



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MIMO PARA TELÉFONOS
INTELIGENTES A LAS FRECUENCIAS WIFI DE 2.4 GHZ Y 5 GHZ
PARA GENERACIÓN DE HACES CONFORMADOS**

**Proyecto de investigación previo a la obtención del título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

Autor:

Gómez Rojas, Klaivert Kenneth

Tutor:

Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda

Riobamba, Ecuador. 2023

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Klaivert Kenneth Gómez Rojas**, con cédula de ciudadanía **085017048-1**, autor del trabajo de investigación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MIMO PARA TELÉFONOS INTELIGENTES A LAS FRECUENCIAS WIFI DE 2.4 GHZ Y 5 GHZ PARA GENERACIÓN DE HACES CONFORMADOS**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones 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 a 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, 10 de noviembre de 2023



Klaivert Kenneth Gómez Rojas
C.I: 0850170481



ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los **31** días del mes de **OCTUBRE** del **2023**, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **KLAIVERT KENNETH GÓMEZ ROJAS** con CC: **0850170481**, de la carrera **INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado **"IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MIMO PARA TELÉFONOS INTELIGENTES A LAS FRECUENCIAS WIFI DE 2.4 GHZ Y 5 GHZ PARA GENERACIÓN DE HACES CONFORMADOS"**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Firmado electrónicamente por:
CARLOS RAMIRO
PEÑAFIEL OJEDA

Ing. Carlos Peñafiel Ojeda Ph.D.
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MIMO PARA TELÉFONOS INTELIGENTES A LAS FRECUENCIAS WIFI DE 2.4 GHZ Y 5 GHZ PARA GENERACIÓN DE HACES CONFORMADOS**, presentado por **Klaivert Kenneth Gómez Rojas** con cedula de identidad **0850170481**, 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 a los 18 días de diciembre de 2023

Presidente del Tribunal de Grado
Msc. Marco Antonio Nolivos Vimos

Firma

Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Daniel Antonio Santillán Haro

Firma

Miembro del Tribunal de Grado
Mgs. Klever Hernán Torres Rodríguez

Firma



CERTIFICACIÓN

Que, **Klaiverf Kenneth Gómez Rojas** con CC: **0850170481**, estudiante de la Carrera **Ingeniería en Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MIMO PARA TELÉFONOS INTELIGENTES A LAS FRECUENCIAS WIFI DE 2.4 GHZ Y 5 GHZ PARA GENERACIÓN DE HACES CONFORMADOS**", cumple con el **4%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 07 de noviembre de 2023



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

Ph.D Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda
TUTORA

DEDICATORIA

Queridos padres y hermanos, hoy con mucha gratitud y alegría, dedico estas palabras a ustedes, quienes durante mi viaje académico han sido mi mayor apoyo y fuente de amor y aliento. Sin su apoyo incondicional no habría podido culminar con mis estudios.

Principalmente, a mis padres, quienes siempre creyeron en mí y me brindaron un hogar lleno de amor y oportunidades, que con sus sacrificios, dedicación y constante aliento me han dirigido a poder superar los desafíos que se presentaron en mi camino.

AGRADECIMIENTO

Quiero aprovechar este espacio para agradecer a Dios por las oportunidades dadas y bendiciones que han estado presentes en este recorrido que con mucho esfuerzo y dedicación he logrado finalizar.

A mis padres que siempre estuvieron ahí constantemente animándome a seguir adelante y no dejarme vencer por los obstáculos y problemas que surgían durante mi vida académica en la universidad, les quiero agradecer desde el fondo de mi corazón y decirles que los amo con todo mi ser. A mis hermanos, sobrinas que siempre han estado presentes, quiero expresarles mi agradecimiento. Juntos hemos compartido muchas experiencias de alegría, tristeza, triunfos, y su apoyo ha sido fundamental para alcanzar este logro.

A mi tutor que, con su guía y experiencia, han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo le agradezco de todo corazón. Sus conocimientos, paciencia y dedicación me han impulsado a explorar nuevos horizontes y a expandir mis habilidades académicas.

A todos los profesores, amigos y compañeros que han dejado una huella imborrable en mi vida, quiero expresarles mi gratitud.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

ACTA FAVORABLE

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICACIÓN URKUND

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN **15**

CAPÍTULO I **17**

- 1.1. Planteamiento del Problema..... 17
- 1.2. Justificación..... 18
- 1.3. Objetivos 19
 - 1.3.1. General 19
 - 1.3.2. Específicos..... 19

CAPÍTULO II **20**

- 2.1. Estado del Arte 20
- 2.2. Fundamentación Teórica 22
 - 2.2.1. Definición de antenas 22
 - 2.2.2. Parámetros de una antena 22
 - 2.2.3. Antena de Microstrip 25
 - 2.2.4. Tecnología MIMO 26
 - 2.2.4.1. Clasificación..... 27
 - 2.2.5. Agrupación de antenas 28
 - 2.2.6. Haces conformados (Beamforming)..... 28
 - 2.2.7. Wifi..... 29
 - 2.2.7.1. Estándares 29

CAPÍTULO III	31
3.1. Metodología	31
3.1.1. Tipo de Investigación	31
3.1.2. Métodos de Investigación	31
3.1.3. Técnica de investigación	32
3.1.4. Procedimiento.....	33
3.1.5. Población y muestra	33
3.1.6. Operacionalización de las variables	34
3.1.7. Diseño de la antena propuesta	36
3.1.7.1. Diseño de la agrupación de antenas para Tecnología MIMO .	37
3.1.8. Estructuras de desacoplamiento	40
 CAPÍTULO IV	 45
4.1. Resultados y Discusiones	45
4.1.1. Análisis de la antena individual.....	45
4.1.2. Análisis de la agrupación de antenas para la tecnología MIMO	46
4.1.3. Análisis de la generación de Beamforming o haces conformados de la antena MIMO propuesta.....	48
4.1.3.1. Beamfomring con dos elementos radiantes.....	49
4.1.3.2. Beamfomring con cuatro elementos radiantes	50
4.1.3.3. Beamfomring con ocho elementos radiantes	50
4.1.4. Análisis del rendimiento de la agrupación de antenas para Tecnología MIMO simulada.	52
4.1.4.1. Prueba de hipótesis para la frecuencia de operación de 2.4 GHz	52
4.1.4.2. Prueba de hipótesis para la frecuencia de operación de 5 GHz.	54
4.1.4.3. Prueba de hipótesis de comparación de los promedios de las variables S_{11} a 2.4 GHz y a S_{11} 5 GHz.....	56
 CAPÍTULO V	 59
5.1. Conclusiones	59
5.2. Recomendaciones.....	60
 BIBLIOGRAFÍA	 65
 ANEXOS	 66

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Estándares 802.11 a través del tiempo.	30
3.2. Operacionalización de variables.....	35
3.3. Dimensión de la base, marco y elemento radiante de la antena MIMO propuesta.	39
4.4. Comparación de la antena propuesta con las publicaciones existentes	48
4.5. Diagramas de radiación obtenidos de la generación de beamforming con los elementos radiantes que conforman la Antena MIMO: a) Ant ₁ a 2.4 GHz, b) Ant ₂ a 2.4 GHz, c) Ant ₁ a 5 GHz, d) Ant ₂ a 5 GHz, e) Ant ₁ y Ant ₂ a 2.4 GHz, f) Ant ₁ y Ant ₃ a 2.4 GHz, g) Ant ₁ y Ant ₅ a 2.4 GHz, h) Ant ₁ y Ant ₅ a 5 GHz, i) Ant ₂ y Ant ₃ a 5 GHz, j) Ant ₁ y Ant ₅ a 5 GHz, k) Ant ₁ , Ant ₂ , Ant ₃ y Ant ₄ a 2.4 GHz, l) Ant ₁ , Ant ₂ , Ant ₃ , Ant ₄ a 5 GHz, m) Ant ₁ , Ant ₂ , Ant ₅ , Ant ₆ a 2.4 GHz, n) Ant ₁ , Ant ₂ , Ant ₅ , Ant ₆ a 5 GHz, o) 2.4 GHz y p) 5 GHz.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Antena transmisora [1]	22
2.2. Diagrama de radiación de una antena directiva [2].	23
2.3. Potencias enviada y reflejada debido a mal ajuste de impedancias [3]	24
2.4. a) Vista general 3D de una antena Microstrip rectangular alimentada por línea de microstrip. b) Alimentación por sonda coaxial [4].	26
2.5. Diagrama de Sistema de Comunicación MIMO [5].	26
2.6. Sistemas de comunicaciones SISO, MISO, SIMO y MIMO [6].	27
2.7. Formación de haces conformados con dos y cuatro antenas [7]	29
3.8. Diagrama de bloques donde se describe el desarrollo del presente trabajo de investigación.	34
3.9. Estructura general de la antena individual propuesta	36
3.10. Distribución de la corriente sobre la superficie de los elementos radiantes de la antena propuesta: 2.4 GHz (3.10(a)) ; 5 GHz (3.10(b))	36
3.11. Antena MIMO propuesta	38
3.12. Base y marco lateral de la antena MIMO propuesta	38
3.13. Elemento radiante de la antena MIMO propuesta	39
3.14. Agrupación de los elementos radiantes sin estructuras de desacoplamiento.	41
3.15. Distribución de corriente de la antena MIMO propuesta sin las estructuras de desacoplamiento. Fuente de alimentación: Ant ₁ a 2,4 GHz(a), Ant ₂ a 2,4 GHz(b); Ant ₁ a 5 GHz(c), Ant ₂ a 5 GHz(d).	41
3.16. Estructura de desacoplamiento en la parte lateral de la base de la carcasa.	42
3.17. Distribución de corriente con tiras en la parte lateral de la base de la carcasa del dispositivo. Fuente de alimentación: Ant ₁ a 2,4 GHz(a), Ant ₂ a 2,4 GHz(b); Ant ₁ a 5 GHz(c), Ant ₂ a 5 GHz(d).	42
3.18. Estructura de desacoplamiento entre los elementos radiantes del teléfono inteli- gente.	43
3.19. Distribución de corriente en la base y la parte lateral de la carcasa del disposi- tivo. Fuente de alimentación: Ant ₁ a 2,4 GHz(a), Ant ₂ a 2,4 GHz(b); Ant ₁ a 5 GHz(c), Ant ₂ a 5 GHz(d).	43
3.20. Coeficiente de transmisión o acoplamiento mutuo entre los elementos radiantes adyacentes con y sin las estructuras de desacoplamiento.	44
3.21. Fabricación de la agrupación de antenas para Tecnologías MIMO mediante el método de corrosión.	44
4.22. Parámetro S ₁₁ de la antena propuesta individual	45
4.23. Diagrama de radiación de la antena individual propuesta: 2.4 GHz (4.23(a)) y 5 GHz (4.23(b))	46

4.24. Coeficiente de reflexión de la antena MIMO propuesta.....	46
4.25. Coeficiente de Correlación Envolvente (ECC) para la frecuencia de 2.4 GHz	
4.25(a) y 5GHz 4.25(b)	47
4.26. Estadístico descriptivo para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz	52
4.27. Prueba para una muestra para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz	53
4.28. Histograma a la frecuencia de 2.4 GHz.....	53
4.29. Prueba para una muestra para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz.	54
4.30. Estadístico descriptivo para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 5 GHz.....	55
4.31. Prueba para una muestra para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 5 GHz...55	
4.32. Histograma a la frecuencia de 5 GHz.....	55
4.33. Diagrama de cajas a la frecuencia de 5 GHz.....	56
4.34. Estadístico descriptivo para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz y de 5 GHz.	57
4.35. Pruébale muestra para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz y de 5 GHz.	57
4.36. Diagrama de cajas a las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz.	58

RESUMEN

Este proyecto de investigación se centra en la implementación y el análisis de una antena empleando la tecnología MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) para teléfonos inteligentes que opere en las bandas Industriales, Científicas y Médicas conocidas como ISM de 2.4 GHz y 5 GHz utilizando el simulador electromagnético CST Studio Suite.

Para lograr el objetivo principal del presente proyecto de investigación se evaluó el rendimiento de las antenas MIMO en estas bandas de frecuencia especificadas mediante el uso del simulador. Con ayuda del simulador se logró modelar y simular la antena MIMO para los teléfonos inteligentes, donde se consideraron diferentes configuraciones y diseños de antenas, y se analizó su desempeño en términos de ganancia, directividad, eficiencia, parámetros de dispersión y patrón de radiación.

La antena propuesta se diseñó sobre un sustrato FR-4 de 1.5 mm de grosor, con una permitividad dieléctrica de $\epsilon_r = 4,3$ la cual consta con un recubrimiento de cobre en ambos lados de la lámina. La antena MIMO consta de una agrupación de antenas colocada de manera simétrica en ambos marcos que se moldean a la forma del teléfono inteligente tradicional, en cada marco se encuentra organizadas 4 antenas de pequeño tamaño coladas en forma de espejo si se toma como referencia las dos primeras antenas puestas sobre el marco. Teniendo la misma configuración para el otro marco que conforma la carcasa del móvil, por esta razón se menciona que el arreglo de antenas está colocado de forma simétrica.

Los resultados obtenidos del simulador electromagnético CST Studio Suite dan evidencia de que la antena propuesta cumple con los parámetros de funcionamiento previstos. Donde la adaptación para ambas frecuencias supera los -15 dB para el coeficiente de reflexión y de -20 dB para el acoplamiento mutuo generado por la proximidad en la que están colocadas las antenas. El bajo acoplamiento se logró, utilizando estructuras de desacoplamiento que permitieron que cada antena funcione de manera más aislada con relación de las demás.

Palabras clave: arreglo de antenas, antena MIMO, coeficiente de reflexión, acoplamiento mutuo, VNA.

ABSTRACT

This research project focuses on implementing and analyzing a Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) antenna for smartphones operating in the Industrial, Scientific, and Medical ISM bands known as 2.4 GHz and 5 GHz using the CST Studio Suite electromagnetic simulator.

To achieve the main objective of this research project, the performance of MIMO antennas in these specified frequency bands was evaluated using the simulator. The simulator was used to model and simulate the MIMO antenna for smartphones, where different antenna configurations and designs were considered in terms of gain, directivity, efficiency, scattering parameters, and radiation pattern.

The proposed antenna was designed on a 1.5 mm thick FR-4 substrate, with a dielectric permittivity of $\epsilon_r = 4,3$, which consists of a copper coating on both sides of the foil. The MIMO antenna consists of a grouping of antennas placed symmetrically on both frames molded to the shape of the traditional smartphone; each structure is organized into four antennas of small size cast in mirror form if we take the first two antennas placed on the shelf with reference. The antenna array is placed in the same configuration as the other frame that makes up the mobile housing.

The results of the electromagnetic simulator CST Studio Suite prove that the proposed antenna complies with the expected operating parameters. The adaptation for both frequencies exceed -15 dB for the reflection coefficient and -20 dB for the mutual coupling generated by the proximity in which the antenna is placed by using decoupling structures that allow each antenna to work more isolated about the others.

Keywords: Antenna array, MIMO antenna, Reflection coefficient, Mutual coupling.



Reviewed by:

Mgs. Sofía Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

INTRODUCCIÓN

La industria de las comunicaciones móviles está evolucionando a un ritmo extremadamente rápido. Con el establecimiento de normas y el desarrollo de las comunicaciones móviles, cada vez se investigan más tecnologías afines con la esperanza de lograr una mayor velocidad de transmisión, un menor coste y una mayor ganancia. Para proporcionar una alta velocidad de datos, uno de los requerimientos es la actualización del sistema de antena SISO (entrada única y salida única) al sistema de antena de MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas). La arquitectura de antena MIMO emplea múltiples antenas en el extremo del transmisor y del receptor [8].

La tecnología MIMO es clave para lograr una mayor velocidad de transmisión. Mediante el uso de la tecnología MIMO, se pueden conseguir múltiples canales independientes en el espectro por el método de diversidad, y se puede reducir el desvanecimiento multitrayectoria para mejorar la velocidad de transmisión de datos [9] [10].

Las futuras generaciones de teléfonos móviles deberán transferir datos a gran velocidad. Por ello, las antenas deben proporcionar un funcionamiento de banda eficiente, una alta velocidad en la transmisión de datos y un bajo consumo de energía [10]. Por otra parte, debido a las limitaciones en el tamaño, se espera que la antena del teléfono móvil sea capaz de operar eficientemente en múltiples bandas de frecuencia en el espectro [11]. En diversas situaciones, la estructura de la antena puede ser complicada, como las que tienen forma tridimensional para operar eficientemente en una sola banda de frecuencia y realizar alguna función en aplicaciones especiales. Sin embargo, para los teléfonos móviles, debido a las limitaciones de tamaño y peso, es preferible disponer de antenas planas de estructura simple, funcionamiento multibanda y patrones de radiación omnidireccionales [12].

El diseño de un sistema de antena MIMO para su uso en teléfonos móviles para las próximas generaciones de comunicaciones móviles se enfrenta a muchos retos. En primer lugar, la antena MIMO debe ser miniaturizada debido a la limitación de espacio. El segundo reto es conseguir un alto aislamiento entre los elementos de la antena a pesar de la pequeña superficie disponible para la antena en el teléfono móvil. El tercer reto es conseguir que la antena MIMO funcione en múltiples frecuencias con suficiente banda ancha en cada frecuencia (funcionamiento multibanda). El cuarto reto es producir la forma deseada de los diagramas de radiación en las bandas de frecuencia operativas. Además, puede ser necesario que una antena MIMO proporcione varios tipos de diversidad, como diversidad espacial, de polarización o de patrón [13] [11].

Para alcanzar mayores capacidades de procesamiento con características de multiplexación y diversidad espacial más elevadas, es necesario imprimir en el chasis un mayor número de elementos de antena (seis o más).

La tecnología MIMO se ha venido estudiando e implementando desde ya hace más de una década por los beneficios que estas pueden ofrecer en diversas tecnologías como son las tecnologías Long Term Evolution (LTE), Wireless Fidelity (Wi-Fi), Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) y más, por eso se evaluará el funcionamiento de la antena mediante la recolección de datos. Como los parámetros de dispersión S (Scattering), donde el coeficiente de reflexión S_{ii} mide, cuanta potencia reflejada existe en el puerto de entrada y, el coeficiente de acoplamiento S_{ij} , cuanta potencia se transfiere de un puerto a al otro, valores que serán evaluados según algunos criterios de diseño. Este proyecto se prevé que será de inspiración para futuras investigaciones del mismo ámbito, dentro del cual se proporcionarán los resultados numéricos para dar validez del rendimiento de la antena en aplicaciones inalámbricas comunes.

CAPÍTULO I

1.1 Planteamiento del Problema

Los dispositivos actuales necesitan antenas que le proporcionen capacidad de lograr alcanzar mayores velocidades de transmisión, un uso eficiente de la anchura espectral y que sea un elemento versátil. Surgiendo las antenas MIMO, que son una agrupación de antenas diseñadas con tecnología de microcinta con un tamaño relativamente pequeño.

Aun así, su incorporación en dispositivos donde las especificaciones técnicas de operación, tamaño y diseño son muy exigentes, como lo es en los teléfonos móviles. Nace la problemática de lograr diseñar antenas compactas dispuestas para tecnologías móviles como lo es la tecnología MIMO, esto se complica aún más si se deben colocar el mayor número de antenas posibles dentro del espacio disponible, generando interferencias entre sí por la proximidad en la que encuentran, dando como resultado patrones de radiación deficientes, generando pérdidas de datos o una mala transmisión y por ende una mala recepción en la señal [14] [15].

Donde los parámetros de interés y que serán estudiados para poder generar valores que cumplan con los requerimientos previstos son el ancho de banda, la directividad, principalmente los parámetros de dispersión y el coeficiente de correlación envolvente (ECC). Sin embargo, estos parámetros dentro del estudio de antenas MIMO (o en el estudio en general de antenas de igual modo) tienen la desventaja de ser valores que tienden a ser altos por el poco aislamiento que existe. Por ello, las deficiencias encontradas en el diseño de la antena serán superadas por medio de la variación u optimización de las dimensiones que se obtengan en su desarrollo, como se verá las dimensiones físicas de la antena están directamente relacionadas con los parámetros mencionados [16].

Por el futuro prometedor que tienen estas antenas dentro del campo de las comunicaciones, nació la motivación del presente trabajo de investigación, en donde se propone diseñar una antena compacta MIMO, utilizando tecnología de microcinta, para integrarla en los teléfonos inteligentes que funcionen en la frecuencia de operación Wi-Fi, que comprende las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz. La implementación de la antena propuesta se llevará a cabo en los próximos seis meses, dentro de este periodo se realizarán las pruebas de funcionamiento y rendimiento en los laboratorios de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo. Se buscará cumplir con parámetros comerciales como buena eficiencia, tamaño adecuado para dispositivos móviles (teléfonos inteligentes) y buena conectividad.

1.2 Justificación

Las antenas cubren un amplio espacio de aplicaciones que van desde su aplicación en dispositivos móviles como en las redes de internet modernas. Por ello, diseñar una antena que logre cumplir con los parámetros de funcionamiento como buena calidad de señal, un óptimo alcance y una cobertura que asegure un buen funcionamiento en distintos escenarios y entornos es muy importante.

Cada vez se vuelven más pequeñas y ligeras, precisas para ser incorporadas en dispositivos en donde el espacio es un recurso limitado, además de ser compactas, deben ofrecer buenas características de funcionamiento que permitan aprovechar el máximo rendimiento de las tecnologías emergentes.

Por ello, el uso de la tecnología MIMO es clave, ya que permite generar mejores características de operación, además haciendo uso de la tecnología microstrip se consigue diseñar antenas compactas, perfectas para dispositivos donde los requerimientos de espacio y funcionamiento son exigentes.

Aunque existe información acerca de este tipo de antenas, no se logra encontrar una fuente clara acerca del desarrollo de esta tecnología que está en constante evolución. Surgiendo así el propósito de este trabajo en donde se busca crear una antena empleando las características de la tecnología MIMO para poder obtener mejores prestaciones que las antenas comunes. Se espera que este proyecto sirva de fuente y motivación para futuras investigaciones dentro de la misma línea de investigación, con esto en mente se proporcionará los datos necesarios correspondientes al estudio de algunos parámetros fundamentales del funcionamiento de la antena.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Implementar una antena de MIMO multibanda compacta para dispositivos móviles inteligentes con aplicaciones Wi-Fi en las frecuencias de 2.4-5 GHz, para generación de haces conformados

1.3.2 Específicos

- Diseñar y simular una antena que opere en las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz.
- Integrar múltiples antenas para la generación de beamforming (haces conformados) en el chasis de un teléfono inteligente.
- Analizar el rendimiento de la antena conforme a los parámetros de rendimiento previstos.
- Implementación y caracterización de la agrupación de antenas usando un analizador de redes vectoriales (VNA).

CAPÍTULO II

2.1 Estado del Arte

En el diseño de antenas MIMO se propusieron varios modelos, en donde cada una de ellas ofrecen diversos beneficios dependiendo del diseño que se emplee y del tipo de técnica o métodos utilizado para minimizar parámetros que afecten el óptimo rendimiento de la antena. Las estructuras más comunes de antenas microstrip están dispuestas de diferentes formas, estas formas pueden ser cuadradas, circulares, rectangulares y triangulares. Otros factores que afectan el rendimiento de una antena pueden ser la técnica de alimentación y la propiedad del sustrato [17].

El acoplamiento mutuo (bajo aislamiento) es uno de los principales factores que afecta el rendimiento de una antena, donde los elementos radiantes están muy próximos unos de otros, razón por la cual se ve limitada la capacidad del canal y el rendimiento en diversidad. Por lo que se han desarrollado técnicas que ayudan en gran medida a minimizar estos problemas que surgen en el diseño [18].

Con el uso de una estructura de tierra defectuosa (DGS) como se presenta en [19], se diseñó una antena MIMO, mediante esta técnica se logró aumentar el ancho de banda en la frecuencia de resonancia con una estructura en forma de U. Los stubs de impedancia en forma de U mejoraron las características de resonancia de la antena produciendo valores altos de aislamiento entre elementos. En [20] se propone una antena dual de dos elementos radiantes idénticos alimentados por medio de una línea microstrip. En esta antena se utiliza un stub rectangular con plano de tierra defectuoso que le permitió generar un alto aislamiento.

Una antena MIMO formada por un disco semicircular unido a un parche rectangular se propone en [21]. Las dos antenas están conectas por una línea de neutralización que ayuda aumentar el aislamiento entre los elementos radiantes. La línea de alimentación se optimizó para lograr un buen acoplamiento con la estructura diseñada.

El diseño de una antena con estructura desacoplada para mejorar el aislamiento se realiza en [22], esto se logró colocando los elementos radiantes de la antena en distintas orientaciones, al observar el cambio hubo una notable mejoría en el aislamiento.

Una antena MIMO de doble banda con acoplamiento mutuo reducido. Se incorpora una fina ranura rectangular a una antena de parche rectangular (RPA) para excitar dos bandas de frecuencias, el acoplamiento mutuo entre los elementos de la antena se suprime mediante la

incorporación de una estructura de doble banda electrónica (EBG) se propone en [23].

Se diseñó una antena MIMO de dos puertos con polarización circular alimentada por una línea microstrip se propone en [24]. Esta antena utiliza una estructura que le permite conseguir un campo irradiado con polarización circular, y para mejorar el aislamiento se coloca una banda estrecha en forma de “Us” entre los elementos radiantes tomando la forma de una “Z”. En [25] se presenta una antena MIMO de polarización circular en la cual se utilizó elementos parásitos para mejorar significativamente las características de la antena. Además de proporcionar un mayor ancho de banda y mayor ganancia también ayudó a reducir el acoplamiento mutuo entre los elementos radiantes de la antena.

Una antena de ranura MIMO de doble banda con diversidad de polarización y ganancia mejorada se presenta en [26]. La antena se compone de dos resonadores de ranura de tipo C conectados espalda con espalda. Al introducir una ranura en forma de U entre dos elementos de antena, se mejora aún más el aislamiento entre los puertos de esta antena MIMO. Por último, se coloca un conductor magnético artificial (AMC) debajo de la antena MIMO para mejorar su ganancia.

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Definición de antenas

Las antenas son dispositivos resonantes que permiten transformar una señal de radio frecuencia (RF) que viaja por medio de un conductor al espacio libre como ondas electromagnéticas tal y como se observa en la figura 2.1. Una de las características más importantes que vale la pena mencionar es que muestran una propiedad conocida como reciprocidad esto quiere decir que la antena mantendrá las mismas características operación tanto cuando transmita o reciba señales de onda [27] [28].

2.2.2 Parámetros de una antena

La ganancia de una antena es la relación que existe entre la intensidad en una dirección dada y la intensidad de radiación de una antena isotrópica, si esta es alimentada con la misma potencia, puede expresarse con la siguiente fórmula [28] [4].

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.1)$$

Donde $U(\theta, \phi)$ es la potencia radiada en una dirección determinada y P_{in} potencia suministrada. Otro parámetro importante es directividad, se refiere al incremento intensidad de

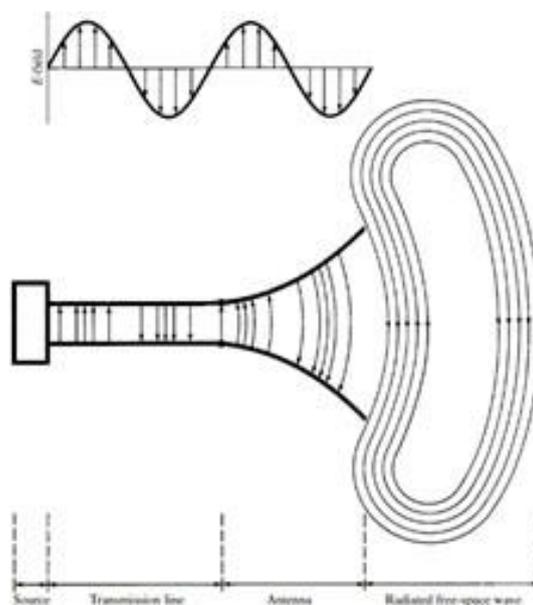


Figura. 2.1. Antena transmisora [1]

la potencia radiada de una antena en una dirección a una distancia fija, en relación con la intensidad de radiación con la misma potencia distribuida por igual en todas las direcciones, una antena isotrópica [4] [29].

$$D = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_r} \quad (2.2)$$

A diferencia de la ganancia, la directiva emplea la potencia radiada P_r en vez de la suministrada. Las antenas tienden a sufrir pérdidas al momento de transmitir las ondas electromagnéticas al espacio, estas pérdidas pueden ser por corrientes de fuga por medio de los dieléctricos o por pérdidas de resistencia en conductores imperfectos. La eficiencia en una antena viene dada por la relación que existe entre la potencia que la antena puede transmitir y la potencia que ésta recibe de la fuente [4] [30]. Se ve representada por la siguiente fórmula.

$$\eta_{tot} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (2.3)$$

El diagrama de radiación es la representación gráfica que describe la fuerza a la que una antena transmite en todas las direcciones a una distancia constante, generalmente se miden en coordenadas esféricas, pero se toma una porción bidimensional del diagrama tridimensional para su análisis como se muestra en la figura 2.2. Existen dos modelos que se toman como referencia para medir la capacidad de una antena; se toma como referencia un diagrama de radiación de una antena isotrópica que se observara como una esfera y de igual manera de una antena dipolo que se asemeja a la forma de un toroide [1] [28].

El método más usado para su medición es el diagrama de una antena isotrópica ideal y estos resultados se miden en dB .

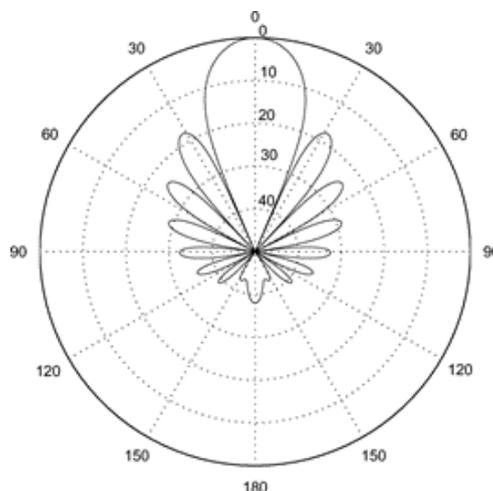


Figura. 2.2. Diagrama de radiación de una antena directiva [2].

El ancho de banda son un grupo de frecuencias superiores e inferiores a la frecuencia central de transmisión que cumplen con los parámetros de funcionamiento permitidos sobre las cuales se transmite una señal [31].

$$BW = \frac{f_U - f_L}{f_0} * 100 \quad (2.4)$$

Donde f_U es la frecuencia superior a la frecuencia de operación por debajo de los -10 dB de adaptación, f_L es la frecuencia menor a la frecuencia de operación por debajo de los -10 dB de adaptación y f_0 es la frecuencia central. Debido a que las antenas funcionan con el mismo principio de los transductores, se espera que gran parte la energía suministrada por la fuente sea emitida por la antena. Se debe garantizar que toda la energía o la mayor parte de esta se transfiera al espacio, por ello, la alimentación debe adaptarse de forma óptima (deben coincidir en impedancia) a la entrada de la antena para evitar así la reflexión de potencia. La mayoría de los dispositivos radiantes suelen diseñarse para impedancias iguales a los 50 Ohm [28] [3].

En la figura 2.3 se observa que ocurre cuando no existe una buena adaptación de impedancia entre la línea de alimentación, como se puede observar parte de la potencia se ve reflejada y esto impide que la antena reciba toda la potencia.

Uno de los parámetros más importantes dentro del estudio de la tecnología MIMO es el Coeficiente de Correlación Envolvente (ECC) que es empleado para caracterizar sistemas con varios elementos radiante, ya que permite cuantificar la ortogonalidad que existe entre antenas que se encuentre próximas entre sí. Cuanto menor sea el valor del ECC menor será el acoplamiento, un aspecto técnico de este parámetro es que para aplicaciones de telefonía celular utilizando la tecnología MIMO este valor deber ser menor a $ECC = 0,5$ [32], [33].

La formulación matemática para obtener este parámetro, es definir el diagrama de radiación

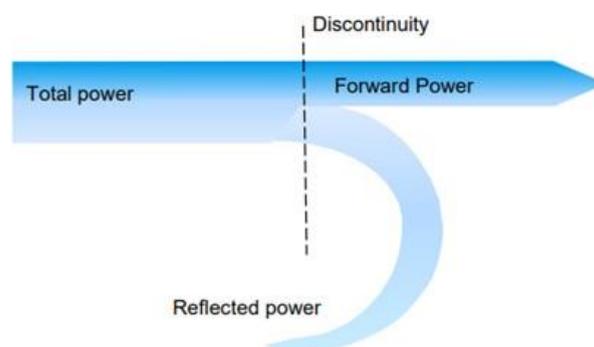


Figura. 2.3. Potencias enviada y reflejada debido a mal ajuste de impedancias [3]

matemáticamente como una función vectorial en coordenadas esféricas como:

$$\overline{F_1(\theta, \phi)} = F_{1\theta}(\theta, \phi) \cdot \overline{a_\theta} + F_{1\phi}(\theta, \phi) \cdot \overline{a_\phi} \quad (2.5)$$

Donde (θ, ϕ) representan ángulos esféricos, a_θ el vector unitario en la dirección theta, a_ϕ el vector unitario en la dirección phi, finalmente $F_{1\theta}(\theta, \phi)$ y $F_{1\phi}(\theta, \phi)$ son funciones complejas. Conociendo esto podemos definir el ECC, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\rho_e = \frac{|\int \int \overline{F_1} \cdot \overline{F_2}^* d\Omega|^2}{\int \int |\overline{F_1}|^2 d\Omega \cdot \int \int |\overline{F_2}|^2 d\Omega} \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 representa la correlación que existe entre los diagramas de radiación dos antenas diferentes. Si el patrón de radiación $F_1 = F_2$ el valor del ECC será 1, en cambio, si son independientes, el valor ECC será 0. La ecuación 2.6 se puede reformular con los valores del coeficiente de reflexión y el coeficiente de transmisión, como:

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (2.7)$$

CST Studio Suite ofrece una forma de medir este valor por medio de los parámetros S utilizando una opción de posprocesamiento, esta opción fue la forma más viable de medir este valor que se mostrara más adelante.

2.2.3 Antena de Microstrip

Las antenas de tipo parche, también llamadas antenas microstrip son impresas sobre ciertos materiales para generar enlaces inalámbricos, debido a su facilidad fabricación y su tamaño compacto, en la figura 2.4(a) se muestra una antena de microstrip rectangular. Actualmente, existe una gran variedad de sustratos que pueden emplearse para el diseño de una antena parche, donde los sustratos con un mayor grosor son más atractivos porque estos tienden a generar mejores características como una mayor eficiencia, un mayor ancho de banda. Aunque los delgados no ofrecen las mismas características, son ampliamente usados por su tamaño reducido [27] [4].

Actualmente, existen muchas configuraciones que se pueden emplear para alimentar una antena de parche, las más usadas son las configuraciones de línea de microstrip, sonda coaxial, acoplamiento por apertura y acoplamiento por proximidad. En el presente trabajo de investigación se utilizó la alimentación por sonda coaxial como el de la figura 2.4(b), el conductor interior del

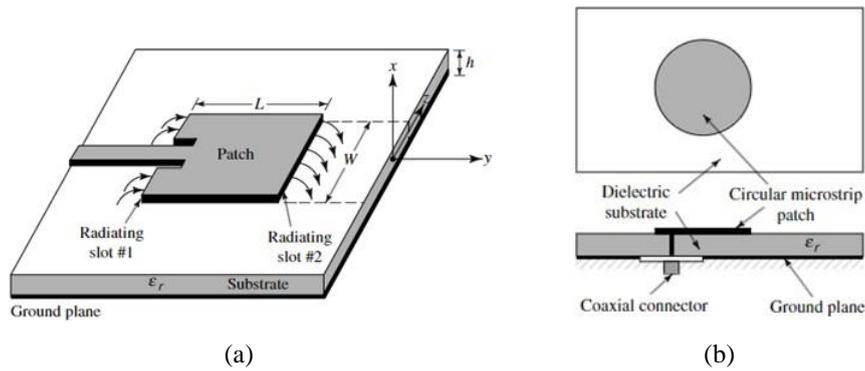


Figura. 2.4. a) Vista general 3D de una antena Microstrip rectangular alimentada por línea de microstrip. b) Alimentación por sonda coaxial [4].

coaxial está unido a la parte radiante de la antena de parche y el exterior está conectado con la tierra, al igual que la línea de microstrip es utilizada ampliamente por desarrolladores en el diseño de antenas para tecnologías MIMO [4].

2.2.4 Tecnología MIMO

Los sistemas de comunicaciones que emplean la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output) pueden proporcionar altas velocidades de transmisión de velocidad de datos mediante la multiplexación espacial [18]. La multiplexación espacial consiste en dividir la misma señal en varias porciones de flujos que son transmitidas al mismo tiempo. Como cada señal tiene características de propagación distintas, las antenas receptoras son capaces de distinguir cada flujo de señal, decodificar los datos y así mejorar la velocidad de transmisión [34]. En la figura 2.5 se observa el comportamiento de un sistema MIMO.

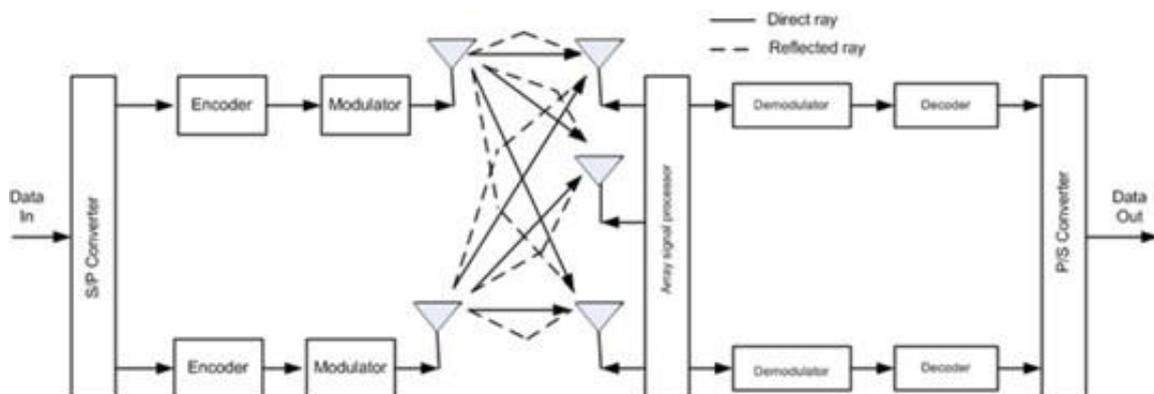


Figura. 2.5. Diagrama de Sistema de Comunicación MIMO [5]

Una particularidad aprovechada por los sistemas MIMO, es el comportamiento que tienen las

ondas electromagnéticas, en donde la información viaja y rebota en las superficies como las paredes, techos y demás objetos para llegar a la antena receptora desde varios ángulos y direcciones con ligeras diferencias. Si en los sistemas existen más antenas que señales, las antenas adicionales pueden añadir diversidad y tener un mayor alcance.

2.2.4.1 Clasificación

Los sistemas de comunicaciones se pueden clasificar según la cantidad de antenas empleadas en la parte de transmisión como en la de recepción, como se muestra en la figura 2.6:

- **SISO:** Los sistemas SISO (Simple Input Simple Output) son las más simples, ya que solo usan una antena tanto en el transmisor como en receptor. Tiene la ventaja de ser simples y no hay necesidad de procesar distintas señales.
- **MISO:** Los sistemas de antenas MISO (Multiple Input Single output) emplean varias antenas en la parte de transmisión y solamente una en el receptor, se conoce como diversidad de transmisión. El receptor tiene la capacidad de recibir más flujos de señales y elegir la mejor señal para su procesamiento.
- **SIMO:** Sistemas de comunicación SIMO (Single Input Multiple Output) emplea una antena en la parte de recepción y varias en la de transmisión. Se ha utilizado en las estaciones de escucha para disminuir los efectos de desvanecimiento.
- **MIMO:** Como ya se ha mencionado, estos sistemas utilizan varias antenas en ambos lados, en el transmisor y el receptor. Para permitir que la misma señal viaje por varias rutas, mejorando las características en la recepción.

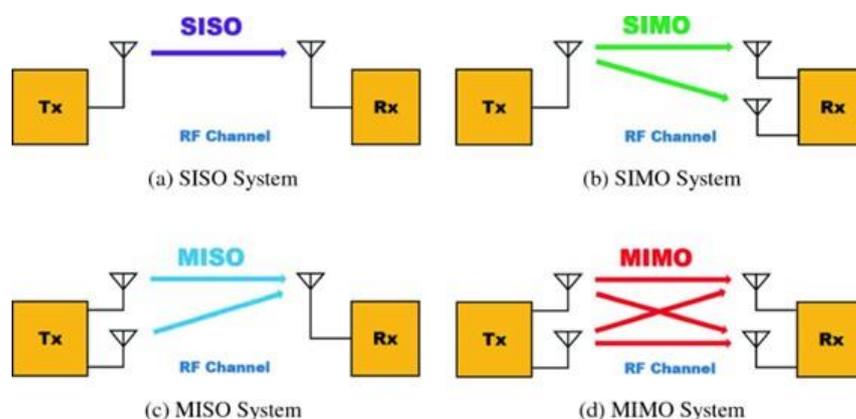


Figura. 2.6. Sistemas de comunicaciones SISO, MISO, SIMO y MIMO [6]

2.2.5 Agrupación de antenas

Se considera una agrupación de antenas al conjunto de antenas individuales ordenadas, de tal forma que logren funcionar como una única antena, logrando obtener mejores características de propagación y de rendimiento que serían muy difíciles de conseguir si solo se tratase de un elemento, esto porque generalmente los diagramas de radiación obtenidos suelen ser muy poco directivos y anchos [35] [17].

Comúnmente las agrupaciones de antenas están formadas por los mismos elementos radiantes dispuestos de una cierta forma. Por ello, se considera que las agrupaciones de antenas tienen limitaciones físicas con relación a la distancia en la que las antenas ordenadas pueden estar separadas o juntas.

Tomando en consideración lo dicho anteriormente, la separación entre cada elemento radiante no debe ser mayor a λ_0 ya que si esta distancia es superada se generarán lóbulos de difracción, en cambio, si la distancia entre cada elemento radiante es menor a $\lambda/2$ se considerarán los efectos del acoplamiento mutuo [35] [36].

Para obtener este valor de referencia se puede calcular aplicando con la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.8)$$

Donde λ es la longitud de onda, f es la frecuencia de operación de la antena diseñada y c es la velocidad de la luz en el espacio libre que es de aproximadamente $3 * 10^8 m/s$.

2.2.6 Haces conformados (Beamforming)

En un sistema MIMO, se utilizan múltiples antenas para transmitir y recibir señales de forma simultánea en diferentes canales espaciales. Esto significa que cada antena transmisora puede enviar múltiples flujos de datos independientes, y cada antena receptora puede recibir varios flujos de datos también. La matriz de antenas en la estación base y en el dispositivo cliente forma una agrupación espacial [7].

El beamforming en una agrupación de antenas MIMO se logra mediante el procesamiento de señales y el ajuste de las fases y amplitudes de las señales transmitidas por cada antena transmisora. El objetivo es enfocar las señales en direcciones específicas para aprovechar los diferentes canales espaciales disponibles y aumentar la ganancia de la señal en una dirección determinada,

como se muestra en la figura 2.7. Esto permite incrementar la capacidad de la transmisión y mejorar la fiabilidad de la comunicación.

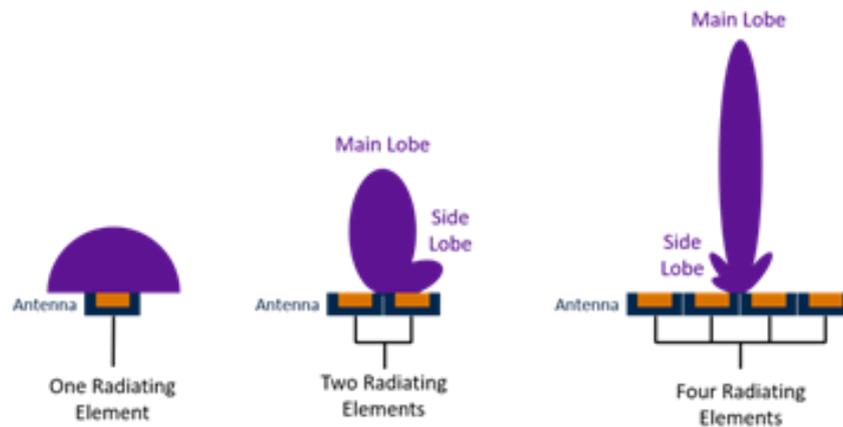


Figura. 2.7. Formación de haces conformados con dos y cuatro antenas [7]

2.2.7 Wifi

Wifi es una tecnología en la que los dispositivos afines logran conectarse a internet de forma inalámbrica. Se conoce como dispositivo Wifi de todos los equipos de red de área local (LAN) que están basados en los estándares 802.11 creadas por el Instituto de Ingeniero Eléctricos y Electrónicos (IEEE) también conocidas como WiFi, que rigen el modo en el cual se comunican entre un cliente inalámbrico y un punto de acceso [37] [38].

La principal ventaja de los equipos IEEE 802.11 es que es la solución más barata para las redes de área local en donde los sistemas cableados tradicionales son poco adecuados para desplegarlos en ciertas áreas de grandes extensiones [39].

2.2.7.1 Estándares

A continuación, en la tabla 2.1 se muestran los distintos estándares que se han desarrollado en los últimos años [37]– [39]:

Estándar	Fecha de lanzamiento	Frecuencia	Velocidad máxima	Compatible con modelos anteriores
802.11	1997	2.4 GHz	2 Mbit/s	no
802.11b	2000	2.4 GHz	11 Mbit/s	no
802.11a	2000	5 GHz	54 Mbit/s	no
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbit/s	802.11 a/b/g
802.11n	2009	2.4 GHz y 5 GHz	600 Mbit/s	802.11 a/b/g
802.11ac	2013	2.4 GHz, 5 GHz, 60 GHz	1300 Mbit/s	802.11 a/n

Tabla 2.1. Estándares 802.11 a través del tiempo.

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

En el presente estudio de investigación se toma como apoyo conocimientos existentes que son claves para alcanzar los objetivos planteados. Para el diseño de la antena, se ocupan como referencia modelos de autores dentro de la misma línea de investigación. La antena diseñada, cumple con las especificaciones técnicas características de las antenas de parche, que es tener un tamaño compacto, dispuesto para equipos celulares de pequeñas dimensiones, en donde deberá coexistir con otros componentes del equipo, y ofreciendo un rendimiento óptimo para las aplicaciones Wi-Fi correspondiente a la banda de frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz.

3.1.1 Tipo de Investigación

Investigación exploratoria

La investigación exploratoria sirve para relacionarse con las técnicas de documentación y literatura bibliográfica que permitirán entender todo lo posible del tema de estudio y de las variables que estén involucradas. Para lograr determinar qué estructura se ajusta a las características previstas. En otras palabras, se emplea para tener una primera aproximación en dirección al tema de investigación propuesto.

Investigación experimental

Este tipo de investigación permite establecer la relación que existe entre las variables de estudio, la variable dependiente y la variable independiente, y realizar un estudio estadístico que demuestren que los resultados obtenidos justifican el funcionamiento de la antena propuesta en el trabajo de investigación. Experimentando con las variables se puede comprender el comportamiento que tiene la antena diseñada, de ahí la importancia de este tipo de investigación en los proyectos prácticos como el que se desarrolla.

3.1.2 Métodos de Investigación

Método adaptativo

Se aplica el método adaptativo en el presente trabajo de investigación. Se inició con el diseño

de la antena la cual será diseñada utilizando tecnología microstrip por sus características que demuestran ser afines con los resultados buscados como bajo perfil, bajo coste, adaptables en espacios reducidos, realizando el estudio detallado de los parámetros que se deben introducir en el modelado de la antena.

Método experimental

La antena propuesta se modela en un simulador electromagnético que permite tener en primera instancia una vista del comportamiento que tendrá la antena propuesta, la cual, será una antena dual que opera en las bandas de frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz. Optimizando los valores de la estructura de la antena y validando los resultados obtenidos, se procede a realizar su implementación. Cabe recalcar que en el diseño de una antena microstrip en pocos casos los valores obtenidos con el primer cálculo corresponden a los valores justos con los que la antena resonará a la banda de frecuencias esperadas, por eso se modificarán los parámetros obtenidos hasta llegar a un punto óptimo de funcionamiento. De igual forma se deben variar de tal modo que no afecte la estructura del diseño compacto para su respectiva implementación.

3.1.3 Técnica de investigación

Observación directa

La técnica de observación consiste en prestar atención a los cambios ocurridos o acontecimientos que se presentan dentro del experimento, para posteriormente realizar un registro de estos eventos para su respectivo análisis.

Estudio bibliográfico

Esta técnica permite recolectar información de diversas fuentes científicas que surtan conocimientos necesarios para el desarrollo del trabajo de investigación como: artículos científicos, libros, repositorios de universidades y de otros tipos, etc.

Operaciones experimentales

Permite tener una interacción directa con las variables que están involucradas con el experimento.

3.1.4 Procedimiento

Como se menciona en la metodología, el diseño de la antena propuesta partió a partir de los modelos de referencia de otros diseños existentes en las distintas investigaciones realizadas sobre el tema, con los que nació la inspiración del diseño final mostrado más adelante.

Aquí se presenta el diseño de una antena MIMO dual para la banda de frecuencia Wi-Fi de 2.4 GHz y 5 GHz para teléfonos inteligentes. La antena está compuesta por 8 elementos radiantes distribuidos simétricamente a lo largo de los dos marcos de la carcasa del teléfono, esto ayudará a realizar un análisis más centrado y sencillo.

La antena propuesta se modela en el software de análisis y simulación CST Studio Suite y para su posterior implementación. En la figura 3.8, se observa de mejor manera el proceso realizado para la realización del proyecto de investigación.

Por fines académicos, los resultados de la antena se omitieron para su posterior publicación en una revista académica de alto impacto. En la figura 3.8 se muestra el proceso que se siguió para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

3.1.5 Población y muestra

Población

La población en este proyecto está determinada por la cantidad de variaciones que se realizan en las dimensiones de la antena hasta obtener los resultados deseados dentro de la simulación. Como se conoce en la estructura de la antena existen parámetros que serán modificados individualmente o en conjunto según se dé el progreso de las simulaciones, cada modificación corresponderá a un dato perteneciente a un extremo o parte de la antena, al finalizar la simulación se hará una documentación de la cantidad total de modificaciones o de datos.

Para obtener el total de datos (que es la población) se sumaron la cantidad de modificaciones hechas de cada parámetro, obteniendo un total de 169 datos.

Muestra

La muestra se toma de la población anteriormente definida con métodos aleatorios.

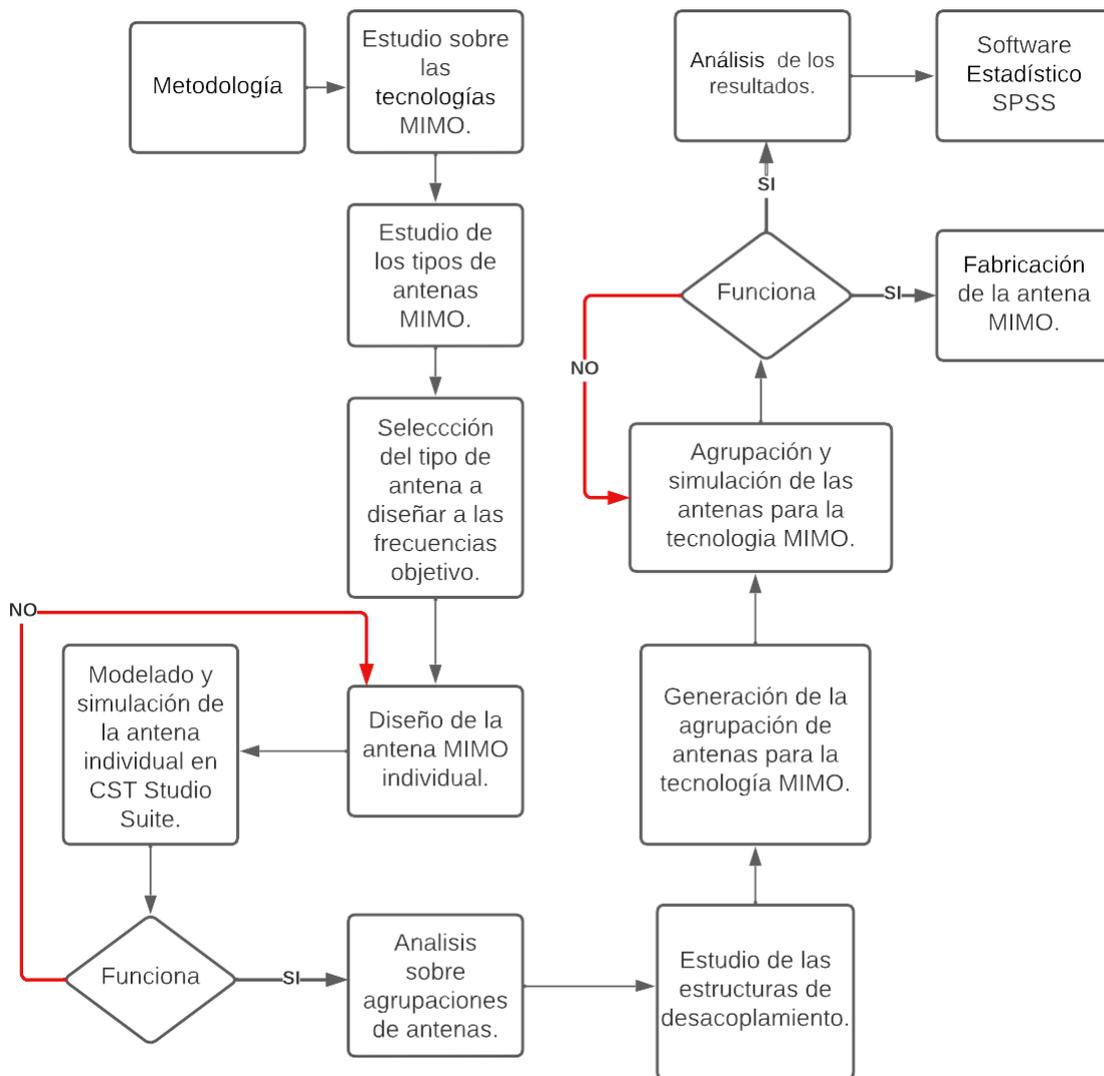


Figura. 3.8. Diagrama de bloques donde se describe el desarrollo del presente trabajo de investigación.

3.1.6 Operacionalización de las variables

Dentro del análisis de las variables, se deben conocer tanto las variables independientes que son las causas de un resultado como las variables dependientes que representan el valor con el cual se miden esos resultados. Para el diseño de antenas se toman como variables independientes a las frecuencias de operación y a los valores que derivan de ella, como son las dimensiones de la antena. Las variables dependientes se tomaron de los resultados obtenidos de la simulación realizada de la antena, como son los parámetros de dispersión S (principalmente los parámetros S_{11} , S_{22}) y las magnitudes del diagrama de radiación (dB_i).

	Independiente	Dependiente
VARIABLES	Diseño de la antena MIMO para la Tecnología MIMO	Implementación de la antena para la Tecnología MIMO
Concepto	Durante el desarrollo del trabajo de investigación se realizó el modelado de la antena individual para luego agrupar las antenas para la Tecnología MIMO	La antena final propuesta consta de ocho elementos radiantes ordenados de cuatro antenas por cada marco. Cada antena o elemento radiante resuena a las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz, es decir que son antenas duales.
Indicadores	Parámetros de estructura. — Dimensiones estructurales de la antena o elemento radiante individual propuesto. Medida en mm	Parámetros S.— Ondas reflejadas e incidentes. Medida en <i>dB</i> ($S_{11}, S_{12}S_{13}, S_{14}...$, S_{88}). Directividad. — Potenciada a una dirección Medida en <i>dB</i> . Ancho de banda. — Capacidad máxima de datos. Medida en %. ECC. — Cuantifica la ortogonalidad entre antenas. Parámetro adimensional debe ser menor a 0.5.
Técnicas e Instrumentación	Simulador Electromagnético	Simulador Electromagnético

Tabla 3.2. Operacionalización de variables

Todo lo mencionado corresponde hasta el diseño de la antena en el simulador electromagnético, como en la simulación, en la implementación también obtendremos valores respectivos a las mediciones que se realizarán. Estos pueden variar al medir los parámetros de la antena (varia-

bles dependientes) con respecto a las cantidades físicas dadas (variables independientes). En la tabla 3.2 se muestran las variables dependientes e independientes empleadas para el análisis del rendimiento de la antena propuesta.

3.1.7 Diseño de la antena propuesta

Como se trata de una antena MIMO para teléfonos inteligentes, esta debe ser compacta, el diseño de la antena está compuesta de una masa de tierra donde se colocará la alimentación y el marco lateral en el que se encontrará impresa la antena diseñada. La antena propuesta está impresa en un sustrato FR-4 de 1.5 mm de espesor con una permitividad relativa de $\epsilon_r = 4,3$.

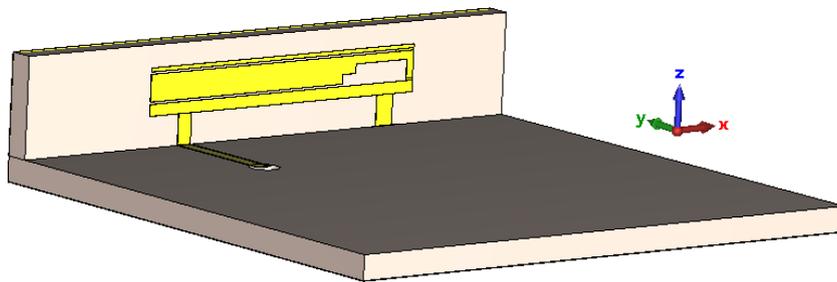


Figura. 3.9. Estructura general de la antena individual propuesta

Como se observa en la figura 3.9 se muestra la estructura general de la antena dual, consta de tres tiras horizontales conectadas en la parte derecha, en la tira central se hicieron dos ranuras que ayudaron a generar una mejor adaptación en resonancia para las dos frecuencias de operación.

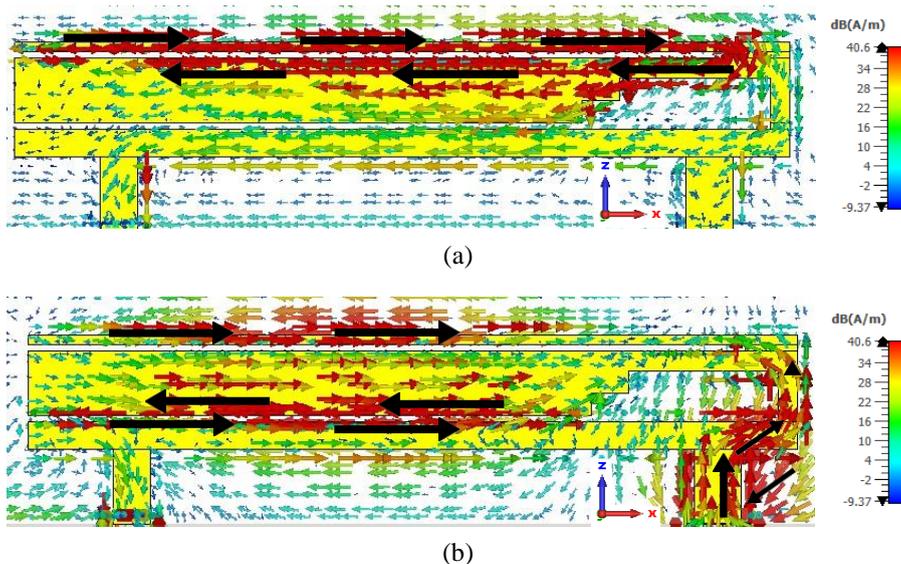


Figura. 3.10. Distribución de la corriente sobre la superficie de los elementos radiantes de la antena propuesta: 2.4 GHz (3.10(a)) ; 5 GHz (3.10(b))

De igual manera, en el marco se imprimieron dos pequeñas tiras verticales que llegan hasta la base de la carcasa. La tira de lado izquierdo conecta la parte radiante de antena a la línea de alimentación y la tira de la derecha se encuentra en cortocircuito con la tira en el marco. En la base de la estructura radiante mostrada se encuentra la línea de alimentación por vía coaxial. Para comprender de mejor forma la excitación en los dos modos resonantes, en la figura 3.10(a) y 3.10(b) se muestra la distribución de corrientes para ambas frecuencias.

En la figura 3.10(a) se observa que la distribución de corriente a 2.4 GHz se distribuye por toda la superficie de la tira que se encuentra en la parte más elevada del marco, terminando su recorrido en la parte superior de la tira central.

En cambio, para la frecuencia de 5 GHz en la figura 3.10(b) la distribución de corriente se reparte prácticamente por casi toda la estructura radiante de la antena. En primera instancia, la corriente se extiende de la línea de alimentación a la tira inferior hasta el cortocircuito puesto en el otro extremo, de igual forma parte de esa corriente se extiende a la tira central y a la tira superior.

Con las imágenes de la distribución de corriente podemos llegar a la conclusión de que en la estructura para ambas frecuencias una misma parte de la antena puede generar cambio en ambas frecuencias.

3.1.7.1 Diseño de la agrupación de antenas para Tecnología MIMO

Como ya se realizó el análisis de la antena individual, se modela y analiza la agrupación MIMO de ocho elementos radiantes. En la figura 3.11 se logra observar cómo están organizados los elementos de la antena. En un lado del marco lateral de la placa PCB de la carcasa del teléfono inteligente se encuentran impresos cuatro elementos radiantes del mismo modo para el otro marco lateral. Esto deja espacio para acomodar los distintos elementos internos que conforman los teléfonos inteligentes, como batería, sistemas y subsistemas de radiofrecuencia, cámaras, módulos de sensores, etc.

Para la antena MIMO, los elementos de un lado del marco se denominarán Ant₁, Ant₂, Ant₃, Ant₄ y del otro lado del marco se la denominarán Ant₅, Ant₆, Ant₇ y Ant₈. Se colocaron los elementos de la antena MIMO de manera simétrica, de tal forma que proporcione un menor acoplamiento entre sí.

En la figura 3.12 se logra observar la estructura general de la base y del marco de la antena MIMO propuesta.

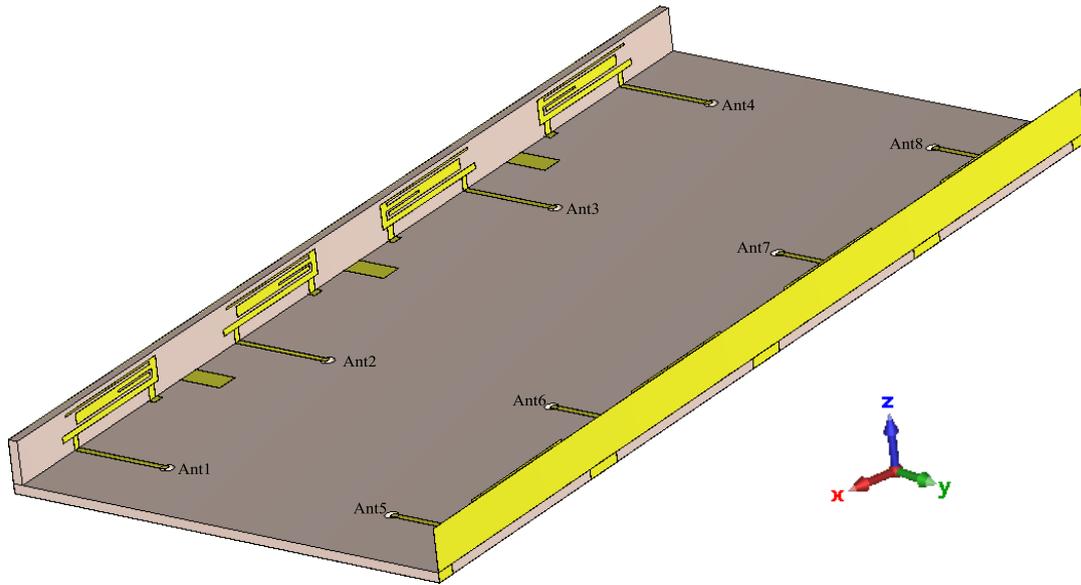


Figura. 3.11. Antena MIMO propuesta

Como se puede observar en la figura 3.11 y 3.12 el diseño de la antena propuesta inicialmente sufrió de algunas modificaciones, al observar la forma de los elementos radiantes mostrados en la figura 3.9 se puede observar de mejor manera la diferencias. Esto se debe a que al momento de agrupar los elementos de la antena se genera muchas interferencias entre sí debido al acoplamiento mutuo existente, generado por la poca distancia en la que se encuentran y a que se modificó el tamaño de la superficie sobre la cual se colocaron, provocando que los resultados

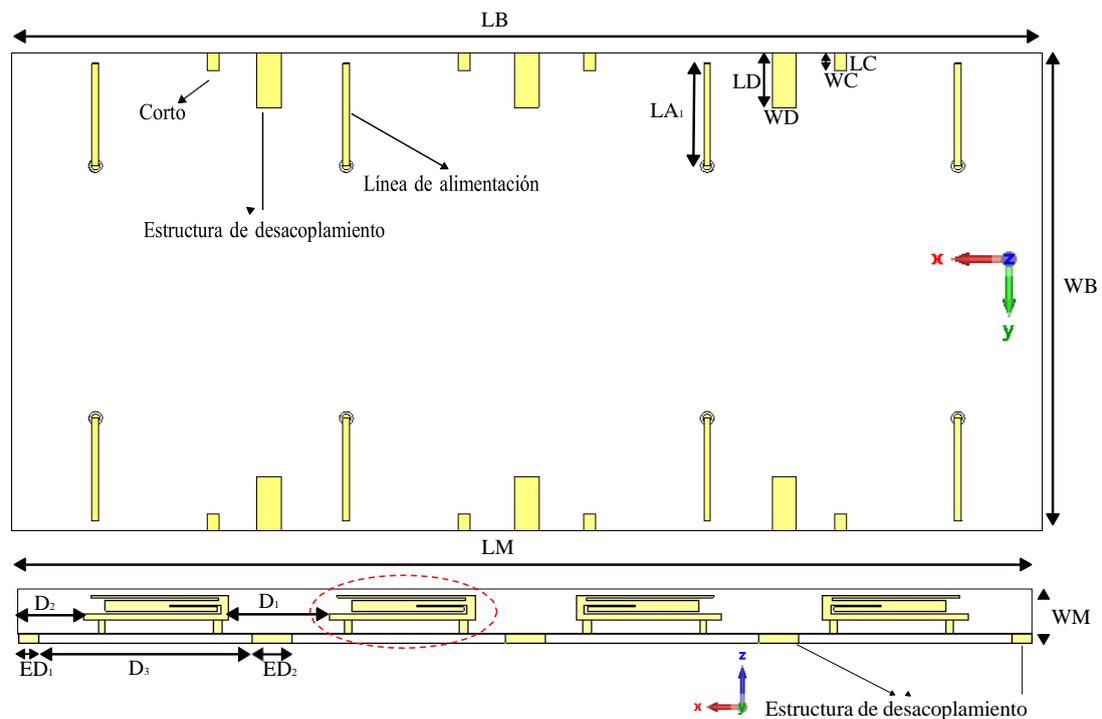


Figura. 3.12. Base y marco lateral de la antena MIMO propuesta

iniciales mostradas en la figura 4.22 se vieran afectados. Aunque se logró mitigar en gran medida con las estructuras de desacoplamiento colocadas en los bordes y la superficie superior de la base de la carcasa, también se tuvo que realizar modificaciones en la estructura de la antena individual para lograr obtener nuevamente la resonancia en las dos frecuencias de operación.

La forma de la antena individual propuesta se muestra en la figura 3.13.

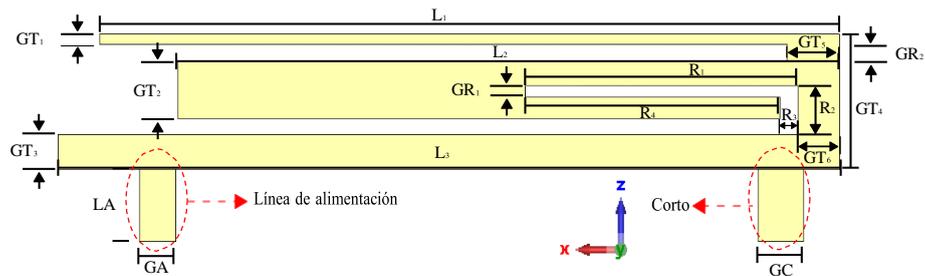


Figura. 3.13. Elemento radiante de la antena MIMO propuesta

A continuación, se encuentra una tabla en donde se podrán ver los valores que corresponden a las dimensiones de la base, el marco y de la antena mostrados en la figura 3.12 y 3.13.

Dimensiones de la Antena MIMO			
Variables	Valor (mm)	Variables	Valor (mm)
WB	70	LB	150
WM	8	LM	150
LA ₁	15	LD	8
WD	3,5	WC	1,75
LC	2,5	D ₁	15
D ₂	9,5	D ₃	31,5
ED ₁	3	ED ₂	6
L ₁	20,35	L ₂	17
L ₃	21,5	GR ₁	0,3
GR ₂	0,45	R ₁	7,5
R ₂	0,6	GT ₁	0,3
GT ₂	1,6	GT ₃	0,95
GT ₄	3,75	LA	2
GA	1	GC	1,25
GT ₅	1,45	GT ₆	1,15
R ₃	0,5	R ₄	7

Tabla 3.3. Dimensión de la base, marco y elemento radiante de la antena MIMO propuesta.

3.1.8 Estructuras de desacoplamiento

En los sistemas de antenas en donde los elementos radiantes se encuentran muy cercanos, se pueden producir deficiencias en el rendimiento. Como un alto acoplamiento mutuo que se debe a la corriente inducida debido a la compartición de tierra común, radiación mínima y un aumento de la correlación de la antena. Como se menciona en el capítulo anterior, la distancia mínima que debe tener una agrupación de antenas es de $\lambda/2$, empleando la formula (2.8) podemos obtener el valor de la separación sugerida:

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{2,4 * 10^9} = 0.125m \quad (3.9)$$

$$\lambda/2 = 0.125/2 = 0.0625m$$

Obteniendo un valor de 62.5 mm entre antenas, la finalidad del presente trabajo de tesis es colocar el mayor número de antenas posibles dentro del espacio disponible en la carcasa del dispositivo, para este caso en los marcos laterales. Como se observa en la tabla 3.3, la dimensión de cada antena es de $21,5 \text{ mm}$, esto permite generar una agrupación de 2 antenas por cada marco con la distancia calculada. En consideración a las expectativas del presente proyecto, se espera que se agregue un total de 4 antenas por cada marco, generando una agrupación MIMO de 8 elementos radiantes.

Aun con la limitación de espacio, se logró agrupar las antenas con una separación de 35.5 mm colocando estructuras parásitas, mediante regla de tres se logra obtener la separación entreantenas. Obteniendo un valor de $0,284\lambda$:

$$\begin{aligned} 125 \text{ mm} &\rightarrow \lambda \\ 35.5\text{mm} &\rightarrow x \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$x = \frac{35.5\text{mm} * \lambda}{125\text{mm}} = 0.284\lambda$$

Inicialmente, se empezó agrupando la antena sin ningún tipo de estructura de desacoplamiento, como se muestra en la figura 3.14. Por practicidad y sencillez solo se realiza el análisis de la antena con los elementos radiantes Ant₁, Ant₂ y Ant₃, que como ya se mencionó anteriormente, están organizados simétricamente, donde el mismo análisis funcionaria para los demás elementos que están distribuidos en la carcasa del dispositivo.

En la figura 3.15 se muestra la distribución de corriente sobre la superficie de los elementos radiantes, el primer análisis muestra cuando se suministra energía a través de Ant₁ a los 2,4 GHz (figura 3.15a), mucha de la energía dada a Ant₁ se propaga a las demás antenas que se

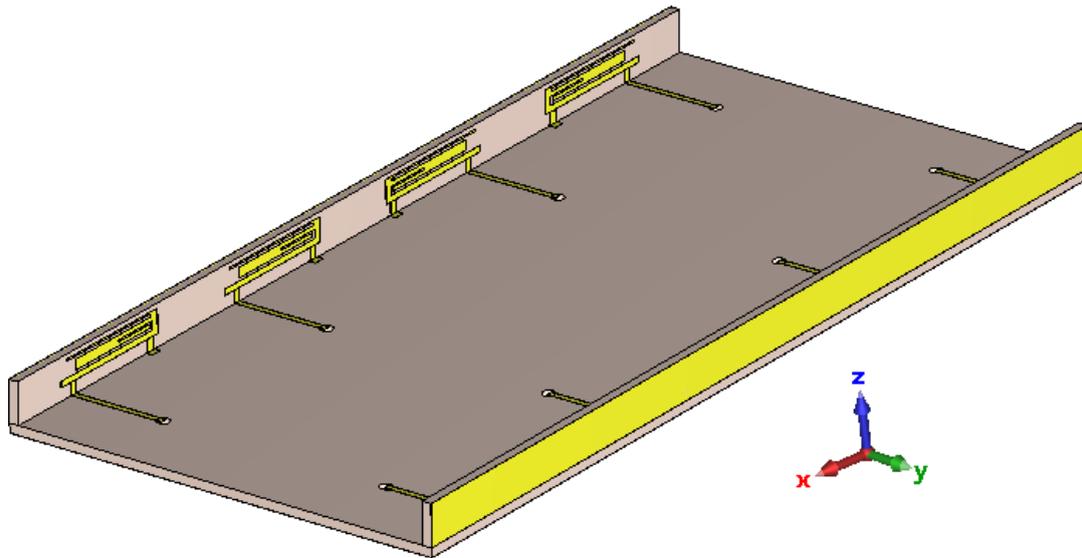


Figura. 3.14. Agrupación de los elementos radiantes sin estructuras de desacoplamiento.

encuentra adyacentes al elemento en análisis, lo mismo pasa con Ant₂ (figura 3.15b) en donde la energía se extiende hacia Ant₁ y a Ant₃. Para los elementos radiantes a los 5 GHz pasa algo similar cuando se suministra energía a Ant₁ (figura 3.15c) y a Ant₂ (figura 3.15d).

Esto ocurre por el alto acoplamiento mutuo que existe entre ellos. Generando que las antenas interfieran entre sí y no irradien la señal de forma efectiva. Por esta razón se presta mucha atención a las estructuras de desacoplamiento que permiten mitigar los problemas que surgen en el momento de realizar el diseño de las agrupaciones MIMO.

Durante el estudio del diseño de la agrupación se probaron varios métodos de desacoplamiento

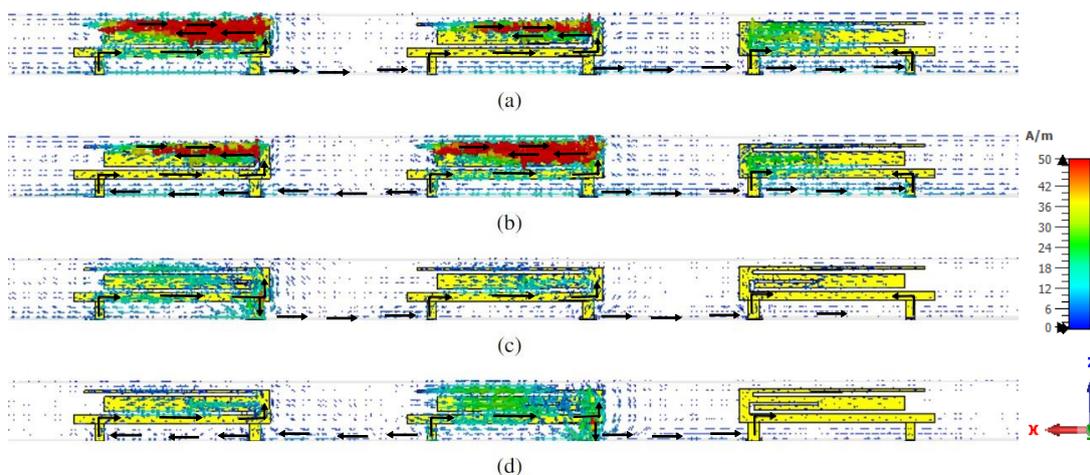


Figura. 3.15. Distribución de corriente de la antenna MIMO propuesta sin las estructuras de desacoplamiento. Fuente de alimentación: Ant₁ a 2,4 GHz(a), Ant₂ a 2,4 GHz(b); Ant₁ a 5 GHz(c), Ant₂ a 5 GHz(d).

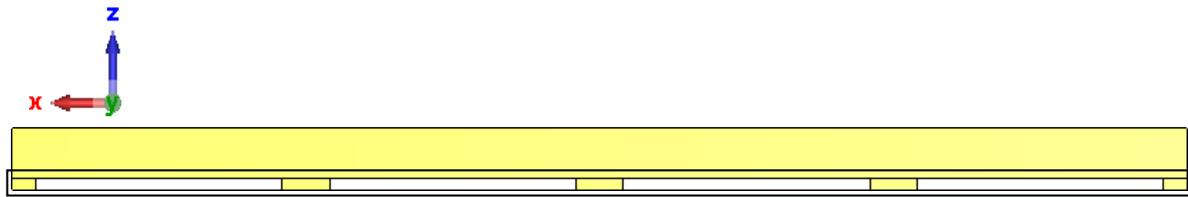


Figura. 3.16. Estructura de desacoplamiento en la parte lateral de la base de la carcasa.

que logren generar bajos valores de adaptación entre los elementos que componen la antena MIMO como en [40–50]. Pero ninguno demostró ser efectivo para cumplir con el objetivo previsto, sin embargo, se colocaron pequeñas tiras en los laterales de la base del dispositivo, como se muestra en la figura 3.16.

En la figura 3.17 se logra observar que el acoplamiento mutuo para la frecuencia de 2,4 GHz (Figuras 3.17a y 3.17b) se redujo en comparación con la distribución de corriente obtenida sin las tiras de la figura 3.15 en donde el flujo de corriente se ve interrumpido por las tiras colocadas en la parte posterior de la base, resultando ser efectiva para reducir el acoplamiento mutuo existente. Lo mismo se logra observar para la frecuencia de los 5 GHz (Figuras 3.17c y 3.17d), podemos afirmar que las tiras colocadas a los extremos de la base logran su cometido, disminuyendo significativamente la corriente esparcida hacia los demás elementos radiantes, concentrando la mayor cantidad de energía únicamente a la antena la cual está siendo alimentada.

Para mejorar los resultados obtenidos del acoplamiento mutuo, se colocaron tres tiras, pero esta

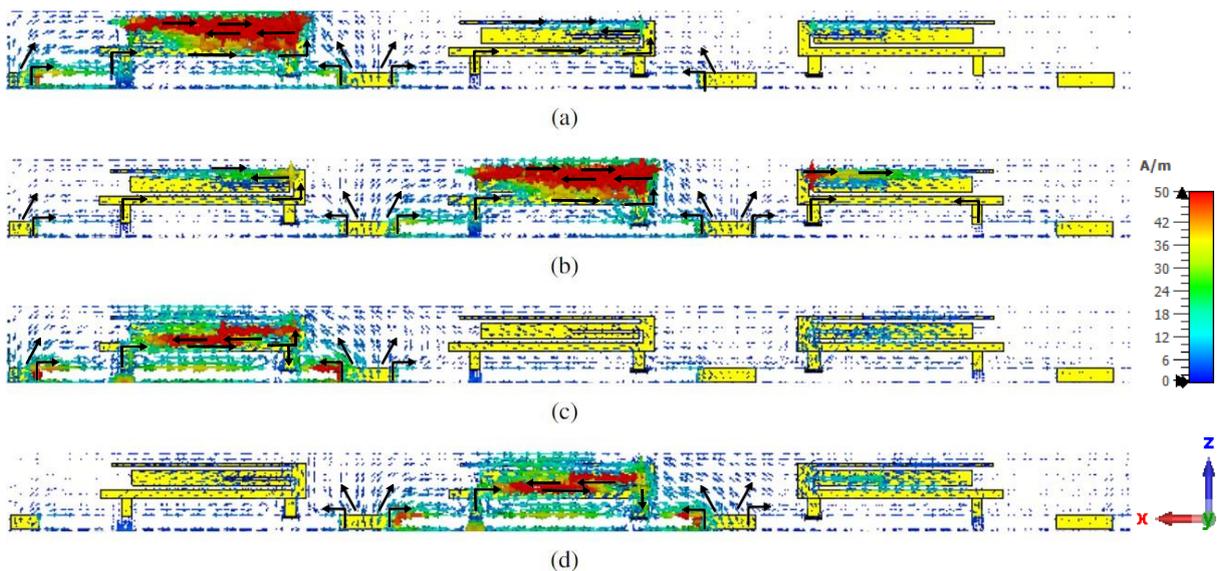


Figura. 3.17. Distribución de corriente con tiras en la parte lateral de la base de la carcasa del dispositivo. Fuente de alimentación: Ant₁ a 2,4 GHz(a), Ant₂ a 2,4 GHz(b); Ant₁ a 5 GHz(c), Ant₂ a 5 GHz(d).

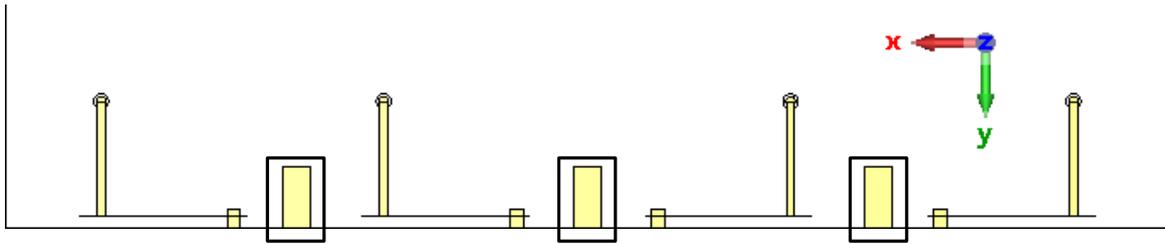


Figura. 3.18. Estructura de desacoplamiento entre los elementos radiantes del teléfono inteligente.

vez en la parte superior de la base de la carcasa, como se observa en la figura 3.18, están en contacto con las tres tiras centrales en la parte lateral mostradas en 3.16.

Al agregar las tiras en la parte superior de la base de la carcasa se logró obtener un bajo acoplamiento mutuo para ambas frecuencias de operación, como se observa en la figura 3.19, la corriente esparcida hacia los demás elementos radiantes es muy baja lo que permite que cada antena tenga un funcionamiento más individual.

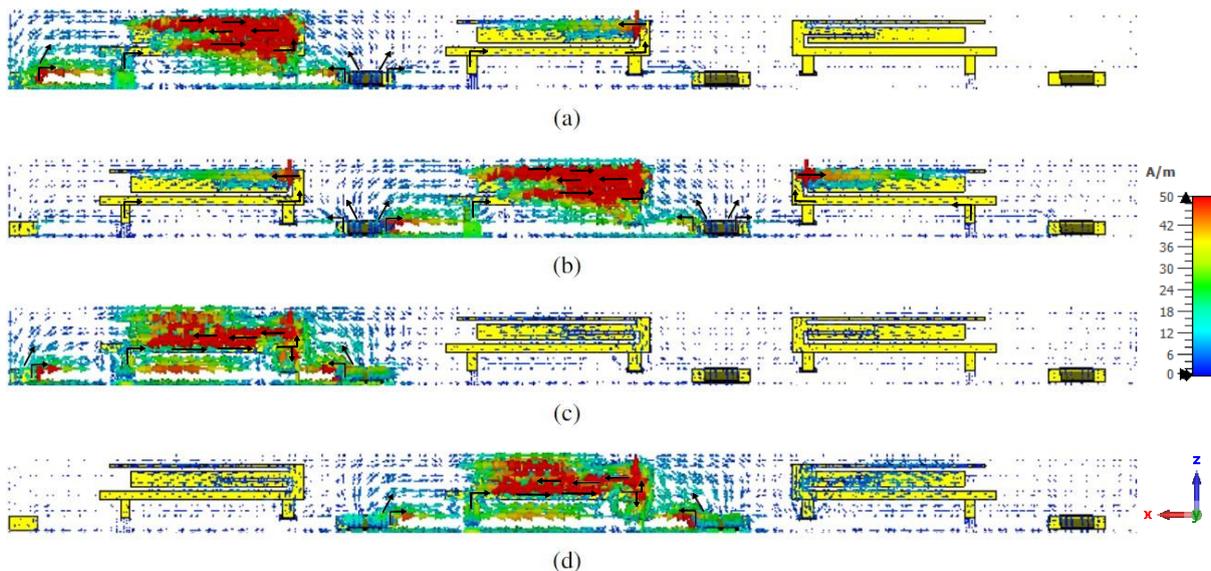


Figura. 3.19. Distribución de corriente en la base y la parte lateral de la carcasa del dispositivo.
Fuente de alimentación: Ant₁ a 2,4 GHz(a), Ant₂ a 2,4 GHz(b); Ant₁ a 5 GHz(c), Ant₂ a 5 GHz(d).

En la figura 3.20 se logra observar el coeficiente de transmisión, donde se muestra la efectividad que tienen las estructuras de desacoplamiento colocadas que logran suprimir en gran medida la corriente que se extiende hacia los elementos radiantes adyacentes, superando los -20 dB en ambas frecuencias de operación.

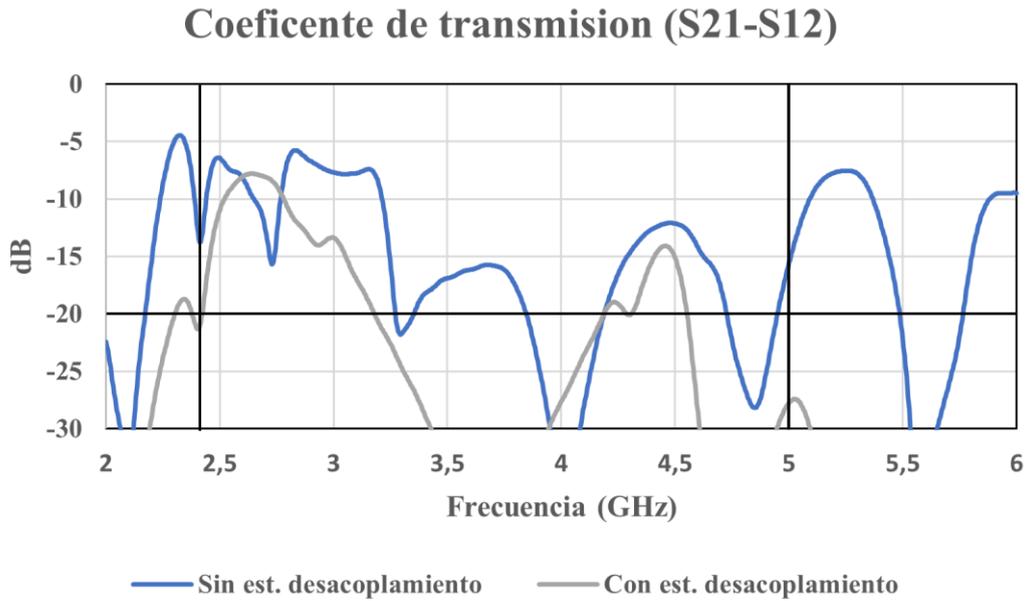


Figura. 3.20. Coeficiente de transmisión o acoplamiento mutuo entre los elementos radiantes adyacentes con y sin las estructuras de desacoplamiento.

Ya finalizadas las simulaciones se procedió con la implementación de la agrupación de antena. Para esto se realizó empleando el método corrosión tal y como se muestra en la figura 3.21

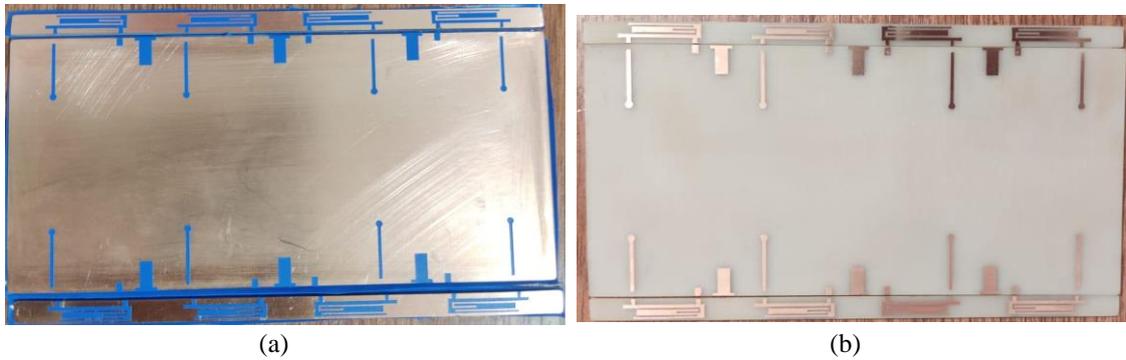


Figura. 3.21. Fabricación de la agrupación de antenas para Tecnologías MIMO mediante el método de corrosión.

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados y Discusiones

4.1.1 Análisis de la antena individual

Los valores del coeficiente de reflexión (S_{11} - S_{22}) debe ser inferior a los -10 dB y como se trata de una agrupación de antenas, el acoplamiento mutuo (S_{21} - S_{12}) debe ser inferior a los -15 dB , cumpliendo con estos dos parámetros se puede decir que la antena MIMO propuesta cumple con los requerimientos mínimos para un buen funcionamiento. El rendimiento de la antena individual, en donde el coeficiente de reflexión para ambas frecuencias fue inferior a los -10 dB con un ancho de banda $5.92\% BW$ para la frecuencia central de 2.4 GHz y de $7.49\% BW$ para la frecuencia superior de los 5 GHz .

En la figura 4.22, se muestra el coeficiente de reflexión de la antena dual propuesta. Se puede ver que la antena presenta buenas características de resonancia en los modos excitados tanto en la frecuencia inferior (2.4 GHz) como en la frecuencia superior (5 GHz) con un coeficiente de reflexión inferior a los -10 dB .

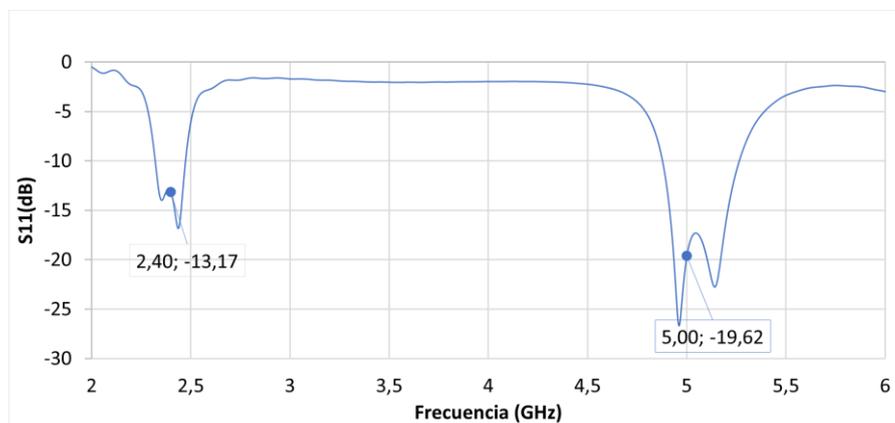


Figura. 4.22. Parámetro S_{11} de la antena propuesta individual

En la figura 4.23 se muestra el diagrama de radiación obtenido de la antena propuesta, en donde la directividad obtenida para la frecuencia de 2.4 GHz es de 5.1 dBi y para la frecuencia de 5 GHz es de 4.05 dBi .

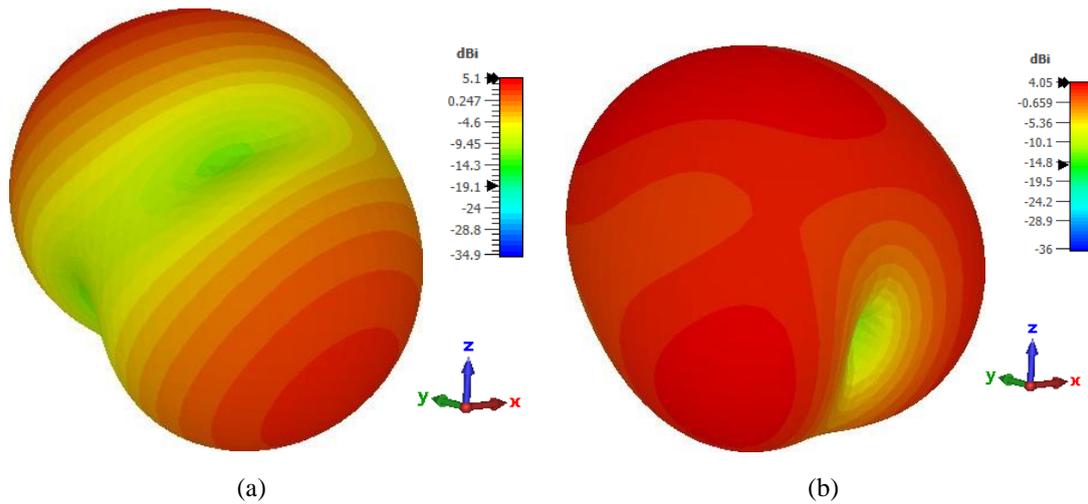


Figura. 4.23. Diagrama de radiación de la antena individual propuesta: 2.4 GHz (4.23(a)) y 5 GHz (4.23(b))

4.1.2 Análisis de la agrupación de antenas para la tecnología MIMO

A continuación, se muestra el coeficiente de reflexión y el coeficiente de transmisión obtenido de las simulaciones realizada de la agrupación de antenas:

De igual forma, podemos observar en la figura 4.24 que los valores correspondientes al coeficiente de reflexión y el acoplamiento cumplen con los parámetros esperados en el diseño de la antena MIMO propuesta.

En donde, para la frecuencia de 2.4 GHz el coeficiente de reflexión es de -21dB con un ancho

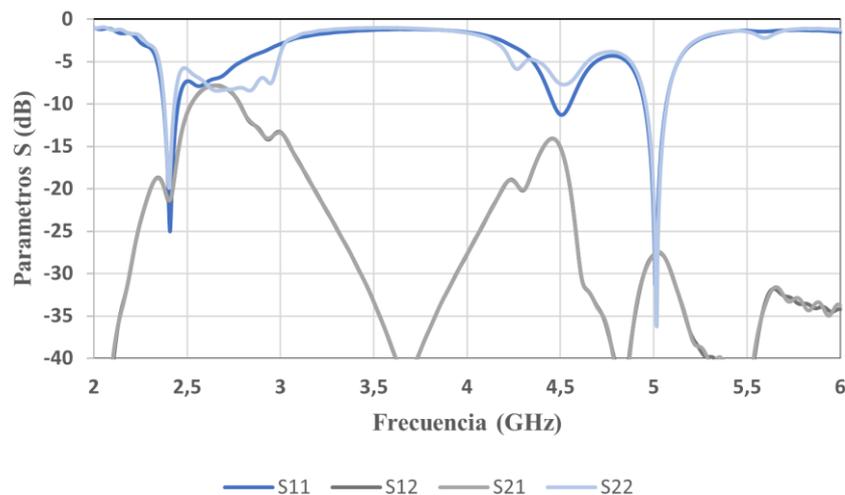
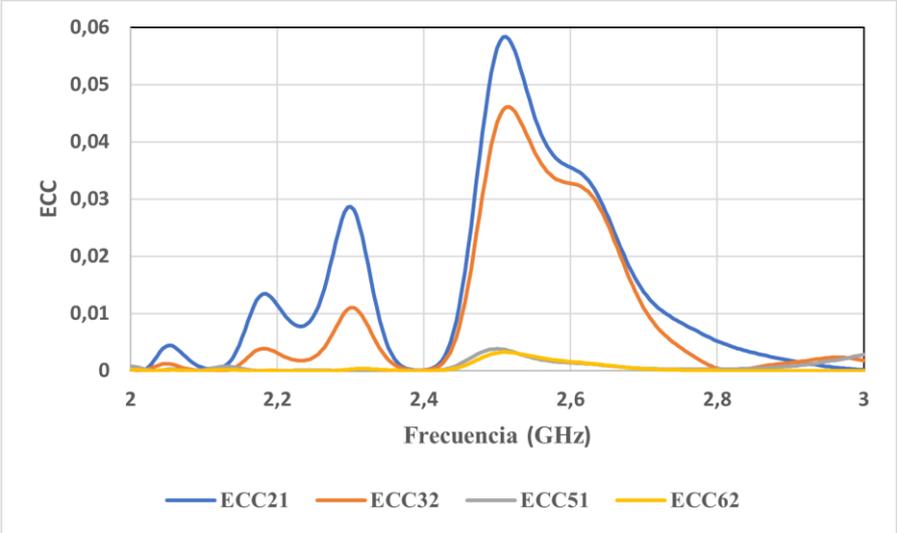


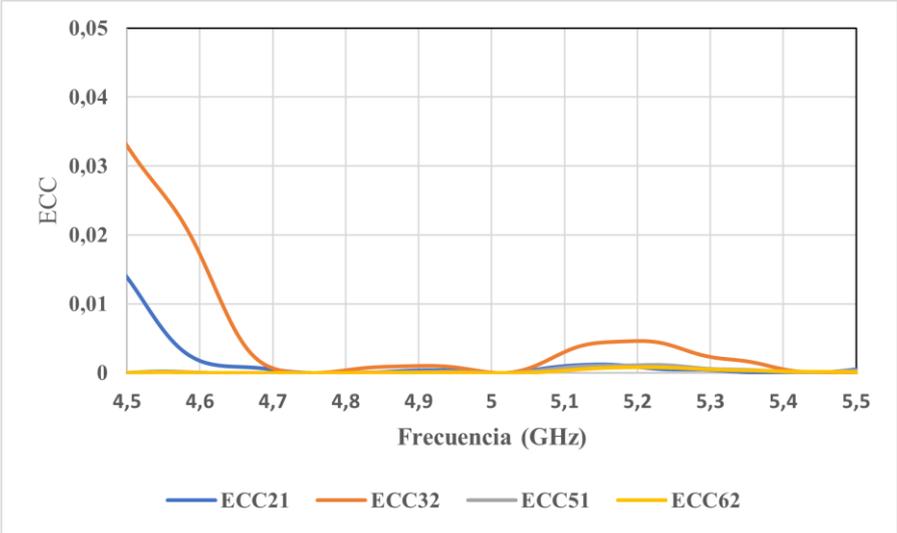
Figura. 4.24. Coeficiente de reflexión de la antena MIMO propuesta

de banda de 3,13 % *BW* y para la frecuencia de 5 GHz el coeficiente de reflexión es de -24 dB con un ancho de banda de 2.19 % *BW* esto para la Ant1. Para Ant2 el coeficiente de reflexión es de -19.67 dB con un ancho de banda de 2.5 % *BW* para la frecuencia de 2.4 GHz y en los 5 GHz el coeficiente de reflexión es de -21 dB con un ancho de banda de 2.39 % *BW*.

Los resultados obtenidos para ECC se muestran en la figura 4.25 que como se observa cumple con el valor sugerido en la bibliografía, siendo este menor a los 0.05.



(a)



(b)

Figura. 4.25. Coeficiente de Correlación Envolvente (ECC) para la frecuencia de 2.4 GHz 4.25(a) y 5GHz 4.25(b)

En la tabla 4.4 se muestra la comparación que existe entre la antena MIMO propuesta con antenas de publicaciones existes.

Ref.	Diseño	Dir.	Dimensiones (mm)	ECC	N. Ele.	Fr	Aislamiento (-dB)
[51]	Radiadores de ranura de anillo cuadrado	2.5 dBi 2.77 dBi 2.8 dBi	17.8 x 15	0.05	4	2.6 GHz 3.6 GHz 5.25 GHz	17
[52]	Radiadores de ranura reconfigurable en forma de C	6.5 dBi 7.5 dBi	8.5 x 3	0.01	4	2.6 GHz 3.5 GHz	20
[53]	Antena monopolo	3.71 dBi	15 x 20	-	2	5.5 GHz	20
[54]	Antena F invertida plana modificada (Pifa)	4.1 dBi	20x6.5	0.01	8	2.6 GHz 3.6 GHz 5.5 GHz	13
[55]	Antena monopolo en forma de S	-	12x18	0.002	2	2.4 GHz 5.2 GHz 5.8 GHz	25
[56]	Elementos radiantes tipo bucle	4-6 dBi	16x15/6	0.17	6	2.55 GHz 3.5 GHz	15
	Antena Propuesta	6-7.5 dBi	20x5.75	0.005	8	2.4 GHz 5GHz	21

Tabla 4.4. Comparación de la antena propuesta con las publicaciones existentes

4.1.3 Análisis de la generación de Beamforming o haces conformados de la antena MIMO propuesta

Las agrupaciones de antenas tienen la ventaja de poder modificar el diagrama de radiación según la necesidad del usuario. Esto lo logra combinando las señales en fase y amplitud para que se genere una nueva señal con mejores características en la mayoría de los casos.

Como se verá más adelante se muestran los diagramas de radiación generados por las antenas que componen la antena MIMO propuesta. Cada antena tiene una ganancia directiva de entre 7.08 dBi para Ant₁ y 7.28 dBi para Ant₂ para la frecuencia de 2.4 GHz y de entre 6.14 dBi para Ant₁ y 7.52 dBi para Ant₂ para la frecuencia de 5 GHz. En la tabla 4.5 se mostrarán los

diferentes diagramas de radiación generados por las antenas.

Los diagramas de la radiación mostrados en la tabla 4.5 a-d, corresponden a las antenas Ant₁ y Ant₂. Como la distribución de las antenas son simétricas, los diagramas de radiación de Ant₄, Ant₅, y Ant₈ serán iguales al de Ant₁ y los diagramas de radiación de Ant₃, Ant₆ y Ant₇ serán iguales al de Ant₂, la diferencia está en la dirección del diagrama de radiación. La organización de las antenas se puede ver en la figura 3.11.

La mayor parte de la energía del diagrama de radiación está dirigida hacia la parte superior de la superficie de la carcasa del teléfono inteligente, con pequeños rasgos de energía dirigidos hacia la parte inferior para la frecuencia de 2.4 GHz como se observa en la tabla 4.5a y 4.5b. La distribución que muestra el diagrama de radiación puede cubrir tranquilamente toda la superficie.

Para los 5 GHz gran parte de la energía radiada se centra en la parte superior de la carcasa, cubriendo de igual forma toda la superficie tendiendo a dirigirse hacia los lados, como se observa en la tabla 4.5c y 4.5d.

4.1.3.1 Beamforming con dos elementos radiantes

Para la generación de beamforming se combinaron las señales de las antenas, la primera parte se muestra el comportamiento que tendrán la agrupación de antenas de dos de los elementos radiantes. La primera generación se hará para la Ant₁, Ant₂, Ant₃ y Ant₅ que según la distribución mostrada en la figura 3.11 están en el mismo lado.

Si comparamos con los diagramas de radiación de la tabla 4.5 a-d, podemos notar que el lóbulo principal se encuentra más focalizado en una dirección específica, por sencillez vemos que se encuentran en la misma dirección tanto para la antena individual en la agrupación tal y como se observa en la tabla 4.5e y 4.5f. La directividad en cada caso se nota un aumento notorio de 8.1 *dBi* y 9.25 *dBi*.

En el caso de las antenas Ant₁ y Ant₅ se genera un diagrama de radiación distinto, el diagrama se direcciona a cuatro puntos así como se observa en la tabla 4.5g, formando un diagrama casi omnidireccional, aunque la directividad se redujo a 5.25 *dBi*.

4.1.3.2 Beamforming con cuatro elementos radiantes

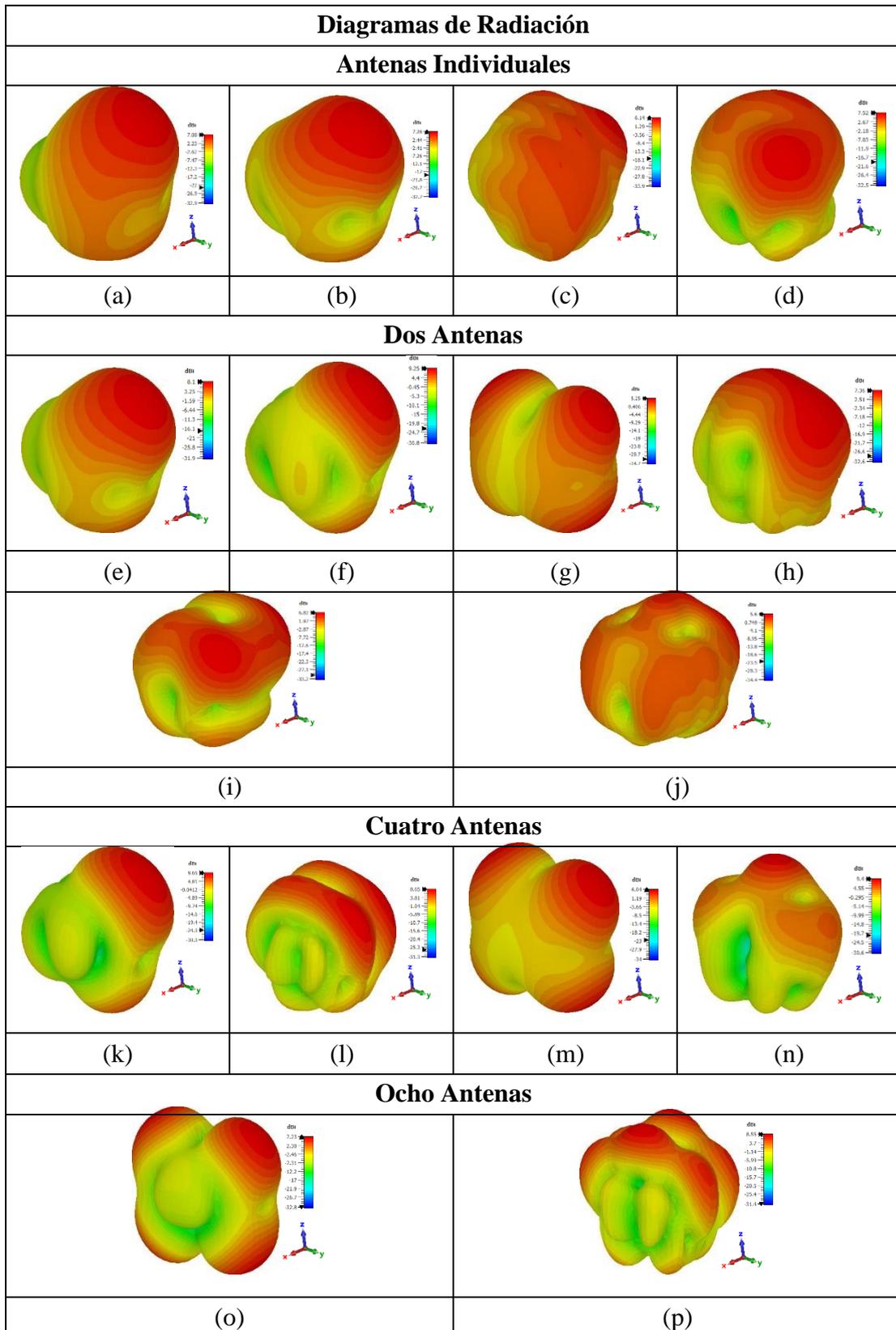
Los cambios que se obtienen al combinar cuatro de los ocho elementos radiantes se observan en la tabla 4.5 k-n. Generando una directividad de 9.66 *dBi* y de 8.66 *dBi*, valores mayores que la directividad obtenida al generar la agrupación con 2 dos elementos radiantes, tal y como se observa en la tabla 4.5k y 4.5l con las antenas Ant₁, Ant₂, Ant₃ y Ant₄.

Los diagramas de radiación muestran que el haz generado por la agrupación de las antenas Ant₁, Ant₂, Ant₅ y Ant₆, se ve más direccionado a un punto específico, si comparamos con los diagramas obtenidos en las figuras anteriores será más notorio el cambio. En el caso de generación de beamforming como se muestra en la tabla 4.5m los lóbulos tienen una directividad de 6.04 *dBi* mayores que el obtenido en la generación mostrada en la tabla 4.5g.

4.1.3.3 Beamforming con ocho elementos radiantes

En las figuras mostradas en la tabla 4.5o y 4.5p se logra visualizar los cambios que se obtienen al combinar los ocho elementos radiantes que componen la antena MIMO. La directividad obtenida a la frecuencia de 2.4 GHz es 7.23 *dBi* y para la frecuencia de 5 GHz es de 8.55 *dBi* mostrando más directividad que las agrupaciones antes mostradas.

Tabla 4.5. Diagramas de radiación obtenidos de la generación de beamforming con los elementos radiantes que conforman la Antena MIMO: a) Ant₁ a 2.4 GHz, b) Ant₂ a 2.4 GHz, c) Ant₁ a 5 GHz, d) Ant₂ a 5 GHz, e) Ant₁ y Ant₂ a 2.4 GHz, f) Ant₁ y Ant₃ a 2.4 GHz, g) Ant₁ y Ant₅ a 2.4 GHz, h) Ant₁ y Ant₅ a 5 GHz, i) Ant₂ y Ant₃ a 5 GHz, j) Ant₁ y Ant₅ a 5 GHz, k) Ant₁, Ant₂, Ant₃ y Ant₄ a 2.4 GHz, l) Ant₁, Ant₂, Ant₃, Ant₄ a 5 GHz, m) Ant₁, Ant₂, Ant₅, Ant₆ a 2.4 GHz, n) Ant₁, Ant₂, Ant₅, Ant₆ a 5 GHz, o) 2.4 GHz y p) 5 GHz



4.1.4 Análisis del rendimiento de la agrupación de antenas para Tecnología MIMO simulada.

A continuación, se muestra el estudio estadístico realizado a la agrupación de antenas simulada, el estudio se realizó con los datos obtenidos del simulador electromagnético CST Studio Suite, donde se evaluará los valores que corresponden al coeficiente de reflexión.

4.1.4.1 Prueba de hipótesis para la frecuencia de operación de 2.4 GHz

Prueba de hipótesis:

H_0 = El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente igual a -10 dB.

H_1 = El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente inferior a -10 dB.

Regla de decisión:

Si p-valor < 0.05, se rechaza H_0

Si p-valor \geq 0.05, se acepta H_0 y se rechaza H_1

En la figura 4.26 podemos observar que se encuentran tres datos importantes que es el valor mínimo, el máximo y la media, donde el más importante a analizar será el valor de la media, que da un valor de -13.37680, que si comparamos con el valor puesto en la prueba de hipótesis se puede rechazar la hipótesis nula, pero no estaría estadísticamente correcto realizar esta afirmación sin un estudio matemático más detallado. Para esto se necesitará realizar una prueba T-Student para una muestra cómo se observa en la figura 4.27

Para poder realizar alguna afirmación debemos observar la figura 4.27, y continuamos con el

Estadísticos descriptivos							
	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza
Coefficiente de reflexion a 2.4 GHz	169	28,02	-31,98	-3,96	-13,3768	4,56332	20,824
N válido (por lista)	169						

Figura. 4.26. Estadístico descriptivo para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 0						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
Coeficiente de reflexion a 2.4 GHz	-38,108	168	,000	-13,37680	-14,0698	-12,6838

Figura. 4.27. Prueba para una muestra para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz

siguiente análisis. Como $2 p\text{-valor} = 2(0,000) = 0 < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula de la prueba a una cola, es decir, se acepta la hipótesis alternativa $H1$: El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente inferior a -10 dB .

En el histograma mostrado en la figura 4.28 podemos observar cómo se distribuyen los datos del coeficiente de reflexión, donde la barra más pronunciada representa los valores mayores incidencia y mientras este disminuye serán valores menos repetitivos. Podemos observar que también existe casos atípicos que se separan del conjunto de barras.

Otra forma de analizar la distribución de los datos es mediante, un diagrama de cajas, como se observa en la figura 4.29. Las dos líneas que conectan a la caja que se observa en el centro se denominan bigotes. Donde se encuentra el 25 % de los datos a analizar y la caja representa el

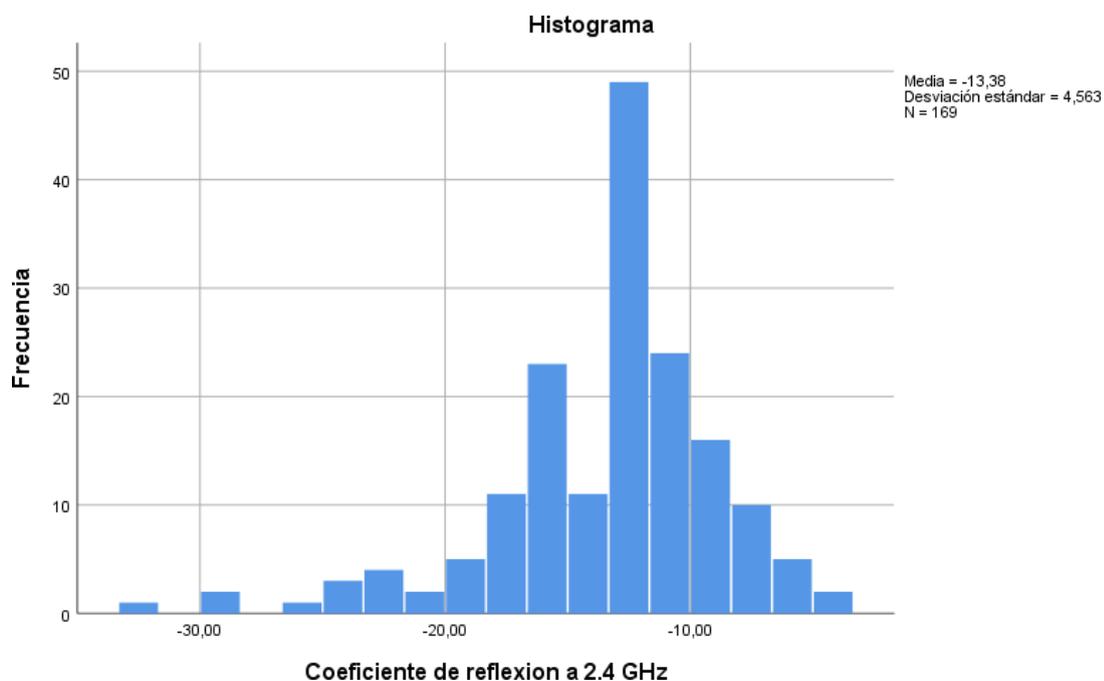


Figura. 4.28. Histograma a la frecuencia de 2.4 GHz.

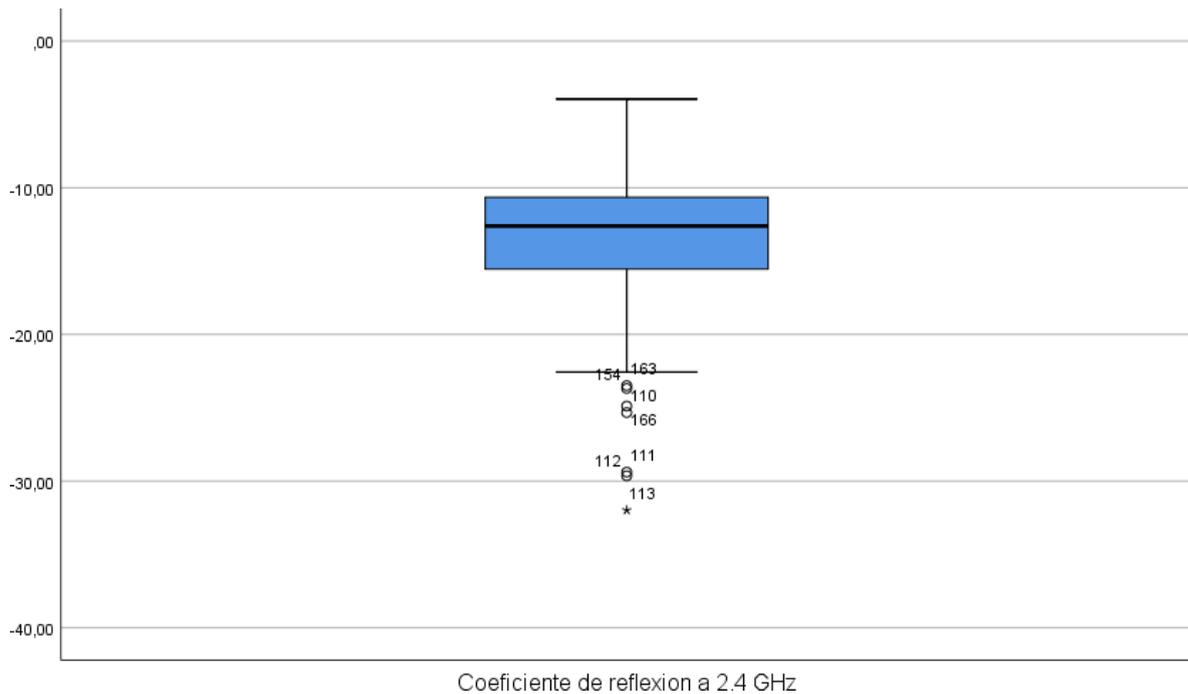


Figura. 4.29. Prueba para una muestra para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz.

50 % de los datos. Si observamos en la parte inferior del bigote se encuentra círculos con ciertos valores, esos como en el histograma son casos atípicos que ocurren muy poca frecuencia, son casos únicos o casos muy dispersos.

4.1.4.2 Prueba de hipótesis para la frecuencia de operación de 5 GHz.

Prueba de hipótesis:

H_0 = El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 5 GHz es estadísticamente igual a -10 dB .

H_1 = El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 5 GHz es estadísticamente inferior a -10 dB .

Regla de decisión:

Si $p\text{-valor} < 0.05$, se rechaza H_0

Si $p\text{-valor} \geq 0.05$, se acepta H_0 y se rechaza H_1

En la figura 4.30 observamos el análisis estadístico descriptivo realizado al coeficiente de refle-

Estadísticos descriptivos

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza
Coefficiente de reflexion a 5 GHz	169	35,03	-36,82	-1,79	-17,3036	6,86048	47,066
N válido (por lista)	169						

Figura. 4.30. Estadístico descriptivo para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 5 GHz.

Como se realizó en el estudio estadístico para el caso de 2.4 GHz, solo se pondrá atención al valor de p-valor y de la media. Con la media se puede concluir que el promedio si es inferior a los -10 dB , pero para reforzar la afirmación se analiza el p-valor.

Prueba para una muestra

	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
Coefficiente de reflexion a 5 GHz	-32,789	168	,000	-17,30361	-18,3454	-16,2618

Figura. 4.31. Prueba para una muestra para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 5 GHz.

Como $2 \text{ p-valor} = 2(0,000) = 0 < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula de la prueba a una cola, es decir, se acepta la hipótesis alternativa H_1 : El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 5 GHz es estadísticamente inferior a -10 dB . Se puede realizar un análisis del comportamiento de los datos si se observa la figura 4.32 y 4.33.

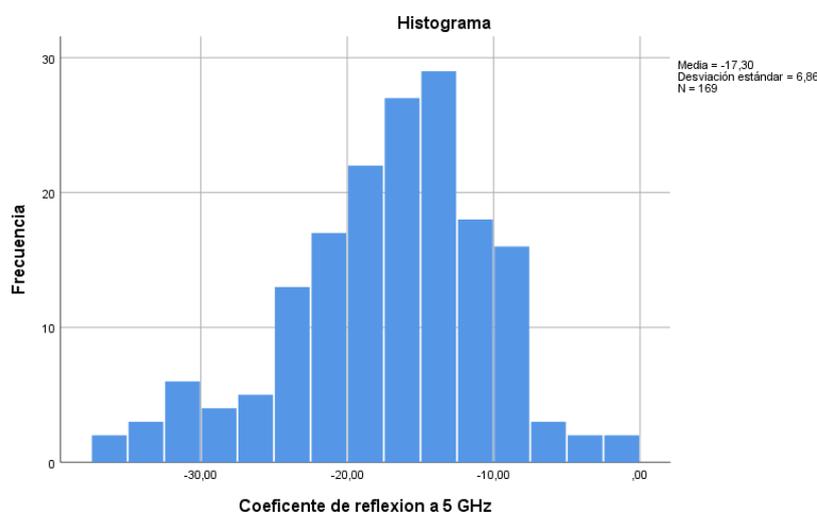


Figura. 4.32. Histograma a la frecuencia de 5 GHz.

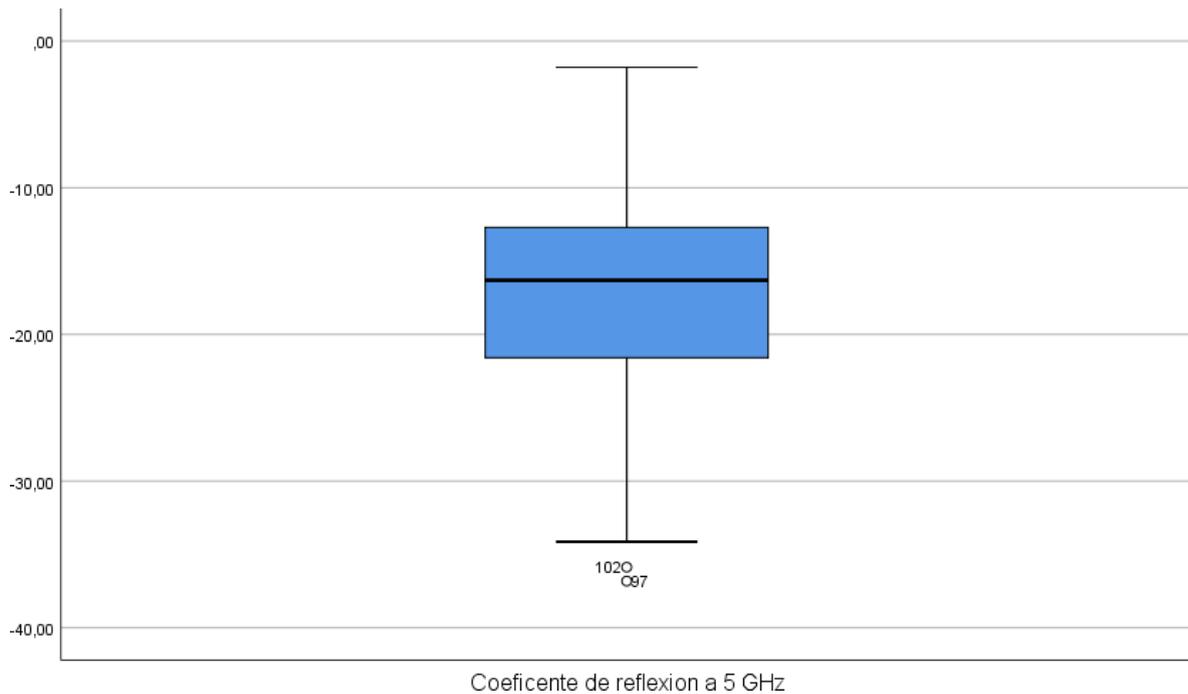


Figura. 4.33. Diagrama de cajas a la frecuencia de 5 GHz.

4.1.4.3 Prueba de hipótesis de comparación de los promedios de las variables S_{11} a 2.4 GHz y a S_{11} 5 GHz

Prueba de hipótesis:

$$H_0 : \mu_{2.4GHz} = \mu_{5GHz}$$

$$H_1 : \mu_{2.4GHz} \neq \mu_{5GHz}$$

H_0 = El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente igual al promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 5 GHz

H_1 = El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente diferente al promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 5 GHz.

Regla de decisión:

Si p-valor < 0.05, se rechaza H_0

Si p-valor \geq 0.05, se acepta H_0 y se rechaza H_1

Estadísticas de grupo

	Frecuencia operacion	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
VAR00001	2.4 GHz	169	-13,3768	4,56332	,35102
	5 GHz	169	-17,3036	6,86048	,52773

Figura. 4.34. Estadístico descriptivo para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz y de 5 GHz.

Finalmente, se realiza el análisis del rendimiento del coeficiente de reflexión, esta vez con las dos frecuencias de operación. Lo primera fue hacer un estudio estadístico descriptivo para poder comparar las medias, donde al observar la figura 4.34 vemos que el promedio a la frecuencia de 5 GHz muestra mejores resultados que a la frecuencia de 2.4 GHz. Para afirmar esto, se realizó una prueba T-Student para muestras independientes tal y como se observa en la figura 4.35.

Como $p\text{-valor} = 0 < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula de la prueba a dos colas, es decir, se acepta la hipótesis alternativa $H_1 : =$ El promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente diferente al promedio de los valores de la variable S_{11} a la frecuencia de operación de 5 GHz. Como se observa que el promedio de 5 GHz es muy inferior al promedio de 2.4 GHz, podemos afirmar que la antena tendrá un rendimiento mejor a la frecuencia de 5 GHz en mucho de los casos. En el diagrama de cajas de la figura

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
VAR00001	Se asumen varianzas iguales	27,101	,000	6,196	336	,000	3,92680	,63381	2,68007	5,17354
	No se asumen varianzas iguales			6,196	292,323	,000	3,92680	,63381	2,67939	5,17422

Figura. 4.35. Pruebale muestra para el coeficiente de reflexión a la frecuencia de 2.4 GHz y de 5 GHz.

4.36 podemos ver que la dispersión a la frecuencia 2.4 GHz es menor que a la frecuencia de 5 GHz, a los 5 GHz la mayor parte de sus datos está situado a valores mejor adaptados que a la frecuencia de 2.4 GHz por ello se concluye que a los 5 GHz se obtendrá un mejor rendimiento.

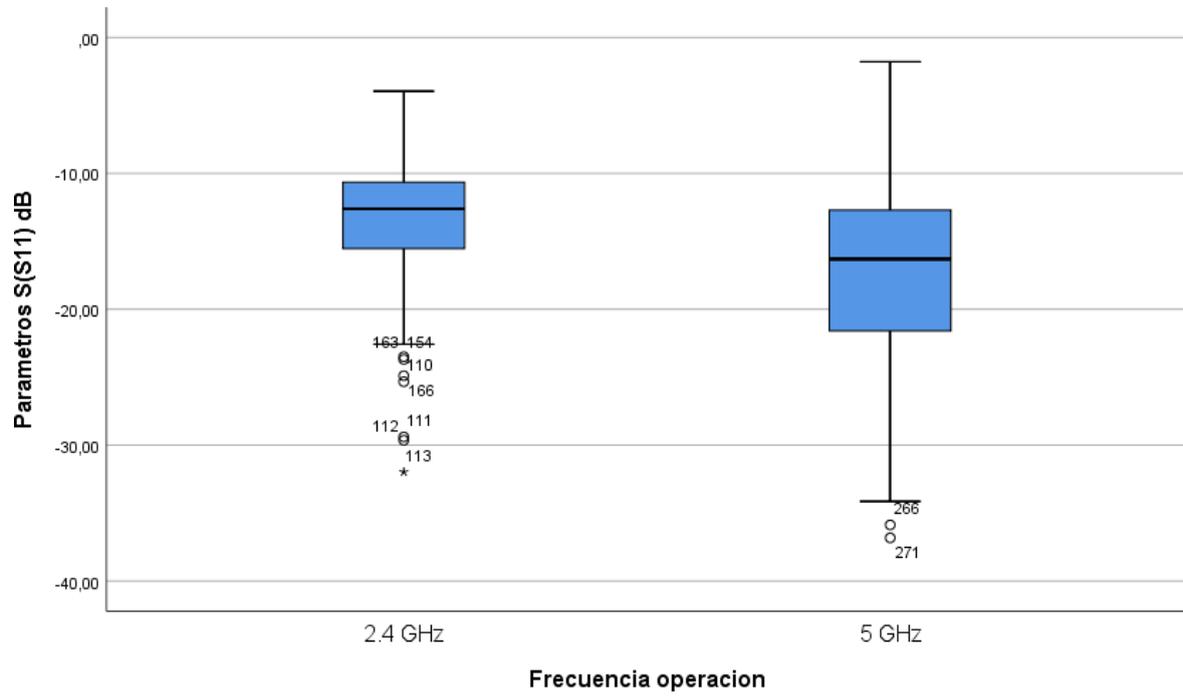


Figura. 4.36. Diagrama de cajas a las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se realizó el diseño de una antena MIMO de ocho elementos radiantes colocados simétricamente en los marcos de la carcasa a las frecuencias Wi-Fi de 2.4 GHz y 5 GHz, en cada marco están impresas cuatro antenas de un tamaño compacto. Durante el diseño de la antena individual se tuvo como objetivo que la antena tenga un tamaño lo más reducido posible para poder colocar el mayor número posible dentro de la dimensión establecida para un teléfono móvil actual de $150 \times 70 \text{ mm}$ y que resuene a las dos frecuencias objetivo.

Se logró realizar el diseño de la antena individual con una dimensión de $21.5 \times 3.75 \text{ mm}$ por antena, con un coeficiente de reflexión de -13.17 dB para la frecuencia de 2.4 GHz y de 19.62 dB para la frecuencia de 5 GHz, por casualidad la directividad obtenida es de 4.05 dBi para ambas frecuencias de operación.

Lo siguiente fue realizar la agrupación de antenas característica de la tecnología MIMO, donde se presentó el primer inconveniente, que era agrupar los elementos radiantes con un bajo acoplamiento mutuo. Para este caso no se tomó en cuenta la teoría de agrupación de antenas porque las dimensiones mínimas sugeridas no permitían acomodar más de dos antenas por marco, como ya sabemos se colocaron cuatro por cada marco.

Por ellos se realizó un estudio sobre las estructuras de desacoplamiento que permitían agrupar los elementos radiantes con bajo acoplamiento mutuo, durante el estudio nació la idea de colocar pequeñas tiras en el centro de cada antena, lo que redujo en gran medida el acoplamiento mutuo obtenido inicialmente con valores superiores a los -20 dB .

Finalmente, se logró obtener una agrupación antenas que resuene a las frecuencias esperadas con un coeficiente de reflexión -21 dB para la frecuencia de 2.4 GHz con una directividad de 7.08 dBi para Ant_1 y de 7.28 dBi para Ant_2 . Y un coeficiente de reflexión de -24 dB para la frecuencia de 5 GHz con una directividad de 6.14 dBi para Ant_1 y de 7.52 para Ant_2 .

5.2 Recomendaciones

Realizar un estudio muy detallado sobre la característica de la antena MIMO, poniendo especial cuidado a las dimensiones ideales para una antena a las frecuencias deseadas con mirada fija a la cantidad de antenas que se desean implementar. Comprender que los modelos pueden variar una vez ya obtenido el diseño final de la antena individual, ya que no en todos los casos (en muchas investigaciones podemos observar que muchos de ellos conservan el mismo diseño hasta el final) pueden mantener su estructura inicial.

Probar todos los métodos de estructuras de desacoplamiento investigados para poder finalmente diseñar una estructura que se ajuste a la agrupación de antenas con el fin de obtener los valores más bajos de acoplamiento mutuo permitido.

Bibliografía

- [1] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.
- [2] A. Arbabi and S. Safavi-Naeini, “Maximum gain of a lossy antenna,” *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 60, no. 1, pp. 2–7, 2011.
- [3] M. Reckeweg and C. Rohner, “Antenna basics white paper,” *Rohde Schwarz*, vol. 31, 2015.
- [4] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [5] M. A. Matin, *Wideband, multiband, and smart reconfigurable antennas for modern wireless communications*. IGI Global, 2015.
- [6] G. S. Baghel, M. Swati, and S. Ghosh, “Mimo antennas: A 5g communication perspective,” in *5G and Beyond Wireless Systems: PHY Layer Perspective*. Springer, 2020, pp. 1–19.
- [7] E. Ali, M. Ismail, R. Nordin, and N. F. Abdulah, “Beamforming techniques for massive mimo systems in 5g: overview, classification, and trends for future research,” *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 18, pp. 753–772, 2017.
- [8] A. Biswas and V. R. Gupta, “Design and development of low profile mimo antenna for 5g new radio smartphone applications,” *Wireless Personal Communications*, vol. 111, pp. 1695–1706, 2020.
- [9] L. Sun, Y. Li, Z. Zhang, and Z. Feng, “Wideband 5g mimo antenna with integrated orthogonal-mode dual-antenna pairs for metal-rimmed smartphones,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 4, pp. 2494–2503, 2019.
- [10] L. Chang, Y. Yu, K. Wei, and H. Wang, “Polarization-orthogonal co-frequency dual antenna pair suitable for 5g mimo smartphone with metallic bezels,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 8, pp. 5212–5220, 2019.
- [11] N. Ojaroudi Parchin, H. Jahanbakhsh Basherlou, Y. I. Al-Yasir, A. M. Abdulkhaleq, M. Patwary, and R. A. Abd-Alhameed, “A new cpw-fed diversity antenna for mimo 5g smartphones,” *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 261, 2020.
- [12] N. O. Parchin, Y. I. A. Al-Yasir, A. H. Ali, I. Elfergani, J. M. Noras, J. Rodriguez, and

- R. A. Abd-Alhameed, "Eight-element dual-polarized mimo slot antenna system for 5g smartphone applications," *IEEE access*, vol. 7, pp. 15 612–15 622, 2019.
- [13] M. A. El-Hassan, A. E. Farahat, and K. F. Hussein, "Millimetric-wave quad-band mimo antennas for future generations of mobile communications," *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 95, pp. 41–60, 2022.
- [14] X.-T. Yuan, W. He, K.-D. Hong, C.-Z. Han, Z. Chen, and T. Yuan, "Ultra-wideband mimo antenna system with high element-isolation for 5g smartphone application," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56 281–56 289, 2020.
- [15] D. Serghiou, M. Khalily, V. Singh, A. Araghi, and R. Tafazolli, "Sub-6 ghz dual-band 8×8 mimo antenna for 5g smartphones," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 9, pp. 1546–1550, 2020.
- [16] Z. Ren, A. Zhao, and S. Wu, "Mimo antenna with compact decoupled antenna pairs for 5g mobile terminals," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 1367–1371, 2019.
- [17] Á. C. Aznar, J. R. Robert, J. M. R. Casals, L. J. Roca, S. B. Boris, and M. F. Bataller, *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.
- [18] P. Sharma, R. N. Tiwari, P. Singh, P. Kumar, and B. K. Kanaujia, "Mimo antennas: Design approaches, techniques and applications," *Sensors*, vol. 22, no. 20, p. 7813, 2022.
- [19] X. Tang, Z. Yao, Y. Li, W. Zong, G. Liu, and F. Shan, "A high performance uwb mimo antenna with defected ground structure and u-shape branches," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 31, no. 2, p. e22270, 2021.
- [20] R. Yang, S. Xi, Q. Cai, Z. Chen, X. Wang, and G. Liu, "A compact planar dual-band multiple-input and multiple-output antenna with high isolation for 5g and 4g applications," *Micromachines*, vol. 12, no. 5, p. 544, 2021.
- [21] R. N. Tiwari, P. Singh, B. K. Kanaujia, and K. Srivastava, "Neutralization technique based two and four port high isolation mimo antennas for uwb communication," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 110, p. 152828, 2019.
- [22] A. M. Saadh, P. Ramaswamy, and T. Ali, "A cpw fed two and four element antenna with reduced mutual coupling between the antenna elements for wireless applications," *Applied Physics A*, vol. 127, pp. 1–18, 2021.

- [23] T. Maturi and B. Harikrishna, “Electronic band-gap integrated low mutual coupling dual-band mimo antenna,” *International Journal of Electronics*, vol. 107, no. 7, pp. 1166–1176, 2020.
- [24] R. N. Tiwari, P. Singh, B. K. Kanaujia, and P. Kumar, “Compact circularly polarized mimo printed antenna with novel ground structure for wideband applications,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 31, no. 8, p. e22737, 2021.
- [25] P. Kim-Thi, H. H. Tran, and T. T. Le, “Circularly polarized mimo antenna utilizing parasitic elements for simultaneous improvements in isolation, bandwidth and gain,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 135, p. 153727, 2021.
- [26] S. N. Islam and S. Das, “Dual-band cpw fed mimo antenna with polarization diversity and improved gain,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 4, p. e22128, 2020.
- [27] L. Boccia and O. Breinbjerg, “Antenna basics,” *Space Antenna HandBook*, pp. 1–35, 2012.
- [28] A. A. Kishk, “Fundamentals of antennas,” in *Antennas for base stations in wireless communications*. The McGraw Hill Companies, 2009, vol. 1, p. 13.
- [29] W. L. Stutzman, “Estimating directivity and gain of antennas,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 7–11, 1998.
- [30] T. Cantabrana Martínez, “Caracterización del canal radioeléctrico en el interior de vagones de transporte en el sector ferroviario,” 2013.
- [31] T. A. Milligan, *Modern antenna design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [32] E. Fritz Andrade, “Evaluación del desempeño de arreglos de antenas para comunicaciones mediante dos coeficientes,” 2021.
- [33] R. Mondal, P. S. Reddy, D. C. Sarkar, and P. P. Sarkar, “Investigation on mimo antenna for very low ecc and isolation characteristics using fss and metal-wall,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 135, p. 153708, 2021.
- [34] A. Krumbein, “Understanding the basics of mimo communication technology,” *Southwest Antennas*, 2016.

- [35] J. M. Manzano, “Análisis y diseño de un array de antenas en tecnología microstrip,” *Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig*, 2020.
- [36] P. White and G. L. Reil, “Millimeter-wave beamforming: Antenna array design choices & characterization white paper,” *Rohde-Schwarz-Ad. Com*, 2016.
- [37] A. M. Gonsai and N. N. Soni, “Wireless network: Standards and its applications,” 2005.
- [38] W.-F. Primer, “Overview of the 802.11 physical layer and transmitter measurements,” *Beaverton: Tektronix Inc*, pp. 4–7, 2013.
- [39] S. Banerji and R. S. Chowdhury, “On iee 802.11: wireless lan technology,” *arXiv preprint arXiv:1307.2661*, 2013.
- [40] P. B. Nayak, R. Endluri, S. Verma, and P. Kumar, “Compact dual-band antenna for wlan applications,” in *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2013, pp. 1381–1385.
- [41] Y.-S. Wang, M.-C. Lee, and S.-J. Chung, “Two pifa-related miniaturized dual-band antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 805–811, 2007.
- [42] M. K. Sharma, M. Kumar, and J. Saini, “Design and analysis of a compact uwb-mimo antenna with improved isolation for uwb/wlan applications,” *Wireless Personal Communications*, vol. 119, no. 4, pp. 2913–2928, 2021.
- [43] A. K. Esnagari and B. Anantha, “A compact microstrip-line fed meandered inverted-f mimo antenna,” in *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [44] J. Y. Deng, Z. J. Wang, J. Y. Li, and L. X. Guo, “A dual-band mimo antenna decoupled by a meandering line resonator for wlan applications,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 3, pp. 759–765, 2018.
- [45] J. Deng, J. Li, L. Zhao, and L. Guo, “A dual-band inverted-f mimo antenna with enhanced isolation for wlan applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2270–2273, 2017.
- [46] H.-S. Fang, C.-Y. Wu, J.-S. Sun, and J.-T. Huang, “Design of a compact mimo antenna with pattern diversity for wlan application,” *Microwave and Optical Technology Letters*,

vol. 59, no. 7, pp. 1692–1697, 2017.

- [47] S. Nandi and A. Mohan, “A compact dual-band mimo slot antenna for wlan applications,” *IEEE antennas and wireless propagation letters*, vol. 16, pp. 2457–2460, 2017.
- [48] N. Ojaroudi Parchin, H. Jahanbakhsh Basherlou, and R. A. Abd-Alhameed, “Design of multi-mode antenna array for use in next-generation mobile handsets,” *Sensors*, vol. 20, no. 9, p. 2447, 2020.
- [49] K. Du, Y. Wang, and Y. Hu, “Design and analysis on decoupling techniques for mimo wireless systems in 5g applications,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 8, p. 3816, 2022.
- [50] X.-x. Zhang, A.-d. Ren, and Y. Liu, “Decoupling methods of mimo antenna arrays for 5g applications: a review,” *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 62–71, 2020.
- [51] N. Ojaroudi Parchin, H. Jahanbakhsh Basherlou, Y. I. Al-Yasir, A. Ullah, R. A. Abd-Alhameed, and J. M. Noras, “Multi-band mimo antenna design with user-impact investigation for 4g and 5g mobile terminals,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 456, 2019.
- [52] N. O. Parchin, H. J. Basherlou, Y. I. Al-Yasir, A. Ullah, R. A. Abd-Alhameed, and J. M. Noras, “Frequency reconfigurable antenna array with compact end-fire radiators for 4g/5g mobile handsets,” in *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*. IEEE, 2019, pp. 204–207
- [53] H. J. Basherlou, N. O. Parchin, and R. A. Abd-Alhameed, “Mimo monopole antenna design with improved isolation for 5g wifi applications,” *International Journal of Electrical and Electronic Science*, vol. 7, no. 12, pp. 1–5, 2019.
- [54] N. O. Parchin, H. J. Basherlou, I. Y. Al-Yasir, M. Sajedin, J. Rodriguez, and R. A. Abd-Alhameed, “Multi-mode smartphone antenna array for 5g massive mimo applications,” in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2020
- [55] J. Mazloum, S. A. Ghorashi, M. Ojaroudi, and N. Ojaroudi, “Compact triple-band s-shaped monopole diversity antenna for mimo applications,” *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, pp. 975–980, 2015.
- [56] U. Ahmad, S. Ullah, U. Rafique, D.-Y. Choi, R. Ullah, B. Kamal, and A. Ahmad, “Mimo antenna system with pattern diversity for sub-6 ghz mobile phone applications,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 149 240–149 249, 2021.

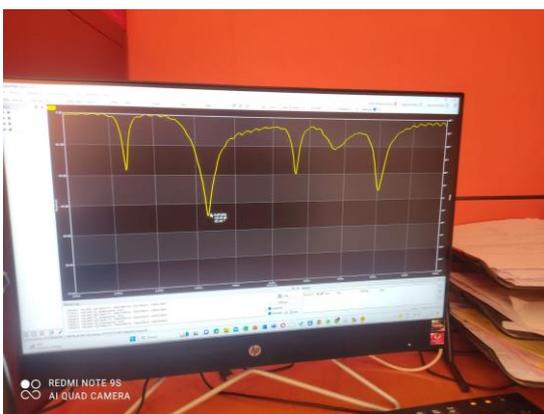
ANEXOS



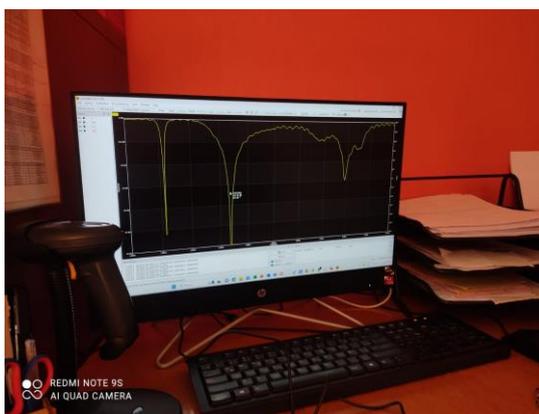
(a)



(b)



(c)



(d)