

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

Tema: “Optimización de antenas para sistemas de captación de energía electromagnética”

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de
Magister en Telecomunicaciones

Modalidad de Titulación : Proyecto de Desarrollo

Autor: Ingeniero Félix Saúl Reinoso Soria

Director: Ingeniero Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD

Ambato-Ecuador

2021

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Magíster, e integrado por los señores Ingeniero Mario Geovanny Garcia Carrillo Magíster e Ingeniero Julio Enrique Cuji Rodriguez Magíster, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Optimización de antenas para sistemas de captación de energía electromagnética”, elaborado y presentado por el señor Ingeniero Félix Saúl Reinoso Soria, para optar por el Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa

Ing. Mario Geovanny Garcia Carrillo, Mg.

Miembro del Tribunal de Defensa

Ing. Julio Enrique Cuji Rodriguez, Mg.

Miembro del Tribunal de Defensa

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “Optimización de antenas para sistemas de captación de energía electromagnética”, le corresponde exclusivamente al: Ingeniero Félix Saúl Reinoso Soria Autor, bajo la Dirección del Ingeniero Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD, director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Félix Saúl Reinoso Soria

AUTOR

Ing. Carlos Diego Gordon Gallegos, PhD.

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Félix Saúl Reinoso Soria

c.c. 1803666500

ÍNDICE GENERAL

Contenido

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
AGRADECIMIENTO	xi
DEDICATORIA	xii
RESUMEN EJECUTIVO	xiii
EXECUTIVE SUMMARY	xiv
1. Capítulo I	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. General:	6
1.3.2. Especificos:	6
2. Capítulo II	7
2.1. Recolección de energía (Energy Harvesting)	7
2.2. Antenas	8
2.2.1. Tipos y diseños de Antenas.	9
2.2.2. Parámetros Fundamentales de las Antenas	14
2.2.3. Antenas Independientes de la Frecuencia.	19
3. Capítulo III	31
3.1. Ubicación	31
3.2. Equipos y Materiales	31
3.2.1. Software de Simulación CST Microwave Studio	31
3.2.2. Placa en FR4	32
3.2.3. Analizador de antenas minúsculo MiniVNA-TINY.	33
3.2.4. Conectores SMA	34
3.3. Tipo de Investigación	35
4. Capítulo IV	36
4.1. Resultados.	36
4.1.1. Antena Espiral de Arquímedes.	36

4.1.2.	Balun de Alimentación o Acoplamiento para Antena espiral de Arquímedes.	42
4.1.3.	Antena Log-Periódica	49
4.2.	Análisis de Resultados	58
4.2.1.	Análisis de Resultados Antena Espiral de Arquímedes	58
4.2.2.	Análisis de resultados Antena Log-Periódica.	60
4.2.3.	Comparación Antena con trabajo Similar	61
4.2.4.	Recolección de energía Electromagnética con las Antenas Fabricadas	65
5.	Capítulo V	70
5.1.	Conclusiones	70
5.2.	Recomendaciones	71
6.	Bibliografía	72
7.	Anexos	75
7.1.	Cálculo Permitividad efectiva ε_{eff} :	75
7.2.	Configuración MATLAB calculo de parámetros para diseño de BALUN	75
7.3.	Configuración MATLAB para calculo longitud de la linea de alimentación primer dipolo Antena Log-Periódica:	78
7.4.	Proceso de Fabricación de Antenas	79

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
4.1. RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE PARÁMETROS ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES	38
4.2. VARIACIÓN PARÁMETROS PARA OPTIMIZACIÓN DISEÑO ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES	40
4.3. RESULTADOS PARÁMETROS OPTIMIZADOS PARA ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES	41
4.4. RESUMEN PARÁMETROS PARA DISEÑO DE BALUN	43
4.5. VARIACIÓN PARÁMETROS PARA OPTIMIZACIÓN DISEÑO DEL BALUN	44
4.6. PARÁMETROS OPTIMIZADOS PARA DISEÑO DEL BALUN	45
4.7. RESULTADOS CÁLCULOS PARA DISEÑO ANTENA LOG-PERIÓDICA	54
4.8. RESUMEN RESULTADO MEDICIÓN ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES	58
4.9. RESUMEN RESULTADOS MEDICIÓN ANTENA LOG-PERIÓDICA	60
4.10. COMPARACIÓN RESULTADOS RECOLECCIÓN ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA	65
4.11. RESULTADO RECOLECCIÓN ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES.	67
4.12. RESULTADO RECOLECCIÓN ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA ANTENA LOG-PERIÓDICA	68

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
2.1. Antena como dispositivo de transición [3]	9
2.2. Formas representativas de elementos de parche microstrip [3]	10
2.3. Antena Microstrip convencional [27]	11
2.4. Líneas de Campo Eléctrico y Magnético [27]	11
2.5. Alimentación por coaxial [3]	12
2.6. Alimentación por línea Microstrip [3]	12
2.7. Alimentación por acoplamiento de Apertura [3]	13
2.8. Alimentación por acoplamiento de Proximidad [3]	13
2.9. Eficiencia y ancho de banda frente a la altura del sustrato a una frecuencia de resonancia constante para un parche rectangular de microstrip para dos sustratos diferentes [3].	17
2.10. Red de microondas arbitraria de N puertos [27]	18
2.11. Antenas Espirales a) Espiral de Arquímedes de 2 brazos b) Sinusoide de 4 brazos c) Log-Periódica de 4 brazos [5]	23
2.12. Espiral de Arquímedes (a) Circular (b) Cuadrada [21]	24
2.13. Geometría de la antena espiral de Arquímedes [7].	25
2.14. (a) Sección de adaptación de la línea de transmisión cónica. (b) Modelo para un cambio de paso de incrementos en la impedancia de la línea ahusada [27].	26
2.15. (a) Variación de impedancia. (b) Respuesta de magnitud del coeficiente de reflexión resultante [27]	28
2.16. Agrupación Log-Periódica de Dipolos [2]	29
2.17. Arreglo de dipolos [3]	29
2.18. Contornos calculados de directividad constante frente a σ y τ para matrices de dipolos Log-Periódicas [3].	30
2.19. Alimentación de una agrupación Log-Periódica [2]	30
3.1. Logo Software CST Microwave Studio.	32
3.2. Placa Virgen FR4	33
3.3. Analizador de Antenas MiniVNA	34
3.4. Conector SMA hembra	34
4.1. Parámetros a considerar para la fabricación de la antena espiral de Arquímedes [12].	36

4.2. Diseño Antena Espiral de Arquímedes de acuerdo a cálculos realizados	39
4.3. Parámetro S11 Antena Espiral de Arquímedes calculada.	39
4.4. Parámetro VSWR, Antena Espiral de Arquímedes calculada	39
4.5. Diseño espiral de Arquímedes definitivo	41
4.6. Parámetro S11, simulación diseño optimizado Antena Espiral de Arquímedes	41
4.7. Parámetro VSWR, simulación diseño Optimizado Antena Espiral de Arquímedes	42
4.8. Resultado cálculo de parámetros en Matlab para diseño del Balun a utilizar para adaptar Antena Espiral de Arquímedes a 50Ω	43
4.9. Diseño Balun se muestra ambos lados del sustrato (a) Cara superior (b) cara inferior	44
4.10. Resultado simulación Balun optimizado	45
4.11. Acoplamiento Antena espiral de Arquímedes con Balun .	45
4.12. Resultados simulación Parámetro S11 Antena Espiral de Arquímedes con Balun de acoplamiento para una impedancia de 50Ω	46
4.13. Resultado simulación VSWR Antena Espiral de Arquímedes con Balun de acoplamiento para una impedancia de 50Ω	46
4.14. Antena Espiral de Arquímedes fabricada con Balun de acoplamiento	47
4.15. Conexión de la Antena fabricada al analizador MiniVNA-TINY	47
4.16. Resultado medición Parámetro S11 Antena Espiral de Arquímedes, que arroja el analizador de antenas MiniVNA-TINY	48
4.17. Comparativo Resultados Simulación vs. Medición Práctica de la Antena espiral de Arquímedes con Balun de acoplamiento	48
4.18. Resultado calculo ancho de linea de transmisión y primer dipolo	50
4.19. Simulación para encontrar la longitud del primer dipolo de la Antena Log-Periódica	51
4.20. Resultado Simulación Variando la Longitud del Dipolo .	51

4.21. Parámetros para calculo de diseño antena Log-Periódica [23]	53
4.22. Diseño antena Log-Periódica en software CST Microwave Studio	54
4.23. Resultado simulación, parámetros S11 Antena Log-Periódica	55
4.24. Resultado simulación, VSWR Antena Log-Periódica	55
4.25. Antena Log-Periódica fabricada	56
4.26. Conexión Antena Log-Periódica al equipo MiniVNA-TINY para pruebas	56
4.27. Resultados del analizador MiniVNA-TINY, Parámetro S11 Antena Log-Periódica fabricada	57
4.28. Comparativo Resultados Simulación vs. Medición Práctica Antena Log-Periódica	57
4.29. Antenas Espiral de Arquímedes a comparar	62
4.30. Comparativo Resultado medición práctica Parámetro S11 Criollo-Reinoso.	62
4.31. Conexiones para la medición de la recolección de Energía Electromagnética antenas a comparar.	64
4.32. Gráfico comparativo resultados de Recolección Energía Electromagnética entre Antenas Criollo-Reinoso	65
4.33. Circuitos de recolección de Energía Electromagnética de 1, 2 y 4 etapas desarrollado por Ing. Dario Balarezo [4]	66
4.34. Medición de la Recolección de energía electromagnética con la Antena Espiral de Arquímedes conectadas al circuito elaborado por [4] en diferentes etapas	67
4.35. Medición de la Recolección de energía electromagnética con la Antena Log-Periódica conectadas al circuito elaborado por [4] en diferentes etapas.	68
7.1. Configuración en Matlab para el cálculo de la Permitividad efectiva.	75
7.2. Configuración Matlab para cálculo de Parámetros para diseño del Balun.	78
7.3. Configuración Matlab para calculo longitud primer dipolo Antena Log-Periódica	79
7.4. Diseño de Antenas en Autocad y PDF para fabricación	80

AGRADECIMIENTO

Al Padre creador de todas las cosas, a el sea toda la Gloria.

DEDICATORIA

A mi familia, mi esposa, mis hijas que es por quien se realiza este esfuerzo, que sepan que todo esfuerzo vale la pena cuando el fin es el bien común y la felicidad de la familia. Las amo.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**“Optimización de antenas para sistemas de captación de energía
electromagnética”**

AUTOR: Ing. Félix Saúl Reinoso Soria

DIRECTOR: Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD

LINEA DE INVESTIGACIÓN:

- Comunicaciones Digitales

FECHA: 13 de Agosto del 2021

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo muestra el diseño y fabricación de dos antenas independientes de la frecuencia, compactas, en tecnología microstrip, de bajo coste y que funcionan dentro de un rango de frecuencias muy amplio para aplicaciones de recolección de energía electromagnética, las cuales fueron optimizadas con la ayuda del software CST Microwave Studio y fabricadas sobre FR4, las frecuencias de funcionamiento se establecen principalmente dentro del rango del espectro donde se han concesionado las diferentes operadoras celulares para tecnología 2G, 3G, 4G LTE en el Ecuador, e inclusive WIFI que es actualmente la banda de mayor uso, con anchos de bandas muy amplios, lo que permite la recolección efectiva de energía electromagnética para frecuencias de mayor presencia y más utilizadas en el territorio ecuatoriano.

Descriptores: Antenas, Electromagnética, Cosecha de energía, Microstrip, Multibanda.

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERIA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES

THEME:

**“Optimization of antennas for electromagnetic energy capture
systems”**

AUTHOR: Ing. Félix Saúl Reinoso Soria

DIRECTED BY: Ing. Carlos Diego Gordón Gallegos, PhD

LINE OF RESEARCH:

- Digital Communication

DATE: August 13h, 2021

EXECUTIVE SUMMARY

The present work shows the design and manufacture of two frequency independent antennas, compact, in microstrip technology, low cost and operating within a very wide frequency range for electromagnetic energy harvesting applications, which were optimized with the help of the CST software and manufactured on FR4, the operating frequencies are established mainly within the range of the spectrum where the different cellular operators have been concessioned for 2G, 3G, 4G LTE technology in Ecuador, and even WIFI, which is currently the most widely used band, with very wide bandwidths, which allows the effective collection of electromagnetic energy for frequencies of greater presence and more used in the Ecuadorian territory.

Keywords: Antenna, Electromagnetics, Energy Harvesting, Microstrip, Multi-band.

1. Capítulo I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En la actualidad existen varios estudios científicos que indican la gran importancia que es obtener energía alternativa y sustentable para alimentar los diferentes dispositivos electrónicos, con la finalidad, de que estos adquieran autonomía; además que la energía utilizada sea lo más amigable con el ambiente y que no genere mayor impacto en contaminación ambiental, que por otro lado se encargue inclusive de mantener una conexión estable y sin interrupciones en los sistemas de comunicación y otros sistemas como es el caso de las IoT por ejemplo. Una de las más populares y cuyo estudio va en auge es la denominada “Energy Harvesting”, que consiste en el proceso mediante el cual se extrae energía presente en el entorno para producir energía eléctrica que posteriormente será almacenada o utilizada por dispositivos de bajo consumo [28]. Dependiendo de la fuente, el sistema de “recolección” es distinto, en el presente proyecto se ha utilizado la Recolección de Energía Electromagnética generada por sistemas de Radio Frecuencia (RF), que consiste principalmente en recoger la energía que emiten las diferentes antenas instaladas a lo largo de una zona geográfica sean estas de comunicaciones móviles o de estaciones de radio, televisión, DTV, Microondas, etc. y convertir estas Radio Frecuencias (RF) en voltaje para ser aprovechado por distintos dispositivos de bajo consumo. Los sistemas de recolección de Energía Electromagnética se desarrollan en etapas, la primera etapa es la Antena, que es la encargada de captar la energía electromagnética del ambiente, la segunda etapa es el sistema de recolección que convierte la energía capturada en voltaje para almacenarlo y que posteriormente podrá ser utilizado por un dispositivo electrónico. Los sistemas más conocidos en relación a la “cosecha” de energía electromagnética son los denominadas “Rectenas”, toman ese nombre de la combinación de Antena + Rectificador, se encuentran varios trabajos relacionados a este tema como en [26] que se desarrolla con una antena monopolo y su rectificador para la captación de energía a través de señales WIFI obtiene una eficiencia del 56 % que la compara con un diseño del fabricante que llega al 63 % resultado por debajo de lo esperado cuyo estudio a pesar de los resultados sirve como base para establecer el mejor software para realizar las simulaciones. También se tiene en esta gama de trabajos de investigación concerniente a las Rectenas el diseño de un arreglo de antena parche a 2.4 GHz acoplado a un rectificador para la cosecha de energía electromagnética que con ayuda de softwares de simulación especializados obtiene un valor de hasta 4.8 Vdc [6]. Además se puede identificar el avance de la investi-

gación en el Ecuador en [19] donde se ha elaborado una rectena para captación de energía electromagnética con el fin de ser utilizada para la recarga de dispositivos móviles y que en los resultados manifiesta que logró cargar un equipo móvil en 1 hora y 24 minutos, la captación lo realiza con un tipo de arreglo de antenas parche circular a diferentes frecuencias que se conecta a un multiplicador de tensión Villard de 2 etapas, finalmente para mencionar otro trabajo en el que se desarrollan este tipo de sistemas para la recolección de energía electromagnética básicos podemos citar el desarrollado en [20], que a pesar de no obtener buenos resultados en la implementación, sirve de referencia sobre el avance de la investigación en este campo con diferentes modelos y diseños correspondiente a la etapa de captación de la energía a través de las antenas, así como de los sistema de recolección. En el trabajo de investigación realizado por [9] muestra a detalle varios artículos de investigación publicados a lo largo de los años, comparándolos y estableciendo conclusiones en base a los parámetros más significativos que permite tener una visión global del avance de la investigación en el ámbito de la recolección de energía electromagnética, en donde se observa que la frecuencia de operación de las redes WIFI (2.40 GHz – 2.45 GHz) es la frecuencia con la que mayormente se trabaja, por ser la de mayor presencia en el espectro y la fuente es la más cercana posible. Las Rectenas de banda ancha que trabajan en las bandas GSM, 3G e ISM también han logrado resultados notables, lo que indica que existe un creciente interés en el campo de la recolección de energía electromagnética.

Para la etapa propiamente dicha de la antena se ha revisado varios artículos de interés con respecto a los diseños y fabricación de las Antenas considerando aquellas que trabajan en multifrecuencias. Un aporte importante se encuentra en [14] en donde se diseña una antena tipo parche que funciona a las frecuencias de 2.4 GHz y 4.9 GHz cuyos resultados sugieren que pueden ser utilizados para recolección de energía de RF es de gran ayuda para de esta manera ir definiendo las técnicas que se utilizarán en el diseño y fabricación de las antenas para el trabajo de investigación propuesto, por otro lado en [30] se diseña una antena multibanda en tecnología Microstrip, que cubre frecuencias de banda desde 900 MHz hasta 6 GHz para aplicaciones de recolección de energía electromagnética, se basa en un estudio previo de las principales frecuencias características que se tiene en el espectro dentro de las ciudades y se enfoca en el diseño de una antena elíptica impresa que opera a dichas frecuencias, exhibe buenas características de radiación y reflexión a 900 MHz (GSM), 2.4 GHz (Bluetooth / WLAN), 3.2 GHz (Radiolocalización, 3G), 3.8 GHz (para LTE, 4G) y banda adicional de 5 GHz (nuevas señales de WIFI) y su dimensión general es muy pequeña (41 mm (ancho) \times 4 mm (largo) \times 1,778 mm (espesor)). Un estudio muy parecido a [30] es el desarrollado en el 2019 por [29] donde realiza el diseño de una antena parche,

con algunas variantes, que permite resonar a la antena en varias frecuencias de interés como son 0.924 GHz, 1.88 GHz, 2.112 GHz, 3.4 GHz, y 3.844 GHz, se considera una antena multibanda que consiste en un parche rectangular con ranuras simétricas pentagonales al interior del parche y permiten a la antena operar a las frecuencias descritas anteriormente, con un ancho de banda mínimo de 50 MHz y un patrón de radiación direccional, en cuanto a los resultados se consideran satisfactorios para la pérdida de retorno, el ancho de banda, el patrón de radiación y la ganancia se han logrado de manera que sea adecuado para el sistema de comunicación móvil y la recolección de energía RF. La antena multibanda propuesta está diseñada y analizada utilizando CST Microwave Studio 2016.

Un estudio completo de Antenas utilizadas para la aplicación de Energy Harvesting en RF para entornos urbanos y semiurbanos se presenta en [25] en donde primeramente se enfoca en un estudio espectral de toda la ciudad tomando como puntos de referencias las estaciones del metro de Londres, con ello determina las bandas de frecuencias a las cuales va a diseñar las antenas y los dispositivos de captación de energía. Por otro lado, el trabajo de investigación llevado a cabo por [16] realiza un diseño interesante de arreglos de antenas y establece las principales ventajas de utilizar el tipo de antenas espirales planas, debido a ello y las referencias encontradas en la diferente bibliografía se consideró las denominadas antenas independientes de la frecuencia para el diseño de las antenas en el presente trabajo, pueden cubrir un gran ancho de banda y además que pueden ser fabricadas con técnicas Microstrip, este tipo de antenas se presentan de varias formas y sus diseños son muy variados [2]. Llamó mucho la atención y es muy común para la recolección de energía electromagnética el uso de Antenas Espiral de Arquímedes, con relación a lo cual, el trabajo realizado por [22] es un trabajo de diplomado en donde realiza el diseño de una antena espiral de Arquímedes para que funcione a una frecuencia central de 2.4 GHz, establece parámetros de funcionamiento óptimo analizando principalmente los factores determinantes como es el valor del ROE o VSWR y el parámetro S11 con los que determina el funcionamiento de la Antena la cual llega a optimizar por medio de simulaciones en software especializado como lo es el CST Microwave Studio. Siguiendo con este tema en el artículo [5] según lo indica el mismo autor se profundiza en el procedimiento de diseño de espiral de Arquímedes impresa. Se analizan los resultados teniendo en cuenta el criterio de mantener un valor de ROE (razón de onda estacionaria) o VSWR inferior a 3 en la banda de interés, los mismos se obtienen mediante la simulación y la optimización utilizando el software CST Microwave Studio, el diseño lo hace para una banda de frecuencias desde 600 MHz hasta 3200 MHz con la misma antena. Un trabajo más reciente como lo es el de [18] muestra el diseño de una antena espiral de Arquímedes que trabaja en el rango de frecuencias desde 1.2

GHz hasta 5 GHz, la cual es un amplio rango de frecuencias que se encuentra asociadas a varios sistemas de comunicaciones, los resultados obtenidos permite determinar que la antena trabaja de forma eficiente dentro de la banda de diseño. Por otro lado resulta interesante lo realizado por [18] que presenta un trabajo en donde aborda el diseño e implementación de un rectificador diferencial de banda ancha (DR) combinado con una antena dipolo espiral de Arquímedes (ASDA) para la recolección de energía inalámbrica a bajas densidades de energía incidentes por debajo de $200\mu W/cm^2$, el diseño propuesto exhibe una eficiencia mejorada de conversión RF-DC en un amplio rango de frecuencia de 1.2 a 5 GHz. Esta banda de frecuencia está asociada con varios servicios de comunicación inalámbrica, por ejemplo, aplicaciones ISM, WLAN, 5G, LTE y GPS. El ASDA plano receptor exhibe polarización circular y tiene una ganancia promedio medida de 4.5 dBi de 1.2 GHz a 5 GHz. es preferible implementar un circuito de recolección de energía de banda ancha, que podría funcionar de manera eficiente y recoger la potencia de diferentes bandas de frecuencia disponibles, además toca el tema del acoplamiento de la antena al circuito, que presenta en muchos de los casos un gran problema y propone el diseño de un balun con excelente resultado demostrado en la simulación de los parámetros de reflexión S11 y S12.

Otro de los tipos de Antenas Independientes de la frecuencia que llama mucho la atención, son las denominadas Log-Periódicas, sobre este tema se tiene el desarrollado por [23] que permite de una manera fácil identificar el proceso de fabricación de diferentes tipos y modelos de Antenas dentro de esta clasificación, que con la ayuda de un software especializado optimiza los diseños hasta ir obteniendo aquellos que son acordes dentro de su planificación, para luego ponerlos en práctica demostrando obtener diseños compactos y con buenos resultados con respecto al ancho de banda de cada antena elaborada. Para un mejor diseño de las Antenas Log-Periódicas la base fundamental se encuentra en artículos como [13] considerado el pionero en su época sobre el estudio de este tipo de antenas y establece las bases fundamentales para el desarrollo de la investigación en este ramo, que al igual que en [10] y en [11] dan las bases para el diseño de las antenas Log-Periódicas y con lo cual se establecen los principales parámetros a considerar al momento del diseño de este tipo de antenas.

Se han considerado trabajos con diseños y variantes de materiales para la fabricación de las antenas, como el estudio realizado por [24] que proporciona dos prototipos destinados a cosecha de energía electromagnética en 2 y 5 bandas, se presenta como una solución universal para la captación de energía RF, puede escalar a un gran número de bandas de frecuencia sin necesidad de antenas o puertos de antena adicionales. Este sistema es útil como una solución universal para las implementaciones de recolección de energía de RF, especialmente si

se escala a un gran número de bandas de frecuencia. Con una solución de recolección tan universal, la elección de la antena se convierte en responsabilidad exclusiva del desarrollador de la aplicación, no desarrolla, ni diseña la antena ya que hace uso de antenas previamente creadas. Se debe analizar el estudio realizado en [17] donde se diseña una antena sobre metamaterial (Los metamateriales son materiales compuestos diseñados artificialmente que consisten en inclusiones metálicas o dieléctricas de longitud de onda inferior, que pueden exhibir propiedades electromagnéticas interesantes e inusuales, como la permitividad negativa y la permeabilidad negativa), para captar energía electromagnética en el rango de frecuencias de GSM y WIFI, el recolector de metamateriales propuesto se fabrica sobre sustrato de Teflón, Se compone de cuatro SRR (*Split-Ring Resonator*) anidados y conectados en la parte superior de un Teflón, los SRR han demostrado tener mayor eficiencia y una mejora significativa en el ancho de banda para la recolección de energía electromagnética; se muestra que la estructura propuesta puede usarse con el propósito de recolectar energía electromagnética de cinco y seis bandas simplemente agregando un SRR adicional a la celda unitaria. La cosechadora de metamateriales propuesta se puede usar para alimentar dispositivos que requieren poca energía para funcionar, como pequeños sensores utilizados en diferentes tipos de monitoreo.

El presente trabajo muestra el diseño y fabricación con sus respectivas pruebas de simulación y funcionamiento práctico de dos antenas independientes de la frecuencia y multifrecuencias para aplicaciones de energy harvesting enfocadas en la energía de RF y que puedan ser utilizadas para mantener activos equipos de bajo consumo como los utilizados en IoT. Las antenas diseñadas, Antena Espiral de Arquimides con su respectivo Balun y una Antena Log-Periódica de arreglos de dipolos funcionan dentro de las bandas de mayor uso en el territorio ecuatoriano como son las asignadas a las operadoras de celulares para tecnología 2G, 3G y 4G LTE, así también en la frecuencia de operación del WIFI y brinda un aporte para el estudio de antenas multifrecuencia y de captación de energía electromagnética en el Ecuador.

1.2. Justificación

En el desarrollo de las Telecomunicaciones es de mucha importancia la autonomía de los aparatos electrónicos, más aún con el desarrollo del Internet de las cosas (IoT), por ello la capacidad de que tengan su propia fuente de energía hace posible esta característica y en este sentido el diseño de una antena que recepte energía de varias fuentes electromagnéticas y frecuencias que se encuentren en el ambiente se puede considerar un estudio de alto impacto, que facilitaría el desarrollo de

aparatos autónomos y además ayudará al estudio de las denominadas energy harvesting en el país, por otro lado aporta con una alternativa de energía “limpia” disminuyendo el consumo de fuentes de energía fosiles.

Con el auge del Internet de las cosas (IoT), que en cierta manera se considera el futuro de las Telecomunicaciones y es hacia donde se ha enfocado una buena cantidad de investigaciones en la actualidad, dando una alternativa de energización a los elementos que forman parte de esta red de dispositivos, aparatos o “cosas” que se estarán comunicando continuamente para la obtención y análisis de datos en general, contribuyendo de esta manera a la amplia gama de dispositivos con diferentes fines para los que son creados, ya que el alcance no se limita a un solo sector como el residencial o el industrial, si no que puede ser utilizado en todos los ámbitos donde se utilice el IoT.

El espectro Radioeléctrico, debido a la presencia de un sin número de sistemas de comunicaciones, se encuentra relativamente saturado, lo que significa que en el ambiente existen señales electromagnéticas que pueden ser aprovechadas para su uso alternativo como es la energy harvesting, siempre y cuando exista una antena que capte esas ondas electromagnéticas en el rango de las frecuencias más utilizadas, motivo del presente estudio.

1.3. Objetivos

1.3.1. General:

- Optimizar los diseños de antenas o arreglos de antenas para la mejor captación de energía electromagnética en el rango de varias frecuencias.

1.3.2. Especificos:

- Investigar el estado del arte, literatura y artículos científicos de los diferentes diseños de antenas para la captación de energía electromagnética.
- Desarrollo del diseño de la antena optimizada para la captación de energía electromagnética en el rango de varias frecuencias.
- Implementación del diseño optimizado de la antena para captación de energía electromagnética.
- Realizar pruebas del modelo de antena implementado e interpretar resultados.

2. Capítulo II

ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1. Recolección de energía (Energy Harvesting)

Las denominadas “Energy Harvesting”, consiste en el proceso mediante el cual se extrae energía presente en el entorno para producir energía eléctrica que posteriormente será almacenada o utilizada por dispositivos de bajo consumo [28]. Una de las “técnicas” más comunes es la Recolección de energía Electromagnética, la cual es generada por sistemas de Radio Frecuencia, y consiste principalmente en recoger la energía que emiten las diferentes antenas instaladas a lo largo de una zona geográfica sean estas de comunicaciones móviles o de estaciones de radio y televisión y convertirla en energía eléctrica, la Recolección de energía electromagnética se compone de 3 etapas principalmente: La Antena, que es la encargada de captar la energía electromagnética del ambiente, la segunda etapa es el sistema de recolección que convierte la energía capturada en voltaje y la tercera etapa es el almacenamiento para que finalmente esa energía pueda ser utilizada por un dispositivo electrónico.

En la primera etapa, para la recolección, principalmente lo que se usa y se diseña es una antena a determinada frecuencia que permita captar la mayor cantidad de energía electromagnética que existe en el entorno. En el estudio realizado por [25] para la aplicación de energy harvesting en RF dentro de entornos urbanos y semi-urbanos, en la parte del diseño de las antenas resalta los siguientes puntos a considerar:

- Considerando que las cosechadoras están diseñadas para operar dentro de un entorno (semi) urbano general, donde se desconoce la ubicación exacta de la fuente de TX, las antenas de las rectenas deben estar lo más cerca posible de la omnidireccionalidad, evitando la necesidad de apuntar el haz durante despliegue.
- Las antenas deben ser fácilmente escalables en todas las bandas de frecuencia.
- Las antenas deben ser de fácil fabricación.

Por otro lado en el estudio desarrollado por [16] se realiza el diseño de un arreglo de antenas y establece las principales ventajas de utilizar antenas independientes de la frecuencia:

- Buen factor Q

- Mayor inductancia por unidad de área
- Capacidad compacta.

En este sentido para el presente trabajo llamó mucho la atención el tema de las Antenas Independientes de la Frecuencia, debido a que permite el diseño de antenas que abarcan un rango de frecuencias bastante amplia y que además pueden ser diseñadas con tecnología microstrip, las mismas que se consideran mas adelante.

El espectro se comporta de diferentes maneras dependiendo del lugar de donde se encuentre el usuario, existe una gran diferencia en el entorno urbanizado con el rural, en el primero hay un gran uso del espectro y por ende mayor cantidad de señales de RF de donde se puede obtener la energía, no así en zonas rurales donde no existen muchas señales de RF activas, por lo que se debe analizar en primera instancia cuales son o en que rango de frecuencias se encuentra concentrada la mayor cantidad señales y enfocar el estudio en un determinado entorno, para que, de esta manera el diseño de la antena sea lo más eficiente posible, considerando además que la potencia que llevan las señales aéreas son muy bajas y disminuyen en relación a la distancia de su transmisor.

2.2. Antenas

Las principales definiciones de Antenas se consideran las siguientes, en el artículo denominado "Manual de ingenierías de Antenas" desarrollado por [15], define una antena como una estructura asociada con la región de transición entre una onda guiada y una onda de "espacio libre" o viceversa. De una manera más técnica en el libro [3] hace la definición de antena tomando en primera instancia el diccionario Webster's que define una antena como "un dispositivo generalmente metálico para irradiar, emitir o recibir ondas de radio", por otra parte toma la definición estándar de la IEEE de términos para antenas (IEEE Std 145-1983) que define la antena o antenas como "un medio para irradiar o recibir ondas de radio". En otras palabras, la antena es la estructura de transición entre el espacio libre y un dispositivo de guía, como se muestra en la Figura 2.1 el dispositivo de guía o línea de transmisión puede tomar la forma de una línea coaxial o una tubería hueca (guía de onda), y se utiliza para transportar energía electromagnética desde la fuente de transmisión a la antena, o desde la antena al receptor. En el primer caso, se trata de una antena transmisora y en el segundo una antena receptora.

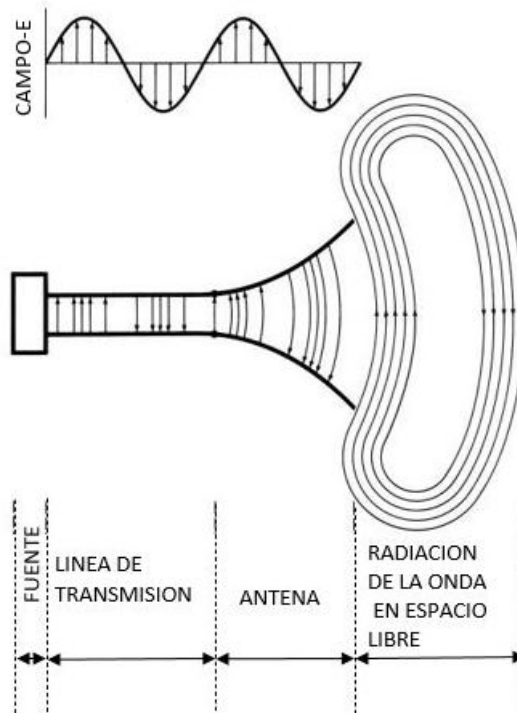


Figura 2.1: Antena como dispositivo de transición [3]

Se concluye que una antena es un dispositivo fabricado en un metal conductor encargado de recibir o propagar energía electromagnética desde un medio a otro.

2.2.1. Tipos y diseños de Antenas.

Considerando su modo de construcción, entre los principales tipos y diseños de antenas, los siguientes son los más comunes, tomando como referencia el libro de [3]:

- Antenas de alambre
- Antenas de apertura
- Antenas Microstrip
- Arreglos de Antenas
- Antenas reflectoras
- Antenas de lente

De las cuales se puntualiza más adelante sobre las Antenas Microstrip, que es el tipo de antena que se utiliza para el diseño de la antena de esta investigación.

Antena Microstrip En el libro de [3] define una antena microstrip como un parche metálico sobre un sustrato conectado a tierra, el parche metálico puede tener diferentes formas y sus dimensiones dependen del diseño, considerando principalmente la frecuencia de funcionamiento. Este tipo de antenas son muy atractivas especialmente por su tamaño que permite un amplio uso sobre todo en el sector de las Telecomunicaciones.

El parche radiante puede tener varias formas como: cuadrado, rectangular, tira delgada, circular, elíptica, triangular o cualquier otra configuración, en la Figura 2.2 se muestran algunos ejemplos siendo los de forma cuadrada, rectangular, dipolo (tira) y circular los más comunes debido a la facilidad de análisis y fabricación, además que las características de radiación son bastante atractivas, especialmente la radiación de baja polarización cruzada [3].

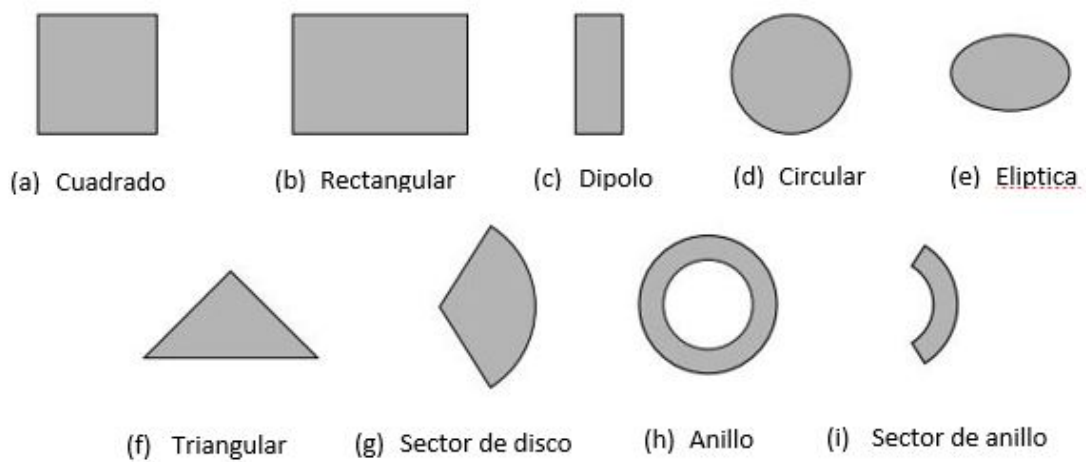


Figura 2.2: Formas representativas de elementos de parche microstrip [3]

La línea de microstrip es uno de los tipos más populares de líneas de transmisión planas principalmente porque puede fabricarse mediante procesos fotolitográficos y se miniaturiza fácilmente e integra con dispositivos de microondas activos y pasivos. La geometría de una línea de microstrip se muestra en la figura 2.3. Se imprime un conductor de ancho W sobre un sustrato dieléctrico delgado, conectado a tierra, de espesor d y permitividad relativa r ; En la figura 2.4 se muestra un bosquejo de las líneas de campo de radiación [27].

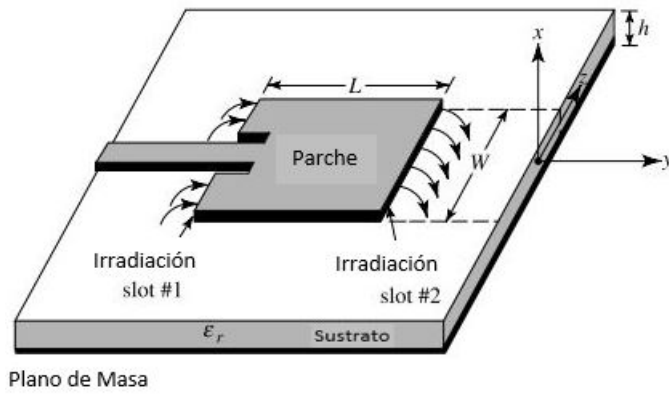


Figura 2.3: Antena Microstrip convencional [27]

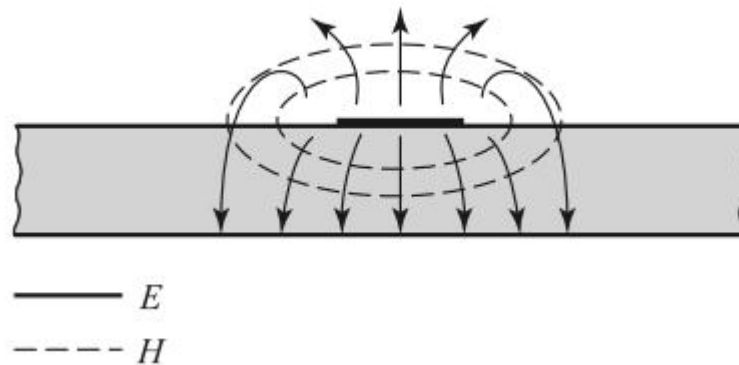


Figura 2.4: Líneas de Campo Eléctrico y Magnético [27]

Métodos de Alimentación para Antenas Microstrip Existen cuatro técnicas de alimentación consideradas las más comunes y que generalmente se las dividen por contacto y sin contacto y son:

Por contacto:

- Coaxial
- Línea Microstrip

Sin contacto:

- Por acoplamiento de proximidad
- Por acoplamiento de apertura

Alimentación por coaxial Las alimentaciones de línea coaxial, donde el conductor interno del coaxial está unido al parche de radiación mientras el conductor externo está conectado al plano de tierra, son los de mayor uso debido principalmente a que es fácil de fabricar y combinar, y tiene baja radiación de espuria. por

lo contrario como desventaja se puede anotar que tiene un ancho de banda estrecho y es más difícil de modelar, especialmente para sustratos gruesos ($h > 0,02\lambda_0$) [3].

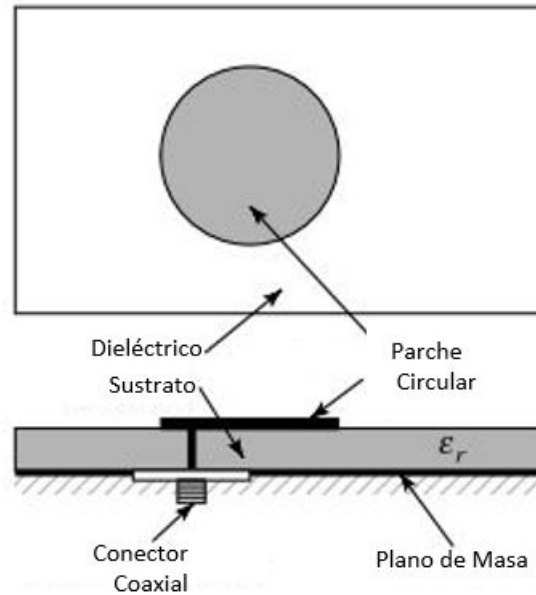


Figura 2.5: Alimentación por coaxial [3]

Alimentación por Línea Microstrip La línea de alimentación de microstrip también es una tira conductora, generalmente de un ancho mucho menor en comparación con el parche. Es fácil de fabricar, simple de combinar controlando la posición del recuadro y bastante simple de modelar. Sin embargo, a medida que aumenta el grosor del sustrato, las ondas superficiales y la radiación de alimentación, hace que aumente las espurias, lo que para diseños prácticos limita el ancho de banda (generalmente de 2% a 5%) [3].

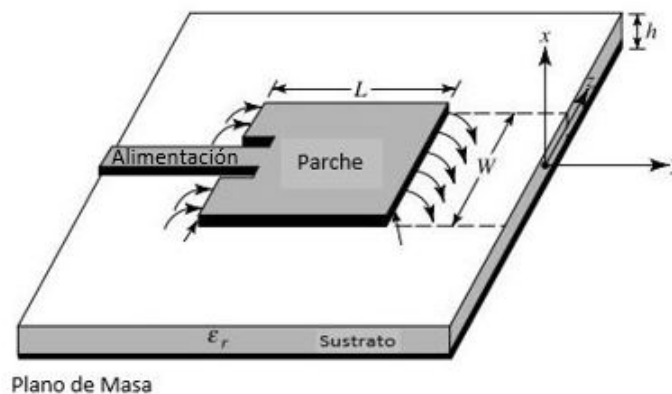


Figura 2.6: Alimentación por línea Microstrip [3]

Alimentación por Acoplamiento de Apertura El acoplamiento de apertura de la figura 2.7 es la más difícil de las cuatro maneras de alimentación para fabricar y también tiene un ancho de banda estrecho. Sin embargo, es algo más fácil de modelar y tiene radiación de espuria moderada. El acoplamiento de apertura consta de dos sustratos separados por un plano de tierra. En el lado inferior del sustrato base hay una línea de alimentación de microstrip cuya energía está acoplada al parche a través de una ranura en el plano de tierra que separa los dos sustratos. Esta disposición permite una optimización independiente del mecanismo de alimentación y del elemento radiante [3].

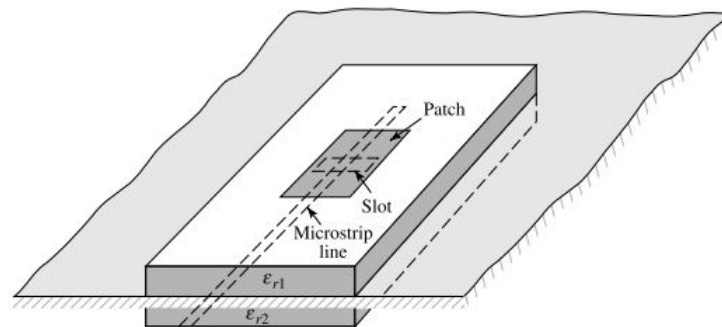


Figura 2.7: Alimentación por acoplamiento de Apertura [3]

Alimentación por Acoplamiento de Proximidad De las cuatro tipos de alimentaciones descritas, el acoplamiento de proximidad tiene la ventaja de obtener el mayor ancho de banda (hasta el 13%), es algo fácil de modelar y tiene baja radiación de espuria. Sin embargo, su fabricación es algo más difícil. La longitud del talón de alimentación y la relación entre el ancho y la línea del parche se pueden utilizar para controlar la unión.

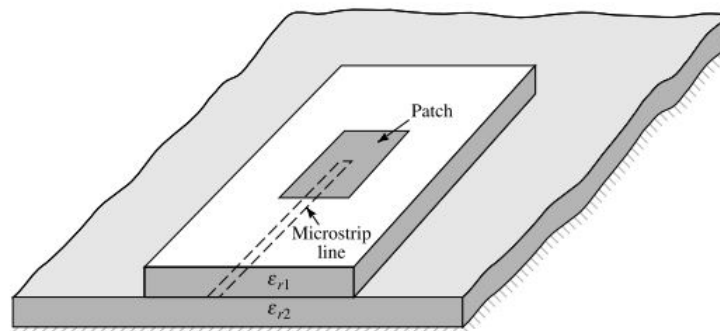


Figura 2.8: Alimentación por acoplamiento de Proximidad [3]

2.2.2. Parámetros Fundamentales de las Antenas

Para caracterizar una antena, dependiendo de su uso, por lo general se consideran ciertos parámetros que permiten establecer su rendimiento, algunos de los más conocidos son: el patrón de radiación, la densidad de la potencia de radiación, la intensidad de radiación, la Amplitud de Radio, Directividad, Eficiencia, Polarización, etc. parámetros que no necesariamente están relacionados entre sí, y que no es necesario especificar todos ellos para definir el rendimiento de una antena, para el caso de las Antenas Microstrip, existen tres parámetros fundamentales como son:

Factor de calidad, Ancho de Banda y Eficiencia. El factor de calidad, el ancho de banda y la eficiencia según el libro de [3] se las considera como las cifras de mérito de una antena, que además están interrelacionadas, no existe una forma total para optimizar estos parámetros independientemente sin que uno de ellos quede afectado. Por lo tanto, siempre hay una compensación entre ellos para llegar a un rendimiento óptimo de la antena. A menudo, esto implica que por la necesidad de optimizar uno de estos factores se deba reducir el rendimiento de otro.

El factor de calidad es una figura de mérito representativa de las pérdidas de una antena. Por lo general, hay pérdidas por radiación, conducción (ohmica), dieléctrica y ondas superficiales. de esta manera, el factor de calidad total Q_t está influenciado por todas estas pérdidas y, en general, se escribe como se muestra en la ecuación 2.1.

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (2.1)$$

en donde:

Q_t = factor de calidad total

Q_{rad} = factor de calidad debido a las pérdidas por radiación (onda espacial)

Q_c = factor de calidad debido a pérdidas de conducción (ohmicas)

Q_d = factor de calidad debido a pérdidas dieléctricas

Q_{sw} = factor de calidad debido a las ondas superficiales

Existen fórmulas aproximadas para representar los factores de calidad de las diversas pérdidas, que se pueden anotar de la siguiente manera, considerando sustratos muy delgados ($h \ll \lambda_0$):

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.2)$$

$$Q_t = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.3)$$

$$Q_{rad} = \frac{2\omega\epsilon_r}{hG_t/l} K \quad (2.4)$$

De donde $\tan \delta$ es la tangente de pérdida del material del sustrato, σ es la conductividad de los conductores asociados con el parche y el plano de tierra, G_t/l es la conductancia total por unidad de longitud de la abertura radiante y

$$K = \frac{\iint_{area} |E|^2 dA}{\oint_{perimetro} |E|^2 dl} \quad (2.5)$$

Para una abertura rectangular que opera en el modo dominante TM_{010}^x

$$K = \frac{L}{4} \quad (2.6)$$

$$G_t/l = \frac{G_{rad}}{W} \quad (2.7)$$

La Q_{rad} representada por la ecuación 2.4, es inversamente proporcional a la altura del sustrato, y para sustratos muy delgados suele ser el factor dominante. El ancho de banda fraccional (FBW) de la antena es inversamente proporcional al Factor de Calidad Total Q_t de la antena, y se define por:

$$FBW = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q} \quad (2.8)$$

o

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_t} \quad (2.9)$$

en donde

f_0 = Frecuencia Central.

Δf = Ancho de banda.

Sin embargo, la ecuación 2.9 puede no ser tan útil porque no tiene en cuenta la coincidencia de impedancias en los terminales de entrada de la antena.

Una definición más significativa del **ancho de banda** fraccional es sobre una banda de frecuencias donde el VSWR en la entrada terminal es igual o menor que un valor máximo deseado, suponiendo que el VSWR es la unidad en la frecuencia de diseño. Una forma modificada de la ecuación 2.9 que tiene en cuenta la correspondencia de impedancias es:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{VSWR - 1}{Q_t \sqrt{VSWR}} \quad (2.10)$$

En general, significa que es proporcional al volumen, que para una antena de microstrip rectangular a una frecuencia de resonancia constante puede expresarse como:

$$BW \sim \text{volumen} = \text{area} \cdot \text{altura} = \text{longitud} \cdot \text{ancho} \cdot \text{altura}$$

$$\sim \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\epsilon_r} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

Por lo tanto, el **ancho de banda** es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la constante dieléctrica del sustrato ϵ_r . La Figura 2.9 muestra una variación típica del ancho de banda para una antena de microstrip en función de la altura normalizada del sustrato, para dos sustratos diferentes. Es evidente que el ancho de banda aumenta a medida que aumenta la altura del sustrato.

La eficiencia de radiación de una antena se expresa mediante la ecuación 2.12:

$$e_{cd} = \left[\frac{R_r}{R_L + R_r} \right] \text{adimensional} \quad (2.12)$$

y se define como la potencia radiada sobre la potencia de entrada. También se puede expresar en términos de los factores de calidad, de esta manera la antena microstrip se puede escribir como:

$$e_{cdsw} = \frac{1/Q_{rad}}{1/Q_t} = \frac{Q_t}{Q_{rad}} \quad (2.13)$$

donde Q_t viene dado por la ecuación 2.1. Las variaciones típicas de la eficiencia como una función de la altura del sustrato para una antena de microstrip, con dos sustratos diferentes, se muestran en la Figura 2.9

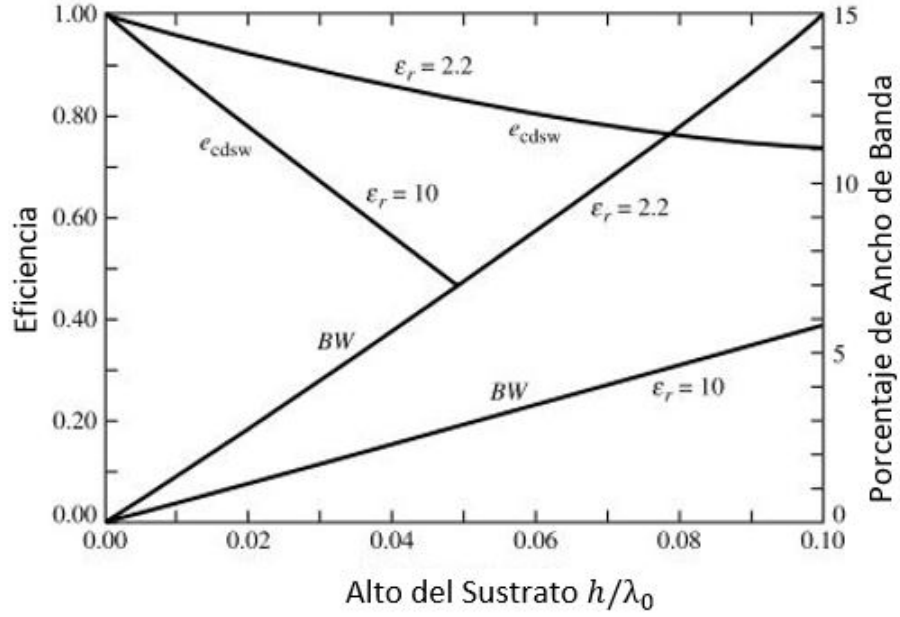


Figura 2.9: Eficiencia y ancho de banda frente a la altura del sustrato a una frecuencia de resonancia constante para un parche rectangular de microstrip para dos sustratos diferentes [3].

Relación de Onda Estacionaria (ROE, VSWR) [2].

Cuando se conecta una carga al extremo de una línea de transmisión cuya impedancia no es la característica de la línea, se produce una desadaptación, que hace que parte de la energía de la señal incidente desde la línea hacia la carga se refleje en ésta y vuelva por la línea. La suma de las señales incidente y reflejada hace que el campo eléctrico en la línea varíe de un punto a otro según se sumen en fase o contrafase las dos ondas. El resultado es una onda estacionaria cuya amplitud y fase dependerán del valor de la impedancia de carga. A partir de la medida de la amplitud y de la fase de esta onda estacionaria se puede hallar el valor de la impedancia de la carga. El coeficiente de reflexión en el extremo de la línea se puede encontrar como muestra la ecuación 2.14

$$\rho = |\rho| e^{j\varphi} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.14)$$

donde Z_L es la impedancia de la carga y Z_0 la de la línea. La medida de $|\rho|$ se realiza a través de la relación de onda estacionaria (ROE o SWR en inglés), que es el cociente entre la tensión máxima y la mínima en la línea, y se relaciona con ρ a través de la ecuación 2.15.

$$SWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} = \frac{|V|_{máx}}{|V|_{mín}} \quad (2.15)$$

Esta cantidad también se conoce como relación de onda estacionaria de voltaje

y, muchas veces, se identifica como VSWR. De la ecuación 2.15 se concluye que SWR es un número real tal que $1 \leq SWR \leq \infty$, de donde un valor de $SWR = 1$ implica una carga adaptada [27].

Parámetros de Dispersión S

Denominada como Matriz de dispersión o Matriz S, se considera como una representación más acorde con las medidas directas y con las ideas de ondas incidentes, reflejadas y transmitidas en redes de altas frecuencias, ya que debido a la dificultad de definir voltajes y corrientes para líneas que no son TEM y considerando además que existe un problema práctico al intentar medir voltajes y corrientes en frecuencias de microondas porque las mediciones directas generalmente involucran la magnitud (inferida de la potencia) y la fase de una onda que viaja en una dirección determinada o de una onda estacionaria y los voltajes y corrientes equivalentes, y las matrices de impedancia y admitancia relacionadas, se convierten en algo así como una abstracción cuando se trata de redes de alta frecuencia.

Así como la impedancia o la matriz de admitancia para una red de N puertos, la matriz de dispersión proporciona una descripción completa de la red como se ve en sus N puertos representados en la figura 2.10. Mientras que las matrices de impedancia y admitancia relacionan los voltajes y corrientes totales en los puertos, la matriz de dispersión relaciona las ondas de voltaje incidentes en los puertos con las reflejadas desde los puertos. Para algunos componentes y circuitos, los parámetros de dispersión se pueden calcular utilizando técnicas de análisis de red. De lo contrario, los parámetros de dispersión se pueden medir directamente con un analizador de redes vectoriales. Una vez que se conocen los parámetros de dispersión de la red, se puede realizar la conversión a otros parámetros de la matriz, si es necesario.

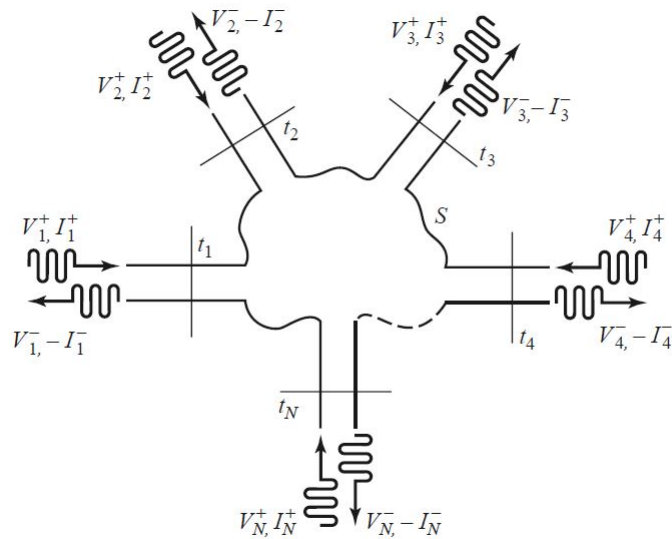


Figura 2.10: Red de microondas arbitraria de N puertos [27]

Considere la red de N puertos que se muestra en la Figura 2.10, donde V_N^+ es la amplitud de la onda de voltaje incidente en el puerto N y V_N^- es la amplitud de la onda de voltaje reflejada desde el puerto N . La matriz de dispersión, o matriz $[S]$, se define en relación con estas ondas de voltaje incidentes y reflejadas como:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ S_{N1} & \cdots & \cdots & S_{NN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

o

$$[V^- = SV^+] \quad (2.17)$$

Un elemento específico de la matriz de dispersión se puede determinar como:

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ para } k \neq j} \quad (2.18)$$

La Ecuación 2.18 indica que S_{ij} se encuentra impulsando el puerto j con una onda incidente de voltaje V_j^+ y midiendo la amplitud de onda reflejada V_i^- que sale del puerto i . Las ondas incidentes en todos los puertos, excepto en el puerto j , se establecen en cero (0), lo que significa que todos los puertos deben terminar en cargas adaptadas para evitar reflejos. Por lo tanto, S_{11} es el coeficiente de reflexión visto en el puerto i cuando todos los demás puertos terminan en cargas adaptadas, y S_{ij} es el coeficiente de transmisión del puerto j al puerto i cuando todos los demás puertos terminan en cargas adaptadas [27].

2.2.3. Antenas Independientes de la Frecuencia.

Comúnmente para todas las antenas se analiza sus parámetros (resistencia de radiación, directividad, etc.) que dependen de sus dimensiones: longitud, diámetro, radio, etc., pero no en términos absolutos sino en función de la longitud de onda (λ). De esta forma, si se produce un escalado de una antena, por ejemplo se doblan todas las dimensiones, su comportamiento será el mismo a la frecuencia mitad, ya que en este caso las dimensiones de la antena respecto a λ son las mismas que en el caso original. A partir de esta consideración Rumsey estableció el principio que indica que una antena cuya geometría pueda ser descrita únicamente en función de ángulos tendrá un comportamiento independiente de la frecuencia, ya que su geometría no varía al realizar un escalado.

Un concepto unido al enunciado del principio de Rumsey es el de antena autoescalable. Tal como se ha comentado anteriormente, si las dimensiones de una

antena que presenta un cierto comportamiento a la frecuencia f se multiplican por una constante k , el comportamiento de la antena es el mismo a una frecuencia f/k . Por tanto, una antena será independiente de la frecuencia si su geometría no varía al multiplicarse por un factor de escala k .

De forma genérica puede decirse que en la realización práctica de una estructura independiente de la frecuencia la dimensión de los terminales de alimentación fija la frecuencia máxima de utilización, mientras que la dimensión total de la antena está relacionada con la frecuencia más baja de funcionamiento [2].

Las antenas independientes de la frecuencia se basan en ideas poderosas y de alto impacto como se indica en [15]:

1. La primera idea surge de la observación de que la impedancia y las propiedades del patrón de una antena que están determinadas por su forma y dimensiones expresadas en longitudes de onda. Si un escalado arbitrario de la antena se transforma en una estructura idéntica a la original, salvo una posible rotación alrededor del vértice, sus propiedades serán independientes de la frecuencia. La antena entonces satisface la condición de ángulo, lo que significa que su forma puede especificarse enteramente solo por ángulos y no por una dimensión particular.
2. La segunda idea es que si una estructura se vuelve igual a sí misma por una escala particular $1/\tau$ de sus dimensiones, tendrá las mismas propiedades en las frecuencias f y τf . la consecuencia es que las características de la antena son funciones periódicas, con un período de $|\log\tau|$, del logaritmo de la frecuencia. Las antenas obtenidas de este principio se denominan Log-Periódicas.
3. Una tercera idea es que las antenas de banda conductoras planas auto-complementarias tienen una impedancia de entrada independiente de la frecuencia. La estructura de banda complementaria se obtiene intercambiando las superficies planas conductoras y no conductoras de la antena de banda especificada. La condición auto-complementaria requiere que la estructura complementaria sea idéntica a la estructura original, excepto por una rotación alrededor del punto del vértice. A continuación, se deduce del principio de Babinet que el producto de la impedancia de entrada es independiente de la frecuencia, ya que las dos impedancias son idénticas. Si para una estructura finita hay poco efecto final, entonces las impedancias serán independientes de la frecuencia. Ésta es una condición suficiente, pero no necesaria, para el funcionamiento independiente de la frecuencia de las antenas Log-Espiral y Log-Periódicas.

Este tipo de antenas se caracterizan principalmente por el hecho de que su polarización, diagrama de radiación e impedancia permanecen constantes, para ello, como se menciona en [5] este tipo de antenas se basan prácticamente en 4 principios como son:

- Auto-similitud Geométrica
- Geometría descrita por ángulos
- Truncamiento
- Corrientes residuales.

En el libro de [21] menciona que una estructura de antena de auto-escala exitosa satisface estos requisitos:

1. La antena contiene sus propias partes del modelo a escala, continuas o discretas, que pueden escalarse a un tamaño infinito.
2. La antena irradia la mayor parte de la potencia en una región activa finita para que pueda terminarse con un efecto mínimo.
3. Alimentada desde el extremo de alta frecuencia, la antena debe ser una línea de transmisión para llevar energía al extremo de baja frecuencia.
4. Las dimensiones de la región activa deben escalar con la longitud de onda.
5. La antena no debe irradiar en la dirección de la estructura en expansión.
6. Las partes deben tener un acoplamiento directo significativo fuera del alimentador de la línea de transmisión.

Otro concepto empleado comúnmente en el diseño de antenas de banda ancha, pero independiente del concepto de auto-escalable, es el de antena auto-complementaria. Para una estructura plana formada por conductores, la estructura complementaria es la que resulta de reemplazar el conductor por el vacío y viceversa, de forma que si se superpone una estructura y su complementaria se obtiene una lámina conductora continua. Una antena es auto-complementaria cuando ella y su complementaria tienen la misma forma [2].

Antenas Auto-complementarias Son antenas cuyas geometrías con su complementaria tienen la misma forma, además para que sean definitivamente auto-complementarias sus partes conductores serán infinitas, al realizar el análisis se han establecido dos principios fundamentales en relación a las antenas auto-complementarias como son el principio de Babinet, este principio establece que

una abertura y un obstáculo, de la misma forma geométrica y las mismas dimensiones e igualmente iluminados, producen el mismo patrón de difracción. Este principio ha sido extrapolado al Electromagnetismo y es utilizado en el cálculo de impedancias de antenas de ranura principalmente, el otro principio es el de Mushiake [1] el cual establece la relación entre las impedancias de entrada de las geometrías auto-complementarias, en este sentido para una antena auto-complementaria su impedancia de entrada no depende de la frecuencia, si no que su valor permanece fijo como se indica en la ecuación 2.19.

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{4Z_{in}^*} \quad (2.19)$$

donde Z_{in} y Z_{in}^* corresponden a las impedancias de entrada de la antena y su complementaria respectivamente y Z_0 es la impedancia intrínseca del medio que rodea a ambas figuras. Cuando el medio es aire el valor de $Z_0 = 120\pi [\Omega]$, considerando además que para una antena auto-complementaria, su impedancia y la de la complementaria son iguales, por tanto:

$$Z_{in} = \frac{Z_0}{2} = 188 [\Omega] \quad (2.20)$$

En este caso este valor corresponde a la impedancia independiente de la frecuencia de las antenas auto-complementarias.

Las antenas auto-complementarias tienen las siguientes ventajas [2]:

1. La realización de prácticas presentará una impedancia más constante con la frecuencia.
2. La antena es resonante y con un valor de impedancia manejable.
3. El valor de la impedancia de la antena es conocido a priori y no es necesario calcularlo.

Antena Espiral. Las antenas espirales consisten en un patrón espiral de lámina metálica delgada grabado en un sustrato, generalmente con el puerto de alimentación conectado desde el centro, y ubicado sobre una cavidad. El grabado contiene un patrón simétrico de mínimo dos brazos o tiras, por lo general se construyen antenas espirales con más brazos para irradiar en múltiples modos o para suprimir modos no deseados. La versión de dos brazos se puede alimentar utilizando una línea simple y equilibrada que requiere de un balun que sirva de acoplamiento [21].

Existen varios tipos de Antenas espirales en las que destacan Log-Periódica, Espiral-equiangular, Espiral de Arquimides y Espiral Sinuosa como se muestra en la figura 2.11 los cuales siguen el principio de la invariabilidad de la corriente

(de la fuente) con la normalización de la frecuencia, entonces se establece una invariabilidad en el diagrama del campo lejano con respecto a la frecuencia [5].

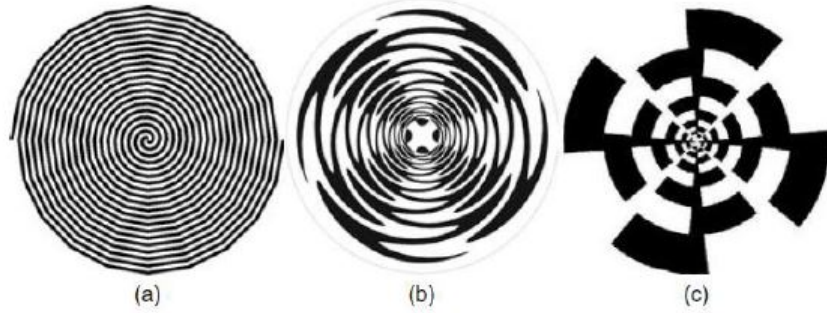


Figura 2.11: Antenas Espirales a) Espiral de Arquímedes de 2 brazos b) Sinusoide de 4 brazos c) Log-Periódica de 4 brazos [5]

Antena Espiral de Arquímedes. Las antenas espirales tienen muchas propiedades que las hacen elementos ideales de banda ancha. Estas antenas muestran un ancho de banda amplio con buena polarización circular e impedancia de entrada estable. Además que este tipo de antenas se ha demostrado que tienen un sin número de implementaciones entre la que destaca la cosecha de energía.

En [21] indica que aunque las espirales Arquímedes y exponenciales tienen ecuaciones diferentes que las definen, la práctica muestra que sus características no difieren mucho. Las longitudes de los brazos espirales de Arquímedes pueden ser largas y producir grandes pérdidas de circuito a bajas frecuencias. El ángulo de envoltura de una espiral de Arquímedes cambia de un valor alto en el centro a un valor bajo en el exterior. La alta tasa de ajuste en el centro excita más modos de orden superior a frecuencias altas. La baja tasa de envoltura en el diámetro exterior mejora la forma del patrón a bajas frecuencias. Aunque una espiral exponencial tiene características más uniformes en todo el rango de frecuencia, una espiral de Arquímedes es bastante útil.

El radio espiral de Arquímedes aumenta uniformemente con el ángulo, La espiral de Arquímedes tiene un ancho de brazo constante y una separación constante entre los brazos a través de toda la abertura.

La ecuación que define esta antena es

$$r = r_0 + a\phi \quad (2.21)$$

Donde r_0 es el radio inicial y a es la tasa de crecimiento y ϕ es el ángulo de crecimiento. No es posible escalar la estructura a un tamaño infinito usando la ecuación 2.21 que es uno de los requisitos de las antenas independientes de la frecuencia. La figura 2.12 muestra dos formas de espirales de Arquímedes.

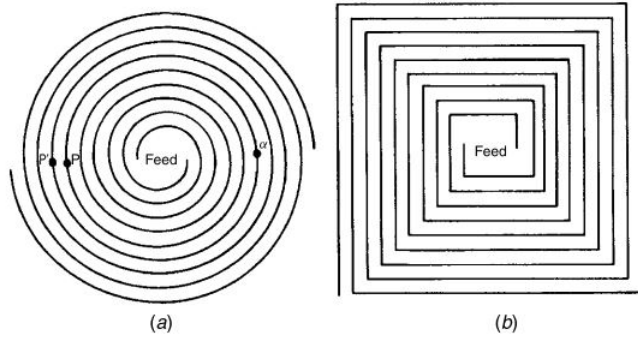


Figura 2.12: Espiral de Arquímedes (a) Circular (b) Cuadrada [21]

Por lo general, es importante que la antena sea auto-complementaria, que la tira de metal sea de ancho uniforme la cual es igual al espacio entre ellas. Una estructura infinita de dos brazos tiene una impedancia de 188Ω , que resulta del principio de Babinet–Booker para una estructura auto-complementaria. Una línea equilibrada alimenta la espiral desde el centro. Las radiaciones de las corrientes casi iguales y opuestas en el punto de alimentación se cancelan en el campo lejano. Los brazos espirales crecientes separan las corrientes. Cuando el perímetro del giro se aproxima a una longitud de onda, las corrientes desfasadas en P y Q (Figura 2.12) se ponen en fase en los puntos P y P', y la radiación de las corrientes ya no se cancela en el campo lejano. Esta condición comienza un poco antes del punto del perímetro de 1λ y continúa durante cierta distancia después de él. Para irradiar eficientemente la antena debe tener un perímetro de 1.25λ a la frecuencia de operación más baja. El tamaño de truncamiento de frecuencia superior está determinado por el requisito de limitar el espacio entre los puntos de alimentación a menos de $\lambda/4$, aunque para reducir la radiación de los modos de modo superior deben estar más cerca. Para la operación en modo superior, aumentamos el diámetro exterior a $(m + 0,25)\lambda/\pi$, y el espacio entre los puntos de alimentación se puede aumentar a $m\lambda/4$.

En la Tesis para PhD desarrollado en [7] ayuda a definir cómo se calculan las principales variables para la construcción de una antena espiral de Arquímedes, indicando primeramente que cada brazo de una espiral de Arquímedes es linealmente proporcional al ángulo ϕ , y se describe mediante las siguientes relaciones:

$$r = r_0\phi + r_1 \text{ y } r = r_0(\phi - \pi) + r_1 \quad (2.22)$$

en donde r_1 es el radio interno de la espiral.

La constante de proporcionalidad se determina a partir del ancho de cada brazo w , y el espacio entre cada vuelta s , que para una espiral auto-complementaria viene dada por:

$$r_0 = \frac{s + w}{\pi} = \frac{2w}{\pi} \quad (2.23)$$

El ancho de la tira de cada brazo se puede encontrar a partir de la siguiente ecuación:

$$s = \frac{r_2 - r_1}{2N} - w = w \quad (2.24)$$

Asumiendo una estructura auto-complementaria, el ancho de la tira se puede escribir como:

$$s = w = \frac{r_2 - r_1}{4N} \quad (2.25)$$

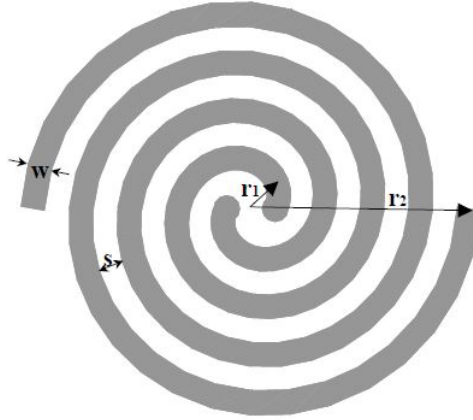


Figura 2.13: Geometría de la antena espiral de Arquímedes [7].

Técnicas de Alimentación para Antenas Espirales. Se han desarrollado diferentes técnicas de alimentación para antenas en espiral, algunos incluyen no solo transiciones balanceadas a no balanceadas, sino también transformación de impedancia. Los más comunes utilizados para espirales impresas de dos brazos son los siguientes [31]:

- El balun de micro-banda cónico,
- El balun de Marchand,
- Los híbridos de 180 grados con alimentación coaxial .

Para el presente trabajo se ha determinado utilizar el Balun de Microbanda Cónico (o de tiras cónicas) ya que tiene la ventaja de que la impedancia de la antena espiral se puede igualar disminuyendo el ancho de las tiras.

Tiras Cónicas (*Tapped Lines*) [27]. Una impedancia de carga real arbitraria podría combinarse con una línea sobre un ancho de banda deseado mediante el uso de transformadores de adaptación de múltiples secciones. A medida que aumenta el número N de secciones de transformador discretas, los cambios de paso en la impedancia característica entre las secciones se vuelven más pequeños y la geometría del transformador se aproxima a una línea que se estrecha continuamente. En la práctica, por supuesto, un transformador de adaptación debe tener una longitud finita, a menudo no más de unas pocas secciones. Esto sugiere que, en lugar de secciones discretas, el transformador puede reducirse continuamente, como se muestra en la Figura 2.14 (a), se pueden obtener diferentes características de la banda de paso utilizando diferentes tipos de conicidad.

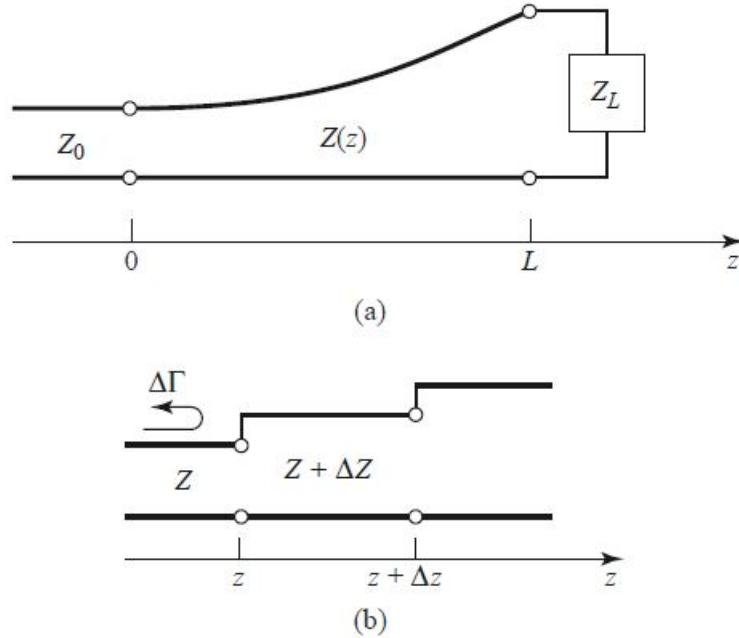


Figura 2.14: (a) Sección de adaptación de la línea de transmisión cónica. (b) Modelo para un cambio de paso de incrementos en la impedancia de la línea ahusada [27].

Considere la línea cónica continua de la figura 2.14(a) como formada por varias secciones incrementales de longitud Δz , con un cambio de impedancia $\Delta Z(z)$ de una sección a la siguiente, como se muestra en la figura 2.14(b). El coeficiente de reflexión incremental del paso de impedancia en z viene dado por:

$$\Delta\Gamma = \frac{(Z + \Delta Z) - Z}{(Z + \Delta Z) + Z} \simeq \frac{\Delta Z}{2Z} \quad (2.26)$$

En el límite de $\Delta z \rightarrow 0$ se tiene un diferencial exacto:

$$d\Gamma = \frac{dZ}{2Z} = \frac{1}{2} \frac{d(\ln Z/Z_0)}{dz} dz, \quad (2.27)$$

desde

$$\frac{d(\ln f(z))}{dz} = \frac{1}{f} \frac{df(z)}{dz} \quad (2.28)$$

Usando la teoría de las pequeñas reflexiones, se encuentra el coeficiente de reflexión total en $z = 0$, sumando todas las reflexiones parciales con sus correspondientes desplazamiento de fase:

$$\Gamma(\theta) = \frac{1}{2} \int_{z=0}^L e^{-2j\beta z} \frac{d}{dz} \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) dz, \quad (2.29)$$

Donde $\theta = 2\beta\ell$. Si $Z(z)$ es conocido, $\Gamma(\theta)$ puede ser encontrado en función de la frecuencia.

A partir de la expresión de la ecuación 2.29 es posible proponer una distribución de impedancias a lo largo de la línea de transmisión de manera de ajustar el coeficiente de reflexión.

En la práctica existen diferentes distribuciones de impedancias que se proponen, la que se utiliza aquí es la de tipo exponencial.

Tiras Cónicas Exponenciales (*Exponential Taper*) [27]. Considerando primeramente una reducción exponencial, como

$$Z(z) = Z_0 e^{\alpha z}, \text{ para } 0 < z < L, \quad (2.30)$$

Como se muestra en la figura 2.15 (a) en donde $z = 0$, $Z(0) = Z_0$ como se desea, en $z = L$ pretende tener $Z(L) = Z_L = Z_0 e^{\alpha L}$ lo que determina la constante α como:

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right) \quad (2.31)$$

Se encuentra $\Gamma(\theta)$ usando la ecuación (2.21) y (2.22) en (2.20):

$$\Gamma = \frac{\ln \frac{Z_L}{Z_0}}{2L} e^{-j\beta L} \frac{\sin \beta L}{\beta L} \quad (2.32)$$

La magnitud del coeficiente de reflexión en (2.23) se muestra en la figura 2.15 (b); tenga en cuenta que los picos en $|\Gamma|$ disminuyen al aumentar la longitud, como cabría esperar, y que la longitud debería ser mayor que $\lambda / 2$ ($\beta L > \pi$) para minimizar el desajuste a bajas frecuencias.

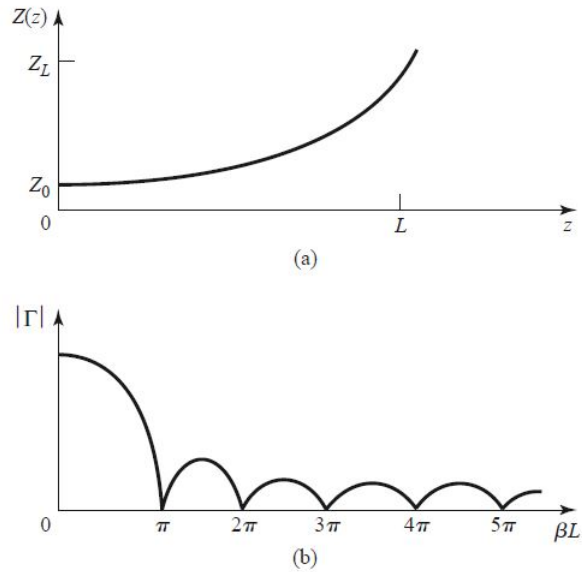


Figura 2.15: (a) Variación de impedancia. (b) Respuesta de magnitud del coeficiente de reflexión resultante [27]

Antena Log-Periódica. La primera antena Log-Periódica con éxito fue introducida por DuHammel e Isbell [11] y era una estructura de hoja plana auto-complementaria que constaba de dos tiras angulares que soportaban dientes curvos produciendo un patrón bidireccional. Luego, Isbell demostró que se podía obtener un patrón unidireccional usando una disposición no plana de las dos mitades de la antena. Posteriormente se descubrió que no se requería una condición auto-complementaria, y se introdujeron una variedad de diseños LP de láminas y alambres por DuHamel y Ore [10]. Finalmente Isbell introdujo un LP que consiste en un arreglo de dipolos [13], considerada la antena LP más utilizada.

Arreglo de Dipolos (en antena Log-Periódica) La geometría de esta antena se muestra en la Figura 2.16 formada por una agrupación no uniforme de dipolos de forma que todas las dimensiones que definen la agrupación se escalan por un factor de escala τ .

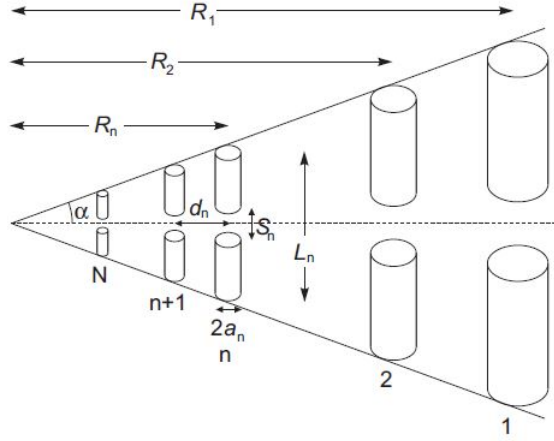


Figura 2.16: Agrupación Log-Periódica de Dipolos [2]

Consiste en una secuencia de dipolos lineales paralelos uno al lado del otro que forman una matriz coplanar. Aunque esta antena tiene directividades ligeramente más pequeñas que la matriz Yagi-Uda (7-12 dB), se pueden lograr y mantener en anchos de banda mucho más amplios. Sin embargo, existen grandes diferencias entre ellos. Si bien las dimensiones geométricas de los elementos de la matriz Yagi-Uda no siguen ningún patrón establecido, las longitudes, los espaciamientos, los diámetros e incluso los espacios en los centros dipolares de la matriz logarítmica periódica aumentan logarítmicamente y se define por la inversa de la relación geométrica τ .

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{S_{n+1}}{S_n} < 1 \quad (2.33)$$

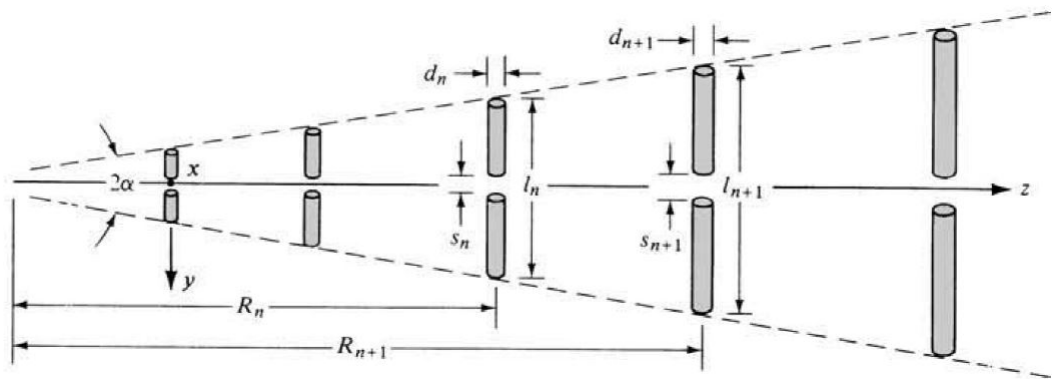


Figura 2.17: Arreglo de dipolos [3]

Otro parámetro asociado es el factor de espaciamiento σ es el espacio en longitudes de onda entre $\lambda/2$ dipolo y el dipolo más corto adyacente, definido por:

$$\sigma = \frac{R_{n+1} - R_n}{2L_{n+1}} = \frac{1 - \tau}{4 \tan \alpha} \quad (2.34)$$

El factor de escala (τ) y el espaciado relativo (σ), determinan la directividad de la agrupación. En la figura 2.18 se muestra una gráfica que relaciona estos dos parámetros con la directividad.

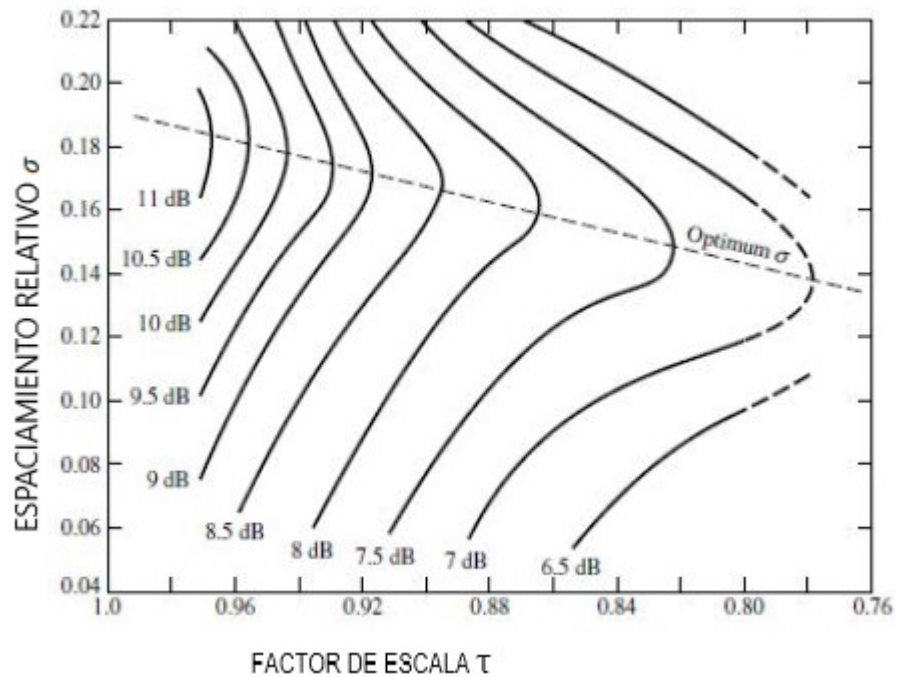


Figura 2.18: Contornos calculados de directividad constante frente a σ y τ para matrices de dipolos Log-Periódicas [3].

La agrupación Log-Periódica se alimenta por el vértice. Para conseguir resultados óptimos es necesario cruzar los cables de alimentación de forma que cada dipolo esté alimentado con un desfase adicional de π al introducido por la línea de transmisión [3], como se muestra en la figura 2.19.

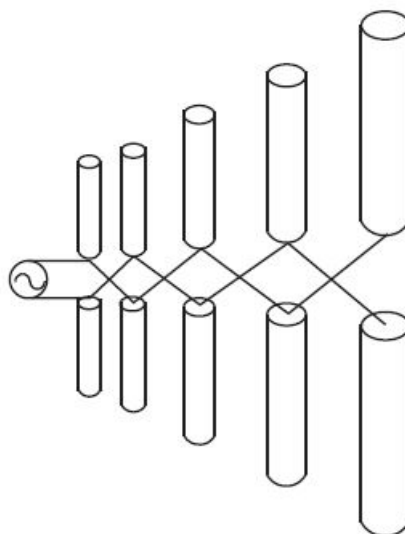


Figura 2.19: Alimentación de una agrupación Log-Periódica [2]

3. Capítulo III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Ubicación

El presente trabajo de investigación es realizado en la ciudad de Ambato provincia de Tungurahua, República del Ecuador, la ciudad consta de alrededor de 179 mil habitantes, ubicada en el centro del país en la región interandina a una altitud de 2580 msnm.

3.2. Equipos y Materiales

Para el desarrollo del proyecto de investigación se ha requerido primeramente de una computadora que cuente con un software especializado para la simulación de los diseños de las diferentes antenas propuestas, que además ayuda a optimizar su desempeño, para posteriormente proceder con la fabricación de las mismas, En la fabricación de las antenas se utiliza placas FR4, Con las antenas fabricadas y utilizando el analizador de antenas MiniVNA-TINY, dispositivo compacto que tiene la facilidad de conectarse por medio de un puerto USB a un computador, se obtiene la medición del parámetro S11, estos resultados se comparan con lo obtenido en la simulación realizada sobre el software especializado CST Microwave Studio. En lo relacionado a la Recolección de energía electromagnética, se utilizan los circuitos elaborados por el Ing. Dario Balarezo en su trabajo de investigación [4] para conocer la cantidad de energía que las antenas pueden “recolectar” en la frecuencia de 2.4 GHz, La Optimización se realiza sobre las antenas elaboradas por el Ing Walter Criollo en su trabajo de investigación [8] sometiendo bajo análisis comparativo.

3.2.1. Software de Simulación CST Microwave Studio

Es un paquete de software con todas las funciones para análisis y diseño electromagnético en el rango de alta frecuencia. Simplifica el proceso de creación de la estructura al proporcionar una potente interfaz gráfica de modelado sólido que se basa en el kernel de modelado ACSI. Una vez que se ha construido el modelo, se aplica un procedimiento de malla completamente automático antes de que se inicie un motor de simulación. este software contiene diferentes técnicas de simulación (solución de transientes, solución en el dominio de la frecuencia, solución de ecuaciones integrales, soluciones multicapa, soluciones asintóticas, y solucionador de modo propio) que permite adaptarse de la mejor manera a diversas aplicaciones. La solución en el dominio de la frecuencia además contiene métodos

especializados para hacer un alto análisis de estructuras resonantes. La versión del software utilizado es el CST STUDIO SUITE 2018.



Figura 3.1: Logo Software CST Microwave Studio.

3.2.2. Placa en FR4

Es el material sobre el cual se fabrican las antenas diseñadas, El nombre corresponde a placas laminadas con epoxi reforzadas en fibra de vidrio que se utilizan para la fabricación de placas de circuito impreso, comúnmente por las bondades que esta presenta principalmente en la relación precio-rendimiento. El "FR" en el nombre significa retardante de llama, mientras que el 4 diferencia el material de otros de la misma clase.

El material ampliamente conocido como FR4 es una estructura compuesta. La capa más básica del material es fibra de vidrio tejida en una hoja delgada similar a una tela. La fibra de vidrio le da a FR4 su necesaria estabilidad estructural. Esta capa de fibra de vidrio más interna se rodea y se une con una resina epoxi resistente al fuego. Esta resina es la que confiere rigidez al material, entre otras propiedades físicas.

Las principales propiedades de este material son:

$\varepsilon = 4,3$ constante dieléctrica

$h = 1,6$ altura del sustrato

$t = 0,035$ altura del conductor de cobre sobre el sustrato



Figura 3.2: Placa Virgen FR4

3.2.3. Analizador de antenas minúsculo MiniVNA-TINY.

El MiniVNA-TINY es un analizador de antena muy compacto con conexión USB, trabaja a un amplio rango de frecuencias que va de 1 MHz hasta 3000 MHz, es un analizador de redes y no solo permite la medición de ROE e impedancias de antenas ya que se puede utilizar para mediciones de transmisión en filtros de banda o amplificadores, entre las principales características de este dispositivo destacan:

- Funciona como un analizador vectorial, adecuado para realizar mediciones cuadripolo típicas de los parámetros S11 y S21.
- Los resultados se pueden mostrar o almacenar como diagrama de Smith.
- Los resultados de la medición son precisos y fácilmente reproducibles.
- La impedancia (Z) se puede medir de $1\ \Omega$ a $1000\ \Omega$, el rango dinámico es de hasta 70 dB.
- El analizador también se puede utilizar como generador de alta frecuencia de baja potencia.
- La fuente de alimentación se realiza mediante la interfaz USB, no se requiere una fuente de alimentación externa.

Datos técnicos miniVNA-Tiny:

- Rango de frecuencia 1 - 3000 MHz
- Rango de impedancia (Z) 1 - 1000 Ω
- Potencia de salida -6dBm @ 500 MHz

- Rango dinámico de hasta 70 dB a 500 MHz
- Conectores 2 × SMA
- Consumo de energía 370 mA a 5 V (USB)
- Peso 70 g
- Dimensiones 66 x 66 x 28 mm

Para la calibración del Pro-miniVNA BT, necesita un conjunto de calibración, que consta de un terminador de 50 Ω , SMA más uno abierto, uno corto.



Figura 3.3: Analizador de Antenas MiniVNA

3.2.4. Conectores SMA

Por sus siglas en inglés Sub-Miniature version A, son conectores coaxiales de Radio Frecuencia de semipresición, con una impedancia característica de 50 Ω , trabajan normalmente a frecuencias entre 0 Hz y 18 GHz y algunos hasta 26.5 GHz, son los conectores que comunmente se utilizan para la alimentación de las antenas.



Figura 3.4: Conector SMA hembra

3.3. Tipo de Investigación

El tipo de investigación aplicada al presente proyecto es **explicativa**, ya que se fundamenta en teorías, investigaciones e implementaciones que se muestran en artículos científicos de revistas de alto impacto, en tesis doctorales y libros basados en publicaciones de alto impacto, la información obtenida sirve de base para fundamentar el presente trabajo de investigación y permite conocer las herramientas y tecnología actualizada para el diseño de las antenas para la captación de energía electromagnética.

4. Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestra el proceso de diseño, simulación, optimización y fabricación de las antenas propuestas, el tipo de antenas escogidas fueron determinadas considerando sus bondades frente a otras ya que permiten diseños que abarcan un rango de frecuencias bastante amplio y que además pueden ser diseñadas con tecnología microstrip lo que garantiza que sean escalables, de bajo costo y compactas. Se analizan los resultados obtenidos en la simulación comparando con las mediciones realizadas en la práctica, se determinan las frecuencias de operación efectiva de las antenas, la cantidad de energía que pueden recolectar a una frecuencia de 2.4 GHz para luego someterlas a comparación con otras antenas similares y con ello conocer si se llegó a los objetivos planteados.

4.1. Resultados.

El proceso empleado ha sido el diseño, simulación, fabricación y caracterización de las Antenas.

4.1.1. Antena Espiral de Arquímedes.

Diseño

Para el primer diseño, Se determina inicialmente el rango de frecuencias que interesa captar, en este caso de 1 GHz hasta 3 GHz.

Una vez establecidas las frecuencias de funcionamiento de la antena se procede a encontrar los parámetros para la simulación, optimización y posterior fabricación.

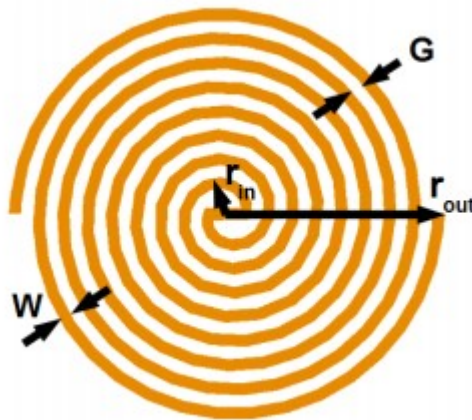


Figura 4.1: Parámetros a considerar para la fabricación de la antena espiral de Arquímedes [12].

1. Con las frecuencias la mas alta y la mas baja de funcionamiento se encuentran los radios tanto internos como externos de la antena espiral con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$r_{in} = \frac{c_0}{2\pi f_h \sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (4.1)$$

$$r_{out} = \frac{c_0}{2\pi f_l \sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (4.2)$$

en donde c_0 corresponde a la velocidad de la luz, f_h a la frecuencia más alta, f_l la frecuencia más baja propuestas y ε_{eff} la constante dieléctrica efectiva del sustrato, en este caso el sustrato que se utiliza para la fabricación de las antenas es FR4 debido a su fácil acceso en el mercado ecuatoriano, cuyas características son las siguientes:

$\varepsilon = 4,3$ constante dieléctrica

$h = 1,6$ altura del sustrato

$t = 0,035$ altura del conductor de cobre sobre el sustrato

Para encontrar ε_{eff} se usan las ecuaciones de [27] configuradas en el software MATLAB, desarrollado en 7

Para ambas frecuencias se calcula $\varepsilon_{eff} = 4,1510$ y $\varepsilon_{eff} = 3,9443$ respectivamente, reemplazando en las ecuaciones (4.1) y (4.2) se tiene:

$$r_{in} = 8,014 \times 10^{-3}$$

$$r_{out} = 23,44 \times 10^{-3}$$

2. Con estos resultados se calcula: El numero de vueltas (N), el ancho de la línea strip (w) y el espacio entre líneas (g)

con la ecuación 2.25:

$$w = g = \frac{r_{out} - r_{inn}}{4N}$$

Además para poder encontrar las demás variables se usan las ecuaciones de [22] que facilitan los cálculos:

$$L = N2\pi R_m \quad (4.3)$$

$$R_m = \frac{r_{in} + r_{out}}{2} \quad (4.4)$$

$$L = 1,25\lambda_l \quad (4.5)$$

Se obtienen los siguientes resultados:

$$R_m = 15,73x10^{-3}$$

$$L = 0,375$$

$$N = 3,7942 = 4$$

$$w = g = 9,64x10^{-4}$$

La tabla 4.1 muestra en resumen los resultados de los cálculos para proceder con el diseño y posterior simulación.

Tabla 4.1: RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE PARÁMETROS ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES

PARAMETROS	VALOR	UNIDAD
frecuencia máxima f_h	3	GHz
frecuencia mínima f_l	1	GHz
Radio Interior r_{in}	8.014	mm
Radio Exterior r_{out}	23.44	mm
Numero de vueltas N	4	u
Ancho del brazo w	0.964	mm
Separación entre los brazos g	0.964	mm

Simulación:

Con los parámetros calculados se plasma el diseño en el software CST Microwave Studio para realizar la respectiva simulación y verificar el funcionamiento de la antena, se analiza el Parámetro S11 y el VSWR para las frecuencias previamente establecidas en el diseño.

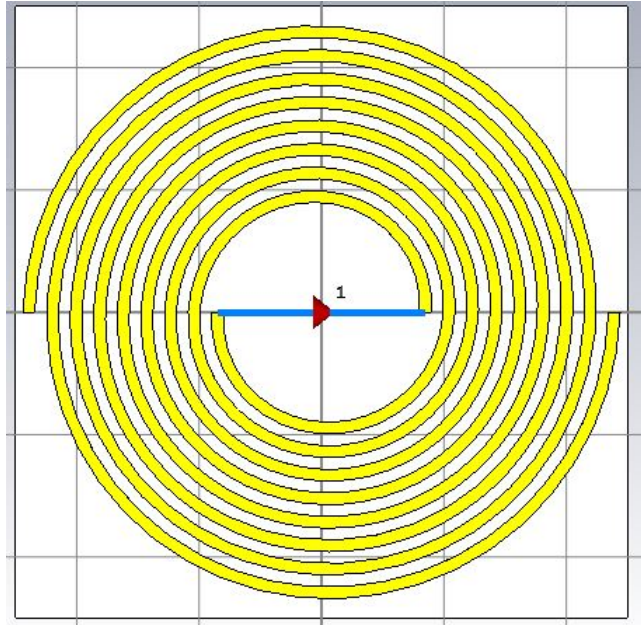


Figura 4.2: Diseño Antena Espiral de Arquímedes de acuerdo a cálculos realizados

A continuación se detallan los resultados obtenidos en la simulación con los parámetros antes descritos:

Parámetro S11:

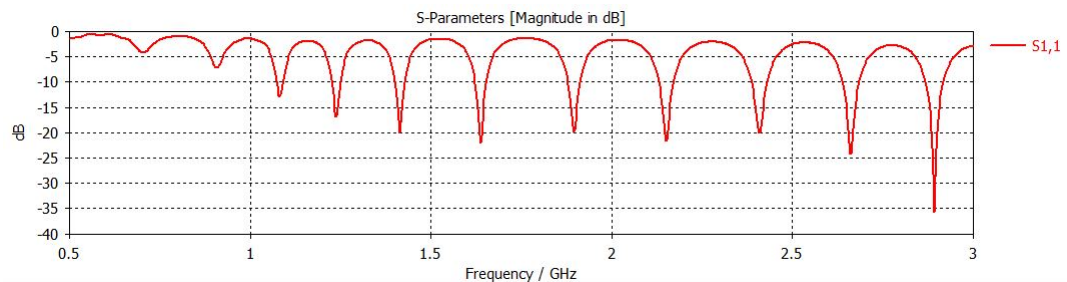


Figura 4.3: Parámetro S11 Antena Espiral de Arquímedes calculada.

VSWR (ROE):

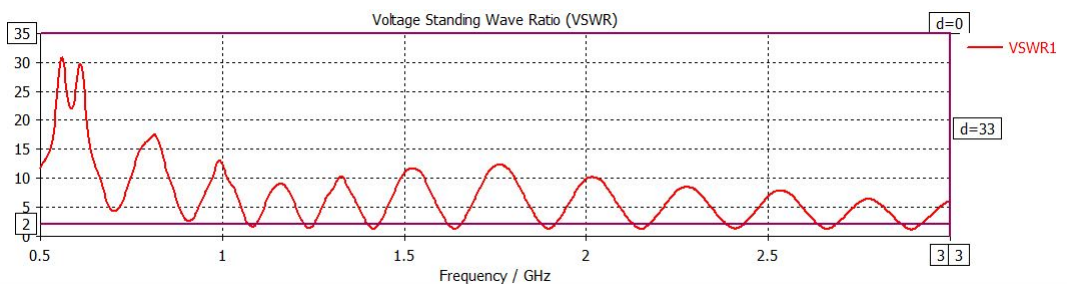


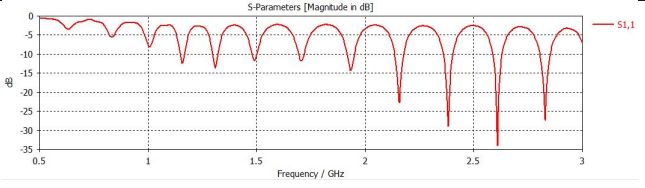
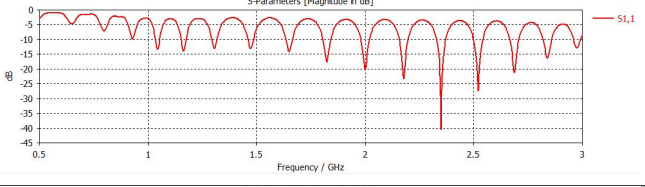
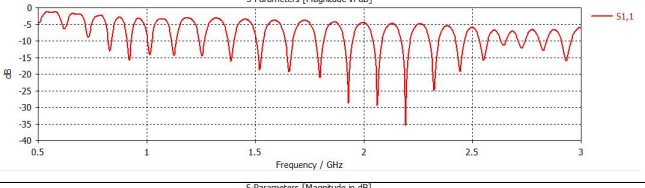
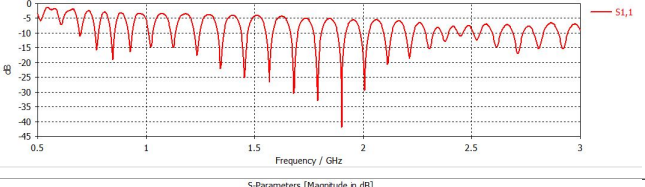
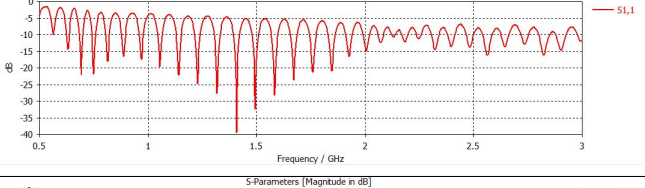
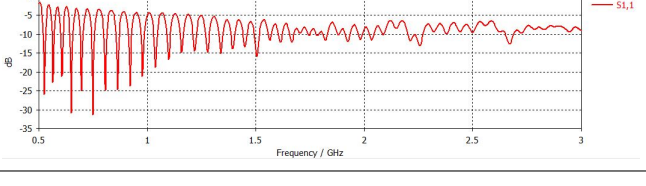
Figura 4.4: Parámetro VSWR, Antena Espiral de Arquímedes calculada

Los resultados mostrados en las figuras 4.3 y 4.4 corresponden a la simulación de la antena diseñada con los datos obtenidos en los cálculos, no son los esperados,

por lo que se procede a optimizar, la optimización consiste en ir variando el ancho de los brazos (w) así como el numero de vueltas de la espiral (N) y el radio interior (r_{in}).

La tabla 4.2 a continuación muestra las variaciones realizadas sobre las variables antes indicadas, con los respectivos resultados del parámetro S11 para determinar si la antena funciona o se acerca a lo requerido.

Tabla 4.2: VARIACIÓN PARÁMETROS PARA OPTIMIZACIÓN DISEÑO ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES

w	N	r_{in}	SIMULACIÓN PARÁMETRO S11
0.964	5	4	
0.964	6	3	
1	7	2	
1	8	1	
1	9	1	
1	11	1	

Luego de realizar varios cambios a las dimensiones de la Antena diseñada, los mejores resultados son los valores que se muestran en la tabla 4.3 y en la figura 4.5 considerando las dimensiones de la antena en relación al tamaño y las frecuencias de resonancia.

Tabla 4.3: RESULTADOS PARÁMETROS OPTIMIZADOS PARA ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES

PARAMETROS	VALOR	UNIDAD
frecuencia máxima f_h	3	GHz
frecuencia mínima f_l	1	GHz
Radio Interior r_{in}	1	mm
Radio Exterior r_{out}	40	mm
Numero de vueltas N	10	u
Ancho del brazo w	1	mm
Separación entre los brazos g	1	mm

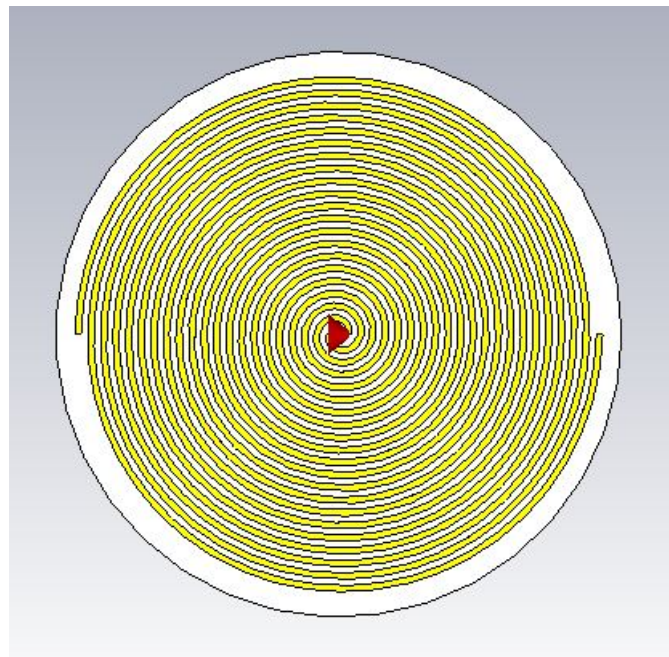


Figura 4.5: Diseño espiral de Arquímedes definitivo

A continuación en las figuras 4.6 y 4.7 detallan los resultados obtenidos en la simulación con los parámetros de la tabla 4.3, se evalúan los parámetros S11 y VSWR:

Parámetro S11:

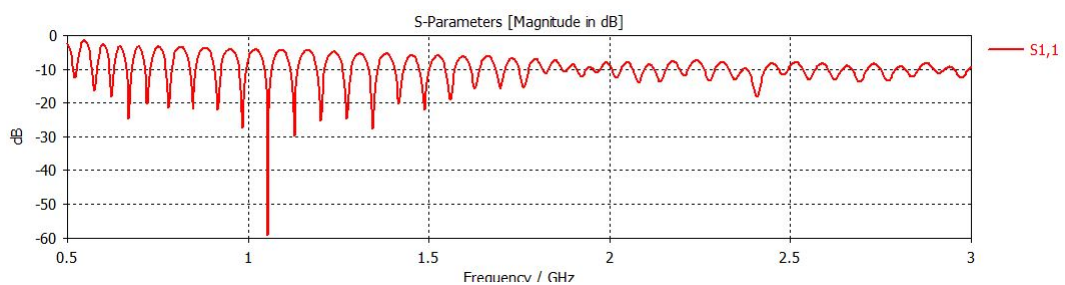


Figura 4.6: Parámetro S11, simulación diseño optimizado Antena Espiral de Arquímedes

VSWR (ROE):

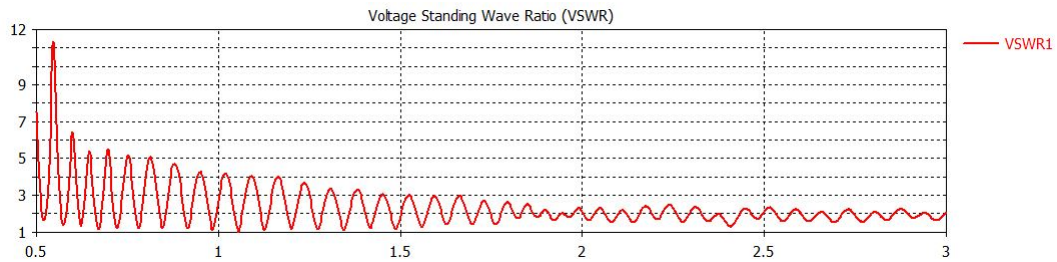


Figura 4.7: Parámetro VSWR, simulación diseño Optimizado Antena Espiral de Arquímedes

De esta manera, se concluye que una vez optimizado las dimensiones de la Antena Espiral de Arquímedes calculada, esta presenta buenos resultados, para una mejor interpretación, mencionar que como criterio práctico se considera que los valores de la razón de onda estacionaria (VSWR, *Voltage Standing Wave Ratio*) sean menores o iguales a 2 ($ROE \leq 2$) y cuanto más cercano esté el valor a la unidad mejor será el desempeño de la antena, o lo que es igual, el ancho de banda de la antena está definido por la banda en la cual el coeficiente de reflexión (S11) permanece por debajo de -10 dB, lo cual implica que la antena posee una buena capacidad de radiar la potencia en lugar de reflejarla hacia el generador.

4.1.2. Balun de Alimentación o Acoplamiento para Antena espiral de Arquímedes.

Las antenas Espirales de Arquímedes al ser antenas auto-complementarias tienen una impedancia característica de 180Ω , de esta manera se hace necesario acoplar esta impedancia para que la antena se pueda alimentar o acoplar a una impedancia de 50Ω que es la que se encuentra en el mercado, considerando la frecuencia a la que está diseñada la antena se emplean técnicas de diseño microstrip, para aplicaciones de banda angosta es común utilizar el adaptador de $\lambda/4$, sin embargo, para un rango de frecuencias mayores se sugieren los diseños de transformadores multisección aplicando el concepto de pequeñas reflexiones, en este caso se considera el Adaptador de Impedancia mediante ensanchamiento de líneas de transmisión (*Tapered Lines*).

Se proceden a realizar los cálculos en base a los parámetros para el acoplamiento, para ello se utiliza la ayuda del software MATLAB, en 7 se encuentra la configuración de las formulas utilizadas, a continuación en la figura 4.8 se muestra el resultado que arroja el software para los parámetros con los cuales se procede a diseñar el balun en el CST Microwave Studio.

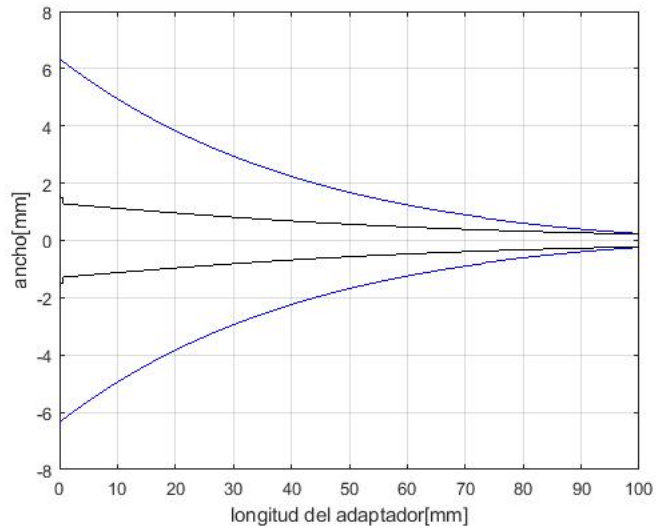


Figura 4.8: Resultado cálculo de parámetros en Matlab para diseño del Balun a utilizar para adaptar Antena Espiral de Arquímedes a 50Ω

Los parámetros obtenidos son los que se muestran en la tabla 4.4 a continuación:

Tabla 4.4: RESUMEN PARÁMETROS PARA DISEÑO DE BALUN

PARÁMETRO	VALOR (mm)
Ancho alimentación	3,218
Ancho Tierra	12,69
Ancho común	0,4406
Longitud	100

Una vez con estos valores se realiza el diseño y la simulación en el software, analizando los parámetros S en transmisión y reflexión, de esta manera determinaremos si el balun se encuentra resonando dentro de las frecuencias que se requiere y que permita a la antena desenvolverse de acuerdo a lo diseñado.

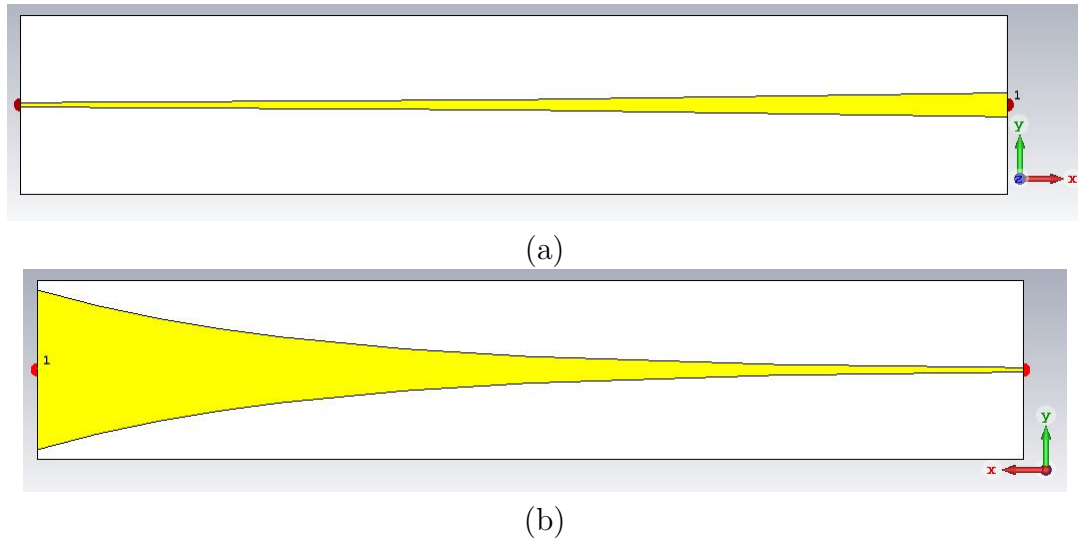


Figura 4.9: Diseño Balun se muestra ambos lados del sustrato (a) Cara superior (b) cara inferior

Se procede a correr la simulación y verificar los parámetros, en este caso se analiza los resultados de los parámetros S (S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}), los puertos se configuran a la impedancia en cada punta es decir en el puerto uno se configura a 50Ω y el puerto dos a 180Ω , los resultados a los que se llega no se presentan de acuerdo a lo que se requiere, por lo que se procede a optimizar, la optimización consiste en ir modificando el ancho tanto de la línea de transmisión como la de tierra para encontrar el mejor resultado, en la tabla 4.5 se muestran las variaciones realizadas con los respectivos resultados obtenidos.

Tabla 4.5: VARIACIÓN PARÁMETROS PARA OPTIMIZACIÓN DISEÑO DEL BALUN

ALIMENTACIÓN	TIERRA	SIMULACIÓN PARÁMETROS S
2.95 mm	13.88 mm	
2.67 mm	14.59 mm	
2.54 mm	15.34 mm	

El mejor resultado obtenido se dio en los parámetros detallados en la tabla 4.6 y cuya simulación de los parámetros S se aprecia en la figura 4.10:

Tabla 4.6: PARÁMETROS OPTIMIZADOS PARA DISEÑO DEL BALUN

PARÁMETRO	VALOR (mm)
Ancho alimentación	2,41
Ancho Tierra	16.13
Ancho común	0,44
Longitud	100

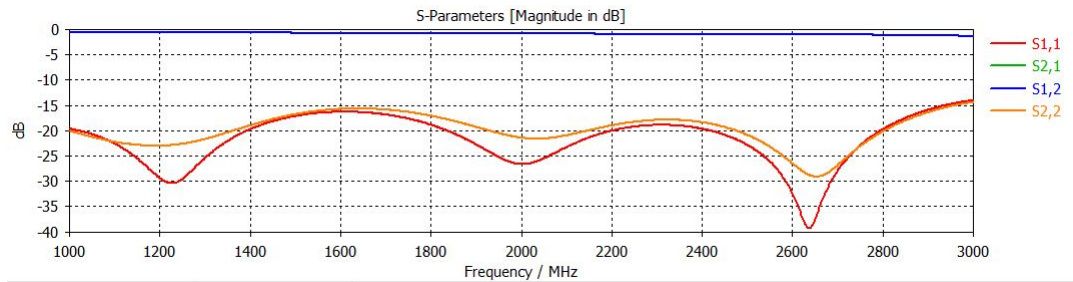


Figura 4.10: Resultado simulación Balun optimizado

Una vez Optimizados tanto el balun como la antena espiral de Arquímedes, se procede a integrarlos y realizar la simulación, con ello se determina los resultados para la antena acoplada y balanceada a una impedancia de entrada de 50Ω , la integración en el sistema CST Microwave Studio se muestra en la figura 4.11.

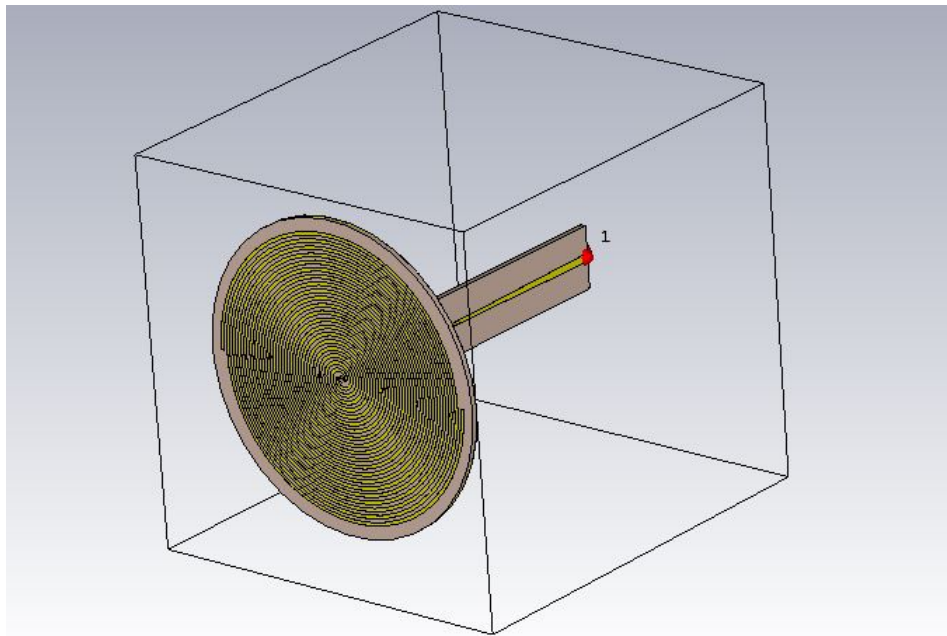


Figura 4.11: Acoplamiento Antena espiral de Arquímedes con Balun

A continuación en la figura 4.12 y 4.13 se presentan los resultados de la simulación de la antena Espiral de Arquímedes con su Balun de acoplamiento a una impedancia de entrada de 50Ω , como resultado se tiene una antena multifrecuencia

que resuena dentro del rango de frecuencias donde trabajan las operadoras celulares en el Ecuador conecionadas para tecnología 2G, 3G y 4G en las frecuencias de 1700 MHz, 1900 MHz y 2100MHz, adicional de las redes WIFI de 2400 MHz.

Parámetro S11:

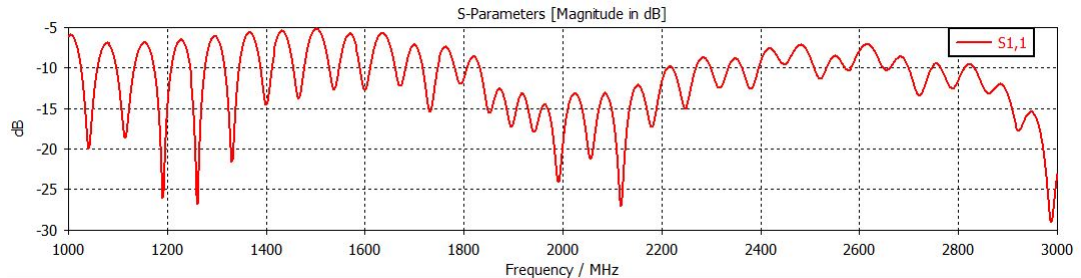


Figura 4.12: Resultados simulación Parámetro S11 Antena Espiral de Arquímedes con Balun de acoplamiento para una impedancia de 50Ω

VSWR (ROE):

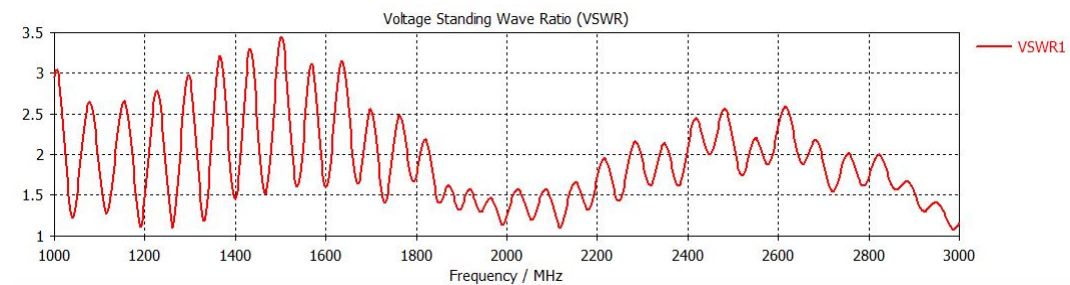
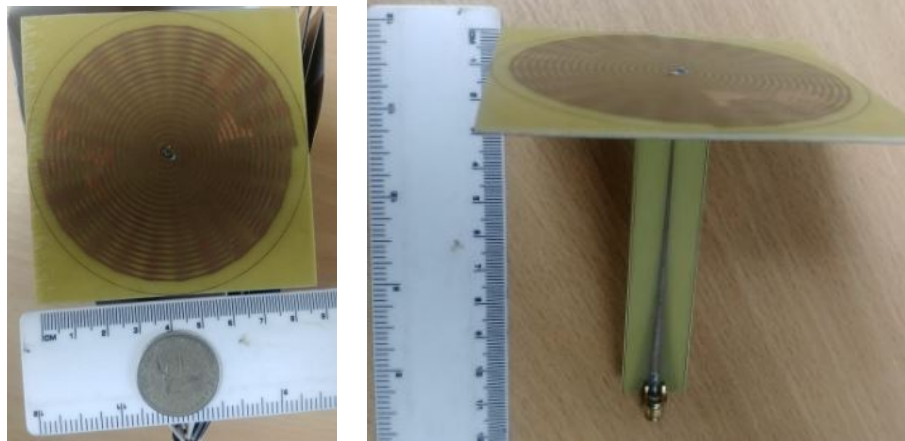


Figura 4.13: Resultado simulación VSWR Antena Espiral de Arquímedes con Balun de acoplamiento para una impedancia de 50Ω

Fabricación:

Conocidos los resultados de la simulación se procede con la fabricación tanto de la antena como el balun de acoplamiento, como se indica en la figura 4.14. La fabricación se llevó a cabo en la ciudad de Quito en la empresa APM quien lo hace con la técnica de planchado de manera artesanal, para mayor detalle de la fabricación se muestra en la parte de los Anexos 7.



(a) Antena Espiral de Arquímedes fabricada des vista superior (b) Antena Espiral de Arquímedes con balun de acoplamiento vista lateral trasera

Figura 4.14: Antena Espiral de Arquímedes fabricada con Balun de acoplamiento

Las dimensiones de la antena fabricada se consideran reducidas e ideales para utilizar en los equipos y sensores que generalmente que se usan en IoT.

A continuación la figura 4.16 muestra el resultado de la medición del parámetro S11 obtenido en la práctica con la ayuda del equipo analizador de antenas MiniVNA-TINY, en la figura 4.15 se muestra la conexión de la antena al dispositivo.



Figura 4.15: Conexión de la Antena fabricada al analizador MiniVNA-TINY

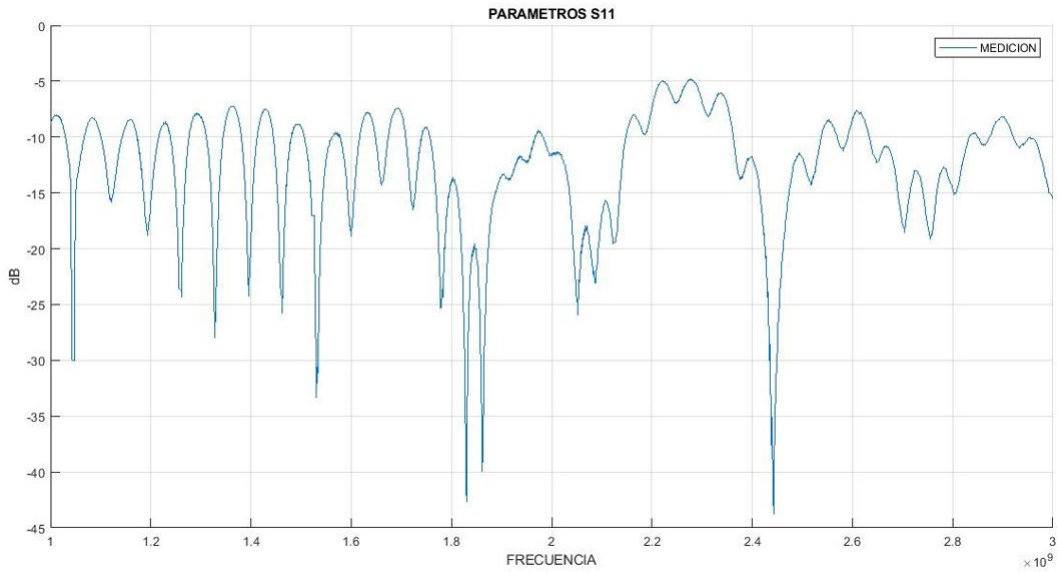


Figura 4.16: Resultado medición Parámetro S11 Antena Espiral de Arquímedes, que arroja el analizador de antenas MiniVNA-TINY

Caracterización:

Se realiza la comparativa de los resultados del parámetro S11, obtenidos en la simulación y la medición práctica con la antena conectada al analizador MiniVNA-TINY lo cual se muestra en la figura 4.17.

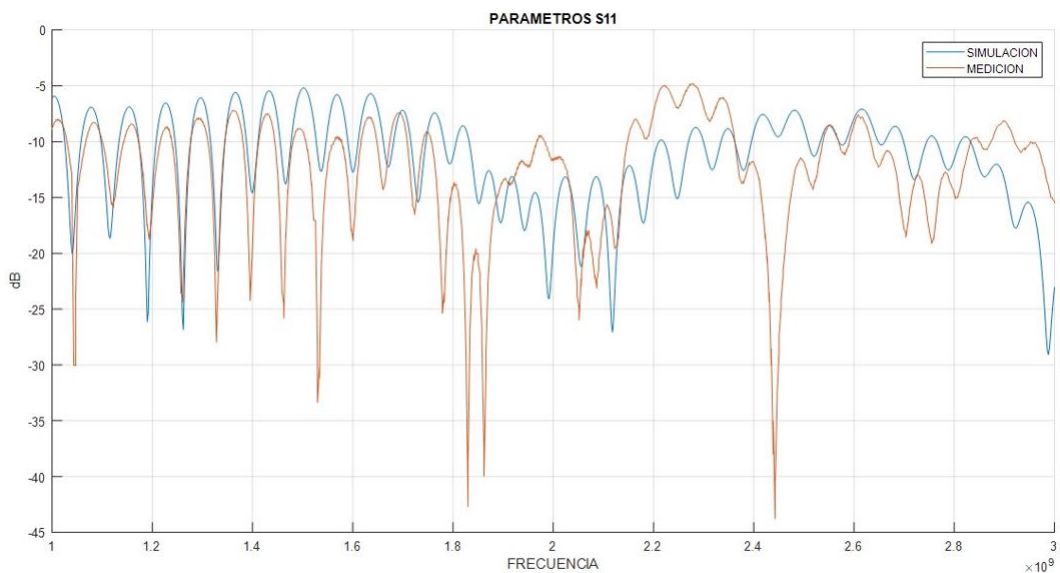


Figura 4.17: Comparativo Resultados Simulación vs. Medición Práctica de la Antena espiral de Arquímedes con Balun de acoplamiento

4.1.3. Antena Log-Periódica

Diseño.

A continuación se detalla el diseño de la antena Log-Periódica propuesta.

En primera instancia se determinan las frecuencias de funcionamiento de la antena, en este caso la antena que se propone diseñar es en las frecuencias desde 1.5 GHz hasta 2.5 GHz.

Se establecen las dimensiones del dipolo más largo que será el que funcione a la frecuencia mas baja, en este caso 1.5 GHz, que servirá de base para ir “dibujando” los siguientes dipolos.

1. El ancho de la linea de transmisión, considerando el sustrato a utilizar y la impedancia

a) Sustrato: FR4:

1) $\varepsilon = 4,3$

2) $h = 1,6$

3) $t = 0,035$

b) Impedancia 50Ω

Con la ayuda del Software Ansoft Designer se calcula el ancho de la linea de transmisión que además será el mismo ancho del primer dipolo, a continuación la figura 4.18 muestra el resultado obtenido con la ayuda del software antes mencionado, que en este caso da un valor del ancho de la linea strip de 3.051 mm que será el ancho de la linea de alimentación y así también del primer dipolo del arreglo.

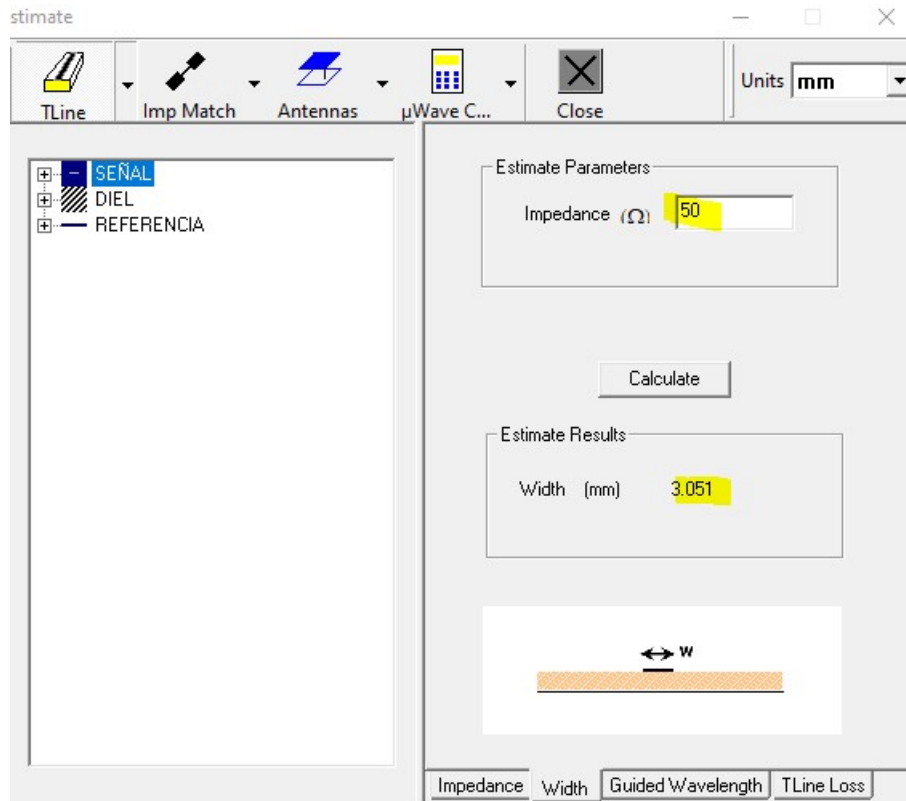


Figura 4.18: Resultado calculo ancho de linea de transmision y primer dipolo

2. Se encuentra la longitud del primer dipolo en base a la frecuencia más baja de funcionamiento del arreglo de dipolos a diseñar, de acuerdo al estado del arte se considera que la longitud de este dipolo debe estar entre $\frac{\lambda}{2}$ y $\frac{\lambda}{4}$. en consecuencia tenemos:

$$f_l = 1,5GHz$$

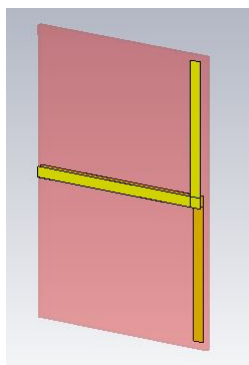
$$\lambda_l = \frac{c}{f_l} = \frac{3 \times 10^8}{1,5 \times 10^9} = 0,2m$$

$$\frac{\lambda_l}{2} = 0,1m$$

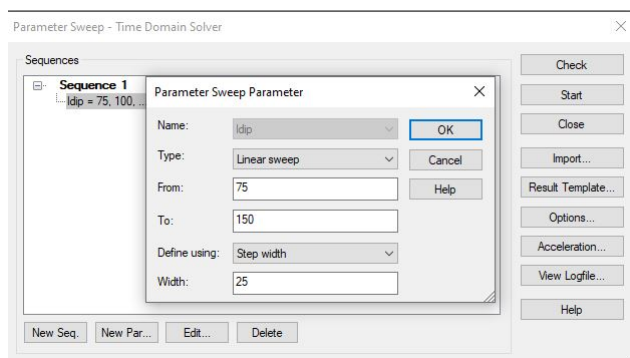
$$\frac{\lambda_l}{4} = 0,05m$$

Para alimentar el dipolo se lo hace mediante una linea de transmision microstrip cuyo calculo se lo realiza utilizando la ayuda del programa Matlab usando las ecuaciones de [27] que se encuentran en los Anexos 7.

Con un valor de 48 mm de la linea de alimentacion se procede a simular para un valor desde $\frac{\lambda}{2}$ hasta $\frac{\lambda}{4}$ de la longitud del dipolo como se muestra en la figura 4.19.



(a) Diseño primer Dipolo con línea de alimentación



(b) Parámetros configurados para simulación, variando longitud del dipolo.

Figura 4.19: Simulación para encontrar la longitud del primer dipolo de la Antena Log-Periódica

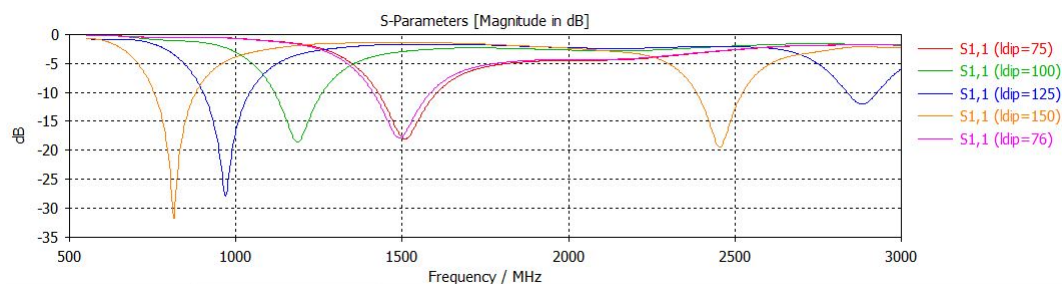


Figura 4.20: Resultado Simulación Variando la Longitud del Dipolo

Con los resultados de la simulación que se muestran en la figura 4.20 se concluye que la longitud del primer dipolo debe ser de $L_1 = 76mm$ para que este resuene a la frecuencia de 1500 MHz.

- Una vez obtenida la longitud y el ancho del primer dipolo se procede a realizar los demás cálculos, primeramente el número de elementos o dipolos necesarios, con la siguiente formula:

$$N = 1 + \frac{\ln B_S}{\ln \frac{1}{\tau}} \quad (4.6)$$

en donde B_S corresponde al Ancho de banda del diseño y esta dado por la ecuación:

$$B_S = B * B_{ar} \quad (4.7)$$

de la cual B es el ancho de banda deseado y B_{ar} es el ancho de banda de la región activa, las cuales se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$B = \frac{f_h}{f_l} \quad (4.8)$$

$$B_{ar} = 1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cot \alpha \quad (4.9)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \tau}{4\sigma} \right] \quad (4.10)$$

De donde τ es el factor de escala, considerado el factor más importante en el diseño de la antena y σ es el espacio relativo, ambos determinan la directividad de la agrupación y se relacionan de acuerdo gráfico 2.18, de [23] se extrae que los valores típicos del factor de escala en el diseño de las antenas Log-Periódicas tradicionales están en el intervalo entre 0.7 y 0.95 dependiendo de la ganancia a la cual se diseña la antena. En el diseño de la antena Log-Periódica impresa se toma una ganancia de 8 dB con ello se establece un valor para el factor de escala de $\tau = 0,88$ y $\sigma = 0,161$

En consecuencia utilizando las ecuaciones 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10, los valores calculados son:

$$B = 1,67$$

$$\alpha = 0,184$$

$$B_{ar} = 1,696$$

$$B_S = B * B_{ar} = 2,83$$

$N = 8,144 = 8$ Que representa el número de elementos a diseñar.

4. Los 8 elementos que componen la antena Log-Periódica de arreglo de dipolos propuesta se calculan a continuación.

Lo primero a establecer es la separación del primer dipolo con el que le sigue, para encontrar la separación se utiliza la ecuación 4.11 considerando las variables detalladas en la figura 4.21.

$$S_N = \frac{1}{2}[L_N - L_{N-1}] \cot \alpha \quad (4.11)$$

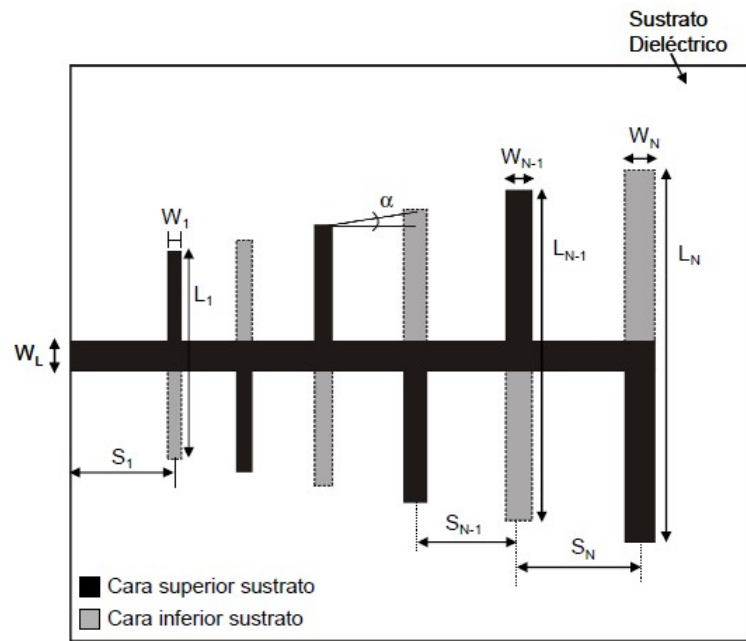


Figura 4.21: Parámetros para cálculo de diseño antena Log-Periódica [23]

Utilizando la ecuación 2.33 encontramos L_N

$$L_2 = \tau * L_1 = 66,88mm$$

$$S_2 = 21,56mm$$

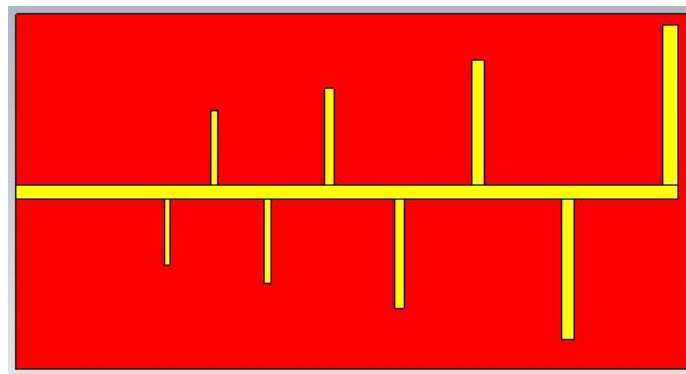
A partir de estos valores se encuentran los demás, los cuales se muestran en la tabla 4.7 a continuación:

Tabla 4.7: RESULTADOS CÁLCULOS PARA DISEÑO ANTENA LOG-PERIÓDICA

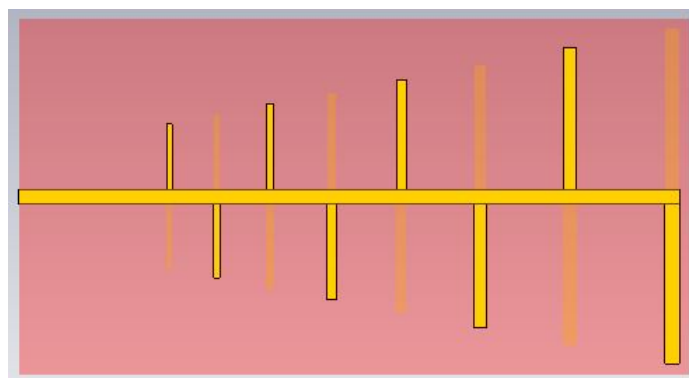
DIPOLO	LONGITUD (mm)	SEPARACIÓN (mm)	ANCHO (mm)
1	76	24.50	3.5
2	66.88	21.56	3.08
3	58.85	18.97	2.71
4	51.79	16.70	2.39
5	45.58	14.69	2.10
6	40.11	12.93	1.85
7	35.29	11.38	1.63
8	31.06	36.60*	1.43

*Esta distancia corresponde entre el dipolo más pequeño y el punto de alimentación que es media longitud de onda de la línea *stripline* de alimentación a la frecuencia de resonancia más alta del diseño.

- Con los resultados obtenidos en la tabla 4.7 se diseña la Antena en el software CST Microwave Studio, como se muestra en la figura 4.22, con el diseño se procede a realizar la simulación y analizar los resultados obtenidos.



(a) Lado superior del sustrato



(b) Lado inferior del sustrato

Figura 4.22: Diseño antena Log-Periódica en software CST Microwave Studio

Simulación:

6. Se muestran los resultados de la simulación realizada en el Software CST Microwave Studio en la figura 4.23 y 4.24, Son buenos resultados los obtenidos en la simulación por lo que se procede a coordinar la fabricación con las dimensiones de la antena de acuerdo al diseño del punto anterior.

Parámetro S11:

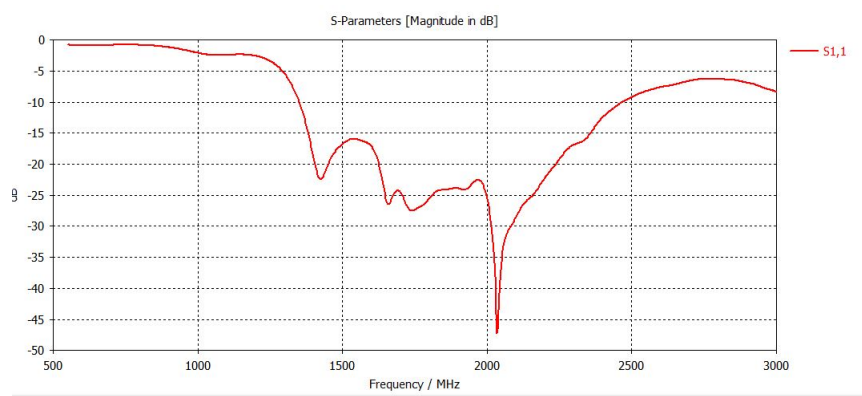


Figura 4.23: Resultado simulación, parámetros S11 Antena Log-Periódica

VSWR (ROE):

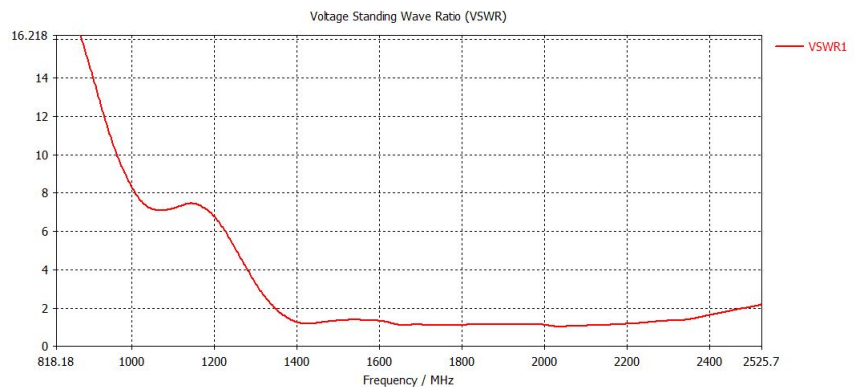


Figura 4.24: Resultado simulación, VSWR Antena Log-Periódica

Fabricación:

Con los resultados obtenidos en la simulación se confirma que la antena se encuentra funcionando acorde a lo propuesto en el diseño y no necesita ser optimizada, por lo que se procede a fabricar la antena, a continuación la figura 4.25 muestra la antena fabricada, cuyo proceso de fabricación se amplía en la sección de Anexos 7.

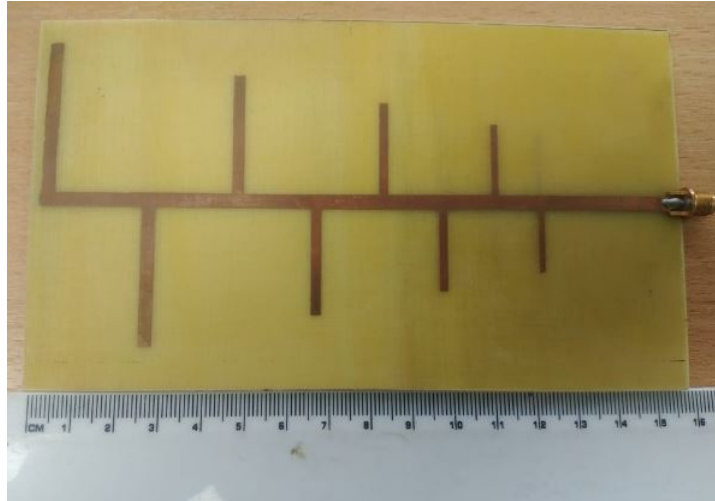


Figura 4.25: Antena Log-Periódica fabricada

Se realizan las mediciones con la ayuda del analizador MiniVNA-TINY, en la figura 4.26 se muestra la conexión de la antena al equipo analizador, para obtener los resultados de resonancia de la antena fabricada, en la figura 4.27 muestra los resultados obtenidos en relación al parámetro S_{11} .

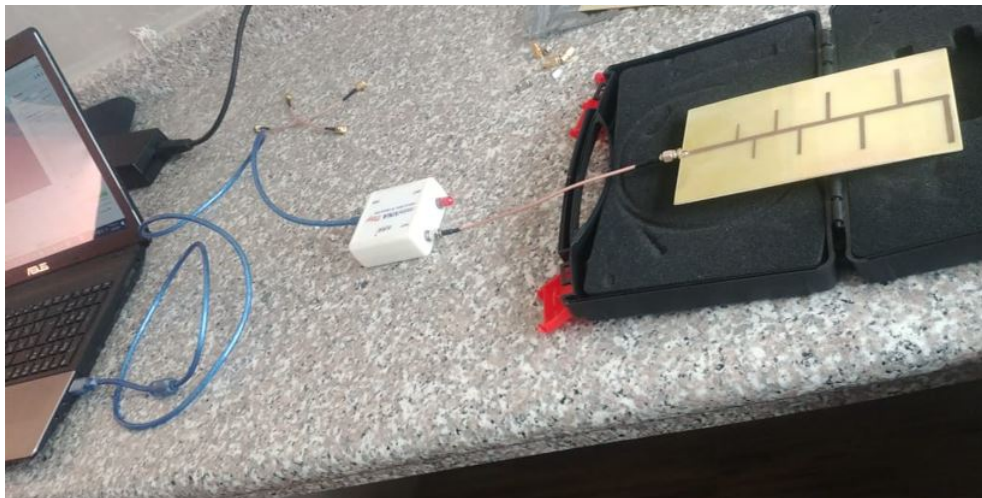


Figura 4.26: Conexión Antena Log-Periódica al equipo MiniVNA-TINY para pruebas

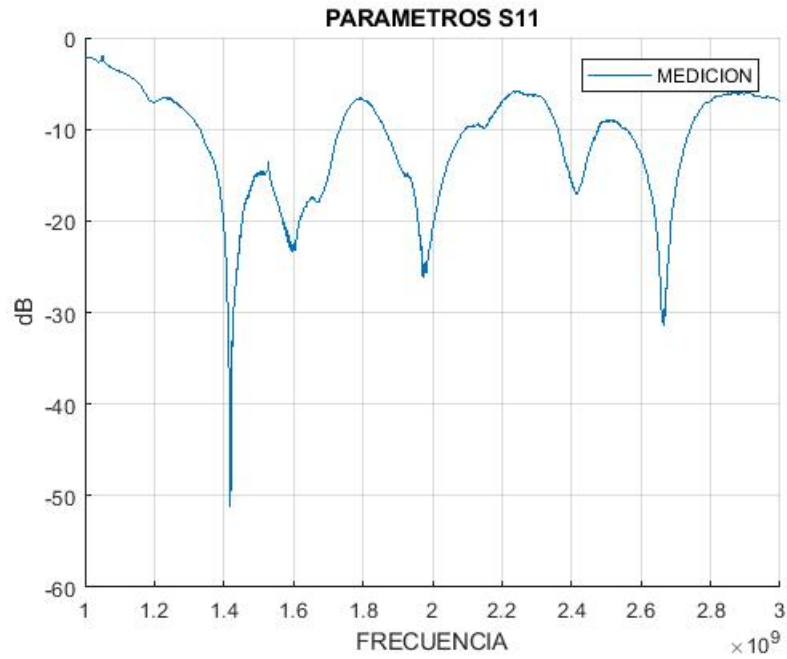


Figura 4.27: Resultados del analizador MiniVNA-TINY, Parámetro S11 Antena Log-Periódica fabricada

Caracterización:

Con los resultados obtenidos en la práctica se realiza un comparativo entre los obtenidos en la simulación, lo cual se muestra a continuación en la figura 4.28:

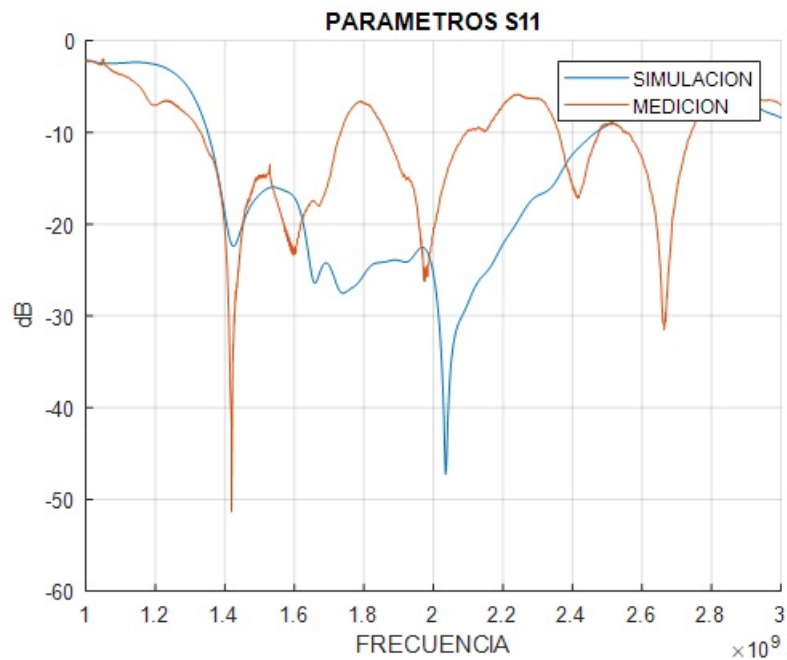


Figura 4.28: Comparativo Resultados Simulación vs. Medición Práctica Antena Log-Periódica

4.2. Análisis de Resultados

Con los resultados obtenidos en la sección anterior a continuación se analiza cada caso:

4.2.1. Análisis de Resultados Antena Espiral de Arquímedes

En el resultado práctico se determina que la antena diseñada y fabricada es una antena multifrecuencia que puede ser utilizada para la recolección de energía electromagnética en el rango de 1 GHz a 3 GHz, las frecuencias de resonancia de la antena se resumen en la Tabla 4.8 con sus respectivos anchos de banda, analizando los parámetros S11 de acuerdo a los resultados obtenidos en la práctica.

Tabla 4.8: RESUMEN RESULTADO MEDICIÓN ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES

Frecuencia Inicial (Hz)	Frecuencia Final (Hz)	Ancho de Banda (Hz)
$1,032x10^9$	$1,067x10^9$	$3,5x10^7$
$1,103x10^9$	$1,142x10^9$	$3,9x10^7$
$1,174x10^9$	$1,213x10^9$	$3,9x10^7$
$1,239x10^9$	$1,276x10^9$	$3,7x10^7$
$1,311x10^9$	$1,344x10^9$	$3,3x10^7$
$1,381x10^9$	$1,412x10^9$	$3,1x10^7$
$1,445x10^9$	$1,481x10^9$	$3,6x10^7$
$1,507x10^9$	$1,561x10^9$	$5,4x10^7$
$1,578x10^9$	$1,617x10^9$	$3,9x10^7$
$1,648x10^9$	$1,674x10^9$	$2,6x10^7$
$1,709x10^9$	$1,741x10^9$	$3,2x10^7$
$1,756x10^9$	$1,967x10^9$	$2,11x10^8$
$1,984x10^9$	$2,146x10^9$	$1,62x10^8$
$2,364x10^9$	$2,538x10^9$	$1,74x10^8$
$2,570x10^9$	$2,591x10^9$	$2,1x10^7$
$2,633x10^9$	$2,833x10^9$	$2x10^8$

La antena funciona dentro de las frecuencias de mayor uso en el espectro en el territorio ecuatoriano, correspondiente a los sistemas de comunicación móvil, entre ellos están la frecuencia de 1700 MHz, 1900 MHz, 2100 MHz que corresponden a las frecuencias de cobertura de 2G, 3G y 4G asignadas a las operadoras celulares del Ecuador, adicional a la frecuencia de 2400 MHz correspondiente a la tecnología WIFI que es la más utilizada.

Mediante la ecuación 4.12 se determina el margen de error correspondiente a las frecuencia de resonancia entre los resultados obtenidos en la simulación con el software CST Microwave Studio y las medidas obtenidas en la práctica con el MiniVNA-TINY

$$\%error = \frac{|V_{aprox.} - V_{real}|}{V_{real}} * 100 \% \quad (4.12)$$

Para la Frecuencia de 1700 MHz:

$$\%error = \frac{|1730-1723|}{1723} * 100 \% = 0,41 \%$$

Para la Frecuencia de 1900 MHz:

$$\%error = \frac{|1896-1862|}{1862} * 100 \% = 1,83 \%$$

Para la Frecuencia de 2100 MHz:

$$\%error = \frac{|2118-2126|}{2126} * 100 \% = 0,38 \%$$

Para la Frecuencia de 2400 MHz:

$$\%error = \frac{|2448-2443|}{2443} * 100 \% = 0,2 \%$$

En comparación con los resultados entre lo simulado y lo obtenido en la práctica como se muestra en el figura 4.17 correspondiente al parámetro S11, se ha analizado que:

1. En todas las frecuencias analizadas se verifica que el porcentaje de error es mínimo entre la medición práctica y lo simulado, variando en mayor medida el nivel de resonancia.
2. En la frecuencia desde 1 GHz hasta 1.74 GHz lo practico tiene similitud con lo simulado, dando una mejor respuesta con lo obtenido en la práctica.
3. A partir de la frecuencia de 1.75 GHz hasta 1.9 GHz la antena fabricada presenta resonancia lo que no se muestra en la simulación, esto es una ventaja ya que aumenta las frecuencias de uso de la antena.
4. Entre las frecuencias de 1.968 GHz hasta 1.980 GHz la antena fabricada no resuena lo que si se muestra en la simulación, que no representa mayor inconveniente.
5. A partir de la frecuencia de 1.984 GHz hasta 2.146 GHz la antena fabricada resuena al igual que lo simulado, con variaciones en el nivel de resonancia.
6. A partir de la frecuencia 2.364 GHz hasta la 2.538 GHz la antena fabricada demuestra un buen nivel de operación, a diferencia de lo simulado incluye estas frecuencias al rango de funcionamiento de la antena, considerando que esta presente la frecuencia de 2.4 GHz que como se menciona anteriormente es una de las frecuencias de mayor uso.

7. Desde la frecuencia 2.538 GHz hasta la 2.834 GHz existe una similitud de operación de la antena fabricada con relación a la simulada con mejor respuesta de la fabricada ya que los niveles de resonancia son mucho mejor que lo obtenido en la simulación.

4.2.2. Análisis de resultados Antena Log-Periódica.

En el resultado práctico se determina que la antena diseñada y fabricada es una antena multifrecuencia que puede ser utilizada para la recolección de energía electromagnética en el rango de 1.3 GHz a 2.7 GHz a pesar que el diseño se estableció desde 1.5 GHz hasta 2.5 GHz, las frecuencias de resonancia de la antena se resumen en la tabla 4.9 con sus respectivos anchos de banda, analizando los parámetros S11 de acuerdo a los resultados obtenidos en la práctica.

Tabla 4.9: RESUMEN RESULTADOS MEDICIÓN ANTENA LOG-PERÍODICA

Frecuencia Inicial (Hz)	Frecuencia Final (Hz)	Ancho de Banda (Hz)
$1,331x10^9$	$1,731x10^9$	$4x10^8$
$1,866x10^9$	$2,091x10^9$	$2,25x10^8$
$2,364x10^9$	$2,474x10^9$	$1,1x10^8$
$2,553x10^9$	$2,739x10^9$	$1,86x10^8$

Con estos resultados podemos determinar que esta antena al igual que la Antena Espiral de Arquímedes fabricada, puede ser utilizada para las frecuencias de cobertura de 2G, 3G y 4G consecionadas a las operadoras celulares del Ecuador, así también en el rango de frecuencia de WIFI.

De manera similar a lo hecho con la antena Espiral de Arquímedes, A partir de la ecuación 4.12 se procede a determinar el margen de error entre lo simulado y lo obtenido en la práctica:

Para la Frecuencia de 1400 MHz:

$$\%error = \frac{|1425-1419|}{1419} * 100 \% = 0,21 \%$$

Para la Frecuencia de 2000 MHz:

$$\%error = \frac{|2035-1980|}{1980} * 100 \% = 2,78 \%$$

Se puede determinar que:

1. En una comparación con la simulación y lo obtenido en la práctica, se disminuye el ancho de banda de operación de la antena, ya que en lo simulado la frecuencia de operación iba desde los 1.5 GHz hasta los 2.5 GHz con un pico de resonancia de -47.27dB en la frecuencia de 2.035GHz , en cambio

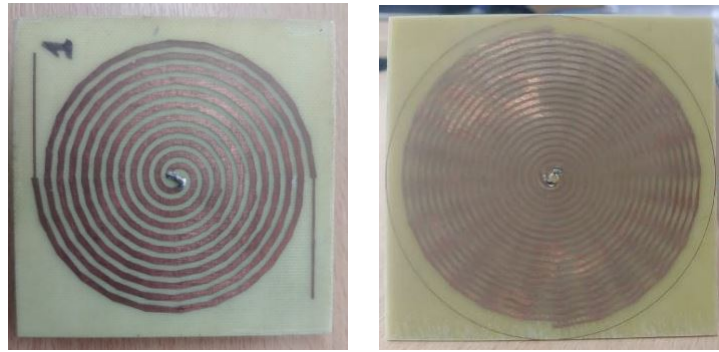
en lo obtenido en la práctica de acuerdo al parámetro S11, la antena llega a tener 4 picos de resonancia con anchos de banda recortados para cada frecuencia de operación pero que permiten su uso dentro de las frecuencias de interés.

2. Desde la Frecuencia de 1.2 GHz hasta la frecuencia de 1.6 GHz aproximadamente se tiene una similitud entre los resultados obtenidos en la practica y la simulación, con un margen de error del 0.21 %.
3. Para las frecuencias superiores desde 1.6 GHz hasta los 2.7 GHz el porcentaje de error aumenta a 2.78 % y en algunas frecuencias puede superar este valor, sin embargo, se debe considerar que para ciertas frecuencias de interés lo obtenido en la práctica es un buen resultado para el uso para el cual la antena fue diseñada.

4.2.3. Comparación Antena con trabajo Similar

Considerando el proceso de Optimización, se usa como referencia el estudio realizado por el Ing. Walter Criollo en [8], donde elabora 2 antenas, una de ellas es una Antena Espiral de Arquímedes, la cual se compara con la antena espiral de Arquímedes aquí fabricada, se analizan los resultados obtenidos en las mediciones prácticas con el analizador MiniVNA-TINY, en cuanto al parámetro S11 y posterior haciendo pruebas de recolección de energía electromagnética con la ayuda de los circuitos del trabajo realizado por el Ing. Darío Balarezo en su Investigación [4], cabe indicar que las mediciones se realizaron utilizando los mismos equipos y bajo las mismas condiciones.

A continuación en las figuras 4.29 se muestran las Antenas fabricadas a comparar.



(a) Antena Ing. Walter Criollo (b) Antena Ing. Félix Reinoso



(c) Vista trasera antenas

Figura 4.29: Antenas Espiral de Arquímedes a comparar

Comparación parámetro S11 Obtenidos en la medición práctica:

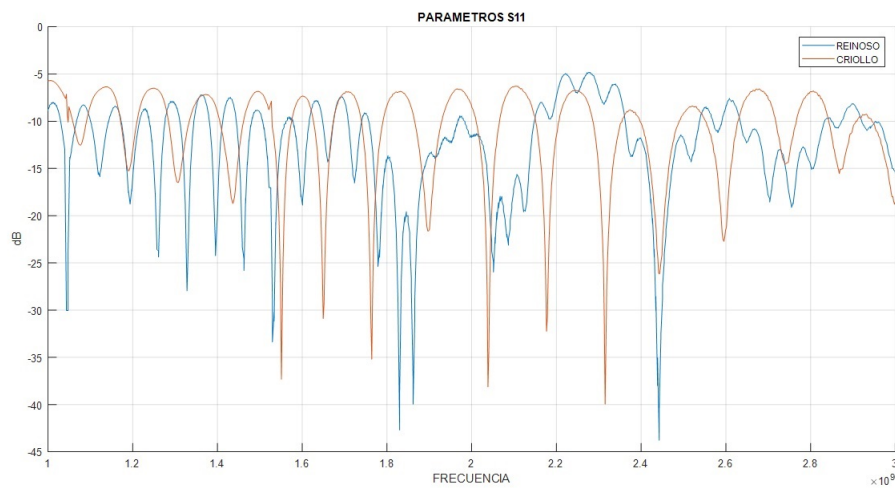


Figura 4.30: Comparativo Resultado medición práctica Parámetro S11 Criollo-Reinoso.

Tal como se muestra en la figura 4.30 se ha realizado la optimización de la Antena elaborada por el Ing. Walter Criollo en su trabajo [8], en cuanto se ha logrado obtener:

1. Antenas multifrecuencia.
2. Desde la frecuencia de 1 GHz hasta 1.7 GHz existe una similitud entre ambas antenas con un pequeño desfase del 1.31 %
3. A partir de la frecuencia de 1.74 GHz la Antena desarrollada en este trabajo presenta un mejor ancho de banda que la antena realizada en [8] en ciertos tramos de frecuencias como son desde 1.74 GHz hasta 2.15 GHz, de 2.3 GHz a 2.5 GHz y en el rango de 2.63 GHz a 2.85 GHz.
4. Los niveles de resonancia en las frecuencias de interés son mucho mayores lo que permite un mejor desempeño de la antena fabricada en este trabajo.

Comparación Recolección Energía Electromagnética:

Dentro de las pruebas realizadas para comprobar el funcionamiento de las Antenas, se hicieron las pruebas de captación de energía electromagnética para la frecuencia de 2.4 GHz (WIFI), conectando las antenas al circuito de captación elaborado por el Ing. Dario Balarezo en su trabajo [4], obteniendo los resultados que a continuación se detallan.

Las pruebas realizadas se hicieron con la antena conectada a través de conector SMA directo al circuito recolector fabricado por el Ing. Dario Balarezo el cual a su salida se conecta a un capacitor de $5 \mu F$ en donde se mide el voltaje de carga del capacitor por un periodo de hasta 2 horas, se realizan las pruebas con el circuito de 2 etapas como se muestra en la figura 4.31



(a) Resultado recolección Antena Espiral de Arquímedes de [8]



(b) Resultado recolección energía electromagnética Antena espiral de Arquímedes fabricada en el presente trabajo

Figura 4.31: Conexiones para la medición de la recolección de Energía Electromagnética antenas a comparar.

La Antena espiral de Arquímedes elaborada en el presente trabajo alcanza a recolectar hasta 1.8 Vdc en 120 min, por lo contrario la Antena elaborada por [8] alcanza un pico máximo de 0.8 Vdc en el mismo tiempo y bajo las mismas condiciones de conexión, estableciendo una optimización para la captación de energía electromagnética; en la tabla 4.10 y la figura 4.32 se muestran los resultados de las mediciones por cada periodo de tiempo.

Tabla 4.10: COMPARACIÓN RESULTADOS RECOLECCIÓN ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA

ETAPAS	TIEMPO	ANTENA CRIOLLO	ANTENA REINOSO
2	30 min	0.5 Vdc	1.5 Vdc
2	60 min	0.8 Vdc	1.6 Vdc
2	120 min	0.8 Vdc	1.8 Vdc

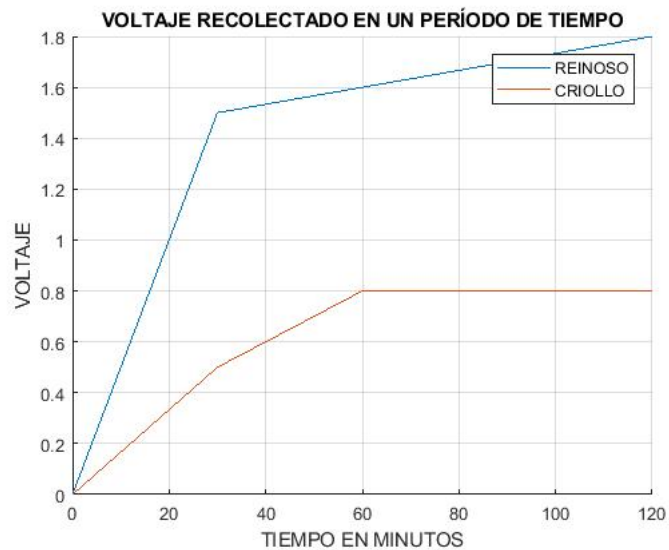


Figura 4.32: Gráfico comparativo resultados de Recolección Energía Electro-magnética entre Antenas Criollo-Reinoso .

4.2.4. Recolección de energía Electromagnética con las Antenas Fabricadas

A continuación se detalla los resultados de recolección energía electromagnética desde una fuente a una frecuencia de 2.4 GHz con la ayuda de los circuitos de recolección de [4] elaborados en 1, 2 y 4 etapas, los circuitos son los que se muestran en la figura 4.33:

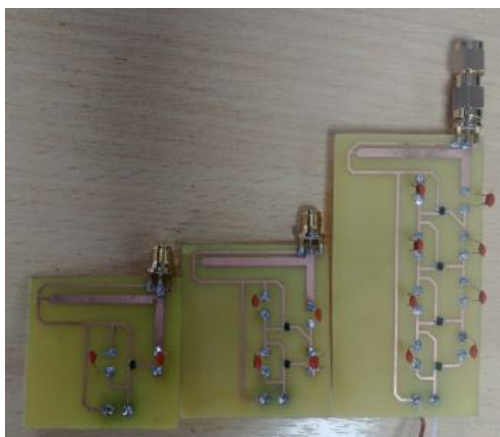
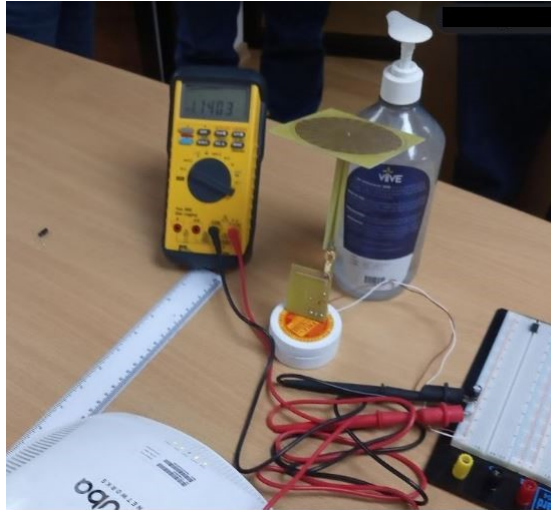


Figura 4.33: Circuitos de recolección de Energía Electromagnética de 1, 2 y 4 etapas desarrollado por Ing. Dario Balarezo [4]

Resultados de la recolección para la Antena Espiral de Arquímedes.

La antena espiral de Arquímedes conectada a dos etapas se analizó anteriormente sometiéndola a comparación con [8], en este sentido, a partir de aquí se analiza los resultados conectando la antena al circuito de [4] para 1 y 4 etapas por un tiempo de 30 min, con la fuente a una distancia de 20 cm y colocando como dispositivo de carga un capacitor de $5\mu F$, los resultados lo podemos ver de una manera mas detallada en la tabla 4.11 y en la figura 4.34.



(a) Antena Espiral de Arquímedes conectada al circuito recolector de 1 etapa



(b) Antena espiral de Arquímedes conectada al circuito recolector de 4 etapas

Figura 4.34: Medición de la Recolección de energía electromagnética con la Antena Espiral de Arquímedes conectadas al circuito elaborado por [4] en diferentes etapas

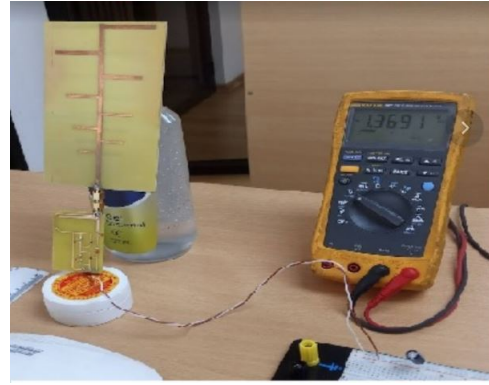
Tabla 4.11: RESULTADO RECOLECCIÓN ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA ANTENA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES.

ETAPA	TIEMPO	VOLTAJE RECOLECTADO
1	30 min	1.14 Vdc
2	30 min	1.41 Vdc
4	30 min	2.48 Vdc

Resultados de la recolección para la Antena Log-Periódica. Siguiendo el mismo esquema de la Antena Espiral de Arquímedes, Se realiza las pruebas de captación de energía con la Antena Log-Periódica, conectando esta a los circuitos fabricados por el Ing. Dario Balarezo en [4] de 1, 2 y 4 etapas como se muestra en la figura 4.35 , a continuación la tabla 4.12 muestra los resultados.



(a) Antena Log-Periódica conectada al circuito de 1 Etapa



(b) Antena Log-Periódica conectada al circuito de 2 etapas



(c) Antena Log-Periódica conectada al circuito de 4 etapas

Figura 4.35: Medición de la Recolección de energía electromagnética con la Antena Log-Periódica conectadas al circuito elaborado por [4] en diferentes etapas.

Tabla 4.12: RESULTADO RECOLECCIÓN ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA ANTENA LOG-PERIÓDICA

ETAPA	TIEMPO	VOLTAJE RECOLECTADO
1	30 min	2.208 Vdc
2	30 min	1.437 Vdc
4	30 min	4.02 Vdc

Los resultados obtenidos son mucho mejores a los conseguidos con la Antena Espiral de Arquímedes y se debe a que el nivel de resonancia en la frecuencia de 2.4 GHz es mayor en la Antena Log-Periódica que en la Antena Espiral de Arquímedes.

5. Capítulo V

5.1. Conclusiones

1. En este trabajo se presentan 2 antenas diseñadas y fabricadas de multifrecuencias y que pueden ser utilizadas para la captación de energía electromagnética en el rango de frecuencias de 1GHz a 3GHz con anchos de bandas considerables, para el caso de la Antena Espiral de Arquímedes llega a obtener hasta $2,11 \times 10^8$ Hz de ancho de banda en las frecuencias entre 1.7 GHz y 1.9 GHz como en la frecuencias entre 2.6 GHz y 2.8 GHz con una pérdida de retorno de hasta -43.79 dB para la frecuencia de 2.44 GHz; en el caso de la Antena Log-Periódica llega a obtener un ancho de banda de hasta 4×10^8 Hz en las frecuencias de 1.3 GHz hasta 1.7 GHz, con una pérdida de retorno de hasta -51.32 dB en la frecuencia de 1.4 GHz, ambas antenas pueden operar en sistemas de comunicación en tecnología 2G, 3G, 4G LTE y WIFI, dependiendo para lo cual se requiera su uso, son además compactas y de bajo costo, que es una ventaja comparadas con las antenas revisadas en la bibliografía donde algunos llegan únicamente hasta la simulación no obteniendo resultados prácticos, en este trabajo se pudo establecer mediciones reales de las antenas fabricadas, sin embargo, es importante señalar que se debe realizar pruebas con equipos de captación de energía que permitan establecer los niveles de recolección de cada una de las antenas a las diferentes frecuencias de funcionamiento, para trabajos futuros se debe considerar trabajar en mejorar el nivel de la ganancia de las antenas.
2. Existe una variación entre la antena simulada y la fabricada que puede deberse a la precisión al momento de la impresión, variaciones que no influye de manera significativa con respecto a las frecuencias de operación.
3. Las antenas fabricadas de acuerdo al diseño son de bajo costo y además de un tamaño que puede ser consideradas para uso en elementos que usualmente se utilizan para conexiones de redes sobre IoT
4. Al momento del diseño de tuvo que recurrir a la optimización con la ayuda del software especializado CST Microwave Studio variando los parámetros de construcción de las antenas, analizando secuencialmente los resultados principalmente del parámetro S11 y del valor del VSWR hasta conseguir resultados óptimos dentro de las frecuencias de funcionamiento diseñadas.
5. La Antena Log-Periódica presenta 4 rangos de frecuencias de resonancias bien definidos con buenos anchos de banda de hasta 400 MHz.

6. La Antena espiral de Arquímedes opera en varias frecuencias, llegando a tener un ancho de banda de hasta 211 MHz en las frecuencias en el orden de 1.7 GHz.
7. Se ha logrado Optimizar la antena espiral de Arquímedes construida por el Ing. Walter Criollo en su trabajo de investigación [8] obteniendo un mejor desempeño en relación a Ancho de banda, Resonancia y Captación de energía electromagnética para una frecuencia de 2.4 GHz.

5.2. Recomendaciones

1. Realizar mediciones prácticas de las antenas fabricadas sobre equipos más robustos en laboratorio especializado que permitan obtener resultados más precisos y analizarlos en comparación a lo obtenido en este trabajo.
2. Combinar las antenas fabricadas con diseños de almacenamiento de energía electromagnética y analizar los resultados que se puede obtener en la captación de energía electromagnética a diferentes frecuencias.
3. Analizar los diseños, fabricando las antenas sobre materiales dieléctricos diferentes y analizar resultados.
4. La cantidad de energía electromagnética que se puede recolectar esta directamente relacionado con la potencia de la fuente, por lo que se recomienda para las pruebas colocar la fuente cerca de la antena, esto se debe principalmente a las limitaciones de apertura de los diodos del circuito de recolección.

6. Bibliografía

- [1] Antenas autocomplementarias. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*.
- [2] Ángel Cardama Aznar, Jordi Romeu Robert, Juan Manuel Rius Casals, Lluís Jofre Roca, Sebastián Blanch Boris, and Miguel Ferrando Bataller. *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.
- [3] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [4] Ing. Dario Balarezo. Optimizacion del sistema de acondicionamiento para un dispositivo de captacion de energia electromagnetica. Master's thesis, Universidad Tecnica de Ambato, 2021.
- [5] Oniet Paz Barros. Antena independiente de la frecuencia, espiral de arquímedes impresa. *Revista Telemática*, 16(3):41–52, 2018.
- [6] David Santiago Blanco Ibalñez, Bryan Javier Cerquera Zambrano, et al. Diseño y simulación de una rectenna para cosechar energía electromagnética a 2.4 ghz. 2020.
- [7] Eric D Caswell. *Design and analysis of star spiral with application to wide-band arrays with variable element sizes*. PhD thesis, Virginia Tech, 2001.
- [8] Walter Criollo. Sistema de captacion de energia electromagnetica para abastecimiento de energia en dispositivos moviles. Master's thesis, Universidad Tecnica de Ambato, 2021.
- [9] Rachit Dana, Parthit Sardhara, Akshay Sanghani, and Prarthan Mehta. A detailed survey of rectenna for energy harvesting: Over a wide range of frequency. In *Optical and Wireless Technologies*, pages 43–55. Springer, 2020.
- [10] R DuHamel and F Ore. Logarithmically periodic antenna designs. In *1958 IRE International Convention Record*, volume 6, pages 139–151. IEEE, 1966.
- [11] Raymond DuHamel and Dwight Isbell. Broadband logarithmically periodic antenna structures. In *1958 IRE International Convention Record*, volume 5, pages 119–128. IEEE, 1966.
- [12] Israel Hinojosa. *Design of wideband arrays of spiral antennas*. PhD thesis, Supélec, 2013.

- [13] D Isbell. Log periodic dipole arrays. *IRE transactions on antennas and propagation*, 8(3):260–267, 1960.
- [14] Jyoti Jain and Abha Sharma. Design of dual band rectangular patch antenna for s-band and c-band applications. *World Journal of Research and Review*, 4(5):262804.
- [15] Richard C Johnson and Henry Jasik. Antenna engineering handbook. *New York, McGraw-Hill Book Company, 1984, 1356 p. No individual items are abstracted in this volume.*, 1984.
- [16] Chia C Kang, Seyi S Olokede, Nor M Mahyuddin, and Mohd F Ain. Radio frequency energy harvesting using circular spiral inductor antenna. In *WAMICON 2014*, pages 1–5. IEEE, 2014.
- [17] Emrullah Karakaya, Fulya Bagci, A Egemen Yilmaz, and Baris Akaoglu. Metamaterial-based four-band electromagnetic energy harvesting at commonly used gsm and wi-fi frequencies. *Journal of Electronic Materials*, 48(4):2307–2316, 2019.
- [18] Mohamed Mansour, Xavier Le Polozec, and Haruichi Kanaya. Enhanced broadband rf differential rectifier integrated with archimedean spiral antenna for wireless energy harvesting applications. *Sensors*, 19(3):655, 2019.
- [19] Jorge Luis Mendoza Chicaiza. Sistema electrónico portátil para la recarga eléctrica de dispositivos móviles mediante la captación de energía electromagnética. B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, 2019.
- [20] José Mezquita Fayos. *Diseño de antenas compactas para aplicaciones de Energy Harvesting*. PhD thesis, 2015.
- [21] Thomas A Milligan. *Modern antenna design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [22] Jorge Morales Lago. *Diseño de una antena espiral de Arquímedes para la frecuencia de 2.4 GHz*. PhD thesis, Universidad Central de Ecuador, 2013.
- [23] Ernesto Ávila Navarro. Diseño, modelado, fabricación y medida de antenas impresas para comunicaciones inalámbricas. *Doctoral, Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales, Universidad Miguel Hernández de Elche, España*, 2008.

- [24] Aaron N Parks and Joshua R Smith. Sifting through the airwaves: Efficient and scalable multiband rf harvesting. In *2014 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID)*, pages 74–81. IEEE, 2014.
- [25] Manuel Piñuela, Paul D Mitcheson, and Stepan Lucyszyn. Ambient rf energy harvesting in urban and semi-urban environments. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 61(7):2715–2726, 2013.
- [26] Alvaro Prieto Poyatos. Diseño de un sistema de captación de energía de señales wifi.
- [27] David M Pozar. *Microwave Engineering 3e*. Wiley, 2006.
- [28] Shashank Priya and Daniel J Inman. *Energy harvesting technologies*, volume 21. Springer, 2009.
- [29] S Venkata Suriyan and KJ Jegadish Kumar. Design of slotted pentagonal structure patch antenna for rf energy harvesting in mobile communication band. In *International Conference on Computer Networks and Communication Technologies*, pages 527–535. Springer, 2019.
- [30] Mansour Taghadosi, Lutfi Albasha, Nasser Qaddoumi, and Mai Ali. Miniaturised printed elliptical nested fractal multiband antenna for energy harvesting applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 9(10):1045–1053, 2015.
- [31] John L Volakis. *Antenna engineering handbook*. McGraw-Hill Education, 2007.

7. Anexos

7.1. Cálculo Permitividad efectiva ϵ_{eff} :

clear all

clc

c=3e8;%velocidad de la luz

fr=3e9;%frecuencia de resonancia (GHz)

h=0.0016;%altura del sustrato (m)

er=4.3;%dielectrico

w=(c/(2*fr))*sqrt(2/(er+1))

Eeff=((er+1)/2)+(((er-1)/2)*(1+(12*(h/w))^{-1/2}))

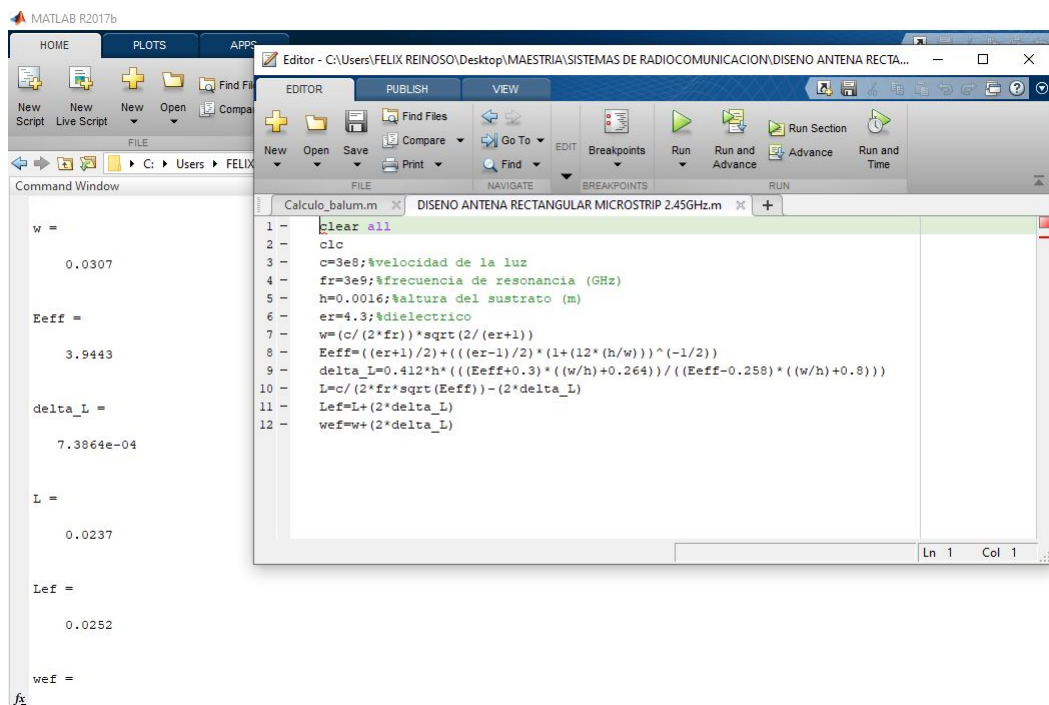


Figura 7.1: Configuración en Matlab para el cálculo de la Permitividad efectiva.

7.2. Configuración MATLAB calculo de parámetros para diseño de BALUN

Z0=50;

ZL=180;

c0=3e11;

L=100;

er=4.3;

```

h=1.6;
wig=18; %valor propuesto//ancho inicial plano de tierra
Zig=10; %valor propuesto // impedancia inicial plano de tierra
GHz=1e12;
N=600; %numero de puntos
%CALCULO EN ANCHO DE LAS LINEAS EN LOS EXTREMOS %
A=Z0./60*sqrt((er+1)/2)+(er-1)/(er+1)*(0.23+0.11/er);
B=377*pi./(2*Z0.*sqrt(er));
w_d1=8*exp(A)/(exp(2*A)-2);
w_d2=2/pi*(B-1-log(2*B-2)+(er-1)/(2*er)*(log(B-1)+0.39-0.61/er));
if w_d2>2
w_d=w_d2;
else w_d=w_d1;
end
wi=round(w_d*h); %ANCHO INICIAL DE LA LINEA MICROSTRIP
A=ZL/2./60*sqrt((er+1)/2)+(er-1)/(er+1)*(0.23+0.11/er); %impedancia cae a
la mitad
B=377*pi./(2*ZL/2.*sqrt(er)); %dos lineas paralelas
w_d1=8*exp(A)/(exp(2*A)-2);
w_d2=2/pi*(B-1-log(2*B-2)+(er-1)/(2*er)*(log(B-1)+0.39-0.61/er));
if w_d2>2
w_d=w_d2;
else w_d=w_d1;
end
wf=w_d*h/2; %ANCHO DE LAS LINEAS PARALELAS
z=0:L/N:L;
alpha=1/L*log(ZL/2/Z0); Z=Z0*exp(alpha*z); %Distribucion de impedancias de
la microstrip
%DISTRIBUCION PROPUESTA EN EL PLANO DE TIERRA %
alpha_g=(1/L)*log(ZL/2/Zig); %alfa para la distribucion del plano
Zg=Zig*exp(alpha_g*z);
A=Zg./60*sqrt((er+1)/2)+(er-1)/(er+1)*(0.23+0.11/er);
B=377*pi./(2*Zg.*sqrt(er));
w_d1g = 8.*exp(A)./(exp(2.*A)-2); w_d2g=2/pi*(B-1-log(2.*B-2)+(er-1)/(2*er)*(log(B-
1)+0.39-0.61/er));
w_dg=zeros(1,length(z));
for i=1:length(z)
if w_d1g(i)<2 && w_d2g(i)<2
w_dg(i)=w_d1g(i);

```

```

elseif w_d1g(i)<2 && w_d2g(i)>2
w_dg(i)=w_d2g(i);
elseif w_d1g(i)>2 && w_d2g(i)<2
w_dg(i)=w_d2g(i);
else w_d1g(i)>2&&w_d2g(i)>2;
w_dg(i)=w_d2g(i);
end
end
w2=w_dg.*h/2;
figure()
plot(z,w2/2,"b",z,-w2/2,"b")
grid on;
% %LINEA MICROSTRIP %
A=Z./60*sqrt((er+1)/2)+(er-1)/(er-1)*(0.23+0.11/er);
B=377*pi./(2*Z.*sqrt(er));
w_d1=8.*exp(A)./(exp(2*A)-2);
w_d2=2/pi*(B-1-log(2.*B-2)+(er-1)/(2*er)*(log(B-1)+0.39-0.61/er));
h1=h;
w1_d=zeros(1,length(z));
w1=zeros(1,length(z));
h11=zeros(1,length(z));
for i=1:length(z)
if w_d2(i)>2
w1_d(i)=w_d2(i);
else w1_d(i)=w_d1(i);
end
w1(i)=w1_d(i)*h1;
h11(i)=h1;
h1=h/2+h/2*(((w2(i)/w1(i))^(w1(i)/h))-1)/(((w2(i)/w1(i))^(w1(i)/h))+1);
end
hold on;
plot (z,w1/2,"k",z,-w1/2,"k") xlabel("longitud del adaptador[mm]");ylabel("ancho[mm]");
h1=h11;
figure()
grid on
hold off;

```

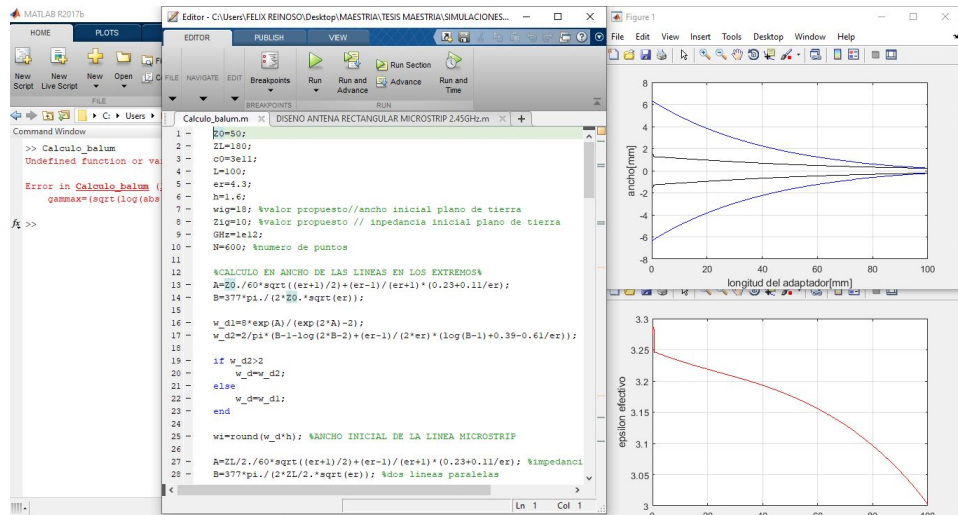


Figura 7.2: Configuración Matlab para cálculo de Parámetros para diseño del Balun.

7.3. Configuración MATLAB para calculo longitud de la linea de alimentación primer dipolo Antena Log-Periódica:

```

clear all
clc
c=3e8;%velocidad de la luz
fr=3e9;%frecuencia de resonancia (GHz)
h=0.0016;%altura del sustrato (m)
er=4.3;%dielectrico
w=(c/(2*fr))*sqrt(2/(er+1))
Eeff=((er+1)/2)+(((er-1)/2)*(1+(12*(h/w))-1/2))
delta_L=0.412*h*(((Eeff+0.3)*((w/h)+0.264))/((Eeff-0.258)*((w/h)+0.8)))
L=c/(2*fr*sqrt(Eeff))-(2*delta_L)
Lef=L+(2*delta_L)  wef=w+(2*delta_L)

```

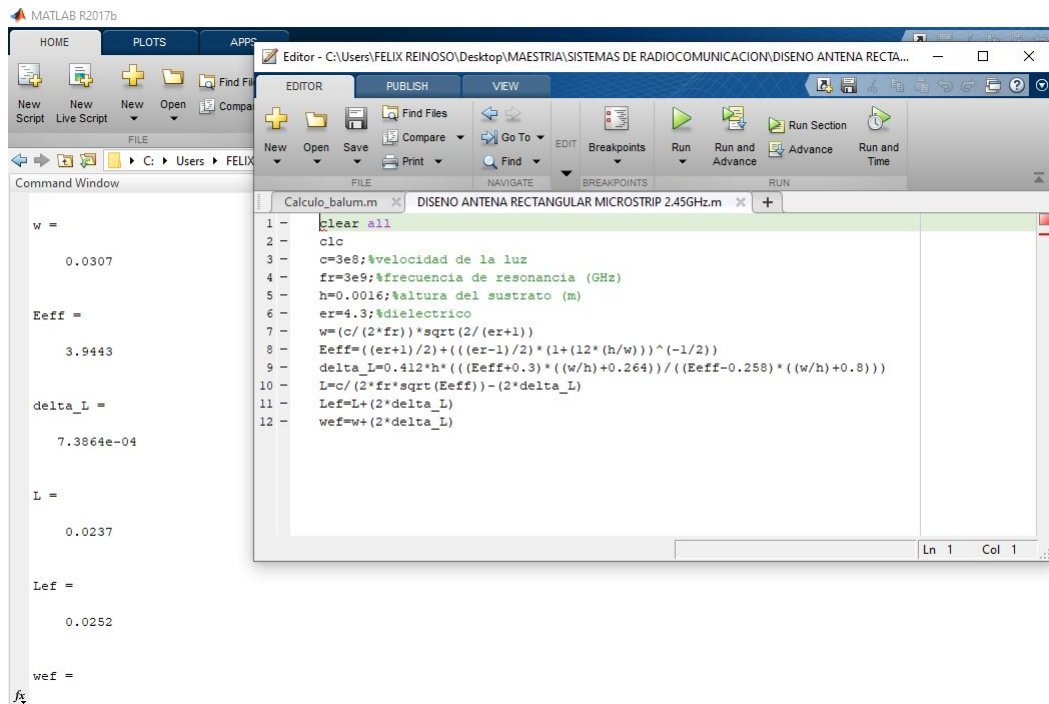
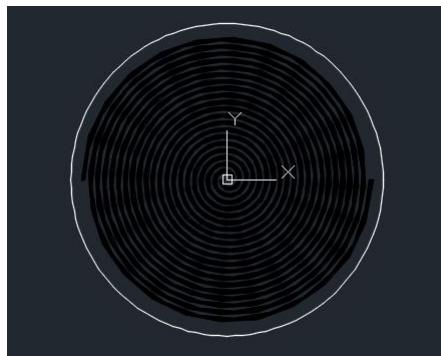


Figura 7.3: Configuración Matlab para calculo longitud primer dipolo Antena Log-Periódica

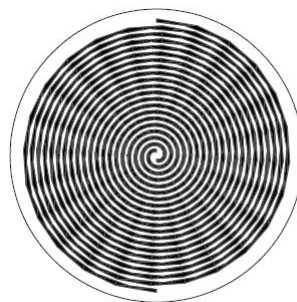
7.4. Proceso de Fabricación de Antenas

Ambas antenas fueron enviadas a fabricar sobre sustrato FR4 a la ciudad de Quito en la empresa APM que tiene una gran experiencia, trabajan de manera artesanal, para lo cual se enviaron los diseños con las dimensiones obtenidas en el Software CST Microwave Studio, los cuales fueron exportados a Autocad para luego pasar a PDF y poder enviar para la impresión.

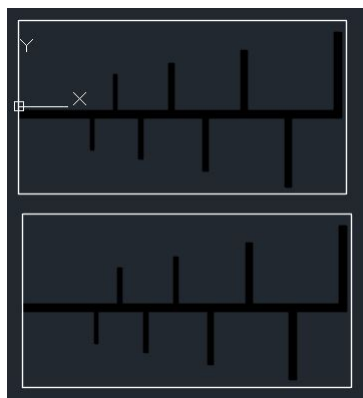
La comunicación se la realizó mediante correo electrónico debido a las limitaciones de movilidad por tema de la pandemia por COVID-19, en las figuras 7.4 se muestran los diseños en Autocad y luego en PDF de ambas antenas, información que fue remitida con las debidas explicaciones a la empresa encargada de la impresión sobre el sustrato.



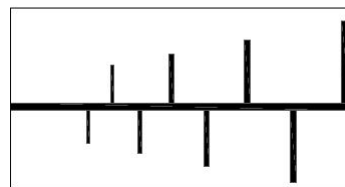
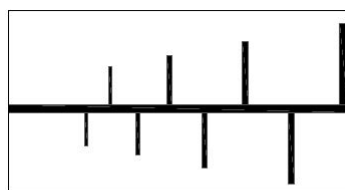
(a) Antena Espiral de Arquímedes en Autocad



(b) Antena espiral de Arquímedes en PDF



(c) Antena Log-Periódica en Autocad



(d) Antena Log-Periódica en PDF

Figura 7.4: Diseño de Antenas en Autocad y PDF para fabricación