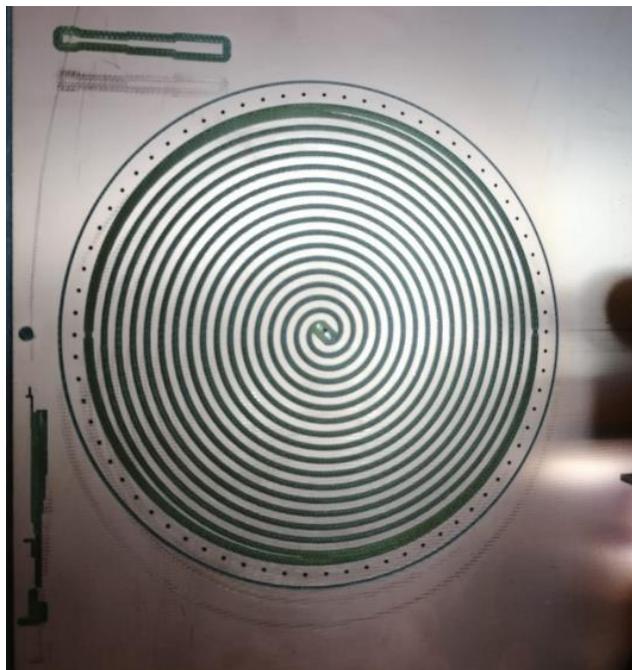


Figura 43. Antena espiral

Ahora bien se procede a realizar el corte de la antena espiral y del casador como se observa en la Figura 44, así como también los huecos en toda la circunferencia de la espiral que posteriormente formarán una cavidad que mejorará su directividad.



Figura 44. Corte Antena Espiral

4.2. Unión del circuito de alimentación con la antena espiral

Una vez realizado el corte de la antena y del casador, se procede a realizar la parte más crítica del proceso de construcción de la antena de Arquímedes el cual consiste en la unión del casador con los terminales de la antena. Si no se lo realiza con el debido cuidado esto puede afectar significativamente a la impedancia de la antena y esto afectar su desempeño final (Caswell, 2001).

El primer brazo de la espiral será soldado al stub, mientras que el segundo brazo de la espiral se conectará al plano de tierra. Como se puede observar en la figura 45.

Además, se soldó al extremo final del casador un conector tipo SMA, el cual permitirá conectar la antena al analizador vectorial para las pruebas a realizarse.

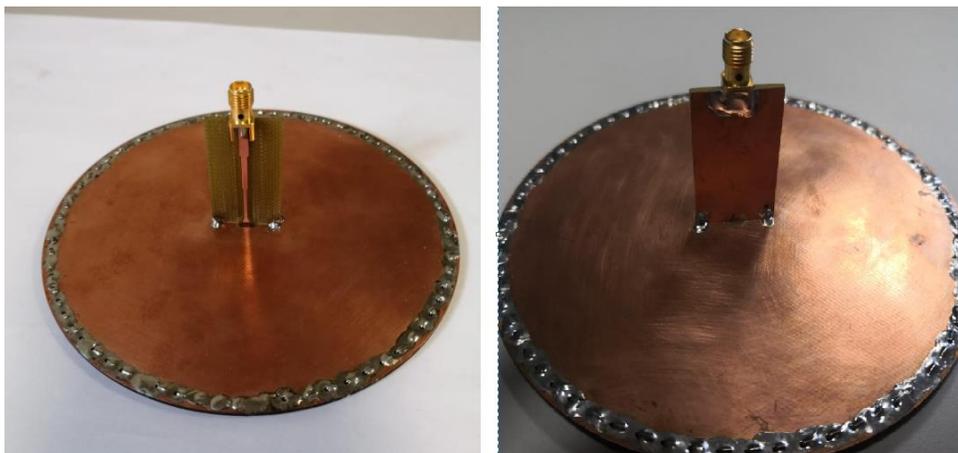


Figura 45. Circuito de alimentación de la antena espiral

Finalmente se procede a soldar con estaño toda la circunferencia externa de la espiral para lograr una cavidad y con ello hacer que la antena espiral tenga una mayor directividad.



Figura 46. Diseño final de la antena espiral de Arquímedes

4.3. Medidas del prototipo final (Antena Espiral / circuito de casamiento)

Una vez terminado el prototipo de la antena espiral con su respectivo circuito de alimentación (casador), es importante poder medir las pérdidas por retorno alcanzada debido a la adaptación y las medidas mostradas a continuación contemplan el conjunto antena espiral y circuito de alimentación como un único elemento.

Para poder medir el coeficiente de reflexión se utilizó un analizador de redes vectoriales (VNA) Anritsu modelo “MS2036A” el cual se encuentra en el laboratorio del CICTE de la Universidad de Fuerzas Armadas-ESPE y que será conectado al conector SMA del circuito de la alimentación de la antena espiral.

En la Figura 47 se puede observar una gráfica comparativa del coeficiente de reflexión de la simulación de la antena vs casador vs el prototipo de la antena. Para lo cual el criterio establecido fue de -10 dB para las pérdidas por retorno y incluso se puede observar para la medida de la simulación de la antena en un gran ancho de banda se encuentra por debajo de -20 dB, así no siendo el caso para la medida del prototipo real de la antena esto debido a que en la simulación no se contemplan en su totalidad pérdidas de materiales como también el efecto de la soldadura de la antena espiral al circuito de alimentación. Con respecto a la medida del circuito de alimentación (casador) se logra de igual forma una muy buena adaptación incluso en gran parte del ancho de banda por debajo de -15dB.

Finalmente, con el prototipo de la antena se logro un gran ancho de banda el cual va desde los 500MHz hasta los 4,5 GHz, encontrándose por debajo de los -10 dB, a excepción de un incremento ligeramente superior a -10 dB en los 3GHz, esto se pudo deber a que el radio inicial de la antena pudo sufrir una pequeña variación debido a la adaptación del casador.

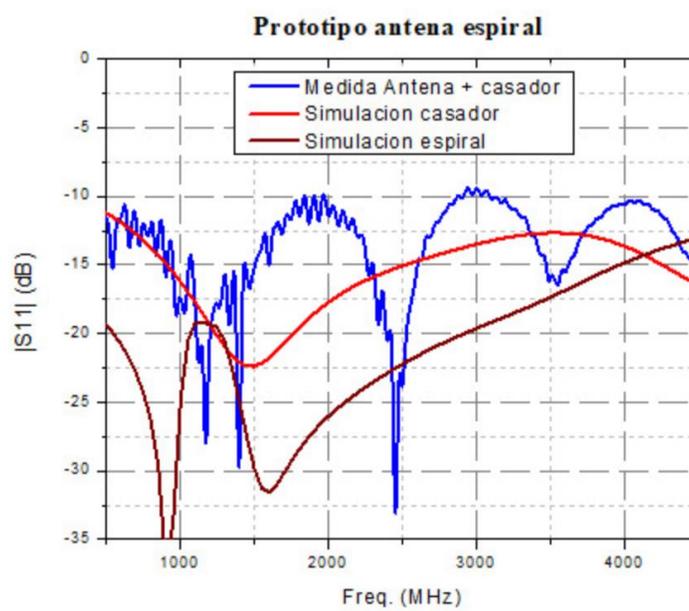


Figura 47. Coeficiente de reflexión

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Las antenas independientes de la frecuencia, teóricamente, deberían tener un ancho de banda infinito, esto no sucede en la práctica debido a que la frecuencia inferior se ve limitada por el radio exterior de la espiral y la frecuencia superior por el radio inicial.

Debido a que el radio inicial de la antena espiral es ligeramente inferior al ancho del camino y ancho del brazo, la impedancia de la antena espiral es inferior a la teórica de 188Ω .

La antena obtenida tiene polarización circular en gran parte de su ancho de banda, haciéndose elíptica para frecuencias bajas (< 800 MHz) lo que la hace idónea para ser usada tanto en transmisión como en recepción en el resto de su ancho de banda.

Se logro diseñar y construir una antena espiral de ancho de banda que va desde los 500 MHz hasta los 4,5 GHz, que es superior a otros modelos de antenas expuestos en literatura técnica y de tipo comercial.

Se pudo comprobar que la antena debido además a la cavidad metálica soldada en su circunferencia alcanzo una alta directividad.

5.2. Recomendaciones

En el diseño de la geometría de la antena espiral se debe procurar que el ancho del brazo sea igual al ancho del camino para así lograr cumplir con el principio de antena auto complementaria.

La antena debe ser soldada simétricamente en los terminales de alimentación ya que si no se consigue la corriente que circulará por cada uno de los brazos será asimétrica y afectará el desempeño de la misma.

5.3. Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se propone realizar la simulación análisis y construcción de una antena espiral de 4 brazos para observar las ventajas que se obtendrían frente a la antena espiral de dos brazos.

Se propone el uso de la antena espiral en un sistema inhibidor de drones con el fin de mostrar su comportamiento, ventajas y desempeño respecto al uso de otros tipos de antenas.

REFERENCIAS

- Addlink Software Científico*. (26 de Febrero de 2018). Obtenido de <https://www.addlink.es/noticias/comsol/2737-diseno-de-antenas-de-ranura-en-espiral-mediante-simulacion-electromagnetica>
- Anguera, J. y. (2008). *Teoría de Antenas*.
- Balanis, C. (1997). *Antenna theory analysis and design*. New York: Jhon wiley sons, inc.
- Cardama, A. J. (1998). *Antenas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Caswell, E. (2001). *Design and Analysis of Star Spiral with Application to Wideband Arrays with Variable Element Size*. Bradley Department of Electrical and Computer Engineering. Blacksburg, VA, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Duque, D. (2017). *Antenas*. Sangolquí.
- Fairclough, C. (21 de Febrero de 2018). *Comsol*. Obtenido de <https://www.addlink.es/noticias/comsol/2737-diseno-de-antenas-de-ranura-en-espiral-mediante-simulacion-electromagnetica>
- García, Á. F. (2006). *Movimiento de la cinta de una casete*.
- GLASS, D. (2007). *Investigation of cylindrically-conformed four arm spiral antennas*.
- Kraus, J. D. (1997). *Antennas For All Applications*. Tata Mcgraw-Hill.
- Lo, Y. T. (1993). *Antenna Handbook*,. New York.

- Macnamara, T. (2018). *Handbook of Antennas for EMC*. Norwood, MA.
- Milligan, T. (2005). *Modern antenna design*.
- Morbidel, L. (2017). *Diseño e implementación de un front-end de microondas para banda ultra ancha*. Bariloche.
- Paz, O. y. (2016). Diseño de un balun de microcinta a línea de cinta coplanar para la banda de televisión digital. *Telématica*.
- Puente, M. (2014). *Desarrollo de una antena espiral de doble banda trabajando en el rango de las sub-milimétricas*. Pamplona.
- Putman, S. (24 de Marzo de 2016). *Altair University Blog*. Obtenido de <https://altairuniversity.com/learning-library/cadfeko-overview/>
- Roca, A. (2009). Diseño de una Antena Espiral de Arquímedes.
- Rumsey, V. (s.f.). "*Frequency Independent Antennas* (Vols. IRE Int. Conv. Rec, vol. 5).
- Stutzman, W. L. (1981). *Antenna Theory and Design, New York, John Wiley & Sons*.
- Vinayagamoorthy, K. (2011). *Design and implementation of wideband baluns for archimedean spiral antennas*.