



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

TEMA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MIMO A 2.4 GHZ Y 5.8 GHZ
PARA APLICACIONES DE RELOJ INTELIGENTE ANALIZADA CON
LA TEORÍA DE MODOS CARACTERÍSTICOS**

AUTOR:

Chávez Garcés Cristina Alexandra

TUTOR:

Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda Ph.D

Riobamba, Ecuador. 2024

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, Cristina Alexandra Chávez Garcés, con cédula de ciudadanía 0650007768, autor del trabajo de investigación titulado: Implementación de una antena MIMO de 2.4 GHz y 5.8 GHz para aplicaciones de reloj inteligente analizada con la Teoría de Modos Característicos, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, 05 de abril de 2024



Cristina Alexandra Chávez Garcés

C.I: 0650007768

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

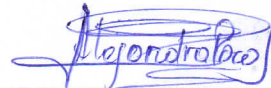
Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MIMO A 2.4 GHZ Y 5.8 GHZ PARA APLICACIONES DE RELOJ INTELIGENTE ANALIZADA CON LA TEORIA DE MODOS CARACTERISTICOS”**, presentado por **CRISTINA ALEXANDRA CHAVEZ GARCES**, con cédula de identidad número **0650007768**, certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 05 de abril de 2024

Ing. Deysi Vilma Inca Balseca
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



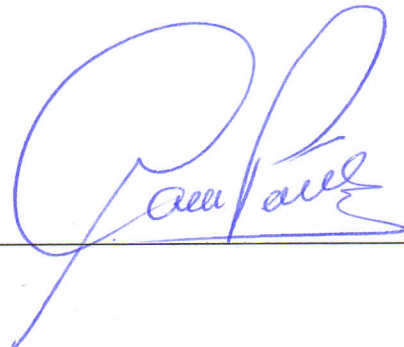
Ing. Alejandra del Pilar Pozo Jara
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ph.D. Manuel Antonio Meneses Freire
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda
TUTOR



CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

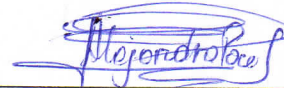
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MIMO A 2.4 GHZ Y 5.8 GHZ PARA APLICACIONES DE RELOJ INTELIGENTE ANALIZADA CON LA TEORIA DE MODOS CARACTERISTICOS”, presentado por CRISTINA ALEXANDRA CHAVEZ GARCES, con cédula de identidad número 0650007768, bajo la tutoría de PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 05 de abril del 2024.

Ing. Deysi Vilma Inca Balseca
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Alejandra del Pilar Pozo Jara
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ph.D. Manuel Antonio Meneses Freire
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **Chávez Garcés Cristina Alexandra** con CC: **0650007768**, estudiante de la Carrera **Ingeniería en Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"Implementación de una Antena MIMO a 2.4 GHz y 5.8 GHz para aplicaciones de reloj inteligente analizada con la Teoría de Modos Característicos"**, cumple con el 6 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **Turnitin**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 01 de abril de 2024



firmado electrónicamente por:
CARLOS RAMIRO
PEÑAFIEL OJEDA

Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda Ph.D.
TUTOR

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a mi familia y a mis amigos pero sobre todo a mi padre Italo Patricio y a mi madre Dolores del Carmen quienes con su amor y sabiduría me enseñaron a ver el camino y me dieron las herramientas para vivirlo; a mi hermano Italo por ser mi soporte y mi sombrilla en tiempos complejos; y para mi sobrina Evelyn Alondra porque el mundo es de ella y para ella.

AGRADECIMIENTO

Ser agradecido es una de las características más nobles del ser humano, así que quiero agradecer a todos quienes un día aportaron en mi sueño de ser ingeniera.

Quiero empezar por agradecer infinitamente a mi familia por acompañarme en este camino: a mi madre Carmita Garcés, a mi padre Patricio Chávez y a mi hermano Patho quienes me han cargado en sus hombros para que yo alcance mis metas, a mi prima y complice Andrea Mely; a mi tío Marco por la inspiración y por la compañía que siempre he sentido de parte de él, su esposa mi tía Gladys y sus hijos Marco y Martín, a mis queridas tías Aída y Magdalena, que siempre han estado preocupadas y atentas de mi camino universitario.

También quiero agradecer a la gente que conocí en la universidad: a mis compañeros del club de robótica quienes me prestaron su laboratorio, a mis compañeros del Semillero de Investigación de Radiación Electromagnética, a mis queridos amigos de la facultad: Roberto, Stalyn, Alejandro, Washo y Darwin; y a los mejores amigos que me regalo estudiar ingeniería: Byron y David.

Jamás olvidaré los días de clases en los que aprendí pero también compartí una risa y buenos momentos junto a mis profesores, por eso quiero agradecerles de manera especial: al Ph.D. Marlon Basantes por su amistad y sinceridad, a la Doctora Myriam Trujillo por apoyarme siempre con el idioma inglés, a la Ing. Deysi Inca y a la Ph.D. Yesenia Cevallos por su apoyo y el ejemplo tan grande que son como mujeres en la ingeniería, y a mi tutor el Ph.D. Carlos Peñafiel por su guía y acompañamiento en este proceso de investigación.

Por último pero nunca menos importantes, quiero agradecerle a mi gran amiga Genesis Daniela por ser una estrella en mi vida y a Edwin Andrés quien con su compañía llena de magia mis días.

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	17
1.3. Justificación	18
1.4. Objetivos	19
1.4.1. General	19
1.4.2. Específicos	19
CAPÍTULO II	20
2.1. Estado del Arte	20
2.2. Fundamentación Teórica	22
CAPÍTULO III	29
3.1. Metodología	29
3.1.1. Tipo de Investigación	29
3.1.2. Métodos de Investigación	29
3.1.3. Procedimiento	29
3.1.4. Fuentes de Información	31
3.1.5. Población y Muestra	31

3.1.5.1. Población	31
3.1.5.2. Muestra	31
3.1.6. Instrumentos de la Investigación	31
3.1.7. Operación de Variables	32
3.2. Diseño y Fabricación	33
3.2.1. Proceso de diseño de la antena	33
3.2.2. Modelado y Simulación de la Antena.	36
3.2.3. Análisis de la Antena con la Teoría de Modos Característicos	39
3.2.4. Implementación de la Antena	39
3.2.5. Caracterización de la Antena	40
CAPÍTULO IV	42
4.1. Resultados y Discusiones	42
4.2. Resultados del análisis de las antenas con TCM	42
4.3. Resultados del análisis del ECC	46
4.4. Resultados de simulación e implementación de la antena.	47
4.4.1. Resultados de simulación	47
4.4.2. Resultados de implementación	49
4.5. Comparación de los resultados con simulaciones similares	50
4.6. Comparación de los resultados de implementaciones similares.	51
CAPÍTULO V	52
5.1. Conclusiones	52
5.2. Recomendaciones	54
BIBLIOGRAFÍA	58

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Resumen del ancho de banda en antenas de interés.	22
3.2. Operación de las variables.	32
3.3. Características de las circunferencias.	34
3.4. Longitud de onda por secciones de la circunferencia.	35
4.5. Resumen del ancho de banda [%] de los resultados	50

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Elementos para el diseño de antenas SIW.	23
2.2. (a) Transición de línea microstrip a SIW, (b) Transición de línea coplanar a SIW [24]	24
2.3. Parche a) Cuadrado, b) Rectangular, c) Circular, d) Elíptico, e) Triangular, f) de Sector Circular, g) de Anillo, f) de Sector de anillo.	25
2.4. Representación gráfica de las corrientes características [14].	27
2.5. Corrientes características en dos discos paralelos [14].	27
2.6. Representación de los campos característicos [14].	28
3.7. Diagrama de bloques del proceso de diseño de la antena propuesta.	30
3.8. Superficie circular dividida para: a) 2 antenas, b) 4 antenas, c) 6 antenas y d) 8 antenas.	35
3.9. División de la superficie para distribuir las antenas.	36
3.10. Bosquejo: a) circular 4 antenas, b) hexagonal 6 antenas, c) circular 6 antenas.	36
3.11. Modelos con fallas: a) en el acoplamiento, b) en la alimentación y c) en la adaptación con otras antenas.	37
3.12. a) Antena en la superficie completa, b) con una vía c) con dos vías, d) con tres vías, e) con cuatro vías, f) con cinco vías.	37
3.13. a) Modelo aproximado a 2.4 GHz, b) Modelo con mejor acoplamiento y c) Modelo con las tres antenas.	38
3.14. a) Modelo aproximado a 5.8 GHz, b) Modelo con mejor acoplamiento y c) Modelo con las tres antenas.	38
3.15. Intentos de implementación fallidos: a) Impregnación con papel fotográfico, b) Impresión laser sobre el sustrato.	39
3.16. Antena Final.	40
3.17. Caracterización de la antena final con el VNA.	41
4.18. Ángulos característicos de la antena de 2.4 GHz.	42
4.19. Potencia contribuida por los modos característicos de la antena de 2.405 GHz.	43
4.20. Corrientes características del modo J_{11} a) vista frontal y b) vista lateral. . .	43
4.21. Campo característicos inducido por J_{11}	44
4.22. Ángulos característicos de la antena 5.8 GHz.	44
4.23. Potencia contribuida por los modos característicos de la antena de 5.8 GHz.	45
4.24. Corrientes características de J_{11} a) vista frontal, b) vista lateral; y de J_{13} d) vista frontal, e) vista lateral.	45
4.25. Campos característicos inducidos por: a) J_{11} y b) J_{13}	46
4.26. ECC a 2.4 GHz.	46
4.27. ECC a 5.8 GHz.	47
4.28. Parámetros de dispersión de la antena simulada a 2.4 GHz.	48
4.29. Parámetros de dispersión de la antena simulada a 5.8 GHz.	48
4.30. Parámetro de reflexión de la antena implementada a 2.4 GHz.	49

4.31. Parámetro de reflexión de la antena implementada a 5.8 GHz.	49
---	----

RESUMEN

En el marco del desarrollo de las comunicaciones inalámbricas de área corporal (WBAN), es fundamental el trabajo en antenas para dispositivos wearables como los relojes inteligentes. Por ello, en este trabajo de investigación se presenta el diseño y la implementación de una antena MIMO de 6 componentes a las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz para reloj inteligente analizada con la TCM; con el objetivo de contrarrestar los efectos de interferencia causados por la cercanía del cuerpo humano y brindar una alternativa para la transición a nuevos protocolos de comunicación inalámbrica que permitan aplicaciones de respuesta sincrónica. En este contexto, se realiza un estudio del estado del arte que sirve para conocer el estado actual de la rama de investigación de las antenas para reloj inteligente. Se realiza un proceso de diseño propio para la creación de las 6 antenas en una sola superficie, incluyendo la alimentación de las antenas y el desarrollo de antenas SIW. Las antenas que componen el diseño final son analizadas con la teoría de modos característicos; la interpretación física se realiza por medio del análisis del ángulo característico, también se observa el comportamiento de las corrientes características y los campos característicos; todo esto con el fin de conocer mejor el comportamiento de las propiedades intrínsecas de la antena; esta información es complementada con el análisis del coeficiente de correlación envolvente para analizar el comportamiento MIMO de la antena final. Al diseñar la antena se obtienen dos anchos de banda de 4.47 % y 5.51 % a 2.409 GHz y 5.798 GHz respectivamente; por la complejidad del diseño de esta antena de bajo perfil es implementada usando una máquina de precisión.

Palabras clave: Ancho de banda, Antena para reloj inteligente, bajo perfil, MIMO, SIW, TCM..

ABSTRACT

Within the framework of the development of wireless body area communications (WBAN), work on antennas for wearable devices such as smart watches is essential. Therefore, this research work presents the design and implementation of a 6-component MIMO antenna at the 2.4 GHz and 5.8 GHz bands for smart watches analyzed with TCM; with the aim of counteracting the interference effects caused by the proximity of the human body and providing an alternative for the transition to new wireless communication protocols that allow synchronous response applications. In this context, a study of the state of the art is carried out that serves to know the current state of the research branch of antennas for smart watches. A proprietary design process is carried out for the creation of the 6 antennas on a single surface, including the feeding of the antennas and the development of SIW antennas. The antennas that make up the final design are analyzed with the theory of characteristic modes; The physical interpretation is carried out through the analysis of the characteristic angle, the behavior of the characteristic currents and the characteristic fields is also observed; all this in order to better understand the behavior of the intrinsic properties of the antenna; This information is complemented with the analysis of the envelope correlation coefficient to analyze the MIMO behavior of the final antenna. When designing the antenna, two bandwidths of 4.47 % and 5.51 % are obtained at 2.409 GHz and 5.798 GHz respectively; Due to the complexity of the design, this low-profile antenna is implemented using a precision machine.

Keywords: Antenna for smart watch, Bandwidth, Low Profile, MIMO, SIW, TCM.

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

Actualmente el desarrollo de dispositivos que se puedan incluir en la vestimenta, mejor conocidos como “Dispositivos wearables”; se encuentra en la búsqueda por contrarrestar los efectos del cuerpo humano en las antenas que utilizan para comunicarse y su vez adaptarse a los protocolos emergentes de comunicaciones inalámbricas [1,2]. En este contexto, se ha desarrollado la investigación de antenas para redes inalámbricas de area corporal (WBAN) [3], existiendo diferentes especialidades como: antenas textiles destinadas a prendas de vestir [4], antenas para pulseras [5], antenas para bandas de brazo [6], entre otras; sin embargo, las antenas para reloj inteligente son las más desarrolladas debido a la popularidad de los dispositivos y las aplicaciones que tiene.

Con la era de la transformación digital se busca incluir a los relojes inteligentes como dispositivos de Internet de las cosas [1,7], por lo que se vuelve necesario crear antenas que permitan disminuir el tiempo de latencia de las comunicaciones para poder soportar aplicaciones de respuesta sincrónica [8].

Para el diseño de antenas para reloj inteligente se deben tener varias consideraciones, como por ejemplo: estos dispositivos tienen que ser de bajo perfil [9], se puede implementar múltiples antenas para contrarrestar el desvanecimiento por trayectos múltiples causado por el movimiento del cuerpo humano [2], se debe aumentar el número de antenas sin aumentar el tamaño de la estructura de la antena [10] y estos dispositivos deben ser adecuadas para su implementación en el reloj inteligente [2,9].

Para esta investigación se realizó un estudio del estado del arte, con el fin de definir el panorama de la rama de investigación de antenas para reloj inteligente y determinar las herramientas a utilizar para crear un diseño innovador.

En este documento se describe el proceso de diseño e implementación de una antena MIMO; el cual, se fundamenta en una serie de simulaciones de las que se obtienen dos antenas que resuenan a 2.409 GHz y 5.798 GHz respectivamente; la antena se implementa con el uso de una máquina de precisión, para posteriormente caracterizar la antena y obtener resultados. La antena diseñada también es analizada con la teoría de modos característicos para conocer cuál es el aporte de las propiedades intrínsecas de la antena.

De esta forma, este trabajo de investigación esta compuesto por cinco capítulos; en el primer capítulo se presentan el problema, la justificación y los objetivos; en el segundo capítulo está el estudio del estado del arte y el marco teórico; en el tercer capítulo se encuentra la metodo-

logía, y el proceso de diseño y fabricación; en el cuarto capítulo se encuentran los resultados de la investigación; y en el último capítulo se encuentran las conclusiones y recomendaciones.

1.2 Planteamiento del Problema

La aparición de los relojes inteligentes como evolución de los relojes convencionales, dió paso al surgimiento de una nueva área de investigación centrada en el diseño de antenas para reloj inteligente [1]. En este campo se busca diseñar antenas que se acoplen a la geometría de los dispositivos y que tengan una capacidad de transmisión y recepción de datos que se adapte a los diferentes protocolos de comunicación inalámbrica existentes y emergentes [9, 11, 12], teniendo en cuenta que el cuerpo humano interfiere en el funcionamiento de las antenas que trabajan en su cercanía [2]. Comercialmente se han planteado diferentes soluciones como la aplicación de antenas FPCB (Flexible Printed Circuit Board) [9]; mientras que, por otro lado los investigadores asumieron el reto que implica el diseño de antenas para reloj inteligente.

Considerando la geometría de los dispositivos, se han diseñado antenas que buscan ser acoplables pero debido al volumen de las mismas se vuelven difíciles de integrar en un reloj inteligente [10, 13]. Por lo que, el resultado de la búsqueda de diferentes soluciones para generar dispositivos cada vez más pequeños, radica en la aplicación de diferentes técnicas que permitan reducir el tamaño de las antenas y acoplarlas al dispositivo final [2, 14]; sin embargo, utilizar dichas técnicas como agregar varias antenas en una sola superficie, resulta en diseños complejos de difícil implementación [15] o en soluciones que se quedan en simulaciones por el reto que implica su implementación [16].

Las soluciones comerciales son populares por ser soluciones básicas que presentan desventajas como: eficiencia limitada, bajo rendimiento y ancho de banda limitado [11]; estas desventajas pueden comprometer la conexión a internet, la respuesta de aplicaciones de solucitud instantánea y la percepción del usuario sobre las mismas; de igual forma las antenas producto de las investigaciones de esta rama han ido evolucionando para disminuir el volumen de las antenas, pero algunas aún tienen problemas como: diseños gruesos, limitaciones en el ancho de banda y dificultad en la implementación de las antenas [12, 14].

1.3 Justificación

Actualmente los relojes inteligentes deben tener una mayor capacidad de transmisión de datos debido a que ahora pretenden analizar a tiempo sincrónico variables como: ritmo cardíaco, frecuencia de respiración, número de pasos y velocidad, entre otras; manteniendo una constante transmisión de información entre el usuario e internet [17]; esto genera la oportunidad de investigar soluciones que respondan a las necesidades que aparecen por las limitaciones de tamaño de los relojes inteligente, que cada vez evolucionan más y posteriormente estarán avanzando hacia nuevos protocolos de comunicación inalámbrica.

En busca de innovar dentro del desarrollo de antenas para reloj inteligente, se propone diseñar una antena de bajo perfil utilizando diferentes técnicas que sirvan para obtener mejores resultados de los que ya existen. La aplicación de tecnología MIMO permite implementar varias antenas en una sola superficie, resolviendo el problema del espacio reducido disponible dentro de los relojes inteligentes y su vez brindando una solución a la interferencia que genera el cuerpo humano y su movimiento, debido a la transmisión en múltiples direcciones. El diseño de una antena innovadora que busca mejorar la calidad de la transmisión de datos y que trabaje a doble banda a las frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz pertenecientes a la banda de ISM (Industrial, Scientific and Medical - Industria, Ciencia y Medicina), sirve para provechar los protocolos de comunicación inalámbrica existentes a 2.4 GHz como lo son: Wi-Fi o Bluetooth, y a su vez el diseño de una antena a una frecuencia mayor que sea apta para la transición a nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica que toleren las comunicaciones de baja latencia y permitan el uso de aplicaciones de respuesta instantánea y IoT.

De esta forma, en el siguiente apartado se detallan los objetivos a cumplir para crear una antena que presente nuevos resultados en la rama de investigación de las antenas para reloj inteligente.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Implementar una antena con tecnología de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO) de doble banda a las frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz para un reloj inteligente analizada con la Teoría de Modos Característicos (TCM).

1.4.2 Específicos

- Realizar un estudio del estado del arte en tecnología de antenas MIMO para relojes inteligentes.
- Diseñar una antena que opere a las frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz.
- Aplicar la Teoría de Modos Característicos a la antena para optimizar su diagrama de radiación.
- Implementar la antena para caracterizarla con un analizador de redes vectoriales.

CAPÍTULO II

2.1 Estado del Arte

Los relojes inteligentes son el producto más popular entre los dispositivos “wearables”, estos hacen referencia a todo dispositivo que se pueda llevar en la vestimenta como accesorio o dentro de las prendas, siendo fundamental que estos dispositivos tengan la capacidad de conectarse de forma inalámbrica [1]. Hoy en día con la transformación digital se busca incluir a estos dispositivos en el desarrollo de IoT [1, 18], con el fin de que tengamos el control de las cosas que nos rodean y podamos conocer su estado al momento [19]. Comúnmente se utiliza estos dispositivos para la notificación de alertas, la recopilación de información mediante sensores y el almacenamiento de la misma [17]. El uso de antenas es indispensable en los relojes inteligentes, debido a que estas cumplen con la función de enviar y recibir información de forma inalámbrica utilizando el espacio libre como medio de transmisión [20].

Los relojes inteligentes como se perciben actualmente aparecieron en el año 2013 con el reloj inteligente Pebble el cual podía mostrar notificaciones, reproducir audio y ejecutar diferentes aplicaciones con una conexión de bluetooth, siendo la evolución de lo que en algún momento fueron: los relojes digitales, los relojes con memoria programable y relojes con micrófono y altavoz incluidos [1].

Las antenas para reloj inteligente son parte de las tecnologías WBAN (Wireless Body Area Network, Redes Inalámbricas de Área Corporal), por lo que una de las primeras investigaciones en el año 2013 se presenta como una antena para aplicaciones de WBAN [3]. En el año 2014 se realiza un estudio SAR (Specific Absorption Rate, Tasa de Absorción Específica) sobre el efecto de las antenas para reloj inteligente en el cuerpo humano, el cual garantiza la seguridad de estos dispositivos [21]; posteriormente se encuentran una serie de investigaciones que se dedican a las antenas para reloj inteligente.

Para el año 2015 en [9] se presenta una antena de cuadro diseñada para comunicaciones bluetooth, donde se plantea que este tipo de antenas deben ser pequeñas y ser diseñadas para estar ocultas dentro de los dispositivos. En base a lo anterior, en el año 2016 en [11] se presenta el diseño de una antena para comunicaciones bluetooth que busca aprovechar el marco del reloj para integrar la antena.

Sin embargo los primeros intentos de desarrollo de antenas para reloj inteligente no tuvieron mucho éxito, por lo que en el mismo año se presenta en una antena HIS (High Impedance Surface - Superficie de alta impedancia) cuadrada que busca mejorar la calidad de la comunicación del dispositivo, aquí también se describe que las antenas para reloj inteligente deben

ser compactas, de bajo perfil y altamente directivas [12].

Con el avance en la popularidad de las comunicaciones Wi-Fi, para el año 2017 se presenta en [13] una antena para comunicaciones Wi-Fi que sirva para mejorar el tratamiento de los datos que recopilan los sensores de los dispositivos, en esta se plantea que el reto de diseño de una antena para reloj inteligente radica en que se deben crear antenas que se acoplen a los dispositivos emergentes como el Huawei Elegant que es un reloj inteligente circular. Posteriormente en el mismo año, se presenta en [10] otra antena HIS para comunicaciones Wi-Fi y Bluetooth que busca mejorar la directividad de los dispositivos previamente analizados, presentando un resultado que define el uso de antenas HIS como una buena opción para el desarrollo de antenas para reloj inteligente.

En el contexto del desarrollo de antenas HIS para reloj inteligente, se presenta en el año 2018 en [2] la miniaturización de una antena HIS en la que se implementan cuatro antenas en una sola superficie aplicando el concepto de antenas MIMO, así se redefine el reto de diseño en implementar la mayor cantidad de antenas sin aumentar el tamaño geométrico total. De esta forma, para el año 2019 en [14] se utiliza la teoría de modos característicos para diseñar una antena MIMO con el fin de solucionar los problemas generados por el desvanecimiento por trayectos múltiples que ocurre por el movimiento de las partes del cuerpo.

Con el fin de avanzar en la rama de investigación, en el año 2020 en [15] se presenta una antena integrada con polarización diversa, en la que se diseñan dos dispositivos resonantes y se realiza el análisis de ECC para observar el comportamiento MIMO de las antenas. Para el año 2021, en [16] se presenta un diseño diferente utilizando tecnología SIW para diseñar una antena MIMO doble banda con analizada con la teoría de modos característicos, esta antena marca el camino para el desarrollo de antenas que se adapten a los protocolos de comunicaciones inalámbricas emergentes en la actualidad.

En base a los objetivos planteados para esta investigación, se puede destacar como las investigaciones de mayor relevancia a: la antena MIMO analizada con TCM presentada en [16] donde se encuentra la simulación de la antena MIMO con cuatro componentes a dos bandas: 2.4 GHz y 5.8 GHz; y la antena de la investigación [2], donde se presenta la implementación de una antena MIMO de cuatro componentes a 2.4 GHz. Ambas referencias presentan resultados que son útiles para definir el comportamiento de la antena final, por lo que en la Tabla 2.1 se recopila la información sobre los mejores resultados de ancho de banda entre las antenas de ambas investigaciones a las diferentes frecuencias de interés.

Tabla 2.1. Resumen del ancho de banda en antenas de interés.

Ref.	Avance	Frecuencia [GHz]	Ancho de Banda [%]
[16]	Simulación	2,4	3.69
[16]	Simulación	5,8	4.95
[2]	Simulación	2.4	4.45
[2]	Implementación	2.4	8.41

2.2 Fundamentación Teórica

Una antena es parte de cualquier sistema de transmisión o recepción, es un dispositivo capaz de transformar señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa, para poder radiar o recibir ondas a ciertas frecuencias en el espacio libre [22]. Las ondas electromagnéticas se definen en referencia a la longitud de la onda, que está representada en la Ecuación 2.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Al diseñar una antena se produce un cierto ancho de banda en la frecuencia deseada. El ancho de banda es el intervalo de frecuencias en que una antena opera de forma satisfactoria y este depende de su geometría [22]. Para calcular el ancho de banda de una antena se utiliza la ecuación 2.2, donde f_o se considera el promedio de la frecuencia máxima y mínima del intervalo y está expresada en la Ecuación 2.3 [23].

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad (2.2)$$

$$f_o = \frac{f_{max} + f_{min}}{2} \quad (2.3)$$

Para definir el intervalo de frecuencias que limitan el ancho de banda se utiliza el resultado de los parámetros de reflexión de los parámetros de dispersión o “Parámetros S” conocidos así por su nombre en inglés “Scattering Parameters”, estos definen la relación de ondas reflejadas con respecto a las ondas incidentes, ya sea en el mismo puerto o en diferentes puertos, permitiéndonos saber cuánta potencia le está llegando a cada puerto [24]. Estos parámetros se utilizan para describir y analizar el comportamiento de un circuito de red en un rango

específico de frecuencias, y comprender cómo la energía se transmite y se refleja en un circuito [25].

Para el diseño de una antena es importante plantearse el tipo de antena, de esta forma se puede definir el proceso de diseño en base a las investigaciones previas. Las antenas SIW son una opción innovadora al momento de implementar varias antenas en un único sustrato, respondiendo al interés de aplicar tecnología MIMO para mejorar la capacidad de las comunicaciones inalámbricas de los relojes inteligentes.

SIW (Substrate Integrate Waveguide, Guía de onda Integrada en Sustrato) es un tipo de antena creada en respuesta al volumen excesivo de las guías de onda, reduciendo grosor de las mismas al grosor de un sustrato [26]. Una de sus principales ventajas es que es una solución a la transición entre diferentes dispositivos de microondas [27].

En la Figura 2.1 se observan los elementos fundamentales para el diseño de una antena SIW, como lo son:

- **Platos metálicos.** Cumplen la función de paredes de la guía de onda.
- **Dieléctrico.** Considerado como el relleno de la guía de onda, sus características dependen del sustrato seleccionado. El grosor de este define la distancia entre los platos metálicos.
- **Vías metálicas.** Orificios rellenos de material conductor.

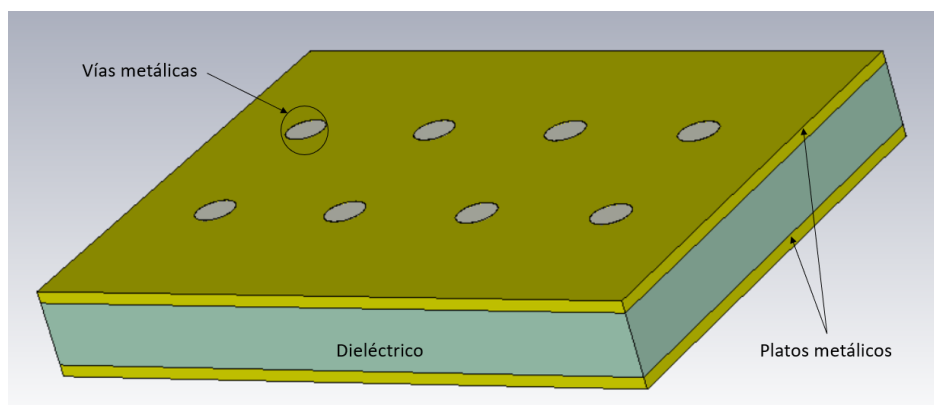


Figura. 2.1. Elementos para el diseño de antenas SIW.

Las vías metálicas son orificios rellenos de material conductor que funcionan como un equivalente de paredes eléctricas de las guías de onda, su diseño y disposición son fundamentales para el correcto funcionamiento de la antena por lo cual se debe tener las siguientes consideraciones [28]:

$$D < \frac{\lambda_d}{5} \quad (2.4)$$

$$p \leq 2D \quad (2.5)$$

De tal forma que, la Ecuación 2.4 nos brinda un valor límite para el diámetro de la vía, y la Ecuación 2.5 la distancia entre vías para evitar problemas de electromagnetismo.

La transición de la antena es un tema muy importante debido a que aquí radica la principal ventaja de este tipo de antenas en relación a las de guía de onda. Realizar una transición entre una guía de onda convencional y la alimentación es laborioso y el resultado es un dispositivo voluminoso, por lo que en las antenas SIW la transición se puede hacer sobre un mismo sustrato, lo que minimiza visiblemente el tamaño de la antena [26]. Existen dos tipos de transición que son útiles para la alimentación de la antena y se presentan en la Figura 2.2, estas dependen del tipo de antena que se utilice, y son las siguientes:

- **Línea Microstrip a SIW:** La impedancia característica de una línea microstrip es generalmente mayor que la de una línea coplanar, y es más fácil de controlar y ajustar mediante el ancho y la altura de la pista [26].
- **Línea Coplanar a SIW:** Las líneas coplanar ofrecen una impedancia característica más baja y, a menudo requieren ajustes más precisos en el espaciado entre el conductor central y el plano de tierra [26].

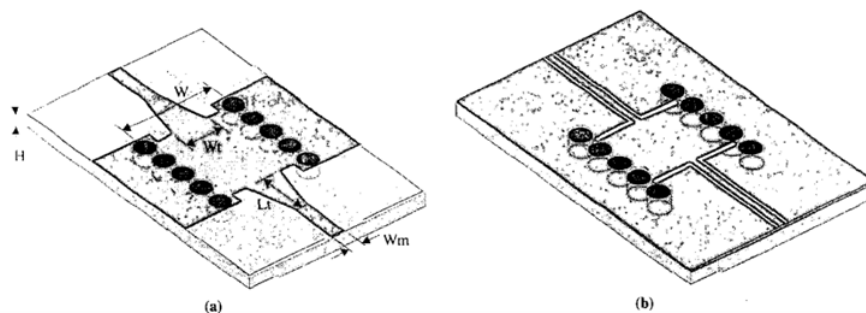


Figura. 2.2. (a) Transición de línea microstrip a SIW, (b) Transición de línea coplanar a SIW [24]

Para finalizar, alimentación de una antena SIW se hace sobre el mismo sustrato por lo que la forma de excitación se puede hacer a través de líneas de transmisión capacitivas [16].

Para el diseño de la antena que se realiza sobre el sustrato se considera el proceso de diseño de una antena microstrip o también conocida como antena de parche. Este tipo de antena se hace sobre un dieléctrico cubierto por dos capas de cobre muy delgadas, donde la inferior

es el plano de masa y no tiene modificaciones, mientras que en la superior el parche puede tener diferentes formas [23]. En la Figura 2.3 se puede observar las configuraciones más frecuentes de las antenas de parche.

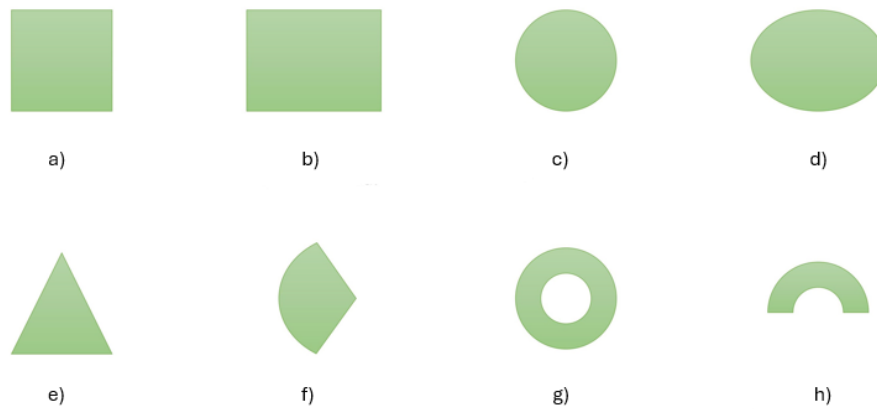


Figura. 2.3. Parche a) Cuadrado, b) Rectangular, c) Circular, d) Elíptico, e) Triangular, f) de Sector Circular, g) de Anillo, f) de Sector de anillo.

La Ecuación 2.6 sirve para el diseño de un parche cuadrado mientras que la Ecuación 2.7 sirve para diseñar un parche circular [29], pero si se observa ambas se nota que la longitud del borde de la figura define la frecuencia a la que resuena el dispositivo.

$$fr = \frac{v_o}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

$$fr = \frac{\lambda'_{mn}}{2\pi\sqrt{r\epsilon_r}} \quad (2.7)$$

En la rama de investigación de las antenas para reloj inteligente, se busca contrarrestar los efectos de sobreado y la dispersión causada por el cuerpo [14], por lo que se propone aplicar el concepto de tecnología MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, Múltiples-Entradas Múltiples-Salidas), debido a que es una solución que sirve para: contrarrestar los efectos del cuerpo humano, dar respuesta a las necesidades demandadas por los nuevos servicios y optimizar el espacio aplicando múltiples antenas en una sola superficie [30].

MIMO es capaz de brindar diversificación espacial, esto representa mayor fiabilidad y un le da un mayor alcance al sistema, ampliando el número de antenas que están emitiendo y recibiendo datos [31]. MIMO permite servicio multibanda con la creación de diferentes antenas sobre la misma superficie, por lo que se puede utilizar una antena MIMO para comunicarse con un mayor número de sistemas [32].

Para analizar el funcionamiento de las antenas MIMO se puede utilizar el ECC (Envelope Correlation Coefficient - Coeficiente de Correlación Envolvente) [33], este se utiliza para conocer la calidad de MIMO; es decir, analizar la relación entre las antenas dependiendo de la necesidad por la cuál se crea el diseño [34]. Para un sistema de antenas MIMO en un mismo sustrato se necesita tener un ECC menor a 0.5, ya que esto representa que las antenas son menos propensas a interferir entre sí [34,35].

Debido a que el análisis de antenas para obtener la alimentación óptima de una antena puede llegar a ser laborioso y complejo, se utiliza un método que puede brindar mayor información que otros métodos más intuitivos y es: la teoría de modos característicos [30]. Fue propuesta por R.F Harrinton y J.R. Mautz en [36], esta brinda un concepto físico claro, con el que se puede explicar los mecanismos de radiación de la antena y facilitar el diseño de la misma [37].

Por definición, la TCM (Theory of Characteristic Modes, Teoría de modos característicos) es el análisis de corrientes modales que se obtienen de forma numérica en cuerpos conductores con geometría arbitraria [37], estas corrientes dependen de la forma y del tamaño del cuerpo conductor y son independientes de la alimentación; se obtienen de las funciones propias de la Ecuación 2.8 que implica la matriz de impedancia de la estructura y representa la ecuación individual de valores propios [38].

$$X(J_n^{\rightarrow}) = \lambda_n R(J_n^{\rightarrow}) \quad (2.8)$$

Donde, λ_n representa los valores propios (eigenvalues), R y X son partes real e imaginaria del parámetro de impedancia Z y (J_n^{\rightarrow}) representa las corrientes reales que están en la superficie del cuerpo sin la necesidad de alimentación [16]. En la Figura 2.4 se observa las corrientes características de un anillo analizado con la teoría de modos característicos en [16].

Es importante destacar que existen dos tipos de corrientes: las corrientes magnéticas son las que fluyen a la derecha o izquierda de los puntos corrientes nulas, y las corrientes eléctricas que son las que entran o salen de los puntos de corrientes nulas [16].

Cuando se analizan dos superficies paralelas que interactúan entre sí como se observa en la Figura 2.5, se generan dos modos en los que las corrientes fluyen: el modo antena se caracteriza por tener un gran ancho de banda y gráficamente se puede observar como en este las corrientes de las dos superficies fluyen en el mismo sentido, mientras que el modo línea de transmisión brinda un menor ancho de banda y las corrientes fluyen en sentido contrario una con respecto a la otra [16].

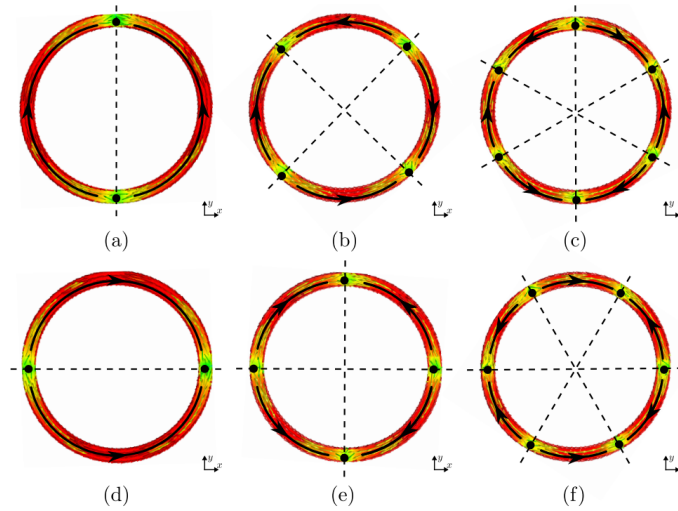


Figura. 2.4. Representación gráfica de las corrientes características [14].

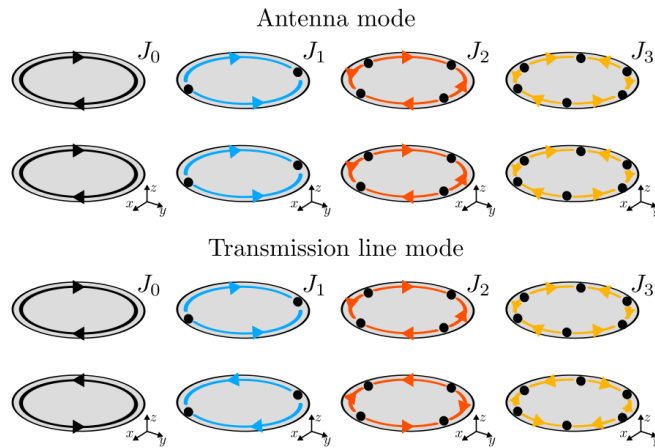


Figura. 2.5. Corrientes características en dos discos paralelos [14].

La nomenclatura que se usa para representar estos modos es: J_{nm} ; donde, ($n = 0$) representa el modo antena y ($n = 1$) el modo línea de transmisión, y por otro lado m representa el orden del modo [16].

A partir del campo eléctrico que producen las corrientes características se puede obtener los campos característicos [39]. En la Figura 2.6 se observan los campos característicos producidos por las corrientes de la Figura 2.4. Es evidente como el número de lóbulos de radiación dependen del orden del modo, lo que significa que cuando la corriente es nula en una dirección el campo también lo será [16].

Por otro lado la teoría de modos característicos nos proporciona un enfoque natural y sistemático para diseñar antenas MIMO con patrones de radiación no correlacionados [40], al expresar la corriente que transita por el plano del cuerpo conductor J_T^{\rightarrow} como la suma ponderada de las corrientes modales J_n^{\rightarrow} , lo que se observa en la Ecuación 2.9 [41].

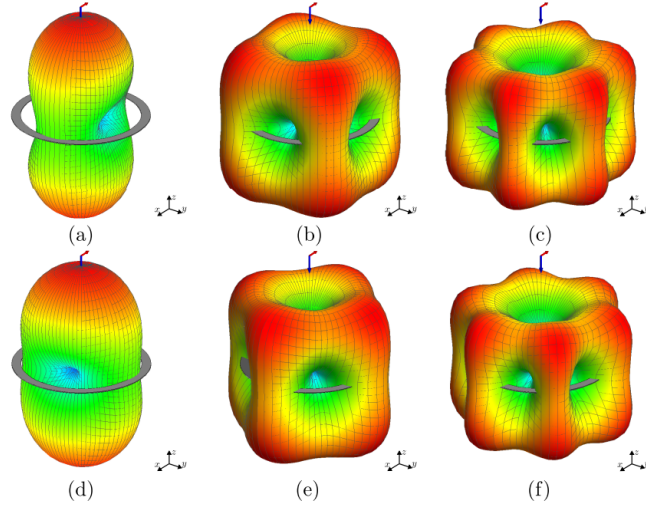


Figura. 2.6. Representación de los campos característicos [14].

$$(J_T^{\rightarrow}) = \sum_n \alpha_n (J_n^{\rightarrow}) \quad (2.9)$$

α_n representa el ángulo característico de cada modo característico, su expresión matemática presentada en la Ecuación 2.10 sirve para interpretar los modos de un cuerpo [16, 41].

$$\alpha_n = 180 - \tan^{-1}(\lambda_n) \quad (2.10)$$

La interpretación física de los modos característicos se puede realizar por diferentes métodos como: la interpretación de los valores propios, el análisis de la significancia modal o el análisis del ángulo característico [16]. El análisis del ángulo característico de un modo característico permite determinar si un modo es resonante ($\alpha_n = 180$) lo que quiere decir que es un buen radiador, o caso contrario ($\alpha_n \neq 180$) nos dice que el modo está almacenando energía [16, 37, 41].

Por último, el análisis de una antena con la teoría de modos característicos permite conocer el porcentaje de potencia que aporta cada modo característico cuando la antena es alimentada, indicando si existe un modo dominante que aporte el 100 % de su potencia o la antena cuenta con una combinación de modos que juntos aporten el 100 % [16].

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

En este apartado se describe la metodología para el desarrollo de una antena para reloj inteligente fundamentada en la información obtenida mediante el análisis de diferentes fuentes dedicadas a este campo investigativo, para con ello dar pie a la implementación de una antena de bajo perfil que aproveche los atributos de la estructura de un reloj convencional y los protocolos de comunicación existentes, y a su vez abra el camino para comunicaciones de mayor velocidad como respuesta a la evolución de las comunicaciones inalámbricas.

3.1.1 Tipo de Investigación

En el presente proyecto investigativo se usan dos tipos de investigación. La investigación exploratoria es parte de la revisión de documentos y literatura bibliográfica que facilitan la comprensión teórica y sustenta el diseño de una antena adecuada para un reloj inteligente, por otro lado la investigación experimental es parte de la fabricación de una antena de bajo perfil, mediante la reproducción del diseño simulado para observar el funcionamiento real de la antena.

3.1.2 Métodos de Investigación

Durante el desarrollo de este proyecto se emplean tres métodos que son útiles para la obtención de los resultados. Se utiliza el método analítico el cuál sirve para comprender cuales son las opciones que se pueden considerar para el desarrollo del diseño de la antena, el método deductivo es parte del análisis de tecnologías existentes para obtener un mejor resultado que el de los dispositivos existentes y el método experimental que se aplica al momento de la simulación e implementación de la antena.

3.1.3 Procedimiento

En el diagrama de bloques de la Figura 3.7 se detallan brevemente los pasos fundamentales para el diseño e implementación de una antena de bajo perfil para reloj inteligente con tecnología MIMO a 2.4 Ghz y 5.8 GHz.

Para empezar se realiza el estudio del estado del arte en antenas para reloj inteligente para conocer en que punto se encuentra el desarrollo de esta rama de investigación y definir el

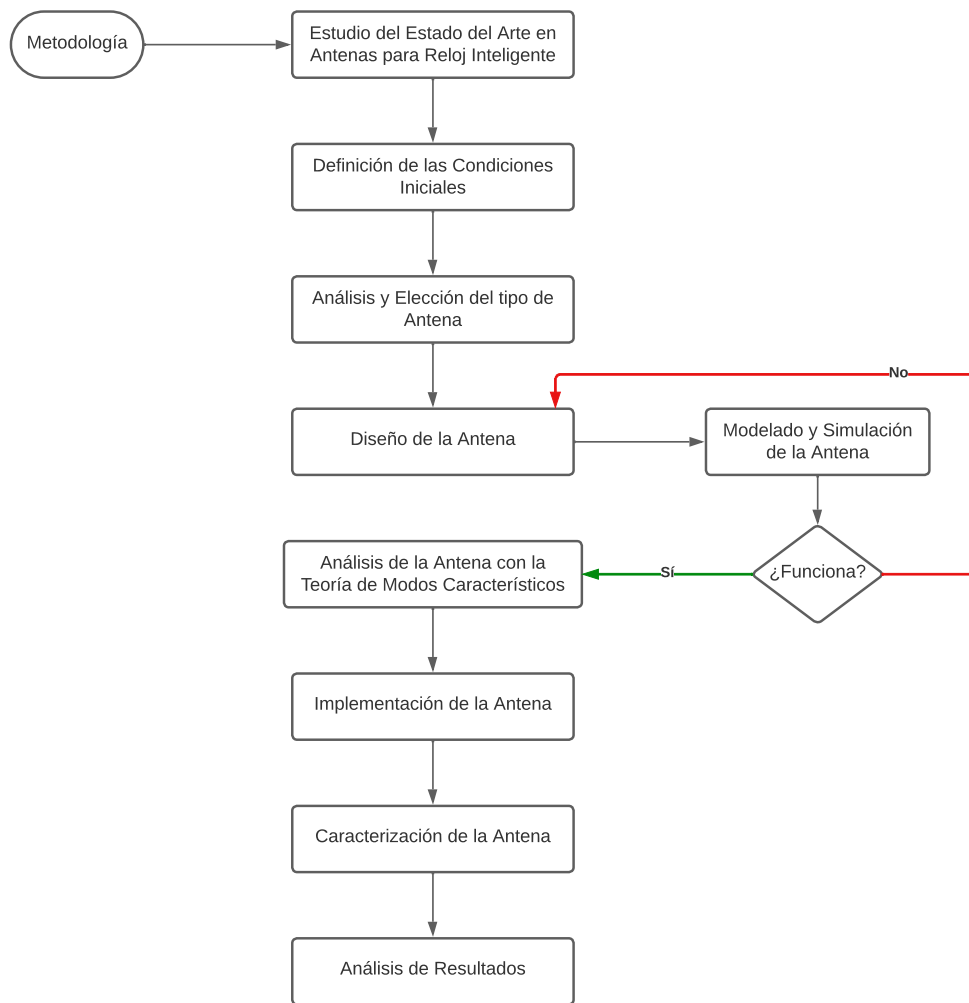


Figura. 3.7. Diagrama de bloques del proceso de diseño de la antena propuesta.

reto de diseño, dando paso a la definición de las condiciones iniciales del diseño como lo son: la frecuencia de trabajo y el material, para posteriormente seleccionar el tipo de antena y las técnicas de diseño aplicables.

Para el diseño de la antena se consideran las condiciones iniciales, las características del material, el tipo de antena y la forma de la misma, con ello se procede a realizar una serie de simulaciones en el software CST Studio Suit hasta obtener un diseño que cumpla con las expectativas planteadas. También se realiza el análisis de la antena con el uso del software Altair Feko para observar el comportamiento de la antena con la teoría de modos característicos.

Cuando el diseño está listo se procede a la fabricación de la antena, en la cual se experimentan diferentes métodos de fabricación en busca del adecuado en relación a la complejidad del trabajo debido al tamaño de la antena, posteriormente se realiza la caracterización del

dispositivo con un Analizador de Redes Vectoriales (VNA).

Por último se realiza la comparación de la antena final con las investigaciones más relevantes que fueron definidas en el estudio del estado del arte para describir el aporte de la antena en su rama investigativa.

3.1.4 Fuentes de Información

La información utilizada para el desarrollo de este proyecto es tomada de: artículos de revistas científicas, libros, tesis, publicaciones en congresos, tesis doctorales y todo documento dedicado al diseño de antenas para reloj inteligente que puedan respaldar el trabajo realizado. Para la investigación de fuentes bibliográficas se utilizan bases de datos científicas como: Google Scholar, IEEE Xplore, Scopus, entre otras.

3.1.5 Población y Muestra

3.1.5.1 Población

La población en estudio son todos los valores obtenidos de ancho de banda en los parametros de dispersión de las simulaciones del diseño de la antena final y de los resultados de la caracterización de las antenas implementadas, con este fin se utiliza el software de simulación CST Studio Suite y el analizador de redes vectoriales LibreVNA para la caracterización de los dispositivos.

3.1.5.2 Muestra

Para la muestra se utilizan los mejores resultados obtenidos del total de las simulaciones que corresponde al diseño que se utiliza como base para la implementación y a los mejores resultados obtenidos de las antenas implementadas, con el fin de compararlos con los resultados de trabajos previos para observar si es que se obtiene mejores resultados.

3.1.6 Instrumentos de la Investigación

Se utilizan dos tipos de instrumentos de investigación: cualitativos y cuantitativos. Se utilizan instrumentos cualitativos al momento de realizar la investigación sobre los casos previos para comprender el avance en esta tecnología, y se utiliza instrumentos cuantitativos para describir el comportamiento del dispositivo desarrollado.

3.1.7 Operación de Variables

A continuación, en la Tabla 3.2 se presenta un resumen de las variables a analizar en el desarrollo de este proyecto. Se resume la información sobre las variables independientes que son parte del diseño y las variables dependientes que son parte del resultado.

Tabla 3.2. Operación de las variables.

VARIABLE	CONCEPTO	INDICADORES	TECNICAS E INSTRUMENTOS
DEPENDIENTE			
Ancho de banda	Longitud de la frecuencia en la mayor resonancia	Hertz,Hz	CST Studio Suite VNA
INDEPENDIENTE			
Parámetros de la estructura	Dimensiones de las antenas	Milímetros, mm	CST Studio Suite

3.2 Diseño y Fabricación

En este apartado se presenta los detalles del proceso de diseño y fabricación de una antena MIMO de bajo perfil para reloj inteligente que trabaja a doble banda a las frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz para posteriormente obtener los resultados de la investigación.

3.2.1 Proceso de diseño de la antena

Para empezar se deben definir las condiciones iniciales del diseño propuesto. Esta antena a doble banda busca ser compatible con los protocolos de comunicación inalámbrica existente, por lo que se plantea que una de las frecuencias sea de 2.4 GHz. También se busca desarrollar una antena que sirva para la transición a nuevas tecnologías con mayores velocidades, por lo que se diseña la segunda antena a una frecuencia de 5.8 GHz.

Se debe definir tipo de antena para continuar con el proceso de condiciones iniciales, por lo que se plantea utilizar antenas de tipo SIW debido a que permite diseñar la antena en el mismo sustrato que la alimentación; esto significa que el material que se utilice definirá el grosor de la antena final, minimizando el tamaño en comparación a las investigaciones previas.

Dentro de las condiciones iniciales también es importante detallar las características del material que se utiliza para el diseño de la antena; por lo que, se utiliza FR-4 como el sustrato ideal, este cuenta con una permitividad de 4.3 y un grosor de 1.6 mm que define el grosor final de la antena.

Por otro lado, definir la topología o forma de la antena también es importante porque esto define la superficie donde se deben incluir las múltiples antenas. La topología circular cuenta con la ventaja de que puede ser dividida de forma simétrica respecto al centro de la circunferencia, también se considera la versatilidad de la antena al momento de ser integrada a un reloj inteligente: la antena circular puede entrar en un dispositivo rectangular o cuadrado, siempre y cuando: el ancho y la altura del dispositivo sea mayor o igual al radio de la antena; pero no resulta lo mismo para una antena rectangular o cuadrada dentro de un dispositivo circular.

El diseño de múltiples antenas sobre una superficie circular utilizando el concepto de antenas SIW empieza con el cálculo de la longitud de onda de cada una de las frecuencias de diseño, considerando las características del material para definir la longitud que necesita cada antena en el sustrato con la Ecuación 3.11.

$$\lambda_d = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.11)$$

Para $f_a = 2,4$ GHz:

$$\lambda_{da} = \frac{3e10}{2,4e9\sqrt{4,3}} = 60,28 \text{ mm}$$

Para $f_b = 5,8$ GHz:

$$\lambda_{db} = \frac{3e10}{5,8e9\sqrt{4,3}} = 24,94 \text{ mm}$$

Después de conocer cuál es el espacio que se necesita para cada antena ($\lambda_{da}, \lambda_{db}$), se procede a analizar cuál es el radio que se puede utilizar para tener la mayor cantidad de antenas y tener un tamaño innovador, por lo que se analiza cuántas antenas pueden entrar en superficies circulares de radio: $r_1 = 18$ mm y $r_2 = 17$ mm.

Para analizar cuántas antenas se puede hacer en cada superficie, se debe calcular la longitud de onda de cada circunferencia con la Ecuación 3.12 y la Ecuación 3.13; en la Tabla 3.3 se presenta la información obtenida.

$$L = \pi 2r \quad (3.12)$$

$$\lambda_c = \frac{L}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.13)$$

Tabla 3.3. Características de las circunferencias.

r_1	r_2
$L = 113,097 \text{ mm}$	$L = 106,81 \text{ mm}$
$\lambda_c = 54,54 \text{ mm}$	$\lambda_c = 51,51 \text{ mm}$

Es importante conocer sobre el espacio en función de la longitud de onda que se tiene disponible para las diferentes antenas si la superficie circular se secciona en partes iguales, como se observa en la Figura 3.8, donde la Ecuación 3.14 sirve para definir la longitud disponible en cada sección, considerando que $\#A$ es el número de antenas que definen la división.

$$\lambda_t = \frac{\lambda_c}{\#A} + 2r \quad (3.14)$$

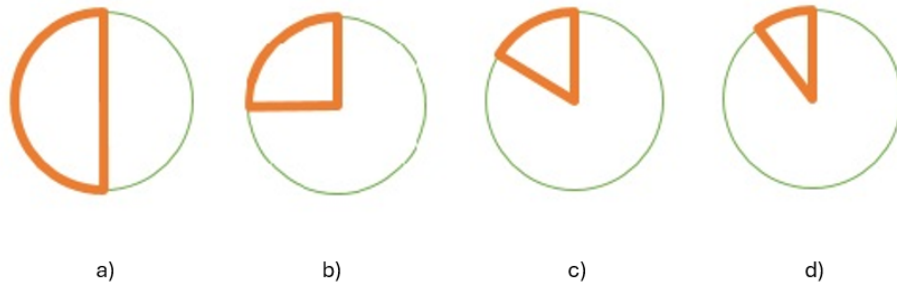


Figura. 3.8. Superficie circular dividida para: a) 2 antenas, b) 4 antenas, c) 6 antenas y d) 8 antenas.

En la tabla 3.4 se recopila la información obtenida de longitud de onda disponible en cada división para los radios propuestos; para saber cuál de las opciones es la mejor se busca encontrar un punto medio que sirva para colocar ambas antenas, para lo cual se utiliza la Ecuación 3.15.

Tabla 3.4. Longitud de onda por secciones de la circunferencia.

#A	r_1	r_2
2	$\lambda_t = 63,27 \text{ mm}$	$\lambda_t = 59,76 \text{ mm}$
4	$\lambda_t = 49,64 \text{ mm}$	$\lambda_t = 46,87 \text{ mm}$
6	$\lambda_t = 45,09 \text{ mm}$	$\lambda_t = 42,58 \text{ mm}$
8	$\lambda_t = 42,51 \text{ mm}$	$\lambda_t = 40,4387 \text{ mm}$

$$\lambda_p = \frac{\lambda_a + \lambda_b}{2} \quad (3.15)$$

$$\lambda_p = \frac{60,28\text{mm} + 24,94\text{mm}}{2} = 42,61\text{mm}$$

Con el resultado obtenido del promedio de longitud de onda necesaria, se observa que la mejor opción es r_1 con una división para 6 antenas, porque al buscar mantener un bajo perfil y la mayor cantidad de antenas posibles sería el mejor escenario; pues el resto de resultados distan del promedio.

En la Figura 3.9 se observa como es la división de la superficie donde se ubicarán: 3 antenas a 2.4 GHz y 3 antenas a 5.8 GHz, estas están distribuidas de forma intercalada dependiendo de la frecuencia.

Es importante considerar que las antenas de 5.8 GHz tienen una menor longitud de onda y por ende sus dimensiones serán más pequeñas que las antenas de 2.4 GHz; a su vez, en caso de que falte espacio para alcanzar la longitud de onda necesaria se aplica tecnología SIW, en

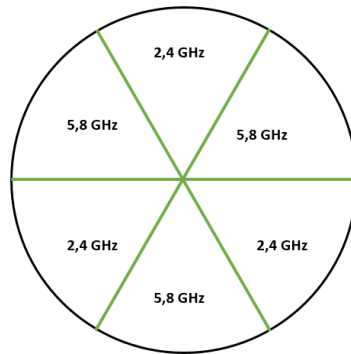


Figura. 3.9. División de la superficie para distribuir las antenas.

la Figura 3.10 se observan los bosquejos que sirven de base para el modelado de la antena final.

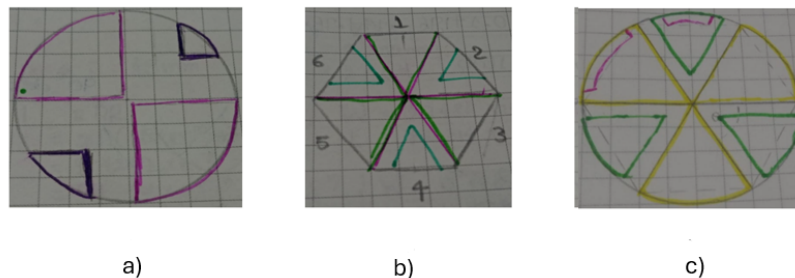


Figura. 3.10. Bosquejo: a) circular 4 antenas, b) hexagonal 6 antenas, c) circular 6 antenas.

3.2.2 Modelado y Simulación de la Antena.

Antes de llegar al modelo final se realizaron diferentes modelados y simulaciones en busca del modelo óptimo. En la Figura 3.11 se observan diferentes modelos que presentan fallas: en el acoplamiento, en la alimentación y al momento de adaptarlo al conjunto de antenas final.

A continuación, se resume en tres pasos el modelado de la antena final; empezando por la antena de 2.4 GHz debido a su mayor complejidad al tener necesitar de orificios para completar la longitud de onda necesaria.

1. **Diseño de la antena de 2.4 GHz.** Primero se debe simular la antena con su alimentación capacitiva diseñada en toda la porción que se tiene disponible junto con el puerto de alimentación para poder observar el comportamiento de la misma; al simular se confirma que la longitud de la porción no es suficiente, por lo que se aplican orificios para conseguir el resultado deseado. Así se van agregando orificios o vías de 1 mm de diámetro rellenas de cobre que sirven como extensión de la longitud de onda hasta encontrar la frecuencia deseada, este proceso se puede observar en la Figura 3.12

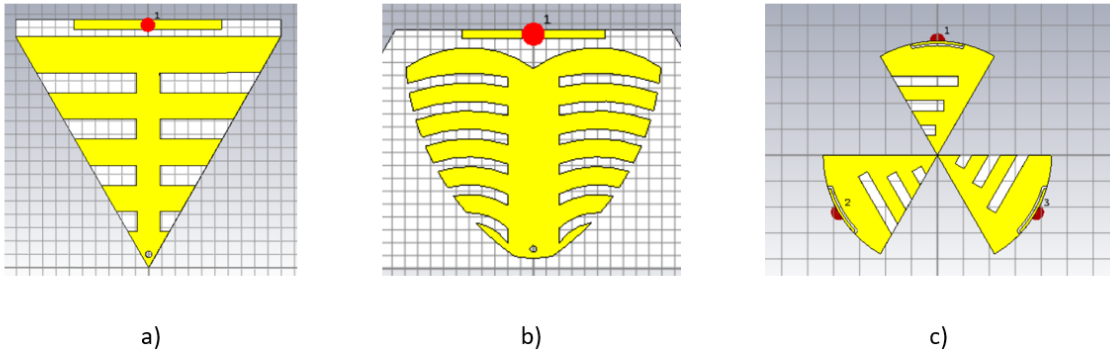


Figura. 3.11. Modelos con fallas: a) en el acoplamiento, b) en la alimentación y c) en la adaptación con otras antenas.

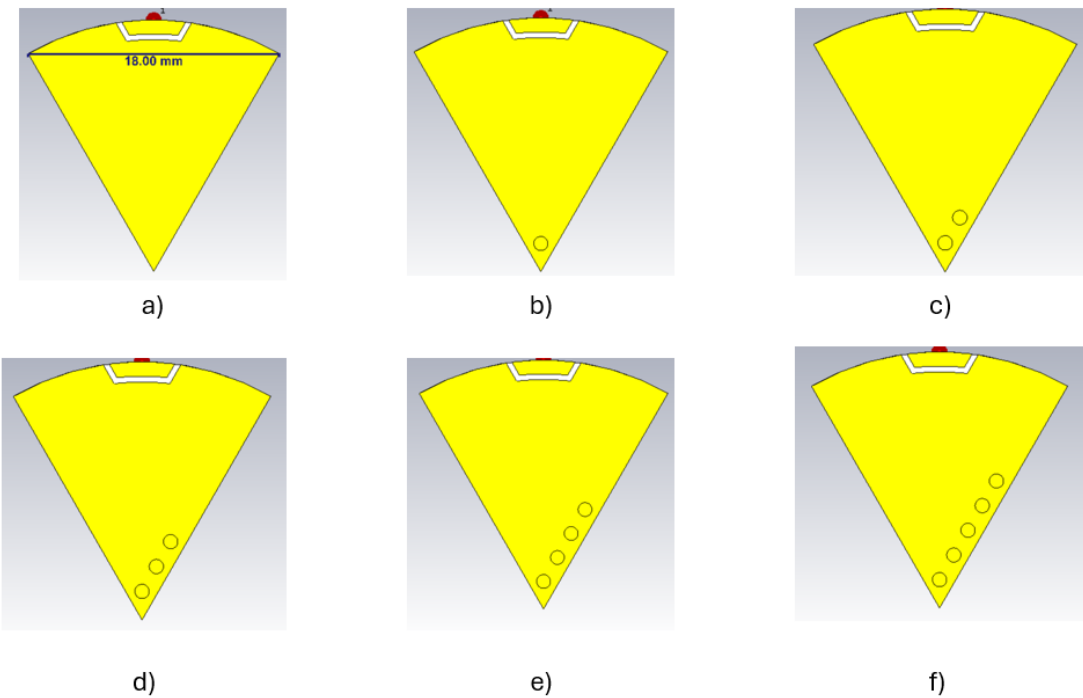


Figura. 3.12. a) Antena en la superficie completa, b) con una vía c) con dos vías, d) con tres vías, e) con cuatro vías, f) con cinco vías.

Después de experimentar se obtiene la primera aproximación del modelo, aquí se observa que se necesitan 4 orificios rellenos de alambre de cobre de 1.6 mm de largo para conseguir una resonancia cercana a 2.4 GHz. Al tener la antena en la frecuencia deseada, se procede a modificar la alimentación para obtener el mejor acoplamiento y finalmente para probar si existen problemas de acoplamiento se simulan las tres antenas juntas en la disposición prevista en el sustrato; en la Figura 3.13 se puede observar este proceso.

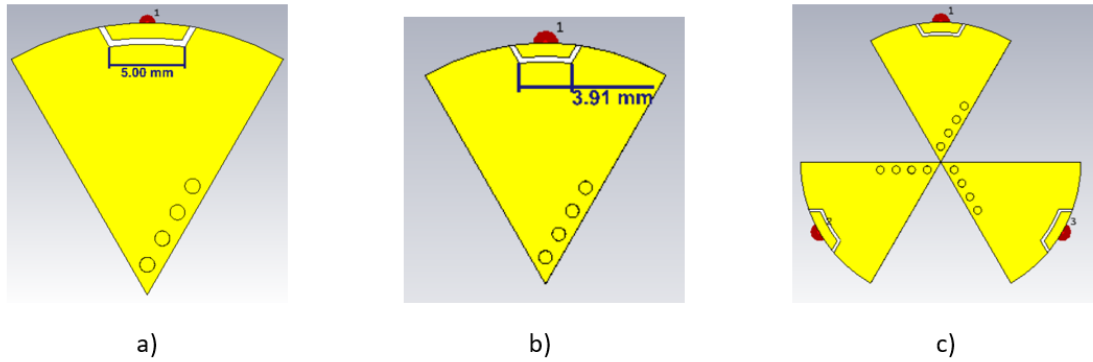


Figura. 3.13. a) Modelo aproximado a 2.4 GHz, b) Modelo con mejor acoplamiento y c) Modelo con las tres antenas.

2. **Diseño de la antena de 5.8 GHz.** La ventaja de esta antena es que la longitud de onda necesaria es menor que la longitud disponible; por lo que, se modela la antena sin necesidad de herramientas para optimizar el espacio, al alcanzar la frecuencia deseada se procede a modificar la alimentación hasta obtener el mejor acoplamiento y por último se simulan las tres antenas juntas para observar si existe problemas de acoplamiento entre ellas; en la Figura 3.14 se observa este proceso.

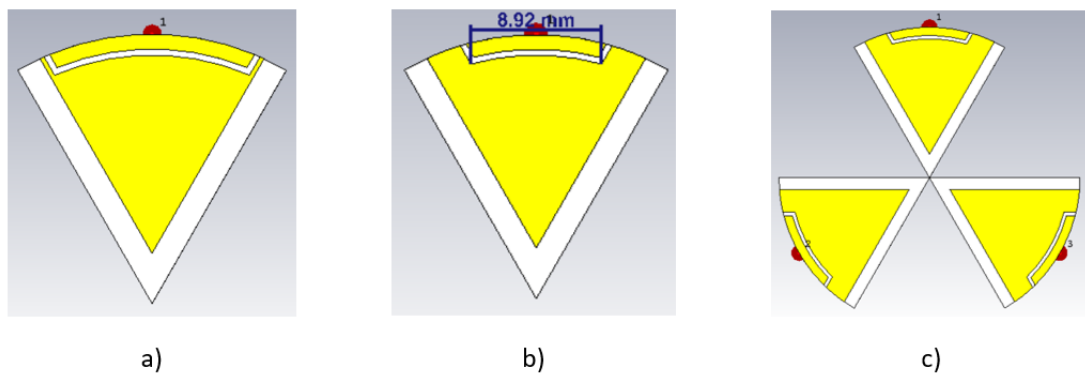


Figura. 3.14. a) Modelo aproximado a 5.8 GHz, b) Modelo con mejor acoplamiento y c) Modelo con las tres antenas.

3. **Unión de las antenas.** Al unir las antenas en la disposición prevista se presentan problemas de acoplamiento, por lo que es necesario modificar la alimentación de las antenas hasta obtener el mejor acoplamiento.

3.2.3 Análisis de la Antena con la Teoría de Modos Característicos

Para realizar el análisis de la antena con la teoría de modos característicos se procede a modelar las antenas en el software Altair Feko sin la necesidad de puertos de alimentación, a razón de que se necesita conocer las corrientes propias de las antenas; de esta forma se puede entender de mejor forma el comportamiento de las antenas.

Se empieza analizando los ángulos característicos para conocer en que frecuencia existe resonancia y dependiendo del ancho de banda determinar si la antena está en modo de antena o línea de transmisión; posteriormente se analizan las corrientes características de las antenas de forma gráfica, para definir la cantidad de corrientes nulas que determinan el modo de la antena y confirmar el modo de antena o línea de transmisión.

Se puede obtener información sobre el diagrama de radiación de las antenas al realizar el análisis gráfico de los campos característicos inducidos por las corrientes características.

Por último, teniendo bien claro los puntos anteriores se procede a analizar cuanta potencia aportan los modos característicos cuando se alimentan con un puerto las antena; para así definir el modo dominante y el conjunto de modos que aportan.

3.2.4 Implementación de la Antena

Las antenas de bajo perfil son un reto debido al tamaño reducido de los diseños y por eso hay investigaciones que se quedan en simulaciones. Para implementar la antena se prueban varios métodos como: impregnación con papel fotográfico e impresión laser sobre el sustrato, los cuales presentan problemas de definición y exactitud como se puede ver en la Figura 3.15.



Figura. 3.15. Intentos de implementación fallidos: a) Impregnación con papel fotográfico, b) Impresión laser sobre el sustrato.

Después de realizar una serie intentos para implementar la antena por diferentes métodos, se

opta por una solución que implique mayor exactitud; por lo que, es indispensable utilizar una cortadora CNC que brinde la precisión necesaria para realizar la implementación de la antena.

La máquina utilizada debe cumplir con un correcto proceso de calibración y se debe contar con las respectivas fresas de corte, perforación y trazado, para lograr la antena diseñada con la mayor exactitud. Si se cumple con los requisitos antes mencionados y se utilizan los respectivos programas para comunicación con la máquina se puede lograr la impresión de la antena sobre el sustrato deseado.

Una vez la antena está lista, es el momento de agregar los 6 puertos que nos sirven para caracterizar. Se utilizan puertos SMA hembra y se sueldan cuidadosamente en las líneas de alimentación; el resultado final se presenta en la Figura 3.16.

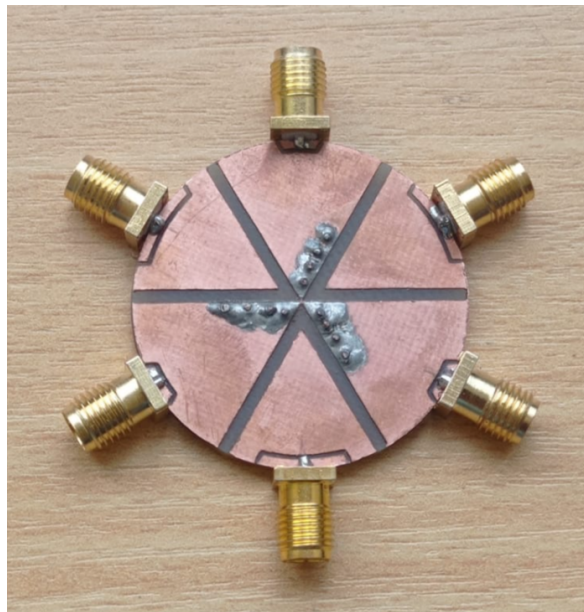


Figura. 3.16. Antena Final.

3.2.5 Caracterización de la Antena

Para la caracterización de la antena se utiliza un Analizador de Redes Vectoriales conocido como VNA, el modelo utilizado es un LibreVNA de 2 puertos con un rango de 100 KHz a 6 GHz, a continuación se describe el proceso:

- Se conecta el VNA al computador para utilizar su interfaz gráfica y se define la frecuencia de análisis.
- Se calibra ambos puertos del dispositivo según las indicaciones de la interfaz.

- Se caracteriza las antenas utilizando el puerto 1 y se observa el parámetro S11 para obtener los datos necesarios para el análisis del ancho de banda de las antenas.

En la Figura 3.17 se observa la caracterización de uno de los puertos de la antena final.



Figura. 3.17. Caracterización de la antena final con el VNA.

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados y Discusiones

En este capítulo se describe el aporte de la antena implementada en su rama de investigación; se presentan los resultados de la antena analizada con la teoría de modos característicos, el análisis de ECC en la simulación de la antena final, y la comparación con dos investigaciones previas que tienen relación con el tema.

4.2 Resultados del análisis de las antenas con TCM

Para interpretar los resultados obtenidos del análisis de las antenas con la teoría de modos característicos se utiliza el valor del ángulo característico, en la Figura 4.18 se observan los valores de los ángulos característicos pertenecientes a las corrientes características de la antena de 2.4 GHz.

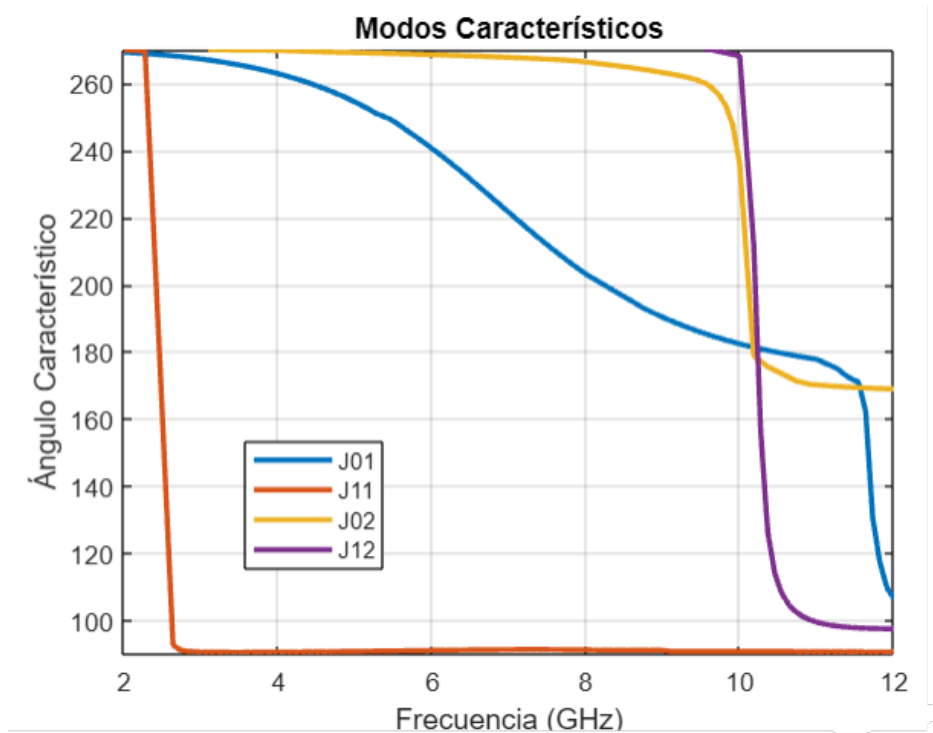


Figura. 4.18. Ángulos característicos de la antena de 2.4 GHz.

Es importante determinar que modos contribuyen a la antena final para definir los modos de interés, por lo que se analiza el porcentaje de potencia contribuida; en la Figura 4.19 se puede observar como el modo J_{11} aporta el 100 % de la potencia cuando la antena tiene configurada la alimentación.

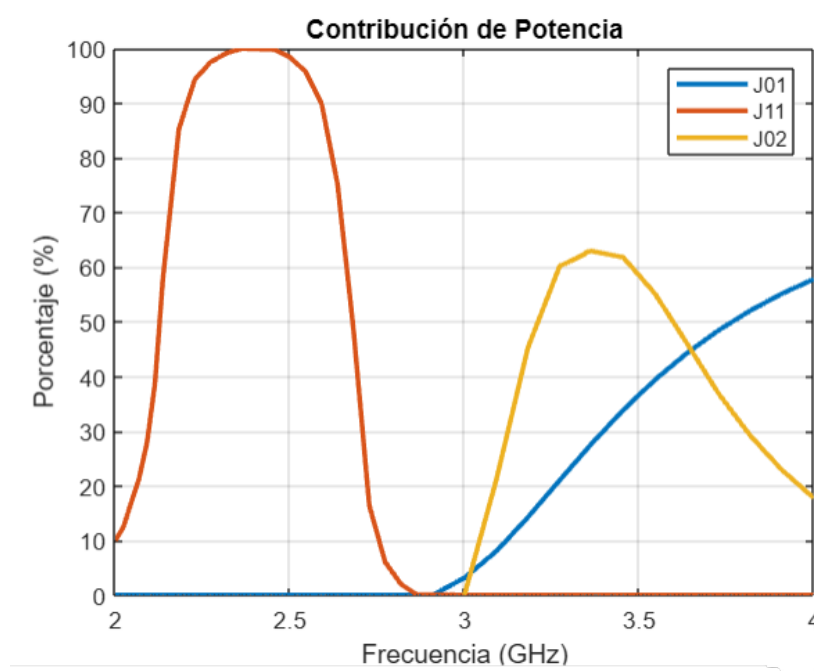


Figura. 4.19. Potencia contribuida por los modos característicos de la antena de 2.405 GHz.

A continuación, en la Figura 4.20 se presenta la distribución de corrientes del modo dominante J_{11} . Se observa como la distribución de corrientes corresponde al modo línea de transmisión de orden 1.

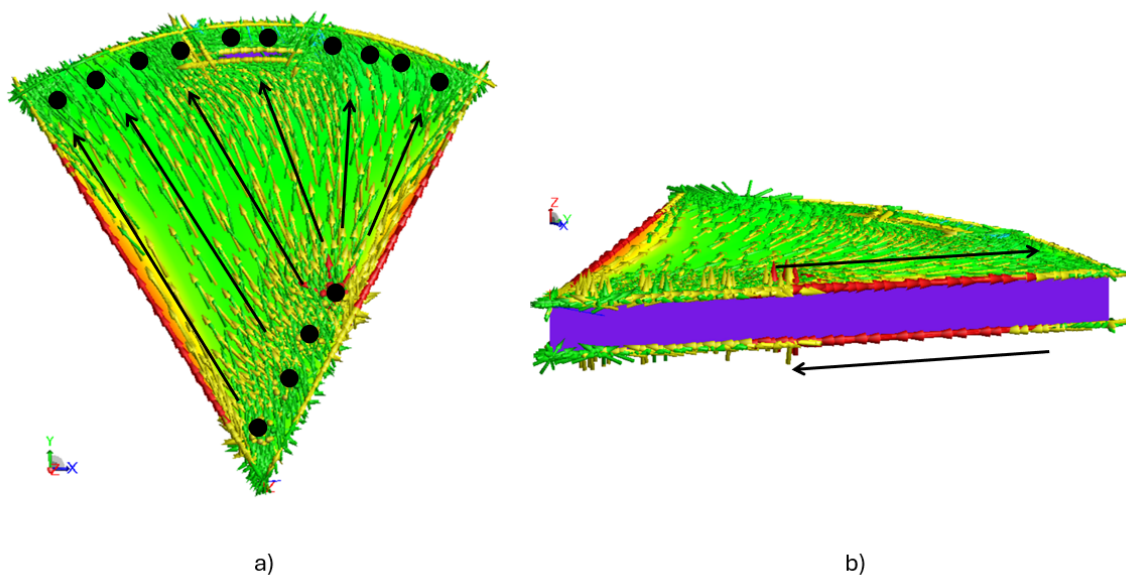


Figura. 4.20. Corrientes características del modo J_{11} a) vista frontal y b) vista lateral.

En la Figura 4.21 se presenta el campo inducido por el modo característico J_{11} , se observar

como este tiene la característica de ser directivo.

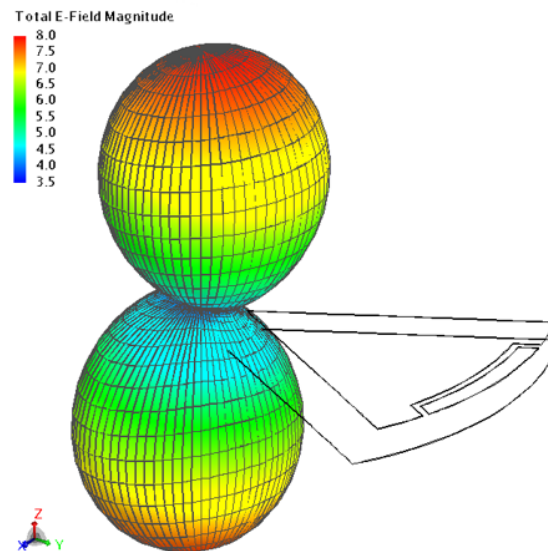


Figura. 4.21. Campo característicos inducido por J_{11}

El proceso para analizar la antena de 5.8 GHz con la TCM es el mismo que se realiza con la antena de 2.4 GHz; por lo que, en la Figura 4.22 se presenta el conjunto de ángulos característicos pertenecientes a los modos característicos de la antena.

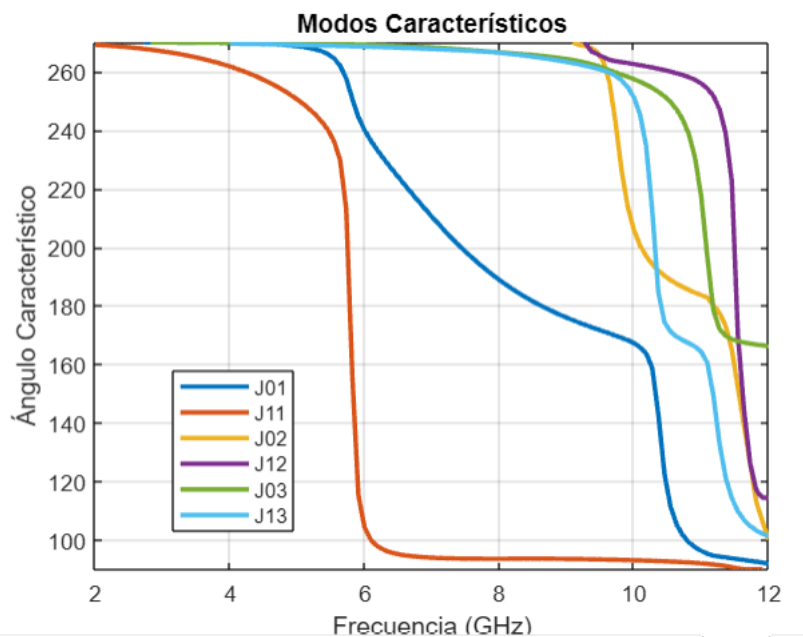


Figura. 4.22. Ángulos característicos de la antena 5.8 GHz.

En la Figura 4.23 se observa que existe una combinación de modos que contribuyen a la potencia a la antena alimentada; se definen como modos de interés, el modo J_{11} aporta 84.15 % de potencia y es el modo dominante; y el modo J_{13} que aporta un 15.85 % de potencia.

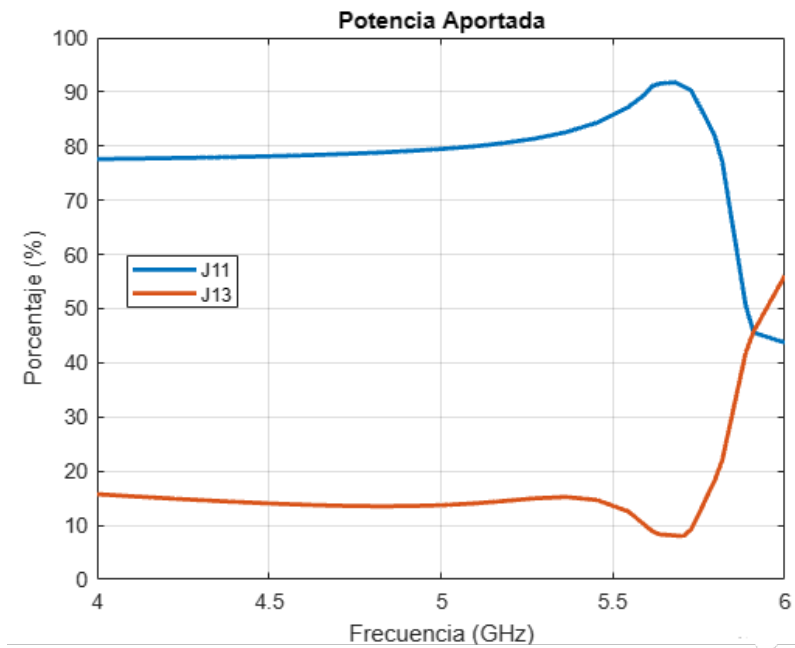


Figura. 4.23. Potencia contribuida por los modos característicos de la antena de 5.8 GHz.

De esta forma, en la Figura 4.24 se presenta la distribución de corrientes de los modos de interés: J_{11} y J_{13} ; donde se puede observar como la distribución de corrientes de ambos modos se encuentra en modo línea de transmisión y cada uno tiene un orden de 1 y 3 respectivamente.

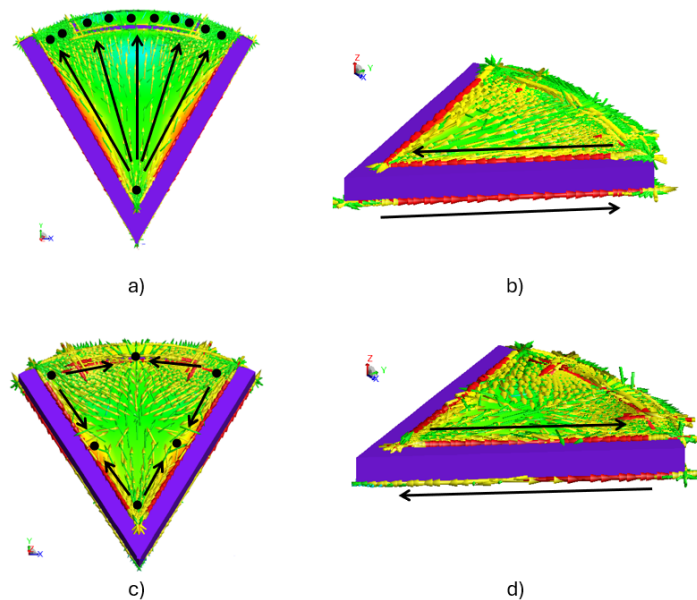


Figura. 4.24. Corrientes características de J_{11} a) vista frontal, b) vista lateral; y de J_{13} d) vista frontal, e) vista lateral.

Así mismo, cada una de las corrientes características induce un campo característico; en la Figura 4.25 se observan los campos característicos inducidos por los modos J_{11} y J_{13} .

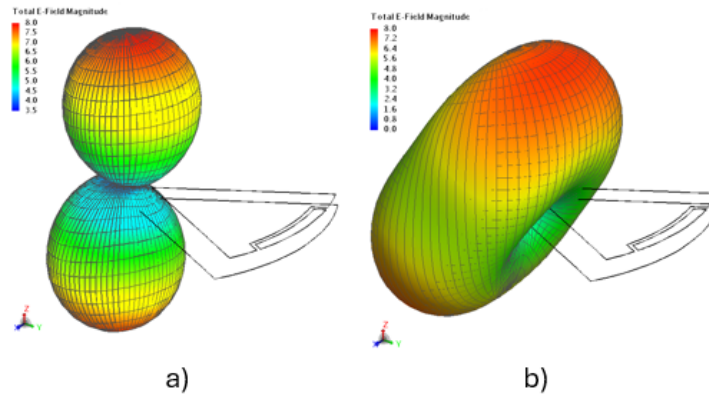


Figura. 4.25. Campos característicos inducidos por: a) J_{11} y b) J_{13} .

4.3 Resultados del análisis del ECC

Primero se analiza el ECC de la antena de 2.4 GHz, el resultado se presenta en la Figura 4.26 donde se observa que el ECC entre las antenas en referencia a una de las antenas de 2.4 GHz cumple con la condición de ser menor que 0.5.

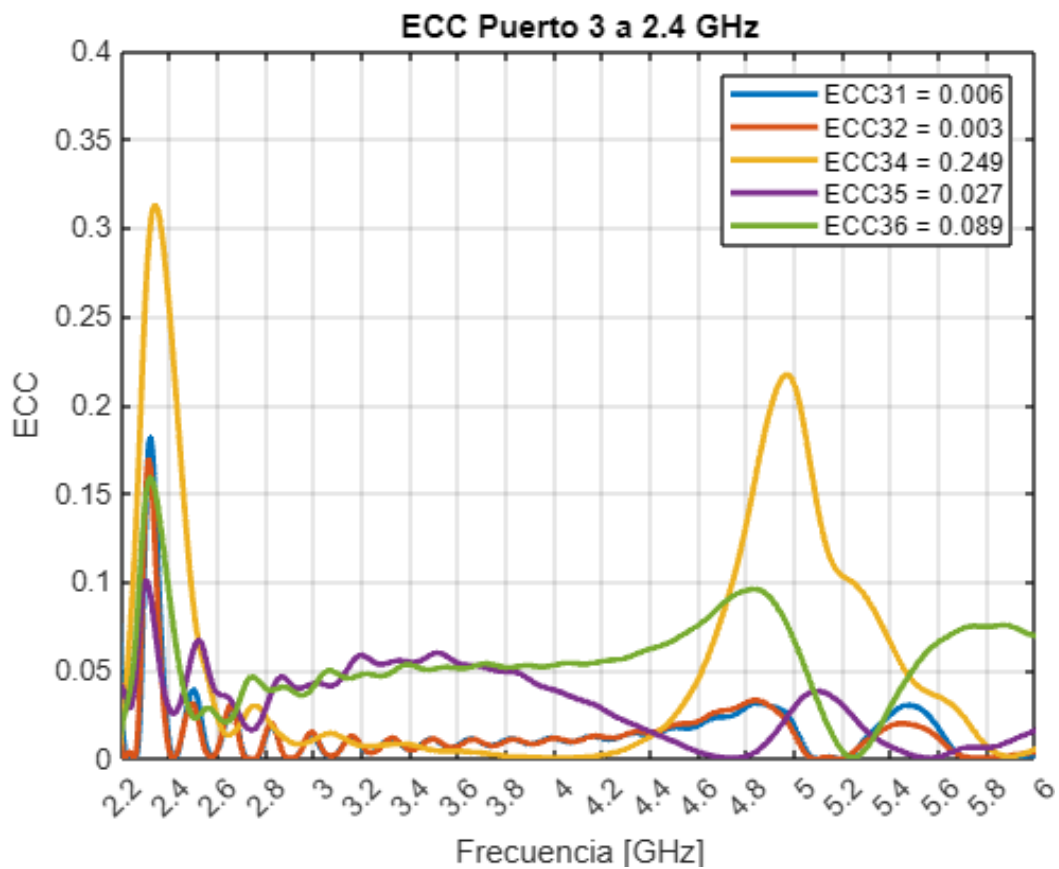


Figura. 4.26. ECC a 2.4 GHz.

Posteriormente se analiza el ECC de la antena de 5.8 GHz, este resultado se presenta en la

Figura 4.27 donde se observa que el ECC entre las antenas en referencia a una de las antenas de 5.8 GHz cumple con la condición de ser menor que 0.5.

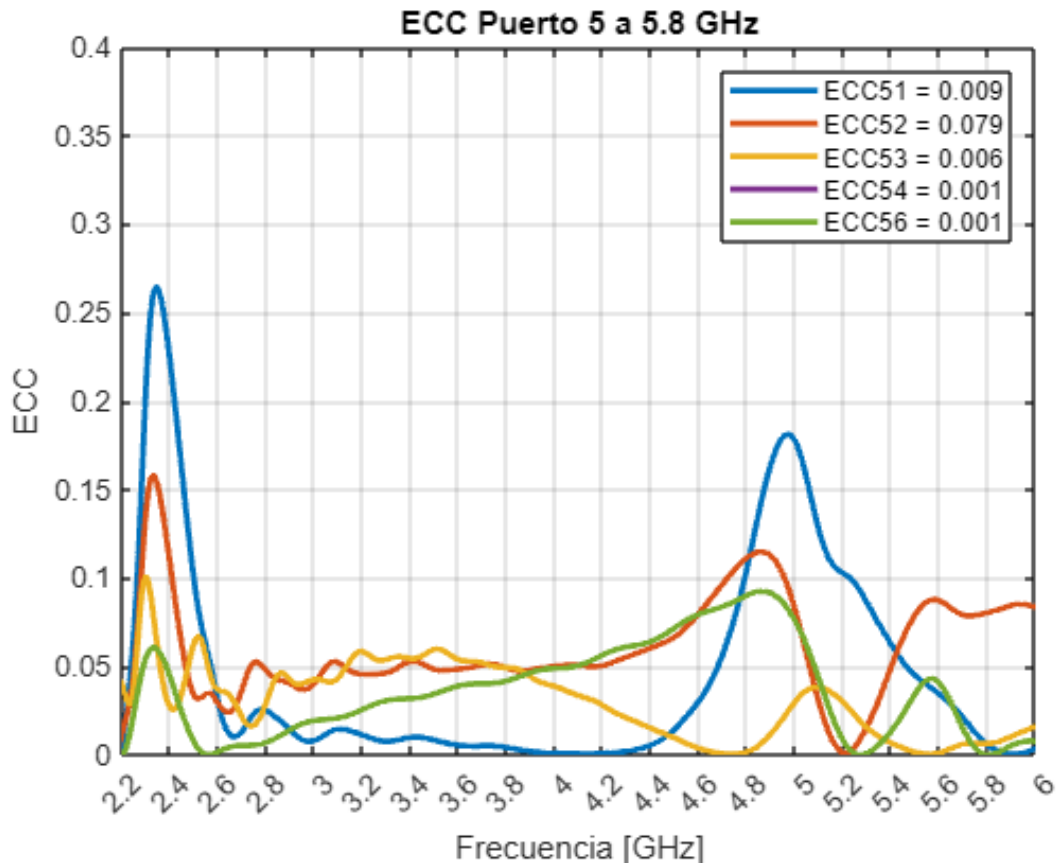


Figura. 4.27. ECC a 5.8 GHz.

4.4 Resultados de simulación e implementación de la antena.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en las diferentes fases del análisis de la antena final, aprovechando la simetría del dispositivo para generalizar los resultados en cada una de las frecuencias.

4.4.1 Resultados de simulación

En la Figura 4.28 se observan los resultados de los parámetros de dispersión de la antena de 2.4 GHz, donde efectivamente se observa una resonancia de -49.93 dB a 2.4095 GHz, también cabe destacar que tiene un valor de desacoplo apropiado para el diseño.

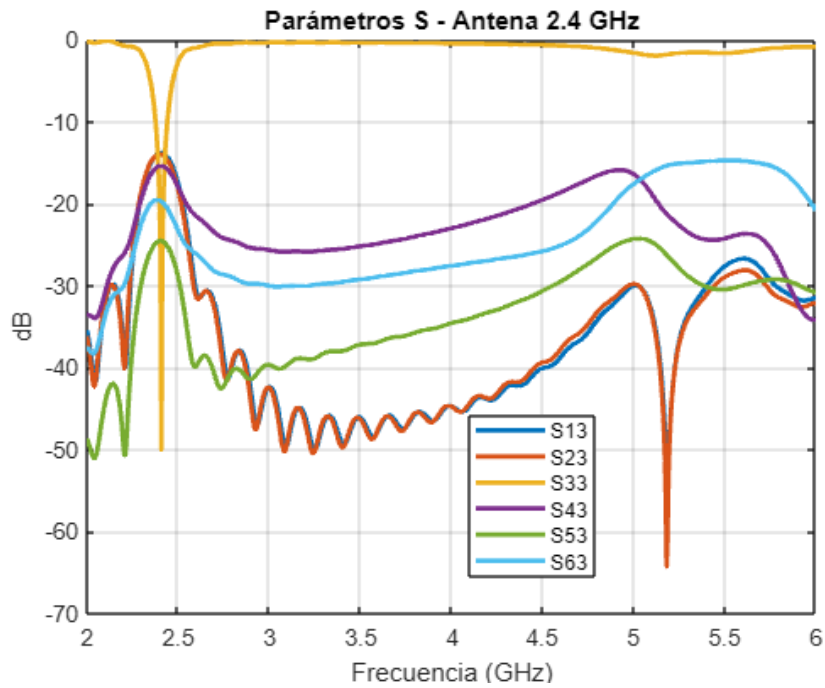


Figura. 4.28. Parámetros de dispersión de la antena simulada a 2.4 GHz.

En la Figura 4.29 se presentan los resultados de los parámetros de dispersión de la antena de 5.8 GHz, donde se observa una resonancia de -15.24 dB a 5.798 GHz, y también posee características de desacoplo válido para el funcionamiento de la antena.

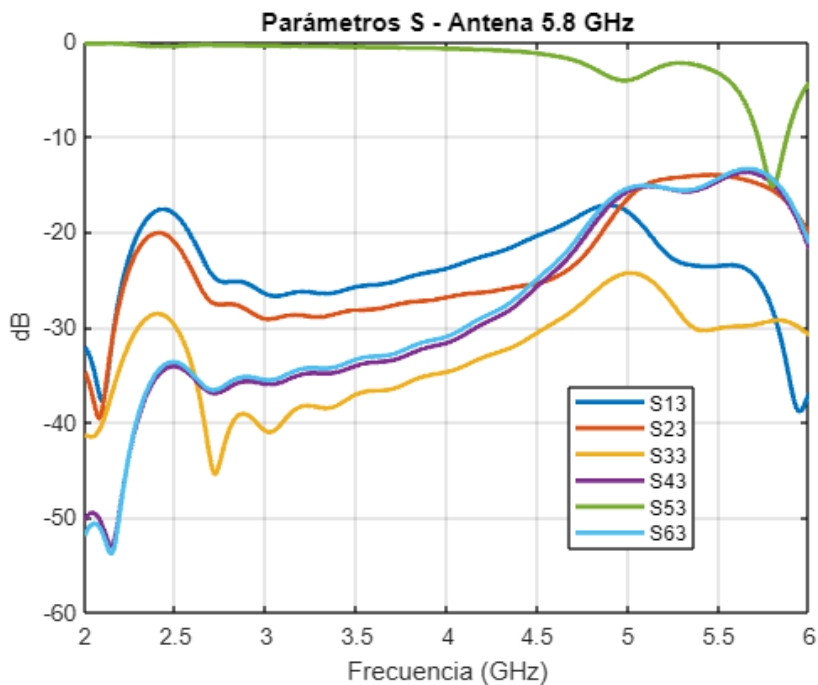


Figura. 4.29. Parámetros de dispersión de la antena simulada a 5.8 GHz.

4.4.2 Resultados de implementación

La implementación de las antenas SIW es compleja debido a que se necesita de mucha precisión al momento de soldar los corto circuitos, por eso el resultado esta a una frecuencia cercana a la deseada pero con un bajo acoplamiento como se presenta en la Figura 4.30.

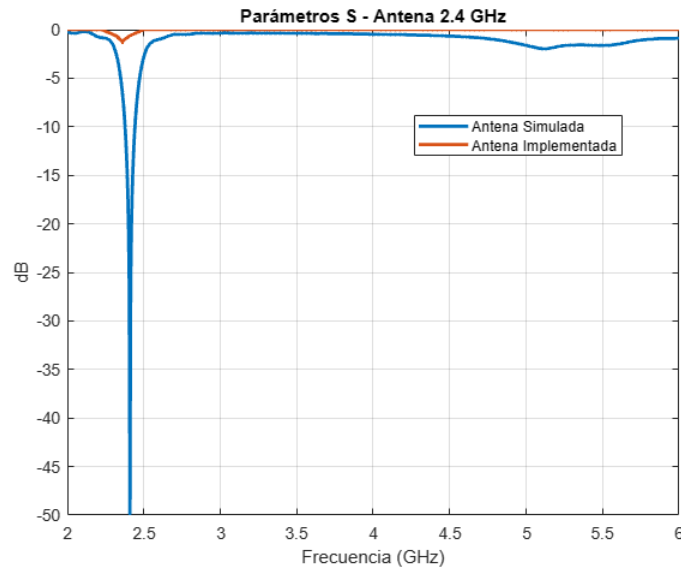


Figura. 4.30. Parámetro de reflexión de la antena implementada a 2.4 GHz.

Por otro lado, los resultados de las antenas a 5.8 GHz como se observa en la Figura 4.31 son más animadores, esto debido a que estas antenas llegan a tener un mejor acoplamiento, lo que significa que este es capaz de funcionar con un cierto ancho de banda.

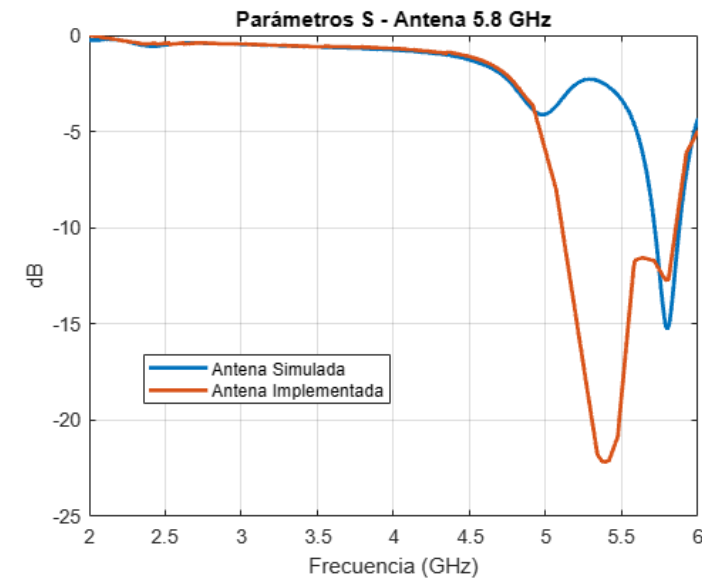


Figura. 4.31. Parámetro de reflexión de la antena implementada a 5.8 GHz.

En la Tabla 4.5 se presenta un resumen del ancho de banda en porcentaje de los resultados obtenidos en la simulación y la caracterización del dispositivo final.

Tabla 4.5. Resumen del ancho de banda [%] de los resultados

Parámetro	Avance	Ancho de Banda [%]
S_{33}	Simulación	4.47
S_{55}	Simulación	5.51
S_{33}	Caracterización	0
S_{55}	Caracterización	15.65

4.5 Comparación de los resultados con simulaciones similares

Es importante comparar los resultados de la antena final para comprender el avance que esta investigación brinda a la rama del desarrollo de antenas para reloj inteligente. En la Tabla 2.1 se encuentran resumidos los resultados que obtuvieron en diferentes investigaciones previas que son de interés para realizar la comparación de las antenas y sirven para definir el aporte de la antena final.

La investigación [16] muestra resultados de ancho de banda en las frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz, al comparar el mejor resultado a ambas frecuencias con el mejor resultado de la antena final se obtienen los siguientes resultados:

- En la frecuencia de 2.4 GHz, la antena final tiene 0.78 % más de Ancho de Banda disponible.
- En la frecuencia de 5.8 GHz, la antena final tiene 0.56 % más de Ancho de Banda disponible.

La investigación [2] únicamente cuenta con antenas a 2.4 GHz, por lo que se compara el mejor valor de ancho de banda de sus componentes con el mejor ancho de banda a 2.4 GHz y 5.8 GHz de la simulación de la antena final, con lo que se obtiene los siguientes resultados:

- En la frecuencia de 2.4 GHz, la antena final tiene 0.02 % más de Ancho de Banda disponible.
- Comparando con el ancho de banda de 5.8 GHz, la antena final tiene 1.06 % más de

ancho de banda disponible.

4.6 Comparación de los resultados de implementaciones similares.

Para obtener resultados del avance de la antena implementada existe el problema de que no existe otra Antena MIMO de 6 componentes a dos bandas, por lo que se procede a realizar la comparación con un dispositivo implementado lo más parecido posible, en base a ello se considera los resultados de una Antena MIMO de 4 antenas a 2.4 GHz.

Al comparar el ancho de banda de los componentes de la antena final a doble banda con el mejor resultado de ancho de banda de la antena de [2] se puede decir que:

- Al comparar los anchos de banda de ambas antenas a 2.4 GHz no hay duda que la mejor antena implementada es la de [2], debido a la incapacidad de definir el ancho de banda para aplicaciones móviles de la antena final en sus componentes correspondientes a la frecuencia planteada.
- Al comparar el ancho de banda a 2.4 GHz de la antena de [2] con el ancho de banda a 5.8 GHz de la antena final, se obtiene que el componente comparado de la antena final tiene 7.24 % más de capacidad de ancho de banda.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

En base al desarrollo de esta investigación y el cumplimiento de cada uno de sus objetivos se puede concluir lo siguiente:

- En la rama de investigación de antenas para reloj inteligente, la antena desarrollada es innovadora; se caracteriza por ser la más delgada con 1.6 mm de grosor, y a la vez la que tiene la superficie más reducida con 36 mm de diámetro. También cabe destacar que con sus 6 antenas en una sola superficie es la que más componentes MIMO presenta.
- Para el diseño de una antena innovadora es necesario investigar y tener diferentes fuentes que permitan realizar un buen trabajo, diseñar una antena de bajo perfil es complejo porque no hay muchas soluciones en cuanto al grosor de la antena. Tener la capacidad de colocar varias antenas en una única superficie depende mucho del ingenio del creador.
- La antena que se presenta en este trabajo de investigación, tiene una topología diferente a las antenas comunes, por lo que no se la puede describir de la misma forma que al resto; por ello es necesario realizar el análisis de la antena con la Teoría de Modos Característicos, para describir el comportamiento de la misma y poder expresar en lenguaje científico el trabajo realizado.
- En base al análisis del ECC, se confirma que los componentes MIMO de la antena final tienen una baja correlación entre sí; lo que implica que las antenas son menos propensas a interferir entre ellas y al presentar múltiples trayectos de transmisión también brindan una solución a las interferencias provocadas por cuerpo humano y su movimiento.
- Implementar una antena de bajo perfil no es un trabajo fácil porque se necesita lograr trazos pequeños en una superficie reducida; en caso de no tener una antena con sus trazos bien definidos se obtienen resultados donde varía la frecuencia y en el peor de los casos ni siquiera se obtiene resultados. Para lograr un diseño preciso es necesario utilizar un dispositivo que brinde precisión como por ejemplo la máquina CNC, con esto se asegura el diseño físico de la antena; de la misma forma sucede al momento de soldar y al no tener disponibles máquinas de precisión para ese trabajo es donde se obtienen fallas.

- Para esta cuarta revolución industrial que estamos viviendo, se debe mejorar la conectividad de la infraestructura digital; aunque los relojes inteligentes sean dispositivos con un gran poder computacional el ancho de banda de las antenas empleadas da mucho que desear; por lo que crear antenas que tengan cada vez mayor ancho de banda, permitirá que estos dispositivos puedan transmitir datos a mayores velocidades, lo que se traduce en un mayor aprovechamiento de las aplicaciones móviles de respuesta instantánea, como por ejemplo las aplicaciones de alertas de anomalías en el ritmo cardíaco que con una mejor conexión a la red pueden salvar vidas.

5.2 Recomendaciones

Después de culminar esta investigación quiero recomendar:

- El uso de aparatos de precisión para implementación de antenas de bajo perfil gracias a los resultados que proporcionan estos dispositivos.
- Realizar el análisis con la teoría de modos característicos desde el modelamiento de las antenas para de esta forma poder predecir los mejores puntos para alimentar antenas.
- Para un trabajo futuro se recomienda realizar un circuito tanque para mejorar el acoplamiento de la antena de 2.4 GHz.
- Realizar en estudio SAR sobre los efectos de esta antena en el cuerpo humano.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. L. Ordóñez, “Dispositivos y tecnologías wearables,” *ACTA. Recuperado de: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu/documents/56040178/FundamentosWearables.pdf>*, 2016.
- [2] D. Wen, Y. Hao, M. O. Munoz, H. Wang, and H. Zhou, “A compact and low-profile mimo antenna using a miniature circular high-impedance surface for wearable applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 1, pp. 96–104, 2018.
- [3] S. Woo, J. Baek, H. Park, D. Kim, and J. Choi, “Design of a compact uwb diversity antenna for wban wrist-watch applications,” in *2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*, vol. 2. IEEE, 2013, pp. 1304–1306.
- [4] C. Ahumada, H. Kaschel, S. Cordero, and R. Osorio-Comparan, “Flexible microstrip antenna for iot and 5g wireless systems,” in *2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, 2022, pp. 1–5.
- [5] B. Sanz-Izquierdo and S. Jun, “Wlan antenna on 3d printed bracelet and wrist phantom,” in *2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, 2014, pp. 372–375.
- [6] Z. Yu, R. Niu, G. Zhang, R. Sun, Z. Lin, Y. Li, and X. Ran, “A wearable self-grounding slit antenna for ism/4g/5g/bluetooth/wlan applications,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 87 930–87 937, 2023.
- [7] S. García Saisó, M. C. Martí, F. Mejía Medina, V. M. Pascha, J. Nelson, L. Tejerina, A. Bagolle, and M. D’Agostino, “La transformación digital para una salud pública más equitativa y sostenible en la era de la interdependencia digital,” *Revista Panamericana de Salud Publica*, vol. 46, p. e1, 2023.
- [8] D. Naranjo, D. Buenaño, and I. T. Mejía, “Evolución de la tecnología móvil. camino a 5g,” *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*, pp. 1–13, 2016.
- [9] S.-W. Su and Y.-T. Hsieh, “Integrated metal-frame antenna for smartwatch wearable device,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 7, pp. 3301–3305, 2015.

- [10] D. Wen, Y. Hao, H. Wang, and H. Zhou, “A wearable antenna design using a high impedance surface for all-metal smartwatch applications,” in *2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT)*, 2017, pp. 274–276.
- [11] Y.-Y. Yang and H.-D. Chen, “Open slot antenna for smartwatch application,” in *2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, 2016, pp. 41–42.
- [12] Y.-S. Chen and T.-Y. Ku, “A low-profile wearable antenna using a miniature high impedance surface for smartwatch applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1144–1147, 2015.
- [13] D. Wu and S. W. Cheung, “A cavity-backed annular slot antenna with high efficiency for smartwatches with metallic housing,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 7, pp. 3756–3761, 2017.
- [14] D. Wen, Y. Hao, H. Wang, and H. Zhou, “Design of a mimo antenna with high isolation for smartwatch applications using the theory of characteristic modes,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1437–1447, 2019.
- [15] B. Wang and S. Yan, “Design of smartwatch integrated antenna with polarization diversity,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123 440–123 448, 2020.
- [16] C. R. Peñafiel Ojeda, “Design of multi-feed uwb antennas using the theory of characteristic modes,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2021.
- [17] M. E. Cecchinato, A. L. Cox, J. Bird, J. Long, I. Iacovides, C. Jennett, P. Cairns, V. Shipp, and A. De Angeli, “Smartwatches: Wrist-based notification devices or a novel way of interacting with apps?” in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2015.
- [18] C. Ebert and C. H. C. Duarte, “Digital transformation.” *IEEE Softw.*, vol. 35, no. 4, pp. 16–21, 2018.
- [19] S. Madakam, V. Lake, V. Lake, V. Lake *et al.*, “Internet of things (iot): A literature review,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, no. 05, p. 164, 2015.
- [20] J. M. Huidobro, “Antenas de telecomunicaciones,” *Revista digital de acta*, vol. 18, 2013.
- [21] K. Zhao, S. Zhang, C.-Y. Chiu, Z. Ying, and S. He, “Sar study for smart watch ap-

- plications,” in *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014, pp. 1198–1199.
- [22] Á. C. Aznar, J. R. Robert, J. M. R. Casals, L. J. Roca, S. B. Boris, and M. F. Bataller, *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.
- [23] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [24] J. A. R. Cruz, “Medios de transmisión, 2012,” *Asignatura de Grado de Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid*.
- [25] J. López Hernández *et al.*, “Diseño de antena de lente con alimentador bowtie y polarización circular para aplicaciones 5g de muy alta velocidad,” B.S. thesis, 2021.
- [26] K. Wu, D. Deslandes, and Y. Cassivi, “The substrate integrated circuits - a new concept for high-frequency electronics and optoelectronics,” in *6th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2003. TELSIKS 2003.*, vol. 1, 2003, pp. P–III.
- [27] D. Deslandes and K. Wu, “Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 2, pp. 68–70, 2001.
- [28] D. Deslandes, “Design consideration and performance analysis of substrate integrated waveguide components,” in *2002 32nd European microwave conference*. IEEE, 2002, pp. 1–4.
- [29] K. N. O. Nuñez, “Diseño, modelado y caracterización de arreglo de antenas microstrip para aplicaciones del internet de las cosas,” *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE): Puebla, México*, 2019.
- [30] N. B. M. A. V. Nogueira, M. C. Fabrés, and E. A. Daviu, “Diseño de una antena compacta para sistemas mimo.”
- [31] J. Pastor Martínez *et al.*, “Implementación de antenas mimo multibanda,” B.S. thesis, 2021.
- [32] R. Calzada Trujillo *et al.*, “Antenas mimo multibanda,” B.S. thesis, 2019.
- [33] O. D. Suárez Mejía *et al.*, “Antenas mimo y sus aplicaciones en las telecomunicaciones.”

- [34] E. Fritz Andrade, “Evaluación del desempeño de arreglos de antenas para comunicaciones mediante dos coeficientes,” 2021.
- [35] R. Mondal, P. S. Reddy, D. C. Sarkar, and P. P. Sarkar, “Investigation on mimo antenna for very low ecc and isolation characteristics using fss and metal-wall,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 135, p. 153708, 2021.
- [36] R. Harrington and J. Mautz, “Theory of characteristic modes for conducting bodies,” *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 19, no. 5, pp. 622–628, 1971.
- [37] Y. Sun, M. Tian, and G. Cheng, “Characteristic mode-based neutralization line design for mimo antenna,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, 2022.
- [38] Y. Chen and C.-F. Wang, *Characteristic Modes: Theory and Applications in Antenna Engineering*, 06 2015.
- [39] R. Harrington and J. Mautz, “Theory of characteristic modes for conducting bodies,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 19, no. 5, pp. 622–628, 1971.
- [40] A. Abdelaziz, H. A. Mohamed, and E. K. Hamad, “Applying characteristic mode analysis to systematically design of 5g logarithmic spiral mimo patch antenna,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 156 566–156 580, 2021.
- [41] J. D. Velin Sagbay, “Diseño e implementación de una antena compacta para aplicaciones en internet de las cosas en 5g,” B.S. thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, 2023.