



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA INTEGRADA EN TELA
LYCRA UTILIZANDO TINTA BARE CONDUCTIVE, PARA LA
BANDA INFERIOR DE WI-FI**

Trabajo de titulación para optar al título de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

Autor:

Alex Eduardo Guambaña Tapia

Tutor:

Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda Ph.D.

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Alex Eduardo Guambaña Tapia, con cédula de ciudadanía 140129027-3, autor del trabajo de investigación titulado: IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA INTEGRADA EN TELA LYCRA UTILIZANDO TINTA BARE CONDUCTIVE, PARA LA BANDA INFERIOR DE WI-FI, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, 08 de agosto de 2024



Alex Eduardo Guambaña Tapia

C.I:140129027-3

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda** catedrático adscrito a la Facultad de **Ingeniería** por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación **“IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA INTEGRADA EN TELA LYCRA UTILIZANDO TINTA BARE CONDUCTIVE, PARA LA BANDA INFERIOR DE WI-FI”**, bajo la autoría de **Alex Eduardo Guambaña Tapia**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 08 días del mes de agosto de 2024.



Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda Ph.D.

C.I: 0603888702


TUTOR (A)

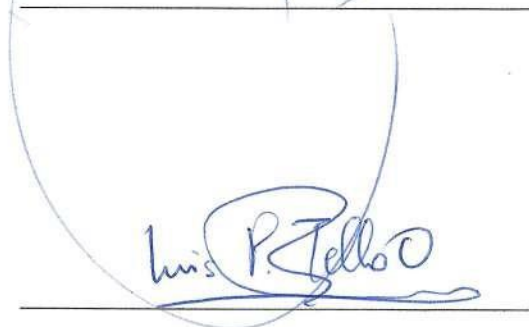
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA INTEGRADA EN TELA LYCRA UTILIZANDO TINTA BARE CONDUCTIVE, PARA LA BANDA INFERIOR DE WI-FI”** por **Alex Eduardo Guambaña Tapia**, con cédula de identidad número **1401290273**, bajo la tutoría del **Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda Ph.D.**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a el 08 de agosto de 2024.

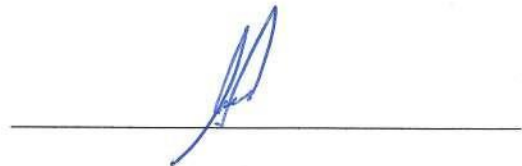
Ph.D. Marlon Basantes Valverde
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO





Ph.D. Luis Tello Oquendo
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Ph.D. Daniel Santillán Haro
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **Guambaña Tapia Alex Eduardo** con CC: **140129027-3**, estudiante de la Carrera de **Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA INTEGRADA EN TELA LYCRA UTILIZANDO TINTA BARE CONDUCTIVE, PARA LA BANDA INFERIOR DE WI-FI"**, cumple con el 3 %, 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, 1 de agosto de 2024.



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

Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda Ph.D.
TUTOR

DEDICATORIA

A Dios, mi madre, mi padre y mis hermanos,

A quienes han sido mi roca, mi inspiración y mi familia incondicional. Agradezco a Dios por su amor y guía constante, a mi madre por su fuerza y sacrificio incansables, a mi padre por su sabiduría y ejemplo de trabajo arduo, y a mis hermanos por su apoyo incondicional y alegría compartida.

Este trabajo es el resultado de su amor, paciencia y apoyo inquebrantable. Cada uno de ustedes ha sido una parte fundamental en mi vida y en este logro. Que esta dedicación sea un reflejo de mi profundo agradecimiento y amor por cada uno de ustedes.

¡Gracias por estar siempre a mi lado!

AGRADECIMIENTO

Queridos madre, padre y hermanos,

Mamá, gracias por ser mi pilar fundamental en todo este camino. Tu apoyo incondicional, tu paciencia y tu amor infinito me dieron la fuerza para seguir adelante en los momentos más difíciles. Tus palabras de aliento fueron mi brújula cuando me perdía en el mar de dudas y tu fe en mí me impulsó a alcanzar mis metas. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo mismo dudaba.

Papá, gracias por ser mi guía y mi ejemplo a seguir. Tu dedicación al trabajo, tu disciplina y tu tenacidad me inspiraron a ser mejor persona y mejor estudiante. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Tus consejos sabios me ayudaron a tomar decisiones importantes en mi vida y tu apoyo moral me permitió llegar hasta donde estoy hoy.

Hermanos/as y a la persona que es como mi hermana mayor (Cris), gracias por ser mi apoyo incondicional y mi fuente de alegría. Sus risas y bromas me alegraron los días más grises y su compañía me brindó el consuelo que necesitaba en los momentos difíciles. Gracias por estar siempre presentes en mi vida, por sus palabras de ánimo y por su confianza en mí.

Este logro no es solamente mi, sino también es de todos ustedes, y se los agradezco con todo mi corazón.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I	17
1.1. Planteamiento del Problema.....	17
1.2. Justificación	18
1.3. Objetivos.....	19
1.3.1. General	19
1.3.2. Específicos.....	19
CAPÍTULO II	20
2.1. Estado del Arte.....	20
2.2. Fundamentación Teórica	22
CAPÍTULO III	26
3.1. Metodología.....	26
3.1.1. Tipo de Investigación	26
3.1.1.1. Investigación exploratoria.....	26
3.1.1.2. Investigación experimental	26
3.1.2. Método de Investigación	26
3.1.2.1. Método adaptativo.....	26
3.1.2.2. Método experimental.....	27
3.1.3. Técnica de investigación	27
3.1.3.1. Observación directa.....	27
3.1.3.2. Estudio de documentos.....	27
3.1.4. Procedimiento	27
3.1.5. Población.....	29
3.1.6. Operacionalización de Variables	30
3.2. Diseño y Fabricación.....	30
CAPÍTULO IV	36

4.1. Resultados y Discusiones.....	36
4.2. Análisis comparativo entre la antena flexible propuesta en simulación y la antena flexible implementada	41
4.2.1. Prueba de normalidad.....	41
4.2.2. Análisis de ancho de banda vs flexibilidad.....	43
4.2.3. Análisis de ancho de directividad vs flexibilidad.....	44
CAPÍTULO V	45
5.1. Conclusiones.....	45
5.2. Recomendaciones.....	46
BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Características dieléctricas de sustratos textiles [56].	23
3.2. Operacionalización de variables.	30
3.3. Variables numéricas del diseño de la antena textil.	32
4.4. Resumen de resultados.	38
4.5. Resultados del test de Shapiro-Wilk para el ancho de banda.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Tela lycra [57].	23
2.2. Línea de transmisión coplanar (CPW).....	24
2.3. Ancho de banda de la red Wi-Fi a 2.4, 5 y 6 GHz.....	25
2.4. Materiales conductores. (a)Tinta Bare Conductive bareconductive , (b) Tinta de Plata [65], (c) Tinta Buddy Paint, (d) Cinta de Cobre.	25
3.5. Metodología del proyecto de investigación.....	28
3.6. Variación de flexibilidad de la antena. (a) Radio mínimo del cilindro con un valor angular de 360°, (b) Radio tiende al infinito con un valor angular muy cercano a 0°.....	29
3.7. Diseño de la antena propuesta, simulado en el software CST Studio Suite. (a) Estructura conductora, (b) Sustrato textil y (c) Vista en 3D de la antena textil.	32
3.8. Variación del radio del cilindro en relación con el ángulo de flexión de la antena.	33
3.9. Variación de la flexibilidad de las antenas textiles simuladas en el software CST Studio Suite a la frecuencia de 2.4 GHz. (a) Antena flexible a 100°, (b) Antena flexible a 200°, (c) Antena flexible a 300° y (d) Antena flexible a 360°.....	34
3.10. Antenas textiles implementadas en sustrato de tela lycra. (a) Antena con tinta Buddy Paint, (b) Antena con tinta Plata, (c) Antena con tinta Bare Conductive y (d) Antena con cinta de Cobre.....	34
3.11. Variación de flexibilidad de las antenas textiles implementadas. (a) Antena flexible a 100°, (b) Antena flexible a 200°, (c) Antena flexible a 300° y (d) Antena flexible a 360°.....	35
4.12. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 0°.....	36
4.13. Distribución de corrientesde la antena simulada a la frecuencia de 2.4 GHz en el software CST Studio Suite.	37
4.14. Diagrama de radiación de la antena simulada a la frecuencia de 2.4 GHz en el software CST Studio Suite.....	38
4.15. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 100°.	39
4.16. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 200°.	39
4.17. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 300°.	40
4.18. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 360°.	41

4.19. Resultados estadísticos para evaluar la normalidad de los datos de ancho de banda utilizando el software R Commander. (a) Diagrama de cajas y (b) Normalidad de muestras.....	43
---	----

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se ha implementado una antena integrada en tela de lycra utilizando tinta Bare Conductive, diseñada para operar en la banda inferior de Wi-Fi. A través de un estudio exploratorio, se analizaron antenas textiles y, mediante métodos adaptativos y experimentales, se definió una estructura resonante a 2.4 GHz. Esta antena demuestra la capacidad de adaptarse a diversas superficies que requieren flexibilidad, manteniendo su funcionalidad y rendimiento en diferentes condiciones.

La antena flexible desarrollada en este estudio presenta un diseño en forma de letra e y utiliza una alimentación coplanar. Para el sustrato, se emplea tela de lycra sobre la cual se aplica vinil textil, lo que garantiza una distribución homogénea de la tinta conductora. Este material cuenta con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 1.50$ y una tangente de pérdidas $\tan \delta = 0.0093$. Además, se utiliza un puerto SMA de 50 ohmios para la alimentación de la antena.

El diseño y análisis de la antena se llevó a cabo utilizando el software de simulación CST Studio Suite. Los resultados obtenidos muestran que la antena final presenta una excelente adaptación de impedancia a la frecuencia de 2.4 GHz, con un ancho de banda del 5.04 %. El diagrama de radiación de la antena es omnidireccional dentro de la banda inferior de Wi-Fi, destacándose una directividad máxima de 1.748 dBi.

La fabricación de la antena se llevó a cabo mediante métodos de serigrafía y dispersión por aerógrafo, empleando una variedad de materiales conductores como cinta de Cobre, tinta de Plata, tinta Buddy Paint y tinta Bare Conductive para los elementos resonantes. Además, se realizó la medición experimental de la antena utilizando un analizador de redes vectoriales. Este enfoque permitió evaluar y ajustar el rendimiento de la antena en condiciones prácticas.

Finalmente, se integró la antena en una prenda de vestir masculina, caracterizada por su flexibilidad y la utilización de tela lycra en su confección. Este paso garantiza que la antena se adapte cómodamente a las estructuras corporales de los usuarios, manteniendo su funcionalidad y rendimiento óptimo en aplicaciones de tecnología vestible.

Palabras clave: Alimentación Coplanar, Bare Conductive, Parámetros S, Microstrip.

ABSTRACT

In the present research work, a Lycra fabric integrated antenna has been implemented using Bare Conductive ink, designed to operate in the lower Wi-Fi band. Through an exploratory study, textile antennas were analyzed, and, by means of the experimental method, a resonant structure at 2.4 GHz was defined. This antenna demonstrates the ability to adapt to various surfaces requiring flexibility, maintaining its functionality and performance in different conditions.

The flexible antenna developed in this study has an e-shaped design and uses a coplanar feed. For the substrate, lycra fabric is used on which textile vinyl is applied, which guarantees a homogeneous distribution of the conductive ink. This material has a dielectric constant of $\epsilon_r = 1.50$ and a loss tangent of $\tan \delta = 0.0093$. In addition, a 50 ohm SMA port is used for the antenna feed.

The antenna design and analysis were carried out using CST Studio Suite simulation software. The results obtained show that the final antenna exhibits excellent impedance matching at the 2.4 GHz frequency with a bandwidth of 5.04%. The radiation pattern of the antenna is omnidirectional within the lower WiFi band, highlighting a maximum directivity of 1.748 dBi.

The fabrication of the antenna was carried out by screen printing and airbrush scattering methods, using a variety of conductive materials such as copper tape, silver ink, Buddy Paint ink, and Bare Conductive ink for the resonant elements. In addition, experimental measurement of the antenna was performed using a vector network analyzer. This approach allowed evaluating and tuning the antenna performance under practical conditions.

Finally, the antenna was integrated into a men's garment, characterized by its flexibility and the use of Lycra fabric in its construction. This step ensures that the antenna adapts comfortably to the users' body structures, maintaining its functionality and optimal performance in wearable technology applications.

Keywords: Coplanar Feed, Bare Conductive, S-Parameters, Microstrip.



Revised by
Mario N. Salazar

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las antenas flexibles han adquirido cada vez más importancia en la investigación y el desarrollo de tecnología portátil, especialmente en los campos de las telecomunicaciones y la electrónica vestible. Las antenas permiten la transmisión (TX) y recepción (RX) inalámbrica de señales de radiofrecuencia (RF) [1]. Las bandas de frecuencia más utilizadas para la tecnología portátil abarcan de 2.4 a 2.4835 GHz, aprovechando el espectro electromagnético de la banda de frecuencias Industrial, Científica y Médica (ISM) y 5G [2], [3]. Su flexibilidad y adaptabilidad a diferentes formas y materiales los hacen ideales para su uso en la electrónica vestible, ayudando a monitorear de manera productiva parámetros de salud a través de dispositivos portátiles como: reloj inteligente, gafas de datos, pulsera de fitness, entre otros [4].

Para aplicaciones como dispositivos portátiles, el diseño de la antena y la selección de materiales son pasos importantes debido a preocupaciones de comodidad del usuario, deformación mecánica, medio ambiente, tasa de absorción específica (SAR), humedad y costos de producción[5], [6], estas características son relevantes en aplicaciones donde las antenas convencionales están limitadas por el espacio o la forma[7]. Incluso cuando la antena se coloca cerca del cuerpo, el efecto de carga de los tejidos corporales rara vez afecta el rendimiento de la antena[8].

El diseño de antena preferido para dispositivos wearables que operan en la banda ISM son los parches rectangulares y circulares con diferentes tipos de ranuras debido al control de onda superficial y una buena adaptación de impedancia [9]-[12]. Un criterio importante en la producción de antenas es el uso de tinta conductora [7]. En este contexto, la tinta Bare Conductive proporciona conductividad confiable, flexibilidad, compatibilidad con RF y facilidad de uso [13]. Las técnicas más comunes para impregnar un material conductor en un dieléctrico son la impresión (inyección, grabado) y la serigrafía [14].

En el marco de esta investigación, se realizó un estudio del estado del arte, para determinar el contexto del campo de estudio de las antenas flexibles incorporadas en textiles e identificar las herramientas que se utilizan para crear un diseño original y novedoso. Con el creciente desarrollo de dispositivos que utilizan tinta conductora y los avances en las técnicas de fabricación impulsados por la miniaturización de dispositivos inteligentes [14]. Se implementa una antena de estructura flexible de tipo parche con línea coplanar, integrada en tela lycra utilizando tinta Bare Conductive. Esta antena funciona dentro de la banda ISM a 2.4 GHz, que se considera altamente compatible con dispositivos electrónicos al no requerir licencia para su uso [15]. La antena flexible se puede deformar a partir de un cilindro con un radio variable, para mejorar

la conectividad inalámbrica en la electrónica portátil, especialmente en prendas de vestir, ofreciendo así una comunicación más estable y discreta.

Este documento está organizado en cinco capítulos. El primer capítulo presenta el problema y los objetivos a alcanzar. En el segundo capítulo se menciona una breve descripción del estado actual del tema de investigación, así como los fundamentos teóricos necesarios. En el tercer capítulo se describen los procesos utilizados para diseñar, simular e implementar la antena. El cuarto capítulo presenta y explica los resultados de la antena flexible y finalmente, en el capítulo cinco, se explican las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

1.1 Planteamiento del Problema

En Ecuador, el continuo desarrollo de los avances tecnológicos [16], la implementación del Internet de las Cosas (IoT) y las redes 5G, han creado un entorno propicio para la integración de tecnologías aplicadas a dispositivos electrónicos portátiles (wearables), centrándose en el desarrollo de antenas flexibles.

Si bien este escenario ofrece importantes oportunidades para el desarrollo de la electrónica portátil, el desafío radica en integrar antenas en sustratos textiles. Por lo tanto, el resultado de encontrar diferentes soluciones para incorporar antenas sobre sustratos textiles, pasa por aplicar diferentes técnicas de impresión y grabado que faciliten reducir el tamaño de las antenas [17]; sin embargo, utilizar técnicas como la impresión (inyección, grabado), resulta un proceso poco accesible debido al alto costo en la adquisición de equipos para su impresión, por ello se analizó la impresora de materiales Dimatix DMP-2850, como un ejemplo de alto costo, considerado una alternativa a la impresión de antenas flexibles [18], [19].

Una de las dificultades fundamentales a superar fue crear y mejorar el diseño de la antena para asegurar su efectividad en la banda ISM de 2.4 GHz. Esto no solo tiene que ver con la configuración geométrica de la antena, si no también, de cómo se deforma para adaptarse a diferentes formas sin afectar su rendimiento.

Por otra parte, desarrollar una antena integrada en tela lycra, utilizando tinta Bare Conductive para Wi-Fi de banda baja, se considera un gran desafío tecnológico, debido a, que este proceso incluye comprender el comportamiento de la antena flexible, mediante el uso de un sustrato textil y la capacidad de deformarla a partir de un cilindro de radio variable. Además, al utilizar tinta Bare Conductive, es necesario generar un proceso de curado con el fin de garantizar una conductividad suficiente y estable en condiciones variables de deformación y uso [20].

1.2 Justificación

En los últimos años, la sociedad ha experimentado cambios muy significativos en el uso y adaptación a las nuevas tecnologías, entre ellas el uso generalizado de Internet [21]. Esta variación ha dado lugar a dispositivos inteligentes, diseñados para facilitar las tareas diarias de la humanidad, como es el control de señal cardiaca a través de un reloj inteligente, medición de distancias recorridas utilizando aplicativos móviles, control de calorías quemadas de forma diaria, entre otros [22]. Entre las aplicaciones más relevantes, en las que destacan las antenas flexibles, se encuentran las relacionadas con la salud, el deporte y la seguridad, mediante la utilización de dispositivos y prendas inteligentes [23], [24]. El paso a los dispositivos portátiles (wearables) ha impulsado la necesidad de innovar en diseño, materiales y características específicas en las antenas y la capacidad para adaptarse a las necesidades de esta nueva tecnología.

Las antenas flexibles, han sobrellevado un crecimiento exponencial debido a la demanda de los dispositivos portátiles. Por lo tanto, integrarlas en la electrónica vestible, se considera una tecnología en tendencia y prometedora [21]. La flexibilidad de esta antena permite adaptarse a condiciones exigentes de uso, incluyendo dotación, flexión y distorsión [20], sin que el dispositivo experimente problemas físicos. Esta característica las posiciona como una solución clave para la integración efectiva de dispositivos tecnológicos en la vestimenta, abriendo nuevas posibilidades y aplicaciones en el ámbito de la tecnología wearable.

En busca de innovación en el desarrollo de antenas flexibles integradas en prendas de vestir, se propone diseñar antenas de bajo perfil utilizando diferentes técnicas para obtener mejores resultados en comparación con las antenas existentes. La aplicación de alimentación coplanar permite desplegar la antena en una única superficie, solucionando el problema de reducir el espacio disponible dentro de la prenda, al tiempo que proporciona una solución contra las interferencias provocadas por el cuerpo humano y su funcionamiento al no tener contacto directo con la piel. El diseño innovador de una antena para mejorar la calidad de transmisión de datos y el rendimiento en la banda ISM de 2.4 GHz optimiza el uso de los protocolos de comunicación inalámbrica existentes, como Wi-Fi y Bluetooth. Además, la antena está diseñada para admitir comunicaciones de baja latencia, lo que facilita respuestas instantáneas en aplicaciones de IoT.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Implementar una antena integrada en tela lycra utilizando tinta Bare Conductive, para la banda inferior de Wi-Fi.

1.3.2 Específicos

- Diseñar una antena flexible que opere en la frecuencia de 2.4 GHz, mediante el simulador electromagnético CST Studio Suite.
- Fabricar la antena flexible mediante el uso de tinta Bare Conductive sobre tela lycra.
- Caracterizar los parámetros de Scattering de la antena flexible mediante ensayos de deformación y un Analizador de Redes Vectoriales (VNA).
- Evaluar los parámetros de radiación de la antena flexible al incorporarla en una prenda.

CAPÍTULO II

2.1 Estado del Arte

En las últimas décadas, ha surgido un considerable interés en la electrónica flexible, con la creación de dispositivos cada vez más pequeños, como pantallas flexibles, etiquetas inteligentes y productos portátiles [25]. El continuo avance en el desarrollo de la microelectrónica flexible y otras tecnologías emergentes ha abierto la posibilidad de integrar diversas funcionalidades [26], [27]. La demanda de dispositivos electrónicos portátiles integrados en la vestimenta ha experimentado un notable aumento, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías innovadoras para satisfacer estas necesidades [28]. Una de estas tecnologías es la implementación de antenas flexibles integradas en tejidos, que permiten la comunicación inalámbrica de dispositivos electrónicos con redes Wi-Fi.

La tecnología vestible (wearable technology), se refiere a cualquier accesorio o prenda inteligente diseñada para llevar sobre el cuerpo [29], [30]. Estos dispositivos están equipados con capacidades tecnológicas que les permiten monitorear de forma continua actividades físicas, comportamientos, parámetros fisiológicos y bioquímicos de los usuarios en su vida diaria [31]. Aunque su uso inicial se centró en el ámbito médico debido a sus innovadoras soluciones de salud [30]; su aplicación se ha expandido a otras áreas como el deporte, el entretenimiento, la industria, la seguridad, entre otras [32]-[36].

Las antenas textiles [37], [38], caracterizadas por su adaptabilidad y ligereza, encuentran en las tintas conductoras un aliado indispensable para su existencia. Estas tintas innovadoras, compuestas por partículas metálicas como plata o cobre dispersas en una matriz plástica, posibilitan la creación de antenas funcionales sobre las telas mediante técnicas de impresión. Gracias a su flexibilidad, las tintas conductoras se adhieren perfectamente a las superficies irregulares de los tejidos sin comprometer su conductividad eléctrica, una propiedad crucial para el correcto funcionamiento de las antenas.

En el año 2018, se exploran los progresos en el ámbito de las tintas conductoras como herramienta para la fabricación de dispositivos electrónicos flexibles. En este contexto, se destaca la relevancia de estas tintas en el desarrollo de antenas textiles, abriendo un abanico de posibilidades para su integración en prendas de vestir. La investigación resalta la ventaja de estas tintas, ya que permiten su impresión directa sobre tejidos, lo que se traduce en una solución eficiente y de bajo costo para la incorporación de antenas en la indumentaria [26].

Las antenas textiles, caracterizadas por su flexibilidad y adaptabilidad, son un componente fun-

damental en las tecnologías Redes Inalámbricas de Área Corporal (WBAN), permitiendo la comunicación entre dispositivos electrónicos integrados en la ropa. Desde las primeras investigaciones significativas en 2013 [39], [40], este campo ha experimentado un crecimiento exponencial, con estudios que exploran su uso en la electrónica vestible y evalúan su impacto en la salud humana [41]. El potencial de las antenas textiles para transformar la forma en que interactuamos con la tecnología es inmenso, abriendo un mundo de posibilidades para el desarrollo de dispositivos innovadores y aplicaciones prácticas en diversos campos.

La antena flexible integrada en tela lycra se considera una tecnología emergente que combina la flexibilidad de la tela con las propiedades conductoras de la tinta Bare Conductive, una tinta conductora a base de agua que se puede aplicar mediante serigrafía para lograr un rendimiento eléctrico constante [42]. La antena se imprime sobre vinilo textil y posterior a ello se encuentra la tela lycra, lo que permite una integración perfecta con prendas de vestir y otros textiles [43].

En el ámbito de las antenas integradas en textiles, el diseño de alimentación de línea coplanar (CPW) se ha convertido en una técnica ampliamente utilizada por su simplicidad y eficiencia en la transmisión de señales. Esta técnica consiste en un conductor central rodeado por dos planos de masa en el mismo plano, creando una configuración compacta y flexible que resulta ideal para aplicaciones en vestimenta.

En el año 2020, se estudia la implementación de antenas flexibles con alimentación CPW en tejidos, destacando sus beneficios en términos de reducción de interferencias y mejora de la eficiencia de radiación, especialmente en la banda ISM a 2.4 GHz. La investigación también aborda los retos técnicos, como la adhesión de la tinta conductora a los tejidos y la durabilidad del dispositivo, proponiendo soluciones potenciales para mitigarlos. El diseño CPW, con sus ventajas y desafíos, representa una línea de investigación prometedora en el desarrollo de tecnologías WBAN y otras aplicaciones en el ámbito de la electrónica vestible [44].

La investigación realizada en 2021, demuestra la viabilidad de las antenas textiles fabricadas con tintas conductoras y diseño CPW en la banda ISM a 2.4 GHz. Estas antenas alcanzan una alta eficiencia de radiación y un ancho de banda adecuado para aplicaciones de comunicación inalámbrica en prendas de vestir, abriendo un camino hacia la implementación de tecnologías WBAN y otras aplicaciones en el ámbito de la electrónica vestible [45].

El desarrollo de antenas textiles va más allá de la simple geometría, requiriendo un enfoque holístico que considere las propiedades del textil, los materiales conductores, la influencia del cuerpo humano, los métodos de fabricación y la miniaturización. Estas investigaciones abren un abanico de posibilidades para la comunicación inalámbrica, la electrónica vestible y otras aplicaciones innovadoras, integrando la tecnología en la ropa y accesorios de manera confiable y práctica [46], [47].

2.2 Fundamentación Teórica

Según el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), una antena se define como un dispositivo eléctrico diseñado para transmitir o recibir ondas electromagnéticas en el espacio libre. Las antenas convierten la energía eléctrica en ondas electromagnéticas (transmisión) o viceversa (recepción), lo que permite la comunicación inalámbrica [48]-[50].

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

Por otro lado, las antenas textiles representan una innovación significativa, ya que se diseñan y fabrican utilizando materiales textiles. Estas antenas ofrecen ventajas notables en comparación con las antenas convencionales, siendo flexibles, ligeras y capaces de integrarse de forma discreta en prendas de vestir y otros textiles [51]-[53].

En el mercado existen dos tipos principales de antenas: las antenas de hilo y las antenas planas. Las antenas de hilo utilizan conductores de hilo como elementos radiantes y se emplean en bandas de frecuencia como MF, HF, VHF y UHF [54]. Por otro lado, las antenas planas son especialmente valiosas en la fabricación de antenas textiles debido a su fácil integración en prendas de vestir y la posibilidad de utilizar materiales textiles [55].

Es importante que los sustratos utilizados en las antenas posean una baja permitividad relativa y una mínima pérdida dieléctrica para asegurar una eficiencia ideal y un ancho de banda adecuado. La permitividad y el espesor del sustrato afectan directamente al ancho de banda, mientras que la tangente de pérdidas influye en la eficiencia, y la flexibilidad del sustrato afecta la adaptación con los usuarios [56].

Es por ello que, se utiliza un buzo deportivo de tela de lycra, como se aprecia en la Fig. 2.1 Las características de este sustrato son: una permitividad relativa de 1.50, que permite la transmisión eficiente de ondas electromagnéticas, y una baja tangente de pérdida, de 0.0093, que indica una capacidad reducida de absorción de energía electromagnética. El espesor de la tela lycra es de 0.675 milímetros, lo que permite elasticidad y ajuste al cuerpo.



Figura. 2.1. Tela lycra [57].

En la Tabla 2.1 se presentan los sustratos textiles más comunes y sus respectivas características dieléctricas.

Tabla 2.1. Características dieléctricas de sustratos textiles [56].

Características Dieléctricas de Sustratos Textiles		
Sustrato textil	Permitividad relativa (ϵ_r)	Tangente de pérdidas ($\tan \delta$)
Mezclilla	1.6	0.0093
Jeans	1.67	0.0025
Polialgodón	1.56	0.01
Poliéster	1.44	0.02
Algodón	1.6	0.02
Fieltro	1.22	0.016
Lycra	1.50	0.0093
Cuero	2.72	0.02

Una vez definido el sustrato a utilizar, es necesario determinar el tipo de alimentación que se empleará en la antena. Para ello, se considera la línea coplanar (CPW), un tipo de línea de transmisión uniplanar utilizada en el diseño de circuitos de microondas. Esta línea consiste en una franja conductora central situada entre dos planos de tierra paralelos y coplanarios. La franja conductora y los planos de tierra están separados por una capa de material dieléctrico como se aprecia en la Fig. 2.2 [58]-[62].

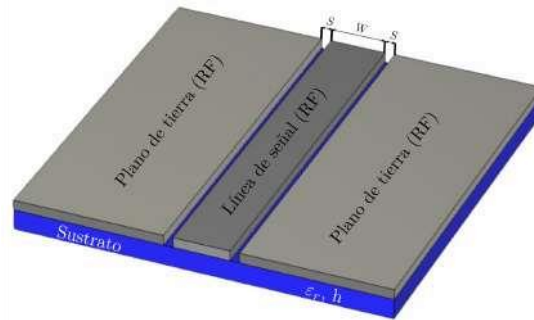


Figura. 2.2. Línea de transmisión coplanar (CPW).

En la fase de diseño de una antena, se define un ancho de banda específico alrededor de la frecuencia central. El ancho de banda (BW) representa el rango de frecuencias en el que la antena puede operar de manera efectiva. Este parámetro indica la capacidad de la antena para irradiar o recibir señales dentro de dicho rango sin una pérdida significativa de rendimiento, como se especifica en la ecuación 2.2. [48].

$$BW = \left(\frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \right) * 100 \quad (2.2)$$

Dentro de la simulación de la antena también se determina la directividad (D) con la que opera, definida como la capacidad de enfocar la energía radiada en una dirección específica. Una mayor directividad indica que la antena concentra más energía en una dirección determinada, lo cual es generalmente favorable para una comunicación eficiente [48]. De igual manera, se presenta el diagrama de radiación, una representación gráfica que describe cómo una antena irradia energía electromagnética en función de la dirección [48].

En consecuencia, se hallan los parámetros de dispersión (S-parameters), que constituyen una medida de la respuesta de un dispositivo de radiofrecuencia (RF) ante señales de entrada en diversos puertos. Estos parámetros explican cómo una señal se refleja y se transmite a través del dispositivo, permitiendo caracterizar su comportamiento en relación con la reflexión, la transmisión y las pérdidas [62].

Por otro lado, la banda inferior de Wi-Fi se refiere a la porción del espectro electromagnético utilizada por los dispositivos Wi-Fi para comunicarse en frecuencias más bajas. En el estándar IEEE 802.11, la banda de frecuencia de 2.4 GHz se utiliza para redes Wi-Fi debido a varias razones, incluida su disponibilidad global, su capacidad para atravesar paredes y objetos sólidos con relativa facilidad, y su capacidad para proporcionar un equilibrio entre el alcance y la velocidad de transmisión de datos [63], [64]. Esta banda de frecuencia está licenciada para uso público, lo que significa que no se requiere una licencia específica para utilizarla.

En comparación con las bandas de 2.4 y 5 GHz, la banda de 6 GHz, que abarca de 5925 MHz a 7125 MHz como se muestra en la Fig.2.3, ofrece un espectro más amplio. Esta banda proporciona más recursos que las bandas de 2.4 y 5 GHz combinadas, lo que permite una mayor capacidad de concurrencia, mayor ancho de banda y menor latencia.

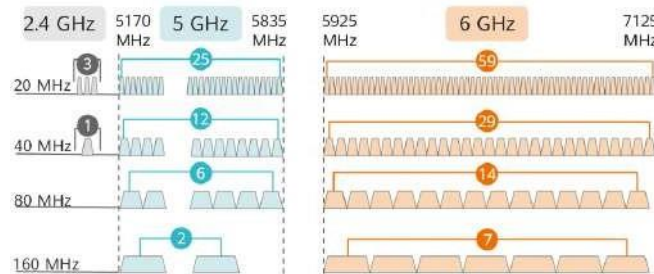


Figura. 2.3. Ancho de banda de la red Wi-Fi a 2.4, 5 y 6 GHz.

En la implementación de la antena, se utilizaron varios materiales conductores que proporcionan flexibilidad en su estructura y mantienen una conductividad adecuada para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo. Entre estos materiales se incluyen los que se indican en la Fig. 2.4.

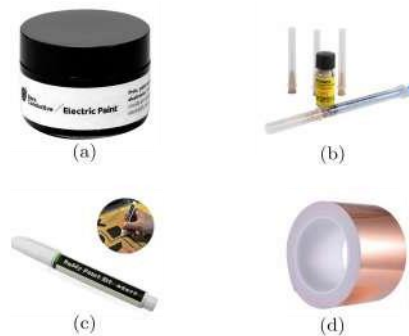


Figura. 2.4. Materiales conductores. (a) Tinta Bare Conductive **bareconductive**, (b) Tinta de Plata [65], (c) Tinta Buddy Paint, (d) Cinta de Cobre.

- **Tinta Bare Conductive:** Tinta conductora que permite crear circuitos electrónicos en superficies no convencionales, como papel, plástico y textiles **bareconductive**.
- **Tinta de Plata:** Se trata de una tinta conductora compuesta principalmente de partículas de plata, utilizada en la fabricación de circuitos impresos flexibles [65].
- **Tinta Buddy Paint:** Tinta conductora para proyectos educativos y de bricolaje, que facilita la creación de circuitos simples.
- **Cinta de Cobre:** Material conductor utilizado en la fabricación de circuitos electrónicos y en la gestión de interferencias electromagnéticas.

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

3.1.1 Tipo de Investigación

Para el desarrollo de la implementación de una una antena integrada en tela lycra utilizando Bare Conductive, para la banda inferior de Wi-Fi, se utilizaron los siguientes tipos de investigación.

3.1.1.1 Investigación exploratoria

En el marco de la presente investigación, se llevó a cabo una exhaustiva revisión de literatura de manera sistemática, recopilando información científica vinculada al diseño e implementación de antenas flexibles y su capacidad de integración en prendas de vestir. Todos los datos fueron extraídos de bases de datos científicas alojadas en diversos repositorios de universidades nacionales y extranjeras, accesibles libremente en línea..

3.1.1.2 Investigación experimental

La investigación es de tipo experimental ya que tiene como finalidad crear una antena flexible basada en tinta conductora destinada a la banda inferior de Wi-Fi. Este proceso se divide en etapas claramente definidas a lo largo del proyecto de investigación. Se ofrece una concisa explicación acerca de la composición de la antena flexible, comenzando por su diseño, la frecuencia de trabajo, mejora en su estructura, operación y finalizando con su integración en una prenda de vestir.

3.1.2 Método de Investigación

3.1.2.1 Método adaptativo

Este método se considerará al momento de generar el diseño de la antena flexible. Para ello, se emplearán diseños existentes como base fundamental en la creación de nuevas configuraciones. No obstante, esta aproximación permitirá lograr una mejora en los parámetros de operación, logrando el diseño de una antena flexible de bajo perfil y buenas características de radiación tales como: parámetros S, diagramas de radiación y ancho de banda.

3.1.2.2 Método experimental

Se empleará un software de diseño electromagnético como apoyo principal para el diseño de la antena, lo que permitirá analizar la frecuencia de resonancia correspondiente a la banda inferior de Wi-Fi (2.4 GHz). Para lograr una resonancia específica, se mejorarán diversos parámetros de diseño para generar los parámetros de operación deseados. Posteriormente, se implementará la antena y se caracterizará utilizando un Analizador de Redes Vectoriales (VNA). Esto permitirá comparar los resultados obtenidos del simulador electromagnético CST Studio Suite edición para estudiantes con las mediciones reales basadas en la implementación.

3.1.3 Técnica de investigación

3.1.3.1 Observación directa

Esta se enfocará en la generación de un criterio con base en la observación, durante los diversos procesos que requiere el diseño e implementación, permitiendo generar un registro de los eventos suscitados, que garanticen la demostración y entendimiento de operación de la antena flexible.

3.1.3.2 Estudio de documentos

Para el estudio de documentos, se consideran diversas bases de datos científicas como: Google Scholar, IEEE Xplore, Scopus, Repositorio digital UNACH, entre otros. Toda la información recabada se extrajo de artículos científicos, tesis, libros y todo documento que se encuentre en el margen de información confiable, sobre el diseño de antenas flexibles.

3.1.4 Procedimiento

El diagrama de bloques mostrado en la Fig. 3.5, se utilizó como fundamento para la elaboración de este trabajo de titulación.

La primera sección se centra en realizar una revisión exhaustiva sobre las antenas flexibles que utilizan tinta Bare Conductive, incluyendo un análisis detallado de sus propiedades y posibles aplicaciones. En la sección de análisis y selección, se examinan minuciosamente los componentes de estas antenas flexibles y las diferentes configuraciones que pueden adoptar. Luego, se lleva a cabo una revisión de los diseños previamente desarrollados, detallando sus caracterís-

ticas, los materiales empleados, su funcionalidad, la frecuencia de operación, el rendimiento y las dimensiones de las antenas.

Luego, se plantea el diseño y la mejora de las características de la antena, definiendo la frecuencia, tamaño y forma, así como el diagrama de radiación y la fuente de alimentación adecuada. Estas simulaciones se realizan en el software CST Studio Suite edición para estudiantes. En función de los resultados obtenidos, se procede a fabricar la antena o, en caso contrario, se ajustan los valores y la configuración para lograr el diseño y las características de operación deseadas.

En la fase de fabricación, se lleva a cabo la implementación del diseño elaborado en el simulador CST Studio Suite edición para estudiantes. Posteriormente, se realizan las mediciones necesarias de la antena flexible utilizando un VNA. La interpretación de los resultados se lleva a cabo mediante un análisis estadístico, el cual proporciona información relevante para la toma de decisiones adecuadas.

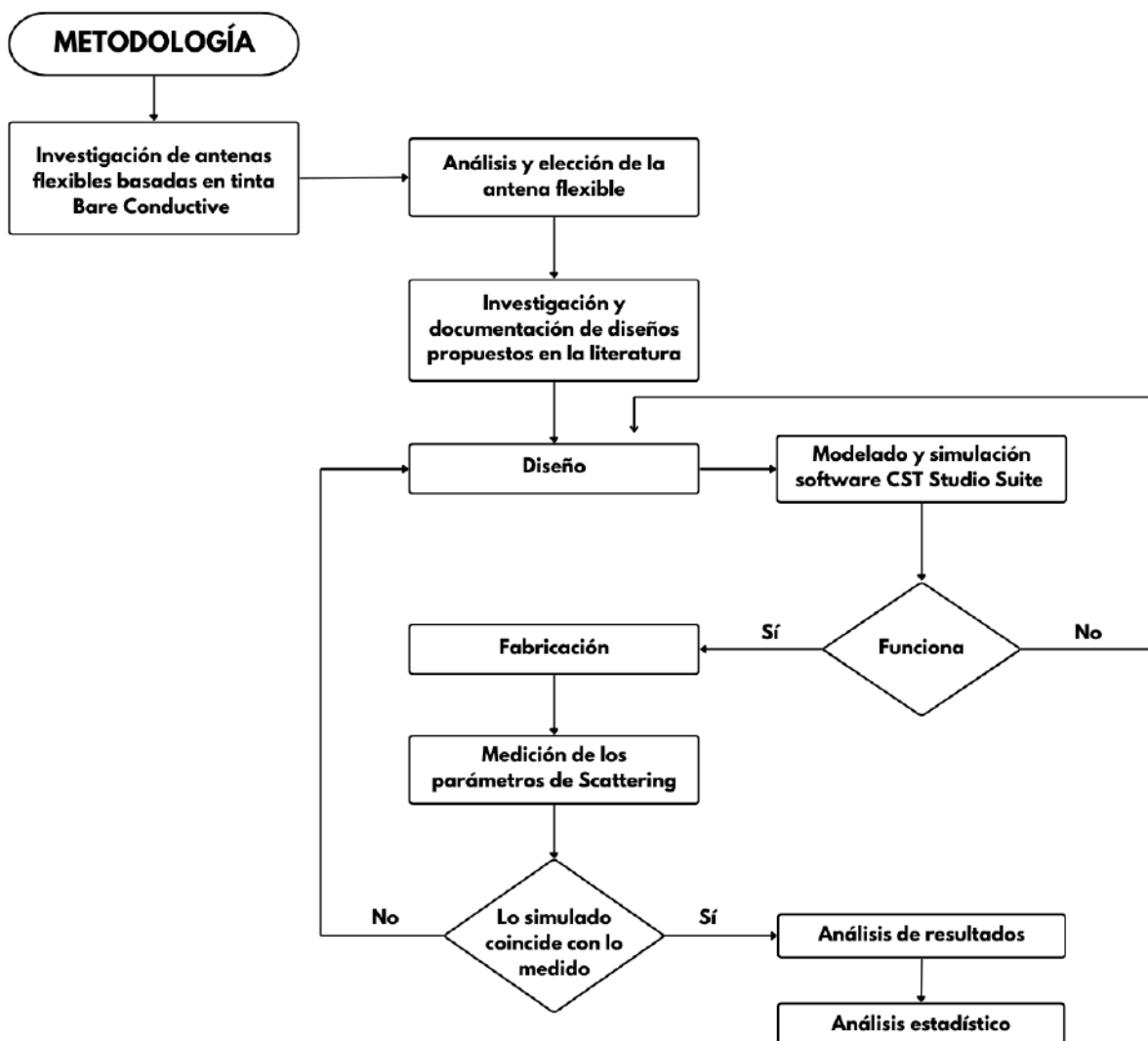


Figura. 3.5. Metodología del proyecto de investigación.

3.1.5 Población

En la población se considera un conjunto de 37 datos, asociados a un intervalo que va desde 0° hasta 360° en relación con la flexibilidad de la antena, teniendo como punto de partida el eje de coordenadas (X, Y). Se consideran exclusivamente los cuadrantes III y IV para demostrar su flexibilidad utilizando intervalos de 10° . Posteriormente, se mide la antena flexible utilizando un VNA para determinar los parámetros de radiación. A medida que se modifica la estructura de la antena, se observa un círculo en la vista frontal y un cilindro en la vista lateral.

Es importante resaltar que, a medida que el cilindro disminuye en tamaño, la deformación de la antena adoptará una forma cilíndrica, como se ilustra en la Fig. 3.6. Por otro lado, cuando el cilindro es extraordinariamente grande, la deformación de la antena será mínima, aproximándose a la linealidad. Esta relación entre la población y la deformación de la antena se logra mediante un cilindro con radio variable y se expresa acorde a la siguiente ecuación:

$$R = \frac{L * 360^\circ}{2\pi * \vartheta} \quad (3.3)$$

Donde,

L : Longitud física de la antena.

ϑ : Dimensión en forma angular de la antena, que puede variar $0^\circ < \vartheta \leq 360^\circ$.

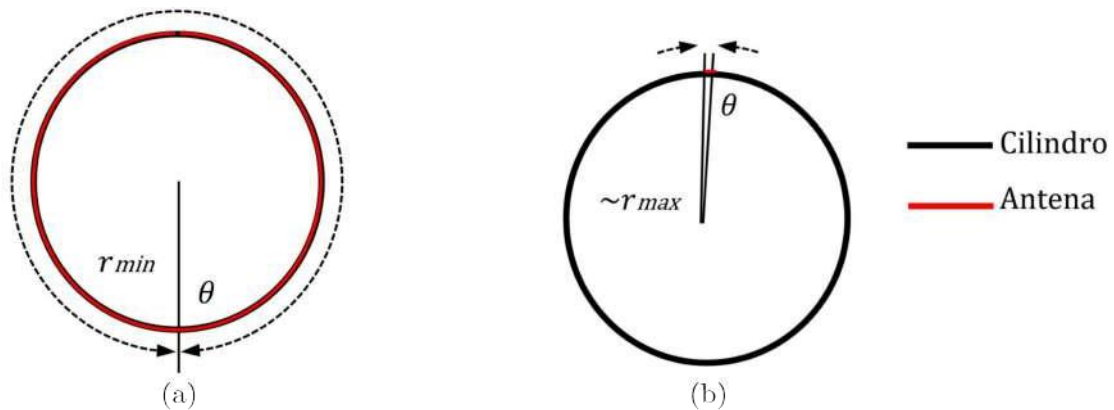


Figura. 3.6. Variación de flexibilidad de la antena. (a) Radio mínimo del cilindro con un valor angular de 360° , (b) Radio tiende al infinito con un valor angular muy cercano a 0° .

3.1.6 Operacionalización de Variables

Tabla 3.2. Operacionalización de variables.

Variables	Concepto	Indicadores	Insumos
Independiente			
Rango de flexibilidad	Variación de flexibilidad mediante un cilindro con incrementos de 10°	Ángulos: 0° a 360°	Cilindro con radios variables
Dependiente			
Parámetros de la antena flexible	Características y comportamiento de la Antena flexible	Ancho de banda Directividad	Simulador electromagnético CST Studio Suite Analizador de redes vectoriales (VNA)

3.2 Diseño y Fabricación

La antena propuesta presenta un diseño novedoso en forma de letra "e" cuadrada, operando a una frecuencia de 2.4 GHz. Esta innovadora estructura flexible permite mantener la discreción de la antena, como se aprecia en la Fig. 3.7

La estructura radiante se excita mediante una alimentación coplanar, la cual consiste en una línea central conductora delgada ubicada entre dos planos de tierra paralelos en el mismo sustrato dieléctrico, como se ilustra en la Fig. 3.7 (a). Para la simulación, se empleó el material Perfect Electric Conductor (PEC) en las partes conductoras de la antena, el cual se encuentra por defecto en la librería de CST Studio Suite.

En el diseño de la antena se empleó un sustrato textil de lycra. Para obtener las dimensiones de la antena propuesta, se definen parámetros de trabajo partiendo del sustrato textil y la frecuencia de trabajo, donde:

- Espesor $h = 0.675$ mm
- Permitividad dieléctrica $\epsilon_r = 1.50$
- Tangente de pérdidas $\tan \delta = 0.0093$
- Frecuencia de operación $f_0 = 2.4$ GHz

Una vez definidos los parámetros de los materiales a emplear, se utilizan las siguientes fórmulas para el análisis matemático:

Longitud de onda en el vacío:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3.4)$$

Permitividad efectiva aproximada:

$$\epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (3.5)$$

Longitud de onda guiada en el sustrato:

$$\lambda_g = \sqrt{\frac{\lambda_0}{\epsilon_{eff}}} \quad (3.6)$$

Longitud del parche (L_p):

$$L_T \approx \frac{\lambda_g}{2} \quad (3.7)$$

Ancho Total del Parche (W_p)

$$W_p \approx 0,8 \times L_T \quad (3.8)$$

Se considera una impedancia característica de 50 ohms, para encontrar el ancho (W_c) y el espaciado (S) de la línea coplanar (CPW) :

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8h}{W_c} + \frac{h}{S} \right) \quad (3.9)$$

Se presenta la estructura de la antena propuesta junto con sus variables dimensionales, como se muestra en la Fig. 3.7.

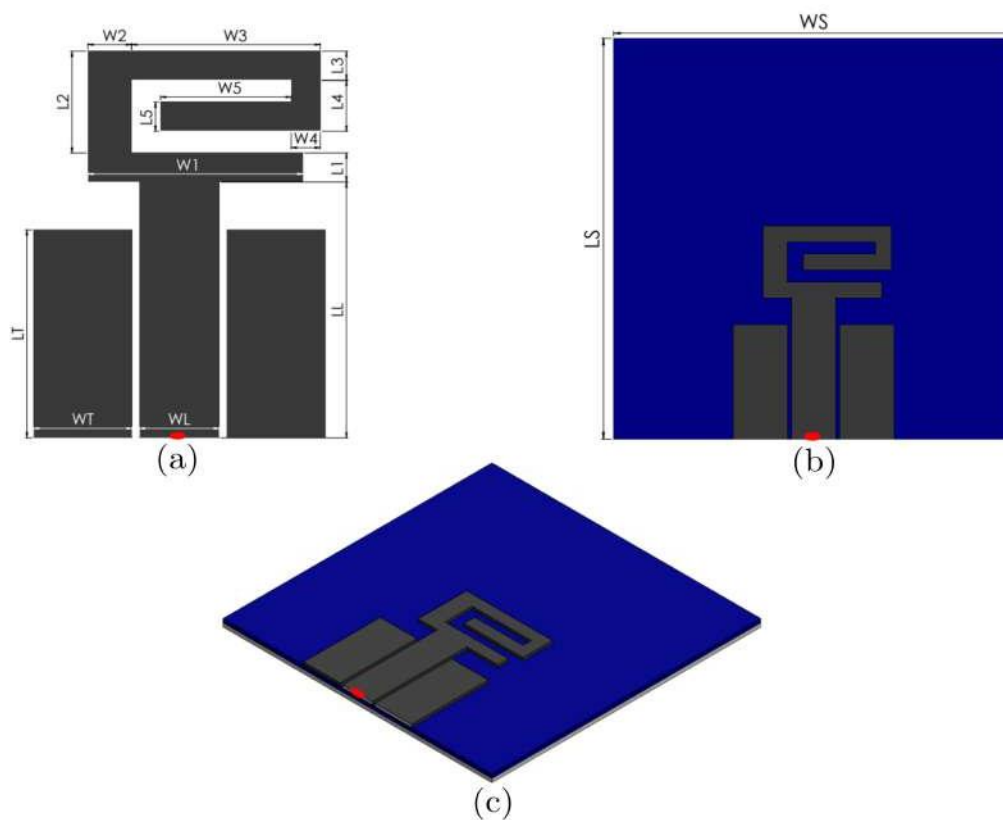


Figura. 3.7. Diseño de la antena propuesta, simulado en el software CST Studio Suite. (a) Estructura conductora, (b) Sustrato textil y (c) Vista en 3D de la antena textil.

En la Tabla 3.3 se proporciona información sobre las variables dimensionales y su equivalencia numérica. Estas variables son fundamentales para conocer los parámetros de funcionamiento de la antena (ganancia, directividad, eficiencia, ancho de banda, frecuencia central y acoplamiento máximo).

Tabla 3.3. Variables numéricas del diseño de la antena textil.

Variables de la Antena								
Variable	WT	LT	WL	LL	W1	L1	W2	L2
Valor (mm)	6.8	14.3	5.5	17.6	15	2	3	7
Variable	W3	L3	W4	L4	W5	L5	WS	LS
Valor (mm)	13	2	2	3.4	9	2	10	5

El radio del cilindro para generar flexibilidad en la antena se calcula con la ecuación 3.3. Este cálculo determina la curvatura necesaria para garantizar la flexibilidad de la antena. La precisión en el cálculo del radio es crucial para el diseño, ya que impacta la capacidad de la antena de adaptarse a superficies curvas o integrarse en aplicaciones que requieren flexibilidad.

La Fig. 3.8 se muestra la variación de la flexibilidad de la antena en un rango de 0° a 360° en incrementos de 10° . Esto implica que en cada ajuste de flexibilidad se genera una flexión de $\pm 5^\circ$, hacia ambos lados. Este fenómeno puede interpretarse con mayor claridad utilizando los cuadrantes III y IV del plano cartesiano, considerando el punto de alimentación de la antena como el centro. Esta representación permite visualizar de manera precisa cómo la antena se deforma alrededor de su eje central, facilitando el análisis de su comportamiento en diferentes orientaciones y su capacidad de adaptación a diversas formas y superficies.

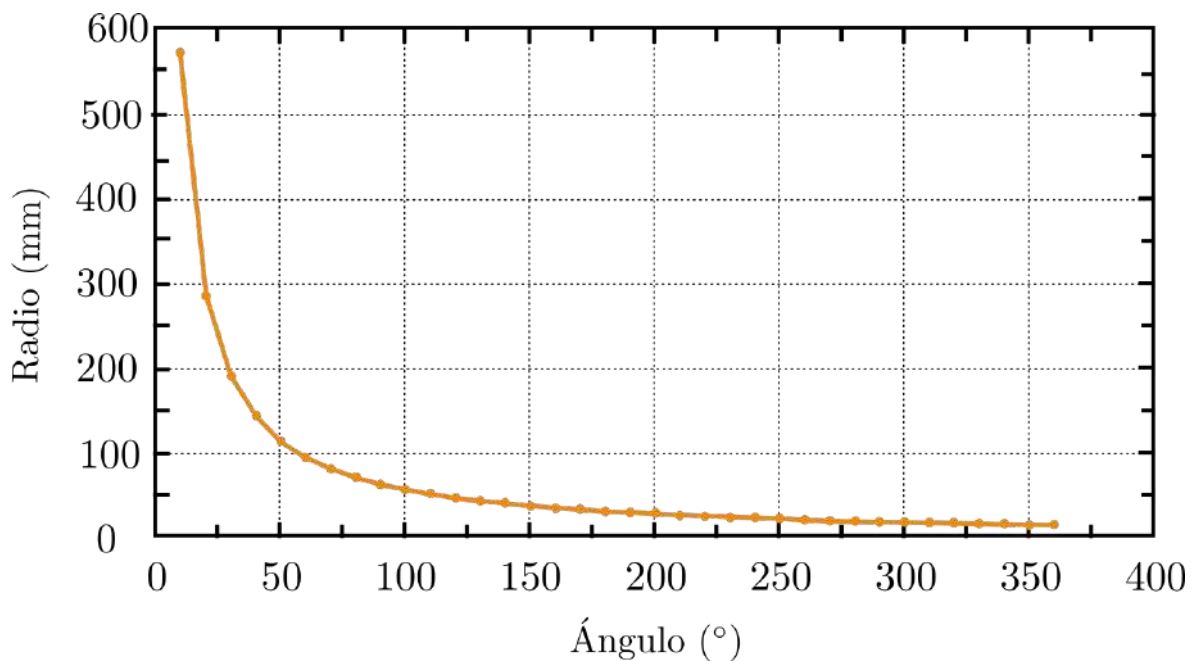


Figura. 3.8. Variación del radio del cilindro en relación con el ángulo de flexión de la antena.

En la Fig.3.9 se presenta la variación de flexibilidad de la antena en el software CST Studio Suite, permitiendo obtener una representación gráfica e interpretar su comportamiento una vez flexionada.

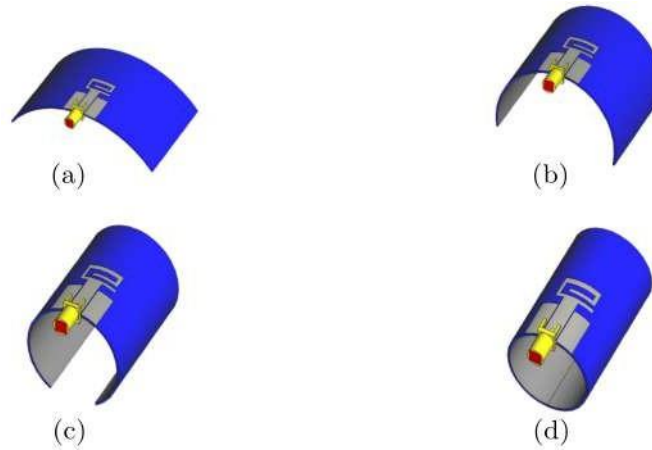


Figura. 3.9. Variación de la flexibilidad de las antenas textiles simuladas en el software CST Studio Suite a la frecuencia de 2.4 GHz. (a) Antena flexible a 100°, (b) Antena flexible a 200°, (c) Antena flexible a 300° y (d) Antena flexible a 360°.

Para la implementación se utilizan cuatro tipos de materiales conductores: Cobre, Plata, Bare Conductive y Buddy Paint. Se mantienen las mismas características utilizadas en la simulación para contrastar la respuesta de la antena en la implementación. En la Fig. 3.10 se muestran las antenas implementadas.

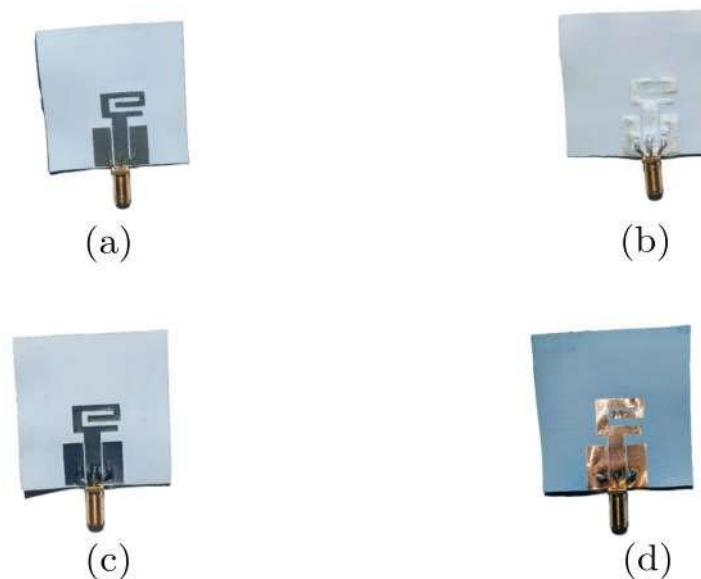


Figura. 3.10. Antenas textiles implementadas en sustrato de tela lycra. (a) Antena con tinta Buddy Paint, (b) Antena con tinta Plata, (c) Antena con tinta Bare Conductive y (d) Antena con cinta de Cobre.

La Fig. 3.11 muestra las antenas en cuatro diferentes ángulos de flexibilidad una vez implementadas. Esta variedad de configuraciones permite observar cómo las antenas se adaptan a distintas curvaturas y condiciones de uso práctico. Cada antena se sometió a 37 ángulo de flexibilidad, permitiendo evaluar su comportamiento.

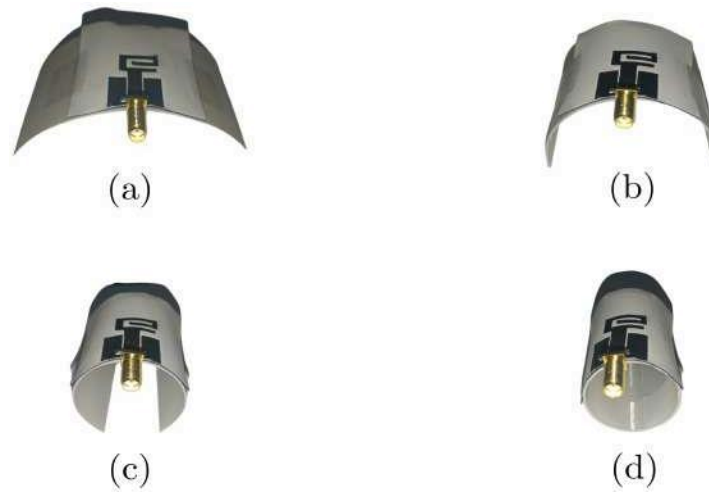


Figura. 3.11. Variación de flexibilidad de las antenas textiles implementadas. (a) Antena flexible a 100°, (b) Antena flexible a 200°, (c) Antena flexible a 300° y (d) Antena flexible a 360°.

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados y Discusiones

Se utilizó un Analizador de Redes Vectoriales para medir el funcionamiento de la antena. Este dispositivo permite analizar los parámetros S de los dispositivos implementados, facilitando la comparación entre las cuatro antenas fabricadas con variaciones en su material respecto a la simulación. La Fig. 4.12 ilustra estos resultados, proporcionando una visión clara de cómo las diferencias en el material afectan el rendimiento de las antenas en relación con las expectativas basadas en la simulación.

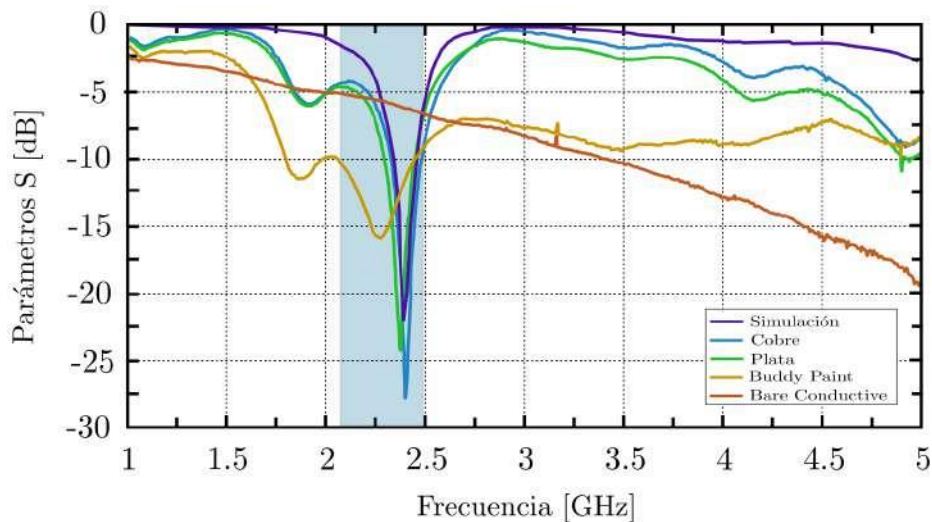


Figura. 4.12. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 0°.

Para determinar si las pérdidas por retorno son aceptables, se utiliza como criterio el parámetro S_{11} , debiendo ser este menor o igual a -10 dB, el cual se cumple satisfactoriamente en las antenas implementadas con cobre, Plata y Buddy Paint, así como en la simulación, pero no en la implementación con tinta Bare Conductive debido a su baja conductividad relativa. La antena simulada opera en el rango de 2.32 a 2.44 GHz, con un ancho de banda del 5.04 % y un acoplamiento máximo de -22.12 dB. En comparación, la antena de cobre cubre de 2.30 a 2.48 GHz, con un ancho de banda del 7.53 % y un acoplamiento máximo de -27.8 dB; la antena de Plata abarca de 2.24 a 2.40 GHz, con un ancho de banda del 6.89 % y un acoplamiento máximo de -24.02 dB; mientras que la antena de Buddy Paint cubre de 2.00 a 2.40 GHz, resultando en un ancho de banda del 18.18 % y un acoplamiento máximo de -16.01 dB.

De este modo, se observa que los cuatro prototipos exhiben un comportamiento similar en los parámetros S , con variaciones mínimas. La antena construida con cobre ofrece los mejores resultados. Al variar el material en la estructura de la antena, se detecta un desplazamiento en la frecuencia de resonancia, un aumento en el ancho de banda y una reducción en el acoplamiento máximo.

La alimentación de la antena desempeña un papel crucial en su rendimiento, ya que determina cómo se distribuye y radia la energía electromagnética. Una alimentación adecuada permite optimizar la eficiencia de radiación y el patrón de radiación, asegurando que la energía se transmita de manera efectiva en la dirección deseada. En la Fig. 4.13, se observa la distribución de la corriente en la antena a una frecuencia de 2.4 GHz. Una distribución uniforme y bien controlada de la corriente puede contribuir significativamente a una mejor directividad, ganancia y eficiencia de la antena.

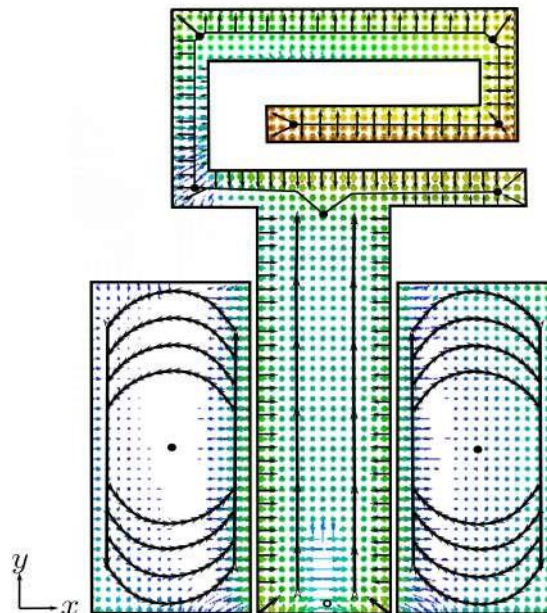


Figura. 4.13. Distribución de corrientes de la antena simulada a la frecuencia de 2.4 GHz en el software CST Studio Suite.

Es fundamental considerar que la ganancia y la directividad son parámetros cruciales que evalúan la capacidad de una antena para dirigir eficientemente la energía de la señal hacia una dirección específica. La directividad de una antena indica su capacidad de concentrar la radiación en una dirección particular, mientras que la ganancia representa la mejora en la intensidad de la señal en esa dirección en comparación con una antena de referencia isotrópica. En la Fig. 4.14 se presenta el diagrama de radiación de la antena a una frecuencia de resonancia de 2.4 GHz, obteniendo una directividad de 1.74 dBi y una ganancia de 1.48 dBi, destacando así su capacidad para focalizar y mejorar la señal en la dirección deseada.

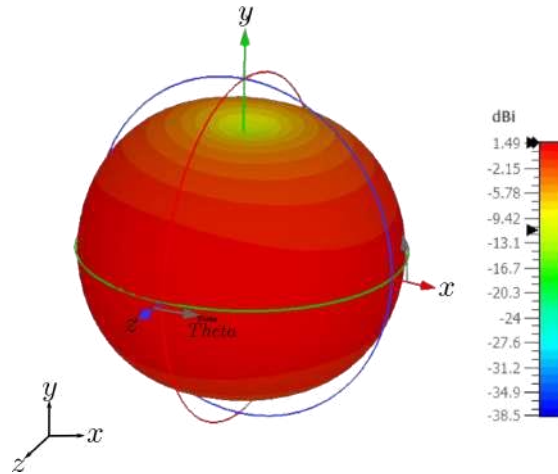


Figura. 4.14. Diagrama de radiación de la antena simulada a la frecuencia de 2.4 GHz en el software CST Studio Suite.

En la Tabla 4.4 se presenta un resumen comparativo entre la antena simulada y las antenas implementadas. Este resumen incluye parámetros clave como la frecuencia central, el acoplamiento máximo y el ancho de banda, proporcionando una visión clara de cómo se comporta la antena en términos de rendimiento y efectividad.

Tabla 4.4. Resumen de resultados.

	Simulación	Cobre	Plata	Buddy Paint
Frecuencia Central (GHz)	2.4	2.4	2.38	2.28
Acoplamiento Máximo (dB)	-22.12	-27.80	-24.02	-16.01
Ancho de Banda (%)	5.04	7.53	6.89	18.18

Al variar la flexibilidad de la antena en un rango de 0° a 360° con incrementos de 10°, se observaron resultados significativos en los ángulos 100°, 200°, 300°, y 360°. Estos resultados destacan cómo la variación angular afecta el rendimiento de la antena, proporcionando datos clave sobre el ancho de banda y el acoplamiento máximo en estas posiciones específicas.

Los resultados, con una flexibilidad de 100° para la antena simulada muestran un rango de operación de 2.26 a 2.38 GHz, con un ancho de banda del 5.17 % y un acoplamiento máximo de -22.97 dB. En comparación, la antena de cobre cubre de 2.22 a 2.38 GHz, con un ancho de banda del 6.95 % y un acoplamiento máximo de -19.13 dB; la antena de Plata abarca de 2.21 a 2.34 GHz, con un ancho de banda del 5.71 % y un acoplamiento máximo de -14.99 dB; mientras que la antena de Buddy Paint cubre de 1.67 a 2.33 GHz, con un ancho de banda del 33 % y un acoplamiento máximo de -17.83 dB. Además, se aprecia una resonancia de 2.85 GHz, que no se incluye en el análisis debido a que presenta un desplazamiento mayor al deseado, como se puede apreciar en la Fig. 4.15

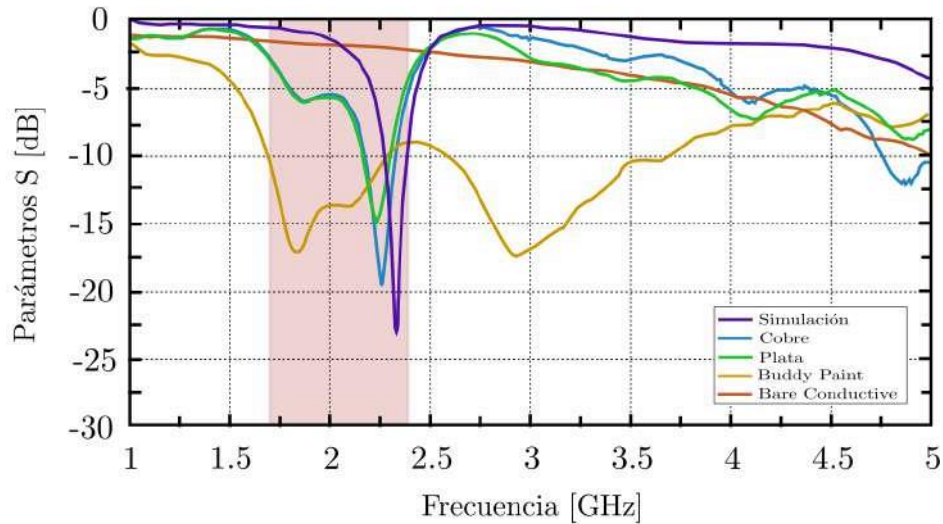


Figura. 4.15. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 100° .

Con una flexibilidad de 200° , la antena simulada opera en el rango de 2.28 a 2.4 GHz, con un ancho de banda del 5.12 % y un acoplamiento máximo de -22.78 dB. Comparativamente, la antena de cobre abarca de 2.21 a 2.36 GHz, con un ancho de banda del 6.56 % y un acoplamiento máximo de -20.75 dB; la antena de Plata se extiende de 2.21 a 2.33 GHz, ofreciendo un ancho de banda del 5.28 % y un acoplamiento máximo de -14.77 dB; mientras que la antena de Buddy Paint cubre de 1.65 a 2.31 GHz, logrando un ancho de banda del 33.33 % y un acoplamiento máximo de -17.57 dB. Además, se observa una resonancia superior a 2.85 GHz, la cual no se considera en el análisis debido a un desplazamiento mayor al deseado, como se muestra en la Fig. 4.16

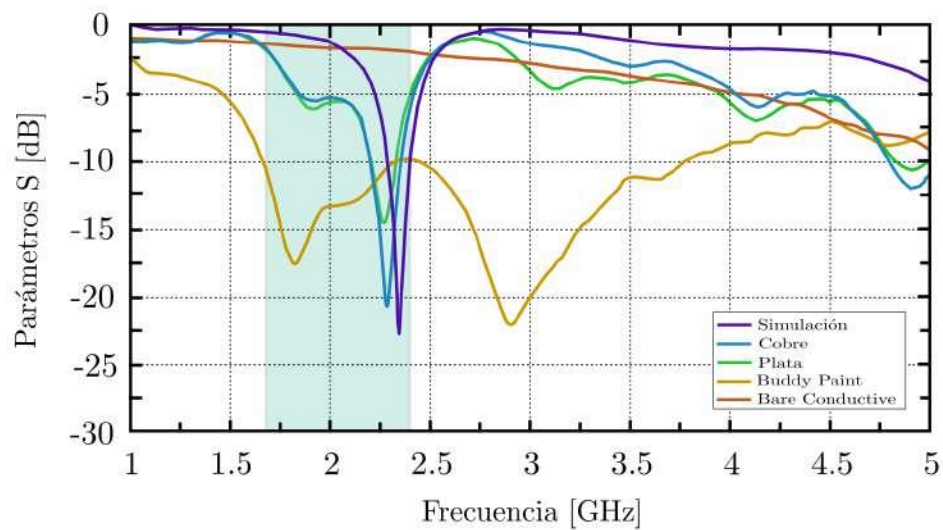


Figura. 4.16. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 200° .

Con una flexibilidad de 300° , la antena simulada opera en el rango de 2.29 a 2.39 GHz, logrando un ancho de banda del 4.27 % y un acoplamiento máximo de -19.18 dB. En comparación, la antena de cobre cubre de 2.24 a 2.42 GHz, con un ancho de banda del 7.73 % y un acoplamiento máximo de -23.37 dB; la antena de Plata abarca de 2.22 a 2.35 GHz, con un ancho de banda del 5.68 % y un acoplamiento máximo de -14.56 dB; mientras que la antena de Buddy Paint cubre de 1.75 a 2.34 GHz, obteniendo un ancho de banda del 28.85 % y un acoplamiento máximo de -13.24 dB. Además, se aprecia una resonancia de 2.3 GHz, que no se incluye en el análisis debido a que presenta un desplazamiento mayor al deseado, como se ilustra en la Fig. 4.17

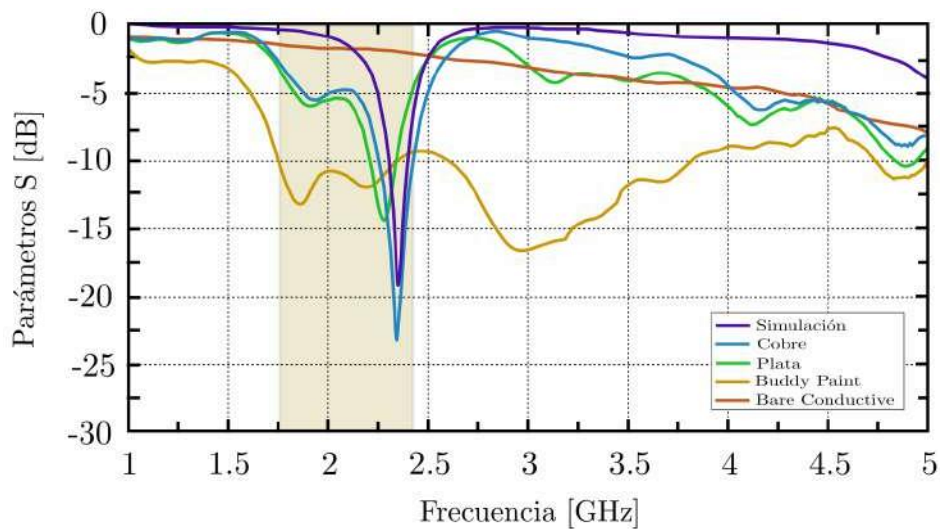


Figura. 4.17. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 300° .

A una flexibilidad de 360° , la antena simulada opera entre 2.29 y 2.4 GHz, con un ancho de banda del 4.69 % y un acoplamiento máximo de -24.24 dB. Por otro lado, la antena de cobre abarca de 2.26 a 2.43 GHz, logrando un ancho de banda del 7.25 % y un acoplamiento máximo de -19.97 dB; la antena de Plata cubre de 2.25 a 2.39 GHz, con un ancho de banda del 6.03 % y un acoplamiento máximo de -15.27 dB; mientras que la antena de Buddy Paint se extiende de 1.74 a 2.29 GHz, alcanzando un ancho de banda del 27.29 % y un acoplamiento máximo de -12.66 dB. Además, se aprecia una resonancia de 3.24 GHz, que no se incluye en el análisis debido a que presenta un desplazamiento mayor al deseado, como se muestra en la Fig. 4.18

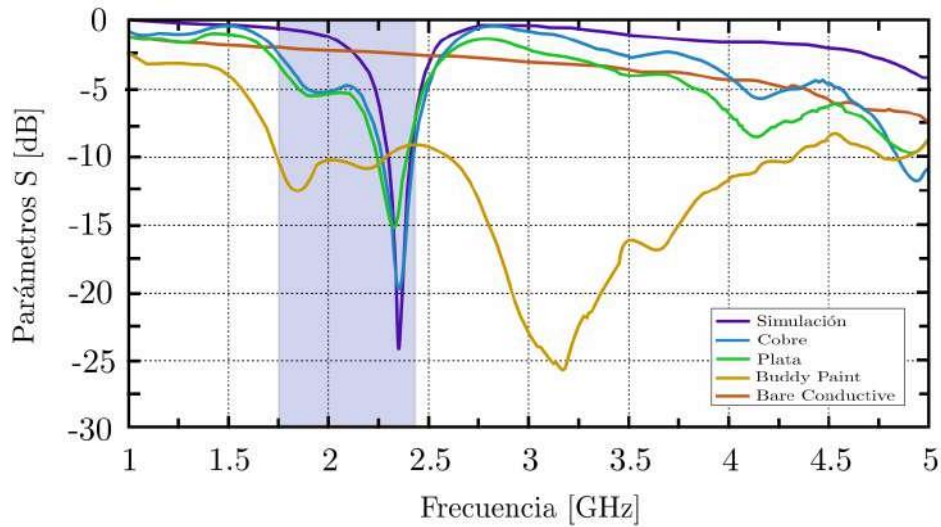


Figura. 4.18. Ancho de banda, coeficiente de reflexión de las antenas, medido con un Analizador de Redes Vectoriales y simulado en el software CST Studio Suite, a 360°.

4.2 Análisis comparativo entre la antena flexible propuesta en simulación y la antena flexible implementada

A continuación se presenta un análisis comparativo de los resultados de ancho de banda y directividad de la antena flexible propuesta en simulación, contrastándolos con los obtenidos en su implementación. Los datos fueron obtenidos al variar la flexibilidad de la antena tanto en la simulación como en la implementación.

4.2.1 Prueba de normalidad

Hipótesis:

H_0 : Los datos de ancho de banda de las antenas siguen una distribución normal

H_a : Los datos de ancho de banda de las antenas no siguen una distribución normal

Estadístico de las distribuciones:

Shapiro-Wilk si $n \leq 50$

Lilliefors si $n > 50$

Zona de rechazo:

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

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

Utilizando el software estadístico R Commander, se llevo a cabo las pruebas de normalidad por grupos. Dado que el tamaño de la población en cada caso es $n = 37$, se utilizó el test de normalidad de Shapiro-Wilk.

Tabla 4.5. Resultados del test de Shapiro-Wilk para el ancho de banda.

Test de Shapiro-Wilk			
Ancho de Banda	Material	Estadístico (W)	P-valor
	Simulación	0.86294	0.0003202
	Buddy Paint	0.86726	0.0004087
	Cobre	0.8757	0.0006655
	Plata	0.96226	0.235

En la Tabla 4.5, se observa que los anchos de banda de las antenas simuladas y medidas con diferentes materiales muestran un p-valor inferior a 0.05 en los casos de simulación, Buddy Paint y cobre. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, indicando que los datos de ancho de banda de estas antenas no siguen una distribución normal. En cambio, para el material Plata, el p-valor es superior a 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula; es decir, los datos de ancho de banda de la antena fabricada con Plata siguen una distribución normal.

Para abordar la falta de normalidad en las antenas fabricadas, como se muestra en la Fig. 4.19, se aplicó un test de Kruskal-Wallis. Este test es adecuado para comparar tres o más grupos independientes, en este caso, las antenas fabricadas con Buddy Paint, cobre y la simulada.

Hipótesis:

H_0 : La distribución de anchos de banda es la misma entre las antenas fabricadas con distintos materiales.

H_a : La distribución de anchos de banda no es la misma entre las antenas fabricadas con distintos materiales.

Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, al realizar el test de Kruskal-Wallis para muestras independientes se obtuvieron los siguientes resultados: el estadístico fue de 176.8 con 4 grados de libertad, y un p-valor igual a 2.2×10^{-16} . Dado que el p-valor es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Por lo tanto, se puede concluir con un 95 %

de confianza que la distribución de anchos de banda no es la misma entre las antenas fabricadas con distintos materiales.

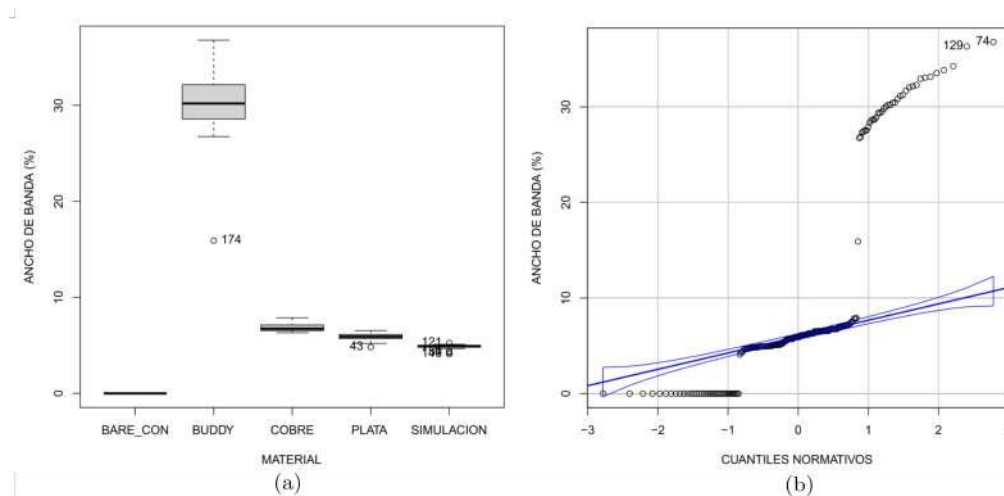


Figura. 4.19. Resultados estadísticos para evaluar la normalidad de los datos de ancho de banda utilizando el software R Commander. (a) Diagrama de cajas y (b) Normalidad de muestras

4.2.2 Análisis de ancho de banda vs flexibilidad

Hipótesis:

H_0 : Los datos del ancho de banda de la antena, relacionada con su flexibilidad siguen una distribución normal.

H_a : Los datos del ancho de banda de la antena, relacionada con su flexibilidad no siguen una distribución normal.

Se utilizó el Test de Shapiro-Wilk debido a que los datos eran inferiores a 50. Con un p-valor igual a 0.0003202, el cual es menor que 0.05, se concluye que los datos del ancho de banda de la antena, relacionados con su flexibilidad, no siguen una distribución normal. Por consiguiente, se optó por emplear un test no paramétrico test de Wilcoxon.

Hipótesis:

H_0 : El ancho de banda difiere de 4.95 %.

H_a : El ancho de banda no difiere de 4.95 %.

Con un estadístico de Wilcoxon de 276 y un p-valor igual a 0.2577, el cual es mayor que 0.05, se concluye que se acepta la hipótesis nula. Esto indica que, con un 95 % de confianza, al menos uno de los valores de ancho de banda difiere significativamente del ancho de banda medio de 4.95 %.

4.2.3 Análisis de ancho de directividad vs flexibilidad

Hipótesis:

H_0 : Los datos de directividad de la antena, relacionada con su flexibilidad siguen una distribución normal.

H_a : Los datos de directividad de la antena, relacionada con su flexibilidad no siguen una distribución normal.

Utilizando el Test de Shapiro-Wilk debido al tamaño de la muestra inferior a 50, se obtuvo un valor de p-valor, el cual es menor que 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que los datos de directividad de la antena, en relación con su flexibilidad, no siguen una distribución normal. Por lo tanto, se procede a emplear un test no paramétrico, test de Wilcoxon.

Hipótesis:

H_0 : No se presenta una diferencia significativa correspondiente al diagrama de radiación en el parámetro de directividad al 95 % de confianza.

H_a : Se presenta una diferencia significativa correspondiente al diagrama de radiación en el parámetro de directividad al 95 % de confianza.

Con un estadístico de Wilcoxon de 388 y un p-valor de 0.3915, el cual supera el nivel de significancia de 0.05, se acepta la hipótesis nula. Esto indica que no se observa una diferencia significativa en el parámetro de directividad del diagrama de radiación al 95 % de confianza.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

En el presente estudio se ha diseñado e implementado una antena flexible de tipo microstrip con alimentación coplanar, operando en la banda inferior de Wi-Fi. La antena se distingue por su diseño innovador en forma de e , lo que facilita su integración en prendas deportivas, específicamente en camisetas. La alimentación coplanar utilizada en este diseño permite una integración efectiva, resultando en menores pérdidas por radiación y un mejor acoplamiento de impedancia. Además, esta configuración contribuye a la reducción de interferencias, optimizando así su desempeño en aplicaciones inalámbricas portátiles.

Para la implementación de la antena, se utilizó tela de lycra como sustrato base. Sobre esta tela se colocó una lámina de vinil textil con el fin de lograr una distribución homogénea de las tintas conductoras empleadas. Esta técnica asegura una adherencia efectiva de los materiales conductores a la prenda de vestir. Así, es posible simular la antena como un logotipo de patrocinadores dentro de la vestimenta deportiva, integrando funcionalidad tecnológica sin comprometer el diseño.

Se analizaron los parámetros S de la antena flexible en un estado sin restricciones de flexibilidad, manteniéndola únicamente en el aire. En esta condición, la antena presentó una frecuencia de resonancia de 2.4 GHz. Al variar el material, se produjo un desplazamiento en frecuencia hacia valores inferiores. Además, el ancho de banda mostró una mejora significativa en cada implementación, lo que sugiere que el material influye positivamente en la optimización de la respuesta de la antena en este contexto.

Finalmente, al analizar el comportamiento de la antena, se observó un leve desplazamiento en sus parámetros S en todas las implementaciones. Estadísticamente, este fenómeno sugiere que las variaciones en los parámetros de ancho de banda, directividad y frecuencia no son significativas. Es crucial destacar que este análisis consideró la flexibilidad de la antena, evaluada mediante su adaptación a cilindros con radios variables.

Esta evaluación de la antena flexible, realizada bajo diversas condiciones de curvatura, demuestra que la integridad funcional de la antena se mantiene estable a pesar de las deformaciones inducidas por el cilindro. La capacidad de la antena para conservar un rendimiento consistente en términos de resonancia y otros parámetros clave bajo estas condiciones refuerza su viabilidad para aplicaciones en prendas de vestir y otras superficies flexibles. Esta adaptabilidad sugiere un potencial significativo para la integración de la antena en tecnologías vestibles.

5.2 Recomendaciones

Realizar un estudio exhaustivo del material bibliográfico relevante para conocer a fondo el área de investigación. Este proceso implica la revisión sistemática y detallada de la literatura existente, que permite identificar las tendencias actuales en el campo de estudio. Al comprender mejor el panorama teórico y práctico, se facilita la orientación de la investigación hacia vías que puedan ofrecer mayor impacto y relevancia.

Para desarrollar una antena, es crucial definir claramente los materiales que se emplearán, como el sustrato y el material conductor, junto con sus características numéricas detalladas. Este procedimiento requiere una selección cuidadosa basada en propiedades como la constante dieléctrica, la tangente de pérdidas y la conductividad. Asimismo, es indispensable establecer los parámetros físicos y eléctricos de estos materiales, ya que son esenciales para realizar el análisis matemático necesario para determinar las dimensiones óptimas de la antena.

Manejar con precaución el proceso de soldadura, es fundamental para asegurar una correcta alimentación de la antena. En este caso, se utilizó estaño en crema, junto con una pistola de calor y un cautín con puntas adecuadas para el tamaño de la soldadura. Es esencial poder controlar la temperatura en ambos equipos, ya que esto ayuda a prevenir daños en el sustrato textil.

Para la integración final de la antena flexible en la camiseta, se recomienda emplear métodos adecuados para la impregnación. Entre los métodos sugeridos se encuentran la serigrafía y la dispersión por aerógrafo. Ambos permiten un control preciso del flujo de tinta, garantizando una aplicación uniforme. Además, estos métodos son rentables, lo que facilita su implementación sin incurrir en altos costos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. S. Meena, S. B. Choi, S.-B. Jung y J.-W. Kim, “Electronic textiles: New age of wearable technology for healthcare and fitness solutions,” *Materials Today Bio*, pág. 100 565, 2023.
- [2] U. Hasni, M. E. Piper, J. Lundquist y E. Topsakal, “Screen-printed fabric antennas for wearable applications,” *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, 591-598, 2021.
- [3] G.-P. Gao, B. Hu, S.-F. Wang y C. Yang, “Wearable circular ring slot antenna with EBG structure for wireless body area network,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, n.º 3, págs. 434-437, 2018.
- [4] P. F. Silva Junior, E. E. Santana, M. S. Pinto et al., “Flexible wearable pre-fractal antennas for personal high-temperature monitoring,” *Wireless Personal Communications*, vol. 114, págs. 1983-1998, 2020.
- [5] M. El Gharbi, R. Fernández-García, S. Ahyoud e I. Gil, “A review of flexible wearable antenna sensors: design, fabrication methods, and applications,” *Materials*, vol. 13, n.º 17, pág. 3781, 2020.
- [6] K. N. Paracha, S. K. A. Rahim, P. J. Soh y M. Khalily, “Wearable Antennas: A Review of Innovative Materials, Structures and Features for Autonomous Communication and Sensing,” *IEEE Access*, vol. 7, IEEE, ed., págs. 56 694-56 712, 2019.
- [7] S. G. Kirtania, A. W. Elger, M. R. Hasan et al., “Flexible antennas: A review,” *Micromachines*, vol. 11, n.º 9, pág. 847, 2020.
- [8] Y.-S. Chen y 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, págs. 1144-1147, 2015.
- [9] G.-P. Gao, B.-K. Zhang, J.-H. Dong, Z.-H. Dou, Z.-Q. Yu y B. Hu, “A compact dual-mode pattern-reconfigurable wearable antenna for the 2.4-GHz WBAN application,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, n.º 2, págs. 1901-1906, 2022.

- [10] V. K. Singh, S. Dhupkariya y N. Bangari, “Wearable ultra wide dual band flexible textile antenna for WiMax/WLAN application,” *Wireless Personal Communications*, vol. 95, n.º 2, págs. 1075-1086, 2017.
- [11] U. Musa, S. M. Shah, H. A. Majid et al., “Design and analysis of a compact dual-band wearable antenna for WBAN applications,” *IEEE Access*, vol. 11, págs. 30 996-31 009, 2023.
- [12] M. El Gharbi, M. Martinez-Estrada, R. Fernández-García, S. Ahyoud e I. Gil, “A novel ultra-wide band wearable antenna under different bending conditions for electronic-textile applications,” *The journal of the Textile Institute*, vol. 112, n.º 3, págs. 437-443, 2021.
- [13] N. N. Mendoza y R. G. Merchán, “Thick layer polymeric inks,” *Eurofach electronica: News and technology of the electronic industry*, n.º 290, págs. 58-62, 2020.
- [14] L. Liu, X. Zhang, H. Ma y Z. Shen, “CuCl₂-doped graphene-based screen printing conductive inks,” *Science China Materials*, vol. 65, n.º 7, págs. 1890-1901, 2022.
- [15] E. E. Moran Villamar, “Comparative analysis of 2.4 GHZ and 5GHZ Wi-Fi networks for the transmission of data and information.,” BS thesis, Babahoyo: UTB-FAFI, 2023.
- [16] R. C. Franco Herrera, “Technological and social factors that affect the implementation of 5G technology in the Ecuadorian context,” BS thesis, 2023.
- [17] D. Wen, Y. Hao, M. O. Munoz, H. Wang y 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, n.º 1, págs. 96-104, 2017.
- [18] P. Rodríguez, E. Mancha Sánchez, A. Bravo, C. Nuevo-Gallardo, I. Tejado y B. M. Vinagre, “Fabricación de microrrobots: MEMSLAB de la Universidad de Extremadura,” en *XLII Jornadas de Automática*, Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, 2021, págs. 160-167.
- [19] F.-J. Martín-Bayona, M. Pérez-Escribano, E. Márquez-Segura et al., “Desarrollo de antena espiral con alimentación lateral realizada mediante fabricación aditiva,” 2022.

- [20] M. U. Ali Khan, R. Raad, F. Tubbal, P. I. Theoharis, S. Liu y J. Foroughi, “Bending analysis of polymer-based flexible antennas for wearable, general IoT applications: A review,” *Polymers*, vol. 13, n.º 3, pág. 357, 2021.
- [21] J. L. Ordóñez, “Dispositivos y tecnologías wearables,” *ACTA. Recuperado de: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu/documents/56040178/FundamentosWearables.pdf>*, 2016.
- [22] A. Afyf, A. Elouerghi, M. Afyf, M. A. Sennouni y L. Bellarbi, “Flexible wearable antenna for body centric wireless communication in S-band,” en *2020 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, IEEE, 2020, págs. 1-4.
- [23] R. Li, L. Wang y L. Yin, “Materials and devices for biodegradable and soft biomedical electronics,” *Materials*, vol. 11, n.º 11, pág. 2108, 2018.
- [24] S. de Souza Godino, “Revisión sistemática sobre la tecnología de prendas y accesorios inteligentes para las personas con discapacidad.” *Perspectivas Metodológicas*, vol. 21, 2021.
- [25] A. Machado, R. Veras, K. Aires y L. d. S. B. Neto, “A systematic review on product recognition for aiding visually impaired people,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, n.º 4, págs. 592-603, 2021.
- [26] D. Son y Z. Bao, “Nanomaterials in skin-inspired electronics: Toward soft and robust skin-like electronic nanosystems,” *ACS nano*, vol. 12, n.º 12, págs. 11 731-11 739, 2018.
- [27] A. Afyf, A. Elouerghi, M. Afyf, M. A. Sennouni y L. Bellarbi, “Flexible Wearable Antenna for Body Centric Wireless Communication in S-Band,” en *2020 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, 2020, págs. 1-4.
- [28] B. E. Nasimba Anchapaxi, “Implementación de e-textile systems aimed at the health care of the elderly: Implementación de un e-textile system aimed at monitoring heart rate of the older adult.” BS thesis, Quito: EPN, 2023.
- [29] S. N. Mahmood, A. J. Ishak, T. Saeidi et al., “Recent advances in wearable antenna technologies: A review,” *progress in Electromagnetics Research B*, vol. 89, págs. 1-27, 2020.

- [30] K. Y. Chau, M. H. S. Lam, M. L. Cheung et al., “Smart technology for healthcare: Exploring the antecedents of adoption intention of healthcare wearable technology,” *Health psychology research*, vol. 7, n.º 1, 2019.
- [31] M. Wu y J. Luo, “Wearable technology applications in healthcare: a literature review,” *Online J. Nurs. Inform*, vol. 23, n.º 3, 2019.
- [32] N. Atanasov, G. Atanasova y B. Atanasov, “Wearable textile antennas with high body-antenna isolation: design, fabrication, and characterization aspects,” en *Modern printed-circuit antennas*, IntechOpen, 2020, págs. 1-19.
- [33] M. H. Mahfuz, M. R. Islam, C.-W. Park et al., “Wearable textile patch antenna: Challenges and future directions,” *IEEE Access*, vol. 10, págs. 38 406-38 427, 2022.
- [34] G. L. Atanasova, B. N. Atanasov y N. T. Atanasov, “Fully textile dual-band logo antenna for IoT wearable devices,” *Sensors*, vol. 22, n.º 12, pág. 4516, 2022.
- [35] B. Almohammed, A. Ismail y A. Sali, “Electro-textile wearable antennas in wireless body area networks: Materials, antenna design, manufacturing techniques, and human body consideration - A review,” *Textile Research Journal*, vol. 91, n.º 5-6, págs. 646-663, 2021.
- [36] K. N. Paracha, S. K. A. Rahim, P. J. Soh y M. Khalily, “Wearable antennas: A review of materials, structures, and innovative features for autonomous communication and sensing,” *IEEE Access*, vol. 7, págs. 56 694-56 712, 2019.
- [37] M. U. Raza, Z. Zhang, T. Liu, M. U. Shoukat, A. Niaz y K. Luo, “Flexible Monopole Antenna for IoT Applications: A Survey,” en *2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2021, págs. 2154-2159.
- [38] S. Dobir Hossain, A. Arif, B. Lohani y R. C. Roberts, “Flexible EGeIn Liquid Metal Microstrip Patch Antenna Based Pressure Sensor,” en *2021 IEEE Sensors*, 2021, págs. 1-4.
- [39] J. M. Jornet e I. F. Akyildiz, “Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, n.º 10, págs. 3211-3221, 2011.

- [40] C. R. Peñafiel-Ojeda, A. Ortíz-Cruz, G. Tubón-Usca et al., “Antena Textil para Aplicaciones de Internet de las Cosas Analizada con la Teoría de Modos Característicos,” *Tesla Revista Científica*, vol. 3, n.º 2, e180-e180, 2023.
- [41] B. Fady, A. Tribak, J. Terhzaz y F. Riouch, “Novel low-cost integrated multiband antenna design customized for smartwatch applications with SAR evaluation,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2020, págs. 1-14, 2020.
- [42] M. A. Monne, X. Lan, M. Y. Chen et al., “Material selection and fabrication processes for flexible conformal antennas,” *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018.
- [43] C. González Marco, “Design of flexible antennas for biometric circuits that can be integrated into clothing.,” 2023.
- [44] S. Kassim, H. Rahim, P. Soh et al., “Flexible Co-planar waveguide (CPW)-Fed Y-shaped patch UWB antenna for off-body communication,” en *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, vol. 1464, 2020, pág. 012 058.
- [45] S. Varma, S. Sharma, M. John, R. Bharadwaj, A. Dhawan y S. K. Koul, “Design and performance analysis of compact wearable textile antennas for IoT and body-centric communication applications,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2021, págs. 1-12, 2021.
- [46] S. M. Ali, C. Sovuthy, M. A. Imran, S. Socheatra, Q. H. Abbasi y Z. Z. Abidin, “Recent advances of wearable antennas in materials, fabrication methods, designs, and their applications: State-of-the-art,” *Micromachines*, vol. 11, n.º 10, pág. 888, 2020.
- [47] C. Hertleer, A. Van Laere, H. Rogier y L. Van Langenhove, “Influence of relative humidity on textile antenna performance,” *Textile Research Journal*, vol. 80, n.º 2, págs. 177-183, 2010.
- [48] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, 2016.
- [49] J. I. Trujillo-Flores, R. Torrealba-Meléndez, J. M. Muñoz-Pacheco et al., “CPW-fed transparent antenna for vehicle communications,” *Applied Sciences*, vol. 10, n.º 17, pág. 6001, 2020.

- [50] L. Yang, T. Mo y H. Li, “Research on V2V communication based on peer to peer network,” en *2018 International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)*, IEEE, 2018, págs. 105-110.
- [51] A. Tsolis, S. Bakogianni, C. Angelaki y A. A. Alexandridis, “A review of clothing components in the development of wearable textile antennas: design and experimental procedure,” *Sensors*, vol. 23, n.º 6, pág. 3289, 2023.
- [52] L. Gimeno Villodre, “Diseño de antenas-sensor wearable para monitorización de respiración,” 2024.
- [53] E. B. Steen-Olsen, H. Pappot, A. Green, H. Langberg y C. Holländer-Mieritz, “Feasibility of monitoring patients who have cancer with a smart t-shirt: protocol for the OncoSmartShirt study,” *JMIR research protocols*, vol. 11, n.º 10, e37626, 2022.
- [54] M. M. Aucancela Yanchaguano y K. F. Haro Ushiña, “Análisis comparativo de los parámetros de dispersión de una antena tipo patch dipolo media onda y antena tipo hilo dipolo media onda en la frecuencia de resonancia de 60Ghz,” B.S. thesis, 2023.
- [55] T. P. I. M. Band, “Flexible antennas and their performanceño in communications systems in the microwave band,” *Paúl Baldeón Egas, Grisel Pérez, Julio C. Riascos, Brigitte González, Eduardo José Campechano , Bertha Ulloa Rubio, Ruth Elena Cuasialpud, Cristian Samir Ulloa and Jonnathan Opazo Hernández-Ecuador: Editorial UISRAEL, August 2021. 284 pages; 21.0 x 29.7cm. Digital book-PDF*, pág. 29, 2021.
- [56] S. Vived Sánchez, “Diseño de antenas wearable de banda estrecha,” 2023.
- [57] S. F. Loarte Albornoz, G. S. Vargas Guerrero y J. E. Marcial Párraga, “Production, export and marketing of cotton T-shirts for women in Florida, USA,” 2022.
- [58] G. Solà y Sabaté, “Modelado de circuitos multimodales en entornos microstrip,” 2014.
- [59] R. J. Espinosa Chavarrea y R. M. Suntaxi Gualutuña, “Evaluationón performance parametersámetros of a microstrip antenna with a flexible substrate within the ISM band,” BS thesis, 2024.
- [60] J. M. Nieto Escribano, “Design of a patch antenna array with serial feed at 60GHz,” 2018.

- [61] Á. Vargas de Lucas, “Diseño y análisis de prestaciones de antenas microstrip para sistemas GPS,” 2021.
- [62] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [63] B. A. Forouzan, *Data communications and networking*. Huga Media, 2007.
- [64] C. R. Peñafiel-Ojeda, C. E. Andrade, R. Baez-Egas y V. Garcia-Santos, “An Ultrawideband Printed Monopole Antenna Analyzed with the Theory of Characteristic Modes,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, n.º 6, págs. 948-954, 2022.
- [65] G. Maroli, F. Palumbo, M. A. Volpe et al., “Comportamiento del secado de tintas de plata para electrónica impresa,” *AJEA*, n.º 5, 2020.