



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Diseño de un sistema de antenas MIMO para una plataforma de un UAV usando Modos Característicos para mejorar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz.

Trabajo de Titulación para optar al título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

Autor:

Tommy Steven Vallejo Guizado

Tutor:

Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda Ph.D.

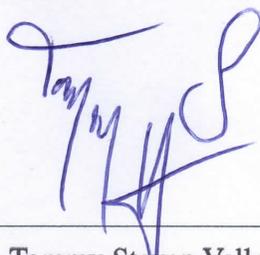
Riobamba, Ecuador. 2025.

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Tommy Steven Vallejo Guizado**, con cédula de ciudadanía **1600683997**, autor del trabajo de investigación titulado: **Diseño de un sistema de antenas MIMO para una plataforma de un UAV usando Modos Característicos para mejorar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz.**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto 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, 31 de enero de 2025

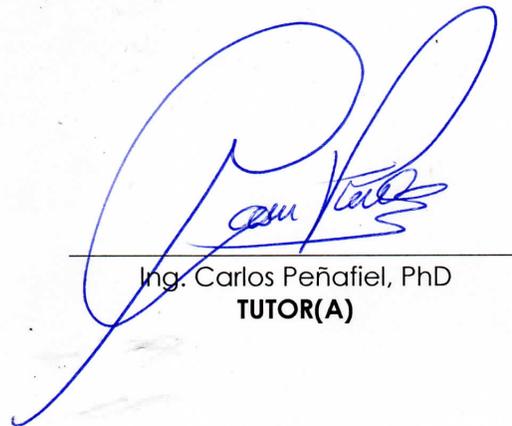


Tommy Steven Vallejo Guizado
C.I:1600683997



ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 28 días del mes de Noviembre de 2024, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **TOMMY STEVEN VALLEJO GUIZADO** con CC: **1600683997**, de la carrera **TELECOMUNICACIONES** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado "DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANTENAS MIMO PARA UNA PLATAFORMA DE UN UAV USANDO MODOS CARACTERÍSTICOS PARA MEJORAR LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN A LA FRECUENCIA DE 2.4GHZ.", por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Ing. Carlos Peñafiel, PhD
TUTOR(A)

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL

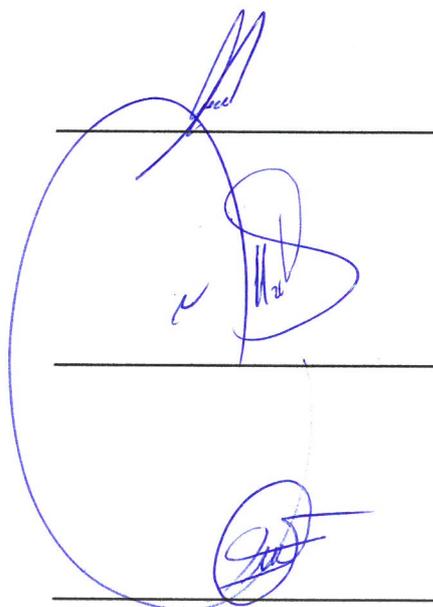
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación «**Diseño de un sistema de antenas MIMO para una plataforma de un UAV usando Modos Característicos para mejorar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz.**» por **Tommy Steven Vallejo Guizado**, con cédula de identidad número **1600683997**, bajo la tutoría del **Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda PhD**, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchado la sustentación por parte de su autor, no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 31 de enero del 2025.

PhD Daniel Santillán Haro
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

PhD Marlon Basantes Valverde
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

PhD Antonio Meneses Freire
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



The image shows three horizontal lines, each with a blue ink signature written above it. The top signature is a cursive 'D' with a long vertical stroke. The middle signature is a cursive 'M' with a large loop. The bottom signature is a cursive 'A' with a large loop.



CERTIFICACIÓN

Que, Tommy Steven Vallejo Guizado con CC: 1600683997, estudiante de la Carrera Telecomunicaciones, Facultad de INGENIERÍA; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "DISEÑO DE UN SISTEMA DE ANTENAS MIMO PARA UNA PLATAFORMA DE UN UAV USANDO MODOS CARACTERÍSTICOS PARA MEJORAR LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN A LA FRECUENCIA DE 2.4 GHZ.", cumple con el 3 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 29 de enero de 2025



Firmado electrónicamente por:
CARLOS RAMIRO
PEÑAFIEL OJEDA

Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda, PhD.
TUTOR

DEDICATORIA

Para mi madre.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su constante guía. A mi madre, Alicia Guizado, por su inquebrantable apoyo, confianza y fe en mí. A mis amigos, por sus consejos. A la República del Ecuador, por hacer posible una educación accesible y gratuita. A la comunidad científica y a los divulgadores, cuyo esfuerzo ha permitido la difusión global del conocimiento.

Al final del día, no importa quién sea, qué haga o qué posea; siempre estaré agradecido por la bondad que otros me ofrezcan.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA

DERECHOS DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I	15
1.1. INTRODUCCIÓN	15
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.3. Justificación	17
1.4. Objetivos	18
1.4.1. Objetivo general	18
1.4.2. Objetivos específicos	18
CAPÍTULO II	19
2.1. Estado del arte	19
2.2. Fundamentación teórica	20
2.2.1. Antenas	20
2.2.2. Teoría de modos característicos	21
CAPÍTULO III	25
3.1. Metodología	25
3.1.1. Tipo de investigación	25
3.1.1.1. Investigación exploratoria	25
3.1.1.2. Investigación experimental	25

3.1.2.	Métodos de Investigación	25
3.1.2.1.	Método adaptativo	25
3.1.2.2.	Método experimental	25
3.1.3.	Técnica de investigación	26
3.1.3.1.	Estudio bibliográfico	26
3.1.3.2.	Simulación	26
3.1.4.	Procedimiento	26
3.1.5.	Población y muestra	27
3.1.5.1.	Población	27
3.1.5.2.	Muestra	27
3.1.6.	Operacionalización de variables	28
3.2.	Modelado y escalado de una plataforma de un UAV	28
3.3.	Diseño de la antena propuesta	30
3.4.	Diseño del sistema MIMO	34
3.5.	Evaluación del coeficiente de reflexión de las antenas a una frecuencia de 2.4 GHz en función de su ubicación.	35
CAPÍTULO IV		38
4.1.	Resultados y discusión	38
4.1.1.	Análisis de modos característicos de la plataforma	38
4.1.1.1.	Distribución de corrientes características	38
4.1.1.2.	Diagramas de radiación	39
4.1.2.	Análisis de la antena propuesta	40
4.1.3.	Análisis del sistema MIMO	41
4.1.4.	Análisis de las antenas a una frecuencia de 2.4 GHz en función de su ubicación	45
4.1.4.1.	Análisis del coeficiente de reflexión a una frecuencia de 2.4 GHz	45
4.1.4.2.	Análisis del ancho de banda a una frecuencia de 2.4 GHz	49
4.1.4.3.	Análisis de la ganancia a una frecuencia de 2.4 GHz	53
CAPÍTULO V		59
5.1.	Conclusiones	59
5.2.	Recomendaciones	60
BIBLIOGRAFÍA		67

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Operacionalización de variables	28
3.2. Parámetros dimensionales de la antena propuesta.	33
3.3. Coordenadas de las ubicaciones de la antena según la Figura 3.10.	37
4.4. Agrupaciones de antenas entre amplitud (A) y desplazamiento de fase ($\Delta\phi$).	43
4.5. Comparativa entre antenas integradas en vehículos.	45
4.6. Estadísticas descriptivas del coeficiente de reflexión	46
4.7. Estadísticas descriptivas del ancho de banda.	50
4.8. Estadísticas descriptivas de la ganancia.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Diagrama de bloques, procedimiento del proyecto de investigación.	23
3.2. Diagrama de bloques, procedimiento del proyecto de investigación.	27
3.3. Plataforma modelada, basada en el UAV Matrice 210.	29
3.4. Plataforma con representación del flujo de corrientes características del modo J_3 y longitud de la trayectoria equivalente a $\frac{3}{2}$ de la longitud de onda. . .	30
3.5. Fases de desarrollo de la antena propuesta. (a) Fase 1. (b) Fase 2. (c) Fase 3. (d) Fase 4.	31
3.6. Antena propuesta sin doblez, bosquejo del flujo de corrientes en un elemento radiante.	32
3.7. Dimensiones de la antena propuesta sin curvatura, en función de la Tabla 3.2.	33
3.8. Vista inferior de la plataforma con el sistema MIMO de cuatro antenas integrado.	34
3.9. Vista en perspectiva de la plataforma con el sistema de antenas MIMO integrado.	35
3.10. Vista superior de la plataforma, que muestra el esquema de las ubicaciones de las antenas.	36
4.11. Ángulos característicos en función de la frecuencia para la plataforma descrita en la Figura 3.4.	38
4.12. Distribución de corrientes características a una frecuencia de 2.4 GHz. (a) Modo J_2 . (b) Modo $J_3 - Ant.$ (c) Modo $J_3 - Ltx.$	39
4.13. Diagramas de radiación a una frecuencia de 2.4 GHz. (a) Modo J_2 . (b) Modo $J_3 - Ant.$ (c) Modo $J_3 - Ltx.$	40
4.14. Comparación de los coeficientes de reflexión para las fases del diseño mostradas en la Figura 3.5.	40
4.15. Diagrama de radiación de la antena propuesta a 2.27 GHz.	41
4.16. Coeficiente de reflexión y transmisión del sistema MIMO.	42
4.17. Coeficiente de evaluación de envolvente del sistema MIMO.	42
4.18. Diagrama de radiación y directividad en coordenadas polares a una frecuencia de 2.4 GHz. (a) Distribución del patrón de radiación similar al modo J_2 . (b) Patrón de radiación similar al modo $J_3 - Ltx.$ (c) Patrón de radiación similar al modo $J_3 - Ant.$ (d) Configuración de agrupación de las antenas 1 y 2. (e) Configuración de agrupación de las antenas 1 y 3. (f) Configuración de agrupación de las antenas 1 y 4. (g) Agrupación de las antenas 1 y 2 con un desfase de 180° . (h) Agrupación de las antenas 1 y 3 con un desfase de 180° . (i) Agrupación de las antenas 1 y 4 con un desfase de 180° . (j) Patrón de radiación de la antena 1 alimentada de forma individual.	44
4.19. Tendencia del coeficiente de reflexión según la ubicación.	46
4.20. Histograma del coeficiente de reflexión.	47
4.21. Diagrama de caja del coeficiente de reflexión.	47

4.22. Ajuste del modelo polinómico del coeficiente de reflexión en función de la ubicación.	48
4.23. Análisis de residuos del modelo polinómico del coeficiente de reflexión en función de la ubicación.	49
4.24. Tendencia del ancho de banda según la ubicación.	50
4.25. Histograma del ancho de banda.	51
4.26. Diagrama de caja del ancho de banda.	51
4.27. Ajuste del modelo polinómico del ancho de banda en función de la ubicación.	52
4.28. Análisis de residuos del modelo polinómico del ancho de banda en función de la ubicación.	53
4.29. Diagrama de radiación en coordenadas polares a una frecuencia de 2.4 GHz.	54
4.30. Tendencia de la ganancia a 84° según la ubicación.	54
4.31. Histograma de la ganancia a 84°.	55
4.32. Diagrama de caja de la ganancia a 84°.	56
4.33. Ajuste del modelo polinómico de la ganancia en función de la ubicación.	57
4.34. Análisis de residuos del modelo polinómico de la ganancia en función de la ubicación.	58

RESUMEN

Las investigaciones en integración de antenas en vehículos aéreos no tripulados (UAV) son escasas, y se cuestiona el rendimiento de las antenas en este tipo de vehículos, con el objetivo de diseñar e integrar un sistema de antenas con tecnología Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) para una plataforma de un UAV usando la Teoría de Modos Característicos (TCM) para mejorar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz. Para el análisis de modos característicos (CMA) se modeló una plataforma con base en el UAV Matrice 210, se escaló en función con una zona para proyectar las corrientes características J_3 . A través de los ángulos característicos se determinaron los modos significativos con sus respectivas corrientes características y diagramas de radiación. A través de elementos de acoplamiento inductivo (ICE) se diseñó la antena propuesta; esta se integró en la plataforma y se formó un sistema MIMO de cuatro antenas. Se evaluó el sistema MIMO y se confirmó su correcto funcionamiento a través de parámetros como el coeficiente de reflexión, coeficiente de transmisión y el coeficiente de correlación de envolvente. Se registró un deterioro en el coeficiente de transmisión de las antenas al trasladar su ubicación. Sin embargo, en la mejor ubicación la antena propuesta innovó al presentar un ancho de banda amplio, en contraste a una integración arbitraria de antenas; se mejoraron los parámetros de transmisión definidos.

Palabras clave: Antenas, Coeficiente de Reflexión, MIMO, TCM, UAV.

ABSTRACT

Research on antenna integration in unmanned aerial vehicles (UAVs) is limited, and there are concerns about antenna performance in such vehicles. The goal is to design and integrate an antenna system with Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) technology for a UAV platform, using Characteristic Modes Theory (TCM) to improve transmission parameters at a frequency of 2.4 GHz. For the characteristic mode analysis (CMA), a platform based on the Matrice 210 UAV was modeled, scaled with a zone to project the characteristic currents J_3 . Significant modes were identified through characteristic angles, along with their respective characteristic currents and radiation patterns. Using inductive coupling elements (ICE), the proposed antenna was designed, integrated into the platform, and configured into a four-antenna MIMO system. The MIMO system was evaluated, confirming its correct operation through parameters such as reflection coefficient, transmission coefficient, and envelope correlation coefficient. A decline in the antennas' transmission coefficient was noted when relocating their position. However, in the optimal location, the proposed antenna demonstrated innovation by presenting a wide bandwidth, in contrast to arbitrary antenna integration, and improved the defined transmission parameters.

Keywords: Antennas, MIMO, Reflection Coefficient, TCM, UAV.

Translation reviewer: Andrea Paola Goyes Robalino

Date: 29/01/2025

Signature:



CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

Con el avance de las tecnologías inalámbricas y la creciente demanda de sistemas de antenas, surgen numerosos desafíos en el campo de la automoción [1]. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) tienen una amplia gama de aplicaciones; operan a menudo en entornos inalámbricos congestionados que pueden generar interferencias no deseadas [2]. El análisis de modos característicos (CMA) se aplica en el diseño de sistemas de antenas que aprovechan los modos resonantes de estructuras arbitrarias [3,4], mejorando las propiedades de radiación de antenas montadas en UAV [5].

La teoría de modos característicos (TCM) es una herramienta de diseño eficaz para abordar la resonancia de objetos. Proporciona una visión clara de los fenómenos físicos que contribuyen a la radiación en ausencia de un punto de alimentación; es una teoría prometedora que proporciona pautas para el diseño y modelado de antenas [6].

En el contexto del diseño de un sistema de antenas Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) a una frecuencia de 2.4 GHz integrado en la plataforma de un UAV, el uso de la TCM es esencial para comprender la resonancia de los objetos y cómo aplicar esta teoría de manera eficiente. Este enfoque permite obtener información precisa sobre las características de las antenas y optimizar su diseño y rendimiento.

En vehículos modernos, el rendimiento de las antenas puede verse afectado por los materiales conductores cercanos, produciendo problemas de radiación [7]. No optimizar el rendimiento de las antenas genera problemas que impactan negativamente en la comunicación de estas [8].

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el crecimiento exponencial de las aplicaciones de los UAV, optimizar los sistemas de comunicación para su operación eficiente en diversos entornos se ha vuelto esencial [9]. En particular, la integración de antenas en plataformas metálicas [10] presenta un desafío único debido a la interferencia electromagnética y las distorsiones ocasionadas tanto por materiales conductores [11] como por la geometría compleja de cualquier vehículo [7]. Estos factores influyen en el patrón de radiación [12, 13], lo cual impacta en la zona de cobertura, la velocidad de transmisión de datos y la estabilidad de la conexión. Además, la aplicación o servicio que implique UAV enfrenta problemas, como las desconexiones frecuentes, el ancho de banda limitado y la alta latencia [14].

El diseño de sistemas MIMO se plantea como una solución eficaz para aumentar la velocidad de transmisión de datos y una mayor capacidad de canal [15, 16], aprovechando la irradiación de múltiples modos a través de diferentes excitaciones en una estructura [17].

En este contexto, es necesario aplicar la TCM para analizar y optimizar la interacción entre antenas y estructuras conductoras [18, 19]. Esta metodología permite descomponer los fenómenos electromagnéticos complejos en modos fundamentales, facilitando la identificación de las zonas óptimas para integrar antenas y mejorando significativamente los parámetros de transmisión. A pesar de la eficacia de esta teoría, su implementación en UAV ha sido limitada y no se han explorado completamente sus beneficios para el diseño de sistemas MIMO en estos vehículos.

El presente trabajo busca abordar esta problemática mediante el desarrollo de un sistema de antenas MIMO para un UAV, optimizando su rendimiento a través del CMA y evaluando el impacto de la ubicación de las antenas en función del coeficiente de reflexión de estas. La investigación se centrará en la frecuencia de operación de 2.4 GHz, que es ampliamente utilizada en aplicaciones de telecomunicaciones, y tiene como objetivo mejorar los parámetros de transmisión a través de un diseño que aproveche la geometría del UAV.

1.3 Justificación

El uso de UAV ha experimentado un notable crecimiento en diversas aplicaciones, tales como seguridad [20–22], monitoreo ambiental [23–25], operaciones militares [26, 27] y uso civil [28–33]. Uno de los principales desafíos que enfrentan estos vehículos es garantizar una comunicación eficiente y sin interferencias en entornos congestionados. Para abordar este desafío, es crucial optimizar el sistema de antenas integrado en la estructura del UAV, especialmente cuando se opera en bandas de frecuencia saturadas como la de 2.4 GHz. En casos de uso como la integración de sensores [34] o la recolección de datos [35–37] a través de Internet de las cosas (IoT) [26, 38]. Además, para satisfacer los requisitos de los UAV de un mayor alcance de red y un mayor rendimiento de datos, los UAV adoptan tecnologías MIMO [39].

El diseño de sistemas de antenas para UAV enfrenta múltiples desafíos, debido a que la geometría y los materiales conductores del vehículo influyen en el patrón de radiación de las antenas, lo que puede alterar la comunicación entre transmisores y receptores. En este contexto, la TCM surge para analizar el comportamiento resonante de estructuras conductoras sin requerir su alimentación directa. Esto permite identificar modos significativos, optimizando el rendimiento de las antenas en función de su ubicación.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo aplicar la TCM para el diseño de un sistema de antenas MIMO en un UAV; en este sentido, se pretende evaluar el desempeño para mejorar el diagrama de radiación y el coeficiente de reflexión.

Además, este estudio contribuirá al campo de las telecomunicaciones al proporcionar un enfoque innovador en el diseño de antenas, utilizando la TCM para abordar los desafíos que presentan las estructuras complejas, como las de los UAV. La implementación de este sistema no solo mejorará las capacidades actuales de los UAV, sino que también permitirá una mayor flexibilidad en la integración de tecnologías futuras en estas plataformas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Diseñar un sistema de antenas MIMO para una plataforma de un UAV usando modos característicos para mejorar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz.

1.4.2 Objetivos específicos

- Modelar y escalar en dimensión una plataforma de un vehículo aéreo no tripulado usando el diseño asistido por computador (CAD) y realizar el análisis de modos característicos.
- Diseñar e integrar un sistema de antenas MIMO a 2.4 GHz a la plataforma del vehículo aéreo no tripulado.
- Evaluar el coeficiente de reflexión de las antenas en función de su ubicación.

CAPÍTULO II

2.1 Estado del arte

El avance de las tecnologías inalámbricas y la demanda en aumento de UAV para usos como la recolección de datos [36, 37] han influido en la búsqueda de soluciones de diseño que optimicen la eficacia de las antenas integradas. Afortunadamente, la TCM apoya el estudio de los modos característicos de cualquier estructura, junto con sus propiedades de radiación [40], facilitando la visualización del comportamiento resonante de la plataforma [18].

Diversos estudios han aplicado la TCM en varios vehículos. Por ejemplo, en [40] se analiza un UAV parcialmente metálico mediante el CMA del revestimiento metálico del cuerpo del UAV. Los resultados indican tres modos característicos con diagramas de radiación omnidireccionales y sus respectivas corrientes superficiales. Se diseñó una red de alimentación de cuatro puertos para excitar los modos seleccionados, empleando interruptores y circuitos de acoplamiento para mejorar la directividad. Posteriormente, se presentan dos formaciones de UAV compuestas por nueve UAV idénticos con una agrupación similar a una antena Yagi-Uda. Sin embargo, no se describe la frecuencia de operación de los elementos de acoplamiento electromagnético (ECE), ni el rango de frecuencias del CMA.

En contraste, [41] diseñó y caracterizó de manera experimental un sistema de antenas de alta frecuencia (HF) instaladas en un vehículo anfibia (AV). Las observaciones del CMA se emplearon para establecer los lugares correctos para la instalación de las antenas diseñadas para excitar los modos mediante ECE, ya sean inductivos o capacitivos. Tras ello, se comprobó el diseño a través de un modelo a escala 1:50, consiguiendo una concordancia óptima entre los resultados simulados y obtenidos, evidenciando el adecuado desempeño de las antenas de doble polarización.

Para aeronaves militares, [9] modeló una estructura a funcionar en la banda de HF, reconociendo cuatro modos significativos a 8 MHz a través de análisis modal. Se elaboraron tres antenas, utilizando mezclas de elementos de acoplamiento inductivo (ICE) y capacitivo (CCE) para mejorar la eficiencia.

De manera similar, [19] experimentó con una estructura de metal basada en un avión a una frecuencia de 10 MHz en escala real, consiguiendo seis modos resonantes significativos. Los diagramas de radiación obtenidos, excitados por varios ECE, exhibieron una notable similitud con los patrones producidos por el CMA. No obstante, la investigación no abarca aspectos como el ancho de banda o el coeficiente de reflexión de las antenas.

Finalmente, en [18], se modeló una aeronave a escala real y se aplicó el CMA para identi-

ficar modos significativos con significancia modal superior a 0.707. Mediante el análisis de las corrientes superficiales, se determinaron 16 ubicaciones óptimas para antenas, utilizando ICE para la excitación. Se simplificó la plataforma original a un modelo asimétrico escalado (40:1) para simular el comportamiento resonante entre 1 GHz y 5 GHz, identificándose un modo principal a 3.6 GHz. Un modelo físico validó las simulaciones, mostrando una concordancia notable entre los coeficientes de reflexión simulados y medidos en diversos casos de dirección de haz.

A pesar de que estos estudios muestran progresos notables en la aplicación de la TCM en sistemas de antenas, esta tesis trata sobre la incorporación de antenas en lugares óptimos sobre estructuras conductoras, empleando el coeficiente de reflexión como indicador principal. Se enfoca en utilizar la estructura de un UAV como base para perfeccionar el sistema de antenas a 2.4 GHz, teniendo en cuenta requerimientos particulares de funcionamiento y diseño.

2.2 Fundamentación teórica

2.2.1 Antenas

La antena, elemento esencial de un sistema de radio, se define como un dispositivo que puede radiar y recibir energía electromagnética de una manera eficiente y deseada. Normalmente, está hecha de metal, pero también se pueden utilizar otros materiales [42].

Las propiedades de una antena, como el patrón de radiación y la impedancia de entrada, son las mismas independientemente de que se utilice como antena transmisora o como antena receptora.

Los parámetros de una antena transmisora incluyen impedancia, intensidad de radiación, diagramas de radiación, directividad, polarización y ganancia [43]. Estos parámetros son importantes para determinar la eficiencia y el rendimiento de la antena en transmisiones. No obstante, en este trabajo se hará énfasis en ciertos parámetros de transmisión específicos, como la impedancia de entrada, la directividad y el ancho de banda.

- Impedancia de entrada: Es la relación entre el voltaje y la corriente en su punto de alimentación. Para una transmisión eficiente, la impedancia de la antena debe estar adaptada a la impedancia característica del sistema de transmisión.
- Directividad: Es la capacidad de una antena para concentrar la radiación en una dirección particular.
- Ancho de banda: Es el rango de frecuencias sobre el cual la antena puede operar de

manera eficiente, es decir, transmitir y recibir señales sin una degradación significativa del rendimiento.

En sistemas MIMO, es crucial evaluar la eficiencia de las antenas de forma individual, y también la interacción entre ellas. El principal aspecto a tener en cuenta es el coeficiente de correlación de envolvente (ECC); es una medida de la independencia de las señales entre las diferentes antenas en un sistema MIMO. Un ECC bajo indica que las antenas transmiten señales diferenciadas, lo que maximiza la eficiencia del sistema MIMO y permite una mayor capacidad de transmisión de datos.

La tecnología MIMO ha transformado el ámbito de las comunicaciones inalámbricas al incrementar de manera notable la capacidad y el rendimiento de los sistemas de transmisión. Esta tecnología utiliza múltiples transmisores y receptores para enviar más datos simultáneamente [44]. Una de las principales tendencias en MIMO es el uso de antenas masivas [45], ya que a mayor cantidad de antenas en un dispositivo, mayor será su capacidad de conexión y las velocidades de transmisión de datos. MIMO se emplea en diversas aplicaciones, como dispositivos móviles, conexiones WiFi y cobertura LTE en redes de telefonía móvil. Además, permite conectar varios dispositivos a través de un único enlace utilizando múltiples señales [46].

El diseño de sistemas MIMO se plantea como una solución eficaz para aumentar la velocidad de transmisión de datos y la capacidad del canal [15, 16] aprovechando la irradiación de múltiples modos a través de diferentes excitaciones en una misma estructura [17]. No obstante, la ubicación adecuada de las antenas en plataformas de UAV sigue representando un desafío crítico, ya que las superficies conductoras y la geometría irregular del vehículo afectan los modos resonantes de las antenas, alterando su rendimiento.

2.2.2 Teoría de modos característicos

La TCM aborda la resonancia de objetos, proporcionando una interpretación de los fenómenos físicos que contribuyen a la radiación; esta teoría proporciona pautas para el diseño y ubicación de antenas.

La TCM establece que, para cualquier objeto sin pérdidas, existe un conjunto de funciones características que pueden emplearse para formar una representación modal del campo dispersado por dicho objeto [47]. La TCM permite la descomposición de estas estructuras complicadas en respuestas básicas como la de un dipolo [48]. El CMA ha encontrado aplicaciones en el diseño de sistemas de antenas que explotan los modos resonantes de la estructura de montaje para mejorar las propiedades de radiación en antenas montadas en vehículos [5] o estructuras arbitrarias [3, 4]. Se ha demostrado que el CMA ofrece información física importante sobre el comportamiento de las antenas desde la perspectiva modal y puede ser una

herramienta poderosa para el modelado y diseño de antenas [6]. Los diseños pueden ser evaluados utilizando métodos numéricos computacionales, como el método de los momentos (MoM) [49], el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) [50] y el método de elementos finitos (FEM) [3]; son eficaces para analizar el diseño y predecir las características de radiación [46, 51].

En la TCM, los modos característicos de una estructura están relacionados con su geometría y material. Las corrientes características superficiales y las radiaciones de campo lejano correspondientes son ortogonales entre sí. La corriente característica J_n se emplea para predecir las capacidades modales de radiación y almacenamiento de energía [40] en una superficie PEC de forma arbitraria [10], que se pueden resolver a partir de la siguiente ecuación de valor propio generalizada [13, 48] :

$$\mathbf{X}(\mathbf{J}_n) = \lambda_n \mathbf{R}(\mathbf{J}_n) \quad (2.1)$$

donde \mathbf{R} y \mathbf{X} son las partes reales e imaginarias de la matriz de impedancia del MoM [3, 52], calculada a partir de la ecuación integral de campo eléctrico (EFIF) para cuerpos metálicos [5]. λ_n y \mathbf{J}_n son el valor propio y la corriente característica del n -ésimo modo característico [13, 16].

Los modos característicos forman un conjunto completo de modos ortogonales, que permiten descomponer cualquier corriente inducida y los campos lejanos generados por una fuente externa. De este modo, las corrientes inducidas en una superficie de Conductor Eléctrico Perfecto (PEC) pueden describirse como una combinación lineal de corrientes características [53]:

$$\mathbf{J} = \sum_n a_n \mathbf{J}_n \quad (2.2)$$

El conjunto de corrientes características crea un campo eléctrico característico que contiene un componente tangencial a la superficie del cuerpo [51]. Un ángulo característico modela el ángulo de fase entre una corriente característica y el campo característico asociado [54]. El ángulo característico se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\alpha_n = 180^\circ - \tan^{-1}(\lambda_n) \quad (2.3)$$

Este ángulo de fase permite comprender el comportamiento de los modos cerca de la resonancia. Si la corriente modal y el campo tangencial están desfasados en 180° ($\alpha_n = 180^\circ$),

el modo se encuentra en resonancia externa, lo que implica que la estructura actúa como un radiador eficiente. Por otro lado, cuando el desfase es de 90° o 270° , el modo está en resonancia interna, y la corriente modal genera un campo nulo en el exterior.

El valor del ángulo característico indica si el modo contribuye a almacenar energía magnética en un modo de inductancia (cuando $90^\circ < \alpha_n < 180^\circ$) o a almacenar energía eléctrica en un modo de capacitancia (cuando $180^\circ < \alpha_n < 270^\circ$) [46, 50].

Mediante ángulos característicos, el ancho de banda se define desde la banda inferior $f_L = 135^\circ$ hasta la banda superior $f_H = 225^\circ$ [54]. Un modo se considera significativo si su ángulo característico se encuentra dentro de este rango de ancho de banda. En la Figura 2.1, se han mostrado los ángulos característicos de los primeros cuatro modos de un anillo circular metálico; cada uno de los ángulos característicos puede variar entre 90° y 270° [54].

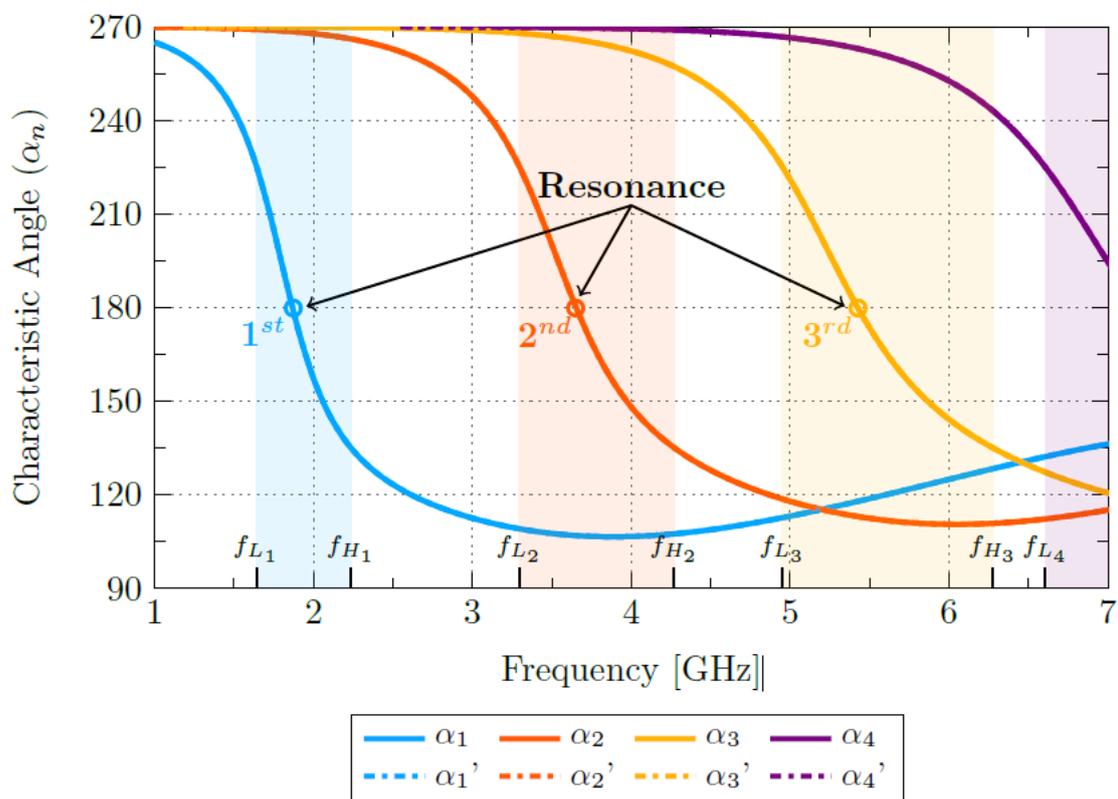


Figura. 2.1. Diagrama de bloques, procedimiento del proyecto de investigación.

En este estudio, se llevarán a cabo simulaciones utilizando el software FEKO, el cual implementa un solucionador basado en el MoM. Se hará uso de la notación de corrientes características J_n , tal como se describe en la tesis doctoral de [54]. En este contexto, las distribuciones de corriente J_1, J_2, J_3 y J_4 corresponderán a patrones asociados a media longitud de onda, una longitud de onda completa, una longitud de onda y media, y dos longitudes de onda, respectivamente.

Adicionalmente, en la tesis doctoral de [55] se realiza una descripción detallada de los modos de antena y los modos de línea de transmisión. El modo de antena se caracteriza por presentar corrientes en ambos brazos del circuito que fluyen en fase, mientras que, en el modo de línea de transmisión, las corrientes fluyen en sentidos opuestos, es decir, con fases contrarias. Por su parte, en [56], se utilizan las abreviaturas $J_n - Ant$ y $J_n - Ltx$ para representar el modo de antena y el modo de línea de transmisión, respectivamente.

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

3.1.1 Tipo de investigación

3.1.1.1 Investigación exploratoria

La investigación exploratoria se enfocará en la identificación de las características y necesidades del sistema de antenas MIMO para la plataforma UAV. Se realizará una revisión de la literatura existente y un análisis preliminar de las tecnologías disponibles.

3.1.1.2 Investigación experimental

La investigación experimental implicará el diseño, desarrollo y prueba de un sistema de antenas MIMO en una plataforma UAV. Se llevarán a cabo experimentos controlados para evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema en condiciones simuladas, utilizando modos característicos para optimizar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz.

3.1.2 Métodos de Investigación

3.1.2.1 Método adaptativo

El método adaptativo se empleará para ajustar y mejorar continuamente el diseño del sistema de antenas MIMO basado en los resultados experimentales y la retroalimentación recibida durante el proceso de desarrollo. Esto permitirá una optimización dinámica y una mejora iterativa del sistema.

3.1.2.2 Método experimental

El método experimental se aplicará en la fase de pruebas, donde se implementarán diversas configuraciones y se evaluará su rendimiento en términos de parámetros de transmisión. Los datos obtenidos de estos experimentos se utilizarán para validar las hipótesis planteadas y refinar el diseño final.

3.1.3 Técnica de investigación

3.1.3.1 Estudio bibliográfico

El estudio bibliográfico consistirá en una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre sistemas de antenas MIMO, plataformas UAV y modos característicos. Esta revisión proporcionará una base teórica sólida y ayudará a identificar las mejores prácticas y tecnologías emergentes en el campo de las telecomunicaciones y redes.

3.1.3.2 Simulación

La simulación será una herramienta clave en el diseño y desarrollo del sistema de antenas MIMO. Se utilizará software especializado para modelar y simular el comportamiento del sistema en diferentes escenarios y condiciones operativas, permitiendo prever y solucionar posibles problemas.

3.1.4 Procedimiento

El diagrama de flujo expuesto en la Figura 3.2 ilustra un panorama general de las acciones necesarias para el diseño de un sistema de antenas MIMO para una plataforma de un UAV, usando modos característicos para mejorar los parámetros de transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz.

El primer paso es el diseño de una plataforma con base en un UAV comercial; esta estructura cumple con el objetivo de figura arbitraria, la cual se analizará posteriormente a través de la teoría de modos característicos.

La teoría de modos característicos provee una interpretación física de los mecanismos de radiación. Se pretende usar esta característica para escalar la plataforma y estimar si los modos significativos favorecen a la agrupación de antenas para el sistema MIMO.

Con la escala seleccionada, se definen las dimensiones en donde se colocarán las antenas, estableciendo la principal limitante para el diseño de la antena. Si la antena cumple con los requisitos de funcionamiento, se diseña el sistema MIMO en la plataforma del UAV, integrando la antena propuesta.

Dentro del análisis de resultados, se procede con la propuesta que diferencia este proyecto de investigación: evaluar el coeficiente de reflexión de las antenas en función de un conjunto de ubicaciones establecidas.

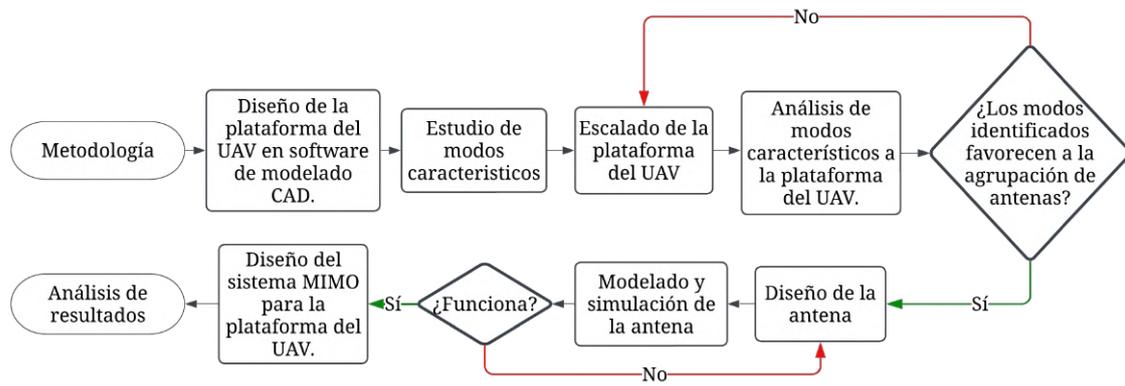


Figura. 3.2. Diagrama de bloques, procedimiento del proyecto de investigación.

3.1.5 Población y muestra

3.1.5.1 Población

Se estudiarán los valores de las mediciones obtenidas mediante simuladores electromagnéticos de los parámetros de dispersión en función de la ubicación en el plano.

3.1.5.2 Muestra

Se expondrán todos los datos medidos dentro de la población.

3.1.6 Operacionalización de variables

Tabla 3.1. Operacionalización de variables

Variable	Concepto	Indicador	Técnicas e Instrumentos
DEPENDIENTE			
Coefficiente de reflexión.	Cantidad de una onda electromagnética que se refleja en la interfaz entre dos medios con diferentes impedancias características.	Decibelio (dB).	Simulador electromagnético.
INDEPENDIENTE			
Coordenadas.	Ubicación de un punto.	Milímetro (mm).	Plano del simulador.

3.2 Modelado y escalado de una plataforma de un UAV

Se modelará y escalará una plataforma basada en el UAV Matrice 210, que servirá como soporte para el sistema de antenas MIMO. Se ha seleccionado una versión simplificada del UAV con el objetivo de que el mallado cumpla con los requisitos del software de simulación basado en el MoM.

Normalmente, los chasis de los UAV están fabricados con materiales conductores de electricidad, como aluminio, titanio o acero. Considerando esta premisa y con el propósito de reducir la carga computacional, se ha modelado una plataforma de PEC con una geometría simplificada basada en el diseño del UAV, como se muestra en la Figura 3.3.

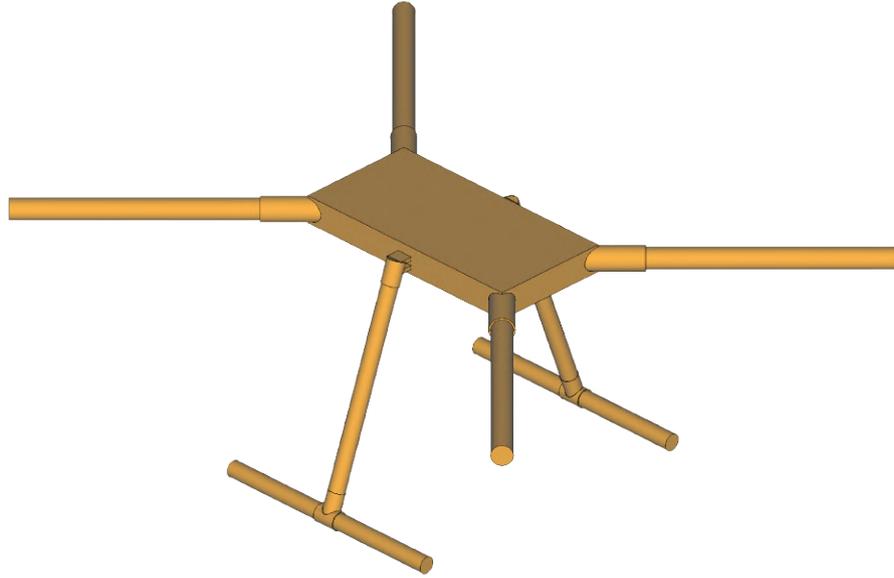


Figura. 3.3. Plataforma modelada, basada en el UAV Matrice 210.

Dado que la plataforma presenta una estructura geométrica compleja, se decidió excitar el modo J_3 mediante el flujo de corrientes características, orientadas a lo largo de una trayectoria que conecta los extremos de los brazos del UAV. Esta configuración se ilustra en la Figura 3.4.

Trabajando a una frecuencia de 2.4 GHz, se escaló la plataforma considerando que la longitud de la trayectoria L debe ser equivalente a $\frac{3}{2}$ de la longitud de onda, lo que resulta en $L = \frac{3}{2}\lambda = 93,75$ mm. En consecuencia, el modelo escalado presenta una relación de reducción de 1:5 respecto a su tamaño original.

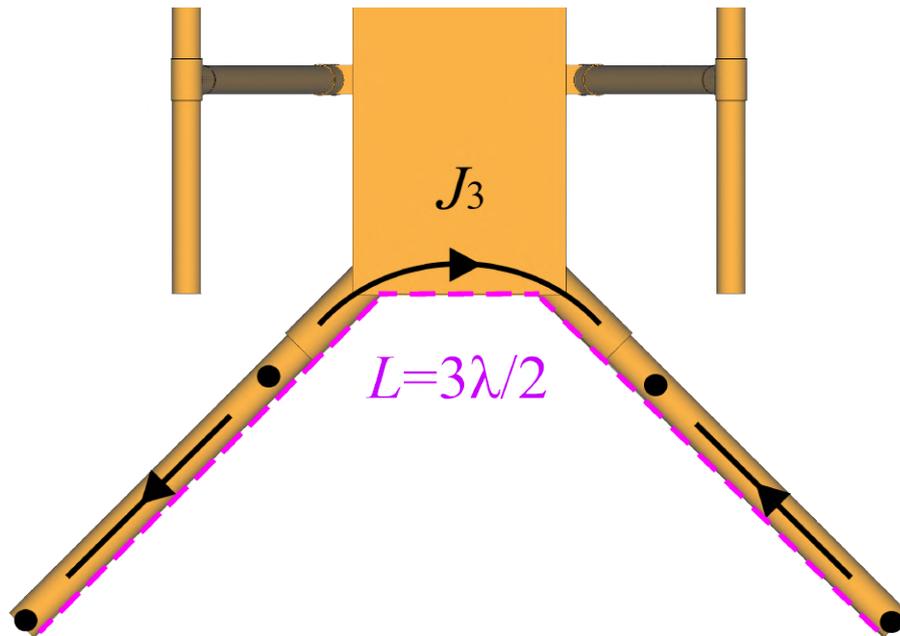


Figura. 3.4. Plataforma con representación del flujo de corrientes características del modo J_3 y longitud de la trayectoria equivalente a $\frac{3}{2}$ de la longitud de onda.

3.3 Diseño de la antena propuesta

El diseño de la antena representa uno de los mayores retos, dado que es probable que experimente un ligero desfase al integrarse en la plataforma. Para mitigar este efecto, se eligió un diseño con un amplio ancho de banda. Diversos estudios han demostrado que el ancho de banda puede incrementarse utilizando técnicas como parches de gran tamaño, planos de masa parciales, planos de masa paralelos no superpuestos al parche o aumentando la separación entre el parche y el plano de masa. Sin embargo, ninguna de estas técnicas puede aplicarse en este caso, ya que la configuración incluye un plano de masa completo, paralelo y superpuesto al parche, además de una distancia limitada entre ambos.

Según lo indicado en [9, 13, 18, 19, 40, 41, 57], la excitación de un modo característico específico se logra añadiendo ECE. En áreas donde el flujo de corriente es mínimo, se incorporan ECC, mientras que en las zonas con flujo de corriente máximo se añaden ICE.

De acuerdo con las distribuciones de corrientes características presentadas en la Figura 4.12, los brazos de la plataforma son apropiados para integrar ICE. Partiendo de esta observación, el objetivo del diseño es desarrollar una antena que imite el comportamiento de un ICE, similar a las antenas full loop o half loop. Además, la propuesta se basa en el tipo de antena plana F invertida (PIFA) mencionada en [58–60], junto con los avances en miniaturización de antenas [61], antenas flexibles [62, 63], antena de bucle dipolo [64] y el diseño usando modos característicos [65–67] los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de la antena

propuesta.

Para el diseño de la antena propuesta se basó desde un diseño muy sencillo hasta uno muy complejo. La Figura 3.5 ilustra las fases de desarrollo de la antena propuesta (Fase 4), que corresponde a una antena PIFA plegada, la cual integra cuatro elementos radiantes con alimentación coaxial.

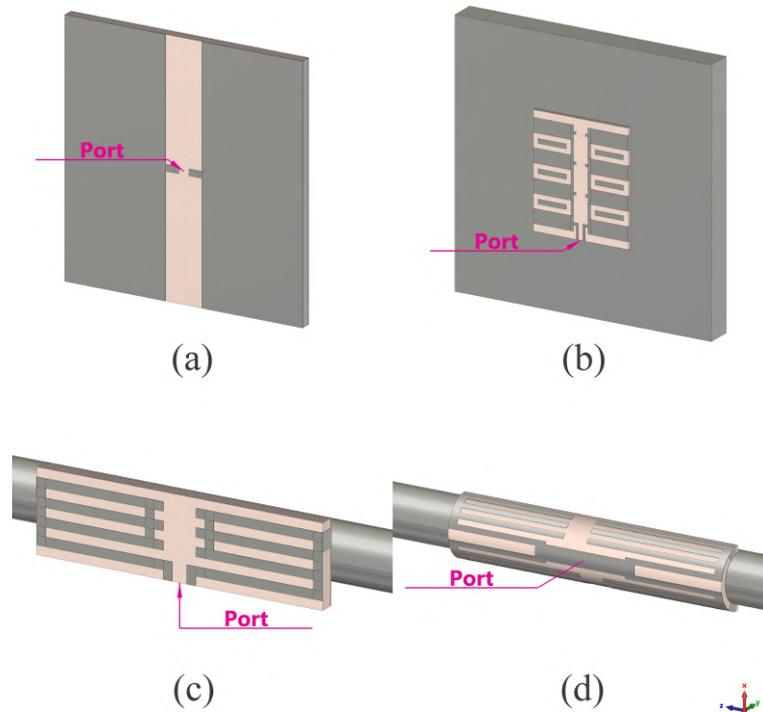


Figura. 3.5. Fases de desarrollo de la antena propuesta. (a) Fase 1. (b) Fase 2. (c) Fase 3. (d) Fase 4.

El sistema de antenas MIMO se diseñará tomando como base la antena propuesta. En la Figura 3.6 se presenta un esquema de la antena, compuesto por un conjunto de cuatro elementos radiantes alimentados coaxialmente. El flujo de corrientes se inicia en el origen (indicado por los puntos negros en la Figura 3.6), atraviesa el cortocircuito hacia el plano de masa y regresa hacia el punto de origen.

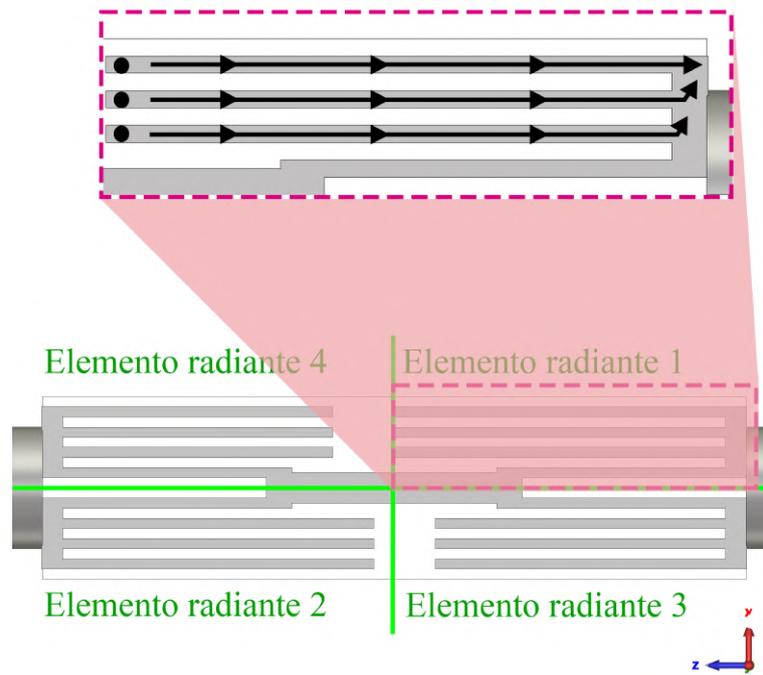


Figura. 3.6. Antena propuesta sin doblez, bosquejo del flujo de corrientes en un elemento radiante.

Las dimensiones de la antena propuesta sin curvatura se detallan en la Figura 3.7 y la Tabla 3.2. La geometría es mayoritariamente simétrica, excepto por las longitudes de los elementos radiantes. El material dieléctrico utilizado es FR-4, que tiene una permitividad eléctrica relativa (ϵ_r) de 4.3.

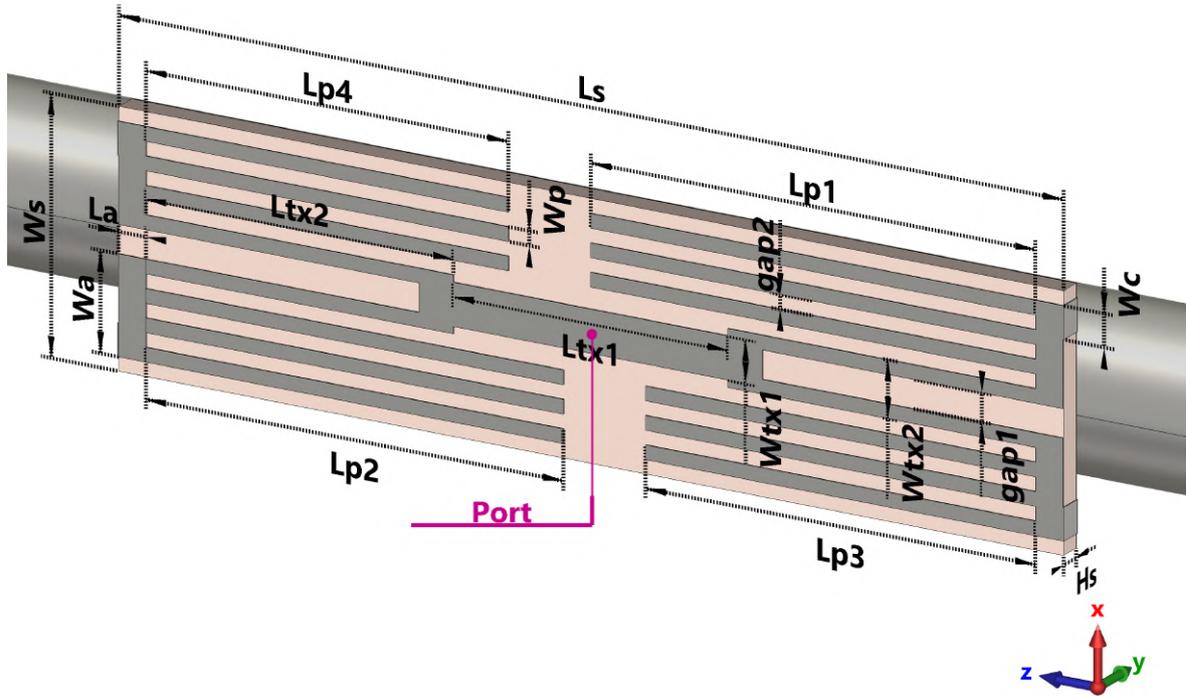


Figura. 3.7. Dimensiones de la antena propuesta sin curvatura, en función de la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros dimensionales de la antena propuesta.

Parámetro	Longitud (mm)	Parámetro	Longitud (mm)
L_s	34.4	W_s	9
L_a	1	W_a	3.5
L_{tx1}	10	W_{tx1}	1.5
L_{tx2}	11.2	W_{tx2}	2
L_{p1}	16.2	W_p	0.5
L_{p2}	15.2	W_c	1.15
L_{p3}	14.2	$gap1$	1
L_{p4}	13.2	$gap2$	0.5
H_s	0.8		

3.4 Diseño del sistema MIMO

Basándose en las distribuciones de corrientes características presentadas en la Figura 4.12 y considerando que la antena propuesta replica el comportamiento de un ICE, se instalaron cuatro antenas en la parte inferior de los brazos superiores de la plataforma. La Figura 3.8 muestra una vista superior de la plataforma con el sistema de antenas MIMO integrado.

Tras realizar un CMA y definir la implementación de antenas capaces de emular el comportamiento de un ICE, se determinó que el uso de cuatro antenas representa el número mínimo necesario para excitar de manera efectiva los modos seleccionados. Esta cantidad asegura un equilibrio entre simplicidad estructural y rendimiento electromagnético. Adicionalmente, la considerable separación física entre las antenas, en comparación con otros sistemas MIMO convencionales, eliminó la necesidad de incluir estructuras adicionales para el desacoplamiento de señales.

La configuración propuesta está diseñada para garantizar la excitación adecuada de los modos deseados y, a su vez, optimizar la generación de los diagramas de radiación mediante la combinación adecuada de la alimentación de los puertos.

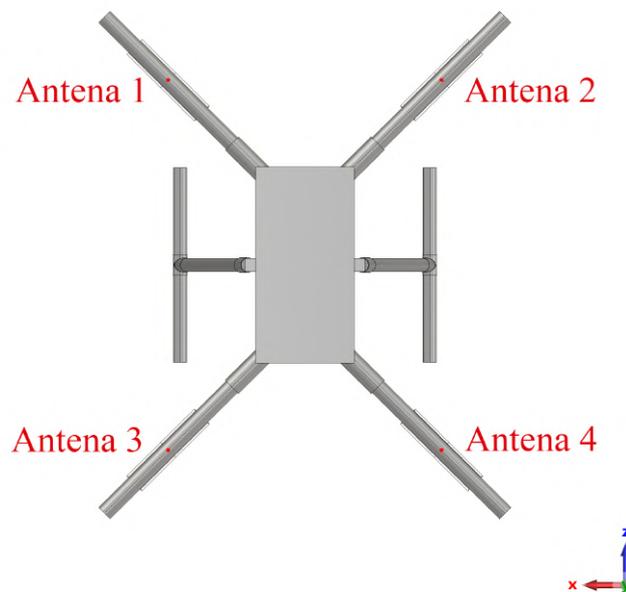


Figura. 3.8. Vista inferior de la plataforma con el sistema MIMO de cuatro antenas integrado.

3.5 Evaluación del coeficiente de reflexión de las antenas a una frecuencia de 2.4 GHz en función de su ubicación.

Para este estudio, en el software CST Studio, se definió el origen del sistema de coordenadas en el centro de la parte inferior del núcleo de la plataforma, como se ilustra en la Figura 3.9. Este punto de referencia permitió establecer un marco común para analizar la posición de las antenas.

La ubicación de las antenas se limitó a once posiciones distribuidas a lo largo de un eje definido. La primera posición, denominada punto uno (P_1), corresponde al punto de unión entre la antena y la plataforma. A partir de este, se definieron once posiciones adicionales, separadas entre sí por una distancia uniforme de 3 mm (ΔP). Con el fin de simplificar la interpretación y el análisis de los datos, las posiciones se enumeraron desde la más alejada hasta el origen del sistema de coordenadas, y se identificaron como P_n , tal como se muestra en el esquema de la Figura 3.10.

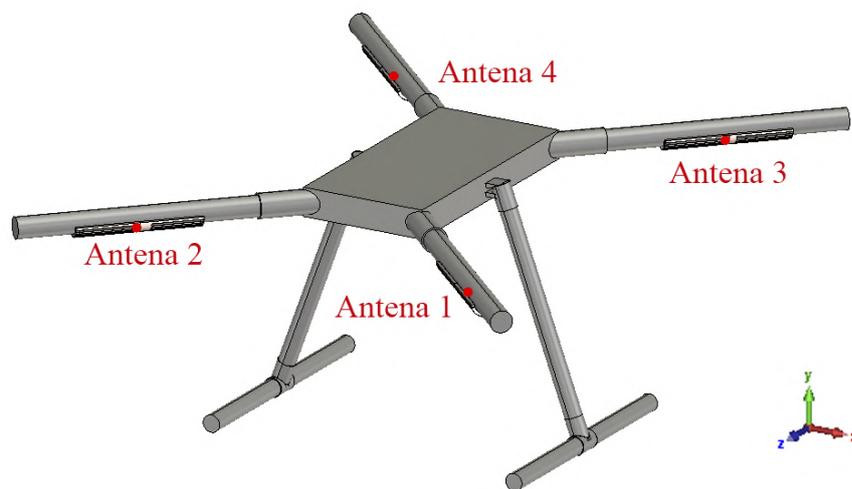


Figura. 3.9. Vista en perspectiva de la plataforma con el sistema de antenas MIMO integrado.

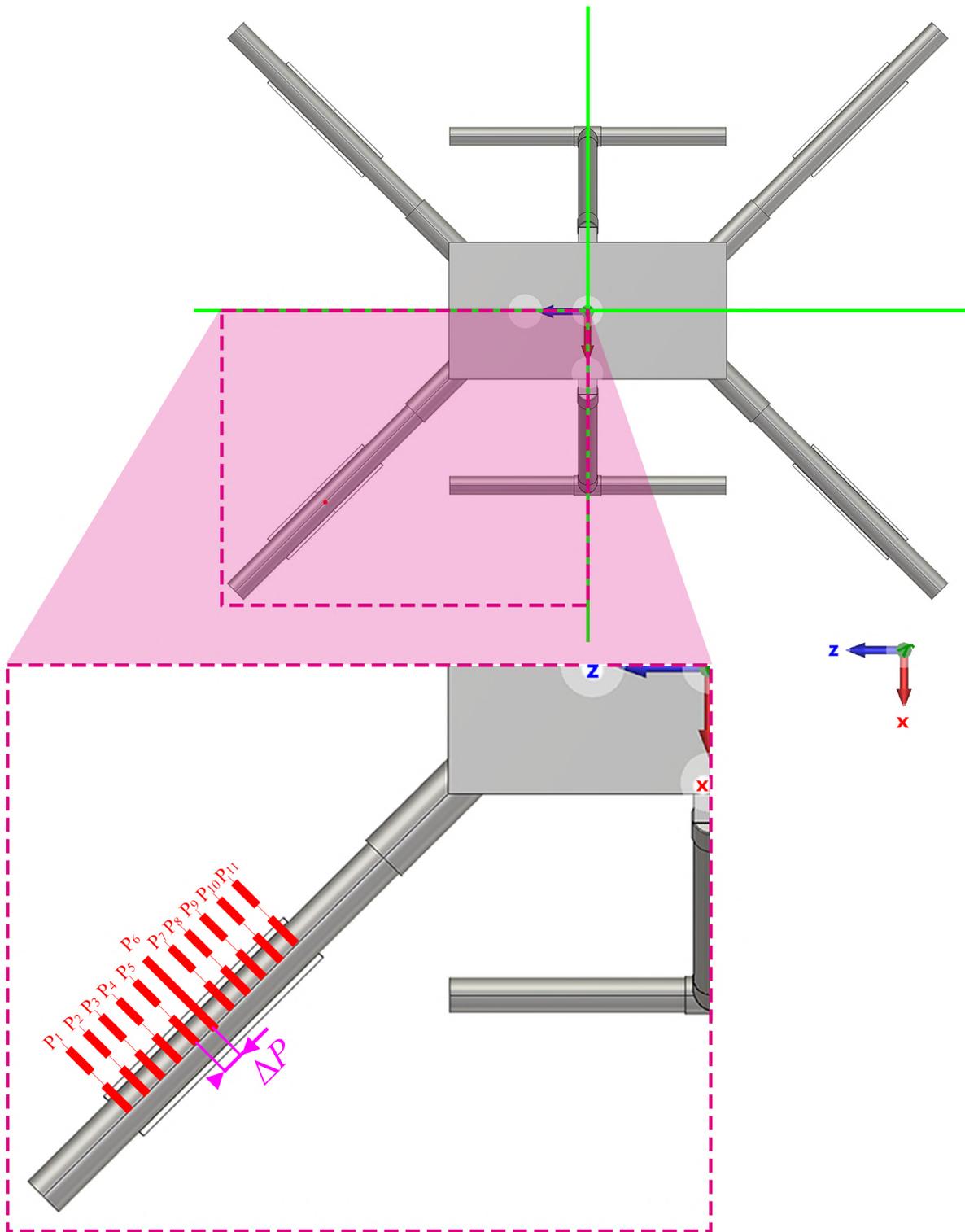


Figura. 3.10. Vista superior de la plataforma, que muestra el esquema de las ubicaciones de las antenas.

Dado que la estructura presenta simetría en los ejes X y Z , se optó por analizar únicamente una antena, lo que permitió reducir significativamente los requerimientos computacionales y los tiempos de simulación. Es importante destacar que, aunque el análisis se centra en una

antena, su desplazamiento refleja el comportamiento de las demás debido a la simetría estructural. Las coordenadas específicas de las ubicaciones de la antena en el plano del simulador se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Coordenadas de las ubicaciones de la antena según la Figura 3.10.

Ubicación	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P_1	60.03	1.04	78.08
P_2	57.91	1.04	75.96
P_3	55.79	1.04	73.83
P_4	53.67	1.04	71.71
P_5	51.55	1.04	69.59
P_6	49.43	1.04	67.47
P_7	47.31	1.04	65.35
P_8	45.19	1.04	63.23
P_9	43.06	1.04	61.11
P_{10}	40.94	1.04	58.98
P_{11}	38.82	1.04	56.86

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados y discusión

4.1.1 Análisis de modos característicos de la plataforma

Mediante el software FEKO, se simuló la interacción de ondas electromagnéticas con la plataforma en un rango de frecuencias de 1.5 GHz a 3.3 GHz. En la Figura 4.11 se muestran tres modos significativos que cumplen con el requisito de encontrarse dentro del rango de ángulos característicos de 135° a 225° en una frecuencia de 2.4 GHz. Los modos J_2 , $J_3 - Ltx$ (modo línea de transmisión) y $J_3 - Ant$ (modo antena) resuenan a frecuencias de 2.27 GHz, 2.37 GHz y 2.56 GHz, respectivamente, con un ángulo característico de $\alpha_n = 180^\circ$.

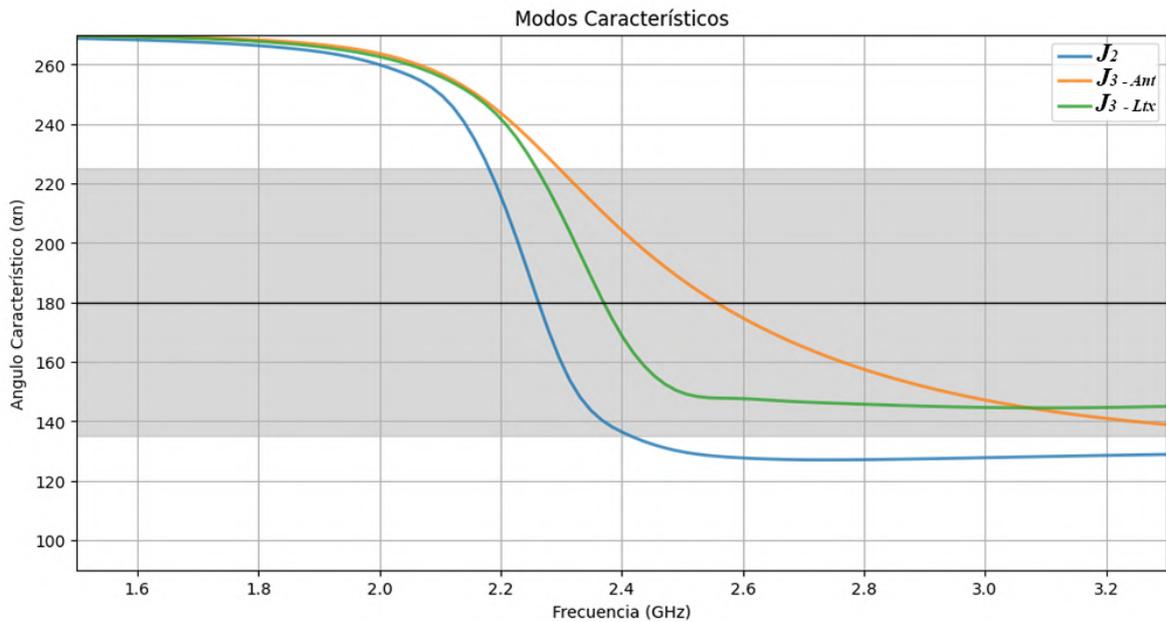


Figura. 4.11. Ángulos característicos en función de la frecuencia para la plataforma descrita en la Figura 3.4.

4.1.1.1 Distribución de corrientes características

En la Figura 4.12 se analizan las corrientes características de los modos significativos.

- Modo J_2 (Figura 4.12 (a)): Las corrientes se distribuyen desde el centro de la plataforma hacia los extremos de los brazos, cubriendo una gran extensión de la estructura.

- Modo $J_3 - Ant$ (Figura 4.12 (b)): Las corrientes fluyen de forma paralela y en la misma dirección, especialmente en el centro de la plataforma. Este comportamiento se asocia con la función de las antenas.
- Modo $J_3 - Ltx$ (Figura 4.12 (c)): Las corrientes también fluyen de manera paralela, pero en direcciones opuestas, mostrando una dinámica que se asemeja a la de una línea de transmisión.

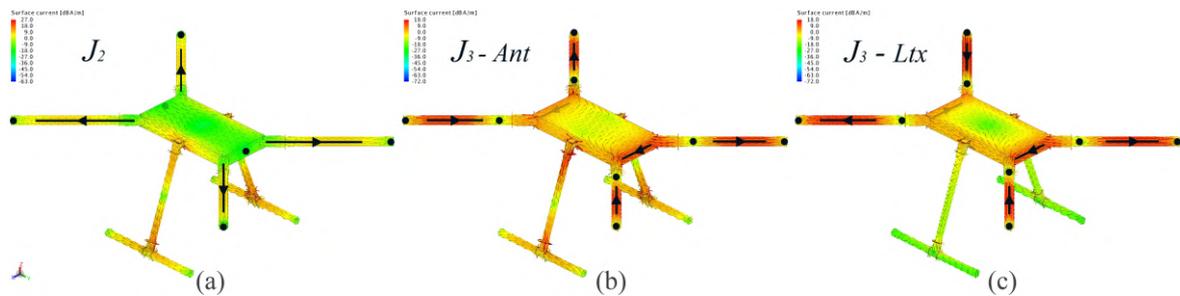


Figura. 4.12. Distribución de corrientes características a una frecuencia de 2.4 GHz. (a) Modo J_2 . (b) Modo $J_3 - Ant$. (c) Modo $J_3 - Ltx$.

4.1.1.2 Diagramas de radiación

Los diagramas de radiación correspondientes a los modos significativos se presentan en la Figura 4.13:

- Modo J_2 (Figura 4.13 (a)): El patrón de radiación es complejo, con varias regiones de máxima radiación en la parte superior e inferior de la estructura, así como zonas de mínima radiación.
- Modo $J_3 - Ant$ (Figura 4.13 (b)): Este modo exhibe una distribución más simétrica, con lóbulos de radiación intensos y una concentración uniforme, lo que lo hace ideal para aplicaciones de radiación controlada.
- Modo $J_3 - Ltx$ (Figura 4.13 (c)): Presenta un patrón más irregular con una mayor cantidad de lóbulos. Esto sugiere una distribución del campo más compleja, con múltiples direcciones de radiación alrededor de la estructura.

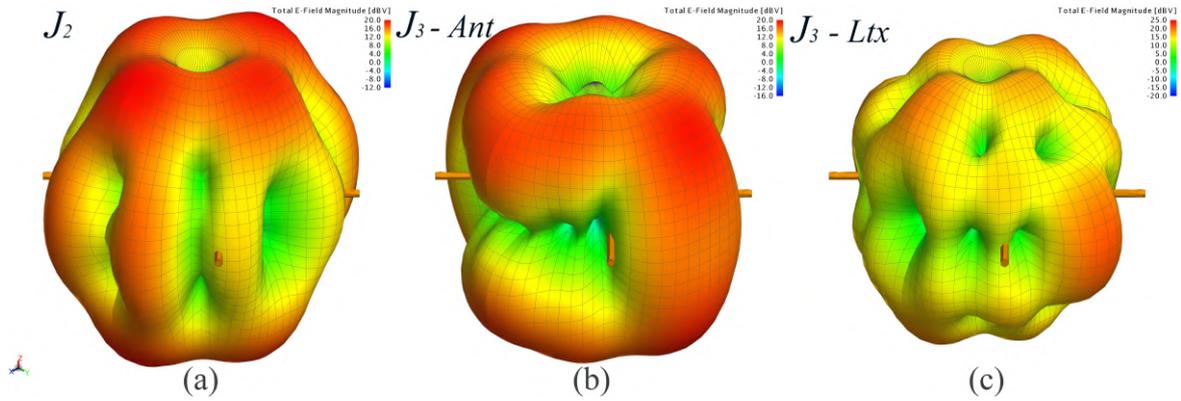


Figura. 4.13. Diagramas de radiación a una frecuencia de 2.4 GHz. (a) Modo J_2 . (b) Modo $J_3 - Ant$. (c) Modo $J_3 - Ltx$.

4.1.2 Análisis de la antena propuesta

Para garantizar un funcionamiento adecuado de la antena, el coeficiente de reflexión (S_{11}) debe ser inferior a -10 dB. En la Figura 4.14, se presentan los coeficientes de reflexión para cada fase de diseño, destacando los anchos de banda con $S_{11} < -10$ dB. Los anchos de banda obtenidos son del 3.03 % para la Fase 1, 1.82 % para la Fase 2, 3.33 % para la Fase 3 y un 19.54 % para la Fase 4, que corresponde a la antena propuesta. Esto indica que la estructura más compleja presenta un gran ancho de banda. Los cuatro valles pronunciados cercanos a cero en el gráfico corresponden a cada uno de los elementos radiantes representados en la Figura 3.6, mostrando una resonancia adecuada para cada elemento en las frecuencias deseadas.

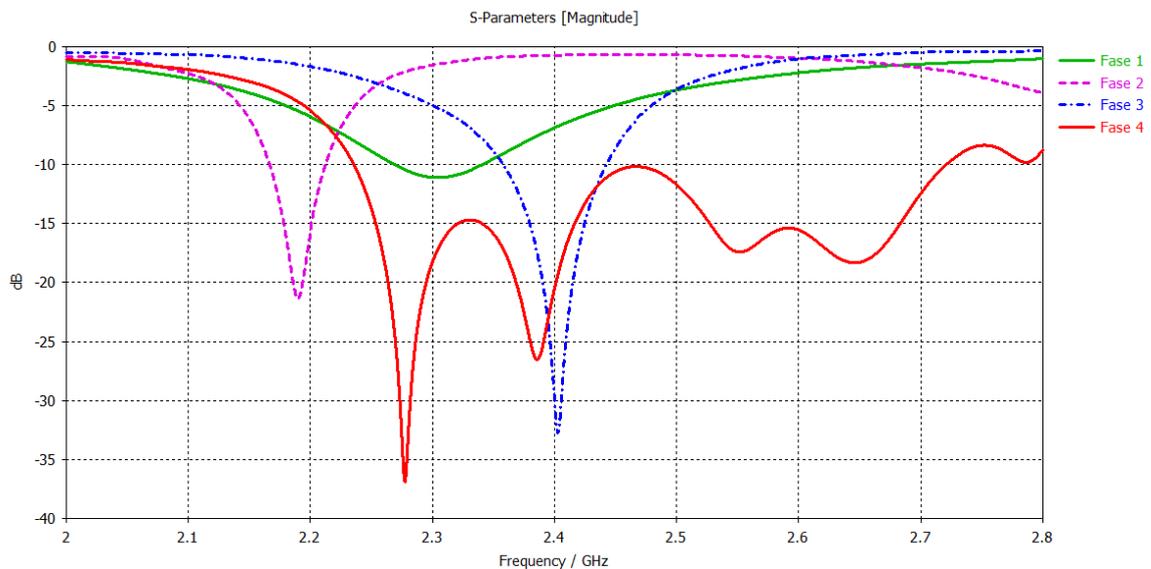


Figura. 4.14. Comparación de los coeficientes de reflexión para las fases del diseño mostradas en la Figura 3.5.

El coeficiente de reflexión de la antena propuesta, como se muestra en la Figura 4.14, indica una respuesta favorable con cuatro valles pronunciados cerca de cero, lo que sugiere una eficiente adaptación de impedancia para los modos deseados en cada uno de los elementos radiantes.

Además, la Figura 4.15 presenta el diagrama de radiación de la antena propuesta a una frecuencia de 2.27 GHz, mostrando una directividad de 2,88 *dBi*. Este valor indica una capacidad moderada de enfoque de la radiación, lo que es adecuado para la aplicación propuesta.

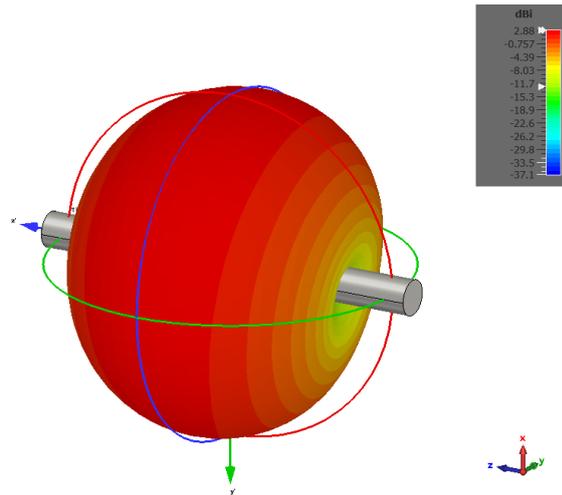


Figura. 4.15. Diagrama de radiación de la antena propuesta a 2.27 GHz.

4.1.3 Análisis del sistema MIMO

Para determinar el correcto funcionamiento de un sistema de antenas MIMO, se deben cumplir ciertos criterios: coeficientes de reflexión inferiores a -10 *dB*, coeficientes de transmisión menores a -15 *dB* y un coeficiente de correlación de envolvente (ECC) inferior a 0.2.

Dado que la estructura es simétrica, la Figura 4.16 presenta los coeficientes de reflexión de las antenas 1, 2, 3 y 4, así como los coeficientes de transmisión entre las antenas 1 y 2, y entre las antenas 1 y 3. Por su parte, la Figura 4.17 muestra el ECC calculado para las combinaciones de antenas 1-2, 1-3 y 1-4.

Los resultados obtenidos confirman que el sistema de antenas MIMO cumple con los criterios establecidos, lo que garantiza su correcto funcionamiento.

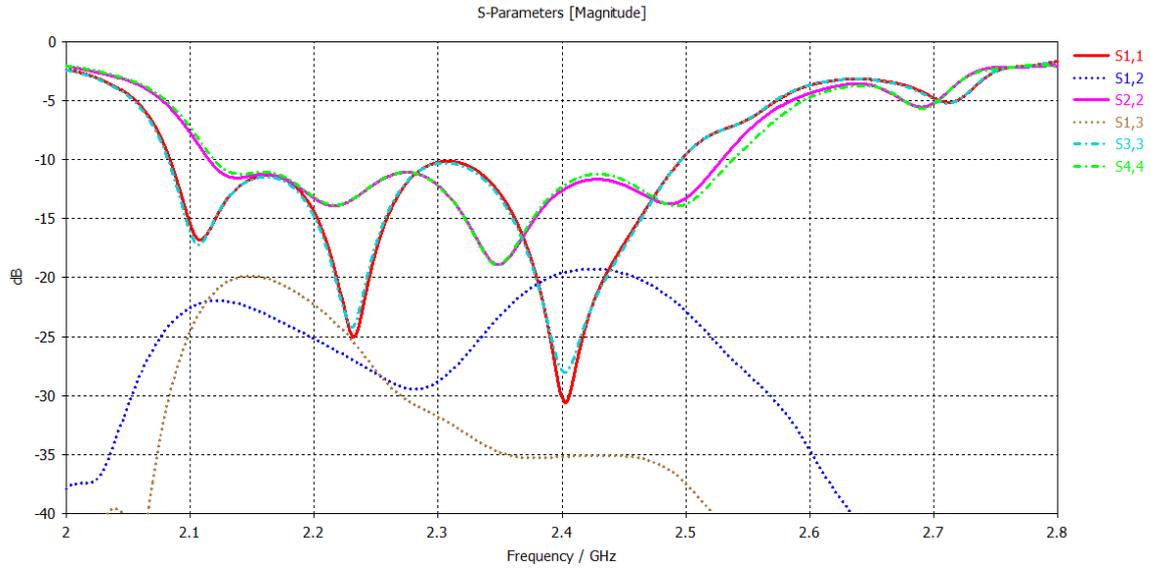


Figura. 4.16. Coeficiente de reflexión y transmisión del sistema MIMO.

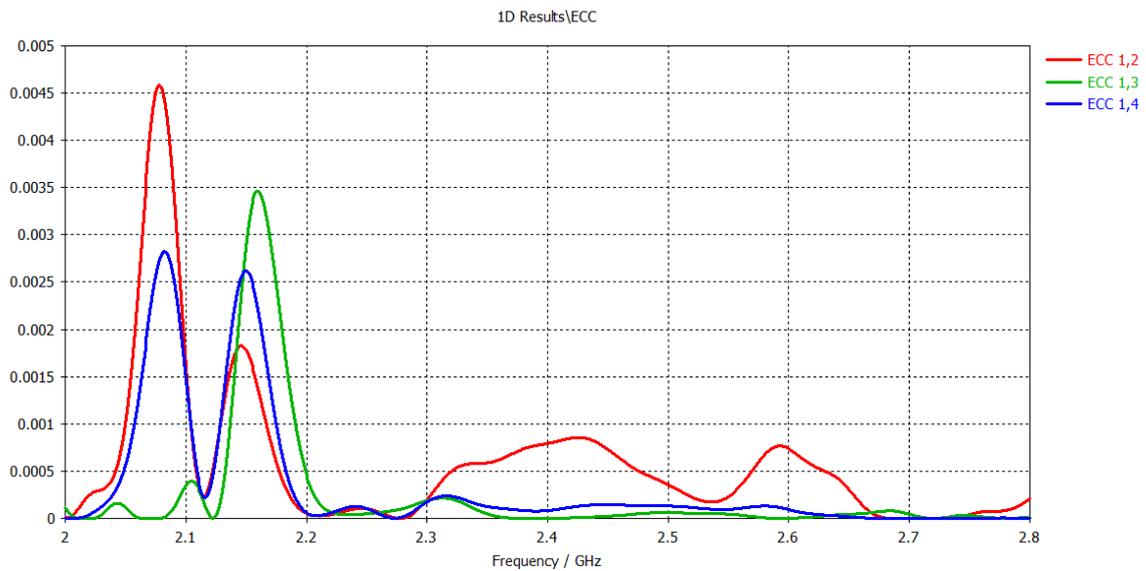


Figura. 4.17. Coeficiente de evaluación de envolvente del sistema MIMO.

En la Figura 4.18 se han representado los diagramas de radiación a una frecuencia de 2.4 GHz, obtenidos al combinar diferentes valores de fase en la alimentación de las antenas. El primero (ver Figura 4.18 (a)) presenta múltiples lóbulos principales, similar al diagrama de radiación de modo J_2 presentado en la Figura 4.13 (a), con una directividad de 2,98 dBi . La energía se distribuye en varias direcciones, aunque no de manera omnidireccional, mostrando varias regiones con radiación intensa. Por otro lado, en la Figura 4.18 (b) se exhibe un patrón casi idéntico al modo $J_3 - Ltx$ presentado en la Figura 4.13 (c), con un mayor número de lóbulos principales más pequeños, lo que indica una mayor directividad en ciertos

ángulos específicos, siendo el lóbulo principal de 4,81 *dBi*. Después, la Figura 4.18 (c) es muy semejante al modo $J_3 - Ant$ presentado en la Figura 4.13 (b), con una directividad de 2,66 *dBi* en el lóbulo principal. En cuanto a la Figura 4.18 (d), el diagrama se vuelve aún más complejo, con lóbulos más grandes y una radiación más distribuida, con una directividad de 2,03 *dBi*. Por otra parte, la Figura 4.18 (e) muestra una estructura de lóbulos más simplificada, lo que indica una menor directividad de 1,21 *dBi*, con la energía más dispersa y menos concentrada en ángulos específicos. Con respecto a la Figura 4.18 (f), se observa una directividad moderada de 3,06 *dBi*, con varios lóbulos alargados que concentran la energía en direcciones particulares. Luego, la Figura 4.18 (g) presenta un elevado número de pequeños lóbulos principales, lo que indica una alta directividad de 5,54 *dBi*, útil para la propagación de señales concentradas. En cuanto a la Figura 4.18 (h), el patrón es similar a los primeros diagramas, con lóbulos de tamaño medio y una distribución de energía equilibrada, con una directividad moderada de 3,19 *dBi*. En cuanto a la Figura 4.18 (i), es comparable con las Figuras 4.18 (f) y (g), con varios lóbulos bien definidos, aunque con la energía más dispersa, resultando en una directividad media de 2,16 *dBi*. Finalmente, la Figura 4.18 (j) presenta el patrón más homogéneo y menos direccional, con una directividad de 3,62 *dBi*, adecuada para aplicaciones omnidireccionales.

La Tabla 4.4 detalla las combinaciones específicas de amplitudes (A) y fases (ϕ) utilizadas para obtener cada patrón, facilitando la replicabilidad de los resultados y adaptaciones para escenarios específicos.

Tabla 4.4. Agrupaciones de antenas entre amplitud (A) y desplazamiento de fase ($\Delta\phi$).

Agrupaciones	Antena 1		Antena 2		Antena 3		Antena 4	
	A	$\Delta\phi$	A	$\Delta\phi$	A	$\Delta\phi$	A	$\Delta\phi$
Figura 4.18								
(a)	1	180°	1	180°	1	0°	1	0°
(b)	1	0°	1	180°	1	0°	1	180°
(c)	1	0°	1	180°	1	180°	1	0°
(d)	1	0°	1	0°	0	N/A	0	N/A
(e)	1	0°	0	N/A	1	0°	0	N/A
(f)	1	0°	0	N/A	0	N/A	1	0°
(g)	1	0°	1	180°	0	N/A	0	N/A
(h)	1	0°	0	N/A	1	180°	0	N/A
(i)	1	0°	0	N/A	0	N/A	1	180°
(j)	1	0°	0	N/A	0	N/A	0	N/A

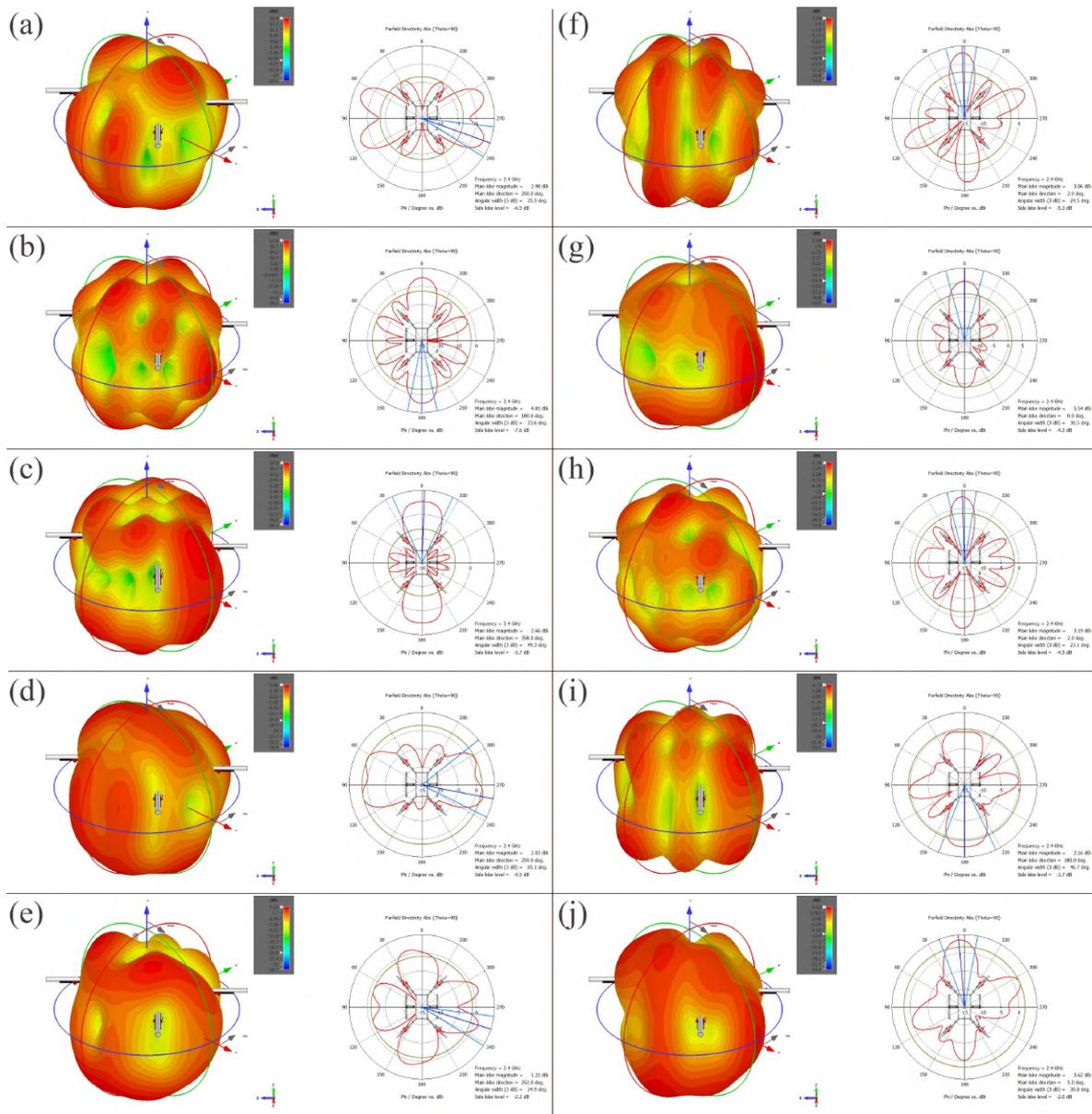


Figura. 4.18. Diagrama de radiación y directividad en coordenadas polares a una frecuencia de 2.4 GHz. (a) Distribución del patrón de radiación similar al modo J_2 . (b) Patrón de radiación similar al modo $J_3 - Ltx$. (c) Patrón de radiación similar al modo $J_3 - Ant$. (d) Configuración de agrupación de las antenas 1 y 2. (e) Configuración de agrupación de las antenas 1 y 3. (f) Configuración de agrupación de las antenas 1 y 4. (g) Agrupación de las antenas 1 y 2 con un desfase de 180° . (h) Agrupación de las antenas 1 y 3 con un desfase de 180° . (i) Agrupación de las antenas 1 y 4 con un desfase de 180° . (j) Patrón de radiación de la antena 1 alimentada de forma individual.

Por último, la Tabla 4.5 compara el ancho de banda de la antena propuesta integrada en la plataforma del UAV con las antenas integradas en vehículos realizadas por otros investigadores. La antena propuesta innova con un ancho de banda cercano al 18 %.

Tabla 4.5. Comparativa entre antenas integradas en vehículos.

Ref.	Tipo de ECE	Frecuencia de resonancia	Ancho de banda (%)	Tipo de vehículo
[18]	ICE	3.7 GHz	5.2-7.2	Aéreo
[9]	ICE, ICE y CCE	290.85 MHz, 637.25 MHz y 0.98 GHz	1.8, 4.7 y 7.3	Aéreo
[41]	ICE & CCE	425 MHz	0.4-1.88	Anfibio
Este trabajo	ICE	2.4 GHz	18.03-18.34	Aéreo no tripulado

4.1.4 Análisis de las antenas a una frecuencia de 2.4 GHz en función de su ubicación

Se realizó un análisis estadístico de las mediciones del coeficiente de reflexión, ancho de banda y ganancia en cada ubicación; este enfoque permite identificar patrones y correlaciones entre la posición de la antena y su desempeño, optimizando así la ubicación en aplicaciones futuras.

4.1.4.1 Análisis del coeficiente de reflexión a una frecuencia de 2.4 GHz

La Figura 4.19 ilustra la variación del coeficiente de reflexión en función de las ubicaciones evaluadas. Este análisis resulta clave para identificar tendencias, patrones o posibles anomalías asociadas con la ubicación de la antena en la estructura, proporcionando una base sólida para optimizar su desempeño.

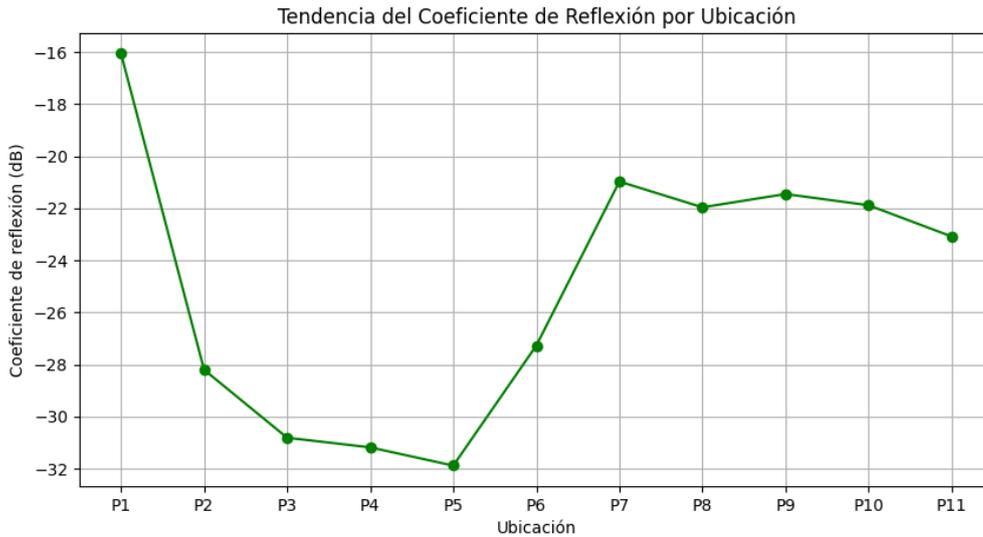


Figura. 4.19. Tendencia del coeficiente de reflexión según la ubicación.

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para caracterizar el comportamiento del coeficiente de reflexión. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.6, donde se destacan la media, la desviación estándar, los valores extremos y los cuartiles. Estos valores permiten evaluar la variabilidad y consistencia del sistema.

Tabla 4.6. Estadísticas descriptivas del coeficiente de reflexión

Estadística	Valor
Número de datos	11
Media	-24.98
Desviación estándar	5.16
Valor mínimo	-31.88
25 % (primer cuartil)	-29.50
50 % (segundo cuartil)	-23.08
75 % (tercer cuartil)	-21.66
Valor máximo	-16.06

En la Figura 4.20 se presenta un histograma de los valores del coeficiente de reflexión. Los datos están mayoritariamente concentrados por debajo de -20 dB, lo que demuestra la efectividad del sistema para reducir la reflexión.

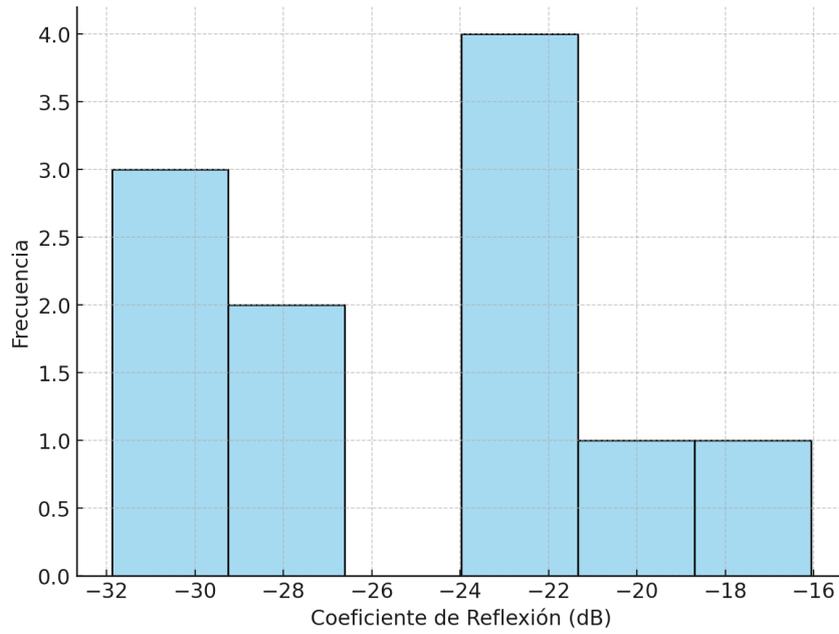


Figura. 4.20. Histograma del coeficiente de reflexión.

La Figura 4.21 representa un diagrama de caja que resume la dispersión de los datos y sus principales estadísticos. Este gráfico incluye el rango intercuartílico (50 % central de los datos), así como los valores mínimos y máximos dentro de un rango aceptable. No se identificaron valores atípicos, lo que indica una distribución homogénea.

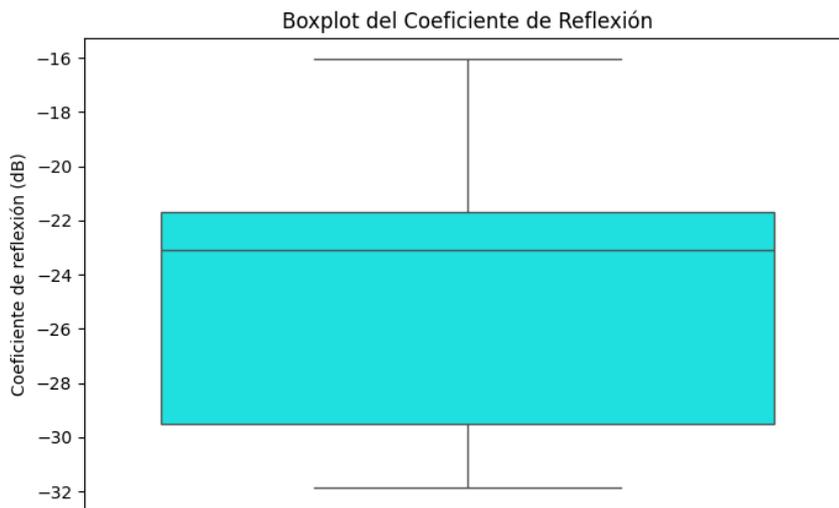


Figura. 4.21. Diagrama de caja del coeficiente de reflexión.

De acuerdo con el análisis realizado, la ubicación P_5 se identificó como la óptima, ya que presentó el menor coeficiente de reflexión con un valor de $-31,88 \text{ dB}$. Este resultado evidencia que P_5 minimiza las pérdidas por reflexión y optimiza el desempeño del sistema a la frecuencia de 2.4 GHz, siendo la configuración recomendada.

Se realizó un ajuste de un modelo polinómico de tercer grado al coeficiente de reflexión en función de la ubicación. La ecuación resultante del polinomio es la siguiente:

$$y(x) = -0,1591x^3 + 3,1347x^2 - 17,1643x - 3,1691 \quad (4.4)$$

donde x representa la ubicación P_n y $y(x)$ corresponde al coeficiente de reflexión en dB. La Figura 4.22 ilustra la forma en que el modelo se ajusta a los datos obtenidos a partir del simulador electromagnético.

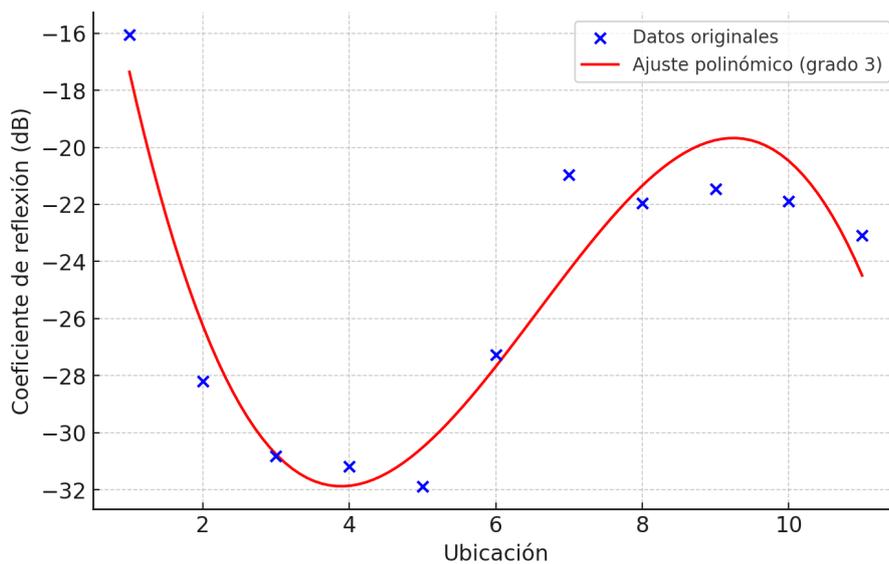


Figura. 4.22. Ajuste del modelo polinómico del coeficiente de reflexión en función de la ubicación.

Para validar la calidad del modelo, se utilizó el error medio cuadrático (RMSE) y se realizó un análisis de residuos.

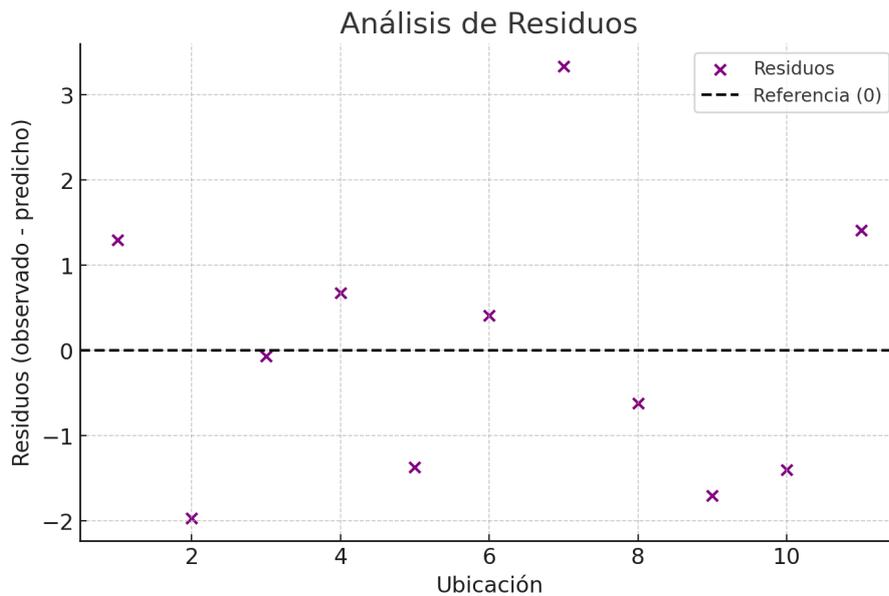


Figura. 4.23. Análisis de residuos del modelo polinómico del coeficiente de reflexión en función de la ubicación.

El valor del RMSE obtenido fue de 1.5487 dB, lo que indica que, en promedio, las predicciones del modelo se desvían del valor observado en aproximadamente 1.55 dB.

El análisis de residuos no muestra un patrón definido, lo que sugiere que el modelo captura adecuadamente la mayoría de las tendencias presentes en los datos.

En conclusión, el modelo polinómico de tercer grado resultó ser apropiado para describir la relación entre la ubicación y el coeficiente de reflexión. El bajo valor de RMSE respalda la capacidad del modelo para ofrecer una representación precisa y confiable de los datos medidos.

4.1.4.2 Análisis del ancho de banda a una frecuencia de 2.4 GHz

La Figura 4.24 presenta cómo varía el ancho de banda en función de las ubicaciones evaluadas para la antena. Este análisis es fundamental para identificar las posiciones que maximizan el desempeño del sistema al incrementar el ancho de banda.

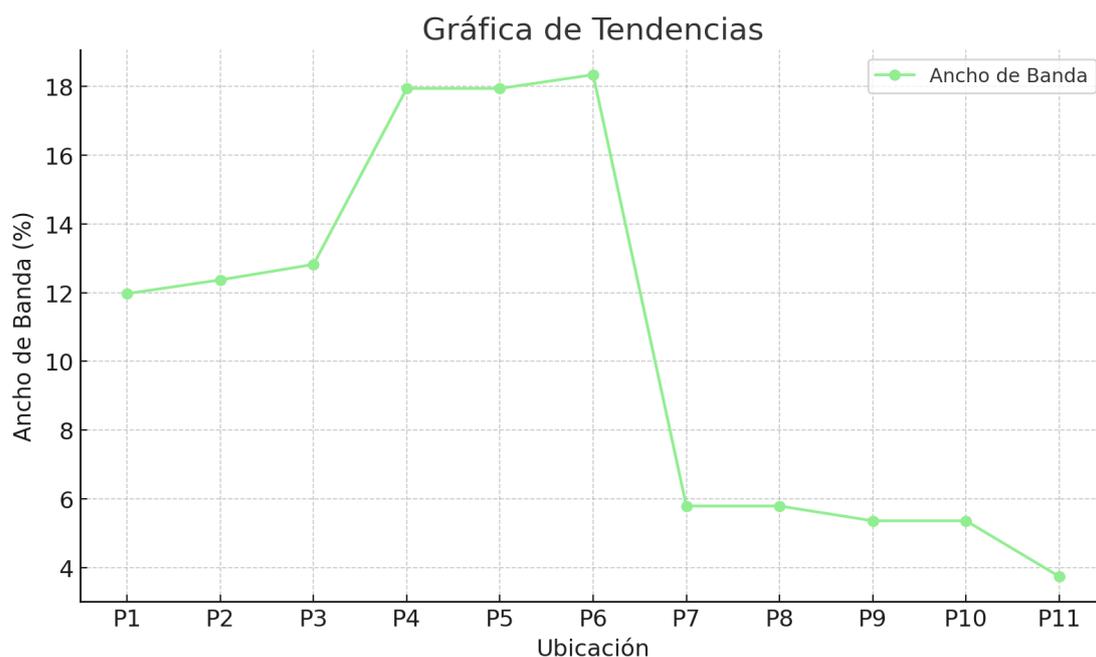


Figura. 4.24. Tendencia del ancho de banda según la ubicación.

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para caracterizar el comportamiento del ancho de banda en las diferentes posiciones de la antena. Los resultados se presentan en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Estadísticas descriptivas del ancho de banda.

Estadística	Valor
Número de datos	11
Media	11.67
Desviación estándar	5.71
Valor mínimo	3.74
25 % (primer cuartil)	5.58
50 % (segundo cuartil)	11.97
75 % (tercer cuartil)	14.38
Valor máximo	18.34

La Figura 4.25 muestra el histograma del ancho de banda, destacando que la mayoría de los valores se concentran entre 5 % y 18 %. Este rango refleja un comportamiento consistente en la mayoría de las ubicaciones evaluadas, excepto por algunos valores más bajos que corresponden a posiciones específicas.

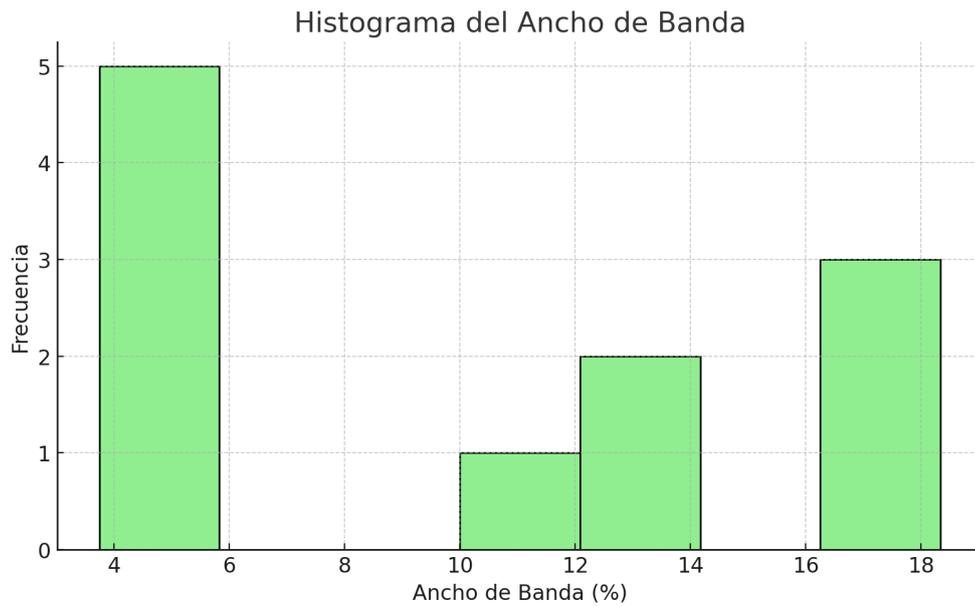


Figura. 4.25. Histograma del ancho de banda.

Por su parte, el diagrama de caja mostrado en la Figura 4.26 ilustra la dispersión de los datos, destacando el rango intercuartílico y los valores extremos. No se identificaron valores atípicos significativos, lo que sugiere que la distribución del ancho de banda es uniforme dentro del rango observado.

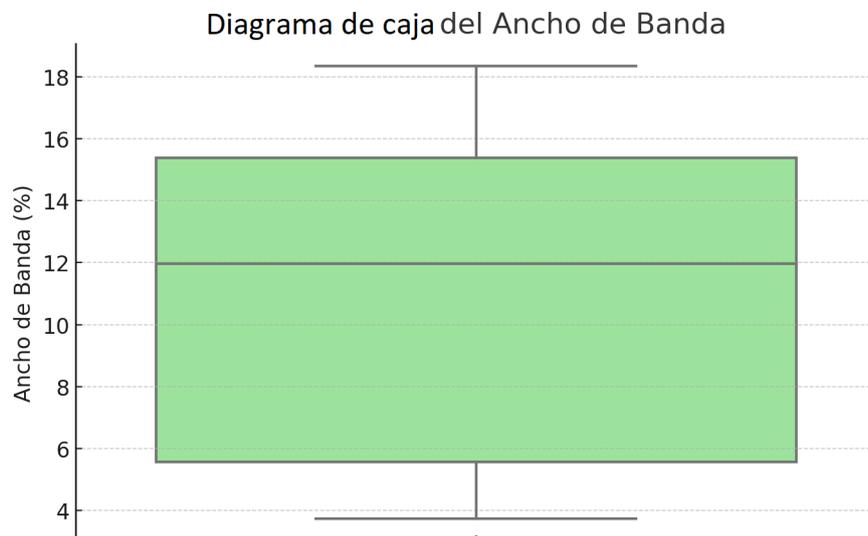


Figura. 4.26. Diagrama de caja del ancho de banda.

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que la mejor ubicación es P_6 , la cual alcanzó el mayor ancho de banda con un valor de 18.34 %. Esto sugiere que esta posición

permite un desempeño óptimo de la antena, maximizando su capacidad para transmitir y recibir señales a la frecuencia de operación.

Se realizó un ajuste de un modelo polinómico de tercer grado al ancho de banda en función de la ubicación. La ecuación resultante del polinomio es la siguiente:

$$y(x) = 0,0794x^3 - 1,6806x^2 + 9,0134x + 2,455 \quad (4.5)$$

donde x representa la ubicación P_n y $y(x)$ corresponde al ancho de banda en porcentaje (%). La Figura 4.27 ilustra la forma en que el modelo se ajusta a los datos obtenidos a partir del simulador electromagnético.

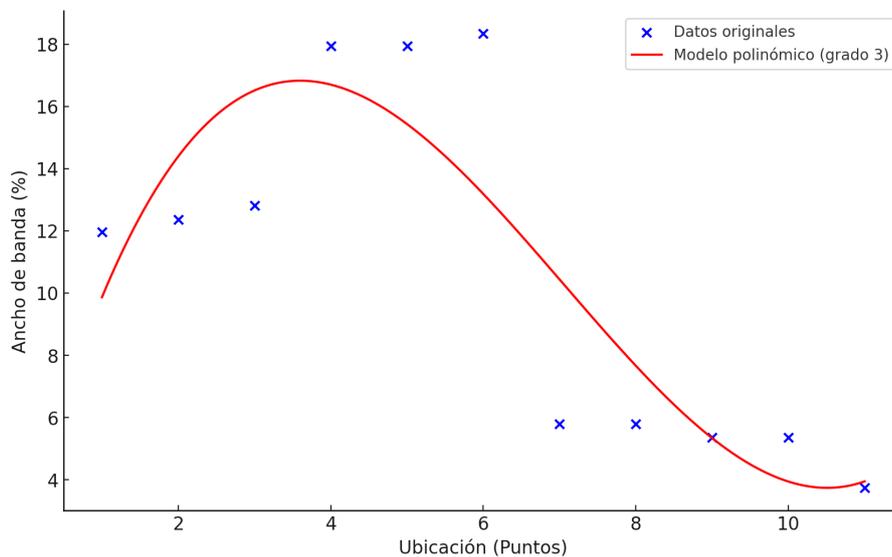


Figura. 4.27. Ajuste del modelo polinómico del ancho de banda en función de la ubicación.

Para evaluar la precisión del modelo, se calculó la RMSE, obteniéndose un valor de 2.7585. Este resultado indica que, en promedio, el modelo presenta un error de aproximadamente 2.76 % al predecir los valores de ancho de banda.

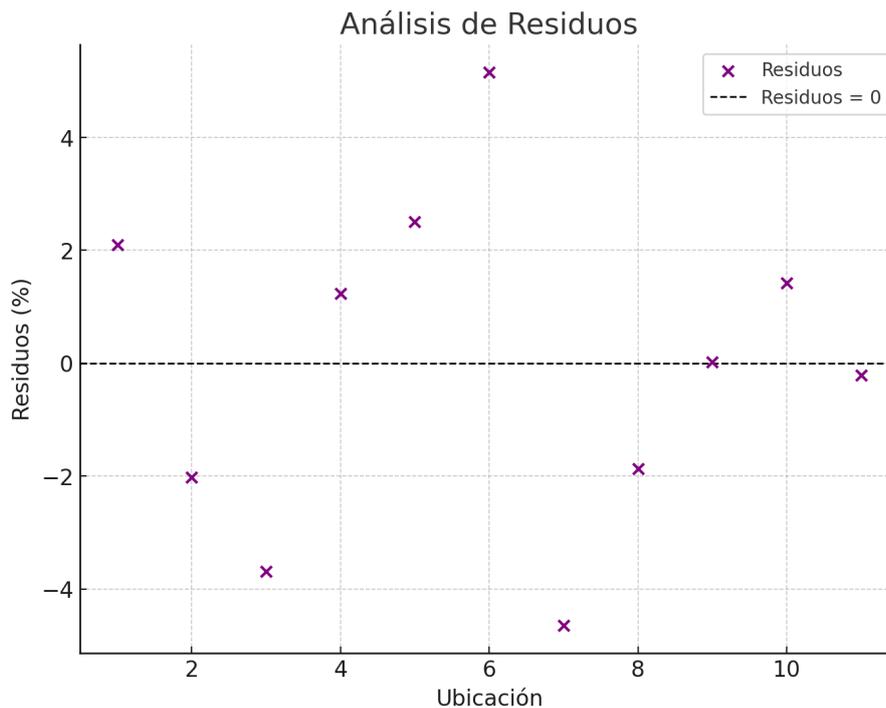


Figura. 4.28. Análisis de residuos del modelo polinómico del ancho de banda en función de la ubicación.

El análisis de residuos revela que la diferencia entre los valores observados y los predichos oscila entre -4.65% y 5.15% . En la gráfica de residuos, se observa que no están distribuidos completamente al azar alrededor de 0, lo que podría indicar que el modelo no captura todos los patrones presentes en los datos.

Además, se identificaron ciertos residuos de mayor magnitud, especialmente en ubicaciones donde el ancho de banda experimenta cambios rápidos. Este comportamiento sugiere que un modelo de mayor grado o de diferente tipo podría ajustarse mejor a los datos.

4.1.4.3 Análisis de la ganancia a una frecuencia de 2.4 GHz

En la Figura 4.30 se presenta la variación de la ganancia medida a 84° en coordenadas polares (ver Figura 4.29), en función de las diferentes ubicaciones de la antena evaluadas. Este análisis es fundamental para identificar la posición óptima que maximice el desempeño de la antena en términos de radiación direccional, un aspecto crucial en aplicaciones donde la direccionalidad juega un papel determinante.

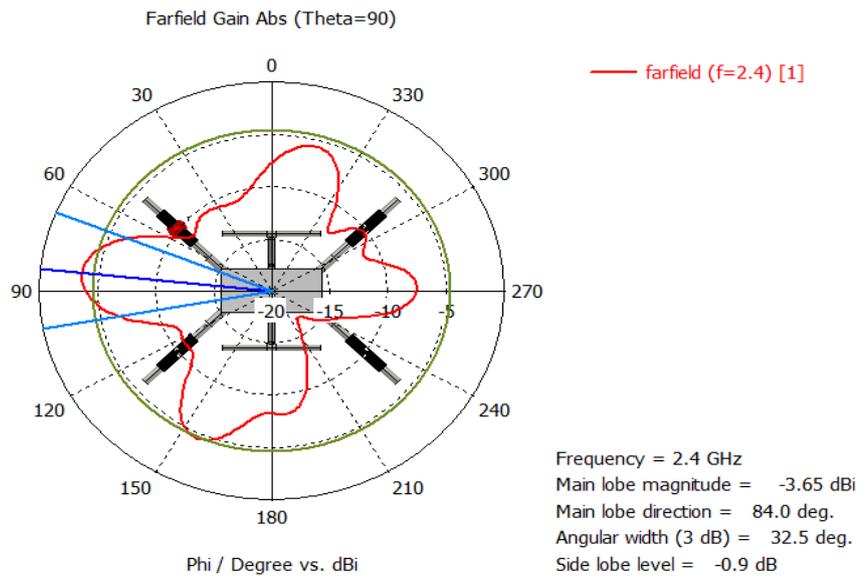


Figura. 4.29. Diagrama de radiación en coordenadas polares a una frecuencia de 2.4 GHz.

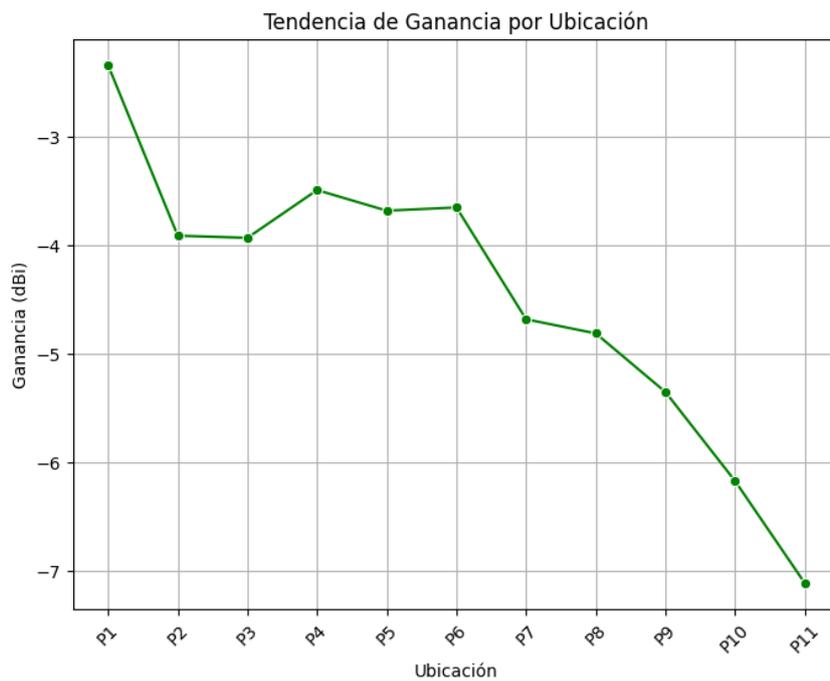


Figura. 4.30. Tendencia de la ganancia a 84° según la ubicación.

Para caracterizar el comportamiento de la ganancia en las ubicaciones evaluadas, se calcularon estadísticas descriptivas, cuyos resultados se resumen en la Tabla 4.8. Estos valores proporcionan una visión general sobre la dispersión y el rango de desempeño de la antena en las condiciones analizadas.

Tabla 4.8. Estadísticas descriptivas de la ganancia.

Estadística	Valor
Número de datos	11
Media	-4.47
Desviación estándar	1.35
Valor mínimo	-7.11
25 % (primer cuartil)	-5.08
50 % (segundo cuartil)	-3.93
75 % (tercer cuartil)	-3.665
Valor máximo	-2.34

La Figura 4.31 muestra el histograma de los valores de ganancia. En él se observa una mayor concentración de datos en el rango de $-5,5 \text{ dBi}$ a -3 dBi , lo cual indica que la mayoría de las posiciones evaluadas se encuentran dentro de este intervalo. Esto sugiere una distribución moderadamente concentrada hacia valores intermedios.

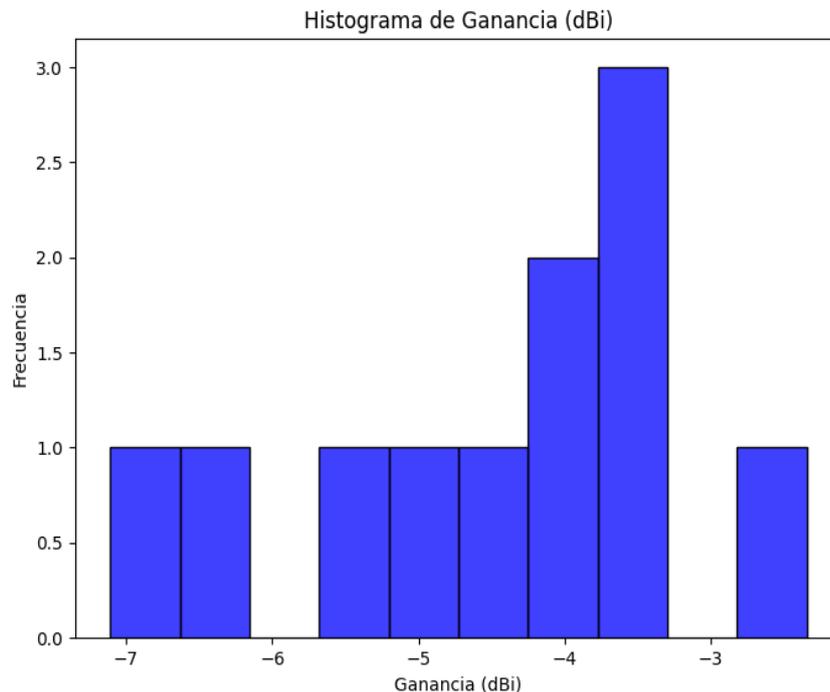


Figura. 4.31. Histograma de la ganancia a 84° .

En la Figura 4.32, se presenta un diagrama de caja que ilustra la dispersión y la variabilidad de los datos en términos de cuartiles. No se identificaron valores atípicos en la muestra, lo

que sugiere una distribución consistente y homogénea de las mediciones realizadas.

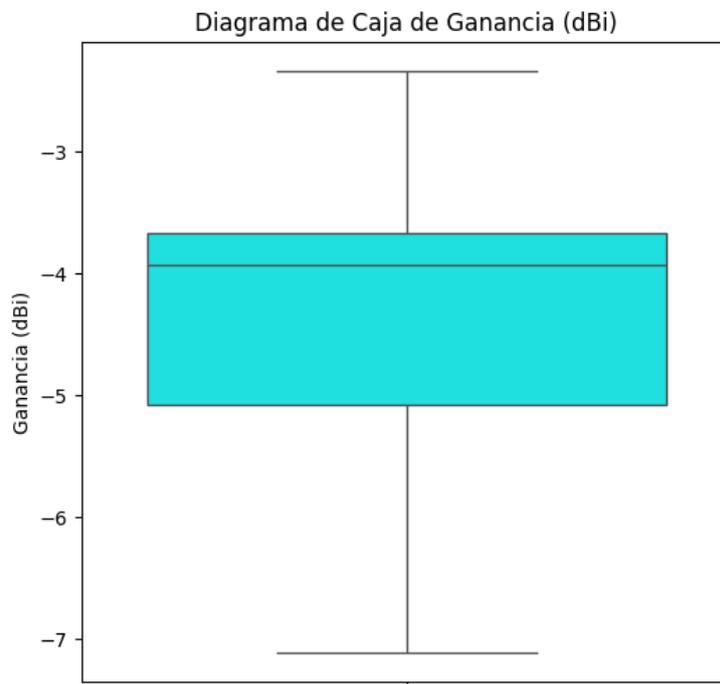


Figura. 4.32. Diagrama de caja de la ganancia a 84° .

A partir del análisis, se concluye que la ubicación óptima para maximizar la ganancia a 84° es P_1 , donde se alcanzó el valor más alto de $-2,34 \text{ dBi}$. Este resultado resalta la relevancia de la posición de la antena en el desempeño radiativo y subraya la necesidad de un diseño adecuado en función de las condiciones específicas de operación.

Se realizó un ajuste de un modelo polinómico de primer grado a la ganancia en función de la ubicación. La ecuación resultante del polinomio es la siguiente:

$$y(x) = -0,3708x - 2,2405 \quad (4.6)$$

donde x representa la ubicación P_n y $y(x)$ corresponde a la ganancia en dBi . La Figura 4.33 ilustra la forma en que el modelo se ajusta a los datos obtenidos a partir del simulador electromagnético.

Se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 0.8314, lo que indica que el 83.14 % de la variación observada en la ganancia puede ser explicada por el modelo. Además, el R^2

ajustado fue de 0.8127, lo que confirma que el modelo de primer orden es adecuado. Este resultado sugiere que el modelo no está sobre ajustado y que la relación lineal es adecuada.

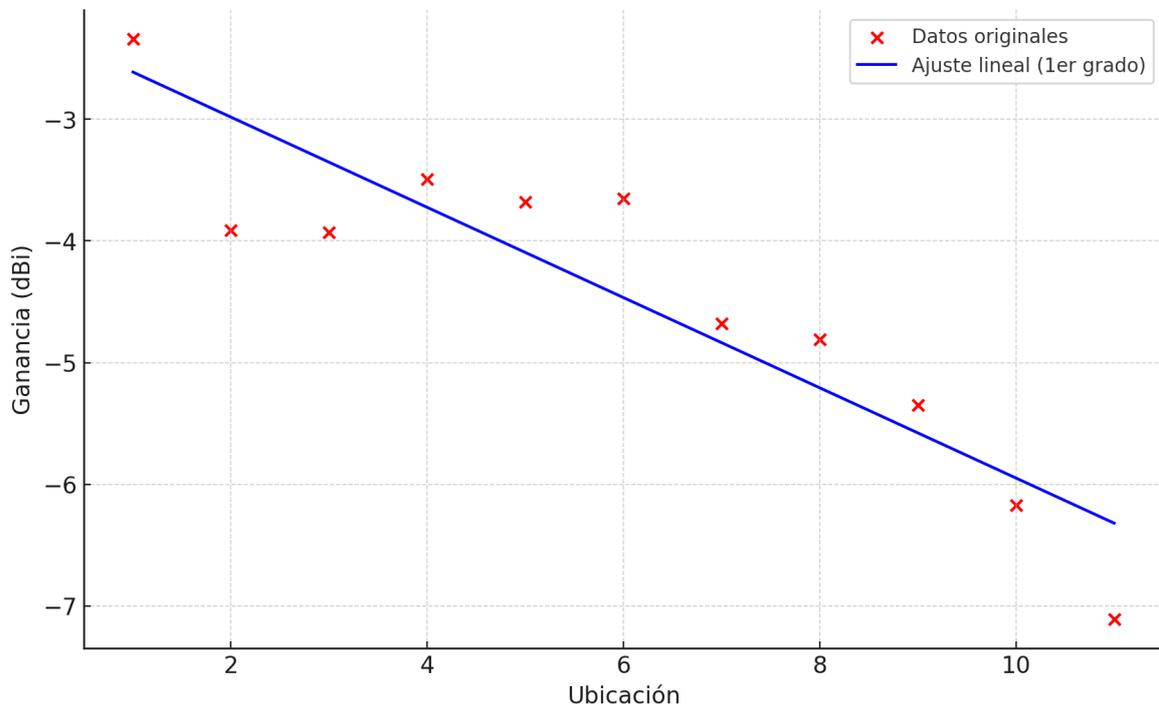


Figura. 4.33. Ajuste del modelo polinómico de la ganancia en función de la ubicación.

Para evaluar la precisión del modelo, se calculó la RMSE, obteniéndose un valor de $0,528 \text{ dBi}$. Esto significa que, en promedio, el modelo presenta un error de aproximadamente $0,528 \text{ dBi}$ al predecir la ganancia. Dado que el RMSE está en la misma unidad que la variable de respuesta, su interpretación es más intuitiva. Este valor es relativamente bajo en comparación con las ganancias observadas, lo que indica que el modelo tiene un buen desempeño.

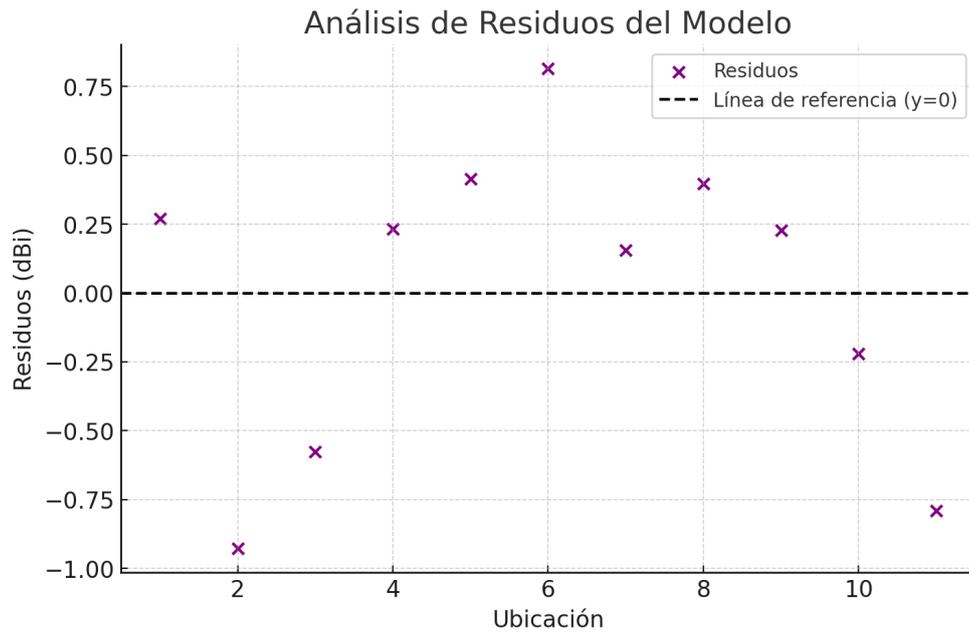


Figura. 4.34. Análisis de residuos del modelo polinómico de la ganancia en función de la ubicación.

La gráfica de los residuos muestra los errores cometidos por el modelo. Los residuos no presentan una tendencia clara, lo que sugiere que el modelo lineal es adecuado. Sin embargo, algunos residuos no están distribuidos de forma completamente aleatoria, lo que podría indicar la presencia de ligeras relaciones no capturadas por el modelo.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

En el presente proyecto de investigación se diseñó un sistema de antenas MIMO agrupado por cuatro antenas que operan a 2.4 GHz, ubicado en los brazos de la plataforma basada en un UAV, siendo estos brazos la principal limitante en el diseño de la antena propuesta.

La plataforma, modelada como una estructura arbitraria basada en el UAV, fue escalada en referencia a una zona específica con el propósito de obtener corrientes características pertenecientes al modo J_3 . A partir de esto, se realizó el CMA, identificando los modos significativos, obteniendo resultados favorables, como las corrientes máximas y mínimas, así como los respectivos diagramas de radiación. Con esta información, se seleccionó el tipo de ECE para excitar los patrones de radiación deseados.

Debido a estructuras complejas y entornos no convencionales, en el diseño de antenas se optó por un enfoque empírico, buscando alternativas para maximizar el rendimiento. Se diseñó una antena con dimensiones de 34.4 mm de largo y 9 mm de ancho, un ancho de banda de 19.54 % a 2.4 GHz, y un diagrama de radiación omnidireccional con una directividad de 2,88 *dB*. Al integrar la antena en la plataforma, esta presentó un desplazamiento en la frecuencia en la gráfica del coeficiente de reflexión. Sin embargo, el amplio ancho de banda permitió mantener la operación en 2.4 GHz. El sistema MIMO presenta valores de coeficiente de reflexión, coeficiente de transmisión y ECC menores a -10 *dB*, -15 *dB* y 0.2, respectivamente, cumpliendo con los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento.

Se realizó la evaluación del coeficiente de reflexión de las antenas en diferentes lugares a una frecuencia de 2.4 GHz, al analizar una antena, corroborando el correcto desempeño de los ICE en áreas de corriente máxima. Al trasladar este componente a zonas de corriente mínima o nula, el desempeño de las antenas se deterioraba, particularmente en lo que respecta al coeficiente de reflexión, lo que disminuía el ancho de banda y deterioraba los parámetros de transmisión. A través de los resultados expuestos, la antena propuesta innova con un ancho de banda amplio en contraste con otros trabajos.

5.2 Recomendaciones

La simulación electromagnética de estructuras grandes y complejas demanda un uso intensivo de recursos computacionales y tiempo. Para optimizar estos recursos, se sugiere reducir la densidad del mallado inicialmente, con el fin de obtener resultados aproximados. Luego, se puede refinar el mallado al nivel recomendado por el simulador y realizar ajustes en la geometría del modelo para alcanzar los resultados deseados. El uso de simetría también es recomendable, ya que disminuye la carga computacional y facilita las modificaciones en el modelado.

Para simplificar el CMA, se propone realizarlo de manera parcial, enfocándose en el sistema de antenas que se integrará y en los patrones de radiación esperados. En general, se sugiere utilizar los tres primeros modos resonantes para obtener resultados efectivos.

El diseño de antenas es un desafío complejo. Para abordarlo, es recomendable estudiar investigaciones publicadas en revistas científicas especializadas, lo que ayudará a comprender mejor el funcionamiento de las antenas, sus circuitos equivalentes, el tipo de ECE a emplear, así como los métodos disponibles para aumentar el ancho de banda y las tecnologías adecuadas para el diseño requerido.

En esta tesis, el diseño de la antena se realizó en parte de manera empírica. En trabajos futuros, se planea implementar un enfoque de ingeniería inversa, desarrollar una formulación matemática y utilizar estos métodos para diseñar antenas que cubran los rangos de frecuencia necesarios para las nuevas tecnologías.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Alsayah, “Structural integration of antennas into the vehicle body,” Theses, Université Côte d’Azur, Mar. 2022. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-03900507>
- [2] J. R. Insua, S. A. Utsumi, and B. Basso, “Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (uav) with crop simulation models,” *PLOS ONE*, vol. 14, no. 3, p. e0212773, mar 2019.
- [3] K. Schab, F. W. Chen, L. Jelinek, M. Capek, J. Lundgren, and M. Gustafsson, “Characteristic modes of frequency-selective surfaces and metasurfaces from s-parameter data,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 12, pp. 9696–9706, dec 2023.
- [4] P. Ylä-Oijala, “Generalized theory of characteristic modes,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 6, pp. 3915–3923, 2019.
- [5] M. F. Adamson, I. L. Morrow, and D. James, “Behaviour of characteristic modes on patch antennas in multilayered media,” *ARMMS: Automated Radio Frequency and Microwave Measurement Society*, apr 2022. [Online]. Available: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/17852>
- [6] J. J. Adams, S. Genovesi, B. Yang, and E. Antonino-Daviu, “Antenna element design using characteristic mode analysis: Insights and research directions,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 64, no. 2, pp. 32–40, 2022.
- [7] J. Núñez, P. Orgeira-Crespo, C. Ulloa, and I. García-Tuñón, “Analysis of the operating conditions for uav-based on-board antenna radiation pattern measurement systems,” *PLOS ONE*, vol. 16, no. 2, pp. 1–21, 02 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245004>
- [8] Q. Zhang, X. Ren, L. Gong, L. Cheng, and Y. Gao, “An unmanned aerial vehicle flight formation for enhanced emergency communication based on conformal antenna design,” *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 5, no. 3, pp. 294–301, 2020.
- [9] C. Wang, Y. Chen, and S. Yang, “Application of characteristic mode theory in hf band aircraft-integrated multiantenna system designs,” *IEEE Transactions on Antennas and*

Propagation, vol. 67, no. 1, pp. 513–521, 2019.

- [10] Q. Zhang, B.-Y. Wu, Y. Gao, and X.-Q. Sheng, “Multilevel fast multipole algorithm enhanced characteristic mode analysis for half-space platform,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 11, pp. 7711–7716, 2020.
- [11] J. P. P. Enríquez, “Diseño e implementación de un radar de banda estrecha, utilizando sdr para la detección de objetos y medición de distancia,” Riobamba, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10693>
- [12] X. Zhang, Y. Li, W. Wang, and W. Shen, “Ultra-wideband 8-port mimo antenna array for 5g metal-frame smartphones,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 72 273–72 282, 2019.
- [13] H. Li, S. Sun, W. Li, M. Wu, and C. Zhou, “Systematic pattern synthesis for single antennas using characteristic mode analysis,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 7, pp. 5199–5208, 2020.
- [14] O. S. Oubbati, M. Atiquzzaman, P. Lorenz, M. H. Tareque, and M. S. Hossain, “Routing in flying ad hoc networks: Survey, constraints, and future challenge perspectives,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 81 057–81 105, 2019.
- [15] N. L. Johannsen and P. A. Hoeher, “Single-element beamforming using multi-mode antenna patterns,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 7, pp. 1120–1123, 2020.
- [16] N. Peitzmeier and D. Manteuffel, “Upper bounds and design guidelines for realizing uncorrelated ports on multimode antennas based on symmetry analysis of characteristic modes,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 6, pp. 3902–3914, 2019.
- [17] W. Su, Q. Zhang, S. Alkaraki, Y. Zhang, X.-Y. Zhang, and Y. Gao, “Radiation energy and mutual coupling evaluation for multimode mimo antenna based on the theory of characteristic mode,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 1, pp. 74–84, 2019.
- [18] C. Wang, Y. Chen, G. Liu, and S. Yang, “Aircraft-integrated vhf band antenna array designs using characteristic modes,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 11, pp. 7358–7369, 2020.
- [19] R. Ma and N. Behdad, “Design of platform-based hf direction-finding antennas using the characteristic mode theory,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1417–1427, 2019.

- [20] X. Sun, D. W. K. Ng, Z. Ding, Y. Xu, and Z. Zhong, "Physical layer security in uav systems: Challenges and opportunities," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 5, pp. 40–47, 2019.
- [21] T. Alladi, Naren, G. Bansal, V. Chamola, and M. Guizani, "Secauthuav: A novel authentication scheme for uav-ground station and uav-uav communication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 12, pp. 15 068–15 077, 2020.
- [22] F. A. Fayez, M. Hammoudeh, B. Adebisi, and K. N. A. Sattar, "Assessing the effectiveness of flying ad hoc networks for international border surveillance," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 15, no. 7, p. 1550147719860406, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1550147719860406>
- [23] J. Lee and H. Ko, "Joint optimization on trajectory, data relay, and wireless power transfer in uav-based environmental monitoring system," *Electronics*, vol. 13, no. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/5/828>
- [24] K. Liu and J. Zheng, "Uav trajectory optimization for time-constrained data collection in uav-enabled environmental monitoring systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 23, pp. 24 300–24 314, 2022.
- [25] J.-C. Padró, F.-J. Muñoz, J. Planas, and X. Pons, "Comparison of four uav georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 75, pp. 130–140, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243418306421>
- [26] A. Utsav, A. Abhishek, P. Suraj, and R. K. Badhai, "An iot based uav network for military applications," in *2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2021, pp. 122–125.
- [27] Z. Xiaoning, "Analysis of military application of uav swarm technology," in *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, 2020, pp. 1200–1204.
- [28] M. Atif, R. Ahmad, W. Ahmad, L. Zhao, and J. J. P. C. Rodrigues, "Uav-assisted wireless localization for search and rescue," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 3261–3272, 2021.
- [29] E. T. Alotaibi, S. S. Alqefari, and A. Koubaa, "Lsar: Multi-uav collaboration for search and rescue missions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 55 817–55 832, 2019.

- [30] M. Y. Arafat and S. Moh, "Localization and clustering based on swarm intelligence in uav networks for emergency communications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8958–8976, 2019.
- [31] J. Sánchez-García, D. Reina, and S. Toral, "A distributed pso-based exploration algorithm for a uav network assisting a disaster scenario," *Future Generation Computer Systems*, vol. 90, pp. 129–148, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X18303649>
- [32] A. Al-Kaff, M. J. Gómez-Silva, F. M. Moreno, A. de la Escalera, and J. M. Armingol, "An appearance-based tracking algorithm for aerial search and rescue purposes," *Sensors*, vol. 19, no. 3, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/652>
- [33] K. Miyano, R. Shinkuma, N. B. Mandayam, T. Sato, and E. Oki, "Utility based scheduling for multi-uav search systems in disaster-hit areas," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 26 810–26 820, 2019.
- [34] J. R. Insua, S. A. Utsumi, and B. Basso, "Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (uav) with crop simulation models," *PLOS ONE*, vol. 14, no. 3, pp. 1–21, 03 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212773>
- [35] S. Rahim, L. Peng, S. Chang, and P.-H. Ho, "On collaborative multi-uav trajectory planning for data collection," *Journal of Communications and Networks*, vol. 25, no. 6, pp. 722–733, 2023.
- [36] A. Kanzaki and H. Akagi, "A uav-collaborative sensing method for efficient monitoring of disaster sites," in *Advanced Information Networking and Applications*, L. Barolli, M. Takizawa, F. Xhafa, and T. Enokido, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 775–786.
- [37] S. Samiappan, L. Hathcock, G. Turnage, C. McCraine, J. Pitchford, and R. Moorhead, "Remote sensing of wildfire using a small unmanned aerial system: Post-fire mapping, vegetation recovery and damage analysis in grand bay, mississippi/alabama, usa," *Drones*, vol. 3, no. 2, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/2/43>
- [38] N. L. Johannsen, N. Peitzmeier, P. A. Hoehner, and D. Manteuffel, "On the feasibility of multi-mode antennas in uwb and iot applications below 10 ghz," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 69–75, 2020.

- [39] Z. Ma, B. Ai, R. He, G. Wang, Y. Niu, M. Yang, J. Wang, Y. Li, and Z. Zhong, "Impact of uav rotation on mimo channel characterization for air-to-ground communication systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 11, pp. 12 418–12 431, 2020.
- [40] Q. Zhang and B. Wu, "Characteristic mode analysis for pattern diversity and beamforming: A survey," *Chinese Journal of Electronics*, vol. 33, no. 5, pp. 1117–1126, 2024.
- [41] K. Ren, M. Ranjbar Nikkhah, and N. Behdad, "Design of dual-polarized, platform-based hf antennas using the characteristic mode theory," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 7, pp. 5130–5141, 2020.
- [42] Y. Huang, *Antennas: from theory to practice*. John Wiley & Sons, 2021.
- [43] C. Parini, S. Gregson, J. McCormick, D. J. van Rensburg, and T. Eibert, *Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements, 2nd Expanded Edition, Volume 1*. The Institution of Engineering and Technology, 2020. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/doi/abs/10.1049/SBRA538F>
- [44] J. Molins-Benlliure, M. Cabedo-Fabrés, E. Antonino-Daviu, and M. Ferrando-Bataller, "Sector unit-cell methodology for the design of sub-6 ghz 5g mimo antennas," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 100 824–100 836, 2022.
- [45] K. K. G. Rojas, "Implementación de una antena mimo para teléfonos inteligentes a las frecuencias wifi de 2.4 ghz y 5 ghz para generación de haces conformados," Riobamba, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12193>
- [46] A. Mohanty and B. R. Behera, "Characteristics mode analysis: A review of its concepts, recent trends, state-of-the-art developments and its interpretation with a fractal uwb mimo antenna," *PIER B*, vol. 92, pp. 19–45, 2021.
- [47] P. Ylä-Oijala, "Generalized theory of characteristic modes," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 6, pp. 3915–3923, jun 2019.
- [48] A. Balcaen, "Characteristic mode approach to understanding a capacitively fed crossed bow-tie antenna," Master's thesis, Carleton University, Ottawa, Ontario, 2021.
- [49] S. Ghosal, A. De, A. P. Duffy, and A. Chakrabarty, "Selection of dominant characteristic modes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 2, pp. 451–460, 2020.
- [50] B. B. Q. Elias, P. J. Soh, A. A. Al-Hadi, P. Akkaraekthalin, and G. A. E. Vandenbosch,

“A review of antenna analysis using characteristic modes,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 98 833–98 862, 2021.

- [51] S. C. Podlogar, P. J. Collins, R. J. Marhefka, and A. J. Terzuoli, “Utilization of characteristic modal analysis for the antenna design needed for an afit satellite,” in *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, 2022, pp. 1822–1823.
- [52] J.-F. Lin and L. Zhu, “Low-profile high-directivity circularly-polarized differential-fed patch antenna with characteristic modes analysis,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 2, pp. 723–733, 2021.
- [53] M. B. Perotoni, F. A. A. D. Silva, and L. A. D. Silva, “Characteristic mode analysis applied to antennas,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 42, p. e20200119, 2020. [Online]. Available: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172020000100454&tlng=en
- [54] P. Ojeda and C. Ramiro, “Design of multi-feed uwb antennas using the theory of characteristic modes,” Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/175186>
- [55] M. Cabedo Fabrés, “Systematic design of antennas using the theory of characteristic modes,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2008.
- [56] J. C. Gonzalez Cevallos, “Diseño de una metasuperficie usando la teoría de modos característicos para reducir el radar cross section,” bachelorThesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, Apr. 2022. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/8955>
- [57] F. A. Dicandia and S. Genovesi, “A compact cubesat antenna with beamsteering capability and polarization agility: Characteristic modes theory for breakthrough antenna design,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, no. 4, pp. 82–93, 2020.
- [58] X.-T. Yuan, Z. Chen, T. Gu, and T. Yuan, “A wideband pifa-pair-based mimo antenna for 5g smartphones,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 3, pp. 371–375, 2021.
- [59] H. Ben Hamadi, S. Ghnimi, L. Latrach, P. Benech, and A. Gharsallah, “New design of multi-band pifa antenna with reduced sar for mobile and wireless applications,” *Wireless Personal Communications*, vol. 115, no. 2, p. 1211–1226, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/s11277-020-07619-1>

- [60] Z. Huang, H. Wu, S. S. Mahmoud, and Q. Fang, "Design of a novel compact microstrip antenna for implantable biotelemetry applications," *Sensors*, vol. 22, no. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8182>
- [61] A. Lamkaddem, A. E. Yousfi, V. González-Posadas, and D. Segovia-Vargas, "Miniaturized dual band implantable antenna for implanted biomedical devices," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 15 026–15 036, 2024.
- [62] A. Basir, M. Zada, Y. Cho, and H. Yoo, "A dual-circular-polarized endoscopic antenna with wideband characteristics and wireless biotelemetric link characterization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 10, pp. 6953–6963, 2020.
- [63] Z. Jiang, Z. Wang, M. Leach, E. G. Lim, J. Wang, R. Pei, and Y. Huang, "Wideband loop antenna with split-ring resonators for wireless medical telemetry," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 1415–1419, 2019.
- [64] A. Darvazehban, S. A. Rezaeieh, and A. Abbosh, "Pattern-reconfigurable loop–dipole antenna for electromagnetic pleural effusion detection," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 8, pp. 5955–5964, 2020.
- [65] S. Yan and G. A. E. Vandenbosch, "Design of wideband wearable antenna using characteristic mode analysis," in *2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, 2019, pp. 1–4.
- [66] J. A. Ganie, C. Singh, K. R. Jha, and S. K. Sharma, "A low band integrated 5g antenna design using characteristic mode analysis," in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2019, pp. 413–414.
- [67] S. Dey, D. Chatterjee, E. J. Garboczi, and A. M. Hassan, "Plasmonic nanoantenna optimization using characteristic mode analysis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 1, pp. 43–53, 2020.