



**Desarrollo de un Arreglo de Antenas de Monitoreo y DF para la banda de 80Mhz – 2Ghz
en apoyo a las Operaciones Militares del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra
Electrónica**

Pérez Villacrés, José Daniel

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

Ing. Tinoco Salazar, Alexis Fabricio – PhD.

30 de agosto del 2020



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Desarrollo de un Arreglo de Antenas de Monitoreo y DF para la banda de 80MHz – 2GHz en apoyo a las Operaciones Militares del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica" fue realizado por el señor Pérez Villacrés José Daniel, 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 las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 30 de agosto de 2020

Firma:

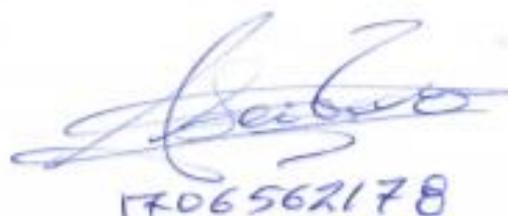


Ing. Tinoco Salazar, Alexis Fabricio – PhD.

C.C: 1706562178

Document Information

Analyzed document	Urkud_PEREZ_DANIEL.rtf (D78409013)
Submitted	8/31/2020 3:52:00 PM
Submitted by	TINOCO SALAZAR ALEXIS FABRICIO
Submitter email	atinoco.salazar@gmail.com
Similarity	7%
Analysis address	aftinoco.espe@analysis.orkund.com



1706562178

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Urkud_ACOSTA_JOSE_Final.docx Document Urkud_ACOSTA_JOSE_Final.docx (D78405653) Submitted by: atinoco.salazar@gmail.com Receiver: aftinoco.espe@analysis.orkund.com	 3
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Urkud_DiegoQuispe_Final.txt Document Urkud_DiegoQuispe_Final.txt (D78321223) Submitted by: atinoco.salazar@gmail.com Receiver: aftinoco.espe@analysis.orkund.com	 2
SA	TESIS.docx Document TESIS.docx (D26210247)	 1
W	URL: https://docplayer.es/65657291-Instituto-politecnico-nacional.html Fetched: 11/24/2019 7:25:10 AM	 2
W	URL: https://de.slideshare.net/daveteslandaz/disenodeantenasdireccionalesde24y58... Fetched: 7/21/2020 3:18:28 PM	 4
W	URL: https://1library.co/document/lq5rmi3z-antena-helicoidal-para-satelites-pequenos.html Fetched: 6/29/2020 1:26:08 AM	 2
W	URL: https://1library.co/document/4yrkvloz-diseno-de-una-antena-de-banda-ultra-ancha-pa... Fetched: 8/6/2020 8:05:32 AM	 3
SA	1562560454_441__reporte3_Antenas.docx Document 1562560454_441__reporte3_Antenas.docx (D54409852)	 1
W	URL: https://1library.co/document/yj7o6e6y-diseno-antena-esprial-arquimedes-frecuencia-... Fetched: 8/31/2020 3:53:00 PM	 5



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Pérez Villacrés José Daniel** con cédula de ciudadanía No. 1718334368 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Desarrollo de un Arreglo de Antenas de Monitoreo y DF para la banda de 80MHz – 2GHz en apoyo a las Operaciones Militares del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de agosto de 2020

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

José Daniel Pérez Villacrés

CC: 1718334368



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Pérez Villacrés José Daniel** con cédula de ciudadanía No. 1718334368, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "**Desarrollo de un Arreglo de Antenas de Monitoreo y DF para la banda de 80MHz – 2GHz en apoyo a las Operaciones Militares del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangoquí, 30 de agosto de 2020

Firma:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Daniel Pérez Villacrés', is written over a horizontal line.

José Daniel Pérez Villacrés

CC: 1718334368

DEDICATORIA

Al concluir este proyecto de investigación quiero dedicar este éxito a Dios y a la Virgen Santísima que siempre guían cada uno de mis pasos, a mi amada esposa, mis hijos y mis padres razón de mi existencia, a mis familiares y amigos quienes de una u otra forma fueron partícipes de este proceso, dedico también a las Fuerzas Armadas institución que me dio la oportunidad de prepararme para servir en forma más eficiente a mi Patria.

José Daniel Pérez Villacrés

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento desde lo más profundo de mi corazón a Dios y a la Virgen Santísima por brindarme su bendición en cada etapa de mi vida, por su guía y protección, por darme la fuerza necesaria para poder sobrellevar cualquier obstáculo.

A mi amada esposa quien con su apoyo incondicional ha sido testigo fiel de cada paso para poder culminar esta meta, a mis hijos mi razón de ser que con su cariño y ternura son el motivo para ser cada día mejor persona, a mis padres y familiares quienes estuvieron pendientes de este largo proceso.

Un sincero agradecimiento al Ejército Ecuatoriano por brindarme la oportunidad de realizar una formación técnica como miembro activo de la institución, a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE cuna de grandes profesionales que con su recurso humano y vasta estructura me permitió realizar todo este proceso desde el periodo de nivelación hasta la titulación.

De manera especial un profundo agradecimiento al Dr. Alexis Tinoco quien con su paciencia y conocimiento supo orientarme en el desarrollo de esta investigación.

José Daniel Pérez Villacrés

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	2
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTO	7
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I	16
Descripción Del Proyecto De Investigación	16
Planteamiento del Problema.....	16
Antecedentes	17
Justificación e Importancia	19
Alcance del Proyecto	20
Objetivos	21

	9
<i>Objetivo General</i>	21
<i>Objetivos Específicos</i>	21
CAPÍTULO II	23
Marco Teórico	23
Parámetros fundamentales de una antena	23
<i>Patrón de radiación</i>	23
<i>Intensidad de Radiación</i>	24
<i>Ancho del haz</i>	24
<i>Directividad</i>	25
<i>Eficiencia de Antena</i>	25
<i>Ganancia</i>	26
<i>Ancho de Banda</i>	27
<i>Polarización</i>	28
<i>Impedancia de entrada</i>	29
Antenas independientes de frecuencia	30
<i>Espirales Equiangulares</i>	32
<i>Espiral de cuatro brazos</i>	32
Subsistema Radiador.....	32
CAPÍTULO III	36
Cálculos teóricos y Geometría inicial de la Antena Espiral de cuatro brazos	36
Cálculos Teóricos.....	36
Stub-Balun.....	41
<i>Transformador constituido de tres transformadores de $\lambda/4$ en cascada.</i>	43

	10
<i>Casador Chebyshev de orden 3 y ondulación máxima (T_m) igual a 0,05</i>	
.....	45
Software HFSS	48
CAPÍTULO IV	49
Simulación y Optimización de la Antena	49
Simulación de la antena.....	49
Simulación del circuito de alimentación	51
Optimización de la antena	51
Diseño final de la Antena Espiral de cuatro brazos con el circuito de alimentación	
53	
CAPÍTULO V.....	54
Análisis de Resultados	54
Función Directividad	54
Coeficiente de Reflexión.....	55
Razón de Onda Estacionaria (ROE)	57
Impedancia característica de la antena.....	58
Diagrama de irradiación.....	59
CAPÍTULO VI.....	61
Conclusiones y Recomendaciones	61
Conclusiones.....	61
Recomendaciones	62
BIBLIOGRAFÍA	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de la Antena Espiral de Arquímedes.	37
Tabla 2. Parámetros calculados de la Antena Espiral de cuatro brazos	41
Tabla 3. Características del substrato	49
Tabla 4. Parámetros de optimización de la Antena Espiral de cuatro brazos	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Patrón de campo en escala lineal	24
Figura 2. Pérdidas de una antena	26
Figura 3. Rotación de una onda electromagnética plana y elipse de polarización ..	28
Figura 4. Distribución corriente instantánea de 1 Espiral de cuatro brazos Modo 1	33
Figura 5. Distribución corriente instantánea de 1 Espiral de cuatro brazos Modo 2	35
Figura 6. Radio medio y Anillo medio	39
Figura 7. Sistemas Balanceados y Sistemas Desbalanceados.....	42
Figura 8. Topología del circuito de casamiento constituido por tres transformadores de $\frac{\lambda}{4}$	45
Figura 9. Geometría inicial de la antena espiral de cuatro brazos	50
Figura 10. Impedancia inicial de la antena espiral de cuatro brazos.....	50
Figura 11. Circuito de alimentación del tipo Chebyshev	51
Figura 12. Optimización de la antena espiral de cuatro brazos.....	52
Figura 13. Diseño final de la antena espiral de cuatro brazos con el circuito de alimentación.....	53
Figura 14. Gráfica de la simulación de la función directividad para 300 MHz, 1 GHz y 2 GHz	54
Figura 15. Gráfica del resultado del módulo del parámetro S activo en función de la frecuencia	56
Figura 16. Gráfica resultante de la razón de onda estacionaria	57
Figura 17. Gráfica resultante de la impedancia característica de la antena.....	58
Figura 18. Diagramas de irradiación tri-dimensionales para las frecuencias de 300 MHz y 1 GHz.	59

Figura 19. Diagrama de irradiación tri-dimensional para la frecuencia de 2 GHz.... 60

RESUMEN

El presente proyecto de investigación está orientado al diseño y simulación de una antena independiente de frecuencia con un gran ancho de banda y de razón axial que permitirá brindar mayor cobertura a los equipos de monitoreo y radio localización que tienen disponibles el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica (AGRUCOMGE), en apoyo al cumplimiento de su misión en las operaciones militares de ámbito interno y externo. Este elemento irradiador cuenta con un sistema de alimentación que acopla la impedancia de entrada de la antena a una línea de transmisión con impedancia característica de 50Ω .

Esta antena fue diseñada con la ayuda de un software de alto rendimiento para realizar el diseño, modelación y simulación de estructuras en 3D para altas frecuencias denominado HFSS™, de la americana ANSYS®, que permite realizar un estudio electromagnético del desempeño de la geometría inicial de la antena espiral de cuatro brazos mediante el empleo del método de elementos finitos, mallas adaptativas, ecuaciones integrales o métodos híbridos avanzados capaces de resolver un sin fin de aplicaciones, dispone también de una interfaz gráfica de usuario intuitiva que proporciona un óptimo aprovechamiento de la herramienta, para luego realizar su optimización sustentada en cada una de las gráficas resultantes de los parámetros más importantes a ser considerados para un adecuado funcionamiento de la antena.

PALABRAS CLAVE:

- **ANTENA INDEPENDIENTE DE FRECUENCIA**
- **SISTEMA DE ALIMENTACIÓN**
- **ANTENA ESPIRAL DE CUATRO BRAZO**

ABSTRACT

The present research is focused on the design and simulation of a frequency independent antenna with a high bandwidth and axial ratio. It will allow to provide greater coverage to the monitoring and radiolocation equipment that is available at the “Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica” (AGRUCOMGE) in support of the fulfillment of its mission in the military operations of internal and external scope. This irradiating element has a feeding system that couples the input impedance of the antenna to a transmission line with impedance feature of 50Ω .

The antenna has been designed with the help of high-performance software to perform the analysis, modeling and 3D structures simulation for high frequencies called HFSS™ from the American ANSYS®. This software allows developing an Electromagnetic study about the performance of the Initial Geometry of the Four-Arm Spiral Antenna by using the finite element method, adaptive meshes, integral equations or advanced hybrid methods capable of solving endless applications. It also has an intuitive graphical user interface that provides an optimal use of the tool and then, it can carry out its optimization based on each one of the resulting graphs from the most important parameters to be consider for a proper antenna operation.

KEYWORDS:

- **FREQUENCY INDEPENDENT ANTENNA**
- **POWER SYSTEM**
- **FOUR-ARM SPIRAL ANTENNA**

CAPÍTULO I

Descripción Del Proyecto De Investigación

Planteamiento del Problema

Equipos de interceptación y radio localización con un adecuado arreglo de antenas empleados en operaciones militares ya sea en el ámbito interno o externo nos brinda una ventaja dentro del Teatro de Operaciones. El obtener información de Fuerzas adversarias genera un punto de inflexión muy importante en el resultado de las operaciones, en este contexto se realizan investigaciones donde se analiza la utilización de diferentes tipos de antenas que nos ayuden a obtener un mejor desempeño de estos dispositivos en forma integral, considerando que es una tecnología a nivel mundial, los desarrollos de investigaciones en aplicaciones militares orientadas a estos sistemas han sido en los últimos años un eje dentro de los cambios tecnológicos aplicados a la seguridad y defensa (Riola & Rodríguez, 2018).

Ejércitos de la región latinoamericana utilizan este tipo de equipos de interceptación para misiones de búsqueda de información de inteligencia militar. La necesidad de disponer de una única antena que trabaje en diferentes bandas y tenga un gran ancho de banda en especial para uso militar dan origen a las primeras topologías de las antenas independientes de frecuencia orientadas a los campos de comunicaciones, sistemas de radionavegación, sistemas de detección y seguimiento de objetivos (Oñate, 2020).

En el Ecuador sus Fuerzas Armadas a través del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica posee equipos de interceptación y radio localización sin un adecuado arreglo de antenas por lo que disminuye el porcentaje de efectividad de estos equipos dentro de una operación. En la actualidad se realizan

investigaciones para desarrollar arreglos de antenas que nos generen mayor cobertura dentro del Centro de Investigación de Aplicaciones Militares CICTE con resultados excelentes (Calderón M., 2020), pero su empleo dentro de las operaciones militares se encuentra aún en proceso.

Antecedentes

La idea de la antena espiral fue concebida alrededor de 1954 por Edwin Turner un ingeniero eléctrico de la Base Wright Patterson de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, quien decidió enrollar los brazos de una antena dipolo de una forma espiral de Arquímedes; al inicio tuvo algunas discusiones con algunas Instituciones Académicas que lo había desalentado pero no desistió de su idea llevando a cabo varios experimentos con resultados obteniendo una antena espiral independiente de la frecuencia polarizada circularmente (Robert G. Cortizone, 1990).

Los resultados de la antena de Edwin Turner proporcionaron un gran estímulo para realizar el análisis y comprensión matemática a Víctor Rumsey uno de los reconocidos expertos en teoría electromagnética y en profundizar en el tema de las "antenas independientes de la frecuencia", había determinado que se necesitaba una expresión matemática basada en algo diferente a un criterio de longitud (Robert G. Cortizone, 1990).

Desconocido por los investigadores estadounidenses, Chatterjie en Canadá había investigado un solo cable cónico, pero la innovación de Turner dio un sustento a la teoría de que las antenas independientes de la frecuencia eran realizables, y proporcionó el estímulo necesario para acelerar los esfuerzos de búsqueda en la comunidad analítica.

Los investigadores se dieron cuenta que la espiral de dos brazos podría estar excitada en dos modos distintos proporcionando así resultados de calidad, siempre y cuando el radio del inicio de la espiral fuera pequeño comparado con el de su longitud de onda (Robert G. Cortizone, 1990).

La realización de un balun de banda ancha se convirtió en uno de los problemas inmediatos, y una variedad de esquemas de balun de banda ancha se idearon a finales de la década de 1950 y principios de 1960.

John Dyson en la Universidad de Illinois fue uno de los primeros en empezar a explotar el balun infinito, en el que una línea de alimentación coaxial se une desde el extremo exterior de un brazo espiral a su centro, y la otra desde el centro del brazo espiral al centro de la antena, donde el conductor central de la línea coaxial estaba unido al otro brazo espiral (Robert G. Cortizone, 1990). Esto proporcionó la misma amplitud y relación de fase necesaria para la correcta alimentación de la espiral de dos brazos en el modo normal de operación, funcionando muy bien para cualquier ancho de banda que la espiral era capaz de soportar, que dependía de la relación de sus radios inicial y final; muchos otros baluns fueron desarrollados en el período después de que Turner dio a conocer por primera vez la espiral recibiendo así una patente en el año de 1955.

En los primeros trabajos se dedujo que eran posibles dos modos operativos distintos para la espiral de dos brazos, el primero denominado modo convencional o normal en el cual se excitaba al conducir brazos opuestos con igual amplitud, pero excitación de fase opuesta similar a la alimentación de un dipolo convencional y un segundo modo en el que los dos brazos estaban excitados con igual amplitud y en fase (Robert G. Cortizone, 1990).

También se descubrió que el problema básico que poseen estas antenas es que su línea de alimentación no estaba equilibrada para el segundo modo, debido a las corrientes en fase, se realizaron varios intentos para absorber la radiación de la línea de alimentación por varios métodos, pero la operación de banda ancha limpia nunca se la logró.

En 1960, Paul Shelton fue el que primero planteó la solución de usar una espiral con tres o más brazos indicando que el número de modos útiles en una espiral sería uno menos que el número de brazos en la espiral, usando este enfoque, tanto el modo convencional denominado Modo 1 o modo de suma y el otro modo denominado Modo 2 o modo de diferencia (Shelton, 1960).

Justificación e Importancia

La tecnología de búsqueda de dirección espiral de cuatro brazos ha sido sometida a desarrollo y refinamiento desde la propuesta original de Shelton, este tipo de sistema se ha utilizado ampliamente para la banda ancha, multioctave, aplicación de búsqueda de dirección (Shelton, 1960). Las aplicaciones han incluido satélite sistemas de rastreo y antenas de misiles para la localización en transmisores de radiofrecuencia.

En la actualidad en el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica existen equipos de monitoreo y radio localización que poseen un arreglo de antenas que limitan su alcance, sin embargo, se ha visualizado la importancia de disponer de un elemento irradiador impreso que incremente su desempeño para obtener resultados que nos ayuden a optimizar la capacidad de respuesta de las Fuerzas Armadas ante una amenaza o riesgo ya sea de ámbito interno o externo.

La importancia de esta propuesta radica en mejorar el desempeño de los equipos de monitoreo y radio localización que dispone el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica, mediante la mejora y desarrollo de un elemento irradiador impreso que incrementará el alcance de los equipos anteriormente mencionados.

Este proyecto presenta una propuesta innovadora y de costo relativamente nulo, mejorando las capacidades de alcance de los equipos de monitoreo y radio localización que posee el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica, permitiendo así el cumplimiento de sus misiones específicas.

Alcance del Proyecto

En el proyecto se pretende entregar al Centro de Investigación de Aplicaciones Militares CICTE el diseño y simulación de un elemento irradiador de gran ancho de banda empleado para los equipos de búsqueda y radio localización que dispone el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica.

Este proyecto se direcciona al diseño de un elemento irradiador impreso, para ser utilizado en las operaciones de búsqueda e interceptación que realiza el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica, la metodología que será utilizada es teórico / experimental.

Por lo que se va a diseñar una antena espiral de cuatro brazos, luego se realizará una optimización de su geometría inicial mediante el programa HFSS™ [ANSYS, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>]. Simulando su desempeño utilizando 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 (Oñate, 2020).

Las modificaciones realizadas a la geometría inicial de la antena espiral de cuatro brazos y al circuito de casamiento nos sirven para mejorar su desempeño sustentadas en las simulaciones realizadas en el programa empleado.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar y simular un Arreglo de Antenas de Monitoreo y DF para la banda de 80Mhz – 2Ghz en apoyo a las Operaciones Militares del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo se relacionan con el objetivo general y sirven para dar sustento a cada una de las etapas de su desarrollo.

- Desarrollar una investigación sobre las características principales de una antena, antenas independientes de frecuencia, antenas espirales de cuatro brazos, y circuitos de casamiento.
- Presentar topologías de diseño para un Arreglo de Antenas de Monitoreo y DF tipo impresa que nos ayuden a mejorar el ancho de banda de funcionamiento, diagrama de irradiación, peso y tamaño.
- Simular diferentes tipos de Arreglos que nos ayuden a seleccionar la topología más eficiente y todo con base al empleo del programa HFSS™.

- Evaluar parámetros de impedancia y diagramas de irradiación importantes en el casamiento de la antena y el circuito de alimentación, en los planos principales de la optimización realizada.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

En el presente capítulo se analiza la fundamentación teórica de los parámetros más importantes que se deben considerar al momento de diseñar una antena. Es indispensable considerar el desarrollo del estado del arte de cada uno de los parámetros para verificar el adecuado funcionamiento de la antena.

Parámetros fundamentales de una antena

Si se desea tener una descripción íntegra del rendimiento de una antena, se debe considerar la definición de varios parámetros que están relacionados entre sí, sin que todos estén especificados, a continuación, se proporcionarán definiciones de parámetros que nos ayuden a comprender el rendimiento de una antena.

Patrón de radiación

También denominado patrón de antena es "una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la región del campo lejano y se representa como una función de las coordenadas direccionales. Las propiedades de radiación incluyen densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad, fase o polarización " (Balanis C. A., 2005).

Por lo general, los patrones de campo se pueden normalizar en relación a su máximo valor, dando origen a patrones de campo y poder normalizados. Se debe considerar que el patrón de potencia a menudo se lo representa en una escala logarítmica o en decibelios (dB).

Intensidad de Radiación

La intensidad de radiación en una dirección dada se la define como la potencia radiada desde una antena por unidad de ángulo sólido, es un parámetro de campo lejano que se obtiene multiplicando la densidad de radiación por el cuadrado de la distancia (Balanis C. A., 2005), su expresión matemática es la siguiente:

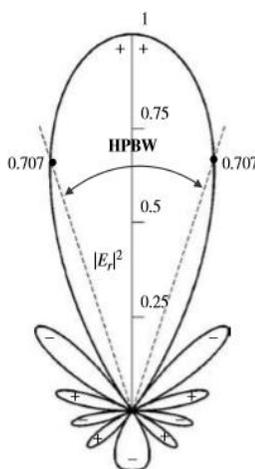
$$U = r^2 W_{rad} \quad (1)$$

Ancho del haz

Se define como la separación angular entre dos puntos idénticos en el lado opuesto del patrón máximo; existen varios anchos de haz en un patrón de antena, uno de los que más se emplea es el ancho de haz de media potencia (HPBW), “En un plano que contiene la dirección del máximo de un haz, el ángulo entre las dos direcciones en las cuales la intensidad de radiación es valor medio de la viga” (Balanis C. A., 2005), otro ancho de haz importante es la separación angular entre los primeros nulos del patrón, y se conoce como el primer ancho de haz nulo (FNBW).

Figura 1.

Patrón de campo en escala lineal



Nota. El gráfico muestra el ancho de haz de media potencia. Tomado de *Antenna Theory Analysis and Design* (p.42), por Constantine A. Balanis, 2005, Wiley Interscience.

Este es un parámetro importante de una antena que se utiliza como una compensación entre ella y el nivel del lóbulo lateral; es decir, a medida que decrecienta el ancho del haz, aumenta el lóbulo lateral y viceversa.

Directividad

La directividad de una antena se define como " La relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena y la intensidad de radiación promediada en todas las direcciones. La intensidad de radiación promedio es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π . Si no se especifica la dirección, se implica la dirección de la intensidad máxima de radiación" (Balanis C. A., 2005).

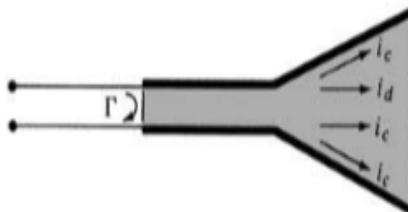
Si no se especifica la dirección, implica la dirección de la directividad máxima expresada como:

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2)$$

Cuando se dispone de antenas con componentes de polarización ortogonal, se define la directividad parcial de una antena para una polarización dada en una dirección dada como "esa parte de la intensidad de radiación correspondiente a una polarización dada dividida por la intensidad de radiación total promediada en todas las direcciones" (Balanis C. A., 2005).

Eficiencia de Antena

La eficiencia total de la antena se utiliza para tener en cuenta las pérdidas en los terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena, estas pérdidas pueden ser de acuerdo a la figura 2.

Figura 2.*Pérdidas de una antena*

Nota. El gráfico muestra las pérdidas en los terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena. Tomado de *Antenna Theory Analysis and Design* (p.65), por Constantine A. Balanis, 2005, Wiley Interscience.

Ganancia

Íntimamente relacionada con la directividad, es una medida que tiene en cuenta la eficiencia de la antena, así como sus capacidades direccionales, se debe recordar que la directividad es una medida que solo describe las propiedades direccionales de la antena mientras que la ganancia de una antena se define como "la relación de la intensidad, en una dirección dada, a la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena se irradiara isotrópicamente. La intensidad de radiación correspondiente a la potencia radiada isotrópicamente es igual a la potencia aceptada (entrada) por la antena dividida por 4π " (Balanis C. A., 2005).

En la realidad se considera la ganancia relativa, que se define como "la relación entre la ganancia de potencia en una dirección dada y la ganancia de potencia de una antena de referencia en su dirección de referencia" (Balanis C. A., 2005).

Se debe tomar en cuenta que la entrada de potencia debe ser la misma para ambas antenas y en la mayoría de los casos la antena de referencia es una fuente isotrópica sin

pérdidas, pero también son consideradas como antenas de referencia las antenas dipolo, bocina o cualquier otra antena cuya ganancia se la pueda calcular.

Ancho de Banda

El ancho de banda de una antena se define como "el rango de frecuencias dentro del cual el rendimiento de la antena, con respecto a alguna característica, se ajusta a un estándar especificado", el ancho de banda se puede considerar como el rango de frecuencias, a cada lado de una frecuencia central, donde las características de la antena están dentro de un valor aceptable de aquellos en de la frecuencia central (Balanis C. A., 2005).

En antenas de banda ancha, este parámetro se considera como la relación de las frecuencias superiores a inferiores de operación aceptable, mientras que para antenas de banda estrecha se expresa como un porcentaje de la diferencia de frecuencia (superior menos inferior) sobre la frecuencia central del ancho de banda.

Considerando que las características de una antena no varían de la misma manera, no existe un solo ancho de banda haciendo una distinción entre el patrón y las variaciones de impedancia de entrada.

En consecuencia, el ancho de banda del patrón y el ancho de banda de impedancia se utilizan para enfatizar esta distinción. El ancho de banda del patrón está asociado con la ganancia, el nivel del lóbulo lateral, el ancho del haz, la polarización y la dirección del haz, mientras que la impedancia de entrada y la eficiencia de la radiación están relacionadas con el ancho de banda de la impedancia (Balanis C. A., 2005).

Se puede aumentar el rango de frecuencia aceptable de una antena de banda estrecha si se realizan adecuados ajustes en las dimensiones críticas de la antena y/o en las redes de acoplamiento a medida que se cambia la frecuencia.

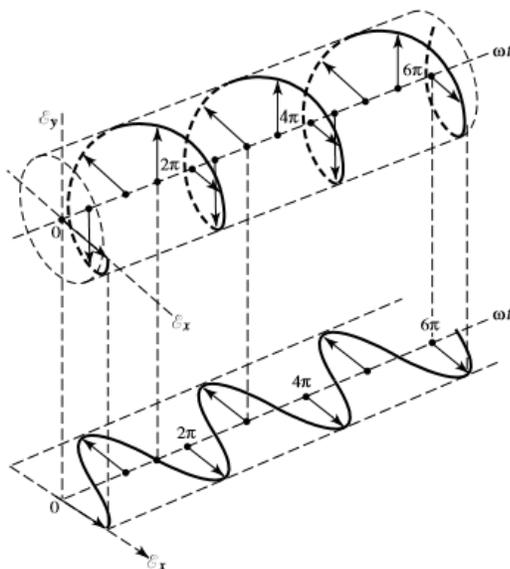
Polarización

La polarización de una antena en una dirección dada se define como “la polarización de la onda transmitida (radiada) por la antena. Nota: Cuando no se indica la dirección, se considera que la polarización es la polarización en la dirección de ganancia máxima”. En la práctica, la polarización de la energía radiada varía con la dirección desde el centro de la antena, de modo que diferentes partes del patrón puede tener diferentes polarizaciones (Balanis C. A., 2005).

La polarización de una onda radiada se define como “esa propiedad de una onda electromagnética que describe la dirección variable en el tiempo y la magnitud relativa del vector de campo eléctrico; Específicamente, la figura trazada en función del tiempo por la extremidad del vector en una ubicación fija en el espacio, y el sentido en el que se traza, como se observa a lo largo de la dirección de propagación”, es la curva trazada por el final punta de la flecha (vector) que representa el campo eléctrico instantáneo (Balanis C. A., 2005).

Figura 3.

Rotación de una onda electromagnética plana y su elipse de polarización



Nota. El gráfico describe la dirección variable en el tiempo y la magnitud relativa del vector de campo eléctrico. Tomado de *Antenna Theory Analysis and Design* (p.71), por Constantine A. Balanis, 2005, Wiley Interscience.

Se la puede definir en términos de una onda radiada o recibida por una antena en una dirección dada, en el campo lejano se la define como "la polarización de la onda plana (local) que se utiliza para representar la onda radiada en ese punto, en cualquier punto del campo lejano de una antena, la onda radiada puede ser representada por una onda plana cuya fuerza en el campo eléctrico es la misma que la de la onda y cuya dirección de propagación es en dirección radial desde la antena. A medida que la distancia radial se aproxima al infinito, el radio de curvatura del frente de fase de la onda radiada también se acerca al infinito y, por lo tanto, en cualquier dirección especificada, la onda aparece localmente como una onda plana " (Balanis C. A., 2005).

La polarización de una onda plana, incidente desde una dirección dada y que tiene una densidad de flujo de potencia dada, que da como resultado la máxima disponibilidad alimentación en los terminales de la antena y se la puede clasificar en lineal, circular o elíptica.

Impedancia de entrada

Definida como la impedancia presentada por una antena en sus terminales o la relación del voltaje a la corriente en un par de terminales o la relación de los componentes apropiados de los campos eléctricos a magnéticos en un punto, matemáticamente representada como:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (3)$$

Antenas independientes de frecuencia

Gracias a la llegada de los sistemas de banda ancha han exigido la elaboración de antenas simples, pequeñas, livianas y económicas, diseñadas para trabajar en toda la banda de frecuencia de un sistema dado, pero en la práctica no logran derivarse de un solo radiador y es importante considerar en el modelado a escala de antena que la impedancia, el patrón, la polarización, etc., son invariables a un cambio en el tamaño físico si también se realiza un cambio similar en la frecuencia de operación o la longitud de onda.

Considerando que luego de cierto punto, la corriente es insignificante, y la estructura más allá de ese punto hasta el infinito puede truncarse y eliminarse dando origen a una frecuencia de corte más baja por encima de la cual sus características de radiación son las mismas que las de la estructura infinita, el límite superior depende de las dimensiones de la línea de transmisión de alimentación dejan de parecer un "punto" (generalmente alrededor de $\lambda/8$ donde λ es la longitud de onda en la frecuencia más alta deseable).

Para tener características independientes de la frecuencia se considera la ecuación general de Rumsey siendo sus formas clásicas antenas con geometrías equiangulares de estructuras espirales planas y cónicas, además de las estructuras periódicas logarítmicamente.

Desde el principio se asume a una antena, cuya geometría se describe mejor por las coordenadas esféricas (r, θ, φ) , tiene ambas terminales infinitamente cercanas al origen y cada una está dispuesta simétricamente a lo largo de los ejes $\theta = 0, \pi$, se supone que la antena es perfectamente conductora rodeada por un medio infinito homogéneo e isotrópico, y su superficie o un borde en su superficie se describe mediante una curva:

$$r = F(\theta, \phi) \quad (4)$$

donde r representa la distancia a lo largo de la superficie o el borde, si la antena se va a escalar a una frecuencia K veces menor que la frecuencia original, la superficie física de la antena debe ser K veces mayor para mantener las mismas dimensiones eléctricas (Balanis C. A., 2005).

Considerando lo anterior, la nueva superficie sería:

$$r' = KF(\theta, \phi) \quad (5)$$

Las superficies no solo son similares sino son congruentes (si ambas superficies son infinitas), la congruencia solo se puede establecer mediante la rotación en ϕ se las considera idénticas. La traslación no está permitida porque los terminales de ambas superficies están en el origen. Se prohíbe la rotación en θ porque ambos terminales están dispuestos simétricamente a lo largo de los ejes $\theta = 0, \pi$ (Balanis C. A., 2005). Para que la segunda antena logre congruencia con la primera, debe girarla en un ángulo C para que:

$$KF(\theta, \phi) = F(\theta, \phi + C) \quad (6)$$

Se debe considerar que el ángulo de rotación C depende de K pero ninguno depende de θ o ϕ . La congruencia física implica que la antena original se comportaría eléctricamente de la misma manera en ambas frecuencias, pero el patrón de radiación se rotará azimutalmente a través de un ángulo C .

Para valores sin restricción de $K(0 \leq K \leq \infty)$, el patrón rotará C en ϕ con frecuencia, porque C depende de K pero su forma no se verá alterada, así la impedancia y el patrón serán independientes de la frecuencia (Balanis C. A., 2005).

Espirales Equiangulares

La espiral equiangular es una configuración geométrica cuya superficie puede describirse por ángulos, que cumple todos los requisitos para las formas que se pueden utilizar para diseñar antenas independientes de la frecuencia.

Como una curva a lo largo de su superficie se extiende hasta el infinito, es necesario designar la longitud del brazo para especificar una antena de tamaño finito, la frecuencia más baja de operación ocurre cuando la longitud total del brazo es comparable a la longitud de onda. Para todas las frecuencias por encima de esto, el patrón y las características de impedancia son independientes de la frecuencia (Balanis C. A., 2005).

Espiral de cuatro brazos

En el presente trabajo se va a diseñar este tipo de antena que consta de cuatro brazos rotados con un ángulo de noventa grados (90°) en forma de espiral, su geometría está definida por sus ángulos y el giro de cada uno de sus brazos, pero para que sean independientes de la frecuencia sus dimensiones deberían ser infinitas y además las dimensiones de los puntos de alimentación y su separación deberían ser infinitesimales, tiene una cavidad de respaldo llena absorbentes, una red aritmética que consiste en un circuito de formación de modo, una compensación de fase de circuito y un circuito de formación de haces para proporcionar salidas simultáneas de modo 1 y modo 2 (Robert G. Corzine, 1990).

A continuación, se describe el funcionamiento de los distintos subsistemas que comprende la espiral de cuatro brazos.

Subsistema Radiador. Una espiral de cuatro brazos, como cualquier matriz de cuatro elementos por fases, tiene cuatro excitaciones básicas alternativas conocidas como modos, la antena y el sistema de alimentación tienen componentes recíprocos lineales

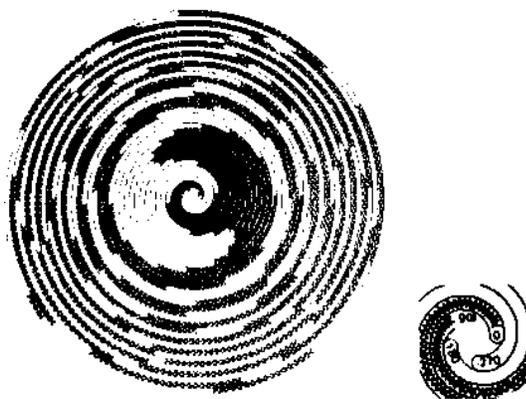
cuyas leyes de funcionamiento se mantendrán si se utiliza como un antena receptora o transmisora (Robert G. Cortizone, 1990).

La aplicación tradicional, por supuesto, es como un sistema pasivo de búsqueda de dirección para proporcionar señales de salida las cuales permitirán determinar la línea de visión (LOS) a las fuentes emisoras de radiofrecuencia.

En el diseño y análisis de este sistema espiral es importante considerar que cualquier fasor de voltaje seleccionado al azar contiene un cierto porcentaje de cada uno de los cuatro modos fundamentales, es decir, cualquier patrón de radiación que produce la espiral es la suma vectorial de un determinado porcentaje de cada uno de los patrones resultantes de los cuatro modos fundamentales de excitación, en la Figura 4 se muestra el Modo 1 de una antena espiral de cuatro brazos (Robert G. Corzine, 1990).

Figura 4.

Distribución de corriente instantánea de una Espiral de cuatro brazos Modo 1



Nota. El gráfico muestra la distribución de corriente instantánea de una antena espiral de cuatro brazos Modo 1. Tomado de *Four Arm Spiral Antennas* (p.12), por Robert G. Corzine, 1990, Artech House.

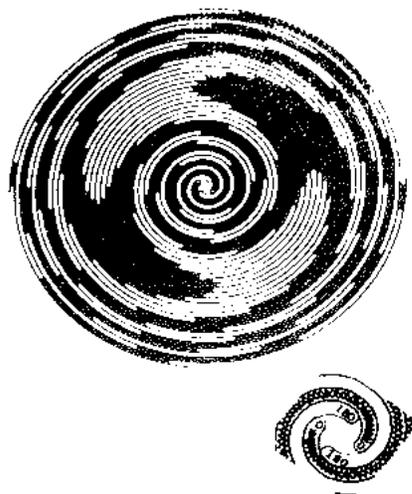
Las longitudes de las regiones sombreadas y no sombreadas representan la mitad de la longitud de onda en la frecuencia de operación, una excepción está en el centro mismo de la espiral, donde las longitudes han sido ajustadas o su fase revertida de tal manera que esta coincida con 0° , 90° , 180° y el voltaje del terminal de antena en 270° requerido para la excitación del modo 1 (Robert G. Cortizone, 1990).

Las áreas sombreadas tienen una corriente en el sentido de las agujas del reloj, mientras que los segmentos no sombreados tienen un flujo de corriente antihorario, considerando que todo girará a la frecuencia de Operación. El material dieléctrico con el que se imprime la espiral, así como el material absorbente de la cavidad que está muy cerca de la espiral, reduce la velocidad de propagación, los conductores adyacentes con flujos de corrientes en la misma dirección de radiación son lo que van a radiar, mientras que los conductores adyacentes o cercanos que fluyen en direcciones opuestas tenderán a cancelarse entre sí y no irradiarán (Robert G. Cortizone, 1990).

En la Figura 5 se muestra una distribución de corriente instantánea en el Modo 2 que similar al Modo 1 las líneas de segmentos de las regiones sombreadas y no sombreadas representan la mitad de la longitud de onda en la frecuencia de operación, en el área sombreada de los elementos de la espiral adyacente se regula de acuerdo al voltaje del terminal de antena requerido para la excitación del modo 2.

Figura 5.

Distribución de corriente instantánea de una Espiral de cuatro brazos Modo 2



Nota. El gráfico muestra la distribución de corriente instantánea de una antena espiral de cuatro brazos Modo 2. Tomado de *Four Arm Spiral Antennas* (p.14), por Robert G. Corzine, 1990, Artech House.

La región de radiación tiene una circunferencia de dos longitudes de onda (2λ), y por lo tanto el campo lejano tendrá una progresión de fase de 720° , se puede observar que a lo largo del eje espiral (perpendicular al plano del papel) se cancelan o el resultado de la suma es igual a cero; por lo su patrón tendrá una rotación simétrica rotacional, circularmente polarizada y para que los dos modos se encuentren en fase depende de la posición relativa de la rotación, esta condición existe en el ángulo de 134° desde eje X.

Las impedancias de entrada de los diversos modos espirales tienden a ser más bajas debido al bajo ancho del brazo utilizadas, espesor de cobre, efectos de proximidad del absorbedor, etc. Obteniendo valores con resultados positivos en el rango de 133Ω tanto para el Modo 1 como para el Modo 2 en la mayoría de los tipos de estructuras espirales de cuatro brazos.

CAPÍTULO III

Cálculos teóricos y Geometría inicial de la Antena Espiral de cuatro brazos

En este capítulo se describe el fundamento teórico matemático para realizar un diseño y geometría inicial adecuada de una antena espiral de cuatro brazos con el propósito de tener una idea general de su geometría inicial. Sus parámetros y características considerando que el rango de operación de los equipos de interceptación y radio localización en los cuales será utilizada va desde los 80 MHz hasta los 2 GHz.

Seguidamente, se realiza el diseño del Balun debido a que este tipo de antena tiene una estructura de equilibrio simétrica. Cuando se presenta el alimentador balanceado se realiza una breve explicación sobre el empleo del software que se utilizará para realizar la simulación de la antena espiral de cuatro brazos tomando en cuenta los cálculos matemáticos realizados anteriormente.

Cálculos Teóricos

Para el diseño de la antena es importante considerar los parámetros que se detallan en la Tabla 1. Siendo las bajas frecuencias, de su banda de operación, quienes limitan la dimensión de la estructura. Como región de alimentación se consideran las frecuencias altas y la línea de alimentación donde se acoplará la antena tiene una impedancia

característica de 50Ω asimétrica considerando que es una antena propiamente para recepción.

Tabla 1.

Parámetros de la Antena Espiral de Arquímedes.

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

Nota. Esta tabla muestra los parámetros de *la Antena Espiral de Arquímedes*. Tomado de Diseño, Análisis, Simulación y Construcción de una red de Antenas Impresas para la Banda de UHF, (Oñate, 2020).

Desde el inicio del presente trabajo se definió la banda de operación de la antena espiral de Arquímedes, como frecuencia mínima se designó el valor de 80 MHz y como frecuencia máxima de 2 GHz.

$$f_{min} = 80 \text{ MHz}$$

$$f_{max} = 2 \text{ GHz}$$

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, Modern antenna design, 2005).

Considerando que las frecuencias bajas son quienes limitan el tamaño de la estructura de la antena, se realiza el cálculo de la longitud de onda (λ_L) para 80 MHz.

$$\lambda_L = \frac{c}{f_{min}} \quad (7)$$

donde:

c es la velocidad de la luz ($3 * 10^8 \text{ m/s}$).

f_{min} es la frecuencia mínima de operación.

$$\lambda_L = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{80 * 10^6 \text{ Hz}}$$

$$\lambda_L = 3,75 \text{ m}$$

Luego de haber realizado el cálculo anterior la longitud del brazo de la espiral (L) sería:

$$L = 1,25 * \lambda_L \quad (8)$$

$$L = 4,6875 \text{ m}$$

Tomando en cuenta los principios de las antenas independientes de frecuencia es posible establecer las siguientes relaciones que nos faciliten el cálculo del radio inicial (r_0) de la antena espiral de Arquímedes.

$$r_0 = \frac{c}{2\pi f_{max}} \quad (9)$$

$$r_0 = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{2\pi * 2 * 10^9 \text{ Hz}} = 23,87 \text{ mm}$$

De la misma forma se puede calcular el radio exterior (r) de la antena espiral como se detalla a continuación:

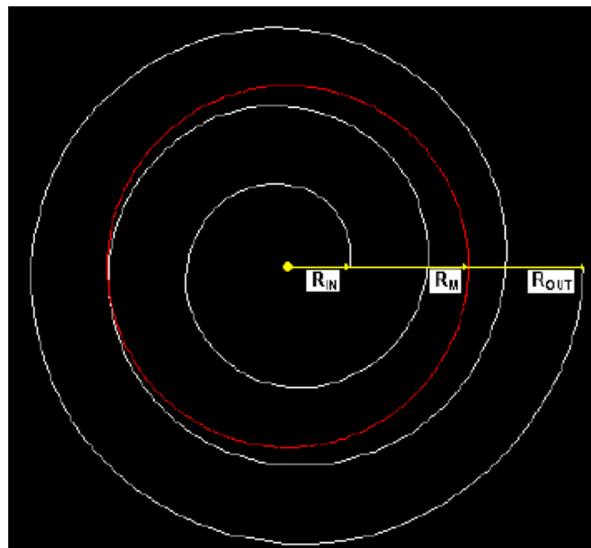
$$r = \frac{c}{2\pi f_{min}} \quad (10)$$

$$r = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{2\pi * 80 * 10^6 \text{ Hz}} = 596,83 \text{ mm}$$

Luego de calcular el radio inicial y el radio exterior de la antena se procede a usar el radio medio (r_m), para realizar una aproximación rápida de la longitud de la espira con el empleo de una semisuma de sus radios (Roca R. , 2009), representadas en la gráfica siguiente:

Figura 6.

Radio medio y Anillo medio



Nota. El gráfico representa la relación existente entre el radio inicial, medio y exterior de la antena espiral. Tomado de *Diseño de antena espiral de Arquímedes*, (Roca R. , 2009).

$$r_m = \frac{r_0 + r}{2} \quad (11)$$

$$r_m = \frac{23,87 \text{ mm} + 596,83 \text{ mm}}{2} = 310,35 \text{ mm}$$

Luego de calcular el radio medio se puede obtener la longitud del anillo y este valor multiplicado por el número total de vueltas (N), también se puede llegar a una ecuación donde se encuentre la longitud del brazo de la espira (Garcia, 2006).

$$N = \frac{L}{(2\pi) r_m} \quad (12)$$

$$N = \frac{4,6875 \text{ m}}{(2\pi) 310,35 \text{ mm}} = 2,40 \text{ vueltas}$$

Al obtener $N = 2,4$ es un buen resultado considerando que las espirales deben tener como mínimo vuelta y media antes de presentar formas razonables de sus patrones de radiación (Milligan, *Modern antenna design*, 2005).

Al ser auto complementaria los parámetros: ancho de la cinta de cada brazo (w) y separación entre las vueltas de la espiral (s) coinciden numéricamente, considerando que dependen del radio interior, del radio exterior y del número de vueltas, el ancho de cada brazo puede ser encontrado a través de la siguiente ecuación (Caswell E. , 2001):

$$w = s = \frac{r - r_0}{8N} \quad (13)$$

$$w = s = \frac{596,83 \text{ mm} - 23,87 \text{ mm}}{8 * 2,40} = 29,84 \text{ mm}$$

A continuación, vamos a construir una tabla con los parámetros calculados con su respectiva unidad de medida.

Tabla 2.

Parámetros calculados de la Antena Espiral de cuatro brazos

Parámetros	Abreviatura	Valor calculado
Longitud de Brazo	L	4,6875m
Radio Inicial	r_o	23,87 mm
Radio Exterior	r	596,83 mm
Número de vueltas	N	2,40 vueltas
Calle Conductora	w	29,84 mm
Separación	s	29,84 mm

Nota. Esta tabla muestra los parámetros calculados de *la Antena Espiral de cuatro brazos*. Tomado de Diseño, Análisis, Simulación y Construcción de una red de Antenas Impresas para la Banda de UHF, (Oñate, 2020).

Stub-Balun

Cuando se realiza la simulación de una antena con ciertas características y geometría, rara vez se logra obtener una misma impedancia en la línea de transmisión y la impedancia característica de la antena. Es por eso que para obtener máxima transferencia de potencia ($ROE = 1$) es necesaria la construcción de una pequeña

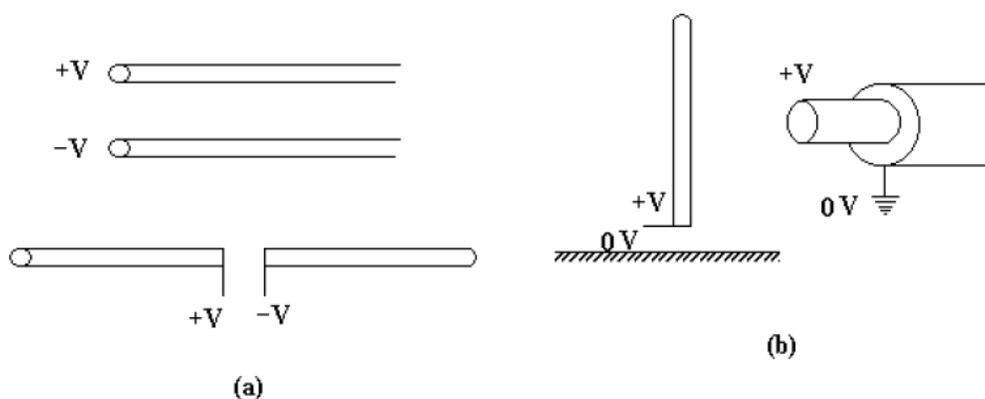
sección llamada stub, conectados a una distancia conveniente de la antena. Con auxilio de la carta de Smith el stub, terminado en circuito abierto (C.A.) o bien circuito cerrado (C.C.), puede ser diseñado para acoplar las cargas y lograr máxima transferencia de potencia (Morbidel L. , 2017).

Es importante considerar que para el acoplamiento de bajas frecuencias se pueden emplear elementos reactivos como inductancias o capacitancias y para frecuencias más elevadas se necesitan redes de acoplamiento más complejas como por ejemplo las de tipo L, tipo L invertida, tipo pi, entre otras (Oñate, 2020).

Un dispositivo empleado en el diseño de antenas son los conocidos baluns que facilita adaptar sistemas balanceados, que es un sistema de alimentación simétricos respecto al plano equipotencial de potencial nulo, a sistemas no balanceados cuyos terminales son asimétricos respecto a un plano equipotencial nulo. 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 J. , 2008).

Figura 7.

Sistemas Balanceados y Sistemas Desbalanceados



Nota. El gráfico muestra el ejemplo de un Sistema Balanceado (a) y el ejemplo de un Sistemas Desbalanceado (b). Tomado de Handbook of Antennas for EMC (Macnamara T. , 2018).

El efecto de unir directamente una antena a una línea de transmisión produce que en el conductor externo del cable coaxial, conectado a un brazo de la antena, se induzca corrientes en la superficie exterior del cable coaxial originando una radiación innecesaria en la superficie del mismo y cambiando drásticamente la distribución de energía radiada junto con los parámetros de impedancia y resistencia de radiación (Cardama, 1998).

En la solución de este trabajo se examina el diseño de dos circuitos de alimentación para poder adaptar la antena espiral de los cuales se selecciona el que posea un mayor desempeño en el proceso de adaptación. El primero es un Transformador constituido de tres transformadores de $\lambda/4$ en cascada y el siguiente es un casador Chebyshev de orden 3 y ondulación máxima (T_m) igual a 0,05.

Transformador constituido de tres transformadores de $\lambda/4$ en cascada

En este modelo se va a utilizar un balun con una transición de microcinta para cinta coplanar (CPS), consiste en una línea de alimentación que posee tres transformadores en cascada de $\lambda/4$ para poder adaptar un valor de 50Ω a 100Ω que finaliza en un stub de $\lambda/4$, utilizando un sistema/a de adaptación de impedancias de un cuarto de onda (Oñate, 2020).

$$Z_0 = \sqrt{Z_i * Z_L} \quad (14)$$

donde:

Z_0 es la impedancia característica de la línea.

Z_i es la impedancia de entrada de la línea.

Z_L es la impedancia final de la línea.

Primer Transformador

$$R_L = 60 \Omega$$

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

Segundo Transformador

$$R_L = 75 \Omega$$

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

Tercer Transformador

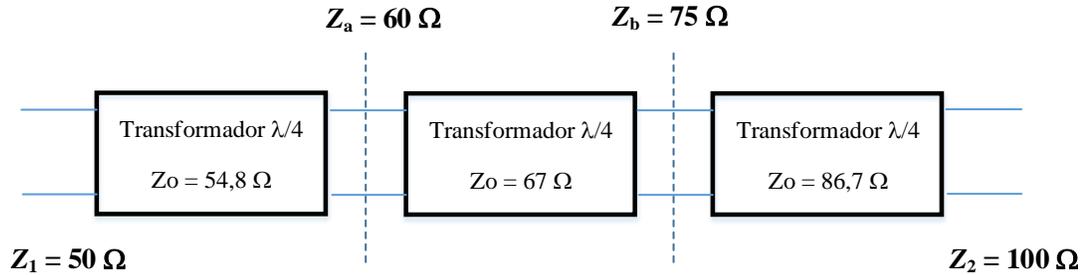
$$R_L = 100 \Omega$$

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

Dando como resultado la topología del circuito de casamiento que se muestra en la figura 8.

Figura 8.

Topología circuito de casamiento constituido por tres transformadores de $\lambda/4$



Nota. El gráfico muestra la topología del circuito de casamiento formado por tres transformadores de $\lambda/4$. Tomado de Diseño, Análisis, Simulación y Construcción de una red de Antenas Impresas para la Banda de UHF, (Oñate, 2020).

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

Para el siguiente circuito se emplea el software Tline para obtener los siguientes resultados.

Para N=3

$$\Gamma_{\theta} = 2e^{-j3\theta}(\Gamma_0 \cos 3\theta + \Gamma_1 \cos(3-2)\theta) \quad (15)$$

$$\Gamma_{\theta} = Ae^{-j3\theta}T_3(\sec \theta_m \cos \theta) \quad (16)$$

donde:

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

$$\sec(\theta_m) = \cosh\left(\frac{1}{3} \cosh^{-1}\left(\frac{\ln(Z_0/Z_{in})}{2\Gamma_m}\right)\right) \quad (17)$$

$$\sec(\theta_m) = \cosh\left(\frac{1}{3} \cosh^{-1}\left(\frac{\ln(100/50)}{2 * (0,05)}\right)\right)$$

$$\sec(\theta_m) = \cosh\left(\frac{1}{3} (2,62397)\right)$$

$$\sec(\theta_m) = 1,4075$$

$$\theta_m = \sec^{-1}(1,4075)$$

$$\theta_m = 44,7273$$

Se obtiene:

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

Luego de expandir la función e igualar sus coeficientes se obtiene:

$$A\{\sec^3 \theta_m (\cos 3\theta + 3 \cos \theta) - 3A \sec \theta_m \cos \theta\} = 2(\Gamma_0 \cos 3\theta + \Gamma_1 \cos \theta) \quad (18)$$

$\cos(3\theta)$:

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

$$\Gamma_0 = \frac{(0,05)\sec^3(44,7273)}{2}$$

$$\Gamma_0 = 0,0697$$

$\cos(\theta)$:

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

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

$$\Gamma_1 = 0,1036$$

Considerando que:

$$\Gamma_0 = \Gamma_3$$

$$\Gamma_1 = \Gamma_2$$

Se obtienen los siguientes resultados:

$$\Gamma_2 = 0,1036$$

$$\Gamma_3 = 0,0697$$

Para $n = 1$

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

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

$$z_1 = e^{4,0514}$$

$$z_1 = 57,48 \Omega$$

Para $n = 2$

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

$$\ln z_1 = \ln(57,48) + 2(0,1036)$$

$$z_1 = e^{4,2586}$$

$$z_1 = 70,7125 \Omega$$

Para $n = 3$

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

$$\ln z_3 = \ln(70,7125) + 2(0,1036)$$

$$z_3 = e^{4,4658}$$

$$z_3 = 86,9926 \Omega$$

Software HFSS

High Frequency Structure Simulator (**HFSS**) es un software de alto rendimiento para realizar el diseño, modelación y simulación de estructuras en 3D para altas frecuencias que permite el estudio electromagnético mediante el método de elementos finitos, mallas adaptativas, ecuaciones integrales o métodos híbridos avanzados que nos permitirán resolver un sin fin de aplicaciones, también dispone de una interfaz gráfica de usuario intuitiva que proporciona un óptimo aprovechamiento de la herramienta.

Para realizar la simulación de la antena espiral de cuatro brazos se emplea este software que frecuentemente es utilizado en la industria de Diseño y Simulación de dispositivos electrónicos de alta frecuencia, alta velocidad, campos electromagnéticos de onda completa en 3D, etc. (Oñate, 2020).

CAPÍTULO IV

Simulación y Optimización de la Antena

Simulación de la antena

Es importante aclarar que para realizar la simulación se consideró las características del sustrato que se encuentra disponible en el laboratorio de telecomunicaciones del Centro de Investigación de Aplicaciones Militares CICTE de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3.

Características del sustrato

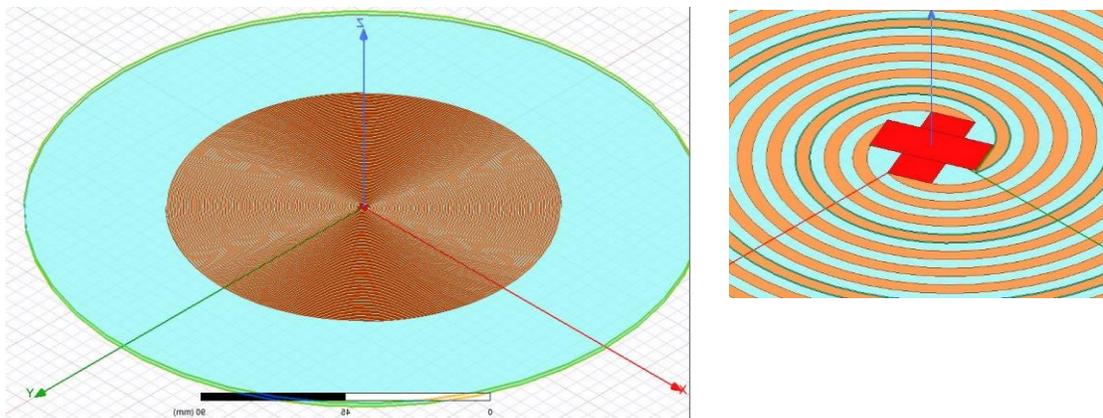
Características Substrato	Simbología	Valor
Permitividad Eléctrica	ϵ_r	4,23
Tangente de perdidas	$\tan\delta$	0,06
Espesura del Substrato	h	1,4 mm
Espesura del cobre	τ	0,366mm

Nota. Esta tabla muestra las características del sustrato utilizado para la simulación. Tomado de Diseño, Análisis, Simulación y Construcción de una red de Antenas Impresas para la Banda de UHF, (Oñate, 2020).

Luego de considerar las características del sustrato se procede a realizar la simulación inicial de nuestra antena espiral de cuatro brazos.

Figura 9.

Geometría inicial de la antena espiral de 4 brazos



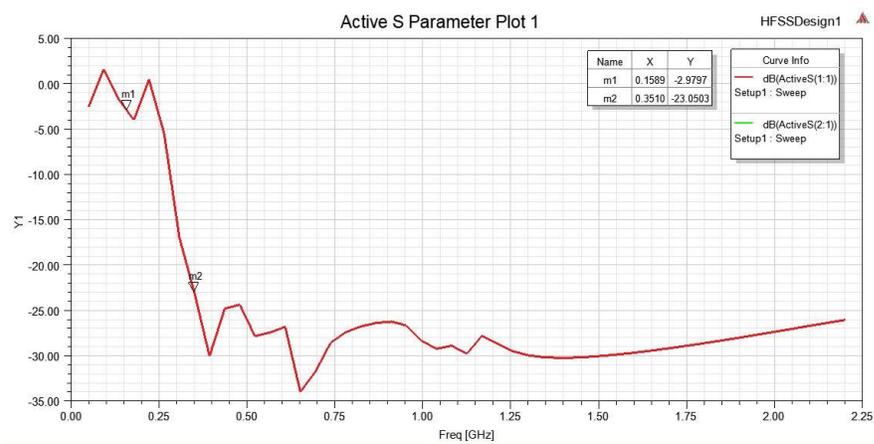
(a)

(b)

Nota. El gráfico muestra la geometría inicial de la antena espiral de cuatro brazos. Tomado de Antena Espiral de cuatro brazos, (Pérez, 2020).

Figura 10.

Impedancia inicial de la antena espiral de cuatro brazos



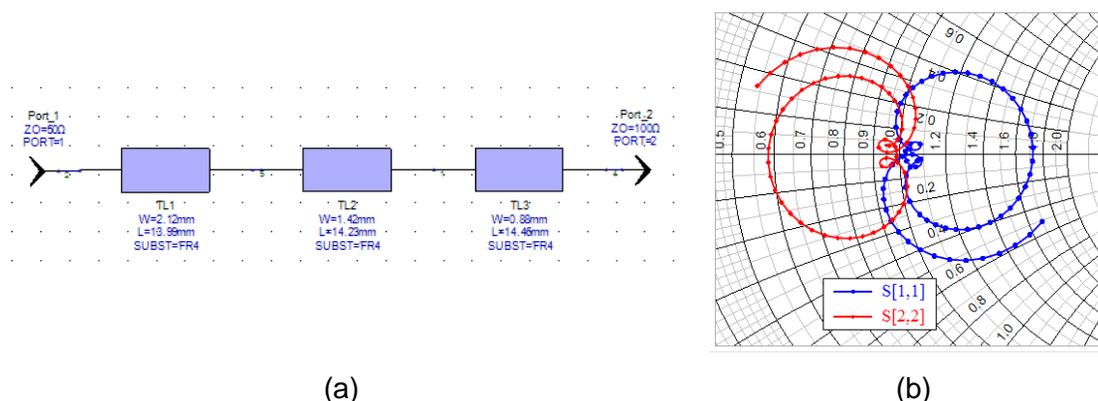
En la figura 10 se observa que el ancho de banda se encuentra por debajo de -25db siendo un resultado adecuado para un óptimo funcionamiento de la antena.

Simulación del circuito de alimentación

El circuito de alimentación que logro un mejor desempeño fue el Casador Chebyshev de orden 3 y ondulación máxima (T_m) igual a 0,05 conformado por un stub con 3 secciones y el plano de tierra por el lado posterior.

Figura 11.

Circuito de alimentación del tipo Chebyshev



Nota. El gráfico muestra el circuito de alimentación de la antena espiral de cuatro brazos. Tomado de Antena Espiral de cuatro brazos, (Pérez, 2020).

En la carta de Smith se puede observar que las impedancias se encuentran cercanas a una ROE=1, con lo que se concluye que la mayor cantidad de potencia que llega al circuito de alimentación va hacer irradiada.

Optimización de la antena

Luego de realizar la simulación de la antena en el software se procede a presentar el diseño final de la antena espiral de cuatro brazos con sus medidas.

Tabla 4.

Parámetros de optimización de la Antena Espiral de cuatro brazos

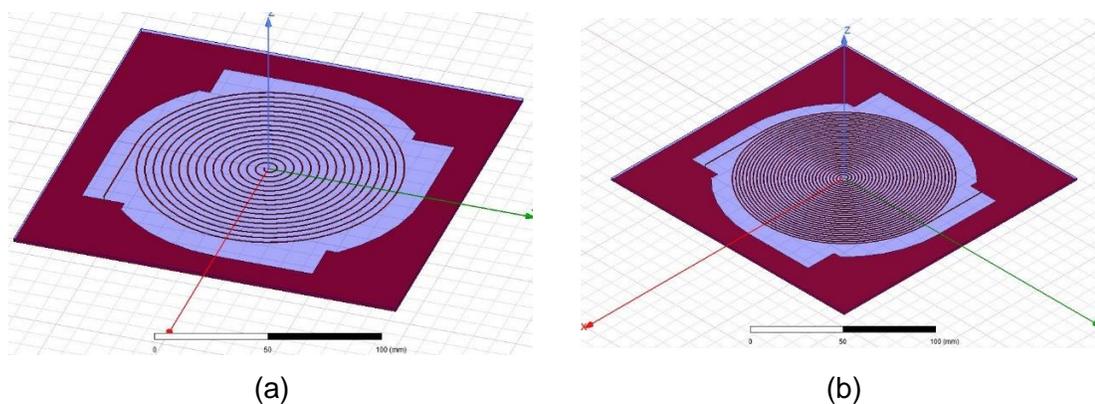
Parámetro	Medida
Radio Inicial	1,75 mm
Número de Vueltas	16
Espesura de los brazos	0,50 mm
Radio exterior	127,79 mm

Nota. Esta tabla muestra los parámetros calculados de *la Antena Espiral de cuatro brazos*. Tomado de Diseño, Análisis, Simulación y Construcción de una red de Antenas Impresas para la Banda de UHF, (Oñate, 2020).

En la figura 11 se puede observar la geometría de la antena que será optimizada utilizando las medidas que se muestran en la tabla 4.

Figura 12.

Optimización de la antena espiral de cuatro brazo



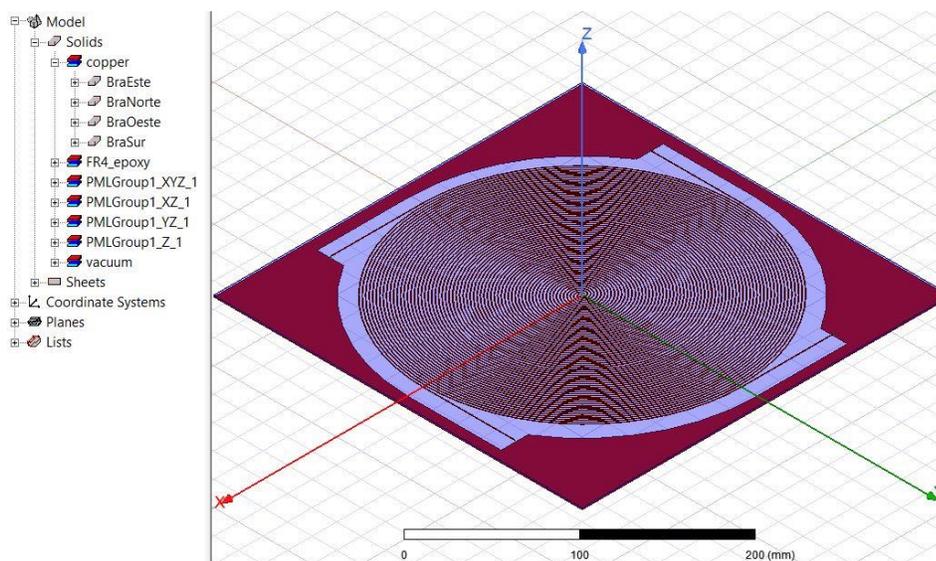
Nota. El gráfico muestra la optimización de la antena espiral de cuatro brazos. Tomado de Antena Espiral de cuatro brazos, (Pérez, 2020).

Diseño final de la Antena Espiral de cuatro brazos con el circuito de alimentación

En la figura 13 se muestra el diseño final de la antena espiral de cuatro brazos con su circuito de alimentación funcionando como un único elemento.

Figura 13.

Diseño final de la antena espiral de cuatro brazos con el circuito de alimentación



Nota. El gráfico muestra el diseño final de la antena espiral de cuatro brazos con el circuito de alimentación. Tomado de Antena Espiral de cuatro brazos, (Pérez, 2020).

CAPÍTULO V

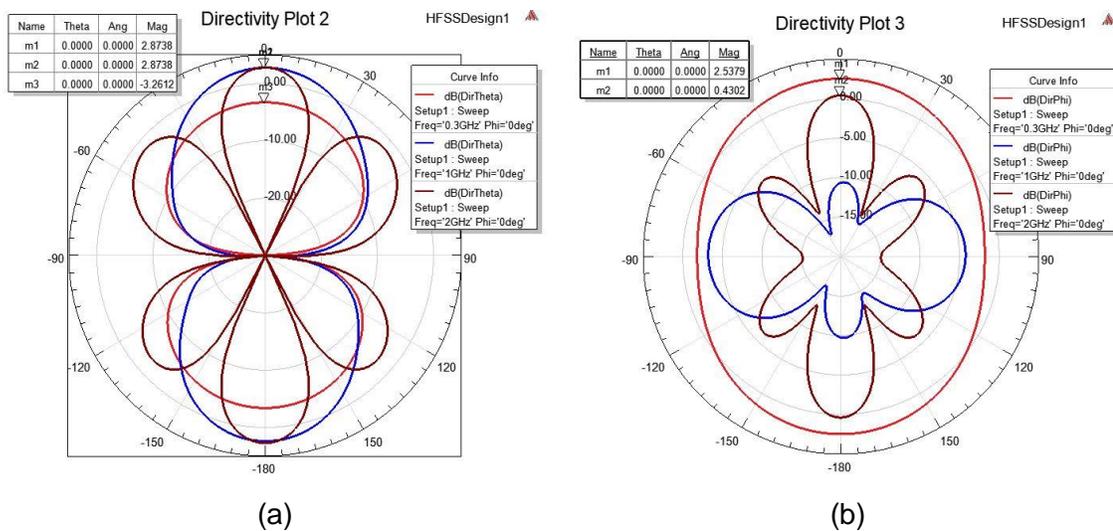
Análisis de Resultados

Función Directividad

A continuación, se muestran en la Figura 14 los resultados de las componentes Theta ($D_{\theta}(\theta, \phi)$) y Phi ($D_{\phi}(\theta, \phi)$) de la Función directividad en el plano H, para las frecuencias de 300 MHz, 1 GHz y 2 GHz.

Figura 14.

Gráfica de la simulación de la función directividad para 300 MHz, 1 GHz y 2 GHz.



Nota. El gráfico muestra la gráfica de las componentes de la función directividad $D_\theta(\theta, \phi)$ y $D_\phi(\theta, \phi)$, en el plano H, para la frecuencia de 300 MHz, 1 GHz y 2 GHz en el plano H.

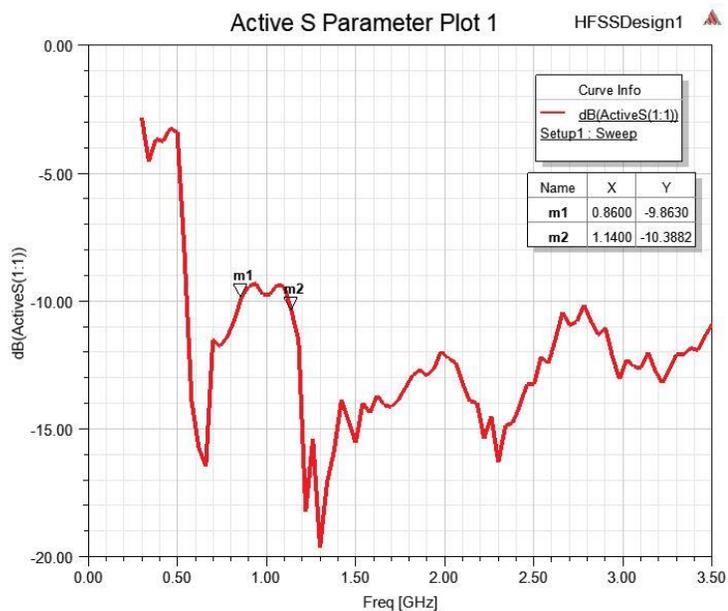
A partir de los gráficos de la Figura 14 se observa, como esperado, que la directividad de la antena está orientada sobre la dirección $\theta = 0$ y $\phi = 0$ (o 90°). El desbalance de las componentes $D_\theta(\theta, \phi)$ y $D_\phi(\theta, \phi)$ implica que la razón axial de la antena está comprometida. De la misma forma el surgimiento de lóbulos secundarios elevados es una indicación que la solución todavía no ha llegado a la convergencia necesaria. Este problema se puede minimizar ejecutando las simulaciones en una Workstation con mejores características de memoria RAM, por las propias características del método de las diferencias finita implementado por el HFSS.

Coefficiente de Reflexión

En la figura 15 se muestra el valor absoluto del coeficiente S activo. Valores inferiores de -10 dB implica que el casamiento de impedancia permita transferir máxima potencia a la carga, minimizando la potencia reflejada en dirección del generador.

Figura 15.

Gráfica del resultado del módulo del parámetro S activo en función de la frecuencia



Nota. El gráfico muestra el ancho de banda del irradiador simulado.

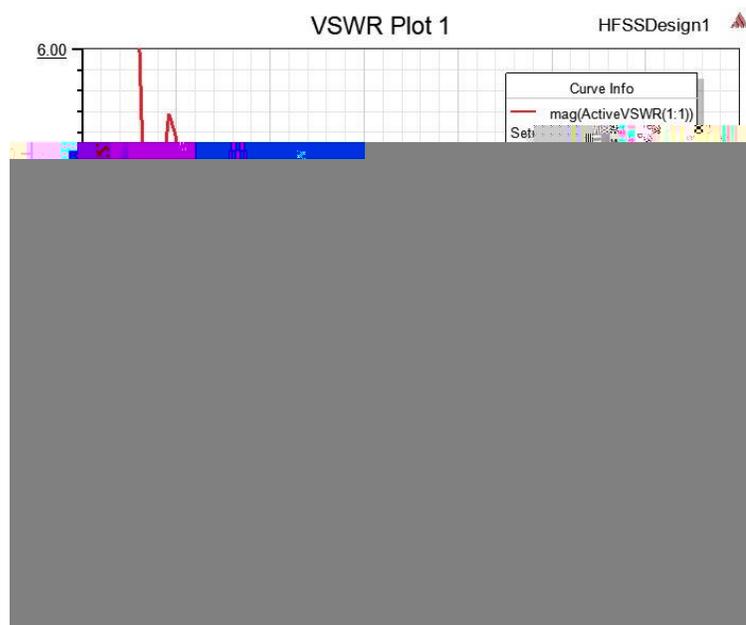
A partir de los resultados de la Figura 15 se puede inferir que el ancho de banda de la antena de impedancia, excluyendo la banda de 860 MHz a 1,14 GHz, va de 600 MHz a 3,5 GHz. Por la experiencia acumulada con el simulador HFSS se puede afirmar que al refinar la convergencia de la simulación el ancho de banda cubrirá toda la banda de por lo menos de 600 MHz a 3,5 GHz

Razón de Onda Estacionaria (ROE)

En la figura 16 se muestra la razón de onda estacionaria de voltaje o VSWR. Para sistemas de transmisión VSWR menores que 2 es tolerado, en cuanto que para antenas de recepción valores tan altos como 3 son comúnmente aceptados.

Figura 16.

Gráfica resultante de la razón de onda estacionaria



Nota. El gráfico muestra el gráfico resultante para la relación de onda estacionaria de voltaje – VSWR.

Considerando el valor más restrictivo de VSWR se puede observar que el ancho de banda de la antena va de 550 MHz a 3,5 GHz.

Impedancia característica de la antena

En la figura 17 se observa la parte real e imaginaria de la impedancia de entrada del elemento irradiador. Como se sabe la parte real de la impedancia de entrada está en torno de 200Ω en cuanto la parte imaginaria presenta comportamiento capacitivo y entorno de 50Ω .

Figura 17.

Gráfica resultante de la impedancia característica de la antena



Nota. El gráfico muestra la gráfica resultante de la parte real e imaginaria de la impedancia de entrada del irradiador en función de la frecuencia.

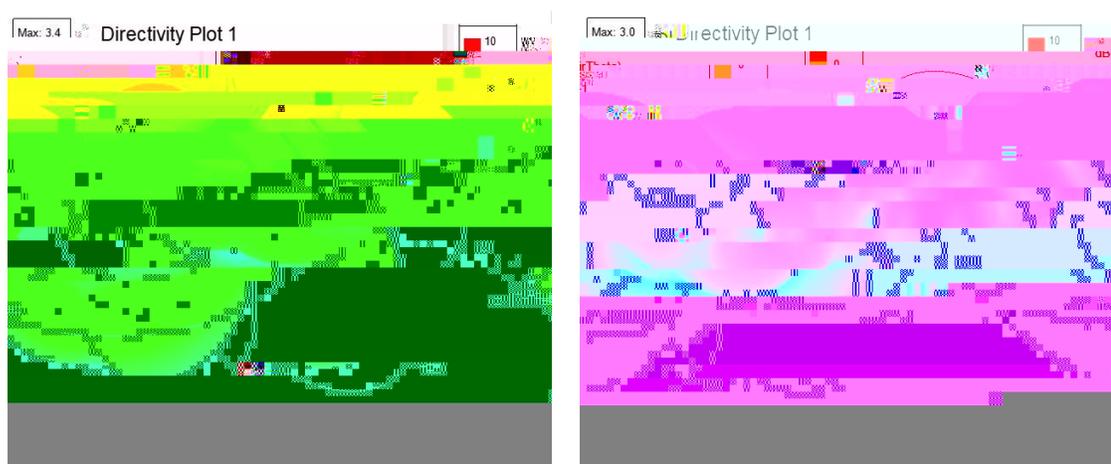
El comportamiento observado de la impedancia de entrada del elemento irradiador demuestra la necesidad de la implementación del casador de impedancia para adaptar la impedancia de entrada de la antena al conector SMA de 50Ω .

Diagrama de irradiación

El comportamiento de los diagramas de irradiación, en función de la frecuencia, es un parámetro importante para determinar como el elemento irradiador transfiere su energía en todas las direcciones de su entorno. A pesar que la Figuras 18 y 19 muestra el comportamiento de la función directividad ese comportamiento es directamente proporcional a los diagramas de irradiación, la información adicionada a estos gráficos es solamente los niveles de la directividad.

Figura 18.

Diagramas de irradiación tri-dimensionales para las frecuencias de 300 MHz y 1 GHz.



(a)

(b)

Nota. El gráfico muestra la representación 3D de los diagramas de irradiación para las frecuencias de 300 MHz, en (a), y 1 GHz.

Figura 19.

Diagrama de irradiación tri-dimensional para la frecuencia de 2 GHz



Nota. El gráfico muestra la representación 3D de los diagramas de irradiación para las frecuencias de 3 GHz.

Con base en los gráficos de las Figuras 18 y 19 se puede inferir que los diagramas de irradiación presentan irradiaciones en los dos hemisferios, de $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ y de $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, debido a que la antena analizada no se le adicionó un plano de tierra en el segundo. Adicionalmente, en la figura 19 se puede comprobar la falta de convergencia en la simulación.

CAPÍTULO VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

En teoría el ancho de banda de una antena independiente de frecuencia es infinito pero en la práctica poseen limitaciones relacionadas al radio inicial y exterior de la espiral en concordancia a su frecuencia mínima y máxima de operación.

Luego de realizar las simulaciones se obtuvo una antena con buenas características de irradiación en la mayoría de su ancho de banda. A pesar que claramente se observa que la solución todavía no convergencia a su solución final es una buena estimativa de las características que se pretende obtener.

Se diseñó, simuló y optimizó una Antenas de Monitoreo y DF para la banda de 500 MHz – 3,5 GHz en apoyo a las Operaciones Militares del Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica mediante una Antena Espiral de cuatro brazos.

Los resultados obtenidos demuestran la tendencia de las características de desempeño de la antena diseñada, a pesar que también se puede verificar que la solución del problema todavía no llegó a su convergencia. Está convergencia es factible de ser satisfecha si se dispondría de un computador con más recursos computacionales en especial de la memoria RAM. Esto es una exigencia inherente del método de los elementos finitos que es implementado en el software HFSS.

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.

Se recomienda implementar el diseño de la Antena Espiral de cuatro brazos para los equipos Monitoreo y DF para la banda de 80Mhz – 2Ghz que posee el Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica.

Es recomendable mejorar la convergencia de las simulaciones cuando se disponga de una Workstation con mayor capacidad de memoria. Se recomienda una configuración de dos procesadores octa-core, una configuración de por lo menos 2 TB de memoria RAM y un espacio libre en disco duro de por lo menos 1 TB.

BIBLIOGRAFÍA

Addlink Software Científico. (2018, Febrero 26). Retrieved from <https://www.addlink.es/noticias/comsol/2737-diseno-de-antenas-de-ranura-en-espiral-mediante-simulacion-electromagnetica>

Alvera, R. R. (2009). *Repositorio Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*.

Anguera, J. (2008). *Teoría de Antenas*. Creative Commons Deed.

Ansoft. (2005). *Anlage Research Group*. Retrieved from <http://anlage.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf>

Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory: Analysis Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken.

Calderón M., M. D. (2020). Sistema de despegue, navegación y aterrizaje autónomo basado en GPS y visión para micro-UAV en apoyo a operaciones militares, *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*.

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.

- Garcia, Á. F. (2006). *Movimiento de la cinta de una casete*. Retrieved from <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cinematica/casete/casete.htm>
- 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). *Repositorio Digital Institucional del Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro*. Retrieved from <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/633/1/1Morbidel.pdf>
- Oñate, A. (2020). *Repositorio ESPE*. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/21762/1/T-ESPE-043452.pdf>
- Paz, O. y. (2016). *Dieño de un balun de microcinta a línea de cinta coplanar para la banda de televisión digital*. *Telématica*.
- Puente, M. (2014). *DEesarrollo de una antena espiral de doble banda trabajando en el rango de las sub-milimétricas*. Pamplona.
- Riola, J. M., & Rodríguez, M. (2018). *Tecnologías del Siglo XXI TECHNOLOGIES OF THE XXI CENTURY* (Vol. 4).
- Robert G. Cortizone, J. A. (1990). *Four Arm Spiral Antenna*. Norwood: Artech House.

Roca, R. (2009). *Repositorio Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*.

Rumsey, V. (n.d.). *"Frequency Independent Antennas (Vols. IRE Int. Conv. Rec, vol. 5)*.

Shelton, J. (1960). *Four Arm Spiral Direction Finding System*. Alexandria.

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*.