



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA PLANA ALIMENTADA
CON UNA LINEA MICROSTRIP EN LA BANDA DE ONDAS
MILIMÉTRICAS PARA 5G**

**Trabajo de Titulación para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Autor:

Cisneros Quishpe Sheyla Estefania

Tutor:

Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda PhD.

Riobamba, Ecuador 2022

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, Sheyla Estefania Cisneros Quishpe, con cédula de ciudadanía 0504083783, autora del trabajo de investigación titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA PLANA ALIMENTADA CON UNA LINEA MICROSTRIP EN LA BANDA DE ONDAS MILIMÉTRICAS PARA 5G**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 23 de agosto del 2022.



Sheyla Estefania Cisneros Quishpe
C.I:0504083783

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL;

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA PLANA ALIMENTADA CON UNA LINEA MICROSTRIP EN LA BANDA DE ONDAS MILIMÉTRICAS PARA 5G**, presentado por **Sheyla Estefanía Cisneros Quishpe**, con cédula de identidad número 0504083783, certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 23 de agosto de 2022.

Mgs. José Luis Jinez Tapia
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO


Firma

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Firma



PhD. Manuel Antonio Meneses Freire
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Firma



PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda
TUTOR

Firma



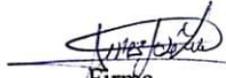

Sheyla Estefanía Cisneros Quishpe
C.I: 0504083783

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA PLANA ALIMENTADA CON UNA LINEA MICROSTRIP EN LA BANDA DE ONDAS MILIMÉTRICAS PARA 5G**, presentado por **Sheyla Estefania Cisneros Quishpe**, con cédula de identidad número 0504083783, bajo la tutoría de PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 23 de agosto de 2022

Mgs. José Luis Jinez Tapia
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO


Firma

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Firma



PhD. Manuel Antonio Meneses Freire
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Firma





Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **CISNEROS QUISHPE SHEYLA ESTEFANIA** con CC: **0504083783**, estudiante de la Carrera **ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA PLANA ALIMENTADA CON UNA LÍNEA MICROSTRIP EN LA BANDA DE ONDAS MILIMÉTRICAS PARA 5G**", cumple con el 4%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 10 de Agosto de 2022



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS RAMIRO
PENAFIEL OJEDA**

Dr. Carlos Peñafiel
TUTOR(A) TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado especialmente a mi Madre Norma Quishpe por ser el pilar fundamental en mi vida, por brindarme su amor su apoyo y su tiempo, porque cuando estuve lejos nunca faltó una llamada de mi Madre para seguirme motivando a seguir con todo este proceso.

A mi hijo Eithan que es mi motivación día a día para continuar con mis estudios, que con un abrazo y un beso llena mis días de felicidad.

A mi esposo Edward por ser una ayuda incondicional para mi hijo y para mi.

Sheyla E. Cisneros Q.

AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios por haberme elegido su Hija, por darme una familia bendecida y por no dejarme sola en mi caminar.

A mis Padres Norma y Milton por apoyarme durante toda mi vida especialmente a mi Madre por enseñarme tantas cosas buenas y porque siempre estuvo conmigo.

A mi esposo Edward y a mi hijo Eithan por ese apoyo que me han brindado, por formar la familia bendecida que Dios lo aprobó.

A mis hermanos Rodrigo y Katty que siempre han estado conmigo enseñándome que es lo bueno y lo malo, especialmente a Katty que me ha fortalecido espiritualmente con sus palabras de aliento.

Sheyla E. Cisneros Q.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	19
1.2. OBJETIVOS.....	20
CAPÍTULO II.....	21
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. ESTADO DEL ARTE	21
2.2. FUNDAMENTACIÓN TEORICA	28
CAPÍTULO III.....	41
3. METODOLOGÍA	41
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	41
3.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	41
3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MÉTRICAS DE RENDIMIENTO	41
3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	43
Fuente: Elaboración propia	43
3.5. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS	43
CAPÍTULO IV.....	49
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1. ANALISIS DE LA ANTENA DISEÑADA SIN RANURAS	49

4.2. ANALISIS DE LA ANTENA DISEÑADA Y COMPARACIÓN CON ANTENA INICIAL SIN RANURAS	52
4.3. ANALISIS DE LA ANTENA PROPUESTA COMPARADA CON UNA ANTENA CONVENCIONAL	60
CAPÍTULO V	67
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
5.1. CONCLUSIONES	67
5.2. RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Figuras de mérito en antenas microstrip.	37
Tabla 2. Operacionalización de las variables.....	43
Tabla 3. Variables de dimensiones del diseño	48
Tabla 4. Estadísticas de grupo para Ancho de banda.....	61
Tabla 5. Prueba de normalidad de la variable Ancho de banda.....	62
Tabla 6. Estadísticas de grupo para Ganancia.....	62
Tabla 7. Pruebas de normalidad para la variable ganancia.....	63
Tabla 8. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon.....	64
Tabla 9. Estadísticos de prueba de la variable Ganancia	64
Tabla 10. Estadísticas de grupo para Eficiencia	65
Tabla 11. Prueba de muestras independientes para Eficiencia	66
Tabla 12. Pruebas de normalidad para la variable Eficiencia.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Agrupación normal de antena microstrip. b) Agrupación 2x2 de antena microstrip con conductor curvo elíptico concéntrico [9].	23
Figura 2. A) Antena microstrip de parche rectangular con línea de transmisión [11].	25
Figura 3. Antena con bocina reflectora con base microstrip [16].	27
Figura 4. Pérdidas de retorno (S_{11}) como resultado del modelo original [17].	27
Figura 5. Pérdidas de retorno (S_{11}) como resultado del incremento de un anillo al modelo original [17].	28
Figura 6. Espectro electromagnético [19].	30
Figura 7. Diagrama de radiación tridimensional [19].	31
Figura 8. Diagrama de radiación bidimensional en coordenadas polares [19].	32
Figura 9. Diagrama de radiación bidimensional en coordenadas cartesianas [19].	32
Figura 10. Polarización lineal [23].	33
Figura 11. Polarización circular [23].	34
Figura 12. Polarización elíptica [23].	34
Figura 13. Antena Microstrip [22].	35
Figura 14. Métodos de alimentación de antenas microstrip. (a) Línea microstrip, (b) Sonda coaxial, (c) Acoplamiento de proximidad, (d) Acoplamiento por apertura [5].	36
Figura 15. Elipse de polarización [29].	38
Figura 16. Geometría de la antena diseñada: Patch superior.	46
Figura 17. Geometría de la antena diseñada: Líneas de alimentación.	46
Figura 18. Geometría de la antena diseñada sin ranuras: Patch superior.	47
Figura 19. Dimensiones de la antena diseñada: (a) Vista frontal (b) Vista lateral	47
Figura 20. Dimensiones de las líneas de alimentación	48
Figura 21. Parámetro S_{11} y S_{12} sin combinación de puertos	49
Figura 22. Parámetro S_{11} y S_{12} con combinación de puertos	50
Figura 23. Impedancia Z_{11} real e imaginaria y Z_{12} real e imaginaria sin combinación de puertos para modelo sin ranuras	50
Figura 24. Impedancia Z_{11} real e imaginaria con combinación de puertos para modelo sin ranuras	51

Figura 25. Diagrama de radiación de diseño sin ranuras: (a) frontal en 3D, diagrama de radiación en coordenadas polares (b)Ganancia, (c)Directividad	51
Figura 26. Diagrama de radiación de diseño sin ranuras: (a) lateral en 3D.....	52
Figura 27. Parámetros S_{11} y S_{12} sin combinación de puertos	52
Figura 28. Parámetros S_{11} y S_{12} con combinación de puertos	53
Figura 29. Impedancia Z_{11} real e imaginaria y Z_{22} real e imaginaria sin combinación de puertos	54
Figura 30. Impedancia Z real e imaginaria con combinación de puertos	54
Figura 31. Diagrama de radiación en 3D, (a) imagen frontal, (b) imagen en perspectiva.....	55
Figura 32. Diagrama de radiación en el plano polar a frecuencia de resonancia 45 GHz con puertos combinados (a)Ganancia, (b) Directividad	55
Figura 33. Diagrama de radiación en 3D $F=45$ GHz sin combinación de puertos, (a) imagen frontal, (b) imagen en perspectiva	56
Figura 34. Diagrama de radiación en el plano polar, puertos no combinados (a) Ganancia, (b) Directividad.....	57
Figura 35. Diagrama de radiación en el plano polar, puertos combinados a 44,75 GHz (a) Ganancia, (b)Directividad.....	57
Figura 36. Diagrama de radiación en el plano polar, sin combinación de puertos a 44,75 GHz (a) Ganancia, (b)Directividad.....	58
Figura 37. Diagrama de radiación en el plano polar, con combinación de puertos a 45,85 GHz (a) Ganancia, (b)Directividad	58
Figura 38. Diagrama de radiación en el plano polar, puertos no combinados a 45,85 GHz (a) Ganancia, (b)Directividad.....	59
Figura 39. Relación de Onda estacionaria de Voltaje VSWR a 45 GHz.....	59
Figura 40. Media Ancho de banda: Antena propuesta vs. Antena convencional	61
Figura 41. Media Ganancia: Antena propuesta vs. Antena convencional	63
Figura 42. Media Eficiencia: Antena propuesta vs. Antena convencional.....	65

RESUMEN

El desarrollo de la tecnología actual en todos los ámbitos de la vida y especialmente en el campo de las telecomunicaciones viene de la mano con nuevas aplicaciones y nuevos dispositivos que ofrecen al usuario interactuar con esta nueva era tecnológica de manera cotidiana; cada vez son más comunes los términos relacionados al internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial y sistemas de comunicación basados en las redes 5G, en todo esto, un elemento crucial parte de los dispositivos de la actualidad y del futuro son las antenas que deben adaptarse para recibir y transmitir a más velocidades y mayor cantidad de información; en este proyecto, por lo tanto, se plantea el diseño y simulación de una antena tipo planar con alimentación micro strip que permita operar en rangos de frecuencia de ondas milimétricas 5G.

La antena propuesta ha sido simulada utilizando el software simulador CST Studio Suite, que opera a una frecuencia de resonancia de 45 GHz, la estructura ha sido diseñada sobre un sustrato de permitividad dieléctrica $\epsilon_r = 2,2$, partiendo de estudios previos de antenas tipo parche y con diferentes agrupaciones, considerando, además, el uso de líneas de alimentación microstrip por aproximación.

El documento abarca 5 capítulos. En el primer capítulo se plasma el planteamiento del problema, el objetivo general y específicos a alcanzar. En el segundo capítulo se realiza un estudio del estado del arte. Avanzando al tercer capítulo, se detalla el procedimiento utilizado para el diseño y simulación de la estructura. Posteriormente, en el capítulo cuatro se exponen los resultados y la operación de la antena diseñada. Finalmente, en el capítulo cinco se determinan las conclusiones y recomendaciones a las que se ha llegado con éste proyecto de investigación.

Palabras clave: antena microstrip, ondas milimétricas, ranura en L, tecnología 5G.

ABSTRACT

Actual technology development for all life environments and specially around telecommunications field is coming with new applications and new devices that offer to the user to interact with this new era of technology day by day; every time are more common terms or words related to the Internet of Things (IoT), artificial intelligence and communication systems based on 5G networks, for this fulfillment, an special element part of all of these new devices are the antennas, which must be adapted for higher speed on reception and transmission and support even more data flow information; therefore, this project plans a planar antenna design and simulation with microstrip line feeder allowing its operation among milimetric waves 5G frequency ranges.

Proposed antenna has been simulated using CST Studio Suite Simulation Software, antenna operates at 45 GHz frequency, the structure has been designed over substrate with $\epsilon_r=2,2$, based on previous studies about patch antennas and with several arrays types, besides taking in account the use of approach microstrip line feeding.

This document includes 5 chapters. The first one explains the problems, and general and specific objectives to be reached. In second chapter is realized a state of the art study. Beyond third chapter, it is detailed procedure used for designing and simulation for the structure. Inside fourth chapter is exposed all results and operation of the antenna designed. Finally, in fifth chapter are defined conclusions and recommends that have been thrown out from this investigation project.

Key words: L-slot, microstrip antenna, milimetric waves, 5G technology.



Reviewed by:
Danilo Yépez Oviedo
English professor UNACH
0601574692

INTRODUCCIÓN

La tecnología ha evolucionado desde tiempos inmemoriales, especialmente en estas últimas décadas donde se ha visto un pronunciado desarrollo en lo que respecta a sistemas de comunicación inalámbrica, robótica, inteligencia artificial, computación y más; todo esto en parte resultado directo del avance de la sociedad y de la tecnología. No obstante, cabe mencionar que cada instrumento o aparato tecnológico que se tiene a disposición en la actualidad, es el producto de años de desarrollo de cada uno de los componentes electrónicos que están presentes dentro de los mismos. Partiendo de los años 60, con el desarrollo de la informática comercial, la aparición de los primeros sistemas operativos y el empleo de la centralización de la información para la conexión de ordenadores, surgen en la década de los 70, los primeros enlaces para transmisión de datos y redes de ordenadores con canales compartidos mediante la difusión de mensajes, comienza la producción en masa de los primeros microprocesadores construidos por la corporación Intel, lo que inicia un camino hacia el desarrollo de nuevas tecnologías computacionales. Al mismo tiempo, empiezan a destacar las investigaciones para la implementación de redes de comunicación basadas en el protocolo Ethernet y Arpanet, la siguiente década destacan los avances computacionales con respecto a la velocidad de procesamiento y mejoras de la interfaz gráfica; siendo esto el comienzo de la expansión tecnológica a nivel mundial gracias al uso del Internet en el ámbito comercial, hecho que se considera como un renacimiento de las telecomunicaciones. A partir de este punto el internet pasa a formar parte importante en la vida de las personas. A comienzos del siglo XXI como ya se preveía el Internet se popularizó en todo el mundo y van sobresaliendo los avances relacionados al desarrollo de redes de alta velocidad con conexiones de banda ancha e inalámbricas [1].

La nueva era tecnológica nace con los términos relacionados al internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial y sistemas de comunicación basados en las redes 5G. De entre las aplicaciones de esta tecnología constan y no se limitan a la realidad aumentada, robótica, conducción de vehículos no tripulados, redes neuronales, etc.; esto conlleva que los usuarios requieran de dispositivos con altas capacidades de almacenamiento y procesamiento, altos niveles de cómputo para diferentes aplicaciones, altos recursos, y un sistema de interacción para realizar funciones de almacenamiento y procesamiento de datos en la nube. Para tales actividades se

requiere entonces de una red que sea capaz de trabajar en tiempo real a una gran velocidad para ejecutar todo el intercambio de información requerido [2].

Desde la primera generación de los sistemas de comunicación (1G), las redes inalámbricas han evolucionado y cambiado muchos aspectos de la vida, sociedad, cultura, política y economía, hoy se tienen redes que presentan nuevas y mejores arquitecturas, cobertura, movilidad, seguridad, privacidad, eficiencia, y más; por lo que la comunidad académica e industrial ha venido trabajando en el desarrollo de estándares y protocolos, hasta llegar a la estandarización y comercialización de la tecnología 5G en el año 2019. Las características principales de la comunicación 5G son: ancho de banda mejorado para dispositivos móviles, comunicaciones ultra confiables de baja latencia y comunicaciones masivas de tipo máquina [2].

Para la implementación de las redes de telecomunicación de quinta generación en los dispositivos se necesita de antenas que puedan adaptarse a esta tecnología, donde las características de la antena determinan la capacidad del sistema de donde están implementadas. El ancho de banda de trabajo de la comunicación 5G, dependiendo de la aplicación puede estar en el rango de 800-900 MHz, 2.45-3.5 GHz o en ondas milimétricas. Hasta la década del 2010 las antenas eran consideradas y tratadas como elementos radiantes simples, pero en la actualidad, los sistemas tienen implementados agrupaciones de antenas que mejoran las prestaciones individuales de cada una de las antenas del grupo [3].

Una antena tipo parche, a pesar de tener algunas desventajas como, las pérdidas en el dieléctrico, bajas potencias de funcionamiento y un ancho de banda limitado, con respecto a otras antenas; provee en cambio, algunas características muy útiles como pequeñas dimensiones, bajo peso y bajo costo de fabricación, lo que permite su uso en una variedad de aplicaciones actuales. Por lo tanto, el presente trabajo trata sobre el diseño de una antena microstrip con acoplamiento por proximidad, y con mejora de ganancia gracias a la combinación de las técnicas de corte de línea elíptica (elliptical line cut) y ranura en L (L-slot) en la geometría del parche, con lo que se logra que la antena opere a una frecuencia de 45 GHz; es decir dentro del rango de ondas milimétricas para aplicaciones en la tecnología 5G. Adicionalmente, se presenta la simulación de la antena propuesta para comprobar que los resultados obtenidos se corresponden con los valores

de los parámetros planteados inicialmente como son: frecuencia de operación, ancho de banda, diagrama de radiación, y directividad.

Este proyecto se desarrolla por el interés en mejorar las características de las antenas microstrip para que puedan adaptarse a las tecnologías 5G, como es el caso de las siguientes aplicaciones: realidad virtual, comunicación de ciudades inteligentes, automatización de procesos industriales, videojuegos 3D, servicios médicos y militares a distancia, etc.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de comunicación actuales demandan altas velocidades de intercambio de información, por lo que la tecnología 4G será reemplazada por su extensión 5G con el paso del tiempo, la tecnología de quinta generación requiere transmisiones a muy alta frecuencia en ondas milimétricas con un ancho de banda elevado, además debe incorporar grandes densidades de dispositivos conectados a una red, y varias antenas incorporadas en los dispositivos de comunicación [4].

Entre los principales dispositivos beneficiarios la tecnología 5G constan los satélites, misiles, dispositivos móviles, en aplicaciones de aviación y aeronáutica, es así que los sistemas de transmisión y recepción de la información son de vital importancia puesto que aseguran una comunicación efectiva entre dispositivos; por lo tanto, las antenas tipo parche son de elevado interés para la investigación debido a su tamaño reducido. Estas antenas consisten en un elemento radiante hecho de un material conductor, implementado mediante líneas de transmisión, sobre un sustrato dieléctrico que tiene al otro lado un plano de masa [5].

1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Las antenas juegan un papel fundamental en las telecomunicaciones, pues son las encargadas de transmitir o recibir información en forma de ondas electromagnéticas, debido a esto se trata de mejorar su eficiencia, tamaño y velocidad, en este contexto las antenas tipo parche son punto central de investigación y desarrollo.

Los parámetros de interés de una antena son principalmente su ancho de banda de trabajo, su ganancia y su eficiencia, los cuales en el caso de antenas microstrip tienen la desventaja de presentar valores bajos. Para tratar de solucionar estos problemas, en la teoría se ha propuesto diferentes formas de diseño de la antena tipo parche para mejorar estas características.

Los diseños más comunes para alimentar la antena tipo parche son: mediante una línea microstrip y cable coaxial. En [6] se propone usar el acoplamiento de proximidad el cual usa dos capas de substratos con la línea microstrip en la capa inferior y el parche en la parte superior. La selección de los parámetros del substrato incrementará el ancho de banda de la antena. Además, se plantea modificar el diseño de la agrupación de parches, mediante las técnicas de corte de línea elíptica y ranura en L, que ayudarán a aumentar la ganancia y directividad de la antena.

Las ondas milimétricas (mmW), son ondas de frecuencias comprendidas en el rango de 30 GHz a 300 GHz, consideradas en el espectro como Frecuencias Extremadamente Altas (EHF) según la UIT. Esta banda tiene una longitud de onda de uno a diez milímetros, de ahí su nombre. [7]

Debido a la capacidad y velocidad de transmisión requerida para 5G, el uso de sistemas basados en ondas milimétricas (mmW), supone una solución muy promisoría para la entrega eficiente de datos de alta capacidad [7].

1.2. **OBJETIVOS**

1.2.1. **OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y simular una antena plana alimentada con una línea microstrip en la banda de ondas milimétricas para 5G.

1.2.2. **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un estudio del estado del arte con array de antenas en ondas milimétricas.
- Simular la antena diseñada en el software CST Studio y analizar el ancho de banda, ganancia y eficiencia de la antena.
- Comparar los valores obtenidos de la propuesta de diseño con el método convencional y validar los resultados.
- Redactar las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo de este proyecto para aportar nuevas ideas a futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ESTADO DEL ARTE

La tecnología 5G es conocida por su velocidad de comunicación de hasta 20 veces mayor que su predecesor 4G. La frecuencia de operación de esta tecnología está en el rango de los 24 GHz a 86 GHz, denominadas como ondas milimétricas. Para un funcionamiento correcto de ésta tecnología se requiere de antenas con características altas de ganancia, rendimiento, directividad y amplios anchos de banda; todo esto representa desafíos de diseño importantes con el fin de evitar pérdidas de propagación y la sensibilidad de bloqueo que aparecen en los enlaces que trabajan en ondas milimétricas. La alta eficiencia espectral es necesaria para evitar los problemas de atenuaciones provocadas por la lluvia la absorción de señales en la atmósfera terrestre y a la poca capacidad de atravesar superficies o estructuras de edificios. Para las aplicaciones de comunicaciones en bandas milimétricas existen diferentes tipos de antenas que operan con efectividad, entre las que podemos encontrar: antenas multihaz pasivas, matrices de antena en fase y antenas multihaz activas [8].

La interconexión de dispositivos móviles actuales con muy alta tasa de datos, muy baja latencia, más capacidad y gran calidad de servicio, exigen a la comunidad científica la exploración de nuevas alternativas en el diseño de antenas; adicionalmente, el desafío de integrar antenas en estructuras con tamaños reducidos para la interconexión de cada objeto con el internet (Internet de las cosas, IoT), requiere de compartir el espectro sin que haya interferencias en las telecomunicaciones. Por tal motivo, una solución a este inconveniente ha sido el desarrollo de una nueva tecnología que permita reutilizar las bandas de frecuencias atribuidas a otros servicios y trabajar sin causar interferencias entre ellos; tal solución se conoce como la tecnología UWB (Ultra-Wideband), que proporciona comunicaciones inalámbricas de corto alcance.

Así, las antenas con tecnología UWB (Ultra-Wideband), aunque difíciles de lograr, se vuelven muy útiles para sistemas 5G. De modo general, las antenas tipo parche con tecnología microstrip son muy comúnmente utilizadas, aunque no son las más adecuadas para temas de multi-servicio debido a sus limitadas características.

Para aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) la Teoría de Modos Característicos TCM se vuelve una gran aliada; mediante su análisis, se han diseñado nuevos modelos RFID. Por ejemplo, la nueva antena RFID para etiquetar latas metálicas de uso comercial. La etiqueta se diseñó para tomar ventaja de la estructura de la lata metálica como radiador principal.

En [9] se diseña tres antenas microstrip basadas en la misma forma de parche, pero con agrupaciones diferentes. A continuación, se menciona lo obtenido para el diseño de antena tradicional de un solo parche y para una agrupación lineal de antenas microstrip con una alimentación por contacto o línea microstrip y conductor curvo. El material del dieléctrico es teflón, línea de alimentación de oro, y el acople, el plano a tierra, los parches de cobre. En la agrupación microstrip cada parche es conectado en diferente sentido, dos de ellos están más alejados de la línea de transmisión, y se ha implementado una línea de alimentación en forma de T.

En la Figura 1(a) se puede visualizar una propuesta que consiste de un parche que se forma por dos conductores elípticos concéntricos y curvos que están unidos por líneas microstrip, como se puede observar, tanto el sustrato y como el plano de tierra tienen forma rectangular; esta propuesta, se convierte en una base para desarrollar los arreglos y presentan una polarización circular y se utilizan para aplicaciones móviles. Esta antena es la base para diseñar algunos arreglos de 2, 3 y 4 elementos.

En el diseño que se puede visualizar en la Figura 1(b) se encuentra un arreglo de antena formado por cuatro parches localizados sobre el plano XY, pero están ubicados en sentidos opuestos, dos de los parches están más alejados de la línea de transmisión y con una línea de alimentación implementada en forma de T, las medidas pueden variar conforme al material utilizado.

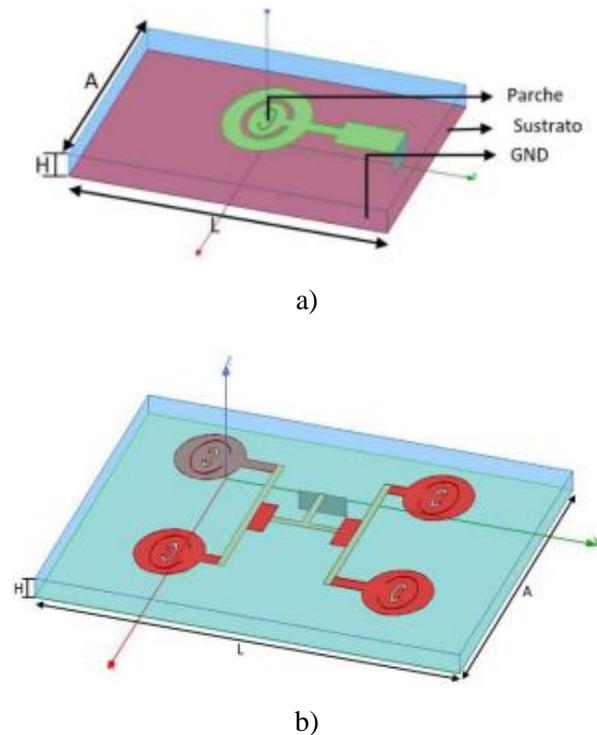


Figura 1. a) Agrupación normal de antena microstrip. b) Agrupación 2x2 de antena microstrip con conductor curvo elíptico concéntrico [9].

Con este diseño se logra aumentar la directividad de la agrupación de antenas, pues se obtiene un haz más estrecho. Tiene la ventaja de que se pueden diseñar lóbulos laterales del conductor más pequeños mientras aumenten el número de parches de la antena. Los resultados obtenidos son un aumento del rendimiento de la agrupación en comparación a un diseño convencional de una sola antena. Esto se evidencia al comparar el valor del coeficiente de reflexión S_{11} , donde se tiene un valor de -55.09 dB para una antena tradicional y -55.09 para una agrupación microstrip. En referencia al ancho de banda se obtuvo mejoras donde, para el caso de una antena simple el ancho de banda es del 11.23% y para la agrupación es del 12.11%. Así mismo, para la ganancia se obtuvo un valor de 6.6 dB para una antena normal y 10.1 para una agrupación. Concluyendo así, que las agrupaciones de antenas ayudan a mejorar las características de radiación.

En [10] se propone el diseño de una agrupación de antenas de microcinta de 2x2, con polarización circular (PC) y alimentación por proximidad en dos capas para su utilización en la

banda de ondas milimétricas de 60 GHz, exponiendo los resultados de las simulaciones del campo electromagnético HFSS, del cual se puede evidenciar un ancho de banda 11.7 GHz en relación con las pérdidas de retorno ($S_{11} \leq -10$ dB), y de 8.98 GHz en relación con la polarización circular ($RA \leq 3$ dB). Adicionalmente se pudo obtener una ganancia máxima de 11.0 dB, proporcionando una alternativa mucho más económica, efectiva y con propiedades de radiación satisfactorias, a la vez cumpliendo con las exigencias de las comunicaciones a tan altas frecuencias.

Varias de las antenas microstrip son fabricadas para funcionar con altas frecuencias en la banda de 60 GHz, obteniendo longitudes de onda de valor de decenas de milímetros, altos valores de directividad y ganancia. Si bien es una ventaja trabajar con estas frecuencias nace el inconveniente de la construcción de la antena ya que se necesita de alta precisión para trabajar con materiales de pequeñas dimensiones. Además, se determinó que la permitividad del sustrato está directamente relacionada con el aumento o disminución del parámetro S_{11} (coeficiente de reflexión del puerto de salida) [11]. La configuración tradicional de las antenas parche de geometría rectangular se observa a continuación.

En la Figura 2 se muestran los componentes y las dimensiones de una antena microstrip tipo parche rectangular con línea de transmisión, misma que opera en la banda de onda milimétrica y se basa en los requisitos de la aplicación en banda de mmW como son: frecuencia de resonancia, rango de operación, ancho de banda, coeficientes de reflexión, relación de onda estacionaria de voltaje y diagrama de radiación. Al definir las dimensiones del parche, entre ellas el grosor (h) que está afectado por el sustrato dieléctrico de permitividad relativa (ϵ_r) ubicado en la parte inferior, éste último incide en las pérdidas de radiación, pues sus características físicas varían dependiendo del sustrato [12].

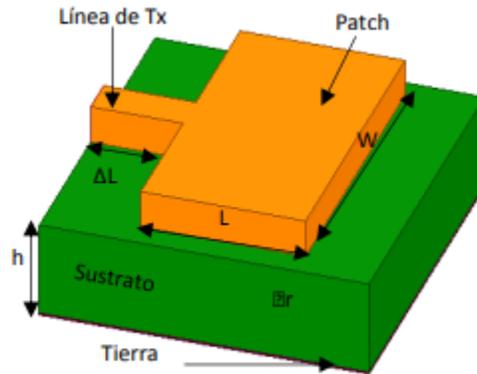


Figura 2. A) Antena microstrip de parche rectangular con línea de transmisión [11].

Las características de diseño buscan trabajar a una frecuencia central de operación de 60 GHz. El material para dieléctrico es el Fr-4, de constante dieléctrica igual a 4.6. El material es un compuesto laminado de epoxi reforzado con vidrio el cual tiene una designación de grado NEMA resistente al fuego. El diseño se simuló en el software ANSYS HFSS cuyos resultados son: ancho de banda de 4.17 % del valor de frecuencia de operación 60.03 GHz, un valor del parámetro VSWR o relación de onda estacionaria de 1.08 que significa un acople de impedancias factible y una ganancia máxima y mínima de -4.97 y -14.76 dB respectivamente.

Diseñar, modelar y simular antenas TSA, que operen a la frecuencia de 30 GHz, es la propuesta de [13] utilizando estructuras de alimentación tipo ranura (acoplada por línea microstrip) y antipodal, incluyendo diferentes análisis de resultados en base a parámetros de acoplamiento y de radiación, al añadir métodos de miniaturización usando criterios típicos de antenas en miniatura tales como el ancho de la banda, la frecuencia de operación y el volumen de la antena, comparando todas y cada una de las propiedades de la antena en función de la reducción de tamaño y comparando las características radiantes de la misma antena pero sin la implementación de una técnica de miniaturización.

En [14] se realiza un análisis comparativo de una antena microstrip diseñada para las frecuencias de funcionamiento de 60 GHz, 67 GHz y 74 GHz. Los parámetros de interés son el coeficiente de reflexión S_{11} , la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR) y el diagrama de

radiación. La finalidad de esta comparativa surge por la demanda de productos tecnológicos de alta calidad y eficiencia que funcionen con la tecnología 5G. Los resultados obtenidos indicaron que a medida que la frecuencia aumentaba los coeficientes de retorno se hacían más bajos (-20 dB, -23.98 dB y -24.49 dB para 60 GHz, 67 GHz y 74 GHz respectivamente). En relación con el VSWR los resultados obtenidos son de 1.0472 dB para 60 GHz, 1.099 dB para 67 GHz y 1.037 dB para 74 GHz. Además, con las medidas calculadas y simuladas de la longitud efectiva, extensión de longitud, largo y ancho del sustrato y tierra para cada frecuencia de diseño, se concluyó que a medida que las frecuencias de resonancia aumentan las dimensiones físicas de la antena disminúan de manera proporcional [14].

Por otra parte, en [15] se detalla el funcionamiento y la disposición geométrica de una agrupación de antenas microstrip de parche rectangular, diseñado para operar en la banda de onda milimétrica, a una frecuencia de 60 GHz, realizando diversas simulaciones en el software ANSYS HFSS y permitiendo seleccionar 5 tipos de agrupaciones que cumplan con los mejores parámetros de diseño como son el coeficiente de reflexión S_{11} igual -24.17 dB, un VSWR de 1.07 dB y un diagrama de radiación semidirectivo con una ganancia máxima de 9 dB, con una frecuencia de operación de 60.04 GHz. Finalmente, una vez analizado los 5 tipos de diseños se pudo obtener valores favorables como una frecuencia de 60.04 GHz, un coeficiente de reflexión (-24.16 dB) equivalente a una mejora del 20.8 %, respecto al valor establecido como meta de estudio y un VSWR (1.07 dB) con una desviación del 0.07 % respecto a un acople perfecto de impedancias, todo esto gracias a la utilización de un sistema de alimentación combinado (serie-paralelo) y una estructura simétrica con geometría cuadrada.

Un nuevo diseño de antenas con base microstrip se presenta en [16], utiliza una bocina compuesta por dos reflectores de hierro con frecuencia de operación central de 60 GHz, el sustrato utilizado es el Fr-4-Epoxy de permitividad 4.4, una alimentación de la línea microstrip dada por un puerto agrupado (lumped port). Los resultados de la simulación muestran una frecuencia de funcionamiento de 60.03 GHz, y los parámetros S_{11} y VSWR de -20.22 dB y 1.7 dB respectivamente.

A continuación, en la Figura 3 se visualiza el diseño de una antena de base microstrip compuesta por dos reflectores con material de hierro en dirección al centro del espacio de

radiación, el plano de tierra GND de cobre, un sustrato de FR4_Epoxy en forma de paralelepípedo rectangular, cuya función es la separación de la línea microstrip con la tierra.

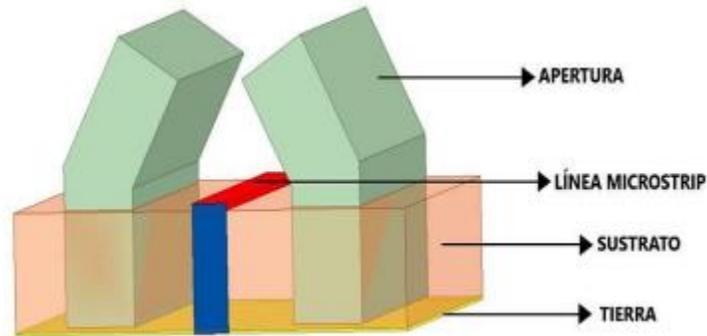


Figura 3. Antena con bocina reflectora con base microstrip [16].

En [17] se diseña una antena plana multibanda y la simulación de la misma en el software CST Microwave Studio, en cuanto a la geometría de la antena, el autor menciona que existen geometrías de antenas multibanda con características muy particulares y que nos entregan muchos comportamientos distintos. Existe un diseño previo donde se modela un diseño con ranura de anillo con una banda dual de operación, cuyo objetivo es obtener una impedancia óptima para las bandas alta y baja; esto acoplado capacitivamente con un parche circular radiante a una línea coplanar de alimentación, la operación de dicha antena va desde 1.97 a 4.25 GHz y desde 4.92 a 5.93 GHz.

La Figura 4 muestra el diseño original de la antena basado en un parche en forma de anillo circular y el resultado de los parámetros de retorno S_{11} en base al diseño original:

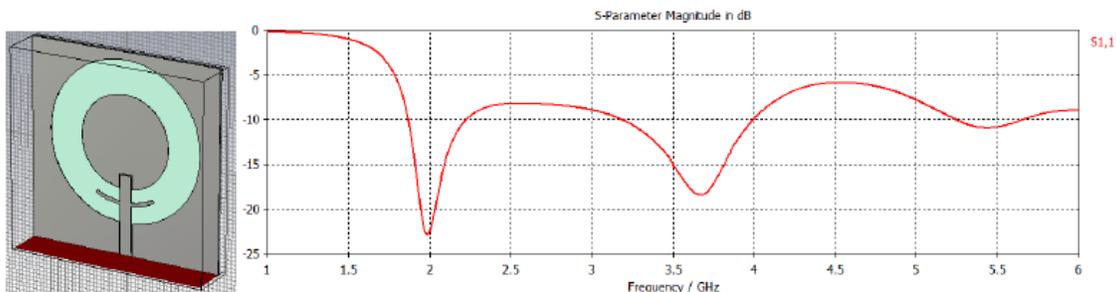


Figura 4. Pérdidas de retorno (S_{11}) como resultado del modelo original [17].

En su trabajo [17], parte de éste diseño previo y una vez obtenidos los mismos resultados busca modificar el diseño original para obtener los resultados planteados, agrega así un segundo anillo que no llega a la línea de alimentación, partiendo con un anillo simple de 35x35 mm y de grosor de 0,8 mm, el cual se reduce hasta un grosor de 0,5 mm, cuya geometría y su resultado se muestran en la siguiente Figura 5, en la cual se puede visualizar el diseño original modificado con el anillo externo adicional al parche, y el resultado que permite visualizar una mejora de la magnitud de S_{11} y mejor ancho de banda:

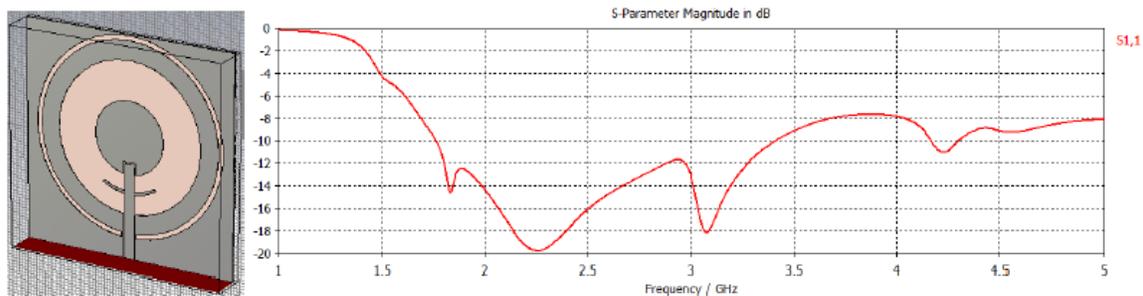


Figura 5. Pérdidas de retorno (S_{11}) como resultado del incremento de un anillo al modelo original [17].

El autor realiza un trabajo interesante de manipulación de varios diseños de antenas planares con diseño de anillos y concluye que el uso de la alimentación por línea coplanar entrega un diagrama de radiación que tiene forma bidireccional, que en ese caso particular ofrece una mejor cobertura cuando se requiere sintonizar las bandas de las tecnologías para operación de la antena. De igual manera menciona que con la geometría basada en anillos dobles genera una respuesta multibanda, que en esta antena opera en las bandas de 810 a 960 MHz y 2,167 a 3,08 GHz. No se debe olvidar que existe un fuerte acoplamiento entre ambos anillos el cual puede ser eliminado utilizando cortos. Utilizar carga capacitiva para un anillo, permite desplazar las frecuencias de resonancia a una posición menor.

2.2. FUNDAMENTACIÓN TEORICA

2.2.1. TECNOLOGÍA 5G

La tecnología ha evolucionado con el tiempo desde la década de 1940, donde apareció la primera generación de un sistema de telefonía móvil, con una transmisión de información

analógica. Desde entonces se ha buscado mejorar la calidad de transmisión, cobertura y capacidad del sistema. A finales de los 90 se introdujo una tecnología intermedia entre la 2G y 3G, denominada 2.5G, que mejoró la capacidad de transmisión de datos gracias al paso de la tecnología de conmutación de circuitos a la de conmutación de paquetes mediante la ayuda del Internet. Posteriormente, la tecnología 3G, con velocidades de hasta 2 Mbps, agregó facilidades multimedia, dando paso a la creación de aplicaciones de audio, gráficos y video. Además, agregó la compatibilidad de sistemas móviles e impulsó aún más el Internet. La tecnología 3G fue mejorada, permitiendo velocidades de transmisión de hasta 14 Mbps y ofrecía servicios multimedia usando conmutación de paquetes, esta tecnología fue denominada 3.5G y 3.75G. Posterior a esto, nace la 4G, basada en el protocolo de internet IP, ofrecía velocidades de descarga de 1 Gbps en reposo, 100 Mbps en movimiento y hasta 50 Mbps para subida, se introdujo la característica QoS que garantizaba la calidad de servicio en todo momento. Las aplicaciones de la cuarta generación son el acceso web desde dispositivos móviles, telefonía IP, juegos, videoconferencias, TV en alta definición y en 3D. En la actualidad se desarrolla la tecnología 5G, con el objetivo de disminuir el consumo de energía, brindar seguridad informática, alcanzar mayores velocidades de transmisión y el almacenamiento masivo en dispositivos. Esto mediante el uso de ondas milimétricas [18].

2.2.2. ONDAS MILIMÉTRICAS

Las ondas electromagnéticas son la radiación electromagnética generada por fuentes de campo electromagnético. cubren todo el espectro, el cual está dividido en diferentes bandas de frecuencia. Teóricamente el espectro entero es infinito, pero el espectro útil está limitado a ciertas frecuencias.

La velocidad de transmisión de una onda v está ligada a su frecuencia f y su longitud de onda λ por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\lambda}{f}$$

La velocidad con la que se mueve una onda electromagnética en el vacío es de 3×10^8 m/s, esta medida se toma como igual para el aire debido a la poca diferencia. Las ondas son clasificadas

según su longitud de onda o velocidad de transmisión, así, en la Figura 6 se puede apreciar la distribución del espectro electromagnético

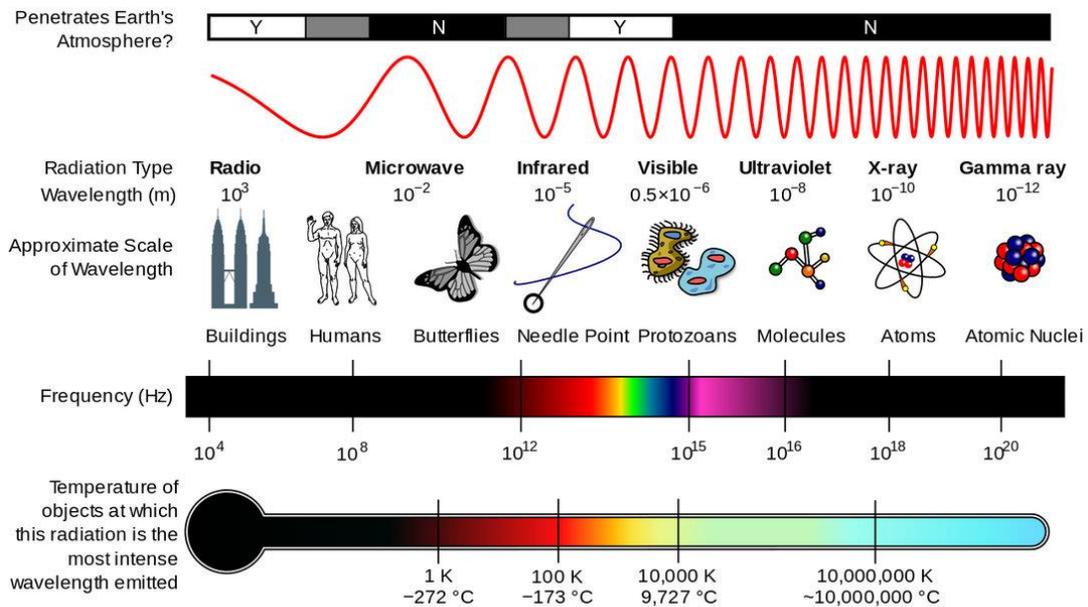


Figura 6. Espectro electromagnético [19].

Dentro del espectro se encuentran las ondas de radio, que comprenden frecuencias desde 1 kHz hasta los 100 GHz: frecuencia extremadamente baja (ELF), frecuencia muy baja (VLF), frecuencia baja (LF), frecuencia media (MF), frecuencia alta (HF), frecuencia muy alta (VHF), frecuencia ultra alta (UHF), frecuencia súper alta (SHF), frecuencia extremadamente alta (EHF). Continúa con la radiación infrarroja con frecuencias comprendidas entre 1 THz y 1 PHz. A partir de lo anterior se encuentra el espectro visible que comprende los colores apreciables por el ojo humano y finaliza con las ondas ultravioletas, rayos X y rayos gamma, peligrosos para la salud.

Las ondas milimétricas (mmWave) son aquellas que trabajan en el rango de frecuencias de 30 GHz y 300 GHz. Este rango de funcionamiento es usado por la tecnología 5G, con el fin de obtener velocidades de transmisión 10 veces mayor al de la tecnología 4G, un nivel de latencia bajo de 1 ms y una disponibilidad del 99.99% [20].

2.2.3. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE ANTENAS

Las antenas se caracterizan mediante la definición de los siguientes parámetros:

Diagrama de radiación:

El diagrama de radiación es una representación gráfica de las características de radiación de una antena en función de la dirección angular. Los campos radiados por una antena pueden ser representados en diagramas tridimensionales en coordenadas esféricas o en diagramas bidimensionales en coordenadas polares o cartesianas.

En la Figura 7 se visualiza un diagrama de radiación tridimensional de una antena direccional; la representación del diagrama 3D se da en coordenadas esféricas con centro en la antena, y se mantiene la distancia de medida constante. Representa la densidad de potencia radiada, o bien la amplitud y/o fase del campo eléctrico radiado por la antena.

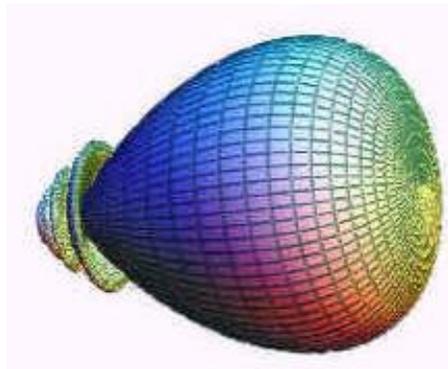


Figura 7. Diagrama de radiación tridimensional [19].

La representación bidimensional del diagrama de radiación de una antena se muestra en la Figura 8, en la cual se puede apreciar la zona de máxima radiación, denominada lóbulo principal; existen lóbulos que lo rodean, pero de menor amplitud que el máximo absoluto, a los cuales se les llama lóbulos secundarios. En algunas antenas puede existir también un lóbulo diametralmente opuesto al lóbulo principal que se conoce como lóbulo trasero [21].

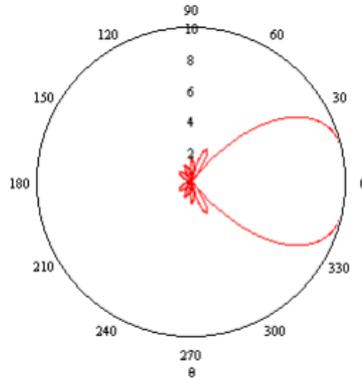


Figura 8. Diagrama de radiación bidimensional en coordenadas polares [19]

En la Figura 9 se visualiza el diagrama de radiación en el plano cartesiano, en el cual se indica la relación entre el lóbulo principal y el segundo y los demás lóbulos, el lóbulo principal a 0 dB, el segundo lóbulo -15 dB; se busca la mayor la relación entre el primer y segundo lóbulo.

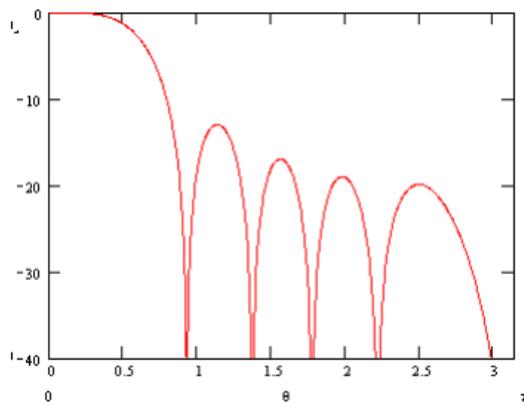


Figura 9. Diagrama de radiación bidimensional en coordenadas cartesianas [19].

Directividad, eficiencia y ganancia

La directividad D de una antena muestra cuánto puede radiar en una determinada dirección. Las antenas microstrip poseen un valor en el rango de 7 y 9 dB [5]. Por otro lado, la ganancia G está definida por la siguiente ecuación:

$$G = \eta D$$

Donde $\eta = \frac{P_r}{P_i}$ es un factor que representa la eficiencia de radiación, entre la potencia radiada P_r y la potencia de entrada P_i , y D es la directividad de la antena. Ambas definiciones de directividad y ganancia son similares, sin embargo, la diferencia radica en que la directividad indica la potencia radiada y la ganancia la potencia entregada de la antena.

La potencia radiada siempre tiene un valor menor a la potencia de entrada, debido a las pérdidas que existen en la antena, de esto que el valor de η siempre es menor a 1. Otro parámetro de las antenas es la Intensidad de radiación que viene a ser la medida de la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección. El valor es independiente de la distancia de la antena [22].

Polarización

La polarización es la propiedad de una onda electromagnética que describe la variación en el tiempo de la dirección y magnitud relativa del vector campo eléctrico. Es decir, es la forma en que una onda se transmite por el espectro electromagnético. Existen tres tipos de polarización: lineal, circular y elíptica.

La polarización lineal se da cuando las componentes del campo eléctrico son iguales o varían en fase $n\pi$ radianes.

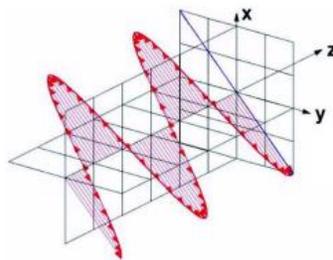


Figura 10. Polarización lineal [23].

La polarización circular ocurre cuando las amplitudes de las componentes del campo eléctrico son iguales y sus fases varían en $\pi/2$ o $3\pi/2$ radianes.

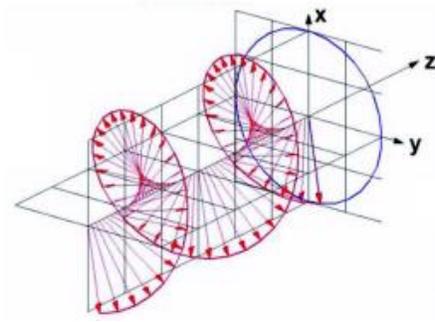


Figura 11. Polarización circular [23]

La polarización elíptica se da cuando la onda electromagnética gira en el transcurso del tiempo por el espacio, con amplitudes distintas y ángulos que no están en fase ni en contrafase.

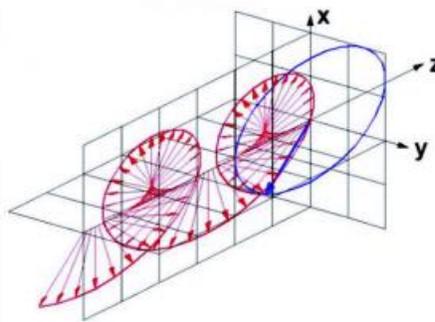


Figura 12. Polarización elíptica [23].

Ancho de banda y Factor de calidad

El factor de calidad Q mide cuanta energía reactiva sin pérdidas es almacenado en un circuito en comparación con la potencia disipada. El ancho de banda es un concepto relacionado al factor de calidad, cuando la disipación de potencia es máxima entonces el ancho de banda es máximo. Lo que significa que se requiere pequeños valores de Q para anchos de banda más amplios. El factor de calidad es definido como:

$$Q \equiv w \frac{(\text{energía total almacenada})}{(\text{potencia disipada en la carga})} = w \frac{W_E + W_M}{P_L}$$

Donde W_E es la energía almacenada en el campo eléctrico, W_M es la energía almacenada en el campo magnético y P_L es la potencia disipada en la carga.

El ancho de banda corresponde al rango de frecuencias en el cual la antena muestra un alto nivel de adaptación respecto a una determinada impedancia de referencia [5].

Antenas microstrip

Son antenas de transmisión plana más populares y por ello están en constante desarrollo, poseen parches metálicos impresos sobre un sustrato dieléctrico situado sobre un plano metálico, como en la Figura 13. Las geometrías de fabricación de estas antenas son: espiral, circular, cuadrada, rectangular, o fractal.

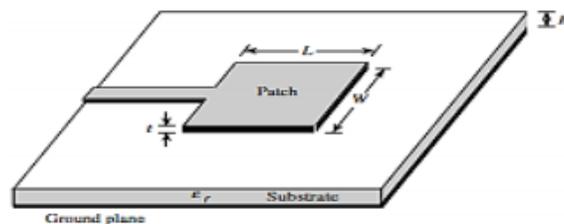


Figura 13. Antena Microstrip [22].

Los esquemas de alimentación más comunes en antenas tipo parche son: por contacto y sin contacto.

- Alimentación por contacto.

En la alimentación por contacto la potencia es suministrada directamente al parche radiante por medio de elementos de conexión como líneas microstrip o conectores coaxiales. Las líneas microstrip tienen la ventaja de su sencillez de fabricación, pero dependiendo de las dimensiones de la línea de alimentación existe la posibilidad de la aparición de radiaciones espurias.

Los conectores coaxiales están conectados al parche y al plano de masa por medio de su conductor interno y externo respectivamente. Su fabricación es sencilla con la ventaja de reducir las radiaciones espurias, pero el ancho de banda se ve reducido [24].

- Alimentación sin contacto.

En este esquema la energía entre la fuente de alimentación y el parche se realiza a través de un acoplamiento de campo electromagnético.

La alimentación por acoplamiento de proximidad emplea dos capas de sustrato dieléctrico, con la ventaja de la reducción de radiaciones espurias con un aumento del ancho de banda, un ejemplo de éste tipo de acople se puede visualizar en la Figura 14(c).

En la Figura 14(d) se puede visualizar un ejemplo del acoplamiento por apertura, en el cual se tienen dos sustratos dieléctricos separados por un plano de tierra que incluye cierto tipo de cortes o ranuras. Su fabricación es compleja y presenta un nivel medio de radiaciones espurias.

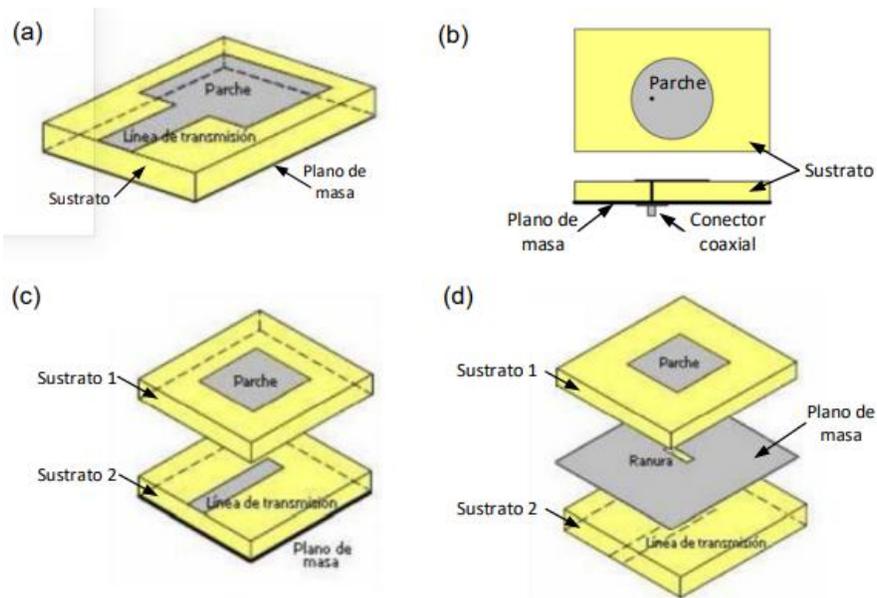


Figura 14. Métodos de alimentación de antenas microstrip. (a) Línea microstrip, (b) Sonda coaxial, (c) Acoplamiento de proximidad, (d) Acoplamiento por apertura [5].

Las figuras de mérito en antenas microstrip.

En las secciones previas se han definido las principales figuras de mérito que permiten evaluar el rendimiento de una antena. En esta sección se aborda, en la tabla 1, el estudio de las

figuras de mérito para antenas en tecnología microstrip, mencionando algunas de las formas en que estos parámetros pueden ser modificados o mejorados, con base en [25].

Tabla 1. Figuras de mérito en antenas microstrip.

Patrón de radiación	El patrón de radiación ideal dependerá de la aplicación de la antena, es posible tener un patrón de radiación mejorado en cuanto a la dirección se refiere con agrupaciones de parches sobre el mismo sustrato, las antenas de ranuras (slots) proporcionan un patrón bidireccional y puede lograrse una radiación unidireccional al colocar un reflector. El patrón de radiación de las antenas microstrip tiene su máximo de radiación en dirección normal al parche, y este puede ser rotado electrónicamente en antenas de apertura microstrip (“slot”) con cargas capacitivas.
Potencia radiada	Es emitida solamente hacia la parte superior de la antena en su forma ideal (a la mitad del espacio).
Directividad	Las antenas microstrip no son muy directivas, pero se puede realizar lo siguiente para mejorar la directividad: (1) Las agrupaciones pueden modificar la dirección por medio del espaciamiento de los elementos radiantes para lograr el desplazamiento en fase requerido, (2) en antenas microstrip de apertura gradual al incrementar la longitud (L) de la antena; (3) evitando las pérdidas por ondas superficiales.
Eficiencia	La eficiencia en las antenas microstrip depende de las pérdidas por conductor, pérdidas por dieléctrico y por radiación espuria. Para aumentar la eficiencia de la antena se puede realizar lo siguiente: (1) mejorar el tipo de alimentación para evitar la radiación no deseada (espuria) y lóbulos secundarios en el patrón de radiación; (2) el tipo de alimentación por hendiduras (insets) es ampliamente utilizado para antenas integradas, debido a que en ese caso la radiación espuria de las líneas de alimentación contribuye; (3) Elegir sustratos delgados disminuye las pérdidas por ondas superficiales, aunque casos particulares las ondas superficiales contribuyen en el rendimiento; (4) La alimentación de tipo coaxial se debe evitar cerca de los bordes del parche ya que aumenta la inductancia debida a las paredes magnéticas según el modelo de cavidad.
Ganancia	Una de las limitantes de las antenas en tecnología microstrip es que su ganancia es baja (≈ 6 dB). Ésta incrementa al disminuir las pérdidas por ondas superficiales, es decir; (1) utilizando sustratos delgados (no es siempre factible) y de baja permitividad dieléctrica; (2) al realizar matrices de elementos radiantes; (3) con la tecnología de micro maquinado, con banda prohibida fotónica, la cual consiste de dieléctricos periódicos donde las ondas electromagnéticas se comportan como lo hacen los electrones en un semiconductor.
Polarización	La polarización circular de las antenas es requerida para las comunicaciones móviles, una antena en tecnología microstrip puede tener polarización circular cuando: (1) al realizar la alimentación de un solo parche con dos fuentes de alimentación con un cierto ángulo de desfase, sin embargo esto provoca reflexiones reduciendo la eficiencia de la antena; (2) una mejor forma de lograr polarización circular es con asimetrías en el parche para perturbar las frecuencias de resonancia (truncar esquinas,

recortar el parche, agregar “stubs”, etc.); (3) al mover el punto de alimentación ya sea (i) a lo largo de la línea central o (ii) en la diagonal; (4) en antenas de apertura (perforaciones en el plano de tierra) la polarización circular se logra haciendo ranuras a lo largo de la línea de alimentación microstrip.

Impedancia de entrada La impedancia de entrada de una antena en tecnología microstrip puede ser calculada con ecuaciones muy estudiadas. Esta impedancia de entrada debe ser acoplada a la línea de alimentación que generalmente es de 50Ω para evitar que existan reflexiones. Por otro lado, según [26] a las antenas microstrip alimentadas por coaxial se agrega un disco para controlar la impedancia de entrada, el tamaño del disco, el espaciado hacia el parche y la posición definen a la Z_{in} , la impedancia de entrada también puede modificarse al colocar pines cortos circuitantes hacia el plano de tierra cerca de la línea de alimentación. Varios métodos de acoplamiento en tecnología microstrip se encuentran disponibles en la literatura [26], [27] y [28].

Ancho de banda Un mayor ancho de banda puede obtenerse al (1) utilizar dieléctricos de mayor espesor aunque esto implique mayores pérdidas por ondas superficiales; (2) realizar el acoplamiento de múltiples resonadores, (3) emplear parches apilados (stacked) alimentando al último elemento para disminuir la inductancia de alimentación, aún que esto implique un mayor costo de fabricación; (4) usar agrupaciones de ranuras de diferente forma y tamaño; estos agregan polos de resonancia aumentando el ancho de banda y complicando el diseño; (5) elegir sustratos dieléctricos adecuados, de forma que el ancho de banda sea mejorado (alimentación por proximidad); (6) emplear secciones extras de líneas de transmisión (stubs).

Fuente: [25]

La polarización de una onda se define como una figura geométrica descrita al transcurrir el tiempo por el extremo del vector campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación.

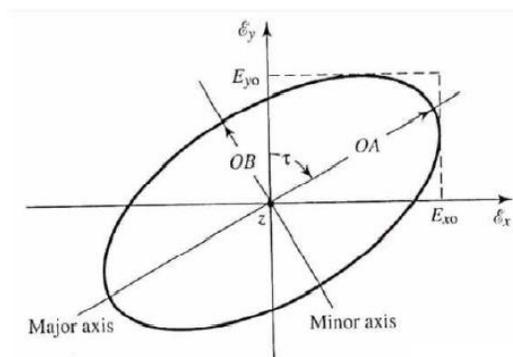


Figura 15. Elipse de polarización [29].

Para un sistema de coordenadas cartesianas, las expresiones de un campo eléctrico radiado que se propaga en la dirección del eje +Z son:

$$E(z,t) = E_x(z,t)\hat{x} + E_y(z,t)\hat{y}$$

$$E_x(z,t) = \text{Re}[E_{x0}e^{j(\omega t - kz + \phi_x)}] = E_{x0}\cos(\omega t - kz + \phi_x)$$

$$E_y(z,t) = \text{Re}[E_{y0}e^{j(\omega t - kz + \phi_y)}] = E_{y0}\cos(\omega t - kz + \phi_y)$$

Donde E_{x0} y E_{y0} son las magnitudes máximas de las componentes X e Y.

Existen 3 tipos de polarización; lineal, circular y elíptica. El tipo de polarización depende de la relación entre E_{x0} y E_{y0} y ϕ_x y ϕ_y . Uno de los requerimientos del diseño especifica que la polarización sea circular, por lo que se hará un enfoque sobre ella.

Una onda estará polarizada circularmente (CP) en un punto si el vector campo eléctrico (o magnético) en ese punto describe un círculo en función del tiempo. Esta polarización solo es posible cuando las magnitudes de las dos magnitudes son iguales y la diferencia de fase entre ellas es múltiplo impar de $\pi/2$. Este tipo polarización tiene a su vez dos diferentes sentidos de giro; a derechas (RHCP), cuya rotación es en el sentido de las agujas del reloj, y a izquierdas (LHCP), con rotación en el sentido contrario de las agujas del reloj. El sentido de giro viene determinado por la onda cuando esta se aleja del observador. [30]

2.2.4. DISEÑO DE ANTENAS MICROSTRIP

Para el diseño de una antena microstrip cuya geometría corresponde a la vista en la Figura 11 se tiene las siguientes ecuaciones [22]:

Ancho del parche en mm, donde c es la velocidad de la luz en $\left(\frac{m}{s}\right)$

$$W = \frac{c}{2F_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

La constante dieléctrica efectiva para el caso $W/h > 1$, donde h es el grosor de la antena en mm y ϵ_r es la constante dieléctrica

$$E_{reff} = \frac{\epsilon r + 1}{2} + \frac{\epsilon r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{0.1588}{1.186} \right]^{-1/2}$$

La extensión de la longitud eléctrica sobre la longitud física está dada por la siguiente expresión

$$\Delta L = 0.412h \frac{(E_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(E_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}$$

En base a lo anterior la longitud se calcula como

$$L = \frac{c}{2F_r \sqrt{E_{reff}}} - 2\Delta L$$

Donde F_r es la frecuencia de operación de la antena en Hz.

Finalmente, el plano de tierra se calcula con las expresiones

$$L_g = 6h + L$$

$$W_g = 6h + W$$

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA

Este tipo de investigación es utilizada para un primer acercamiento científico hacia un tema, cuando éste aún no ha sido abordado o no ha sido estudiado lo suficiente y las condiciones del estudio no han sido aún determinantes. Su propósito es destacar los aspectos fundamentales de una problemática determinada y encontrar los procedimientos adecuados que pueden servir para elaborar una investigación posterior. La utilidad de este tipo de investigación implica que, en base a sus resultados, se simplifican líneas de investigación en el futuro [31].

3.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación exploratoria puede llevarse a cabo de manera primaria o secundaria. Bajo estos dos tipos, hay múltiples métodos que puede usar un investigador. Los datos obtenidos pueden ser cualitativos o cuantitativos. En la propuesta de éste proyecto se utiliza la investigación secundaria, que es la recopilación de información previamente publicada como casos de estudio, revistas, periódicos, libros, internet

3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MÉTRICAS DE RENDIMIENTO

3.3.1. POBLACIÓN

La población en estudio serán todos los valores obtenidos de las simulaciones realizadas como son: el ancho de banda, la ganancia y la eficiencia. Para éste propósito se utilizará el software de simulación CST.

3.3.2. MUESTRA

La muestra se tomará aleatoriamente de la población anteriormente indicada, y tomando en cuenta la cantidad de población con características resultantes exitosas vs la cantidad de población con características resultantes fallidas.

3.3.3. MÉTRICAS DE CARACTERIZACIÓN

a. Ganancia

La ganancia de una antena es la razón existente entre la potencia que entra a la antena y la potencia que sale de esta, la ganancia se produce por el efecto de la directividad donde se concentra la mayor potencia de acuerdo al diagrama de radiación; es decir, se refiere a la energía que entrega la antena en cuestión, comparada con la energía entregada por una antena isotrópica, que por definición cuenta con un diagrama de radiación esférico perfecto y una ganancia lineal unitaria. Se define comúnmente en dBi's.

b. Ancho de banda

El ancho de banda de una antena se conoce como el rango de frecuencias dentro de las cuales dicha antena puede operar satisfactoriamente, cumpliendo con las características requeridas de acuerdo a un estándar especificado. Esto, por lo general se toma entre los puntos de media potencia, pero a veces se refiere a las variaciones en la impedancia de entrada de la antena.

c. Directividad

La Directividad de la antena es una medida de la concentración de la potencia radiada en una dirección particular y se puede entender también como la capacidad de la antena para guiar toda la energía radiada en una dirección específica. Es usualmente una relación de intensidad de radiación en una dirección particular en comparación a la intensidad promedio isotrópica, mientras más alto es la directividad más afilada es el haz de radiación.

3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 2. Operacionalización de las variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTO
Rangos de frecuencia	Frecuencias de trabajo	Frecuencias de ondas milimétricas entre 30 GHz y 80 GHz	Software simulador CST Studio Suite
VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	
Parámetros de Transmisión / Recepción	Parámetros de funcionalidad y operación de la antena	<ul style="list-style-type: none"> - Ancho de banda - Ganancia. - Directividad - Impedancia 	

Fuente: Elaboración propia

3.5. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

En este apartado se presenta el proceso de diseño y fabricación de la antena, se define una frecuencia principal de trabajo de 45 GHz, realizando una serie de procesos para cumplir los objetivos planteados, proponiendo un diseño de antena microstrip y simular el modelo propuesto en el software CST.

3.5.1. DISEÑO DE LA ANTENA

Para el diseño de la antena, se ha procedido a seleccionar una estructura de geometría elíptica de tipo microstrip que consta de dos substratos con características de tipo Roger RT5880 y cuyas líneas de alimentación se encuentran entre ambos substratos para excitar al patch elíptico mediante acoplamiento por aproximación.

El sustrato seleccionado tiene las siguientes características en el simulador CST:

Coefficiente dieléctrico del sustrato (ϵ_r) = 2,2

Espesor del sustrato (H_s) = 0,787 mm

Espesor del patch elíptico (H_p) = 0,035 mm

Partiendo de la información que proporciona el material, se propone una antena Microstrip con parámetros de diseño tales como geometría circular (elíptica), frecuencia de operación de 45 GHz, sustrato de fabricación Roger RT5880 con constante dieléctrica de 2,2 y un material conductor cobre. Respectivamente el cálculo y desarrollo para la variable F se evidencia en la siguiente ecuación:

$$F = \frac{8.791 * 10^9}{f_r * \sqrt{3}}$$

En donde:

F es la variable calculada en base a la frecuencia a la que va a trabajar la antena

f_r es la frecuencia de resonancia de la antena, en éste caso 45 Ghz.

Por otro lado, el radio correspondiente al diseño de la antena Microstrip circular se evidencia en la siguiente ecuación:

$$R = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2 * h}{\pi * \epsilon_r * F} \left[\ln \left[\frac{\pi * F}{2 * h} \right] + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

En donde:

R es el radio del parche de la antena

F es la variable calculada en base a la frecuencia a la que va a trabajar la antena

h es la altura del sustrato, para éste caso 0.787 mm

ϵ_r es la constante dieléctrica del sustrato, en este caso 2.2

Un agrupamiento de parches implica un número de elementos radiantes que se combinan en una red de alimentación que consiste en divisores de potencia y líneas de alimentación. En la parte de alimentación se utiliza una red tipo “paralela”, en la que eventualmente la potencia se divide en dos partes idealmente iguales. Por otro lado, cuando se diseña la red de alimentación de un agrupamiento, se debe evitar la discontinuidad que se provoca por: cambio de anchos, dobleces de 90° en las líneas de transmisión, ranuras, terminaciones abiertas o uniones T, pues cerca de la discontinuidad la distribución de los campos eléctrico y magnético están modificados.

Considerando estas especificaciones técnicas de diseño y en base a las ecuaciones de distancias y separación de líneas, se realizará modificaciones a la geometría tomando en cuenta todos los parámetros del modelo para que sea optimizado en respuesta a los valores que deseamos obtener.

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r * \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$$L = \frac{\lambda_g}{4}$$

En donde:

λ_g es la longitud de onda calculada

f_r es la frecuencia de resonancia, en este caso 45 Ghz

c es la velocidad de propagación de la onda electromagnética (velocidad de la luz)

ϵ_{eff} es el coeficiente dieléctrico del sustrato, en este caso 2.2

L es la longitud calculada de la línea de alimentación

Puesto que al ser un proyecto de investigación el modelo final elegido se ha basado en la propia experiencia de un sinnúmero de simulaciones y realizando el análisis y comparación con diferentes antenas microstrip aplicadas por diferentes estudios anteriores. Por tal motivo, como se puede observar en la Figura 16, se decidió utilizar una forma de la estructura principal para la

composición del parche, que incluye además cortes de ranura tipo L que están contrapuestos entre sí y distribuidos simétricamente dentro de la estructura principal elíptica, y cuyas medidas se detallan unos ítems mas abajo.

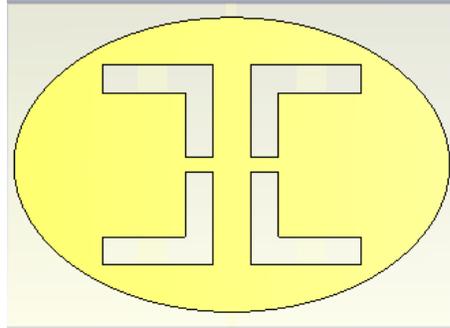


Figura 16. Geometría de la antena diseñada: Patch superior.

Así mismo, la Figura 17, permite visualizar las líneas de alimentación de la antena, mismas que de igual manera se han simulado de acuerdo a los parámetros resultantes requeridos, con un sistema de dos puertos para una impedancia de entrada de $Z = 50 \text{ ohm} + 0j$ dentro del ancho de banda de las frecuencias planteadas.

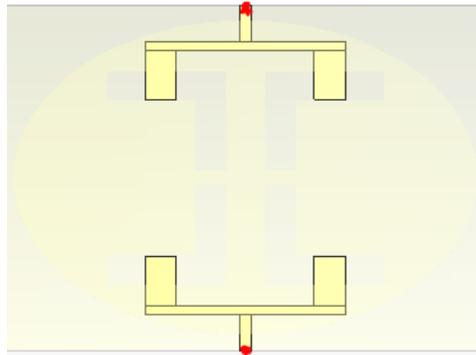


Figura 17. Geometría de la antena diseñada: Líneas de alimentación.

3.5.2. ANTENA PROPUESTA SIN RANURAS

Para propósitos comparativos, y verificar las diferencias que pueden darse por cambiar aun pequeñas características del diseño de una antena, en la Figura 18, se puede ver que inicialmente

también se ha procedido a diseñar una antena con una simetría elíptica similar al diseño planteado, con la diferencia que en éste caso no dispone de ranuras; así se puede realizar un análisis posterior para ver la afectación en los parámetros resultantes de la antena. Las líneas de alimentación para ambos modelos de parche se mantienen similares al diseño realizado.

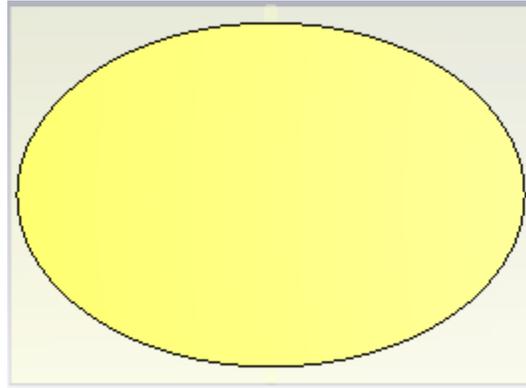


Figura 18. Geometría de la antena diseñada sin ranuras: Patch superior.

3.5.3. SIMULACION DE LAS ANTENAS EN EL SOFTWARE CST

De acuerdo con la geometría definida y los materiales que conforman la antena, se procede a crear la antena en el software de simulación CST studio, bajo los siguientes criterios y dimensiones:

Patch superior de geometría elíptica:

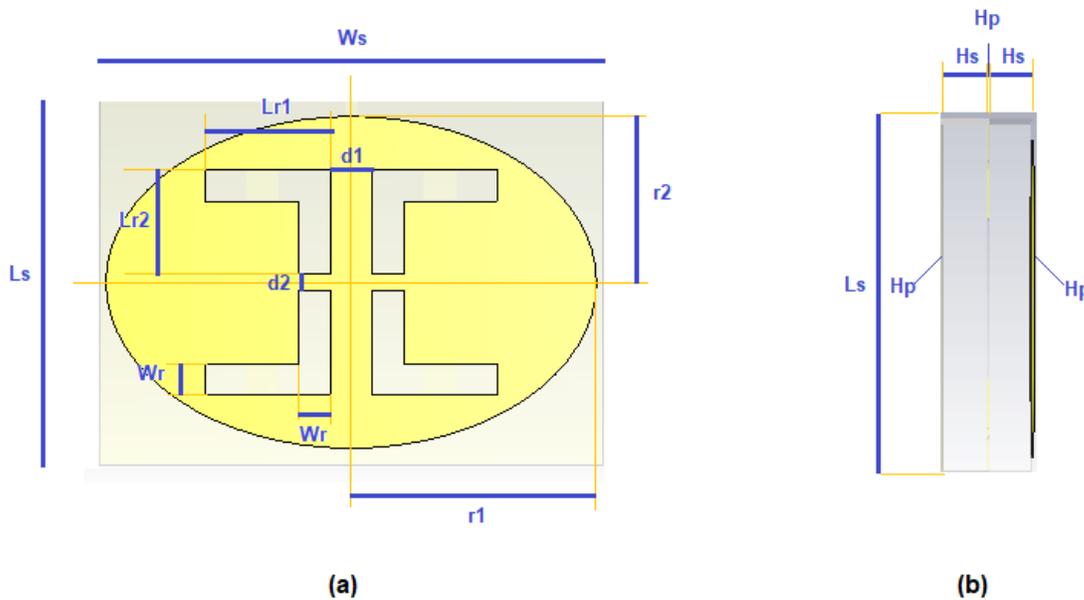


Figura 19. Dimensiones de la antena diseñada: (a) Vista frontal (b) Vista lateral

Líneas de transmisión entre dos sustratos de características similares:

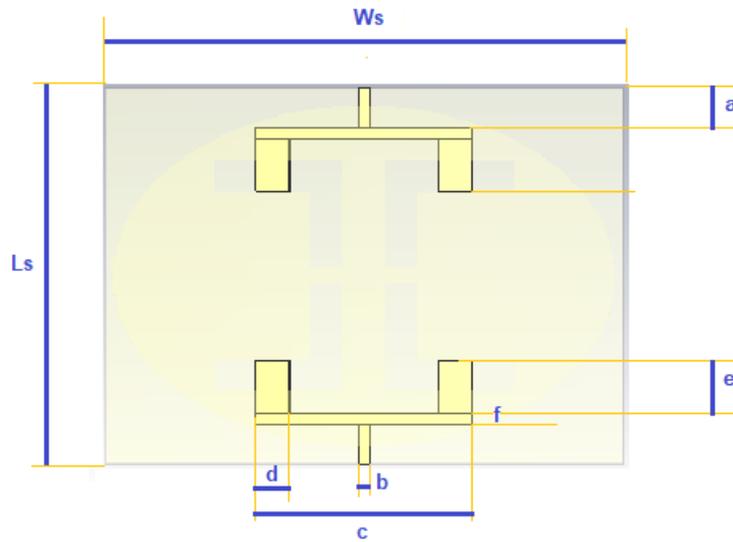


Figura 20. Dimensiones de las líneas de alimentación

A continuación, los valores de las variables del diseño:

Tabla 3. Variables de dimensiones del diseño

Variable	Valor (mm)
W_s	8,27
L_s	5,97
r_1	4
r_2	2,7035
L_{r1}	2,04
L_{r2}	1,7
W_r	0,513
d_1	0,68
d_2	0,27

Variable	Valor (mm)
a	0,6301
b	0,2
c	3,463
d	0,54
e	0,852
f	0,05

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizado el diseño de la antena, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación en el software CST Studio, se ha simulado la antena diseñada que cumple con los valores de los parámetros planteados en el proyecto que son: frecuencia de operación, ancho de banda, ganancia, y también la otra antena diseñada sin ranuras en la elipse para propósitos netamente comparativos.

4.1. ANALISIS DE LA ANTENA DISEÑADA SIN RANURAS

A continuación, se hace un breve análisis de la antena de geometría elíptica, pero sin ranuras. Este análisis se lo ha realizado cuando la estructura está siendo alimentada solamente por un puerto de forma aislada. En la Figura 21 se muestra que el coeficiente de reflexión S_{11} es apenas menor a -10 dB en el rango de frecuencias que van desde 43 GHz hasta 44 GHz; en el caso del parámetro S_{12} , se han obtenido los valores ligeramente superior a los -10 dB en ese mismo rango de frecuencias, no existe aún un acoplamiento mutuo confiable entre los puertos de alimentación, también se puede verificar que en los parámetros S_{11} no se alcanza una frecuencia de resonancia de 45 GHz, en efecto en el rango de frecuencias analizado, y no se alcanza una frecuencia de operación de la antena, de acuerdo al valor requerido en éste proyecto:

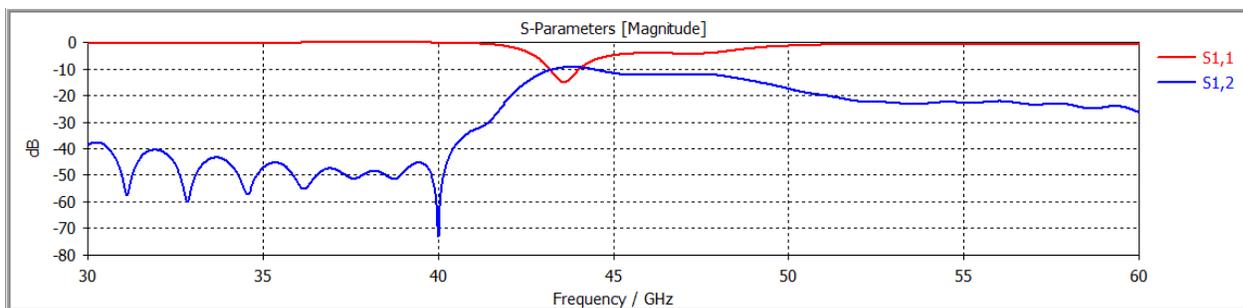


Figura 21. Parámetro S_{11} y S_{12} sin combinación de puertos

Por otro lado, bajo el mismo modelo sin ranuras, una vez realizado el análisis de la estructura cuando los dos puertos se alimentan de forma simultánea, en la Figura 22, se puede ver

que el ancho de banda descrito por el coeficiente de reflexión nunca es menor a -10 dB en el rango de frecuencias analizado; es decir no se consigue la operabilidad de la antena, a continuación, la visualización de la gráfica resultante:

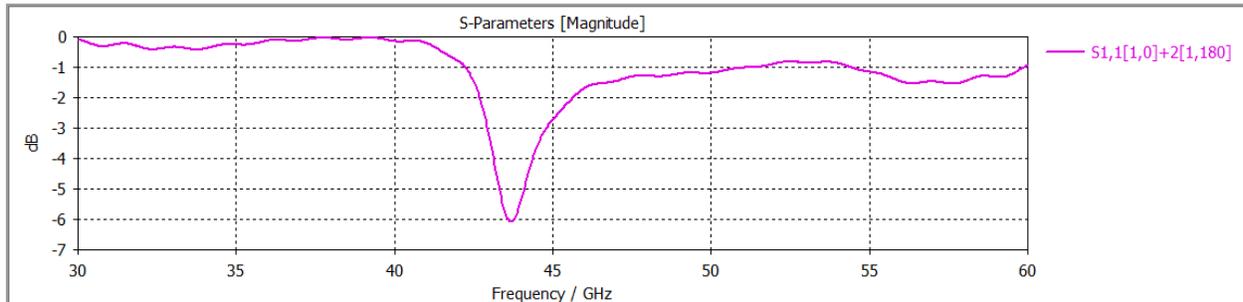


Figura 22. Parámetro S_{11} y S_{12} con combinación de puertos

Continuando con el análisis, en lo que respecta al diagrama de impedancias, se podría decir que se logra el acoplamiento de las líneas de alimentación, pero no para el valor de frecuencia resonante requerido en el proyecto, pues como se muestra en la Figura 23, se alcanzan valores que están alrededor de los 50 ohms en la componente real especialmente, pero para frecuencias en el rango entre los 40 Ghz y 43 Ghz, a continuación, la figura:

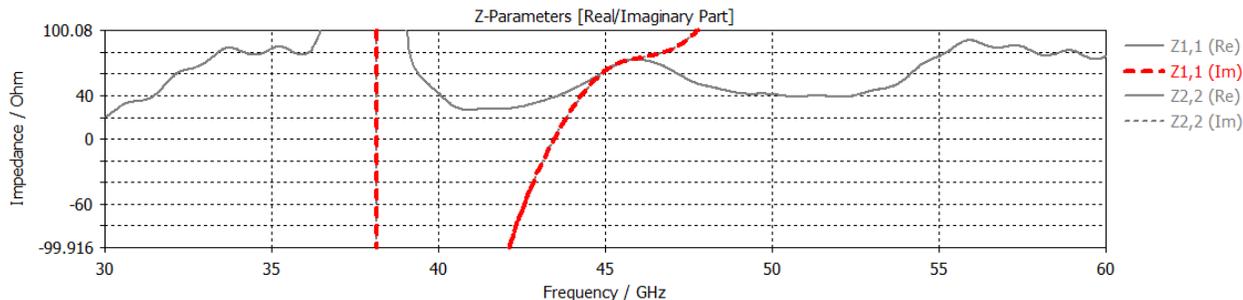


Figura 23. Impedancia Z_{11} real e imaginaria y Z_{12} real e imaginaria sin combinación de puertos para modelo sin ranuras

El resultado de la impedancia con combinación de puertos, como se visualiza en la gráfica 24, arroja los siguientes valores, su componente real se encuentra bordeando o por debajo de los 50Ω , para un rango de frecuencias de 40 GHz a 48,5 GHz y su componente imaginaria se aproxima al valor de 0 a la frecuencia de 43,5 GHz aproximadamente. Considerando los datos de la componente real de la impedancia especialmente, se puede deducir que la antena se encuentra casi

acoplada para operar en el rango de frecuencias para la que fue diseñada, a continuación, la gráfica resultante:

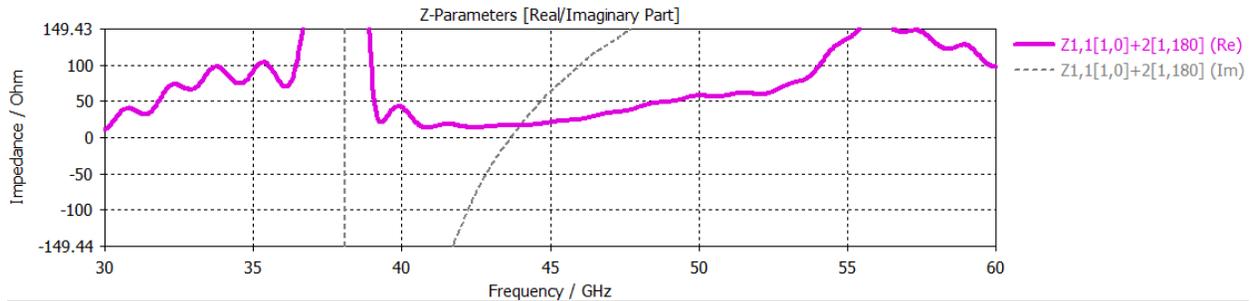


Figura 24. Impedancia Z_{11} real e imaginaria con combinación de puertos para modelo sin ranuras

Finalmente, el diagrama de radiación pierde uniformidad y unidireccionalidad, como se puede verificar en la Figura 25(a), en el diagrama de radiación 3D frontal, no existe un diagrama de radiación radial hacia todas las latitudes, y en las Figuras 25 (b) y (c), se pueden visualizar los diagramas de radiación en coordenadas polares tanto de ganancia (Figura b) como de directividad (Figura c), en éstos se puede notar que una buena parte del lóbulo principal va hacia otra dirección, y de igual manera se observa que se pierde ganancia y directividad, con los valores que se alcanzan de 2,81 dBi y 3,24 dBi, respectivamente.

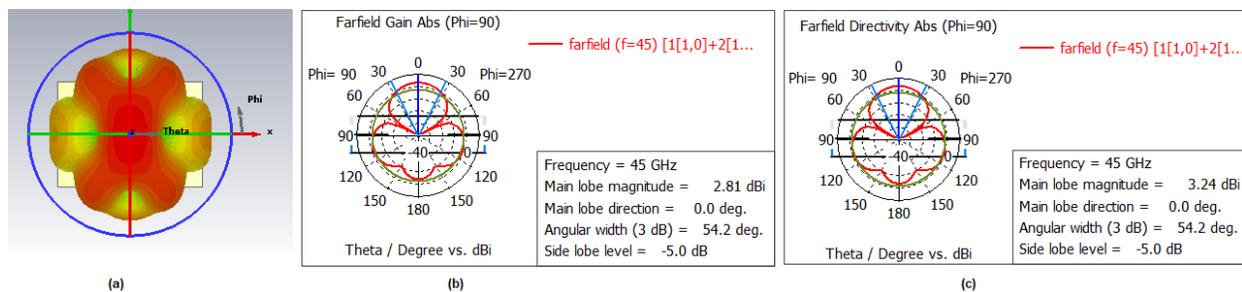


Figura 25. Diagrama de radiación de diseño sin ranuras: (a) frontal en 3D, diagrama de radiación en coordenadas polares (b)Ganancia, (c)Directividad

La Figura 26 del diagrama de radiación en 3D, permite visualizar claramente que existe una propagación del diagrama de radiación hacia la parte inferior del parche de la antena para el caso del diseño sin ranuras, de ahí que se analizará más adelante la posible afectación de colocar ranuras en el parche elíptico.

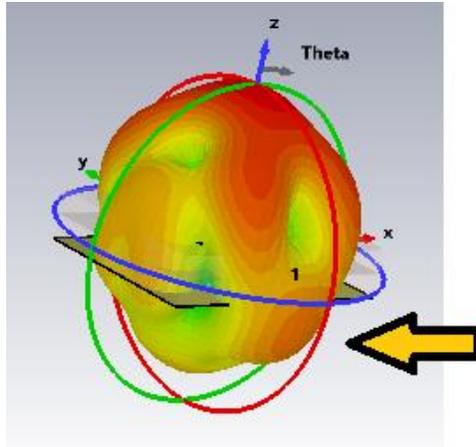


Figura 26. Diagrama de radiación de diseño sin ranuras: (a) lateral en 3D

4.2. ANALISIS DE LA ANTENA DISEÑADA Y COMPARACIÓN CON ANTENA INICIAL SIN RANURAS

Para la descripción de los parámetros de scattering que genera en la antenna propuesta se utiliza el análisis de onda completa, el primer análisis se lo ha realizado cuando la estructura está siendo alimentada solamente por un puerto de forma aislada. En la Figura 27 se muestra el coeficiente de reflexión S_{11} es menor a -10 dB en el rango de frecuencias que van desde 44,91 GHz hasta 45,85 GHz; en el caso del parámetro S_{12} , se han obtenido los valores inferiores a los -15 dB y hacia abajo, esto describe que el acoplamiento mutuo entre los puertos de alimentación es muy bueno.

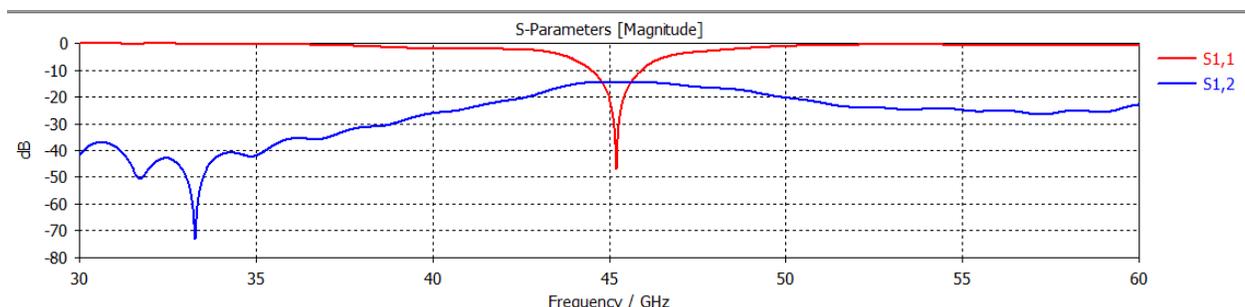


Figura 27. Parámetros S_{11} y S_{12} sin combinación de puertos

Por otro lado, una vez realizado el análisis de la estructura cuando los dos puertos se alimentan de forma simultánea, se puede ver que el ancho de banda descrito por el coeficiente de reflexión es menor a -10 dB en el rango de frecuencias que van desde 44,91 GHz hasta 45,85 GHz; es decir que el rango de frecuencia abarca la frecuencia de resonancia para la cual fue diseñada la antena, a continuación, la gráfica resultante:

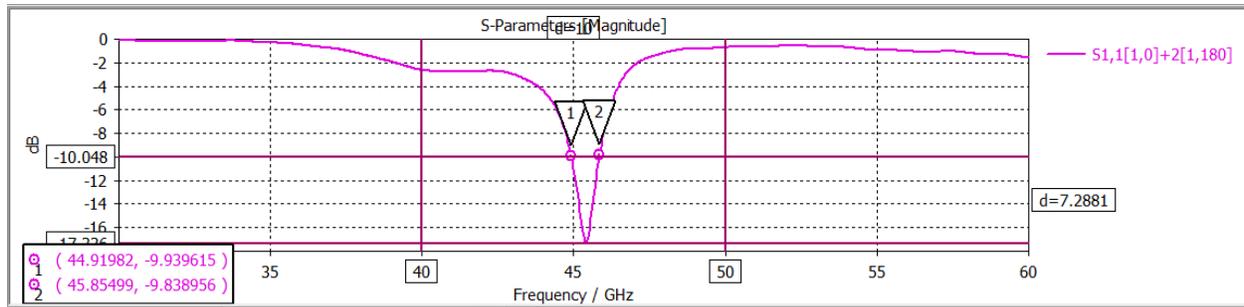


Figura 28. Parámetros S_{11} y S_{12} con combinación de puertos

En éste punto es importante realizar una comparación entre los resultados de ambos parches, en las Figuras 21 y 22, producto de la simulación del diseño sin ranuras no se consiguen resultados de operación satisfactorios de la antena; por tal motivo, se han incluido ranuras tipo L colocadas de manera opuesta entre ellas, lo que se puede visualizar en las Figuras 27 y 28, como resultado de la simulación del diseño con ranuras, la afectación positiva para alcanzar un nivel óptimo de la antena propuesta para operar a la frecuencia de 45 GHz. Se debe mencionar que tanto el posicionamiento de las ranuras, así como la ubicación y separación de las líneas de alimentación de la antena pueden afectar el rango de frecuencias de operación, dato importante a considerarse para futuros desarrollos.

En cuanto al comportamiento de la impedancia que toma la estructura propuesta, sin combinación de puertos, las componentes reales e imaginarias para el límite de frecuencia baja de 44,75 GHz se adjudican valores de $53.39 - 24.07j \Omega$ para los parámetros S_{11} y S_{22} , y para la frecuencia alta de 45,85 GHz se adjudican valores de $-3.91 - 21.84j \Omega$ para los parámetros S_{11} y S_{22} ; para la frecuencia de resonancia 45 GHz, se tienen en cambio los siguientes valores de impedancia $49.61 - 9.23j \Omega$ para los parámetros S_{11} y S_{22} , respectivamente. Todos estos valores

están bordeando y bajo los 50Ω , por lo que se puede deducir que la antena se encuentra acoplada y opera en el rango de frecuencias para la que fue diseñada. A continuación, la gráfica resultante:

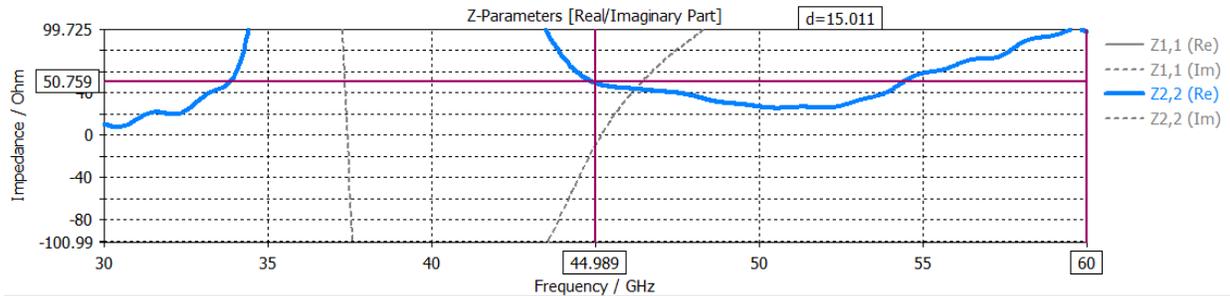


Figura 29. Impedancia Z_{11} real e imaginaria y Z_{22} real e imaginaria sin combinación de puertos

El resultado de la impedancia con combinación de puertos, arroja los siguientes resultados, las componentes reales e imaginarias para las frecuencias de 44,91 GHz y 45,85 GHz adjudican valores de $57.44 - 46j \Omega$ y $30 + 30j \Omega$ respectivamente, para la frecuencia de resonancia 45 GHz se tienen los valores de impedancia de $47.41 - 28.10j$. Estos valores se ubican alrededor o por debajo de los 50Ω , por lo que se puede deducir que la antena se encuentra acoplada y opera en el rango de frecuencias para la que fue diseñada, a continuación, la gráfica resultante:

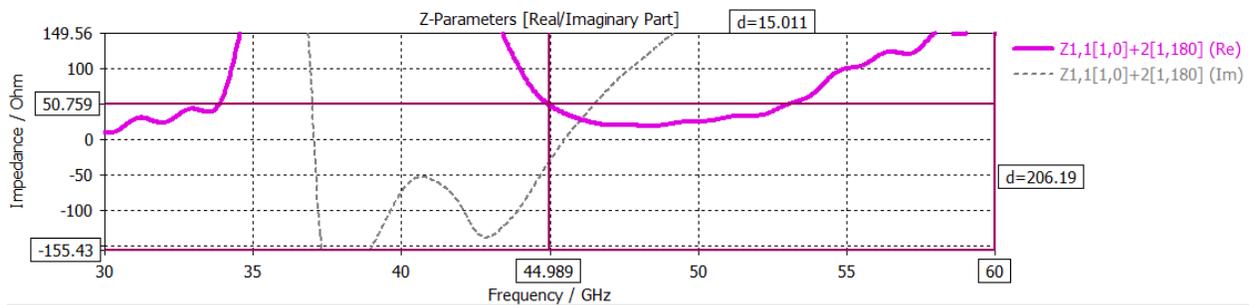


Figura 30. Impedancia Z real e imaginaria con combinación de puertos

Realizando la comparación de los resultados de la simulación entre ambos diseños, por un lado el diseño sin ranuras como se analizó anteriormente en las Figuras 23 y 24, y por otro lado el diseño del parche con ranuras, por medio de las Figuras 29 y 30, se puede verificar que en ambos casos los valores de la impedancia indican que existe un acoplamiento.

En lo que respecta al diagrama de radiación de la antena diseñada, se puede verificar en la imagen 3D frontal, que a la frecuencia de resonancia 45 GHz para la que fue diseñada, con puertos combinados, se forma un diagrama de radiación perfectamente unidireccional con una ganancia de 6,18 dBi en su punto más radiante. A continuación, se muestra el diagrama de radiación de la antena en 3D, vista frontal y vista en perspectiva:

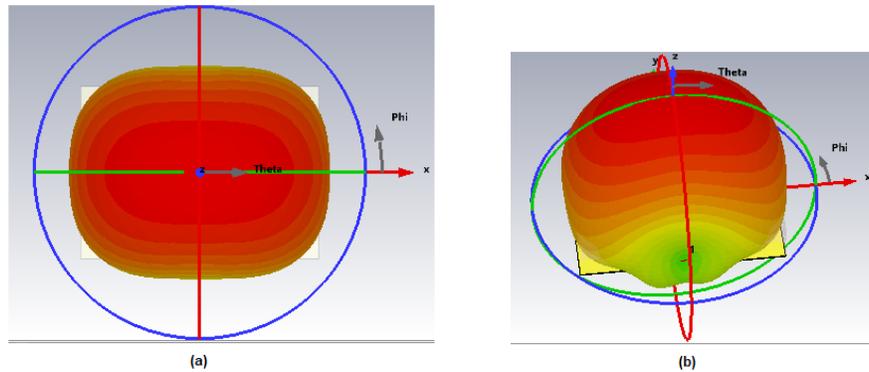


Figura 31. Diagrama de radiación en 3D, (a) imagen frontal, (b) imagen en perspectiva

En la Figura 32, se puede visualizar el resultado del diagrama de radiación en el plano de coordenadas polares, con combinación de puertos; en la cual se puede verificar la unidireccionalidad del lóbulo principal, a frecuencia de resonancia 45 GHz conforme a diseño, en la Figura 31(a) se presenta además un valor de ganancia de 6,18 dBi y en la Figura 31(b) un valor de directividad de 6,43 dBi.

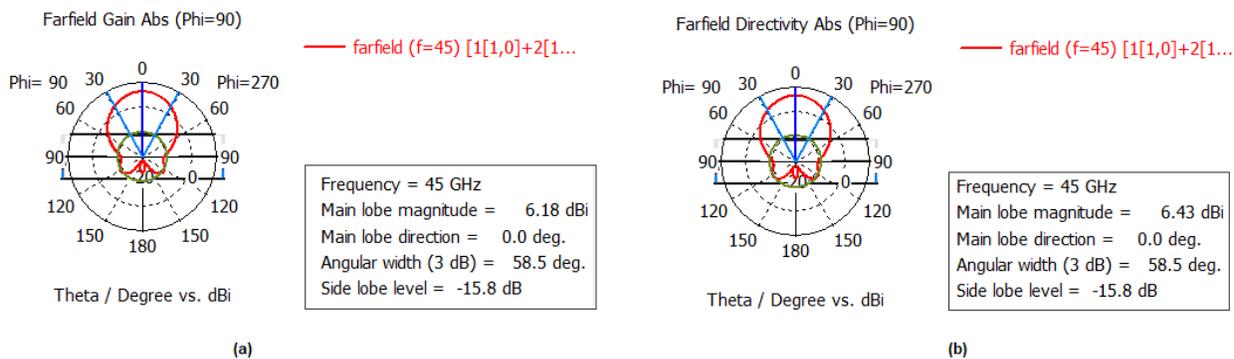


Figura 32. Diagrama de radiación en el plano polar a frecuencia de resonancia 45 GHz con puertos combinados (a)Ganancia, (b) Directividad

Retomando el análisis del diagrama de radiación del parche sin ranuras en comparación con el diseño realizado, se deduce la importancia de la colocación de cortes o ranuras en el parche

principal de la antena, puesto que éstos permiten que se genere la unidireccional en la propagación del diagrama de radiación y de igual manera el incremento de los valores de directividad y ganancia para una operación satisfactoria de la antena propuesta. Al colocar las ranuras o cortes en el parche, para una frecuencia de resonancia de 45 GHz se alcanza un valor de ganancia de 6,18 dBi y un valor de directividad de 6,43 dBi como se puede ver en la Figura 32, versus los valores del modelo de parche inicial sin ranuras de 2,81 dBi para la ganancia y 3,24 dBi, para la directividad, como se visualizó anteriormente en la Figura 25.

En la Figura 33, se visualiza el diagrama de radiación del diseño en 3D, tanto frontal como en perspectiva cuando no existe combinación de puertos, se puede notar que la dirección de la radiación carece de la unidireccionalidad que tiene cuando si se trabaja con puertos combinados, y que se requiere para una operación satisfactoria de la antena.

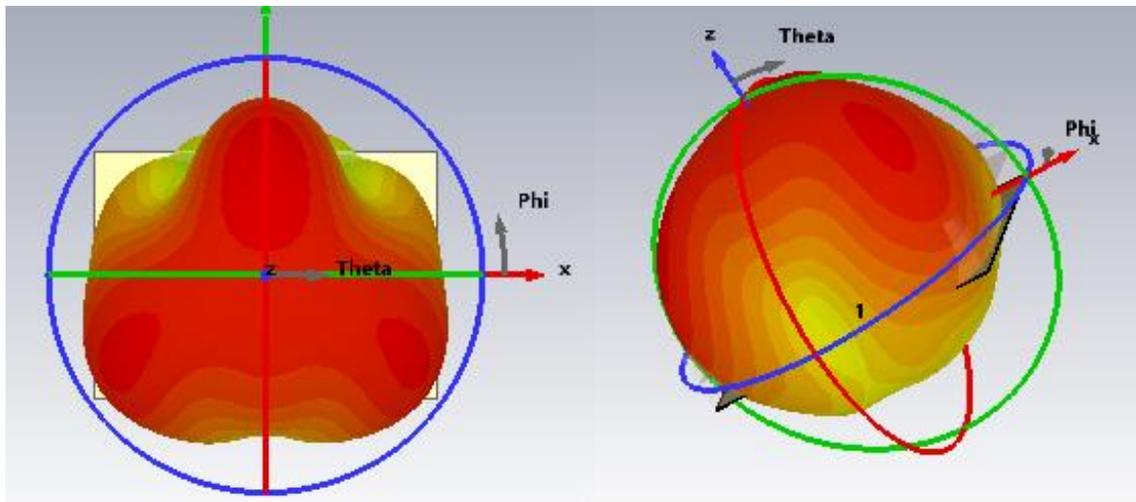


Figura 33. Diagrama de radiación en 3D $F=45$ GHz sin combinación de puertos, (a) imagen frontal, (b) imagen en perspectiva

A continuación, en la Figura 34 (a) y (b) se muestran los diagramas de radiación en el plano de coordenadas polares sin combinación de puertos, en los cuales se puede verificar que el lóbulo principal no tiene perfecta unidireccionalidad y se da como resultado un valor de ganancia de 4,57 dBi y un valor de directividad de 4,81 dBi.

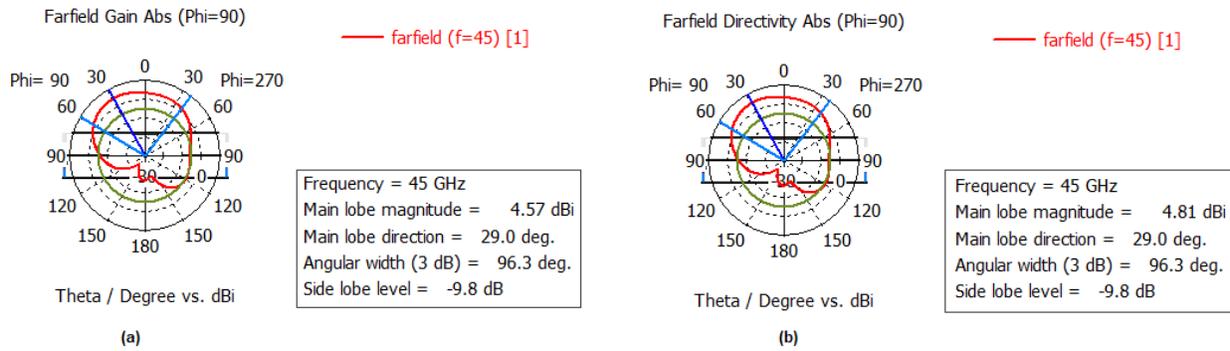


Figura 34. Diagrama de radiación en el plano polar, puertos no combinados (a) Ganancia, (b) Directividad

A continuación, en la Figura 35 se puede visualizar el resultado del diagrama de radiación en el plano de coordenadas polares, con combinación de puertos; se puede verificar que existe la unidireccionalidad del lóbulo principal, a frecuencia de 44,75 GHz, límite inferior del ancho de banda, presenta un valor de ganancia de 4,69 dBi (a) y un valor de directividad de 4,93 dBi (b).

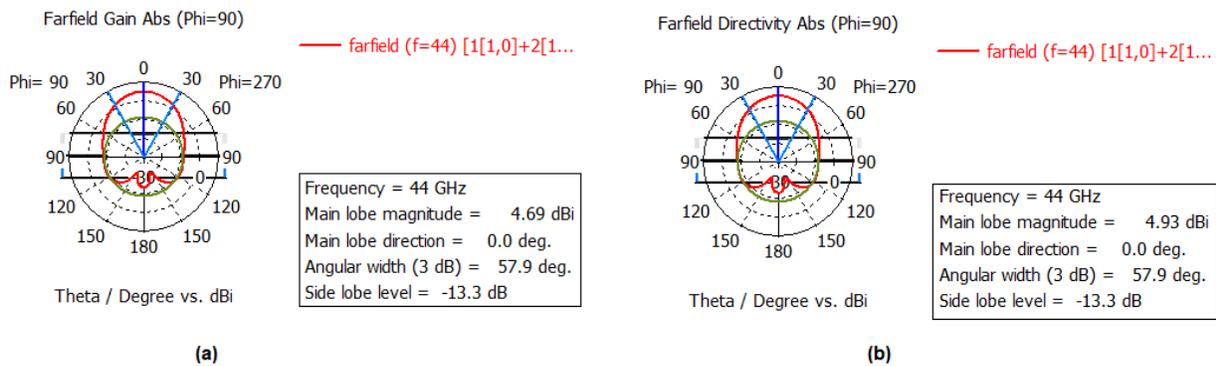


Figura 35. Diagrama de radiación en el plano polar, puertos combinados a 44,75 GHz (a) Ganancia, (b) Directividad

A continuación, en la Figura 36 se puede visualizar el resultado del diagrama de radiación en el plano de coordenadas polares, sin combinación de puertos para la frecuencia del límite inferior de operación 44,75 GHz; se puede verificar que existe una desviación de la unidireccionalidad del lóbulo principal, presenta un valor de ganancia de 4,47 dBi (a) y un valor de directividad de 4,71 dBi (b); es decir ambos parámetros disminuyen cuando no se realiza la combinación de puertos.

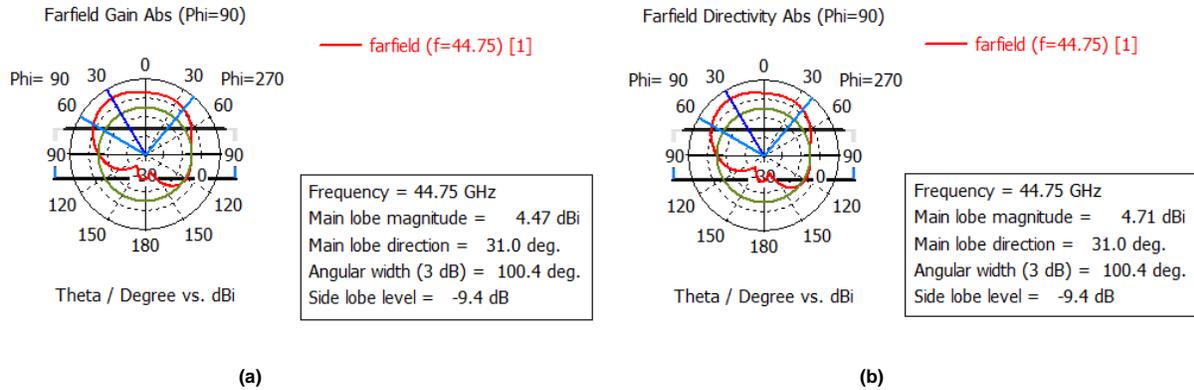


Figura 36. Diagrama de radiación en el plano polar, sin combinación de puertos a 44,75 GHz (a) Ganancia, (b)Directividad

En la Figura 37, se visualiza en cambio el resultado del diagrama de radiación en el plano de coordenadas polares, con combinación de puertos; en la cual se puede verificar la unidireccionalidad del lóbulo principal, al límite superior de frecuencia de 45,85 GHz conforme a diseño, presenta un valor de ganancia de 7,28 dBi (a) y un valor de directividad de 7,64 dBi (b).

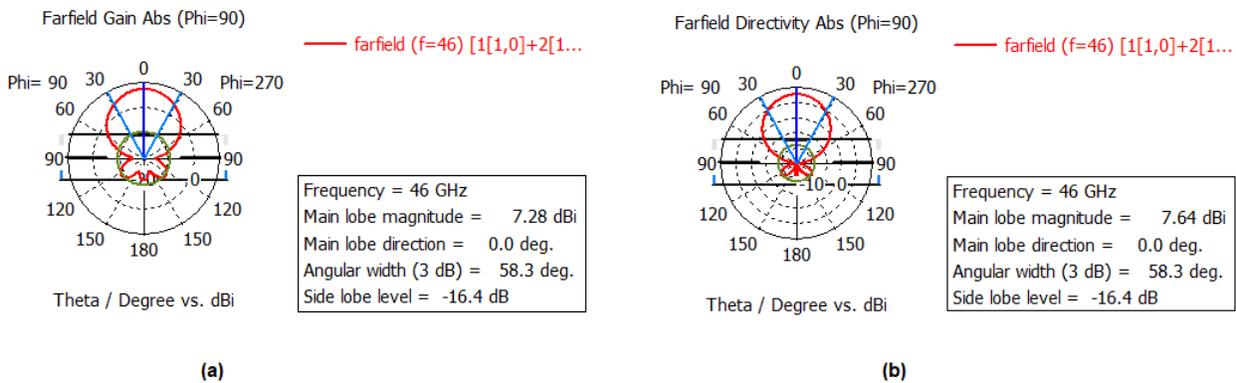


Figura 37. Diagrama de radiación en el plano polar, con combinación de puertos a 45,85 GHz (a) Ganancia, (b)Directividad

Ahora se puede visualizar en la Figura 38 el resultado del diagrama de radiación en el plano de coordenadas polares, con puertos no combinados; en la cual se visualiza que al límite superior de la frecuencia de operación a 45,85 GHz, existe una desviación de la unidireccionalidad del lóbulo principal, y además se presenta un valor de ganancia de 5,64 dBi (a) y un valor de directividad de 5,93 dBi (b), los cuales son menores con respecto a los valores obtenidos con los puertos combinados para la misma frecuencia.

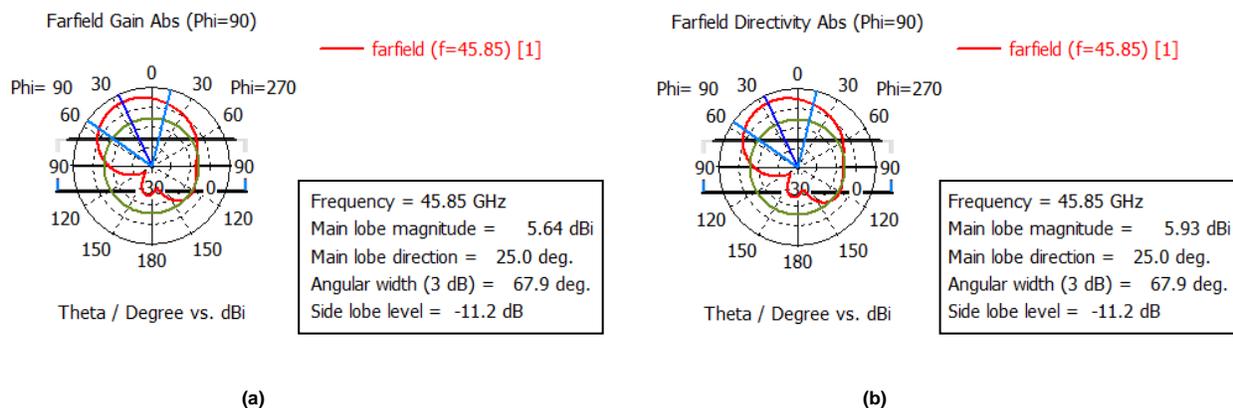


Figura 38. Diagrama de radiación en el plano polar, puertos no combinados a 45,85 GHz (a) Ganancia, (b)Directividad

En este punto es importante hablar de la relación de onda estacionaria de voltaje VSWR, que es un parámetro que indica el desajuste entre una antena y su línea de alimentación. Los valores para VSWR están enmarcados dentro del rango de 1 a ∞ . Un valor de Relación de Onda Estacionaria de Voltaje inferior a 2 se puede considerar como adecuado para una combinación de antena con línea de alimentación. Por lo tanto, generalmente cuando el valor de VSWR excede 2 para una frecuencia de interés, se puede decir que la antena en cuestión está mal adaptada. Para el diseño de antena que se ha realizado en éste proyecto de investigación, el valor de VSWR para la frecuencia requerida de 45 GHz tiene un valor de 1.81, por lo que se deduce que la relación de onda estacionaria de la antena es adecuada. A continuación, se muestra la gráfica de VSWR:

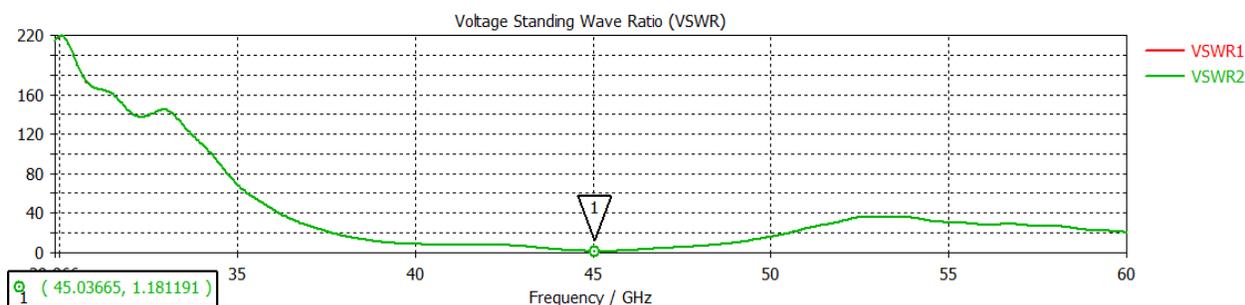


Figura 39. Relación de Onda estacionaria de Voltaje VSWR a 45 GHz

En base a los resultados obtenidos, se puede realizar el cálculo del valor de la eficiencia de radiación. La eficiencia de radiación se define como la razón entre la ganancia y la directividad de una antena, en nuestro caso se toman los dos parámetros para las frecuencias definidas de 44,75 GHz y 45,85 GHz, de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\eta = \frac{G}{D}$$

Para la frecuencia de 44,75 GHz se tiene una eficiencia de radiación de 0,951, y para la frecuencia de 45,85 GHz se tiene una eficiencia de radiación de 0,953.

4.3. ANALISIS DE LA ANTENA PROPUESTA COMPARADA CON UNA ANTENA CONVENCIONAL

A continuación, se presenta una estadística comparativa de parámetros importantes resultantes de la antena propuesta versus los mismos parámetros resultantes de una antena convencional.

Los parámetros analizados de acuerdo a la población de este estudio son los siguientes:

- Ancho de banda,
- Ganancia, y
- Eficiencia.

H₀: los datos siguen una distribución normal

H₁: los datos no siguen una distribución normal

Si $n > 50$ se aplica Kolmogorov-Smirnov

Si $n \leq 50$ se aplica Shapiro

Si p-valor (Sig) < 0.05 se rechaza H₀

Si p-valor (Sig) ≥ 0.05 se acepta H₀ y se rechaza H₁

4.3.1. Análisis del ancho de banda

De acuerdo con la Tabla 4, la media del ancho de banda de la antena propuesta es de 1,3220 GHz y la media de la antena convencional es de 0,9000 GHz; por lo tanto, de acuerdo a la prueba de hipótesis se demuestra que existe diferencia significativa entre las medias y se determina que la media del ancho de banda de la antena propuesta es mayor que la media del ancho de banda de la antena convencional.

Tabla 4. Estadísticas de grupo para Ancho de banda

Estadísticas para una muestra				
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
AP_AB	20	1,3220	,29359	,06565
AC_AB	20	,9000	,41320	,09240

Fuente: Elaboración propia

Como se puede verificar en la siguiente gráfica, existe una diferencia significativa entre las medias de los datos de la variable ancho de banda respecto de la antena convencional (AC) y la antena propuesta (AP).

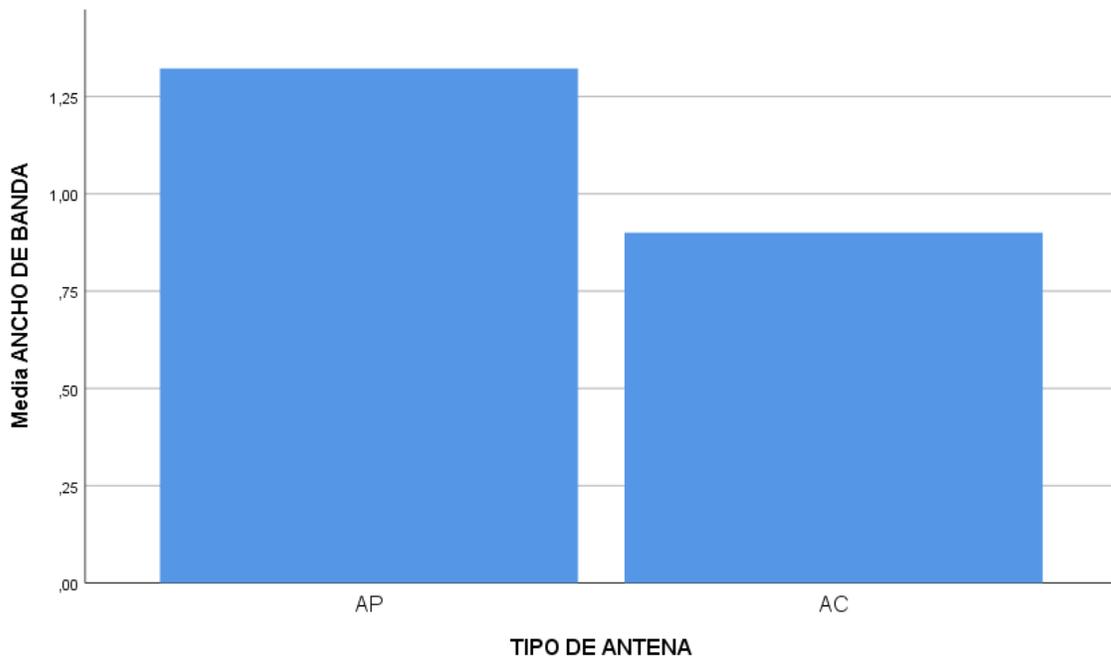


Figura 40. Media Ancho de banda: Antena propuesta vs. Antena convencional

Como prueba de la hipótesis respecto a la variable AP, en la tabla, p-valor=0,001 es menor que 0,05 es decir existe diferencia significativa entre las medias de los datos de la variable ancho de banda respecto de la antena convencional y la antena propuesta.

Tabla 5. Prueba de normalidad de la variable Ancho de banda.

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Diferencia_AB	,171	20	,126	,914	20	,078

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 utilizamos Shapiro-Wilk ya que tenemos n=20 y es menor que 50 por lo tanto, el p-valor tenemos de 0,078 en la diferencia de las dos antenas respecto a la variable ancho de banda, lo cual nos da a conocer que se acepta H₀ y se rechaza H₁, al aceptar H₀ quiere decir que los datos siguen una distribución normal.

4.3.2. Análisis de la Ganancia

De acuerdo con la Tabla 6, la media de la ganancia de la antena propuesta es de 7,7155dBi y la media de la antena convencional es de 4,3845 dBi; por lo tanto, al mostrar según la prueba de hipótesis que existe diferencia significativa entre las medias se determina que la media de la ganancia de la antena propuesta es mayor que la media de la ganancia de la antena convencional.

Tabla 6. Estadísticas de grupo para Ganancia

	Estadísticos descriptivos				
	N	Media	Desv. Desviación	Mínimo	Máximo
AP_G	20	5,7155	,83747	3,54	7,28
AC_G	20	4,3845	,90123	2,81	5,74

Fuente: Elaboración propia

Como se puede verificar en la gráfica siguiente, existe una diferencia notable entre las medias de los datos de la variable de ganancia respecto de la antena convencional (AC) y la antena propuesta (AP).

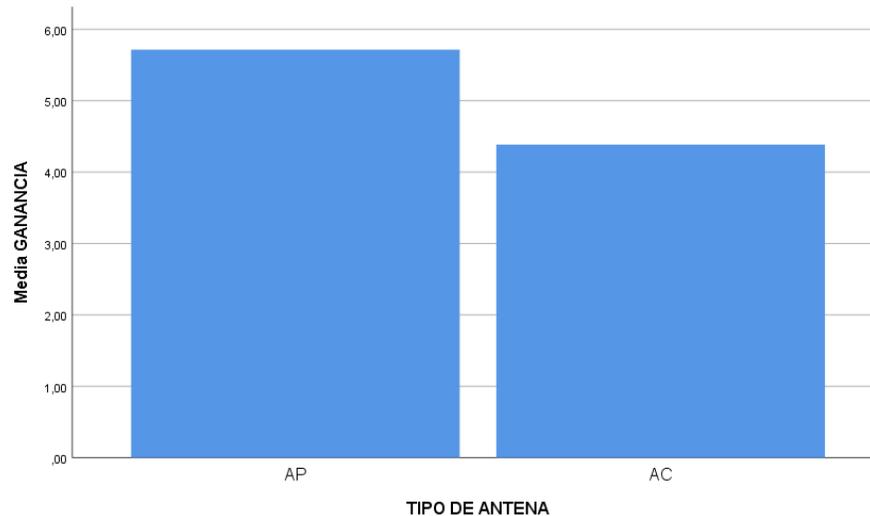


Figura 41. Media Ganancia: Antena propuesta vs. Antena convencional

Tabla 7. Pruebas de normalidad para la variable ganancia.

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Diferencia_G	,180	20	,089	,881	20	,019

En la Tabla 7 utilizamos Shapiro-Wilk ya que tenemos $n=20$ y es menor que 50 por lo tanto, el p-valor tenemos de 0,019 lo cual nos da a conocer que se rechaza H_0 y se acepta H_1 , al aceptar H_1 quiere decir que los datos no siguen una distribución normal, para ello tenemos que hacer el test de Wilcoxon.

Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

Tabla 8. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon.

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
AP_G - AC_G	Rangos negativos	0 ^a	,00	,00
	Rangos positivos	20 ^b	10,50	210,00
	Empates	0 ^c		
	Total	20		

a. AP_G < AC_G

b. AP_G > AC_G

c. AP_G = AC_G

En la Tabla 8 tenemos la prueba de Wilcoxon que nos da a conocer que tenemos diferencia significativa con respecto a la variable Ganancia, por lo tanto la antena propuesta(AP) es mejor que la antena convencional(AC).

Tabla 9. Estadísticos de prueba de la variable Ganancia

Estadísticos de prueba ^a		AP_G - AC_G
Z		-3,920 ^b
Sig. asintótica(bilateral)		,000

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

b. Se basa en rangos negativos.

En la Tabla 9 el p_valor tiene el valor de 0.000 es decir es menor al 0,05 tenemos que rechazar H₀ y validar H₁.

4.3.3. Análisis de la Eficiencia

De acuerdo con la Tabla 10, la media de la eficiencia de la antena propuesta es de 94,4015% y la media de la eficiencia de la antena convencional es de 90,4355%; por lo tanto, se muestra según la prueba de hipótesis que existe diferencia significativa entre las medias se determina que la media de la eficiencia de la antena propuesta (AP) es mayor que la media de la eficiencia de la antena convencional (AC).

Tabla 10. Estadísticas de grupo para Eficiencia

	TIPO DE ANTENA	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
EFICIENCIA	AP	20	94,4015	1,32609	,29652
	AC	20	90,4355	2,13431	,47725

Fuente: Elaboración propia

Como se puede verificar en la gráfica siguiente, existe una leve diferencia entre las medias de los datos de la variable de eficiencia respecto de la antena convencional (AC) y la antena propuesta (AP).

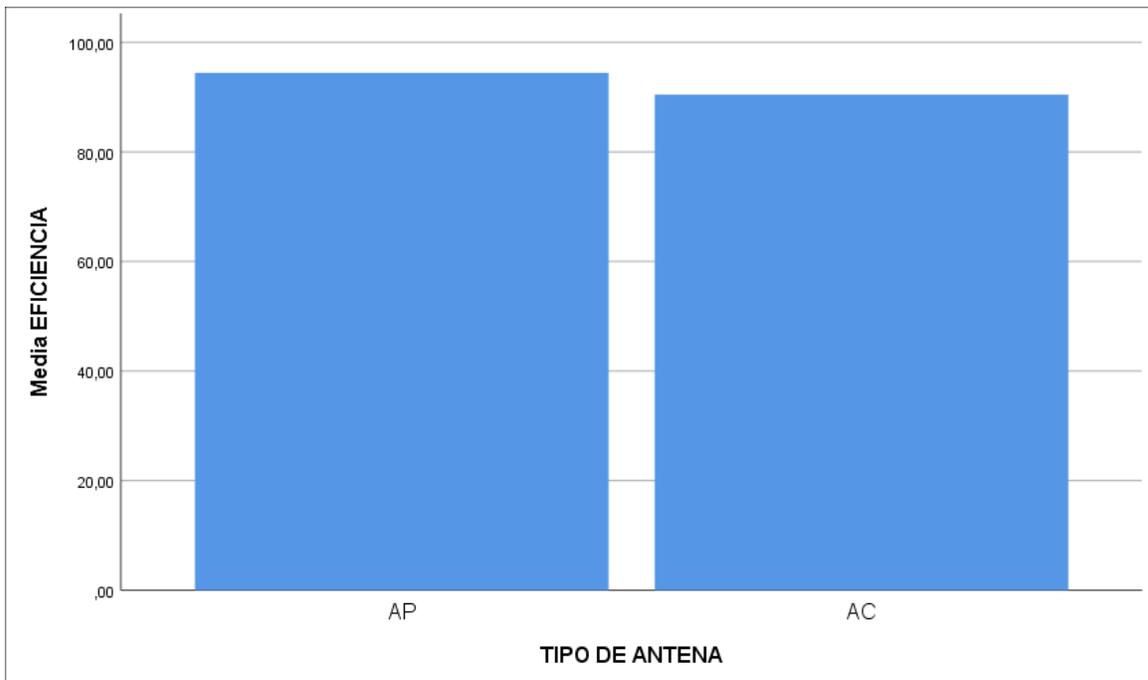


Figura 42. Media Eficiencia: Antena propuesta vs. Antena convencional

En la Tabla 11, p-valor=0,031 es menor que 0,05, es decir existe diferencia significativa entre las medias de los datos de la variable eficiencia respecto de la antena convencional y la antena propuesta.

Tabla 11. Prueba de muestras independientes para Eficiencia

		prueba t para la igualdad de medias								
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
EFICIENCIA	Se asumen varianzas iguales	5,026	,031	7,059	38	,000	3,96600	,56186	2,82857	5,10343
	No se asumen varianzas iguales			7,059	31,767	,000	3,96600	,56186	2,82119	5,11081

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 12 utilizamos Shapiro-Wilk ya que tenemos n=20 y es menor que 50 por lo tanto, el p-valor de la diferencia de antenas con respecto a la eficiencia es de 0,235, por lo tanto acepta H₀ es decir que los datos siguen una distribución normal.

Tabla 12. Pruebas de normalidad para la variable Eficiencia.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Diferencia_EF	,152	20	,200*	,940	20	,235

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En el presente proyecto de tesis se ha diseñado y simulado una antena plana alimentada con una línea microstrip en la banda de ondas milimétricas para 5G con frecuencia de resonancia de 45 GHz y opera desde la frecuencia de 44,75 GHz hasta la frecuencia de 45,85 GHz; es decir tiene un ancho de banda operacional de aproximadamente 1,1 GHz.
- Se ha realizado una investigación de algunos estudios y trabajos previos de diseños de array de antenas tipo planar en ondas milimétricas, de aquellos se concluye que, si bien en ninguno de ellos se diseñaron antenas para operar en frecuencias más allá de los 30 GHz como es el caso de éste proyecto, si se puede verificar que mientras se requiere más alta frecuencia de operación, más reducido el tamaño de la antena como tal, y que pequeñas variaciones en las dimensiones pueden desplazar la frecuencia de operación de una antena hacia frecuencias superiores o inferiores, por lo que la experimentación propia durante la simulación es vital.
- Una vez realizado el estudio de la alternativa de diseño, se procedió a simular la antena diseñada en el software CST Microwave Studio para verificar el cumplimiento de los parámetros de operación de la antena, se concluyó que se tiene un ancho de banda aproximado de 1,1 GHz que va desde los 44,75 GHz hasta los 45,85 GHz; así mismo, entre el rango de frecuencias mencionado, los valores de la impedancia se mantiene alrededor o bajo los 50 ohms, lo cual permite concluir que existe un acoplamiento adecuado con las líneas de alimentación., ganancia y eficiencia de la antena.
- La simulación también permitió observar el diagrama de radiación en 3D, el cual se pudo confirmar que era uniforme y unidireccional en el sentido requerido; de igual manera, se pudieron observar los diagramas polares del diagrama de radiación en los cuales se pudo verificar la unidireccionalidad del lóbulo principal de radiación y verificar también la funcionalidad de dos de los parámetros más importantes de la antena como son la ganancia, cuyo valor resultante es de 6,18 dBi y la directividad, cuyo valor alcanzado es de 6,43 dBi, con eficiencia de 0.96.

- Otro parámetro importante que es la Relación de Onda estacionaria de Voltaje (VSWR) está en un valor de 1.81. el mismo que permite deducir que la antena diseñada está adaptada correctamente a la línea de alimentación.
- También se procedió a realizar la comparación de los valores obtenidos del diseño de antena propuesto con el método convencional, para los parámetros Ancho de banda, Ganancia, y Eficiencia, de lo que se verificó que variaciones pequeñas en las dimensiones mueven la frecuencia y el ancho de banda de operación, en éste caso, se pudo verificar con claridad que el solo hecho de incluir pequeñas ranuras en el parche principal de la forma geométrica principal de la antena puede hacer de una antena funcional o no.

5.2. RECOMENDACIONES

- Previo al inicio de un diseño de una antena plana alimentada con línea de microstrip, es muy recomendable investigar sobre estudios previos al respecto, puesto que pueden facilitar cualquier proyecto de este tipo, e incluso valdría la pena el uso de estos diseños previos como punto de partida para cualquier nuevo diseño de antena, aun si los parámetros planteados cambien mucho.
- Si el objetivo planteado, además del diseño, incluye la construcción o fabricación de una antena, se recomienda definir adecuadamente desde un principio los parámetros y las características de los materiales a ser utilizados como sustratos; puesto que variables como espesor y coeficiente dieléctrico, pueden afectar en gran medida el resultado final estos tipos de antena tipo planar luego de su proceso de fabricación.
- Cuando el diseño de la antena incluye más de un puerto, además de las gráficas de los parámetros de la antena que se obtienen por cada uno; es muy importante realizar la combinación de los puertos para obtener las gráficas de los parámetros S de la antena, y considerar además las condiciones del entorno en la que la antena deberá operar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.E. Luis Felipe Borja, «Evolución histórica de los sistemas de comunicación,» 18 10 2021. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/unidossomosmaz/asignaturas-estudio/home/modulo-uno/evolucion-historica-de-los-sc>.
- [2] Q.-V. Pham, F. Fang, V. N. Ha, J. Pitan, M. Le, B. L. Le, W.-J. Hwang y Z. Ding, «A Survey of Multi-Access Edge Computing in 5G and Beyond: Fundamentals, Technology Integration, and State-of-the-Art,» *IEEE Acces*, vol. 8, 2020.
- [3] N. Fernández, «ANTENAS PARA DISPOSITIVOS MÓVILES 5G e IoT,» Valencia, 2019.
- [4] P. Pattnaik, S. Mohanty y M. Satarupa, «Smart Healthcare Analytics in IoT Enabled Environment,» *Intelligent Systems Reference Library*, pp. 35-61, sf.
- [5] A. Durán, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA CONFORMADA PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO UTILIZADO PARA MONITOREO AGRÍCOLA,» Quito, 2020.
- [6] E. Sandi, Rusmono, A. Diamah y K. Vinda, «Ultra-wideband Microstrip Array Antenna for 5G Millimeter-wave Applications,» *Journal of Communications*, 2020.
- [7] G. Córdova, Artist, *Estudio técnico de ocupación del espectro radioeléctrico para redes de servicio móvil avanzado (SMA) 5G en el Ecuador..* [Art]. 2018.
- [8] D. Arizaca y M. Bataller, «DISEÑO DE ANTENAS EN BANDA DE FRECUENCIAS MILIMÉTRICAS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES 5G,» Valencia, s.f..
- [9] C. Casa, «DISEÑO DE ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP CON CONDUCTOR CURVO PARA ONDAS MILIMÉTRICAS,» Quito, 2021.
- [10] O. Hernández, M. Rodríguez y F. Marante, «Antena De Microcinta Con Polarización Circular En La Banda De 60 Ghz,» La Habana, 2018.
- [11] T. León, «DISEÑO DE UNA ANTENA MICROSTRIP PARA ONDA MILIMÉTRICA,» Quito, 2020.
- [12] A. Luna, Antenas, Puebla: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2015.
- [13] F. J. Vizuete, «ANTENA DE MICROCINTA CON POLARIZACIÓN CIRCULAR EN LA BANDA DE 60 GHz,» Quito, 2021.
- [14] E. Chalapud, «ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP PARA LAS BANDAS DE 57-64, 64-71 Y 71- 76 GHz,» Quito, 2021.
- [15] X. H. Paucar y M. A. Quispe, «DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP PARA BANDA DE ONDA,» Quito, 2020.
- [16] L. Aucatoma, J. Gómez y S. Recalde, «Funcionamiento de una Antena Bocina (Horn) con base de Microstrip mediante la variación de su apertura en banda de ondas milimétricas,» Quito, 2021.
- [17] C. Rueda, Diseño de una Antena Plana Multibanda para Dispositivos Móviles usando los estándares GSM/UMTS/LTE/Zigbee/Rfid, Mexico DF: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.

- [18] J. Anchundia, J. Anchundia y B. Chere, «La tecnología 5G en el Ecuador. Un análisis desde los requerimientos 5G,» *Polo del conocimiento*, vol. 5, nº 42, pp. 805-822, 2020.
- [19] M. Ferrando y A. Valero, «Introducción. Parámetros de Antenas,» 2021. [En línea]. Available: http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF.
- [20] J. Gómez y S. Recalde, «ANALIZAR EL FUNCIONAMIENTO DE UNA ANTENA BOCINA (HORN) CON BASE DE MICROSTRIP MEDIANTE LA VARIACIÓN DE SU APERTURA EN BANDA DE ONDAS MILIMÉTRICAS,» Quito, 2021.
- [21] J. A. Bava, *Antenas Reflectoras em microondas*, La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 2013.
- [22] B. Rodriguez, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP DE RANGO DE OPERACIÓN DE SUPER ALTAS FRECUENCIA (3.5 GHz a 6 GHz) PARA LA EVALUACIÓN DE LA TASA DE ABSORCIÓN ESPECIFICA EN TEJIDOS HUMANOS.,» Bogotá, 2019.
- [23] A. Gordón, «Diseño, simulación e implementación de una antena microstrip Yagi para operar en la banda de 5.8 GHz,» Quito, 2016.
- [24] K. Olán, *Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicación en Internet de las cosas*, Puebla: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2019.
- [25] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl y A. Ittipiboon. [En línea].
- [26] Motorola, «IEEE 802.11^a For Interference Avoidance,» 2009. [En línea].
- [27] D. M. Pozar, «IEEE Transactions on Antennas and Propagation,» Junio 1987. [En línea].
- [28] J. Coonrod y A. Aguayo, «Rogers Corporation,» Agosto 2009. [En línea].
- [29] I. Ederra, «Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.,» [En línea].
- [30] J. C. García, «E.T.S de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación,» 14 Junio 2018. [En línea].
- [31] O. Zafra, «Tipos de investigación,» *Revista Científica Gral. José Maria Cordova*, pp. 13-14, 2006.
- [32] EcuRed, «Antena Yagi Uda,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Antena_Yagi_Uda. [Último acceso: 25 10 2021].
- [33] E. Cordoví y C. García, «Propuestas de antenas activas para la recepción de la televisión digital en Cuba,» Cuba, 2016.
- [34] Universidad Politécnica de Valencia, «El dipolo doblado,» Valencia, 2021.
- [35] Universidad Politécnica de Valencia, «Antenas Microstrip,» 2021. [En línea]. Available: http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Transparencias_reducidas/Tema_9.pdf.
- [36] C. Pérez, «ANTENAS CON REFLECTOR PARABÓLICO,» 2018. [En línea]. Available: https://personales.unican.es/perezvr/pdf/Antenas%20con%20Reflector%20Parabólico_V4.pdf. [Último acceso: 25 10 2021].
- [37] M. Ihamji, E. h. Abdelmounim, J. Zbitou, H. Bennis y M. Latrach, «TELKOMNIKA,» Octubre 2018. [En línea].

- [38] C. R. Peñafiel, Design of Multi-feed UWB Antennas using the Theory of Characteristic Modes, Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2021.
- [39] L. A. Quiroz, Propuesta para un modelo de antena microstrip basada en perturbaciones geométricas, Bogotá: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2016.
- [40] D. Viteri, DISEÑO DE ANTENA PARA CURACIONES, Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2009.
- [41] D. Albornoz, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN ARREGLO DE ANTENAS METAMATERIAL ALIMENTADO MEDIANTE ACOPLAMIENTO POR APERTURA A 5.8 GHZ EN SUSTRATO FR4, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2019.
- [42] D. Jaramillo, Estudio, Diseño y Construcción de un prototipo de arreglo de antenas microstrip para recepción en la banda y comparable a la ganancia de una antena parabólica, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2013.
- [43] C. Perdomo y C. Vivas, Técnica microstrip conceptos, aplicaciones y software de diseño, Popayán: Universidad del Cauca, 2004.
- [44] S. Castrillón, Implementación y caracterización de antena microstrip en geometría de anillo, Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano, 2016.
- [45] J. Torrecillas, Diseño de una antena de parche con ancho de banda usando técnicas de adaptación de impedancias, Cartagena de Indias: Universidad Politécnica de Cartagena, 2018.
- [46] X. Yu, Diseño de antenas de tipo parche para un transceptor WIMAX basado en el chip MAX2838, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, 2014.
- [47] A. Pérez, J. Jabonero y C. Doncel, Antena tipo parche diseño y simulación, Bogotá: Unipanamericana, 2018.
- [48] E. Cárdenas, N. Santana y L. Narváez, Diseño de una antena patch, Bogotá: Universidad INCCA de Colombia, 2014.
- [49] J. m. Nieto, Diseño de un array de antenas parche con alimentación en serie a 60GHz, Pamplona: Universidad Pública de Navarra, 2018.
- [50] J. X. Llumiquinga Bungacho y F. A. Olmedo Garcés, Artists, *Análisis del efecto del SAR provocado por una antena microstrip en onda milimétrica*. [Art]. Universidad Politécnica Salesiana, 2022.