



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA
COMPACTA PARA APLICACIONES EN INTERNET DE LAS
COSAS EN 5G**

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

Autor:

Velin Sagbay Jose David

Tutor:

Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda

Riobamba, Ecuador. 2023

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, JOSE DAVID VELIN SAGBAY, con cédula de ciudadanía 1600495210, autor del trabajo de investigación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA COMPACTA PARA APLICACIONES EN INTERNET DE LAS COSAS EN 5G**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí 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 de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 3 de mayo 2023.



JOSE DAVID VELIN SAGBAY

C.I: 1600495210

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado del trabajo de investigación Diseño e implementación de una antena compacta para aplicaciones en internet de las cosas en 5G, presentado por Jose David Velin Sagbay, con cédula de identidad número 1600495210, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la APROBACIÓN de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba, 3 de mayo 2023.

Daniel Antonio Santillán Haro, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Manuel Antonio Meneses Freire, Dr.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda, PhD.
TUTOR

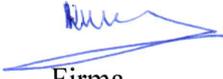


CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA COMPACTA PARA APLICACIONES EN INTERNET DE LAS COSAS EN 5G, presentado por Jose David Velin Sagbay, con cédula de identidad número 1600495210, 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, 3 de mayo 2023.

Presidente del Tribunal de Grado
Mgs. Klever Hernán Torres Rodríguez



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Daniel Antonio Santillán Haro



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
Dr. Manuel Antonio Meneses Freire PhD.



Firma



CERTIFICACIÓN

Que, **VELIN SAGBAY JOSE DAVID** con CC: **1600495210**, estudiante de la Carrera **INGENIERIA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA COMPACTA PARA APLICACIONES EN INTERNET DE LAS COSAS EN 5G**", cumple con el 10 %, 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, 20 de abril de 2023

PhD. Carlos Peñafiel
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis se la dedico a mi familia, a mi madre Karina y a mis hermanas Johanna y Gabriela por ser el motor de mi esfuerzo, por todas las virtudes y enseñanzas que han dejado en mí, que sin duda han formado a un hombre del cual se pueden sentir orgullosas.

Jose David Velin Sagbay

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a la Universidad Nacional de Chimborazo y los docentes que durante el camino de mi formación académica me han aportado grandes conocimientos que hicieron que pueda desarrollarme día a día como profesional y ser humano, gracias por la dedicación y paciencia.

Un agradecimiento a Edison Villarroel por su apoyo a mi desarrollo profesional en gran parte de mi vida estudiantil.

También quiero agradecer al principal colaborador Carlos Peñafiel durante todo el proceso que conllevo esta investigación, quien con sus conocimientos, enseñanza y dirección permitió que este trabajo fuese concluido.

Finalmente, Agradezco a mi familia y mi novia por siempre estar conmigo apoyando en lo que necesito.

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA.....	II
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL	III
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	IV
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
INTRODUCCION.....	15
CAPÍTULO I.....	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo General.	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
CAPÍTULO II.....	18
2. MARCO TEORICO	18
2.1 ANALISIS DEL ESTADO DEL ARTE	18
2.2 FUNDAMENTACION TEÓRICA	24
2.2.1 INTERNET DE LAS COSAS	24
2.2.2 REDES DE QUINTA GENERACIÓN	25
2.2.3 ANTENAS MICROSTRIP	26
2.2.4 ANTENAS MIMO	28
2.2.5 TEORIA DE MODOS CARACTERÍSTICOS	29
2.2.6 TECNICAS DE COMPACTACION	30
CAPÍTULO III	32

3	METODOLOGIA.....	32
3.1	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	32
3.2	MÉTODOS Y TECNICAS DE INVESTIGACIÓN	32
3.3	FUENTES DE INFORMACIÓN	32
3.4	INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
3.5	POBLACIÓN, MUESTRA Y METRICAS DE RENDIMIENTO	33
3.6	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES.....	33
3.7	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	33
	CAPÍTULO IV	40
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.7	ANALISIS DE LA ANTENA MULTI ALIMENTACIÓN DE DOS PUERTOS. 40	
4.8	ANALISIS DE LA ANTENA DE DOS PUERTOS CON LÍNEA EN CORTOCIRCUITO	44
4.9	RESULTADOS DE LA OPTIMIZACION DE LA ANTENA MULTI ALIMENTACIÓN.....	49
4.10	ANÁLISIS DE LOS MODOS CARACTERÍSTICOS.....	52
4.11	RESULTADOS EXPERIMENTALES	55
4.12	INTEGRACIÓN DE LA ANTENA EN UN RELOJ DE DESARROLLO	59
4.13	ANALISIS DE RELACION ENTRE LAS VARIABLES MEDIDAS.....	62
	CAPÍTULO V	64
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
5.7	CONCLUSIONES	64
5.8	RECOMENDACIONES.....	65
	BIBLIOGRAFÍA	66
	ANEXOS	72

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Comparación entre los 4 sistemas de antena.	21
Tabla 2. Operacionalización de las variables	33
Tabla 3. Medidas del diseño de la antena.	38
Tabla 4. Comparación de antena simulada con y sin línea en corto circuito.....	52
Tabla 5. Valores medidos de RSSI.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de antena compacta SWB con integración de ranuras en el parche y plano de tierra, sobre un laminado Ultralam 3850 [14].....	18
Figura 2. Diseño de antena MULTI ALIMENTACIÓN de cuatro puertos [20].....	19
Figura 3. Diseño de antena MIMO de dos puertos opuestamente lado a lado a) vista frontal b) vista posterior [22].....	20
Figura 4. Diseño de antena MIMO de 10 puertos de lado a lado y frente a frente a) vista frontal con ranuras elípticas b) vista posterior [23].....	22
Figura 5. Diseño de antena MIMO UWB de 4 puertos, (a) vista frontal (b) vista posterior. [26]	22
Figura 6. Diseño de antena dos puertos con meta rejilla en el plano de tierra [30].	23
Figura 7. IoT basado en aplicaciones inteligentes [32].	24
Figura 8. Antena Microstrip circular [39].	26
Figura 9. La distribución de corriente característica de los dos discos metálicos circulares interconectadas. (a) Análisis usando la pared eléctrica, (b) usando una pared magnética, y (c) distribución de corriente en la estructura completa [52].	30
Figura 10. Diseño de Antena Microstrip (a)Vista frontal, (b) vista posterior	35
Figura 11. Parámetros S11 de la antena Microstrip.	35
Figura 12. Geometría de la antena multi alimentación vista frontal.	36
Figura 13. Geometría de la antena multi alimentación: vista posterior.....	36
Figura 14. Diseño de antena con integración de línea en corto circuito.....	37
Figura 15. Variables del diseño de antena (a) vista frontal (b)vista posterior.....	38
Figura 16. Medidas de la línea de meandro.....	39
Figura 17. Diseño de la antena con línea de Meandro	39
Figura 18. Diagrama de radiación del diseño de la antena Microstrip (a) 2.4 GHz y (b) 5.8 GHz.....	40
Figura 19. Parámetro S11 y S12 sin divisor de potencia.....	41
Figura 20. Parámetro S ₁₁ con divisor de potencia.	41
Figura 21. Impedancia Z ₁₁ real e imaginaria sin línea de corto circuito.	42
Figura 22. Diagrama de radiación de diseño sin línea en cortocircuito para 2.4 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad.....	43
Figura 23. Diagrama de radiación de diseño sin línea en cortocircuito para 5.8 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad.....	43
Figura 24. Diagrama de radiación del diseño de la antena con múltiples puertos para 2.4 GHz: (a) diagrama de radiación con alimentación de los puertos individuales , (b) diagrama de radiación con alimentación de los puertos combinados.....	44

Figura 25. Diagrama de radiación del diseño de la antena con múltiples puertos para 5.8 GHz: (a) diagrama de radiación con alimentación de los puertos individuales , (b) diagrama de radiación con alimentación de los puertos combinados.....	44
Figura 26. Parámetro S11 y S12 sin divisor de potencia.....	45
Figura 27. Parámetros S antena con línea en cortocircuito y combinación de puertos.	46
Figura 28. Impedancia Z_{11} real e imaginaria con divisor de potencia.....	46
Figura 29. Diagrama de radiación de diseño con línea en cortocircuito para 2.4 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad.....	47
Figura 30. Diagrama de radiación de diseño con línea en cortocircuito para 5.8 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad.....	48
Figura 31. Parámetros S antena con línea de meandro y sin combinación de puertos.	49
Figura 32. Parámetros S antena con línea de meandro y combinación de puertos.	49
Figura 33. Impedancia Z_{11} real e imaginaria de la antena compacta.	50
Figura 34. Diagrama de radiación del diseño compacto para 2.4 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad	50
Figura 35. Diagrama de radiación del diseño compacto para 5.8 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad.	51
Figura 36. Representación de los ángulos característicos α_n de los modos en la estructura.	52
Figura 37. Distribución de corriente modal de la estructura y plano de tierra de los 7 modos a sus respectivas frecuencias de resonancia.....	54
Figura 38. Diagramas modales de radiación con sus respectivas frecuencias de resonancia.....	55
Figura 39. Prototipo fabricado de la antena propuesta (a) antena 1 con línea en cortocircuito y (b) antena 2 compacta	56
Figura 40. Medición de la antena con VNA (a) antena 1 y (b) antena 2.....	56
Figura 41. Medición de la antena 1 sin divisor de potencia.	57
Figura 42. Medición de la antena 1 con divisor de potencia.....	57
Figura 43. Medición de la antena 2 sin divisor de potencia.	58
Figura 44. Medición de la antena 2 con divisor de potencia.....	58
Figura 45. Medición de la antena compacta con el reloj de desarrollo	59
Figura 46. Medición inicial y final del parámetro RSSI.	60
Figura 47. Medición de parámetros RSSI del reloj de desarrollo.	60
Figura 48. Medición inicial y final de la antena del reloj del parámetro RSSI.	61
Figura 49. Medición final de la antena.....	62
Figura 50. Diagrama de dispersión de las variables.....	63

RESUMEN

En este trabajo de investigación se ha desarrollado y probado una antena multi alimentación de dos puertos sobre un reloj de desarrollo, la antena compacta face to face trabaja en las bandas industriales, médicas y libres o conocido como bandas ISM de 2.4 GHz y 5.8 GHz, la antena esta desarrollada para aplicaciones de IoT para la actualidad de nuestro entorno y pensando en el futuro del desarrollo de las telecomunicaciones como una solución a al acoplamiento mutuo para bandas de 5G.

Esta antena está construida sobre un sustrato FR-4 de 1.5 mm de ancho, permitividad dieléctrica $\epsilon_r = 4,4$ y recubrimiento de cobre de 0.035 mm, la antena tiene una medida total de 72x45x1.5 mm, dentro de ella dos elementos radiadores en forma de octágono atachado en los extremos con una línea de transmisión en forma triangular, se aplicó el método de integración de stub para compactar la antena y llegar a las bandas deseadas, además se desarrolló un plano de tierra modificado (DGS), para mejorar el ancho de banda y también ayudo al ajuste de las frecuencias, para la reducción del acoplamiento mutuo en la banda de 2.4 GHz se usó una línea en corto circuito que une los dos elementos radiantes, posteriormente para la compactación de la antena se usó línea de meandro para unir los elementos.

El documento está desarrollado por 5 capítulos. En el primer capítulo esta desarrollado por el planteamiento del problema, el objetivo general y los objetivos específicos a alcanzar. En el segundo capítulo se cumple con el análisis del estado del arte y el desarrollo del marco teórico. Para el tercer capítulo, se detalla el procedimiento utilizado para el diseño y simulación de la estructura. Posteriormente, en el capítulo cuatro se presentan los resultados, mediciones, análisis de modos característicos y operación de la antena medida e implementada en el reloj de prueba. Finalmente, en el capítulo cinco se determinan las conclusiones y recomendaciones a las que se ha llegado con este proyecto de investigación.

Palabras claves: DGS, Multi alimentación , IoT, Stub, Ranuras, modos característicos.

ABSTRACT

In this research work has been developed and tested a two-port multiple feed antenna on a development clock, the compact face to face antenna works in the industrial, medical and free bands or known as ISM bands of 2.4 GHz and 5.8 GHz, the antenna is developed for IoT applications for our current environment and thinking about the future of telecommunications development as a solution to mutual coupling for 5G bands.

This antenna is built on a FR-4 substrate of 1.5 mm wide, dielectric permittivity $\epsilon_r = 4.4$ and copper coating of 0.035 mm, the antenna has a total measurement of 72x45x1.5 mm, it has inside two radiating elements in the shape of octagon tied at the ends with a transmission line in triangular shape, the stub integration method was applied to compact the antenna and reach the desired bands, also a modified ground plane was developed (DGS), to improve the bandwidth and also helped the adjustment of frequencies, for the reduction of mutual coupling in the band of 2.4 GHz band, a short-circuit line was used to join the two radiating elements, then for the compactness of the antenna, a meander line was used to join the elements.

The document is developed in 5 chapters. The first chapter is developed by the problem statement, the general objective and the specific objectives to be achieved. The second chapter contains the analysis of the state of the art and the development of the theoretical framework. The third chapter details the procedure used for the design and simulation of the structure. Subsequently, chapter four presents the results, measurements, characteristic modes analysis and operation of the antenna measured and implemented in the test clock. Finally, in chapter five the conclusions and recommendations reached with this research project are determined.

Keywords: DGS, Multi power, IoT, Stub, Slots, Characteristic modes



Firmado electrónicamente por:
EDISON RAMIRO
DAMIAN ESCUDERO

Reviewed by:
MsC. Edison Damian Escudero
ENGLISH PROFESSOR
C.C.0601890593

INTRODUCCION

El Internet de las cosas (IoT) es una tecnología que nos conecta con todo lo que nos rodea, la tendencia de IoT nos lleva a cambios en muchos aspectos de nuestras vidas, seguridad, salud, transporte e industria. IoT podría implementarse en cualquier lugar de la vida diaria, en interiores y exteriores, y para ello, existe una creciente demanda de diseños de antenas compactas que puedan integrarse de forma invisible en varios objetos [1].

Diseñar antenas compactas de pocos milímetros y que sean de múltiples entradas y múltiples salidas (multi alimentación) es uno de los retos que trae las redes de telecomunicaciones de quinta generación, la miniaturización de las antenas trae consigo grandes beneficios en la estructura del dispositivo, pero también es un gran reto para la ingeniería de diseño de antenas [2], [3], la tendencia de las investigaciones para los dispositivos de IoT es la de crear cosas más pequeñas, con mejores rendimientos y de bajo costo.

La reducción del tamaño físico de la estructura de la antena se vuelve cada vez más importante para dispositivos portátiles y no portátiles [4]. Desafortunadamente, hacer que la estructura de la antena sea más compacta conduce a la degradación de los parámetros de rendimiento eléctrico, principalmente en el ancho de banda, la eficiencia, directividad entre otros [5].

La necesidad de antenas muy pequeñas o compactas para el desarrollo de nuevas tecnologías es de gran importancia, ya que según Worldwide Global DataSphere (WGD) IoT Devices and Data Forecast se espera que para 2025 se conecten alrededor de 41600 millones de dispositivos a Internet [6]; por ello estas deben tener la capacidad de poder implantarse en dispositivos como tabletas, lavadoras, microondas, celulares, relojes inteligentes y más objetos “inteligentes”. Siendo estas planas, compactas, livianas para reducir sistemas e integrar otras prestaciones a los mismos dispositivos para que generen mejor rendimiento y para mantener una comunicación confiable [7], [8].

Este proyecto tiene como objetivo contribuir con la investigación y desarrollo de las antenas utilizadas en IoT; principalmente a mejorar las condiciones electromagnéticas que lleven a un desarrollo de dispositivos de mejor calidad y que garantice la conectividad que el avance tecnológico espera.

Este proyecto parte del estudio del arte sobre la temática de antenas compactas para aplicaciones en IoT, luego se diseñará la antena en el simulador electromagnético CST Studio Suit y posteriormente se analizará los principales modos característicos de la antena en el software Altair Feko. A continuación, se realizará la fabricación e implementación de una antena multi alimentación de bajo costo en un sustrato FR-4 de 1.5 mm de altura y un espesor de cobre de 0.035 mm, para un reloj de desarrollo y se realizará la descripción del comportamiento de la antena en un entorno indoor.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los dispositivos IoT actualmente requieren de anchos de banda grandes y velocidades de envío de datos altos como es la tecnología 5G, que reemplazara a todas las tecnologías anteriores, esta tecnología requiere de tasas de datos a gran velocidad, confiabilidad y a frecuencias ya establecidas para que el intercambio de tecnología no sea costoso y se pueda usar en parte la infraestructura de las tecnologías anteriores, el diseño de antena compactas en las bandas ISM tiene muchos retos, ya que es necesario antenas de varios puertos para esa tecnología, pero esto lleva a problemas estructurales debido a que a frecuencias más bajas, la estructura de la antena es mayor y la fiabilidad de la antena, lleva al uso de más puertos, lo que nos lleva al acoplamiento mutuo entre antenas.

El desarrollo e investigación de metodologías más económicas que mejoraren la repuesta y comunicación de los dispositivos inteligente mediante antenas tipo parche multi alimentación son de gran interés debido a su bajo perfil, costo y la gran ventaja de tener varios puertos, además que nos pueden brindar antenas multibanda con capacidades optimas de ancho banda, directividad, ganancia y pueden ser compactas.

1.1 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La industria de las comunicaciones inalámbricas exige antenas pequeñas y compactas con una fabricación de bajo costo, fácil de implementar y de buenas características [9], el uso generalizado de estos dispositivos y el crecimiento constante de la tecnología nos lleva a diseñar y desarrollar antenas compactas de alto rendimiento y rentables [3]. Por lo tanto, se requiere de antenas que tengan un buen ancho de banda, confiable, eficientes, reducción en el tamaño físico de la estructura y que puedan generar múltiples haces.

El problema principal de la compactación de una antena, es la reducción del ancho de banda y la ganancia de la antena con respecto al tamaño de la misma y a la directividad de operación, muchas de las antenas miniaturizadas tienen problemas a frecuencias bajas, ya que la antena en bajas frecuencias es más grande. También la cobertura para IoT exige de un mayor número de antenas para conectarse en cualquier lugar o la necesidad de crear agrupaciones de antenas para lograr una cobertura masiva de dispositivos IoT [5], [9], esto lleva a la problemática de acoplamiento mutuo entre antenas.

Para abordar el problema de reducción de ancho de banda, poca ganancia, directividad y acoplamiento mutuo en la conectividad y compactación de la antena, se implementará varias técnicas de compactación como es; la técnica de integración de ranuras y la técnica de introducción stubs en el plano de tierra conocido como planos de tierra modificados (DGS) y el plano radiante, que introducen inductancia y capacitancia adicionales que puede ayudar a mejorar en ancho de banda, la eficiencia y reducir la antena sin afectar a la frecuencia de resonancia en las bandas ISM [2], [10].

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General.

Diseñar e implementar una antena compacta para aplicaciones en internet de las cosas.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Analizar el estado del arte de antenas compactas usada en aplicaciones para IoT.
- Diseñar una antena compacta en las bandas ISM (2.4 -5.8GHz), usando un simulador electromagnético.
- Estudiar el comportamiento de la antena a través de modos característicos.
- Fabricar e integrar una antena compacta en un reloj inteligente.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO

2.1 ANALISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Los dispositivos IoT y 5G se implementa una amplia variedad de métodos y procedimientos de diseño de antenas para su compactación. Una exploración cuidadosa de bibliografías en el aspecto nacional e internacional, muestra el interés creciente en la investigación de métodos de compactación por líneas de meandro, stubs o ranuras dentro del sustrato y del plano de tierra de la antena, que ayudan a la compactación, mejorando el ancho de banda, ganancia y eficiencia. Algunos ejemplos de integración de líneas de meandro nos muestran [8], [11]–[13] integrando pequeños cortes serpenteados para reducir el parche radiante y así mismo el tamaño total de la antena.

Por otro lado, la integración de ranuras y stubs tanto en el plano de tierra y en el plano radiante se han estudiado de diversas maneras, en [14] se diseña una novedosa antena compacta y flexible de ultra ancho de banda para 5G, sobre un sustrato flexible ultra delgado, esta antena SWB tiene una relación de ancho de banda de 57,47:1, para su compactación se inserta una ranura cuadrada con pequeñas dimensiones en el centro del parche circular, que se agrega a una muesca rectangular larga. Las ranuras y muescas introducidas en el parche y el plano de tierra son fundamentales para mejorar el ancho de banda y dando como resultados armónicos adicionales que hacen que la antena tenga un rango de frecuencia de 1.74 a 98 GHz.

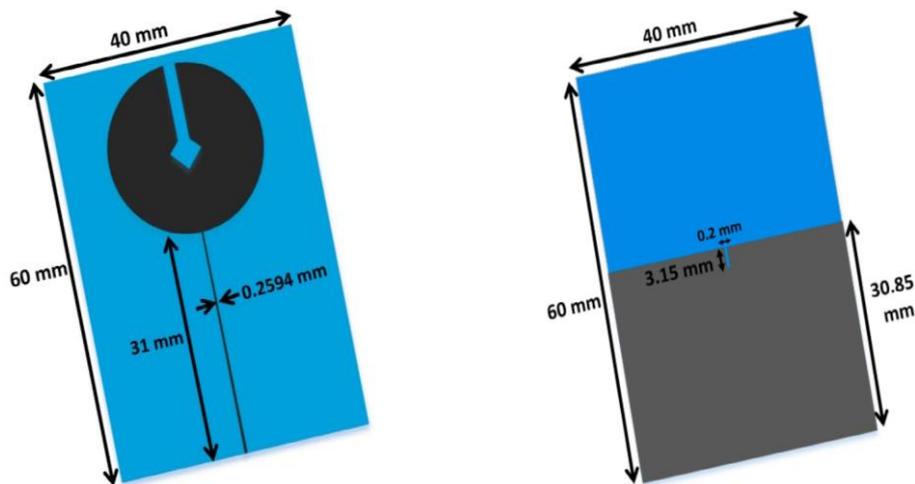


Figura 1. Diseño de antena compacta SWB con integración de ranuras en el parche y plano de tierra, sobre un laminado Ultralam 3850 [14]

También se muestra una interesante propuesta de antena ranurada tipo notch en [15][16], donde nos indica la compactación de la antena mediante ranuras en el sustrato en forma de brazos, cubriendo una banda de frecuencias de 2.4 y 5 GHz, obteniendo parámetros muy buenos de la antena, pero con dificultades de distorsión. Así mismo en [17], diseña una antena monopolo plana UWB compacta que opera en el rango de frecuencias de 3,1 GHz–

10,8 GHz sobre sustrato FR-4, la antena tiene una línea de transmisión que está diseñada en base a una guía de onda coplanar con tierra (CPWG) y las vías en el CPWG se emplean para eliminar el fenómeno de no radiación en algunas frecuencias específicas. La forma del radiador se modifica a partir de la forma hexagonal y se adecúa una ranura en forma de cinta dentro del radiador para optimizar el rango de frecuencia de funcionamiento.

De otra forma se han realizado varios estudios con planos de tierra modificados que potencializan los anchos de banda y ayudan a la configuración de las bandas de frecuencia deseadas como se muestra en [18] y [19], nos muestra una antena para bandas ISM de 5.8, que incluye aplicaciones para IoT, en esta antena además de la integración de cavidades en el parche principal en forma de I, nos indica que las ranuras del plano de tierra se comportan tanto como bifurcaciones resonantes como de circuito abierto, modificando la respuesta general de la agrupación, ya que son excitados por los campos producidos por las líneas de alimentación a las antenas. De hecho, el tamaño de la ranura y su interacción con parche frontal, determina la frecuencia de resonancia, que está en función de la posición referente de la ranura con respecto al parche.

Para antenas MIMO de varios puertos se han estudiado diferentes métodos, dentro de ellos el mayor inconveniente es el acoplamiento mutuo entre los elementos radiantes es por esto que citaremos varias investigaciones que nos ayudaran a enfocar nuestro proyecto. En [20], nos muestra una antena de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) de banda super ancha de cuatro puertos, compacta y de bajo perfil para aplicaciones de Internet de las cosas. La antena propuesta comprende cuatro elementos resonantes idénticos en forma de hoz, que son excitados por líneas de alimentación de guía de ondas coplanares (CPW) cónicas, en el plano de tierra modificado está grabada una forma de hoz complementaria a al parche frontal, usa rendijas en el plano radiante para rechazar bandas no deseadas, además que sus puertos están ubicados en simetría rotacional para lograr un alto aislamiento del puerto y evitar la correlación entre los elementos de antena vecinos, el rango operativo de la antena MIMO varía de 3,1 a 40 GHz, la ganancia máxima de la antena es de cerca de 7 dBi y tiene un tamaño completo de 56x56x0.5 mm.



Figura 2. Diseño de antena MULTI ALIMENTACIÓN de cuatro puertos [20]

De modo similar, en [21] se muestra una antena multi entrada y multi salida (MIMO) de bajo perfil, compacta, de cuatro elementos y ocho puertos para IOT 5G y aplicaciones portátiles celulares sobre un sustrato FR-4 con un tamaño total de 120x60 mm. Este arreglo de antena contiene cuatro elementos de antena que son iguales en su configuración. Las dimensiones de tierra de la antena se toman de manera similar a un celular actual. Los cuatro elementos de la antena están situados en las cuatro esquinas de la estructura de tierra de la antena. Cada elemento de antena tiene dos puertos de alimentación, haciendo así un total de ocho puertos de antena por lo que es necesario reducir el acoplamiento mutuo entre diferentes puertos de antena, esto se logra cortando ranuras en el plano de tierra, incluida una pequeña tira grabada a lo largo de toda la longitud del plano de tierra para generar un corto circuito, y se cortan ranuras rectangulares en el plano de tierra debajo de cada elemento de antena. Como resultados se obtiene un BW mínimo por los ocho puertos para S_{11} menor a -10 dB que es de 1,4 GHz desde 2,4 GHz hasta más de 3,8 GHz. El aislamiento obtenido entre diferentes puertos tiene un valor menor a -13 dB, y el valor máximo va por debajo de -30 dB. Para las bandas de frecuencia cubiertas por esta estructura de antena, el coeficiente de correlación se encuentra por debajo de 0,03 en las bandas de interés, mientras que la ganancia máxima medida está en el rango de 3,2 a 5 dB.

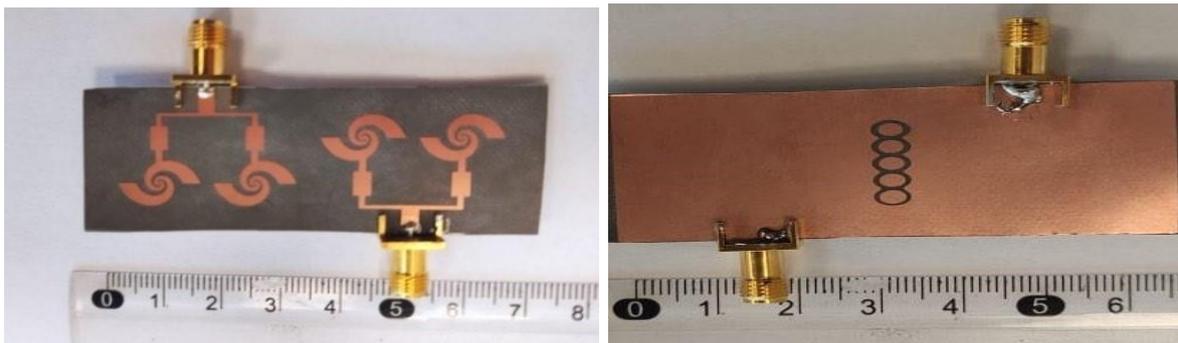


Figura 3. Diseño de antena MIMO de dos puertos opuestamente lado a lado a) vista frontal b) vista posterior [22]

Así mismo mediante otro enfoque analítico en [22] se muestra un estudio completo de los modos característicos (MC) de cuatro sistemas de antenas de doble puerto para sistemas 5G, partiendo de una antena de configuración espiral multi alimentación de un solo elemento, en esta investigación nos muestra sistemas de antena cara a cara, lado a lado, ortogonal y opuestamente lado a lado en el parche frontal y en el plano de tierra una tierra DGS compuesta por cinco anillos conectados, la ventaja de esta investigación es que nos muestra modelos de antena con alta eficiencia y patrones de antena no correlacionados gracias al análisis de los MC.

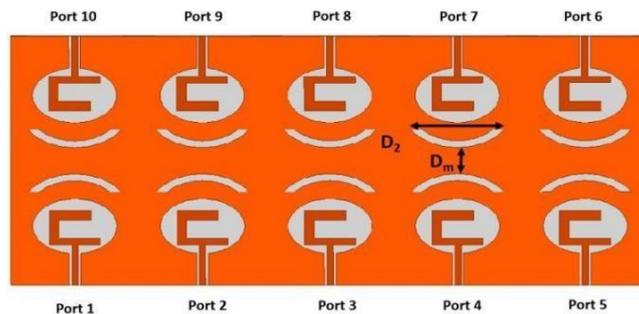
La Figura 3, se muestra el sistema 4 que es el opuestamente lado a lado, con un tamaño total de 65x25 mm² sobre un sustrato Rogers RT5880 con una permitividad relativa (ϵ_r) de 2,2, una tangente de pérdida de 0,0009 y un espesor de 0,787 mm, como se puede observar la vista frontal muestra un sistema de antena es espiral de dos brazos con dos puertos opuestos de lado a lado y el plano de tierra se ha diseñado un DGS compuesta por

cinco anillos conectados con una distancia de centro a centro $d = 2,85$ mm, como se muestra, los radios interior y exterior de DGS se han diseñado para optimizar la banda de frecuencia operativa propuesta, además de un plano de tierra parcial para mejorar el aislamiento. A continuación, se muestra una tabla de los resultados de los 4 sistemas, dejando como efecto que el sistema cuatro tiene los mejores rendimientos.

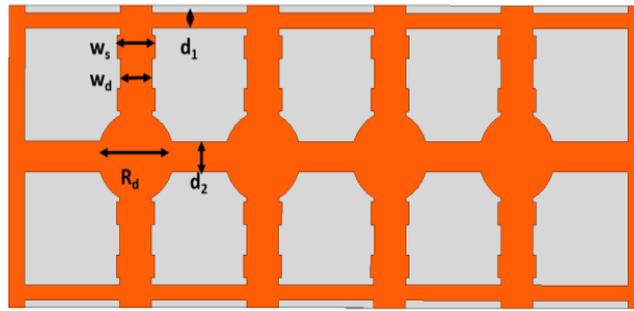
Tabla 1. Comparación entre los 4 sistemas de antena.

	Numero de modos acoplados	Aislamiento (dB)	BW (%)	Ganancia (dB)	ECC	CCL (bit/s/H z)	Radio axial BW (%)	Tamaño (mm)
Sis. 1	3	19	10.8	8.5	0.15	0.4	9,3	32x43x0.787
Sis. 2	2	29.5	11.4	9.5	0.02	0.19	10.1	65x25x0.787
Sis. 3	2	28	11.6	8.8	0.05	0.25	10.4	53.5x33x0.787
Sis. 4	1	30.5	11.9	10.1	0.01	0.11	11	65x25x0.787

De la misma forma estructural se ha diseñado una antena MIMO alimentada por CPW que opera en la banda 5G de onda milimétrica 24,25-27,5 GHz. Se han implementado dos técnicas a la estructura propuesta en términos de estructuras de tierra modificada y estructura metálica defectuosa para la reducción simultánea del acoplamiento mutuo. La técnica de acoplamiento mutuo se ha exhibido mediante el análisis de la densidad de corriente superficial simulada de la antena MIMO con y sin estructura DGS. La mejora de los parámetros de dispersión y las características de radiación de la estructura propuesta se presentan haciendo referencia a la evolución del diseño de la estructura MIMO [23]. Para reducir el acoplamiento mutuo se diseñan ranuras elípticas parciales grabadas en el plano de tierra coplanar Figura 4 (a), después se diseña una estructura con defectos en la parte posterior del sustrato como se muestra en la Figura 4 (b), se debe observar que esta capa metálica defectuosa no forma parte de la tierra de la antena, si no que actúa como un reflector que reduce la radiación X-polar y mejora el aislamiento co-pol a X-pol sin perturbar los parámetros S de la antena, dando como resultados acoplamientos mutuos por debajo de los -40 dB.



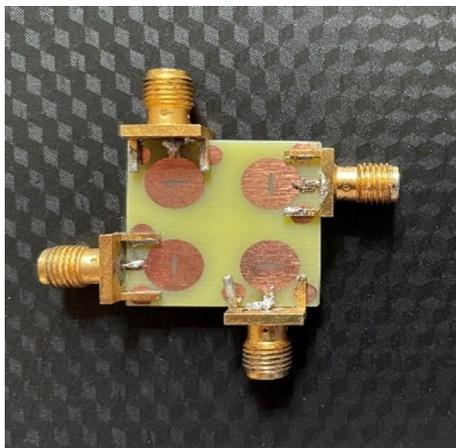
(a)



(b)

Figura 4. Diseño de antena MIMO de 10 puertos de lado a lado y frente a frente a) vista frontal con ranuras elípticas b) vista posterior [23].

En otros estudios se han realizado varios métodos para el desacoplamiento mutuo como se muestra en [24], que presenta una antena MIMO transparente de cuatro elementos, donde las antenas cuadradas en forma de anillo están dispuestas en un plano de tierra común al igual que [25]-[26]; para el acoplamiento mutuo se observa que la separación de los elementos mientras más grande es, mejora el acoplamiento. En [26], se propone una antena MIMO UWB compacta $24 \times 24 \text{ mm}^2$ para las bandas milimétricas. En esta investigación se establece una antena de 4 elementos radiantes como se muestra en la Figura 5, comprende un CPW modificado en forma de dos estructuras circulares que alimentan el parche circular ranurado centralmente, y el plano de tierra individual para cada elemento en el caso de la antena final de cuatro elementos, para mejorar acoplamiento mutuo se usó un anillo hueco que une las tierras y se tiene un espacio considerable entre elementos radiantes en el frente de la antena.



(a)



(b)

Figura 5. Diseño de antena MIMO UWB de 4 puertos, (a) vista frontal (b) vista posterior. [26]

Otro método de acoplamiento se muestra en [27], [28]; el diseño de antenas de 4 puertos para 0,6 GHz en sub-1GHz, sub-6GHz 5G NR y las bandas de comunicación Wi-Fi 6, se logra mediante cargas capacitivas y resistivas a través de las ranuras, esto ayuda que, en frecuencias específicas en el parche principal, los parámetros S puedan ser $< -10 \text{ dB}$, aunque los parámetros S también pueden variar.

En [29], nos muestra una antena MIMO de 4 puertos diseñada sobre el sustrato FR-4 con un tamaño de $60 \times 60 \times 1,6 \text{ mm}^3$, para aplicaciones 5G sub-6 GHz. Cada elemento de la antena, se compone de una línea de alimentación de microcinta y un plano de tierra de ranura abierta integrado con dos brazos rectangulares para realizar la polarización circular. Se utiliza una tira metálica en forma de I en las antenas MIMO de cuatro puertos propuestas para obtener un nivel de voltaje común en el plano de tierra y conectar los planos de tierra, logrando un aislamiento entre elementos superior a 19 dB y un coeficiente de correlación de envolvente (ECC) inferior a 0,12 (campo lejano) entre los puertos del prototipo de antena MIMO, sin embargo, esta antena está diseñada para cubrir una sola banda de 3.4–3.8 GHz.

En [30], se diseña una antena de dos puertos como se muestra en la Figura 6, para aplicaciones en el rango de frecuencia operativo de 5,65 GHz a 6,55 GHz que cubre la banda de frecuencia de 5,925 a 6,425 GHz para comunicación satelital, 5,7 a 5,85 GHz para WiMAX, 5,725 a 5,85 GHz para banda ISM y 5,8 GHz para aplicación WLAN. Esta antena para mejorar el acoplamiento mutuo de -16 dB, se usa un plano de tierra modificado con una estructura de rejilla para todo el plano llamado meta rejilla, asimismo esta meta rejilla reduce significativamente el tamaño total de la antena.



Figura 6. Diseño de antena dos puertos con meta rejilla en el plano de tierra [30].

En esta investigación se propone un sistema de antena MIMO [31], el elemento de antena individual se compone de un parche Microstrip ranurado con una línea de alimentación angular escalonada y un plano de tierra defectuoso. La antena MIMO está diseñado sobre sustrato FR-4 con un tamaño de $36,4 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$, para cubrir la banda de frecuencia de 3,35 GHz a 3,65 GHz para las aplicaciones de quinta generación (5G). El aislamiento entre los elementos de la matriz se mejora mediante el uso de una estructura de desacoplamiento de metamaterial épsilon-negativo de índice cercano a cero (NZI-ENG) basada en líneas de meandro, ofrece un aislamiento de más de 28 dB para elementos de antena dispuestos en configuración transversal y lateral. Además, los parámetros de rendimiento de MIMO simulados y medidos, es decir, el coeficiente de reflexión activa total (TARC) menor a -18 dB, el coeficiente de correlación envolvente (ECC) menor a 0,1 y la pérdida de capacidad del canal (CCL) menor a 0,3 se encuentran dentro de los límites aceptables.

2.2 FUNDAMENTACION TEÓRICA

2.2.1 INTERNET DE LAS COSAS

El término internet de las cosas (IoT) fue introducido por primera vez por Kevin Ashton en 1999, el concepto de IoT gira en torno a la palabra "inteligencia" y "la capacidad de obtener y aplicar conocimientos de forma independiente". Por lo tanto, IoT se refiere a las "cosas o dispositivos y sensores" que son inteligentes, únicamente direccionables en función de sus protocolos de comunicación, y son adaptables y autónomos. Se ha caracterizado a IoT con tres visiones. Orientado a Internet: la visión se centra en la conectividad entre los objetos; Orientado a las cosas: la visión se enfoca en objetos genéricos; y orientado al conocimiento: la visión se centra en cómo representar, almacenar y organizar la información. Lo que se interpreta según Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), como “conectividad en todo momento y lugar para cualquier persona” [32].

El IoT se basa en el concepto de que se debe de conectar dispositivos integrados inteligentes con el entorno humano, facilitando procesos no solo en el día a día de las personas, sino también en las industrias, la salud, dispositivos inteligentes y otros ámbitos de producción, automatización, la supervisión remota y la logística, es importante conocer que gracias al IoT es posible tener una comunicación fluida entre personas, procesos y cosas [33], [34].

El fin de IoT es que el mundo físico se conecte con el mundo digital y los dos cooperen para realizar actividades, procesos o transmitir datos con poca mediación humana, en este mundo hiperconectado, los sistemas digitales pueden registrar, monitorear y ajustar cada interacción entre las cosas conectadas [35].

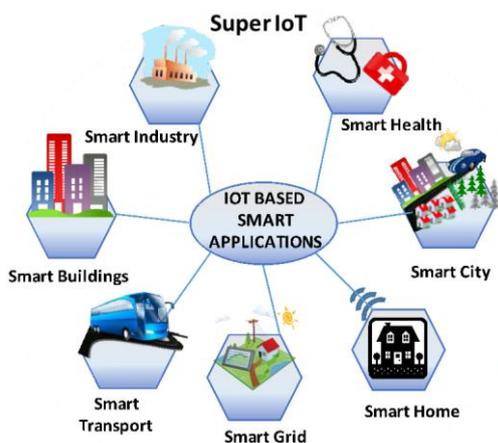


Figura 7. IoT basado en aplicaciones inteligentes [32].

El IoT en el crecimiento de las redes inalámbricas es muy importante, ya que se espera que miles de millones de dispositivos estén interconectados para los próximos años, Por lo tanto, las tendencias recientes muestran a los investigadores un gran interés por la amalgama de diversas tecnologías, como la integración de sensores y sistemas integrados con sistemas ciber físicos (CPS), comunicaciones de dispositivo a dispositivo (D2D) y sistemas

inalámbricos 5G con IoT como centro; para que estos dispositivos estén conectados necesitan de una herramienta muy importante que son las antenas. Las antenas para los dispositivos de IoT necesitan que sean compactos, de bajo perfil y con gran ancho de banda para que muchos dispositivos puedan funcionar sin ningún problema al momento de interactuar con el entorno que requiere el ser humano [19], [20].

2.2.2 REDES DE QUINTA GENERACIÓN

La tecnología de quinta generación (5G) es una tecnología emergente con servicios evolutivos y revolucionarios. Es la próxima generación de tecnología para proporcionar velocidades de datos ultra altas, latencia muy baja, más capacidad y buena calidad de servicio, además 5G es más rápido que 4G, y ofrece velocidades de datos máximas de hasta 20 Gbps y velocidades de datos promedio de más de 100 Mbps [14].

Las redes de quinta generación o 5G para el internet de las cosas son de vital importancia, porque la tecnología 5G transmite datos a altas velocidades haciendo que los dispositivos inteligentes conectados al móvil, Tablet o Smart Devices trabajen sin problemas de conexión. 5G ayuda al IoT a que más dispositivos se interconecten, por ejemplo, dentro de una casa que tenga 5 o 6 dispositivos inteligentes conectados, la red suele saturarse, con 5G las ventajas son que puedes conectar muchos más dispositivos sin problemas de interrupción o conectividad, además que se puede enviar datos, hacer procesos, encender o apagar cosas casi en tiempo real.

Debido al considerable desarrollo de la comunicación inalámbrica, ha habido una tendencia creciente de tráfico de red y de datos creciente. Para cumplir con esta demanda, se implementa el sistema inalámbrico de quinta generación, que puede ofrecer un espectro de frecuencia mejorada y velocidades de datos sin precedentes de hasta varios gigabits por segundo (Gbps). La tecnología 5G usaría la banda 4G existente junto con los rangos de frecuencia 5G recientemente definidos, incluidas las bandas de ondas milimétricas (mmWave).

Las tecnologías de próxima generación y el desarrollo de 5G permiten que IoT requiera servicios y soluciones de vanguardia junto con la necesidad de espectro de banda ancha para satisfacer las demandas del tráfico. Por lo tanto, es necesario combinar los espectros de banda baja, banda media y banda alta para administrar el uso de 5G y para habilitar IoT con éxito. IoT en la actualidad utiliza principalmente frecuencias de banda ISM de 915 MHz, 2,4 GHz a 5 GHz [36].

Las bandas de frecuencia 5G están compuestas por el rango de frecuencia uno (FR1) que trabaja en las denominadas bandas sub-6 GHz y el rango de frecuencia dos (FR2), que cubre las bandas de ondas milimétricas [32]. El despliegue temprano de 5G actualmente es compatible con las bandas sub-6 GHz (FR1) debido a la compatibilidad con la infraestructura

2G/3G/4G. Una de las características más relevantes para proporcionar altas velocidades de datos es la tecnología MIMO (multiple-input multiple-output) [37].

El espectro de sub-6 GHz ofrece una buena combinación de cobertura y capacidad para los servicios 5G. Los dispositivos inalámbricos IoT de corto alcance usan especialmente Bluetooth y ZigBee. Bluetooth usa las frecuencias de 2.4 a 2.485 GHz. Utiliza el radio de ultra alta frecuencia para transmitir y recibir datos entre dispositivos IoT en las distancias más cortas [36].

La banda de frecuencia de 5GHz es usado comúnmente como una alternativa para la frecuencia superior de 2.4 GHz. Esta banda dispone de 4 bandas RF: 5.1, 5.3, 5.4 y 5.8 GHz; dando como resultado 24 canales separados por 20MHz. Los canales pueden usarse para un único sistema inalámbrico y no tener riesgo de interferencias. El estándar Wifi 802.11ac se maneja en la banda de 5GHz y por lo tanto tiene menor interferencia que los estándares anteriores [36], [38].

2.2.3 ANTENAS MICROSTRIP

Una antena Microstrip es la línea de transmisión frecuentemente usada y es la base de las antenas, también otro concepto que se usa es parches metálicos impresos sobre un sustrato dieléctrico ubicado sobre de un plano metálico. El funcionamiento de estas antenas depende de los elementos de producción como es parámetros de permitividad, permeabilidad, y las dimensiones físicas de la antena, las cuales son, ancho, largo del parche de la antena.

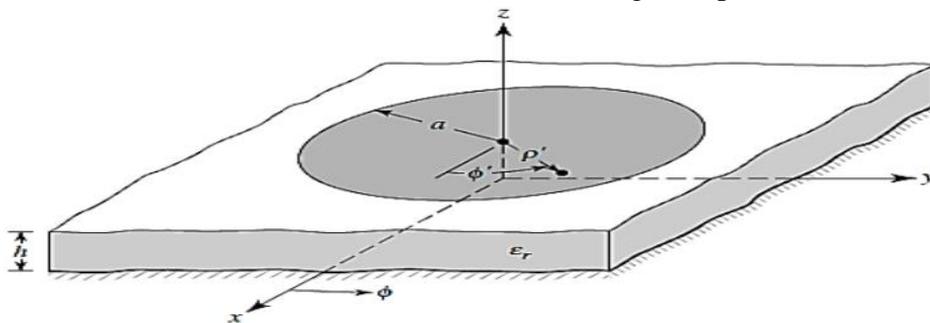


Figura 8. Antena Microstrip circular [39].

Estas antenas están en constante desarrollo, por su ilimitada geometría y tamaños que cada vez se van haciendo más compactos, ya que nos permiten adaptarse a los nuevos requerimientos de las telecomunicaciones actual [3]. Existen diferentes tipos de geometrías que se pueden realizar como, rectangular, espiral, fractal, circular, cuadrada. El diseño geométrico dependerá de las características citadas anteriormente [39]. Para realizar el cálculo del ancho y largo de la antena Microstrip están definidas las siguientes ecuaciones:

Para el ancho del parche en mm, donde c es la velocidad de la luz en $\left(\frac{m}{s^2}\right)$ [39].

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

La constante dieléctrica efectiva para el caso $W/h > 1$, donde h es el grosor del material de la antena en mm y ϵ_r es la constante dieléctrica [39].

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

La extensión de la longitud eléctrica sobre la longitud física está dada por la siguiente expresión [39].

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

En base a lo anterior la longitud se calcula como [39]

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

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

En el caso de una antena Microstrip circular tenemos las siguientes ecuaciones [39].

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi e_r F \left[\ln \left[\frac{\pi F}{2h} \right] + 1.7726 \right]} \right\}^{1/2}}$$

Finalmente, el plano de tierra se calcula con las expresiones [39].

$$L_g = 6h + L$$

$$W_g = 6h + W$$

2.2.4 ANTENAS MIMO

El termino MIMO “significa múltiples entradas múltiples salidas”, es una de las tecnologías clave para mejorar el rendimiento de la tecnología 5G. Los sistemas con antena MIMO deben mantener una pequeña distancia entre elementos, valores de correlación más bajos y un alto aislamiento entre elementos [40] [41]. La mayor ventaja de usar la red MIMO en comparación con una normal es la capacidad de conexión. La confiabilidad del enlace y la velocidad de transmisión de datos del sistema se pueden mejorar si el transmisor o receptor tiene una mayor cantidad de antenas, ya que conduce a más rutas de señal y, por lo tanto, a un mejor rendimiento[24], [42]

La comunicación inalámbrica es propensa a interferencias, desvanecimiento de trayectos múltiples y pérdidas por radiación. También, se vuelve más difícil a frecuencias más altas. Para superar estos problemas, es muy importante utilizar las antenas MIMO, ya que mejora el rango de transmisión sin aumentar la potencia de la señal [43].

En MIMO, se pueden enviar más señales de manera inteligente mediante el uso de múltiples antenas y, por lo tanto, mejorar significativamente la capacidad del canal. El método utilizado para reducir el número de antenas en MIMO es utilizar antenas multibanda que brinden cobertura a diferentes aplicaciones inalámbricas. Además, las antenas MIMO se pueden clasificar según su banda de frecuencia como antenas de banda ancha y multibanda [44].

Para aumentar la ganancia, mejorar el aislamiento (acoplamiento mutuo), el ancho de banda, el coeficiente de correlación envolvente (ECC) y la eficiencia. La interacción electromagnética entre los elementos de la antena en MIMO se nombra como acoplamiento mutuo (MC). En este proceso, el receptor de una antena absorbe energía cuando otra antena está radiando energía. Por lo tanto, es muy fundamental en MIMO reducir el acoplamiento mutuo entre los elementos de la antena. Se puede calcular matemáticamente de la siguiente manera [45]:

$$MC_{mn} = \exp\left(-\frac{2x_{mn}}{\lambda}(\alpha + n\pi)\right)$$
$$MC_{mn} = 1 - \frac{1}{N} \sum_m \sum_{m \neq n} MC_{mn}$$

Donde MC_{mn} y x_{mn} son el acoplamiento mutuo y la distancia entre los elementos de antena m^{th} y n^{th} respectivamente; y $m \neq n$. El parámetro α controla el nivel de acoplamiento y N es el número de elementos MIMO. Generalmente se calcula en forma de parámetros de dispersión y se mide en dB. Otro parámetro importante de MIMO es el coeficiente de correlación envolvente (ECC) que representa la correlación entre las señales entrantes en los puertos MIMO [46].

2.2.5 TEORIA DE MODOS CARACTERÍSTICOS

La teoría de los modos característicos (TCM) por definición son corrientes modales que se obtienen numéricamente para cuerpos conductores con forma geométrica arbitraria, son independientes de cualquier tipo de excitación y dependen solo de la forma y tamaño del cuerpo conductor, el cálculo numérico de los modos característicos o corrientes características $J_n^{\vec{}}$ implica la matriz de impedancia de la estructura, estas corrientes modales se obtienen de las funciones propias de la siguiente ecuación individual de valores propios [47], [48]:

$$X(J_n^{\vec{}}) = \lambda_n R(J_n^{\vec{}})$$

Donde $J_n^{\vec{}}$ son las funciones propias o corrientes propias, R y X son las partes real e imaginaria del parámetro de impedancia Z y λ_n son los valores propios.

Además, La teoría de los modos característicos proporciona un enfoque natural y sistemático para diseñar antenas MIMO con alta eficiencia y patrones de antena no correlacionados [22]; Es por eso que se puede expresar una corriente $J_T^{\vec{}}$ que transita por el plano del cuerpo conductor como la suma ponderada de las corrientes modales $J_n^{\vec{}}$ como se muestra en la siguiente ecuación:

$$J_T^{\vec{}} = \sum_n \alpha_n J_n^{\vec{}}$$

Siendo α_n el autovalor o α característico de cada modo característico el cual suministra información sobre los parámetros de radiación. Para el diseño de antenas por TCM, se tiene algunas alternativas para interpretar los modos [49] [50]; El más usado es el ángulo característico (α_n), su expresión matemática viene dada como:

$$\alpha_n = 180^\circ - \tan^{-1}(\lambda_n)$$

El ángulo característico α_n representa la diferencia de fase entre la corriente característica $J_n^{\vec{}}$ y su campo característico asociado $E_n^{\vec{}}$, la interpretación física del ángulo característico nos dice que un modo característico es resonante y tiene la capacidad de ser un buen radiador cuando $\alpha_n = 180^\circ$, caso contrario cuando $\alpha_n \neq 180^\circ$, el modo estaría almacenando energía [22] [50][51].

En la Figura 9, se muestra un ejemplo de distribución de corrientes de una antena dos discos metálicos circulares interconectados presentados por [52], la representación más significativa esta mostrada en el ítem (c) de la figura, ya que muestra la distribución de la corriente en toda la antena cuando están los dos discos en cortocircuito.

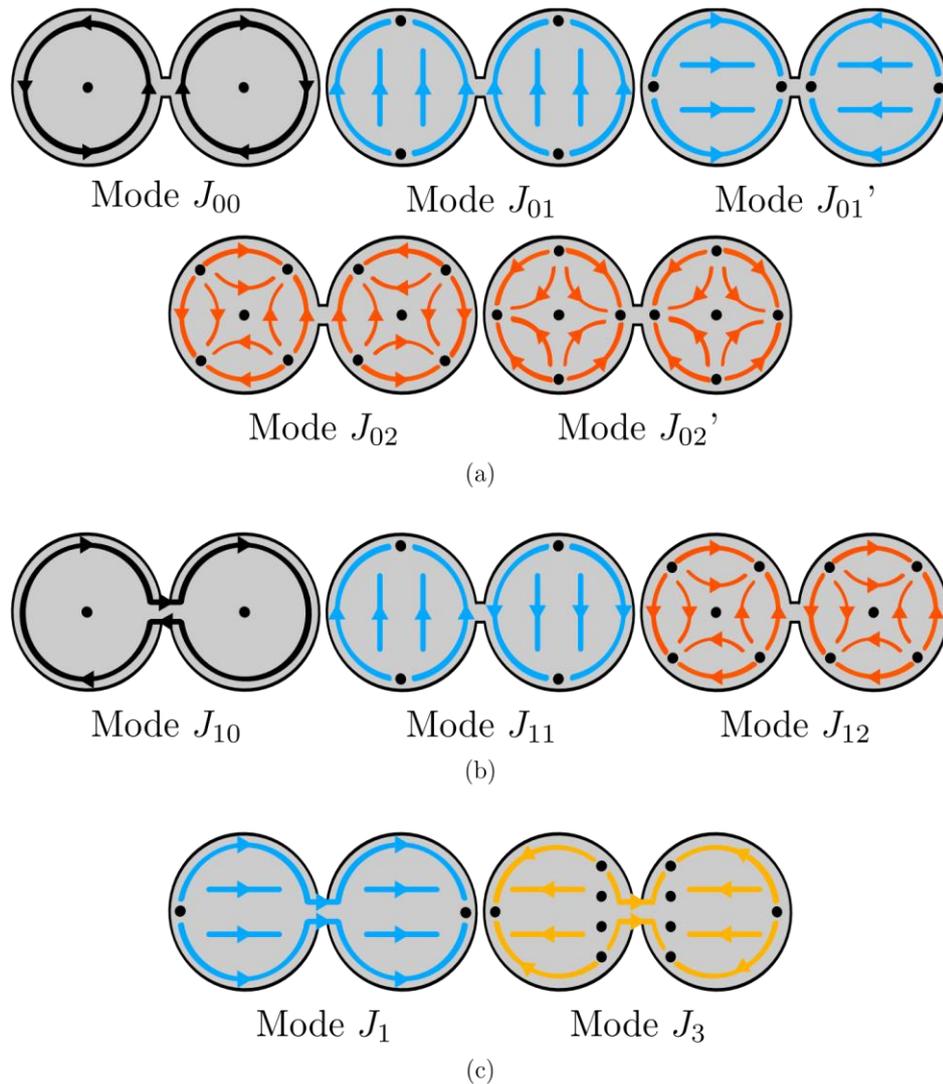


Figura 9. La distribución de corriente característica de los dos discos metálicos circulares interconectadas. (a) Análisis usando la pared eléctrica, (b) usando una pared magnética, y (c) distribución de corriente en la estructura completa [52].

2.2.6 TECNICAS DE COMPACTACION

La miniaturización de las antenas es importante para la creación de nuevos dispositivos, el avance tecnológico lleva a crear antenas más compactas y de bajo perfil que cumplan las condiciones que se necesita cada dispositivo inteligente, existen muchas ventajas de la miniaturización, por ejemplo, la fácil integración, menos recursos, menor consumo de energía, menor inversión, etc. Así como tiene muchas ventajas tiene su complejidad y se requiere de sacrificios en algunos aspectos al momento de miniaturizar una antena, como es; para una disminución en el tamaño de la antena, hay una reducción en su ancho de banda y su eficiencia [53].

Como un resumen general de las características de las antenas se debe entender que las antenas se pueden modificar cambiando su geometría, distribución de la corriente, sea eléctrica o magnética y cambiando sus dimensiones eléctricas. Estas características se

entienden bajo los términos de eficiencia, polarización, factor Q, la adaptación (impedancia de entrada), ancho de banda y ganancia. Con esta idea se han desarrollado métodos de diseño que perfeccionan y modifican de manera eficiente la forma y la geometría general de una antena para lograr las características de radiación deseadas mientras se restringen las dimensiones generales para que sean lo más pequeñas posible [1], [21], [24].

- Por líneas de meandro: Las líneas de meandro introducidas en las antenas tienen como objetivo llenar el espacio generado por una línea o tira larga, doblándola en forma de S para ocupar una longitud total más corta, reduciendo en si el largo de la antena total [53].
- Fractales: Se refiere a los fragmentos rotos o irregulares y estructuras fractales que se pueden encontrar en la naturaleza. Son geometrías que llenan el espacio en el que puntos distintos tienen entornos disjuntos. que puede ser mayor que su dimensión topológica y se pueden usar para ajustar una longitud relativamente larga en un área mucho más pequeña[53].
- Ranuras: De acuerdo con la teoría de la antena, la existencia de ranuras en el parche de la antena o en el plano de tierra disminuirá el factor de calidad (Q) de la antena, mientras que la inductancia (L) de la antena aumentará, lo que a su vez resulta en el aumento del ancho de banda. Además, la presencia de las ranuras en el plano de tierra o parche radiante tendrá un efecto sobre la frecuencia de resonancia de la antena cuando cambie su inductancia [53].

CAPÍTULO III

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio, se realiza el diseño, la fabricación y la integración de un modelo de antena compacta para comunicaciones inalámbricas en aplicaciones de IoT mediante el uso de un reloj de desarrollo y elemento de prueba para wifi, la investigación es de tipo experimental y aplicada.

3.2 MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.2.1 MÉTODO INVESTIGATIVO EXPERIMENTAL

Consiste en la manipulación de una variable para determinar su efecto sobre las variables dependientes, para determinar el correcto funcionamiento de la antena dentro de las bandas mencionadas y que sea capaz de transmitir y recibir información dentro de la prueba de desarrollo a 2.4 GHz.

3.3 FUENTES DE INFORMACIÓN

El presente trabajo realizó la recopilación de información científica y experimental que existe sobre la implementación de antenas compactas y antenas miniaturizadas para las frecuencias de la banda media utilizando diferentes tipos de métodos para la miniaturización de antenas, además se realizó una revisión sistemática de papers y revistas, bibliotecas online como lo es Scopus, Google Scholar y IEEE con filtros de publicación de cuatro años, en inglés y español dentro de tesis con el objetivo de estimar información relevante.

3.4 INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los instrumentos utilizados en la investigación vienen dados por tres categorías: observación directa y análisis de documentos.

- **Observación Directa.**

Consiste en el análisis y selección de información precisa que sustente el desarrollo del proyecto que permita cumplir los objetivos propuestos en la investigación.

- **Análisis de documentos.**

Se analiza en gran parte publicaciones científicas, revistas, papers, manuales de dispositivos y especificaciones generales, con el fin de respaldar la viabilidad del proyecto.

3.5 POBLACIÓN, MUESTRA Y METRICAS DE RENDIMIENTO

3.5.1 POBLACIÓN

En este proyecto la población serán los datos obtenidos del funcionamiento de la antena, como es; ancho de banda, eficiencia y directividad; y los datos obtenidos en la implementación de la antena al medir el alcance de la antena en un entorno real.

3.5.2 MUESTRA

Los datos medidos dentro de la población serán los expuestos siendo un total del 100% ya que todos los datos tomados serán válidos para la exposición del proyecto.

3.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES

Tabla 2. Operacionalización de las variables

Variable independiente	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Geometría de la antena	Se refiere a la compactación de la antena	Ancho, largo y alto de la antena	Software CST Studio
Variable independiente	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Directividad	Dirección de máxima radiación.	Ángulos de direccionamiento (θ)	Simulador
Eficiencia de la radiación	Es la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada por la antena.	Porcentaje (%)	Simulador
Ancho de banda	Es la cantidad de información que se recibe cada determinado intervalo de tiempo.	Coefficiente de reflexión	VNA

3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

En este apartado se presenta el proceso de diseño y fabricación de la antena para la banda ISM de 2.4 y 5.8 GHz, se lleva un proceso estructurado para cumplir los objetivos

planteados, proponiendo un diseño de antena multi alimentación de 2 puertos, simulado sobre el software CST estudio y FEKO para el análisis de modos característicos y finalmente se implementa en un reloj de prueba.

3.7.1 DISEÑO DE LA ANTENA

Para diseño de la antena, se inicia con una estructura de antena Microstrip circular con una línea de alimentación semi rectangular y un parche radiante en forma de octágono cortado en sus extremos por figuras ovaladas, adicional se cortó una ranura dentro del parche que nos ayudó para el ajuste de frecuencias deseado; Para el plano de tierra se usó el plano de tierra modificado con un ranura en el centro, se utilizó un material de bajo costo y de buena composición para antenas de bajo perfil como es el FR-4, con tamaño total de 45x32x1.5 mm, como se muestra en la Figura 10.

Las características del material para el diseño de la antena es FR-4 de doble cara con recubrimiento de cobre con las siguientes características:

- Coeficiente dieléctrico (ϵ_r) = 4.4
- Espesor sustrato = 1.5 mm
- Espesor del cobre = 0.035 mm

Una vez obtenido los datos técnicos del material que se usó. Se calculó F que es la frecuencia más alta de operación de la antena, cabe mencionar que para el diseño de una antena multibanda se debe tomar como referencia la frecuencia más baja de funcionamiento que en este caso de 2.4 GHz, para la banda de 5.8 GHz se logra mediante la integración de ranuras dentro del parche, con estos datos se muestra la ecuación para la obtención de valor aproximado en nuestro diseño.

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

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 este caso se debe escoger las frecuencias más baja que sería 2.4 GHz.

Para el parche, encontrar el radio proporcionado al diseño de la antena Microstrip circular se tiene la siguiente ecuación:

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

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, que es 1.5 mm

ϵ_r es la constante dieléctrica del sustrato, en este caso 4.4

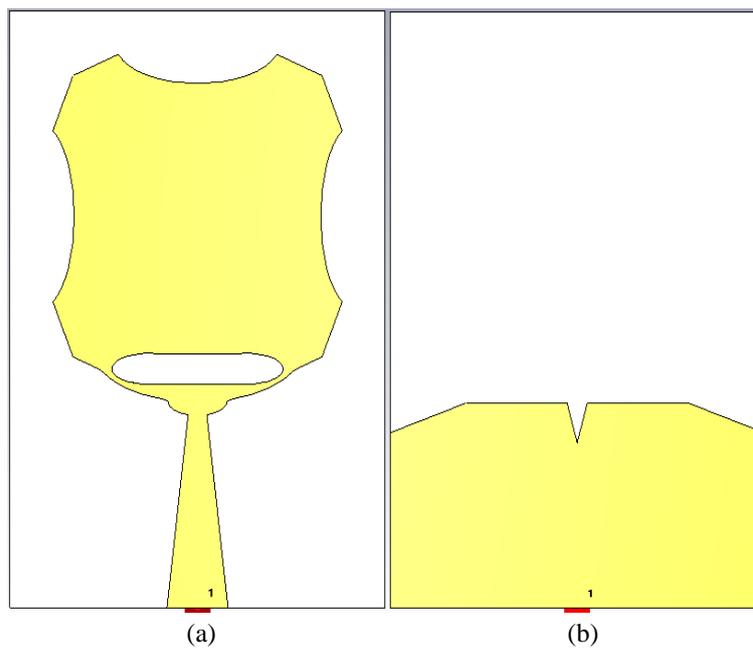


Figura 10. Diseño de Antena Microstrip (a)Vista frontal, (b) vista posterior

En la Figura 11 se muestra los parámetros S_{11} , se muestra dos bandas de frecuencia que son de 2.4 GHz y 5.8 GHz.

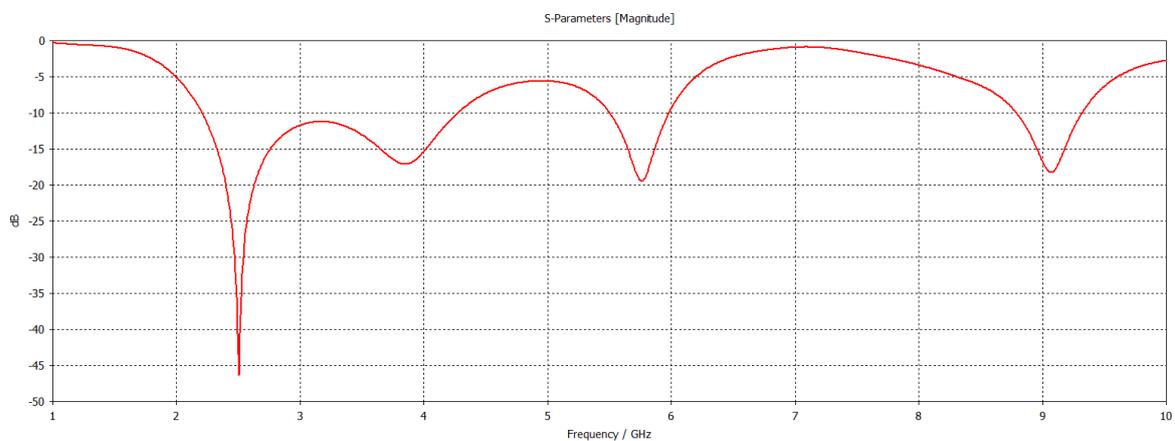


Figura 11. Parámetros S_{11} de la antena Microstrip.

3.7.2 DISEÑO DE ANTENA MULTI ALIMENTACIÓN

El diseño de la antena multi alimentación de dos puertos se partió del diseño mostrado en la Figura 9, a diferencia de la antena Microstrip, se integró ranuras circulares y se extendió el parche en el límite de la línea de alimentación, haciéndolo más triangular, además se cortó un porcentaje del total del parche para compactar la antena e integrar el segundo elemento radiante y dejar un espacio entre los elementos para que no exista problema con el acoplamiento mutuo.

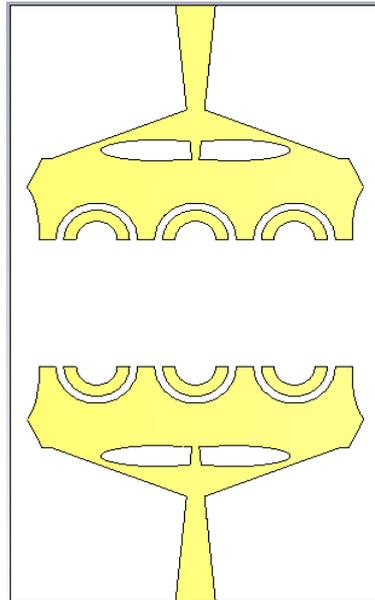


Figura 12. Geometría de la antena multi alimentación vista frontal.

En el caso del plano de tierra modificado, se insertó un elemento ovoide en la tierra con ranuras en los costados que ayudan a la manipulación de las frecuencias deseadas y a mejorar el ancho de banda, este análisis se lo hará más adelante. También se integró una ranura en forma triangular en el centro de la tierra tal como se muestra en la Figura 12.

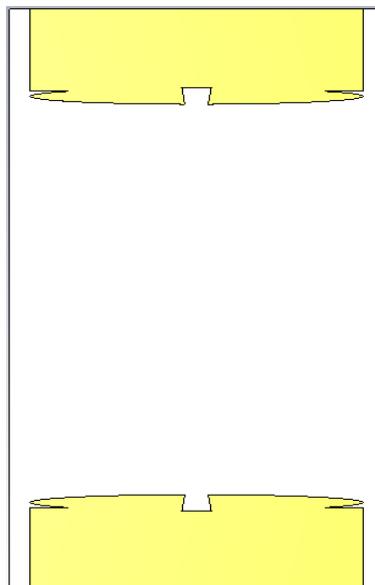


Figura 13. Geometría de la antena multi alimentación: vista posterior.

3.7.4 DISEÑO DE ANTENA CON INTEGRACIÓN DE LÍNEA EN CORTO CIRCUITO

Para el desarrollo de la antena multi alimentación de dos puertos, se debe tener muy en cuenta el acoplamiento mutuo entre elementos, en este caso el diseño es una antena cara a cara donde se debe cuidar el espacio entre los elementos, para que el acoplamiento mutuo sea máximo de -15 dB.

Teniendo en cuenta este criterio, para la banda de frecuencia de 2.4 GHz, el acoplamiento mutuo no era el adecuado, por este motivo y mediante varios procesos de simulación, se logró mejorar el acoplamiento mutuo mediante la integración de una línea en corto circuito [54], [55], para tener acoplamiento mutuo por debajo de los -15 dB, este resultado se muestra en la Figura 14 y en el siguiente capítulo se detalla como varia los parámetros de la antena con la integración de la línea.

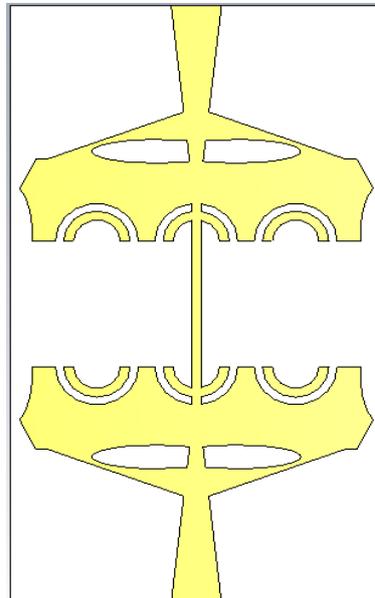


Figura 14. Diseño de antena con integración de línea en corto circuito.

3.7.4 SIMULACION DE LAS ANTENAS EN EL SOFTWARE CST

En este apartado se detalla el proceso de creación de la antena en el simulador CST Studio Microwave, con dimensiones de todos los elementos antes mencionados, cabe mencionar que al describir la medida de un elemento este tiene el mismo valor para el elemento frontal.

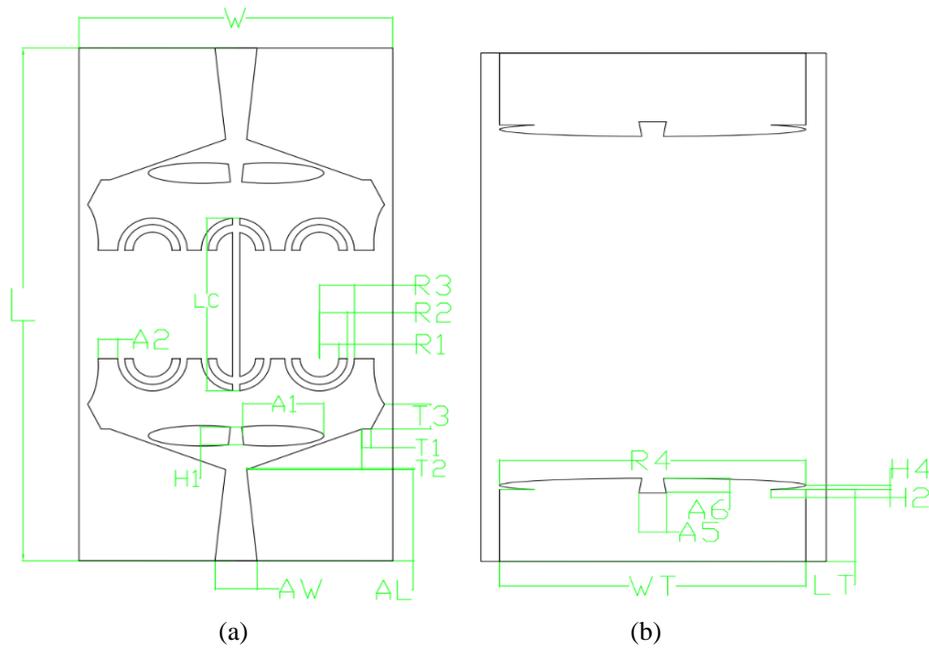


Figura 15. Variables del diseño de antena (a) vista frontal (b) vista posterior.

Tabla 3. Medidas del diseño de la antena.

Variable	Valor (mm)
W	45
L	80
h	1.5
AW	6.05
AL	14.22
T1	1.3
T2	16.55
T3	3.9
A1	11.63
A2	2.83
R1	2.79
H1	2.78

Variable	Valor (mm)
R4	40
A6	2.19
A5	3.6
WT	40
LT	11.3
H4	0.69
H2	4.57
R2	3.99
R3	4.99
LC	26.9

3.7.5 OPTIMIZACION DE LA ANTENA MULTI ALIMENTACIÓN

Se llevó a cabo un proceso de optimización para la compactación de la antena, mediante el uso de una línea de Meandro. Este método implica doblar la línea en cortocircuito en forma de S, lo que permite reducir el tamaño total de la antena sin alterar su diseño original. Para llevar a cabo esta tarea, se tomaron en cuenta medidas precisas para la línea de meandro que se muestran en la Figura 16, la optimización de la antena en su tamaño total se estableció con dimensiones de 72x45x1.5 mm, con este proceso la antena tuvo una disminución del tamaño de 8mm. Este proceso de compactación resultó en una antena más eficiente y práctica en términos de su espacio físico.

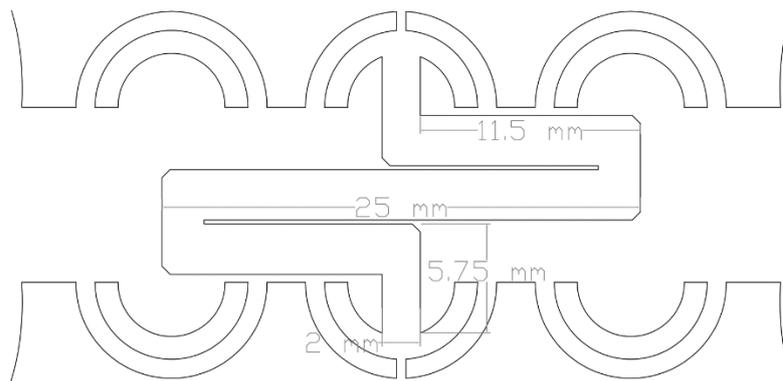


Figura 16. Medidas de la línea de meandro.

La Figura 17, se muestra el diseño de la antena compacta implementando la línea de Meandro, por la tira en cortocircuito del modelo anterior en el simulador CST studio.

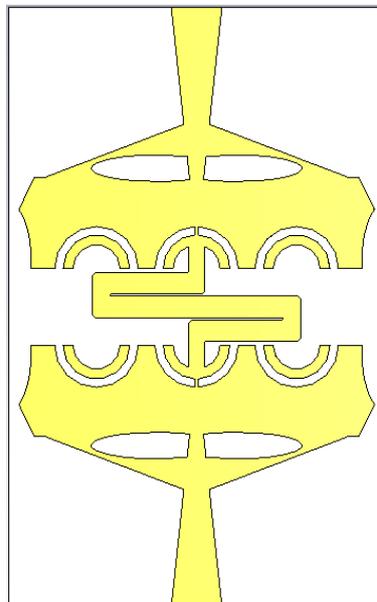


Figura 17. Diseño de la antena con línea de Meandro

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez ejecutado el diseño y la fabricación de la antena, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos los cuales son:

- Resultados del diseño en el software CST Studio
- Resultados de los parámetros de la antena
- Análisis de modos característicos con Altair Feko
- Aplicación de la antena en un reloj de prueba
- Resultados medidos

4.7 ANALISIS DE LA ANTENA MULTI ALIMENTACIÓN DE DOS PUERTOS.

En este apartado se realiza el análisis de la antena multi alimentación de dos puertos, como se muestran en la Figura 12, para las dos bandas de frecuencia. El análisis se lleva a cabo con los elementos de la antena separados por una distancia de $d=14$ mm.

En este proyecto de investigación, se utilizó una antena múltiple alimentación debido a la unidireccionalidad de los diagramas de radiación para la banda de 5.8 GHz mostrados en la Figura 18, la utilización de dos elementos cara a cara con dos puertos, es una solución viable para la optimización de los diagramas de radiación y los valores de intensidad.

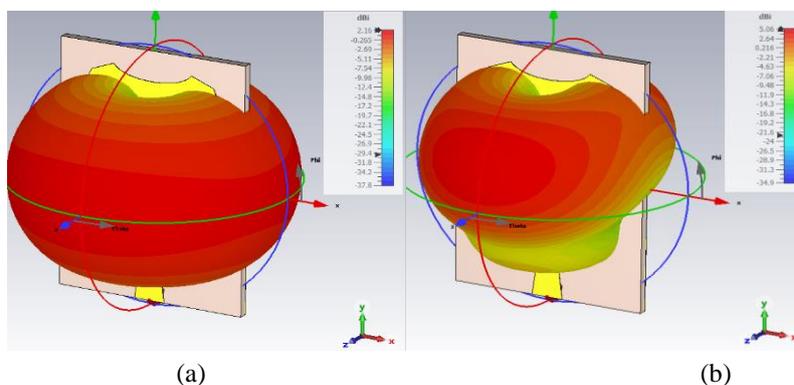


Figura 18. Diagrama de radiación del diseño de la antena Microstrip (a) 2.4 GHz y (b) 5.8 GHz

Para analizar los parámetros fundamentales de la antena de dos elementos se usó el simulador CST Studio Microwave que nos permite optimizar, analizar y comparar los cambios de la antena, al ser una antena de dos elementos es importante determinar la distancia óptima entre los elementos radiantes y el sustrato. Se creó una variable dependiente creada en el software nos permitió evaluar los valores S_{21} y S_{12} a diferentes distancias sin afectar la frecuencia de resonancia.

Los parámetros S_{11} , también conocido como coeficiente de reflexión y los parámetros S_{21} son esenciales para evaluar la capacidad de la antena para transmitir y recibir señales en la banda de frecuencia deseada. El parámetro S_{11} representa la reflexión de la señal de la antena, mientras que el parámetro S_{21} se refiere a la cantidad de señal que se acopla o se transfiere desde el puerto de entrada de la antena al puerto de salida. Este parámetro mide la capacidad de la antena para transmitir la señal desde un puerto a otro.

En la Figura 19, se muestra los parámetros S_{11} y S_{21} de la antena sin la combinación de los puertos, para la banda de 2.4 GHz se obtiene valores de hasta -14.95 dB en S_{11} y -11.42 dB en S_{21} , de la misma forma para la banda de 5.8 GHz se observa valores de hasta -22.95 dB y -32.36 dB respectivamente. Por otro lado, en la banda de 2.4 GHz, la antena presenta un acoplamiento mutuo más alto, lo que se refleja en valores de S_{12} de -11.42 dB, por encima del límite permisible de -15 dB para este tipo de antenas. Esto indica que la antena puede presentar algunas dificultades en la transmisión y recepción de señales en esta banda de frecuencia en particular.

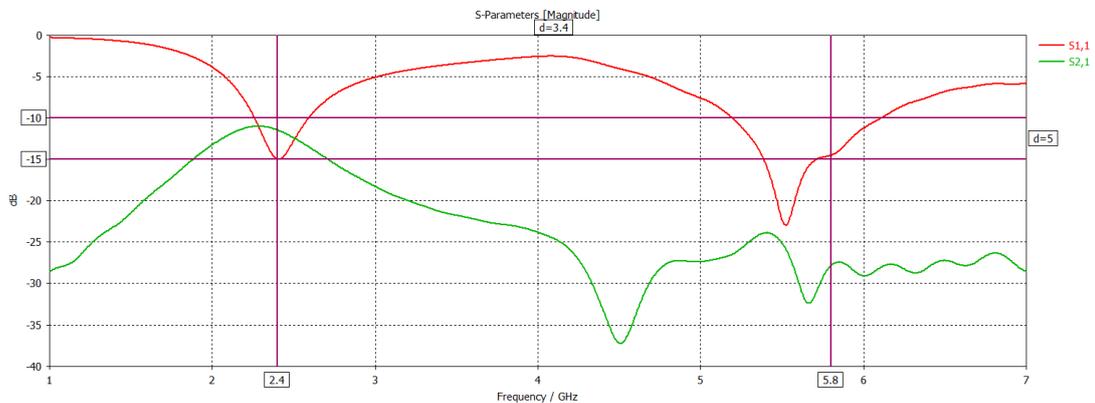


Figura 19. Parámetro S_{11} y S_{12} sin divisor de potencia.

La evaluación de estos parámetros permite determinar la eficiencia de la antena en la transmisión y recepción de señales. Los resultados obtenidos a través del análisis de los parámetros S_{11} y S_{21} permiten ajustar la distancia entre los elementos radiantes y el sustrato para lograr un mejor rendimiento de la antena multi alimentación de dos puertos en la banda de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz.

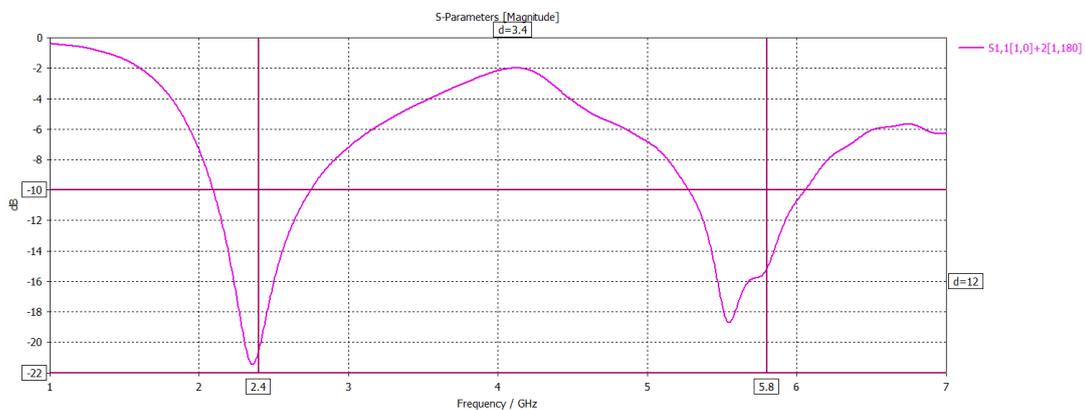


Figura 20. Parámetro S_{11} con divisor de potencia.

El análisis de los parámetros S_{11} en combinación de los puertos en una antena, es crucial para evaluar su rendimiento y determinar su capacidad para transmitir y recibir señales en diferentes bandas de frecuencia como lo había mencionado. En este caso particular, se puede observar que la antena presenta un buen desempeño en la banda de 5.8 GHz, con valores de S_{11} de hasta -19 dB. Además, el ancho de banda obtenido en esta banda de frecuencia es de 770 MHz, lo que representa una amplia capacidad de transmisión y recepción de señales. En la banda de 2.4 GHz debido a que no se tiene un acoplamiento adecuado, el funcionamiento a esta frecuencia no es óptimo. Es importante tener en cuenta que estos resultados se obtuvieron mediante la alimentación de los dos puertos de la antena mediante un divisor de potencia en el simulador, lo que puede tener un impacto en el rendimiento real de la antena en una configuración real.

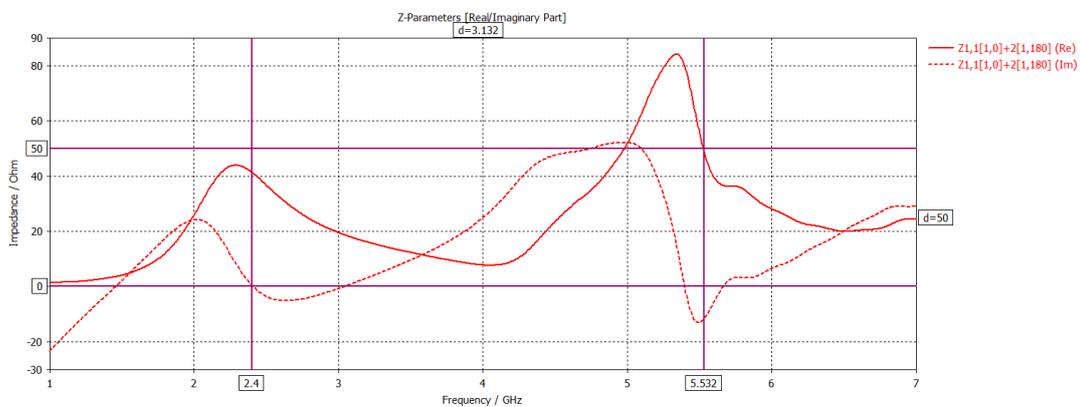


Figura 21. Impedancia Z_{11} real e imaginaria sin línea de corto circuito.

En la Figura 21, se muestra el resultado de la impedancia para el caso en el que existe la combinación de puertos de entrada. La gráfica indica que la antena presenta valores cercanos a los 50 Ω para su componente real en 5.53 GHz a 6 GHz en la banda de 5.8 GHz, mas no en la banda de 2.4 GHz debido al deficiente acoplamiento mutuo de los puertos a esta frecuencia. Además, se puede observar que su componente imaginaria se aproxima a cero en estas frecuencias.

Estos resultados indican que la antena está esta acoplada en el rango de frecuencias de 5.8 GHz diseñado, en el caso de la banda de 2.4 GHz debido a su nulo acoplamiento mutuo a esta frecuencia el acople de impedancias no es el óptimo. Un acoplamiento adecuado a la impedancia característica de la línea de transmisión o del sistema de comunicaciones ayuda a minimizar las reflexiones y optimizar la transmisión y recepción de señales.

En el siguiente apartado se muestran los diagramas de radiación de la antena, estos diagramas son una representación gráfica de la intensidad de la radiación electromagnética en diferentes direcciones en el espacio. Para fines comparativos se mostrarán los resultados de la antena sin la tira en cortocircuito. En la Figura 20, se muestra los resultados correspondientes la banda de 2.4 GHz.

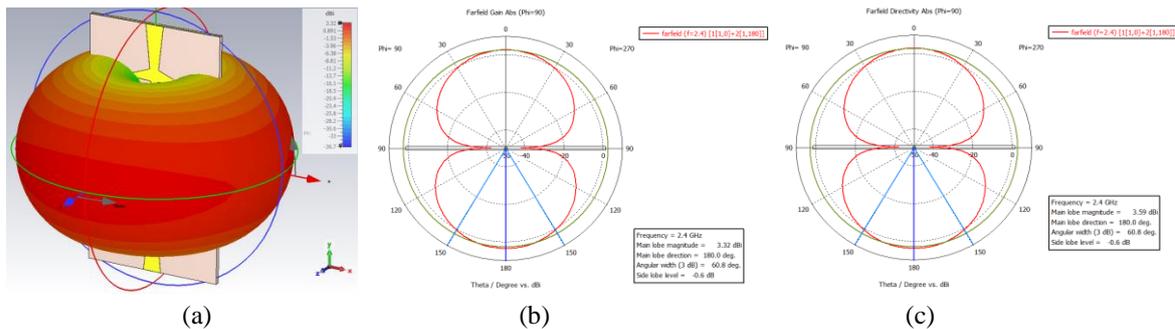


Figura 22. Diagrama de radiación de diseño sin línea en cortocircuito para 2.4 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad.

La Figura 22, se muestra información detallada sobre la radiación, directividad y ganancia de la antena. En primer lugar, la figura 22 (a) nos proporciona una vista clara del patrón de radiación omnidireccional de la antena. Este patrón se caracteriza por la emisión de energía en todas las direcciones alrededor de la antena, lo que permite una cobertura completa de 360 grados en el plano horizontal.

Por otro lado, la Figura 22 (b), nos muestra que la antena tiene una ganancia de 3.32 dB en la banda de frecuencia correspondiente. Esta ganancia se refiere a la capacidad de la antena para concentrar la energía en una dirección específica en lugar de irradiarla en todas las direcciones. La ganancia es una medida importante para evaluar la eficiencia de la antena en términos de la cantidad de energía transmitida. Finalmente, la Figura 22 (c), nos proporciona información sobre la directividad de la antena en coordenadas polares. En este caso, la directividad de la antena es de 3.59 dB, lo que indica que la antena es capaz de concentrar la energía en una dirección específica con alta eficiencia.

Es importante destacar que, a pesar de las buenas características de la antena en términos de radiación, ganancia y directividad, esta no es capaz de funcionar en la banda de 2.4 GHz debido al acoplamiento mutuo bajo. Este es un factor importante a tener en cuenta al seleccionar la antena adecuada para una aplicación específica.

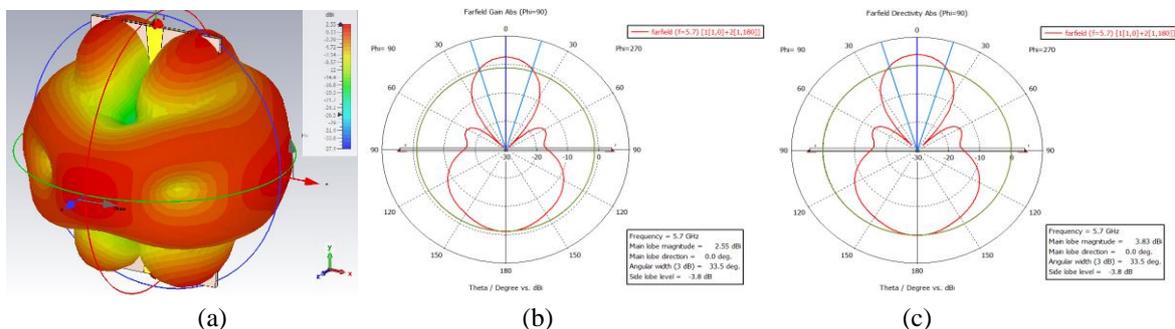


Figura 23. Diagrama de radiación de diseño sin línea en cortocircuito para 5.8 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad

La Figura 23, se muestra un análisis detallado de la antena en la banda de frecuencia de 5.8 GHz. En la Figura 23 (a), podemos observar que la antena presenta una pérdida de directividad, lo que resulta en la radiación de energía en el plano Y. Sin embargo, se puede

observar que la antena todavía es capaz de cubrir principalmente el área en el plano horizontal en su totalidad, lo que es beneficioso en muchas aplicaciones. En cuanto a la ganancia y la directividad de la antena, la Figura 23 (b) y (c) muestran que el máximo valor de ganancia es de 2.55 dB y el máximo valor de directividad es de 3.83 dB.

Es importante mencionar que la combinación de puertos en este tipo de antenas es fundamental, en la Figura 24 y 25, se muestra los diagramas de radiación de la antena con múltiple alimentación en las dos bandas de trabajo, en la Figura (a), se muestra el diagrama de radiación en perspectiva cuando no existe combinación de puertos, se puede notar que la dirección de la radiación carece de unidireccionalidad que se obtiene cuando si se trabaja con puertos combinados Figura (b), y que se requiere para una operación satisfactoria de la antena.

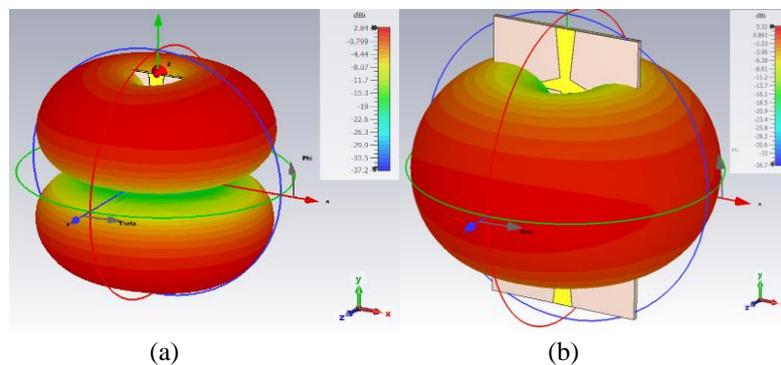


Figura 24. Diagrama de radiación del diseño de la antena con múltiples puertos para 2.4 GHz: (a) diagrama de radiación con alimentación de los puertos individuales , (b) diagrama de radiación con alimentación de los puertos combinados.

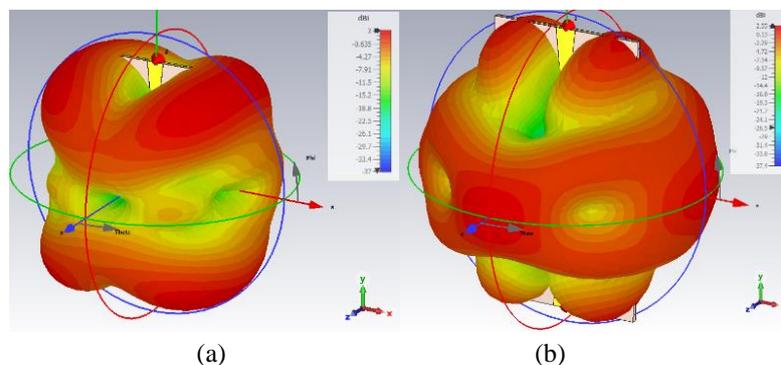


Figura 25. Diagrama de radiación del diseño de la antena con múltiples puertos para 5.8 GHz: (a) diagrama de radiación con alimentación de los puertos individuales , (b) diagrama de radiación con alimentación de los puertos combinados.

4.8 ANALISIS DE LA ANTENA DE DOS PUERTOS CON LÍNEA EN CORTOCIRCUITO

En este apartado se dará a conocer los resultados de la antena con línea en cortocircuito simulada de la Figura 14. Previo al análisis es importante realizar una comparación de la estructura de ambas antenas, debido a que no se consiguió los resultados esperados para las

dos bandas de frecuencia en la antena de la Figura 12, por tal motivo se integró una línea en cortocircuito en el centro de la antena que une los dos elementos en la parte frontal, para mejorar el acoplamiento mutuo esperado para la banda de 2.4 GHz, debido a esta línea en cortocircuito tenemos una afectación positiva para alcanzar los parámetros de la antena propuesta para operar en las dos bandas.

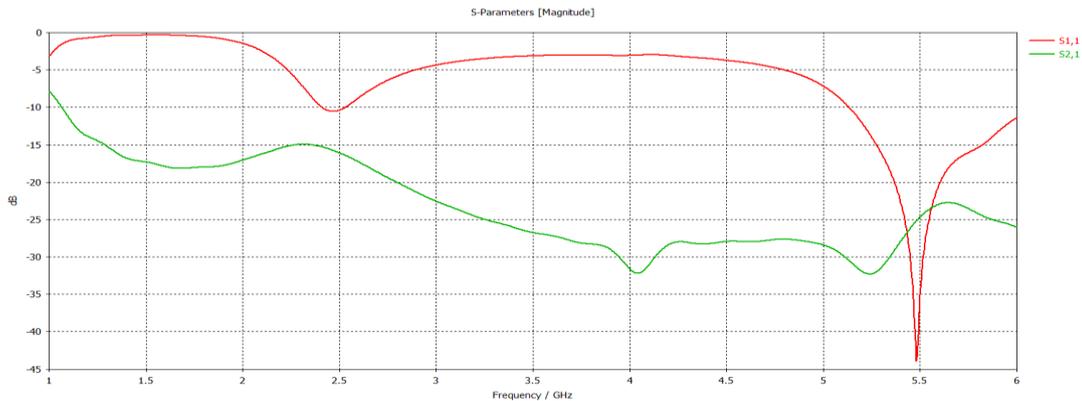


Figura 26. Parámetro S₁₁ y S₁₂ sin divisor de potencia.

Iniciamos este análisis con los parámetros Scattering. En la Figura 26 se muestran los parámetros S₁₁ y S₂₁ de la antena sin el divisor de potencia y la línea en cortocircuito. En la banda de 2.4 GHz los valores obtenidos son de hasta -10.54 dB, en la banda de 5.8 GHz se obtuvieron valores de hasta -43.93 dB. En el caso de los parámetros S₂₁ y S₁₂ de la banda de 2.4 GHz, se obtuvieron valores por debajo de -15.71 dB con la línea en cortocircuito, mientras que sin la línea se obtuvo un valor de -11 dB. Esto implica un cambio significativo en el funcionamiento de esta banda y valores para la banda de 5.8 GHz por debajo de los -23.09 dB hasta -25.40 dB para S₂₁ y S₁₂.

Se debe tener en cuenta que un buen acoplamiento mutuo entre puertos a ciertas frecuencia los valor S₂₁ y S₁₂ en este caso debe estar por debajo de los -15 dB, además los valores S₂₁ y S₁₂ de los elementos radiantes de la antena son los mismos ya que el divisor de potencia asegura que la potencia de la señal se distribuya equitativamente entre los diferentes elementos de la antena, de manera que cada uno de ellos pueda irradiar la señal con una potencia similar. Esto es importante para garantizar una buena directividad y ganancia en la antena, ya que la radiación de la señal dependerá de la cantidad de potencia que reciba cada elemento.

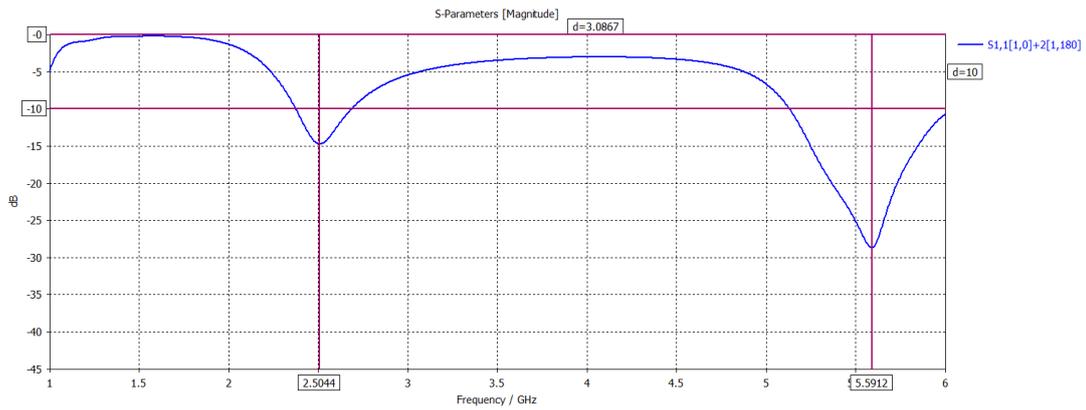


Figura 27. Parámetros S antena con línea en cortocircuito y combinación de puertos.

Se observa que en la banda de 2.4 GHz se obtiene valores por delante del mínimo para el uso de la frecuencia que es de -10 dB en el rango de 2.38 GHz a 2.68 GHz, al igual que en la banda de 5.8 GHz en el rango de 5.13 GHz a 6.05 GHz, es decir que el rango de frecuencia en cada banda abarca la frecuencia de resonancia para la cual fue diseñada la antena. Una vez realizado el análisis de la estructura se puede ver que el ancho de banda (BW) en la banda de frecuencia de 2.4 GHz es de 300 MHz; en cuanto a la banda de frecuencia de 5.8 GHz, el ancho de banda es de 920 MHz, esto quiere decir que tiene una gran flexibilidad para las aplicaciones en esta banda.

El valor máximo obtenido para el parámetro S_{11} y S_{22} fue de -14.71 dB a la frecuencia de 2.5 GHz. Por otro lado, en la banda de frecuencia de 5.8 GHz, se obtuvieron parámetros excelentes, con valores de hasta -28.61 para S_{11} y S_{22} .

En cuanto al comportamiento de la impedancia que toma la estructura propuesta, con la combinación de puertos, las componentes reales e imaginarias para la frecuencia a la que está adaptada a 50Ω en la banda de 2.4 GHz es a la frecuencia de 2.57 GHz se adjudican valores de $50 - 21.5j \Omega$ para los parámetros S_{11} y S_{22} , y para la frecuencia en la banda de 5.8 GHz la frecuencia a la que mejor adaptación de impedancia tiene es de 5.55 GHz y se adjudican los siguientes valores de $50 + 3.85j \Omega$ para los parámetros S_{11} y S_{22} ;

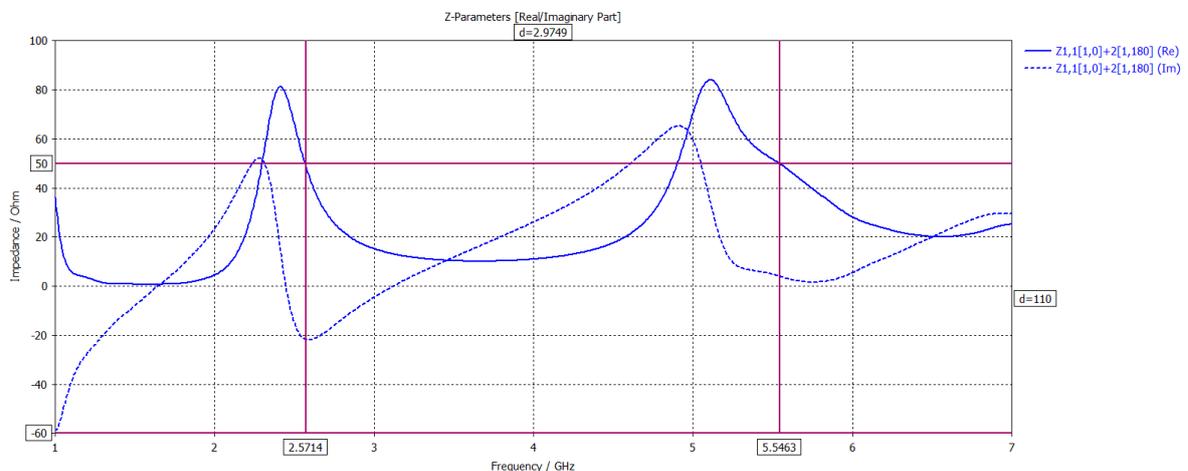


Figura 28. Impedancia Z_{11} real e imaginaria con divisor de potencia

Estos valores de acoplamiento de impedancia son importantes para garantizar una transferencia eficiente de potencia entre el transmisor y la antenna, lo que se traduce en una mejor calidad de la señal y una mayor eficiencia en la radiación. En otras palabras, si la impedancia de la antenna no está correctamente adaptada a la impedancia de la fuente de señal (en este caso, 50Ω), se pueden producir reflexiones de señal y pérdidas de energía, lo que afecta negativamente la calidad de la señal y la eficiencia de la antenna.

En relación al análisis del diagrama de radiación de la antenna diseñada, se puede evidenciar a través de la visualización del modelo en tres dimensiones, tal como se muestra en la Figura 29 (a), que al combinar los puertos se logra un diagrama de radiación omnidireccional. Esto indica que la antenna irradia en todas las direcciones de manera uniforme, sin presentar una dirección preferencial. La ganancia de la antenna ha sido evaluada en 3.58 dB, lo que significa que la antenna es capaz de concentrar la radiación en 360° y es más efectiva en la emisión y recepción de señales en comparación con una antenna isotrópica. Asimismo, se ha obtenido una directividad de 4.02 dB.

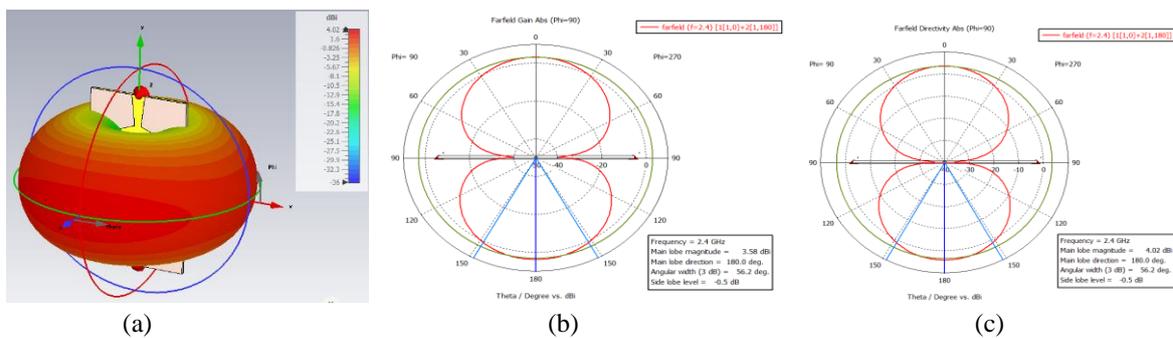


Figura 29. Diagrama de radiación de diseño con línea en cortocircuito para 2.4 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad

En lo que respecta a la banda de frecuencia de 5.8 GHz, al igual que la antenna sin línea en cortocircuito, se ha observado que una pequeña porción de la radiación se dispersa en el plano XY y en los costados del eje Z. Sin embargo, la radiación se mantiene en gran medida omnidireccional con ligeras variaciones. Los diagramas polares obtenidos evidencian que el comportamiento de la antenna es más direccional en la parte frontal que en la parte trasera. En cuanto a la ganancia y directividad obtenidas para esta banda de frecuencia, se han registrado valores de 2.03 dB y 2.89 dB, respectivamente. En general, se ha comprobado que la antenna diseñada presenta un rendimiento satisfactorio en la banda de frecuencia de 5.8 GHz, con una radiación predominantemente omnidireccional y un comportamiento direccional más marcado en la parte frontal.

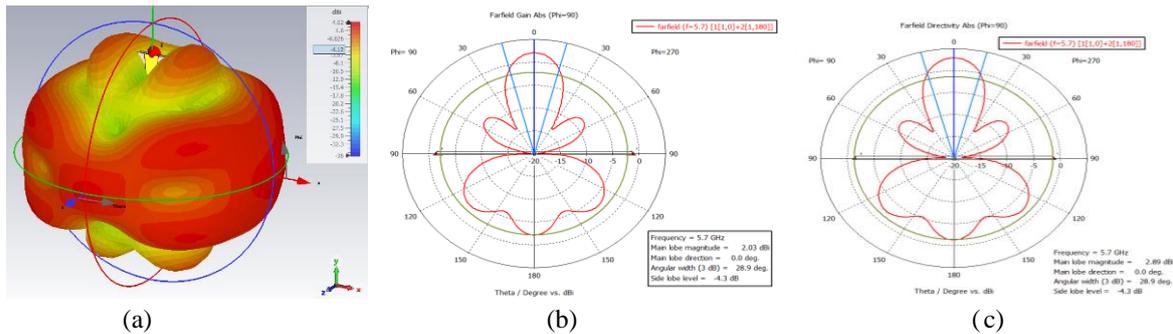


Figura 30. Diagrama de radiación de diseño con línea en cortocircuito para 5.8 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad

Al comparar los resultados obtenidos para la antena con línea en cortocircuito y sin línea en cortocircuito, se puede apreciar que los diagramas de radiación presentan una variación poco significativa. Esto indica que la inclusión de este tipo de estructuras al elemento radiante es una opción viable para mejorar el acoplamiento mutuo y, al mismo tiempo, preservar los diagramas de radiación. Asimismo, esta estructura ayuda a garantizar que la antena emita y reciba señales de manera más efectiva, lo que se refleja en la estabilidad de los diagramas de radiación obtenidos. En resumen, se puede afirmar que la inclusión de líneas en cortocircuito en la estructura de la antena es una estrategia útil para mejorar su rendimiento y preservar sus características de radiación.

Con los resultados obtenidos, se puede realizar el cálculo para el valor de la eficiencia de radiación. La eficiencia de radiación de una antena se define como la relación entre la ganancia y la directividad de la antena. Para calcular la eficiencia de radiación de la antena diseñada, se tomaron en cuenta los datos de las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz. La fórmula para el cálculo de la eficiencia de radiación es la siguiente:

$$\text{Eficiencia de radiación } (\eta) = \frac{\text{Ganancia (G)}}{\text{Directividad (D)}}$$

Para la banda de frecuencia de 2.4 GHz:

$$\text{Eficiencia de radiación } (\eta) = \frac{3.9 \text{ dBi}}{3.9 \text{ dBi}} = 0.8905 \text{ o } 89.05\%$$

Para la banda de frecuencia de 5.8 GHz:

$$\text{Eficiencia de radiación } (\eta) = \frac{2.03 \text{ dBi}}{2.89 \text{ dBi}} = 0.7024 \text{ o } 70.24\%$$

Se puede observar que la eficiencia de radiación es mayor en la banda de frecuencia de 2.4 GHz en comparación con la banda de 5.8 GHz. Sin embargo, en ambas bandas de frecuencia, la eficiencia de radiación es relativamente alta, lo que sugiere que la antena diseñada es eficiente en términos de emisión y recepción de señales en estas frecuencias. Cabe destacar que la eficiencia de radiación es un parámetro importante a considerar en el

diseño de antenas, ya que indica la cantidad de energía que se convierte en señal útil en comparación con la energía total suministrada a la antena.

4.9 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACION DE LA ANTENA MULTI ALIMENTACIÓN

A continuación, se realiza análisis de los parámetros Scattering. En la Figura 31, se muestran los parámetros S_{11} ; S_{22} y S_{21} ; S_{12} de la antena sin la combinación de puertos y la línea de Meandro. En la banda de 2.4 GHz los parámetros S_{11} y S_{22} tienen valores de hasta -24 dB, y para la banda de 5.8 tienen valores de hasta -35 dB. Los parámetros S_{21} y S_{12} para la antena compacta son los siguientes, en la banda de 2.4 GHz se observan valores por debajo de -15 dB hasta -23.95 dB, mientras que en la banda de 5.8 GHz se obtienen valores hasta -22.75 dB.

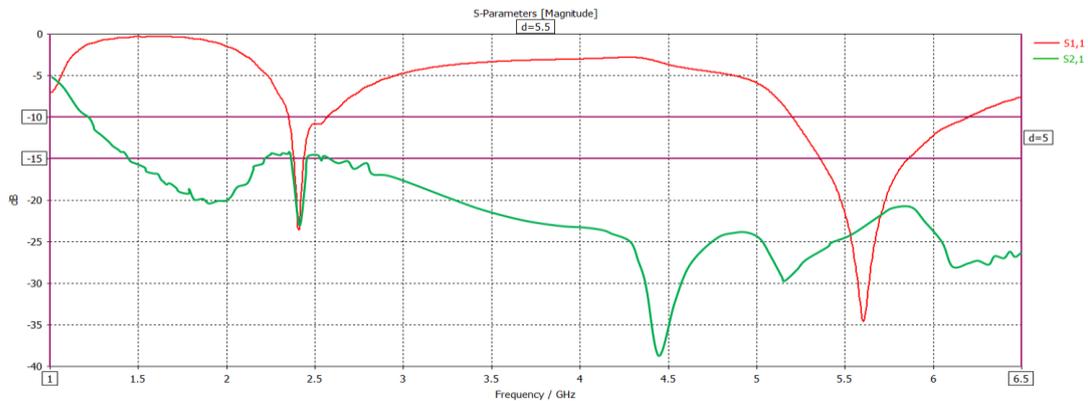


Figura 31. Parámetros S antena con línea de meandro y sin combinación de puertos.

En la figura 32, se muestra los resultados finales de la antena con la combinación de los puertos de entrada, en la banda de 2.4 GHz se obtiene los siguientes valores en los parámetros S_{11} y S_{22} en el rango de 2.29 GHz a 2.72 GHz; en la banda de 5.8 GHz en el rango de 5.22 GHz a 6.19 GHz. En general, los parámetros de dispersión (S-parameters) de la antena compacta son mejores en ambas bandas de frecuencia que la antena con línea en cortocircuito.

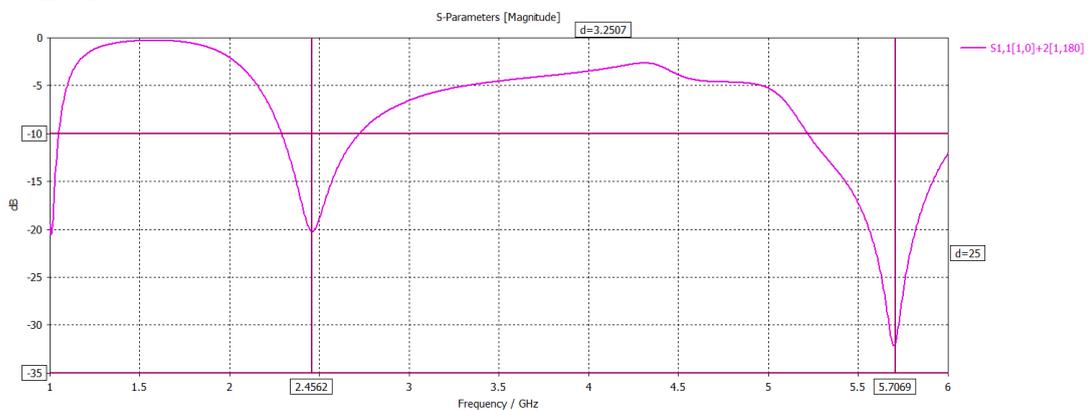


Figura 32. Parámetros S antena con línea de meandro y combinación de puertos.

Una vez realizado el análisis de la antena compacta se puede ver que el ancho de banda (BW) en la banda de frecuencia de 2.4 GHz es de 430 MHz; en cuanto a la banda de frecuencia de 5.8 GHz, el ancho de banda es de 970 MHz, esto quiere decir que la antena es más flexible en comparación con el diseño con tira en cortocircuito.

En cuanto al comportamiento de la impedancia de la antena compacta, con la combinación de puertos, las componentes reales e imaginarias para la frecuencia a la que mejor adaptación se observa a 50Ω es a la frecuencia de 2.5 GHz se adjudican valores de $50 - 12.22j \Omega$ para los parámetros S_{11} y S_{22} , y para la frecuencia en la banda de 5.8GHz la frecuencia a la que mejor adaptación de impedancia tiene es de 5.7 GHz y se adjudican los siguientes valores de $50 - 2.62j \Omega$ para los parámetros S_{11} y S_{22} .

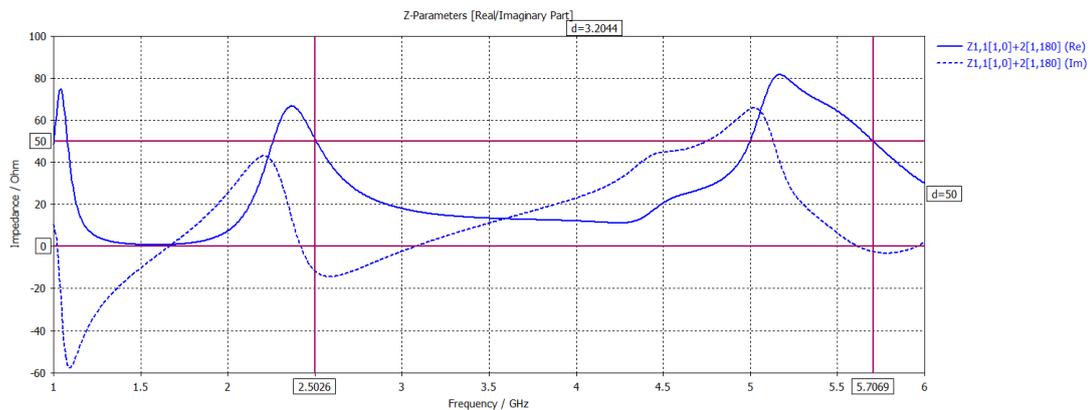


Figura 33. Impedancia Z_{11} real e imaginaria de la antena compacta.

En relación al análisis del diagrama de radiación de la antena compacta, se puede evidenciar a través de la visualización del modelo en tres dimensiones, tal como se muestra en la Figura 34 (a), que al combinar los puertos se logra un diagrama de radiación omnidireccional. Esto indica que la antena irradia en todas las direcciones de manera uniforme, sin presentar una dirección preferencial. En lo que respecta al diagrama de radiación 3D de la antena diseñada, se puede ver que a la frecuencia de resonancia 2.4 GHz para la que fue diseñada, con puertos combinados y la línea de meandro, se forma un diagrama de radiación perfectamente omnidireccional con una ganancia de 3.15 dB en su punto más radiante y una directividad de 3.55 dB.

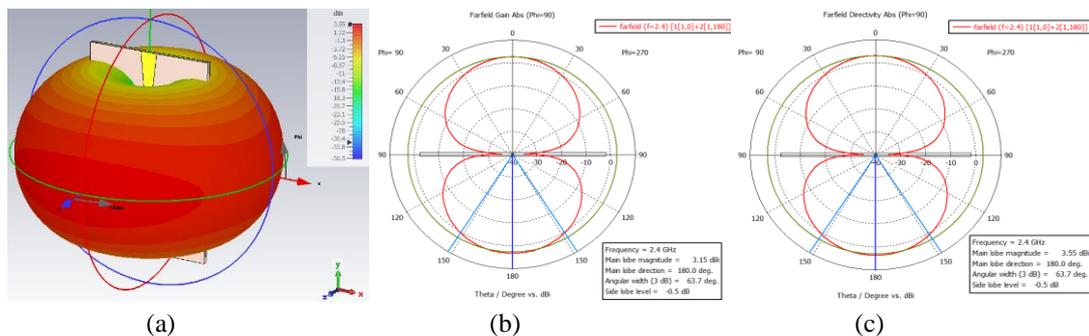


Figura 34. Diagrama de radiación del diseño compacto para 2.4 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad

Para la banda de frecuencia de 5.8 GHz, al igual que en la Figura 28 y 21, el diagrama de radiación en una pequeña parte la radiación tiene una derivación en el plano Y, aunque en la Figura 35 (a) esta derivación es mucho menor. Los diagramas polares obtenidos evidencian que el comportamiento de la antenna es más direccional en la parte frontal que en la parte trasera. En cuanto a la ganancia y directividad obtenidas para esta banda de frecuencia, se han registrado valores de 3.25 dB y 4.1 dB, respectivamente.

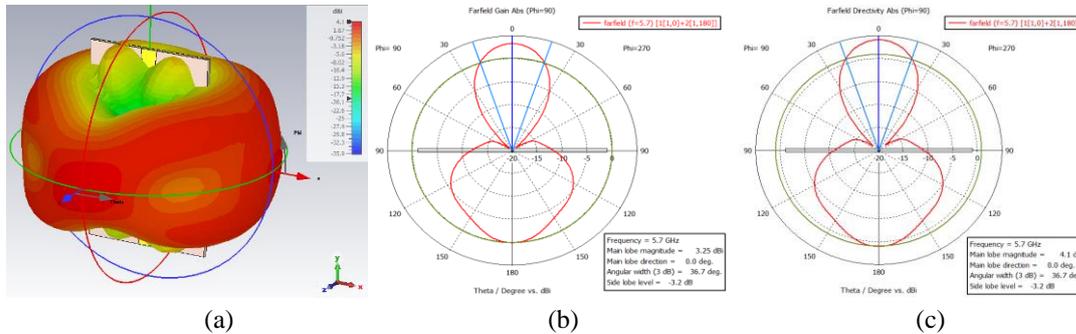


Figura 35. Diagrama de radiación del diseño compacto para 5.8 GHz: (a) diagrama de radiación en 3D (b)Ganancia, (c)Directividad.

Al comparar los resultados obtenidos para la antenna con línea en cortocircuito, sin línea en cortocircuito y la antenna compacta, se puede apreciar que los diagramas de radiación presentan una variación poco significativa para la banda de 2.4 GHz y para la banda de 5.8 GHz el diagrama de radiación de la antenna compacta resulta más efectivo, ya que la pérdida de radiación en el plano Y es más baja. Esto indica que la compactación de la antenna con línea de Meandro no solo ayudo a que la antenna sea más pequeña, además podemos observar que los diagramas de radiación son mejores y con mayor rendimiento.

Con los resultados obtenidos se calculó la eficiencia de la antenna para ambas bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz.

Para la banda de frecuencia de 2.4 GHz:

$$\text{Eficiencia de radiación } (\eta) = \frac{3.15 \text{ dBi}}{3.55 \text{ dBi}} = 0.8873 \text{ o } 88.73\%$$

Para la banda de frecuencia de 5.8 GHz:

$$\text{Eficiencia de radiación } (\eta) = \frac{3.25 \text{ dBi}}{4.1 \text{ dBi}} = 0.7927 \text{ o } 79.27\%$$

Se puede observar que la eficiencia de radiación es mayor en la banda de frecuencia de 2.4 GHz en comparación con la banda de 5.8 GHz al igual que en los diseños anteriores.

A continuación, se presenta una tabla que resume los datos obtenidos a partir de la simulación de la antenna con y sin línea en cortocircuito, y la antenna compacta, en el caso de la antenna sin línea en corto circuito la banda de 2.4 GHz se desprecia debido a que los parámetros no son adecuados para su funcionamiento.

Tabla 4. Comparación de antena simulada con y sin línea en corto circuito.

	Sin línea en cortocircuito	Con línea en cortocircuito	Antena compacta
Parámetros	2.4 GHz		
Ancho de banda	---	12.5 %	17.91%
Parámetros S_{11} - S_{22}	---	-14.58	-19.97
Parámetros S_{12} - S_{21}	---	-18.44	-23.94
Directividad	---	4.02	3.55
Ganancia	---	3.58	3.15
Eficiencia		89.05%	88.73%
Parámetros	5.8 GHz		
Ancho de banda	15.5%	15.86%	16.72%
Parámetros S_{11} - S_{22}	-18.71 dB	-28.42 dB	-22.75
Parámetros S_{12} - S_{21}	-32.39 dB	-32.55 dB	-31.86
Directividad	3.83 dBi	2.89 dBi	3.25
Ganancia	2.55 dBi	2.03 dBi	4.1
Eficiencia	66.58%	70.24%	79.27%

4.10 ANÁLISIS DE LOS MODOS CARACTERÍSTICOS

Para el análisis de los resultados de los modos característicos presentes en la antena se seleccionaron los modos dentro del rango de las dos bandas y los más significativos en base a la interpretación de los ángulos característicos, todos los modos analizados resuenan $\alpha_n = 180$. Se puede apreciar en la Figura 36, que 7 modos fueron los seleccionados por la información que estos nos muestran, a través del rango de frecuencia de 2.38 GHz a 6 GHz. Los 7 modos presentan una correlación en el eje del ángulo característico con valor de 180° . El primer ángulo característico se presenta a 2.38 GHz, el segundo a 2.46 GHz, el tercero a 2.68 GHz, el cuarto se muestra a 5.21 GHz, el quinto a 5.59, el sexto a 5.7 GHz y el séptimo a 5.96 GHz.

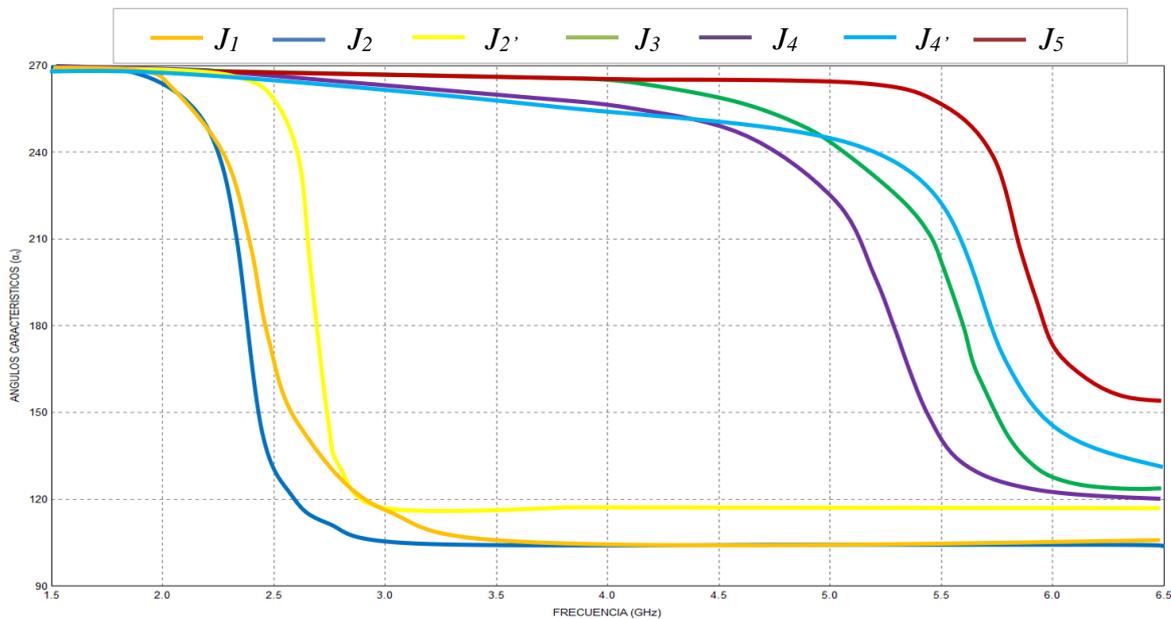
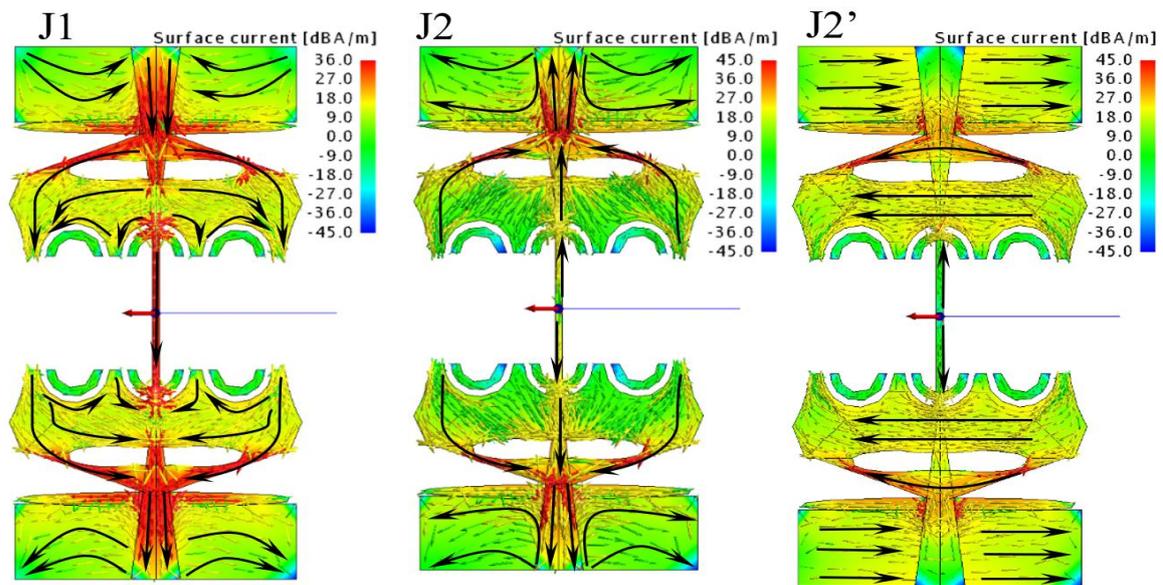


Figura 36. Representación de los ángulos característicos α_n de los modos en la estructura.

En la Figura 37, se muestra el análisis de las corrientes características de los modos más significativos y los cuales nos aportan información relevante. Se sabe que gracias al estudio realizado por [52] cortocircuitando 2 elementos de una antena se pueden crear tres familias de modos: los modos de línea de transmisión, los modos de antena y los modos que fluyen por toda la estructura, visto en la Figura 9. Al observar las direcciones de las corrientes en el caso del modo J_2 en el centro de la estructura debido al cortocircuito se crea un conjunto de corrientes que se distribuyen para cada elemento de la antena, esta distribución de corriente es perpendicular al punto en cortocircuito y tienen la misma dirección. De la misma forma se cumple el criterio para el modo J_2' su distribución de corriente en este caso es horizontal.

Por otro lado, en el modos J_1 y J_3 son los más importantes debido a que su distribución de corrientes fluye en toda la antena, y son estos modos a lo que se puede excitar para tener mejores rendimientos. Por las corrientes en la línea de cortocircuito, el análisis modal se realiza en toda la estructura. Se observa que la distribución de las corrientes en J_1 fluye por toda la antena sin interferencia de nulos, en el modo J_3 presenta nulos que provocan un cambio en su dirección de corrientes. Este análisis es importante para comprender cómo las corrientes fluyen a través de toda la estructura de la antena y cómo influyen en su patrón de radiación.



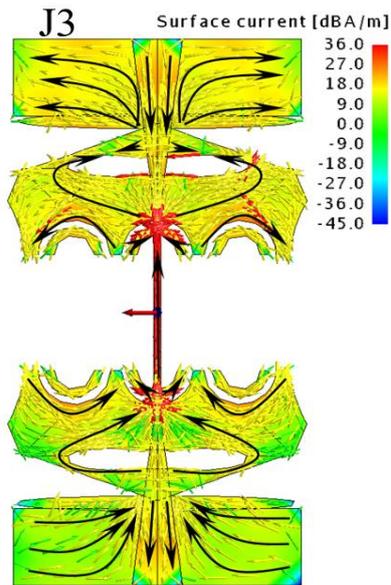
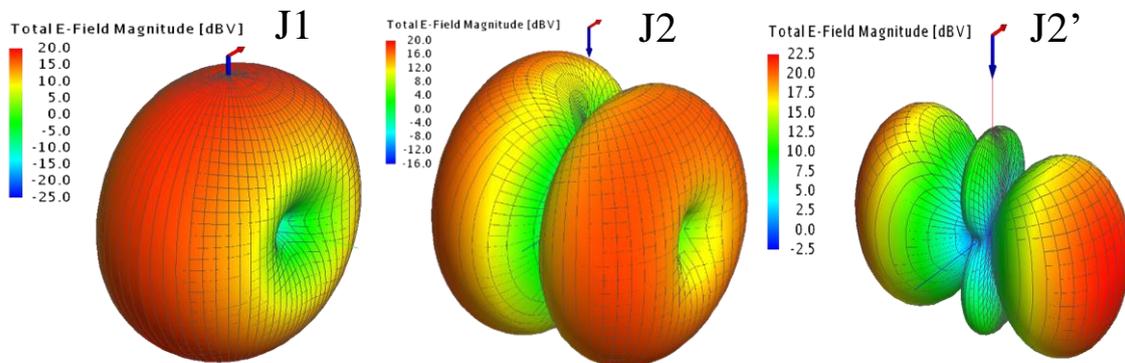


Figura 37. Distribución de corriente modal de la estructura y plano de tierra de los 7 modos a sus respectivas frecuencias de resonancia.

En la Figura 38, se presentan los diagramas de radiación de los modos principales de una antena. Se puede observar que los modos J_1 y J_3 son los que tienen la distribución de radiación más relevante porque su diagrama de radiación cubre casi todo el plano Z. El diagrama de radiación del modo J_1 en la primera banda es un poco más esférico que en la segunda banda debido a la diferencia en frecuencia y su fluidez de corrientes. Además, se puede notar que el diagrama de radiación generado por las corrientes de flujo en la zona central de la antena produce patrones de radiación similares a los obtenidos en simulaciones realizadas con el software CST Studio. En cuanto a los modos J_2 , sus diagramas de radiación son más directivos con respecto al plano XY, es decir, la radiación se genera de manera lateral. Este tipo de radiación permite diseñar antenas con un ancho de banda mayor y con mayor directividad.



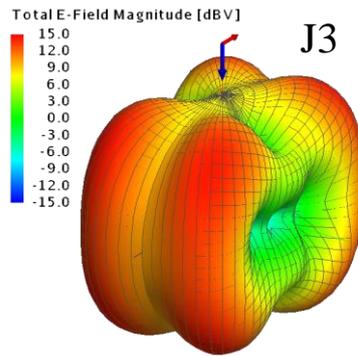


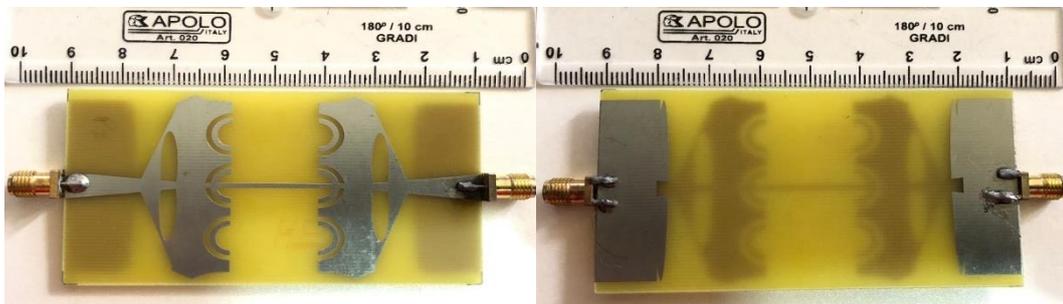
Figura 38. Diagramas modales de radiación con sus respectivas frecuencias de resonancia.

4.11 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema de antena propuesto consiste en una antena de parche de 2 puertos cara a cara. Con el fin de verificar los resultados de la simulación, se procedió a medir el prototipo mediante un analizador de red vectorial (VNA), específicamente el modelo Libre VNA, que cuenta con una capacidad de medición de hasta 6 GHz. Para ello, se realizó la medición del campo lejano utilizando el VNA en modo de medición de dos puertos midiendo el coeficiente de transmisión S_{11} .

Las Figuras 39 y 40, muestran el prototipo del sistema de antena fabricado y la configuración de medición utilizada para el sistema de antena propuesto, respectivamente. En las secciones siguientes, se proporcionará una descripción detallada de los resultados medidos, así como un análisis comparativo con los resultados de la simulación.

En cuanto a la fabricación del prototipo, se utilizó una maquina CNC, que es una técnica muy precisa y que permite obtener diseños con una alta precisión, además se usó una capa de estaño sobre el cobre para la protección ante la oxidación. De esta forma, se pudo asegurar que las dimensiones de la antena fueran las mismas que las especificadas en la simulación, lo que garantizó la comparabilidad de los resultados obtenidos.



(a)

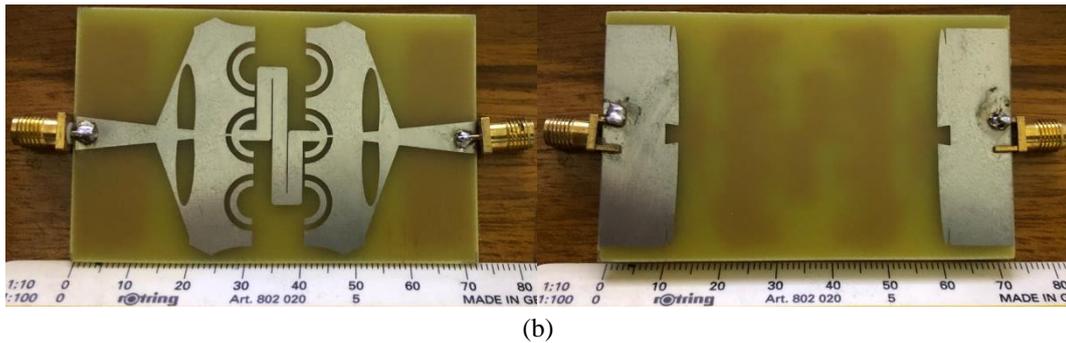


Figura 39. Prototipo fabricado de la antena propuesta (a) antena 1 con línea en cortocircuito y (b) antena 2 compacta

La Figura 40, detalla la disposición de medición empleada para examinar la antena propuesta a través de la utilización de un instrumento de alta precisión como es el analizador de red vectorial (VNA), junto a divisores de potencia específicamente diseñados y simulados para las dos bandas de frecuencia de interés. Estos divisores de potencia se construyeron utilizando un transformador $\frac{\lambda}{4}$, ya que se consideró la mejor opción para garantizar mediciones exactas de la antena.

En particular, la elección del transformador $\frac{\lambda}{4}$ se justifica por su capacidad para proporcionar una coincidencia óptima de impedancia entre la antena y el analizador de red, permitiendo así minimizar la reflexión de señal y maximizar la eficacia de la medición. En este sentido, el diseño y simulación previos de los divisores de potencia permitieron ajustar su comportamiento eléctrico a las características de la antena y de la banda de frecuencia correspondiente, asegurando una óptima transmisión y recepción de la señal.

De este modo, la utilización de un sistema de medición tan avanzado, junto a componentes especialmente diseñados para las características particulares de la antena y la frecuencia de operación, permitió obtener mediciones precisas y confiables de la antena propuesta, lo que a su vez contribuye a validar los resultados obtenidos mediante simulación y confirmar el desempeño y la calidad del sistema de antena desarrollado.

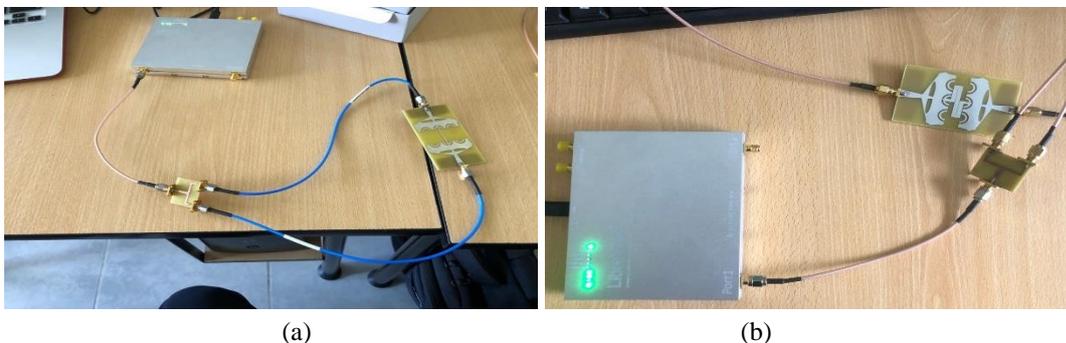


Figura 40. Medición de la antena con VNA (a) antena 1 y (b) antena 2

La curva de parámetros S_{11} es una representación gráfica que muestra la reflexión de la señal incidente en la antena. En la Figura 41 se presentan los resultados tanto de la

simulación como de la medición de la antena de parche de 2 puertos propuesta con línea en cortocircuito. Los valores medidos para la banda de 2.4 GHz son de -14 dB, lo cual es una mejora respecto a los valores simulados. Para la banda de 5.8 GHz se obtuvo mejores valores de -15.5 dB en comparación con los valores simulados.

El ancho de banda medido para la banda de 2.4 GHz es de 200 MHz, lo que representa un incremento del 40% en comparación con los valores simulados. En cambio, para la banda de 5.8 GHz, el ancho de banda se mantuvo estable y se logró obtener una banda ancha de más de 850 MHz.

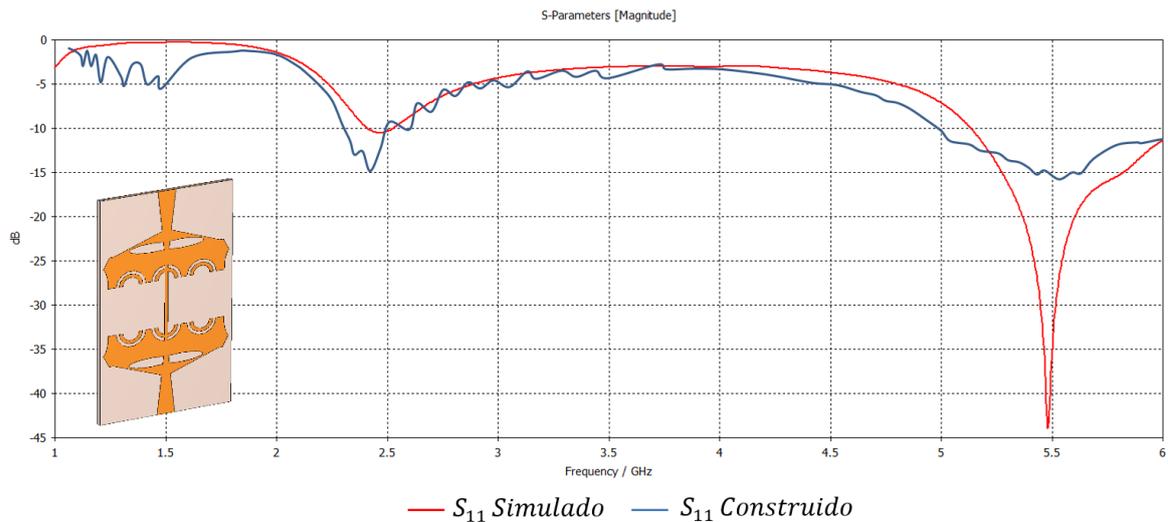


Figura 41. Medición de la antena 1 sin divisor de potencia.

A continuación, se describe los resultados medidos con divisores de potencia para las dos bandas, este análisis se lo realiza banda por banda para mejorar la visualización de los resultados y se realiza una optimización de las imágenes para la presentación. En la Figura 42 se muestra los valores medidos de la antena 1 en la banda de 2.4 GHz y 5.8 GHz. Como se puede observar en la primera banda se consigue un BW de 540 MHz (2.31 GHz- 2.74 GHz), se observa parámetros S_{11} y S_{22} de hasta -16 dB. En la segunda banda de 5.8 GHz se obtuvieron los siguientes parámetros BW de 890 MHz (5.21 GHz – 6.1 GHz) el coeficiente de reflexión de esta banda es de -23 dB.

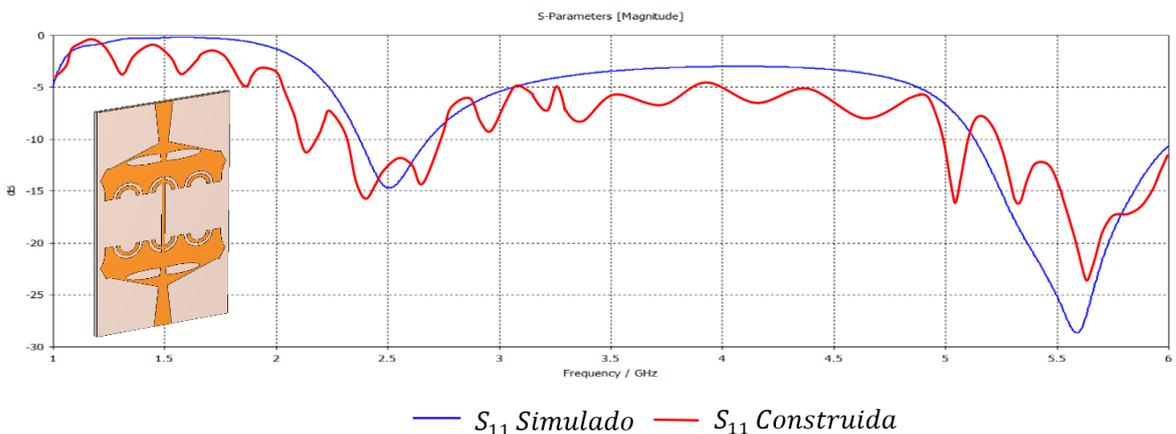


Figura 42. Medición de la antena 1 con divisor de potencia.

En la Figura 43 se presentan los valores simulados y medidos de la antena 2, con la optimización de la antena mediante la línea de meandro se obtuvieron los siguientes resultados; valores de hasta -12 dB para la banda de 2.4 GHz, se observa a demás una tercera banda de resonancia a 3.1 GHz, el ancho de banda es de 200 MHz (2.36-2.56 GHz), en el caso de la banda de 5.8 GHz, se obtienen valores superiores a los simulados, se observa valores de hasta -34 dB y el ancho de banda es superior a 1 GHz.

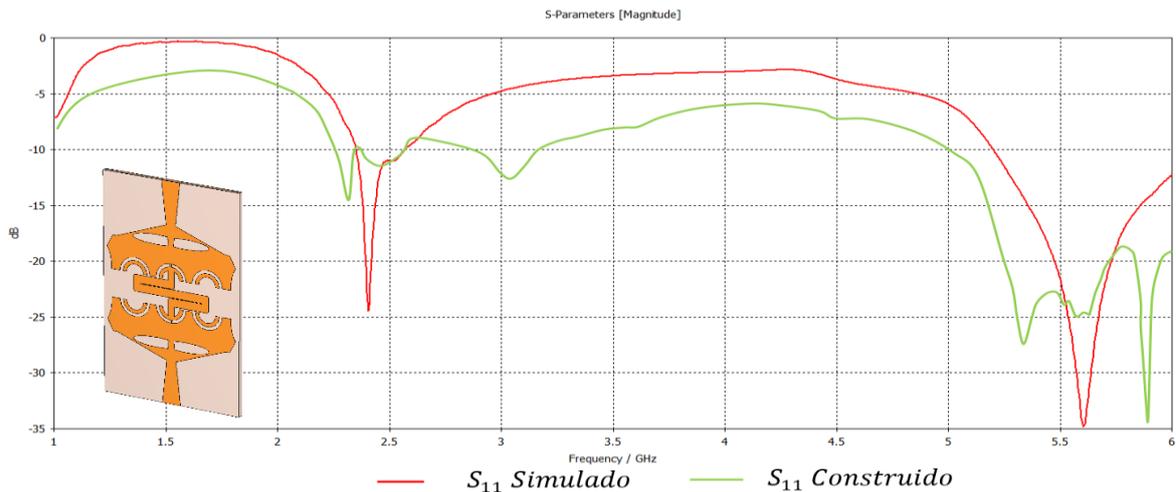


Figura 43. Medición de la antena 2 sin divisor de potencia.

En la Figura 44, se muestra los valores medidos de la antena 2. Como se puede observar en la primera banda se consigue un BW de 390 MHz (2.29 GHz- 2.68 GHz), se observa parámetros S_{11} y S_{22} de hasta -21 dB. En la segunda banda de 5.8 GHz se obtuvo un ancho de banda mayor a 1 GHz, con el coeficiente de reflexión de esta banda hasta -34 dB. Estos resultados indican que la antena propuesta tiene un buen rendimiento y es capaz de operar en una amplia gama de frecuencias, lo que la convierte en una opción viable para su implementación en sistemas de comunicaciones inalámbricas de alta velocidad y ancho de banda.

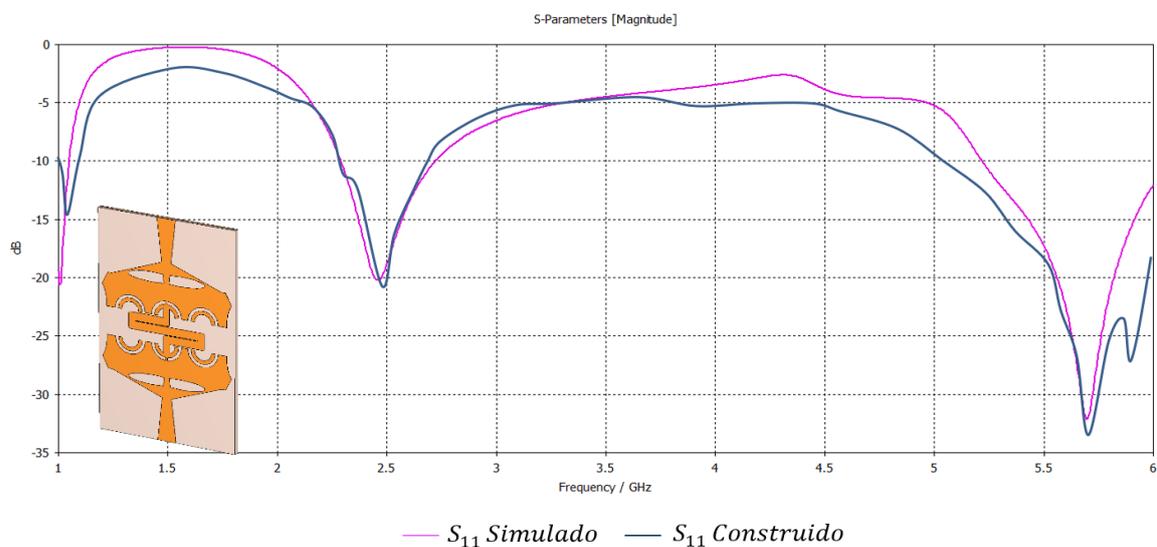


Figura 44. Medición de la antena 2 con divisor de potencia.

4.12 INTEGRACIÓN DE LA ANTENA EN UN RELOJ DE DESARROLLO

Para la implementación de la antena propuesta, se utilizó un reloj de prueba AURISIC DSTIKER&SPACE V2, que tiene la capacidad de escanear redes WiFi Access Points (APs) y Stations (STs). La antena se conectó al reloj mediante un cable coaxial SMA macho a UFL IPX IPEX, que es el puerto de salida del reloj para la antena.

Es importante mencionar que el reloj solo opera en la frecuencia de 2.4 GHz, por lo que las pruebas se realizaron bajo ese estándar. La detección del Access Point creado para las pruebas de la antena se realizó midiendo el Receiver Signal Strength Indicator (RSSI), que es una medida de la potencia de la señal de radio que se recibe en un dispositivo inalámbrico, como un punto de acceso de Internet.

El RSSI se utiliza para indicar la calidad de la conexión inalámbrica entre un dispositivo cliente y el punto de acceso. Cuanto mayor sea el valor del RSSI, mejor será la calidad de la señal. Un valor bajo del RSSI puede indicar una señal débil, lo que puede provocar una conexión intermitente o lenta.

En este contexto, se midió el RSSI de la señal transmitida por la antena propuesta en diferentes distancias desde el punto de acceso hasta el reloj de prueba. Se realizaron varias mediciones y se obtuvieron los valores medios de RSSI para cada distancia.

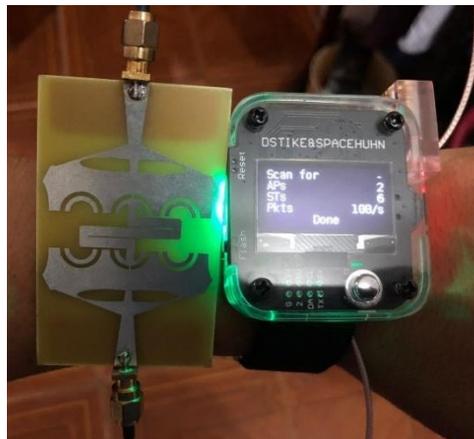


Figura 45. Medición de la antena compacta con el reloj de desarrollo

Se tomo mediciones de RSSI cada 2.5 metros en un espacio de 40 metros dentro de un pasillo, las señales receptadas por la antena mediante un Access Point creado desde el computador llamada “PRUEBA_ANTENA” como se mostrará en las siguientes mediciones.

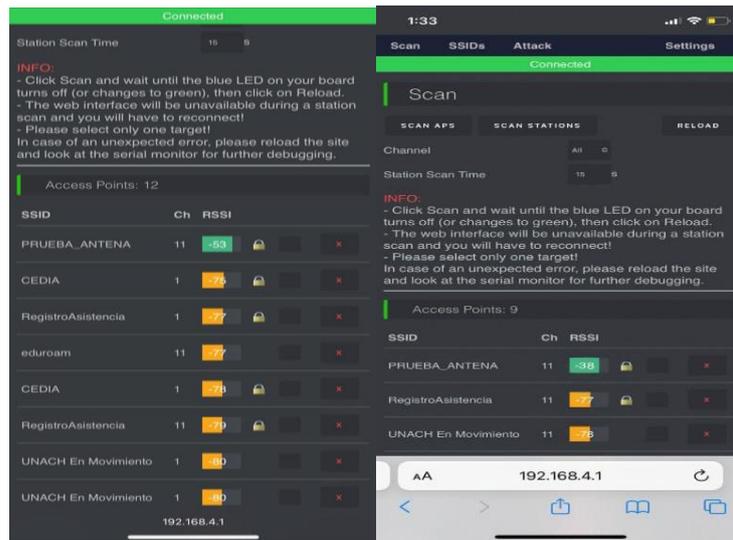


Figura 46. Medición inicial y final del parámetro RSSI.

Se realizó la recolección de información a través de un total de 16 pruebas, cuyos resultados se encuentran representados en la Tabla 5. El análisis de los datos obtenidos indica que la antena funcionó correctamente durante las pruebas, ya que a medida que nos alejamos del punto de acceso, se registró una disminución en la recepción de señal. Este comportamiento es consistente con la teoría de la propagación de ondas de radio, la cual establece que la intensidad de la señal disminuye a medida que aumenta la distancia de la fuente emisora. Cabe destacar que el rendimiento de la antena puede verse afectado por diversos factores, tales como la calidad de la señal emitida por el punto de acceso, la presencia de obstáculos y las características del entorno en el que se realiza la prueba.



Figura 47. Medición de parámetros RSSI del reloj de desarrollo.

Además, se realizó la medición con la antena del dispositivo como se muestra en la Figura 47, para comparar los resultados medidos, se puede observar en la Tabla 5, que los valores RSSI medidos por la antena del reloj son más bajos, y tienen el mismo comportamiento con la antena compacta al cambiar a una distancia más lejana.

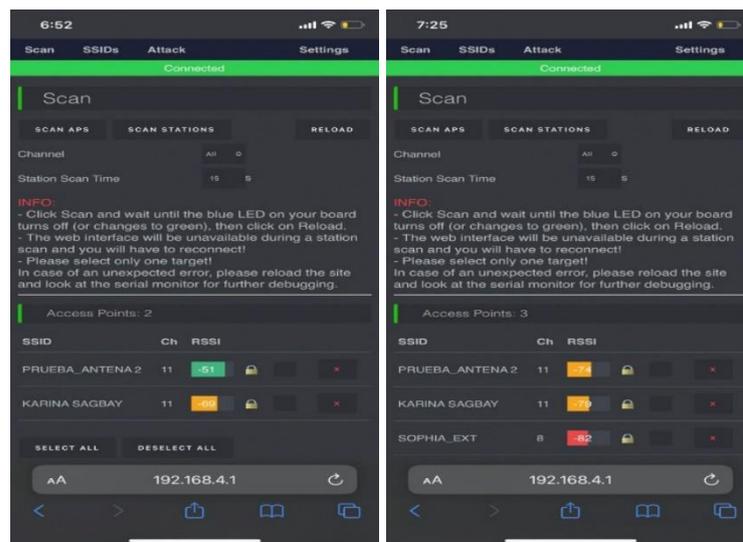


Figura 48. Medición inicial y final de la antena del reloj del parámetro RSSI.

Tabla 5. Valores medidos de RSSI

N	Distancia (m)	RSSI (dBm) Antena compacta	RSSI (dBm) Antena reloj
1	2.5	-38	-51
2	5	-39	-52
3	7.5	-39	-56
4	10	-47	-60
5	12.5	-48	-61
6	15	-49	-62
7	17.5	-50	-63
8	20	-52	-64
9	22.5	-53	-65
10	25	-55	-65
11	27.5	-57	-67
12	30	-57	-69
13	32.5	-58	-70
14	35	-60	-72
15	37.5	-62	-73
16	40	-63	-74

Se agregó un punto adicional para evaluar el alcance de la antena cuando los parámetros muestran resultados bajos. En este caso, los resultados medidos por la antena fueron muy bajos a partir de los 61 metros, con un valor de -87 dBm. La Figura 49 representa el valor final medido en la evaluación de la antena. Es importante destacar que los valores de RSSI pueden variar dependiendo de múltiples factores, como la presencia de obstáculos, interferencias electromagnéticas, la topografía del terreno y la calidad de la antena utilizada. Por lo tanto, es esencial realizar mediciones en diferentes condiciones para obtener una evaluación precisa del alcance y la eficacia de una antena.

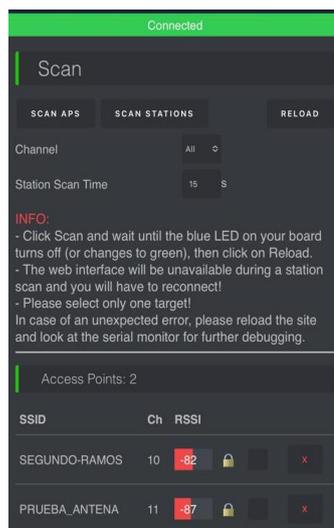


Figura 49. Medición final de la antena.

4.13 ANALISIS DE RELACION ENTRE LAS VARIABLES MEDIDAS.

A continuación, se muestra una gráfica de los valores obtenidos con la medición de la antena a través de un diagrama de dispersión, que nos mostrara la relación que existe entre estas variables.

Los parámetros de relación analizados de acuerdo a las mediciones mostraras por el reloj de desarrollo en este estudio son los siguientes:

- Distancia (m)
- RSSI (dBm)

En la Figura 50, se observa una relación lineal decreciente entre las dos variables, con un porcentaje de explicación del modelo lineal del 95.85 entre la distancia y el valor medido de RSSI. Es decir, si hay una variación en la distancia o en el valor de RSSI, habrá un cambio proporcional en cualquiera de las dos variables. Este fenómeno se describe mediante la ley de inversa del cuadrado, que establece que la señal de radio disminuye de manera proporcional al cuadrado de la distancia. Por lo tanto, si nos alejamos del punto inicial, los valores medidos de RSSI serán más bajos, mientras que, si nos acercamos, los valores serán más altos. Esta relación lineal positiva es de gran importancia en la teoría de la comunicación inalámbrica, ya que permite predecir con cierta exactitud cómo se va a comportar una señal de radio en función de la distancia y el valor de RSSI.

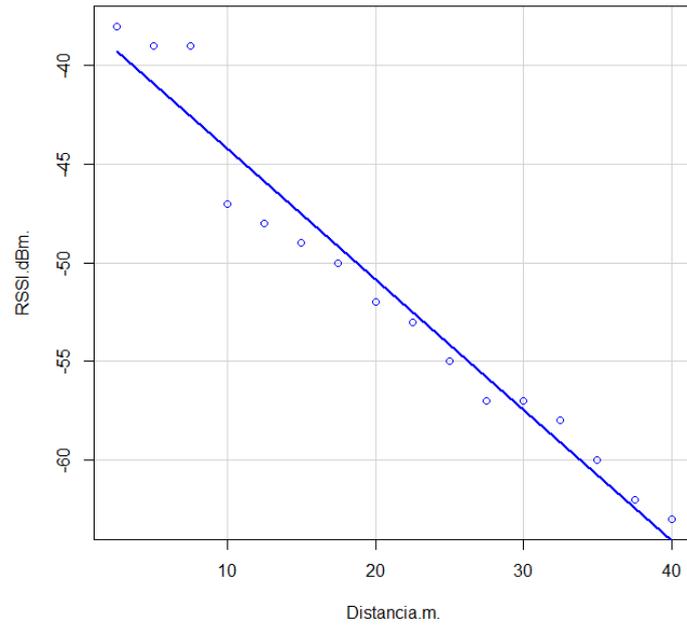


Figura 50. Diagrama de dispersión de las variables.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.7 CONCLUSIONES

- En la presente investigación se ha diseñado una antena multi alimentada de dos elementos mediante el uso del software CST Studio y Altair Feko, que trabaje en dos frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz, para la conectividad de dispositivos IoT en 5G.
- Se realizó en análisis del estudio del arte de varios trabajos de diseño de antenas para IoT en 5G, en varios ámbitos como es: estructural, por diferentes bandas de frecuencias y antenas multi alimentación, de este estudio se concluye que, las antenas multi alimentación son de vital importancia para el desarrollo de 5G en las telecomunicaciones, también se puede verificar que a frecuencias más bajas la estructura de la antena es mucho mayor y la compactación son más complejas, además diseños con planos de tierra defectuoso e integración de stubs y ranuras ayudan a la compactación de la antena, todos estos estudios ayudaron a la elaboración del diseño, el análisis de los parámetros de rendimiento y el estudio de los modos característicos de la antena.
- Se realizó el diseño y construcción de una antena multi alimentación sobre un sustrato FR-4 de bajo costo a doble cara, con un tamaño total de la antena de 72x45x1.5 mm, con planos de tierra defectuoso, stubs, ranuras en ambas caras y una línea de meandro, elementos radiantes en forma de octágono atachado a los extremos que ayudaron a la selección de bandas de frecuencias deseadas, y una línea de alimentación en forma triangular.
- Después de experimentar una respuesta inesperada en el acoplamiento mutuo en la banda de 2.4 GHz, se llevó a cabo la implementación de una técnica utilizando una línea en cortocircuito. Los resultados obtenidos a través de esta técnica mostraron valores por debajo de -15 dB en el acoplamiento mutuo, lo que indica una mejora significativa en la eficiencia de la antena. La técnica de línea en cortocircuito fue elegida debido a que no requiere cambios estructurales en la antena. Al conectar los elementos de la antena con una tira o línea, se logra la cancelación de la corriente de acoplamiento original mediante la introducción de una nueva corriente.
- Tras realizar la optimización de la antena mediante una línea de meandro, se logró una reducción significativa en su altura de 80 mm a 72 mm en comparación con la antena original que utilizaba una línea en cortocircuito para unir ambos elementos. Esta compactación de la antena representa un avance importante en términos de eficiencia y rendimiento, y destaca la importancia de la optimización en el diseño de antenas para mejorar los sistemas de comunicación inalámbrica.

- La antena simulada tiene un ancho de banda para 2.4 GHz de 17.91% y para 5.8 GHz de 16.72%, los parámetros S simulados están por debajo de los -10 dB para el S11 y S22; y por debajo de los -15 dB para el S21 y S12. Además, mediante los parámetros de radiación 3D se observó que la antena es omnidireccional para 2.4 GHz y en el caso de 5.8 GHz pierde direccionalidad y una pequeña parte irradia en el plano Y, También la antena tiene una eficiencia de 89% para la banda de 2.4 GHz y 79% para la banda de 5.8 GHz.
- Se observó que el análisis de los modos característicos es muy importante para conocer el comportamiento de la antena, en conjunto con el software de simulación FEKO permite la descripción del comportamiento de la antena dentro de un rango de frecuencias definido, demostrando así, la capacidad de la estructura para irradiar.
- Se realizó la implementación de la antena sobre un reloj de desarrollo que nos ayudó a la medición de recepción de señal de la antena en un entorno cerrado de 40 metros, obteniendo resultados satisfactorios que nos muestra el funcionamiento correcto de la antena y mediciones que nos indican una pérdida de recepción de señal a medida que se aleja del Access Point creado, llegando hasta un punto de 61 metros donde los parámetros RSSI son bajos.

5.8 RECOMENDACIONES

- Para la antena multi puerto es necesaria la combinación de los puertos mediante divisores de potencia para obtener los valores reales de los parámetros S de la antena.
- Se recomienda para el diseño de la estructura de la antena usar otros métodos de compactación o figuras geométricas que pueden llevar a un mejor resultado y antenas más compactas.
- Se debe establecer el correcto número de modos, saltos de frecuencias y mallado a evaluar en FEKO, pues esto es determinante para encontrar los modos fundamentales y determinar que la gráfica no resulte con varios errores debido al software.
- En la implementación de la antena se puede hacer la medición de resultados en varios entornos, con la finalidad de ver cuál es la fiabilidad de la antena y hasta qué punto puede funcionar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. I. Oh, H. W. Jo, K. S. Kim, H. Cho, and J. W. Yu, “A Compact Cavity-Backed Slot Antenna Using Dual Mode for IoT Applications,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 20, no. 3, pp. 317–321, Mar. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.3049219.
- [2] J. Francisco, E. Bravo, M. David, and B. Casanova, “Universidad Central ‘Marta Abreu’ de Las Villas TRABAJO DE DIPLOMA Técnicas de miniaturización en antenas de microcintas.”
- [3] S. Dey, M. S. Arefin, and N. C. Karmakar, “Design and Experimental Analysis of a Novel Compact and Flexible Super Wide Band Antenna for 5G,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 46698–46708, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3068082.
- [4] S. Koziel, “Objective Relaxation Algorithm for Reliable Simulation-Driven Size Reduction of Antenna Structures,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 16, pp. 1949–1952, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2689803.
- [5] L. Chettri and R. Bera, “A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 16–32, Jan. 01, 2020. doi: 10.1109/JIOT.2019.2948888.
- [6] “Internet of Things and data placement | Edge to Core and the Internet of Things | Dell Technologies Info Hub.” <https://infohub.delltechnologies.com/l/edge-to-core-and-the-internet-of-things-2/internet-of-things-and-data-placement> (accessed Dec. 29, 2022).
- [7] A. Motevasselian and W. G. Whittow, “Miniaturization of a Circular Patch Microstrip Antenna Using an Arc Projection,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 16, pp. 517–520, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2586749.
- [8] T. T. Le and T. Y. Yun, “Miniaturization of a Dual-Band Wearable Antenna for WBAN Applications,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 19, no. 8, pp. 1452–1456, Aug. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3005658.
- [9] “LaSalleOnLine INGENIERÍAS TEORÍA DE ANTENAS Guía de estudio Jaime Anguera y Antonio Pérez 2008 Creative Commons Deed.”

- [10] M. Fallahpour and R. Zoughi, "Antenna Miniaturization Techniques: A Review of Topology- and Material-Based Methods," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 60, no. 1, pp. 38–50, Feb. 2018, doi: 10.1109/MAP.2017.2774138.
- [11] A. Bhattacharyya, J. Pal, K. Patra, and B. Gupta, "Bandwidth-Enhanced Miniaturized Patch Antenna Operating at Higher Order Dual-Mode Resonance Using Modal Analysis," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 20, no. 2, pp. 274–278, Feb. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2020.3048444.
- [12] M. S. Islam, M. T. Islam, M. A. Ullah, G. K. Beng, N. Amin, and N. Misran, "A Modified Meander Line Microstrip Patch Antenna with Enhanced Bandwidth for 2.4 GHz ISM-Band Internet of Things (IoT) Applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127850–127861, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940049.
- [13] A. Bhattacharyya, J. Pal, K. Patra, and B. Gupta, "Bandwidth-Enhanced Miniaturized Patch Antenna Operating at Higher Order Dual-Mode Resonance Using Modal Analysis," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 20, no. 2, pp. 274–278, Feb. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2020.3048444.
- [14] S. Dey, M. S. Arefin, and N. C. Karmakar, "Design and Experimental Analysis of a Novel Compact and Flexible Super Wide Band Antenna for 5G," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 46698–46708, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3068082.
- [15] R. J. Cascant, M. Cabedo, F. Cotutor, and M. Ferrando Rocher, "DISEÑO ANTENAS RANURADAS DE BAJO PERFIL PARA APLICACIONES 5G/IOT." [Online]. Available: www.etsit.upv.es
- [16] M. Ayyappan and P. Patel, "On Design of a Triple Elliptical Super Wideband Antenna for 5G Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 76031–76043, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3185241.
- [17] S. Park and K. Y. Jung, "Novel Compact UWB Planar Monopole Antenna Using a Ribbon-Shaped Slot," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 61951–61959, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182443.
- [18] L. I. Balderas, A. Reyna, M. A. Panduro, C. del Rio, and A. R. Gutierrez, "Low-Profile Conformal UWB Antenna for UAV Applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127486–127494, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939511.
- [19] K. N. Olan-Nunez, R. S. Murphy-Arteaga, and E. Colin-Beltran, "Miniature Patch and Slot Microstrip Arrays for IoT and ISM Band Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 102846–102854, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998739.

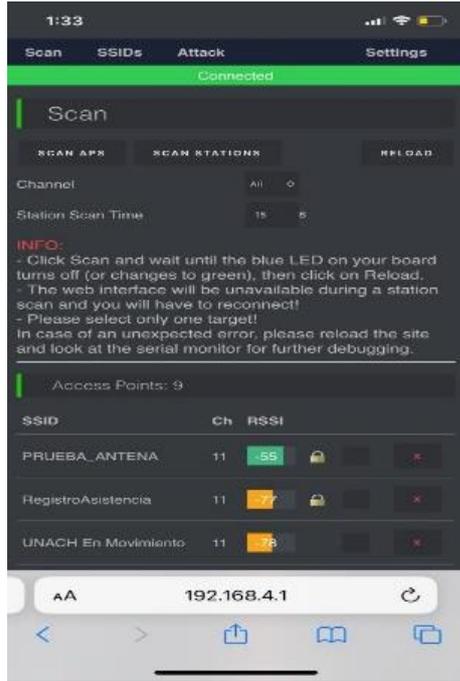
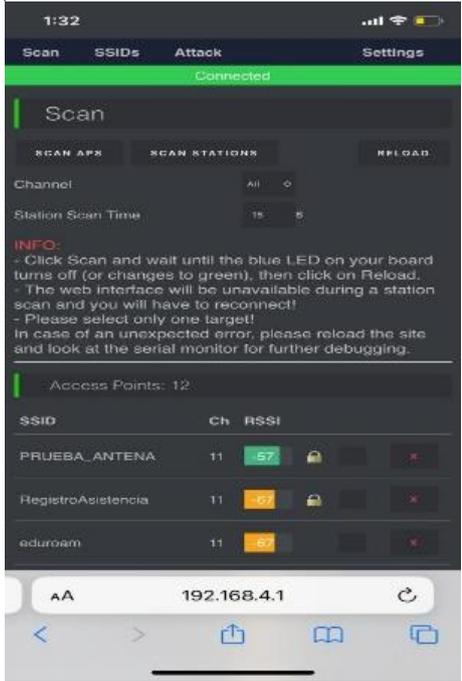
- [20] P. Kumar, S. Urooj, and A. Malibari, "Design and Implementation of Quad-Element Super-Wideband MULTI ALIMENTACIÓN Antenna for IoT Applications," *IEEE Access*, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045534.
- [21] H. T. Chattha, M. K. Ishfaq, B. A. Khawaja, A. Sharif, and N. Sherif, "Compact Multiport MIMO Antenna System for 5G IoT and Cellular Handheld Applications," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 20, no. 11, pp. 2136–2140, Nov. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.3059419.
- [22] A. Abdelaziz, H. A. Mohamed, and E. K. I. Hamad, "Applying Characteristic Mode Analysis to Systematically Design of 5G Logarithmic Spiral MIMO Patch Antenna," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 156566–156580, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3130205.
- [23] S. Nej, A. Ghosh, S. Ahmad, J. Kumar, A. Ghaffar, and M. Hussein, "Design and Characterization of 10-Elements MIMO Antenna with Improved Isolation and Radiation Characteristics for mm-Wave 5G Applications", doi: 10.1109/ACCESS.
- [24] A. Desai, C. D. Bui, J. Patel, T. Upadhyaya, G. Byun, and T. K. Nguyen, "Compact wideband four element optically transparent MIMO antenna for mm-wave 5G applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 194206–194217, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033314.
- [25] M. Bilal, S. I. Naqvi, N. Hussain, Y. Amin, and N. Kim, "High-Isolation MIMO Antenna for 5G Millimeter-Wave Communication Systems," *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/electronics11060962.
- [26] A. Patel et al., "UWB CPW fed 4-port connected ground MIMO antenna for sub-millimeter-wave 5G applications," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 9, pp. 6645–6658, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.12.015.
- [27] K. R. Jha, Z. A. P. Jibrán, C. Singh, and S. K. Sharma, "4-Port MIMO Antenna Using Common Radiator on a Flexible Substrate for Sub-1GHz, Sub-6GHz 5G NR, and Wi-Fi 6 Applications," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 689–701, May 2021, doi: 10.1109/ojap.2021.3083932.
- [28] M. Hussain et al., "Design and Characterization of Compact Broadband Antenna and Its MIMO Configuration for 28 GHz 5G Applications," *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 4, Feb. 2022, doi: 10.3390/electronics11040523.
- [29] S. Saxena, B. K. Kanaujia, S. Dwari, S. Kumar, H. C. Choi, and K. W. Kim, "Planar Four-Port Dual Circularly-Polarized MIMO Antenna for Sub-6 GHz Band," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 90779–90791, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993897.

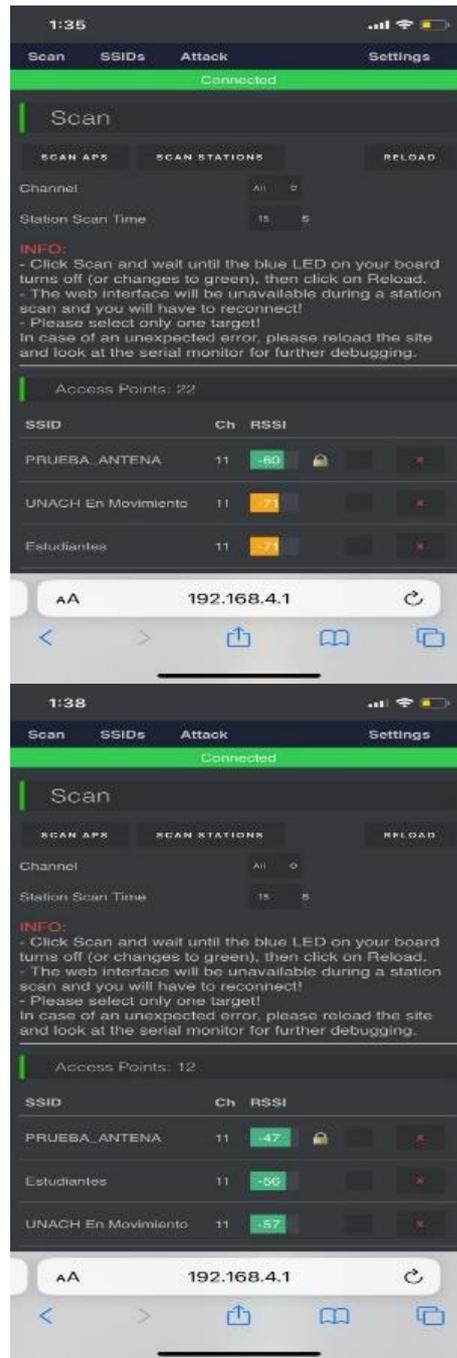
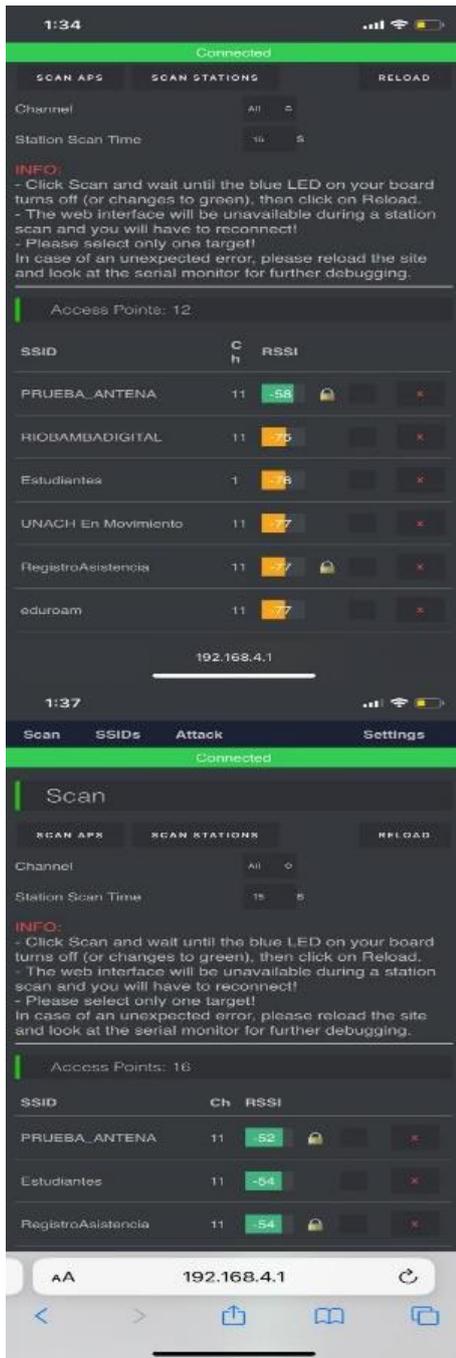
- [30] M. Mishra, S. Chaudhuri, R. S. Kshetrimayum, A. Alphones, and K. P. Esselle, "Space Efficient Meta-Grid Lines for Mutual Coupling Reduction in Two-Port Planar Monopole and DRA Array," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 49829–49838, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3146941.
- [31] T. Shabbir et al., "16-Port non-planar mimo antenna system with near-zero-index (nzi) metamaterial decoupling structure for 5g applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 157946–157958, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3020282.
- [32] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, "Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios," *IEEE Access*, vol. 8. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 23022–23040, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.
- [33] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, "Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios," *IEEE Access*, vol. 8. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 23022–23040, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.
- [34] K. N. Olan-Nunez, R. S. Murphy-Arteaga, and E. Colin-Beltran, "Miniature Patch and Slot Microstrip Arrays for IoT and ISM Band Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 102846–102854, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998739.
- [35] ORACLE, "¿Qué es el Internet de las Cosas (IoT)?" <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/> (accessed Feb. 07, 2023).
- [36] "Protocolos inalámbricos IoT (Internet de las cosas) y sus bandas de frecuencia - Data-alliance.net." <https://www.data-alliance.net/blog/iot-internet-of-things-wireless-protocols-and-their-frequency-bands/> (accessed Feb. 10, 2023).
- [37] J. Molins-Benlliure, M. Cabedo-Fabres, E. Antonino-Daviu, and M. Ferrando-Bataller, "Sector Unit-Cell Methodology for the Design of Sub-6 GHz 5G MIMO Antennas," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 100824–100836, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207163.
- [38] "Espectro y Estándares de Intel 5G." <https://www.intel.la/content/www/xl/es/wireless-network/5g-technology/standards-and-spectrum.html> (accessed Feb. 10, 2023).
- [39] H. Brayan Esteve and R. Barrera, "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP DE RANGO DE OPERACIÓN DE SUPER ALTAS FRECUENCIA

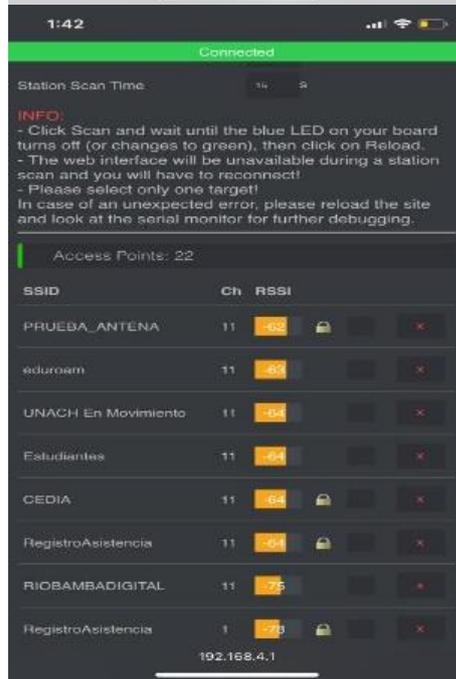
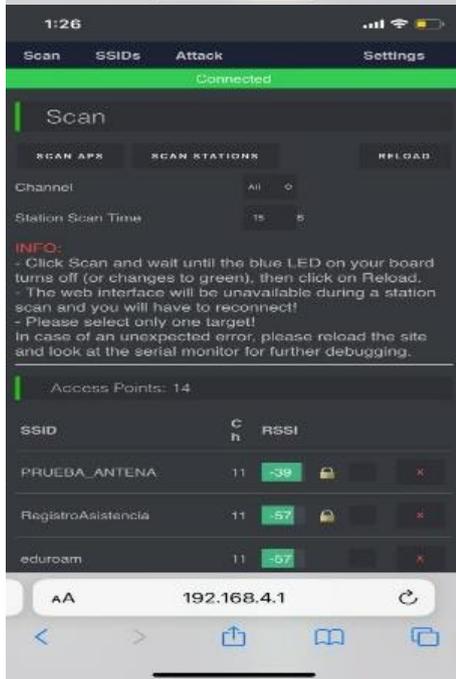
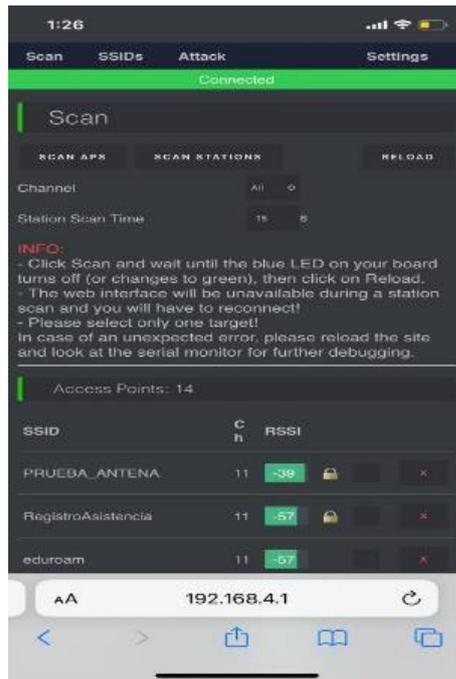
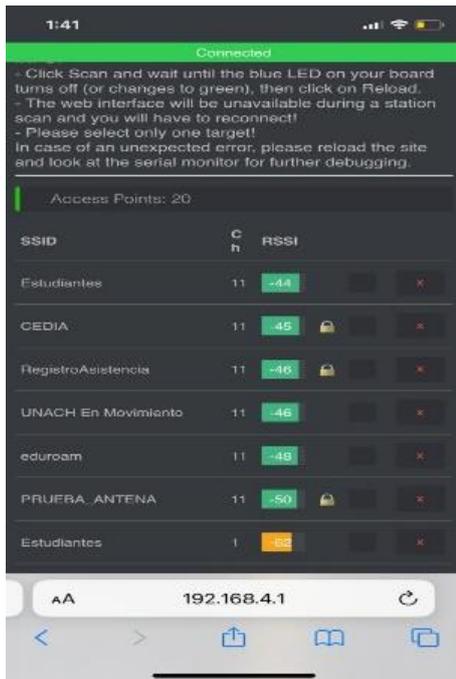
- (3.5 GHz a 6 GHz) PARA LA EVALUACION DE LA TASA DE ABSORCION ESPECIFICA EN TEJIDOS,” 2019.
- [40] Q. L. Li, S. W. Cheung, D. Wu, and T. I. Yuk, “Optically transparent dual-band mimo antenna using micro-metal mesh conductive film for WLAN system,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 16, pp. 920–923, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2614577.
- [41] M. A. Sufian, N. Hussain, A. Abbas, J. Lee, S. G. Park, and N. Kim, “Mutual Coupling Reduction of a Circularly Polarized MIMO Antenna Using Parasitic Elements and DGS for V2X Communications,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 56388–56400, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3177886.
- [42] K. S. Sultan, H. H. Abdullah, E. A. Abdallah, and H. S. El-Hennawy, “Metasurface-based dual polarized MIMO antenna for 5G smartphones using CMA,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 37250–37264, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975271.
- [43] “LaSalleOnLine INGENIERÍAS TEORÍA DE ANTENAS Guía de estudio Jaume Anguera y Antonio Pérez 2008 Creative Commons Deed.”
- [44] S. Kumar, A. S. Dixit, R. R. Malekar, H. D. Raut, and L. K. Shevada, “Fifth generation antennas: A comprehensive review of design and performance enhancement techniques,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163568–163593, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3020952.
- [45] I. Nadeem and D. Y. Choi, “Study on Mutual Coupling Reduction Technique for MIMO Antennas,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 563–586, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885558.
- [46] M. El Ouahabi, A. Zakriti, M. Essaaidi, A. Dkiouak, and H. Elftouh, “A Miniaturized Dual-Band MIMO Antenna with Low Mutual Coupling for Wireless Applications,” 2019.
- [47] Y. Sun, M. Tian, and G. S. Cheng, “Characteristic Mode-Based Neutralization Line Design for MIMO Antenna,” *Int J Antennas Propag*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/9669114.
- [48] A. Mohanty and B. R. Behera, “Characteristics Mode Analysis: A review of Its Concepts, Recent Trends, State-of-the-Art Developments and Its Interpretation with a Fractal UWB MIMO Antenna,” 2021.
- [49] A. H. Jabire, H. X. Zheng, A. Abdu, and Z. Song, “Characteristic mode analysis and design of wide band MIMO antenna consisting of metamaterial unit cell,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.3390/electronics8010068.

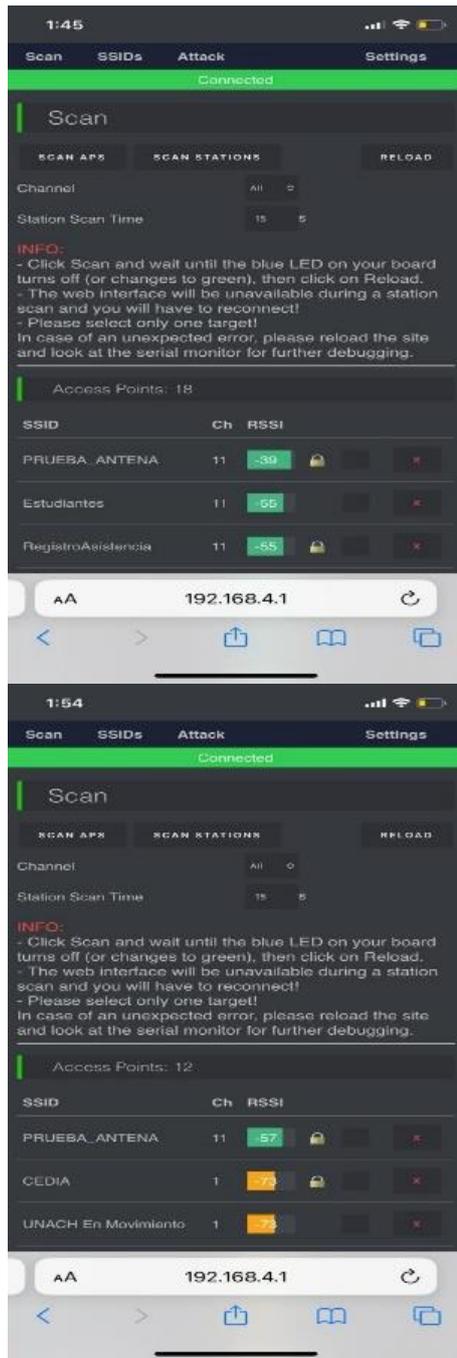
- [50] C. Ramiro Peñafiel-Ojeda, C. Efrain Andrade, R. Baez-Egas, and V. García-Santos, “An Ultrawideband Printed Monopole Antenna Analyzed with the Theory of Characteristic Modes.”
- [51] J. F. Lin and L. Zhu, “Low-Profile High-Directivity Circularly-Polarized Differential-Fed Patch Antenna with Characteristic Modes Analysis,” *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 69, no. 2, pp. 723–733, Feb. 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3016465.
- [52] C. Ramiro Peñafiel Ojeda Advisors Miguel Ferrando Bataller Dra Marta Cabedo Fabrès Valencia, “Design of Multi-feed UWB Antennas using the Theory of Characteristic Modes,” 2021.
- [53] M. Fallahpour and R. Zoughi, “Antenna Miniaturization Techniques: A Review of Topology- and Material-Based Methods,” *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 60, no. 1, pp. 38–50, Feb. 2018, doi: 10.1109/MAP.2017.2774138.
- [54] P. Kumar, T. Ali, and M. P. MM, “Characteristic Mode Analysis-Based Compact Dual Band-Notched UWB MIMO Antenna Loaded with Neutralization Line,” *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/mi13101599.
- [55] Y. Sun, M. Tian, and G. S. Cheng, “Characteristic Mode-Based Neutralization Line Design for MIMO Antenna,” *Int J Antennas Propag*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/9669114.

ANEXOS









Anexos1. Pruebas de medición de RSSI de la antena