



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

DISEÑO DE UNA ANTENA TEXTIL TIPO LOGOTIPO PARA
APLICACIONES DEL INTERNET DE LAS COSAS EN EL RANGO DE
FRECUENCIAS MEDIAS

Trabajo de Titulación para optar al título de
Ingeniero en Telecomunicaciones

Autor:

Ortiz Cruz, Andrés Josué

Tutor:

Ph.D. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda

Riobamba, Ecuador. 2022

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Andrés Josué Ortiz Cruz, con cédula de ciudadanía 060494354-8, autor del trabajo de investigación titulado: DISEÑO DE UNA ANTENA TEXTIL TIPO LOGOTIPO PARA APLICACIONES DEL INTERNET DE LAS COSAS EN EL RANGO DE FRECUENCIAS MEDIAS, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, 02 de diciembre de 2022.



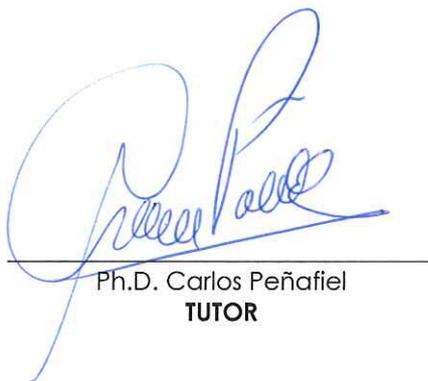
Andrés Josué Ortiz Cruz

C.I: 060494354-8



ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 28 días del mes de octubre de 2022, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante Andrés Josué Ortiz Cruz con CC: 060494354-8, de la carrera Ingeniería en Telecomunicaciones y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado “**Diseño de una Antena Textil Tipo Logotipo Para Aplicaciones del Internet de las Cosas en el Rango de Frecuencias Medias**”, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Ph.D. Carlos Peñafiel
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación DISEÑO DE UNA ANTENA TEXTIL TIPO LOGOTIPO PARA APLICACIONES DEL INTERNET DE LAS COSAS EN EL RANGO DE FRECUENCIAS MEDIAS, presentado por Andrés Josué Ortiz Cruz, con cédula de identidad número 060494354-8, bajo la tutoría de Dr. 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 02 de diciembre de 2022.

Franklin Samaniego, PhD.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



FIRMA

Luis Tello, PhD.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



FIRMA

Klever Torres, Mgs.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



FIRMA



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.15
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **Ortiz Cruz Andrés Josué** con CC: **060494354-8**, estudiante de la Carrera **Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**DISEÑO DE UNA ANTENA TEXTIL TIPO LOGOTIPO PARA APLICACIONES DEL INTERNET DE LAS COSAS EN EL RANGO DE FRECUENCIAS MEDIAS**", cumple con el **8 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 24 de noviembre de 2022.



PhD Carlos Peñafiel Ojeda
TUTOR

DEDICATORIA

Dedicado a Dios y a mi familia

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, especialmente a mi madre, por su apoyo y comprensión a lo largo de mi formación profesional.

A mi tutor de tesis, Ph.D. Carlos Peñafiel, por su amistad y ayuda académica que permitió la culminación de este trabajo de investigación.

Un agradecimiento a las personas que me apoyaron de una u otra manera en este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO I	16
1.1. Antecedentes	16
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
2.2.1. Antenas	22
2.2.2. Antenas Microstrip	22
2.2.2.1. Antenas Textiles	23
2.2.2.2. Técnicas de Alimentación	25
2.2.3. Parámetros de la Antena	26
2.2.3.1. Impedancia de entrada	27
2.2.3.2. Diagrama de Radiación	28
2.2.3.3. Directividad	28
2.2.3.4. Ganancia	29
2.2.3.5. Eficiencia	30
2.2.3.6. Ancho de banda	30
2.2.3.7. Coeficiente de reflexión	30
CAPÍTULO III	31
3.1. Metodología	31
3.1.1. Tipo de Estudio	31
3.1.2. Métodos de Investigación	31

3.1.3. Procedimiento	31
3.1.4. Fuentes de Información	32
3.1.5. Población y Muestra	32
3.1.5.1. Población	32
3.1.5.2. Muestra	33
3.1.6. Instrumentos de la Investigación	33
3.1.7. Operacionalización de las Variables	33
3.2. Diseño y Fabricación	33
CAPÍTULO IV	36
4.1. Resultados y Discusiones	36
4.2. Análisis de la antena textil propuesta comparada con una antena con forma arbitraria	43
4.2.1. Prueba de normalidad de muestras	43
4.2.2. Prueba de Hipótesis	45
CAPÍTULO V	47
5.1. Conclusiones	47
5.2. Recomendaciones	48
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	53

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Parámetros electromagnéticos de materiales textiles.	24
3.2. Operacionalización de variables.	33
4.3. Valores máximos de directividad y ganancia de las antenas textiles.	39
4.4. Test de Normalidad.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Configuración general de una antena microstrip con parche rectangular.	22
2.2. Formas más utilizadas en las antenas microstrip.	23
2.3. Alimentación por línea microstrip.	25
2.4. Alimentación por sonda coaxial.	25
2.5. Alimentación por proximidad.	26
2.7. Análisis mediante coordenadas esféricas.	28
2.8. Diagrama de radiación tridimensional del campo eléctrico.	29
3.9. Metodología del proyecto.	32
3.10. Estructuras propuestas y alimentación de la antena.	34
3.11. Antenas textiles tipo logotipo fabricadas.	35
4.12. Coeficiente de reflexión de los prototipos.	36
4.13. Distribución de corrientes para la frecuencia de 2.4 GHz.	37
4.14. Distribución de corrientes para la frecuencia de 3.4 GHz.	37
4.15. Diagrama de radiación en la frecuencia de 2.4 GHz.	38
4.16. Diagrama de radiación en la frecuencia de 3.4 GHz.	38
4.17. Diagramas de radiación en forma polar.	39
4.18. Eficiencia de los modelos de antenas propuestos.	40
4.19. Comparación de los resultados simulados y medidos de la antena textil tipo logotipo propuesta.	40
4.20. Impedancia de la antena fabricada con pintura a base de grafito.	41
4.21. Impedancia de la antena fabricada con lámina de cobre adhesivo.	42
4.22. Impedancia de la antena fabricada con pintura comercial eléctrica.	42
4.23. Estadístico de prueba para el parámetro frecuencia central.	45
4.24. Estadísticas de grupo para la frecuencia central.	45
4.25. Estadístico de prueba para el parámetro ancho de banda.	46
4.26. Estadísticas de grupo para el ancho de banda.	46
4.27. Estadístico de prueba para el parámetro eficiencia.	46
4.28. Estadísticas de grupo para la eficiencia.	46

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo general diseñar una antena textil tipo logotipo que trabaje en el rango de frecuencias medias y pueda ser utilizada en aplicaciones de IoT. A través de un estudio exploratorio se analizó las antenas textiles y utilizando los métodos experimental y adaptativo se logró definir una estructura optimizada.

La antena textil consta de un anillo circular exterior y un elemento radiador circular interior. Se utiliza como sustrato textil una tela jean con valores de $\epsilon_r = 1,78$ y $\tan(\delta) = 0,085$, y para la parte de alimentación se utiliza dos líneas de transmisión unidas por un divisor de potencia.

El diseño y análisis de la antena se realizó mediante el software de simulación CST STUDIO. Los resultados de la simulación para la antena final muestran una buena adaptación de impedancia en el rango de frecuencias de 2.1 GHz a 3.6 GHz consiguiendo un ancho de banda del 52.63 %. El diagrama de radiación de la antena es bidireccional en todo el rango de frecuencias analizado y la directividad máxima que se consigue tiene un valor aproximado de 4.88 dBi.

La fabricación de la antena se lo hizo mediante el método de serigrafía utilizando una pintura conductora para los elementos resonantes y, mediante un Analizador de Redes Vectoriales (VNA), se llevó a cabo la medición experimental de los parámetros de la antena.

Palabras clave: antena textil, antena logotipo, Internet de la Cosas, tecnología vestible.

ABSTRACT

This research aims to design a logo textile antenna that works in the mid-frequency range and can be used in IoT applications. Through an exploratory study, textile antennas were analyzed, and using the experimental and adaptive methods; it was possible to define an optimized structure.

The textile antenna consists of an outer circular ring and an inner circular radiator element. A jean fabric with values of $\epsilon_r=1.78$ and $\tan(\delta)=0.085$ is used as a textile substrate, and two transmission lines are used for the feeding part, joined by a power divider.

The antenna was designed and analyzed using CST STUDIO simulation software. The simulation results for the final antenna show an excellent impedance match in the frequency range from 2.1 GHz to 3.6 GHz achieving a bandwidth of 52.63 %. The antenna's radiation pattern is bidirectional throughout the frequency range analyzed, and the maximum directivity achieved has an approximate value of 4.88 dBi.

The manufacture of the antenna was done by the screen-printing method using a conductive paint for the resonant elements. Through a Vector Network Analyzer (VNA), experimental measurement of antenna parameters was carried out.

Keywords: textile antenna, logo antenna, Internet of Things, wearable technology.



SOFIA FERNANDA
FREIRE CARRILLO

Reviewed by:

Lic. Sofia Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

INTRODUCCIÓN

La tecnología ha evolucionado de tal manera que ha cambiado la manera de vivir de la sociedad. Es difícil pensar que a lo largo del día, ya sea por trabajo, estudio, ocio, entre otros, no se interactúe con algún dispositivo electrónico conectado a Internet. Sin embargo, todavía queda un largo camino por recorrer para que los avances tecnológicos se conviertan en una parte integral del ser humano y su día a día.

Debido a esto, la idea de conectar dispositivos y objetos de uso diario a la red ha tomado gran interés permitiendo que las comunicaciones inalámbricas y conceptos como el Internet de las Cosas (IoT) tengan un crecimiento sorprendente en los últimos años. El dotarle de capacidades inteligentes a estos objetos y convertirlos en fuentes de datos es una de las metas de IoT y para esto es necesario diferentes sistemas electrónicos y de comunicación que puedan relacionarse entre sí inalámbricamente [1]. De igual manera, el desarrollo en las redes de telecomunicaciones; por ejemplo, las redes corporales inalámbricas (WBAN) y la tecnología 5G, traen diversas ventajas; entre ellas, mayor velocidad de transmisión, bajas latencias, eficiencia espectral, bajo consumo energético, entre otras [2, 3], facilitando el soporte a las nuevas aplicaciones IoT y la conexión de más dispositivos inteligentes a la red de manera fiable [4]. En consecuencia, se ha visto como una oportunidad el integrar la electrónica en los accesorios o prendas de vestir de una persona para que realicen funciones específicas; dando como resultado, la tecnología vestible.

La tecnología vestible corresponde a todo aquel sistema o dispositivo electrónico inteligente diseñado para ser portado por una persona; por lo tanto, resulta interesante conectar los textiles a la red, en especial la ropa. Sin embargo, para que esta comunicación entre el textil y la red se establezca, se necesita de varios elementos, entre estos, una antena.

Las antenas son componentes fundamentales en esta nueva tendencia de aplicaciones inalámbricas. La tecnología moderna ha permitido que el diseño y fabricación de antenas portátiles, mediante la utilización de materiales textiles, puedan ser colocadas en prendas de vestir. Por esta razón, las antenas textiles pueden ser lavables, adaptables, compactas, ligeras [5]. No obstante, el desarrollo y manufactura de una antena textil presenta verdaderos desafíos y características que deben tomarse en consideración [6].

La implementación de las antenas textiles portátiles está relacionada, principalmente, con la mejora de la calidad de vida de las personas brindando un monitoreo continuo del cuerpo del usuario y de sus actividades. No obstante, diversos campos de la ciencia y varios sectores de la industria han visto el uso de esta tecnología como una oportunidad dando como resultado que

las antenas textiles sean uno de los campos de investigación más prometedores y de vanguardia en la actualidad, en especial las antenas textiles que imiten la forma de un logotipo [7].

En el presente trabajo se diseña una antena textil tipo logotipo. Este documento está organizado en cinco capítulos. El primer capítulo plantea la problemática y los objetivos a alcanzar. La siguiente parte expone una pequeña reseña sobre el estado actual del tema de investigación, así como la fundamentación teórica necesaria. En el capítulo posterior se mencionan los procedimientos empleados para el diseño, simulación e implementación de la antena. El capítulo cuatro presenta e interpreta los resultados de la antena textil y por último, en el capítulo quinto, se describen las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

1.1 Antecedentes

Uno de los objetivos de IoT es la conexión de objetos cotidianos y de uso común a la red. La posibilidad de integrar funciones inalámbricas a la ropa ha dado como resultado el desarrollo de antenas textiles portables. Algunos ejemplos de este tipo de antenas que podemos mencionar tanto por sus resultados como por sus aplicaciones se encuentran en [8–11].

La antena que describe el autor en [8] ha sido diseñada para aplicaciones médicas. Se basa en un resonador elíptico, utiliza dos capas del textil denim y una capa de fieltro como sustratos, presenta un amplio ancho de banda trabajando desde los 6.5 GHz hasta los 35 GHz, una directividad máxima de 10 dBi y una eficiencia alrededor del 70 %.

En [9], se presenta una antena que trabaja en las bandas ISM de 2.4 GHz y 5.8 GHz. El análisis de esta antena se lo hace en el espacio libre y en proximidad del cuerpo humano. El material utilizado como elemento conductor es cobre adhesivo y el sustrato textil es la tela jean.

El diseño de la antena en [10] consta de un parche rectangular en forma de escalón con una ranura hexagonal en su interior. La antena ha sido desarrollada para aplicaciones biomédicas mostrando un gran ancho de banda operando desde los 2.8 a 10.9 GHz. La antena en [11], opera alrededor de los 1500 MHz a 1700 MHz para aplicaciones GPS. La investigación expone el diseño de la antena, manufactura y su comportamiento en condiciones ambientales extremas.

Aunque varias antenas textiles han sido propuestas en la literatura, son muy pocas las antenas que utilicen la forma de un logotipo en concreto debido a sus dificultades tanto en diseño como en fabricación.

En [12], se presentan dos antenas que imitan la forma del logotipo de la empresa estadounidense APPLE Inc. y de la empresa francesa LACOSTE. Estas antenas están fabricadas con un textil conductor autoadhesivo no tejido montado sobre el textil jeans utilizado como sustrato. Las antenas trabajan a una frecuencia de 1.8 GHz obteniendo para el caso de la antena con el logo de APPLE un ancho de banda del 70 % y una directividad de 3.18 dBi y para la antena con el logotipo de LACOSTE un ancho de banda del 20 % y una directividad de 4.55 dBi.

La antena que se expone en [13], tiene la forma del logo de la casa francesa de moda Louis Vuitton y es fabricada sobre material de cuero. Esta antena opera en la banda de frecuencia de 2.45 GHz para aplicaciones ISM y la banda de frecuencia de 4.25 GHz, obteniendo anchos de

banda de 17.1 % y 13 % y ganancias de -0.29 dBi y 3.05 dBi, respectivamente.

La geometría del elemento radiante de la antena mostrada en [14], imita el escudo de armas del cuerpo de bomberos de Lecce (Italia). La antena trabaja en la banda GPS L1 a la frecuencia de 1.575 GHz para aplicaciones de localización obteniendo un ancho de banda de 33 MHz y una directividad de 8 dBi.

El diseño de la antena en [15], tiene la forma del logo de la universidad Neofit Rilski, Bulgaria. La antena opera a dos frecuencias, 2.4 GHz y 5.47 GHz. El material utilizado para el elemento radiante es una tela conductora y el substrato es una composición de tres capas de diferentes textiles.

1.2 Planteamiento del Problema

Como parte del avance tecnológico y calidad de vida de las personas, el incorporar sensores, sistemas electrónicos y de telecomunicaciones en la vestimenta, accesorios o en alguna parte del cuerpo de un individuo que sean capaces de adquirir, procesar, almacenar y enviar datos en tiempo real para realizar diversas funciones (de monitoreo, sensoriales, de protección, entre otros) ha tomado gran interés debido a sus aplicaciones dependiendo el área de estudio tales como medicina, seguridad, deporte, entretenimiento, entre otras [16].

Este tipo de tecnología, denominada tecnología vestible, ha conseguido un alto nivel de evolución y desarrollo por su utilización en la Internet de las Cosas. Una de las características fundamentales de este tipo de tecnología, y en general de IoT, es la capacidad de conexión inalámbrica de los diferentes dispositivos y sistemas a la red [16]. Por esta razón, la comunicación inalámbrica, rendimiento y transmisión de datos son parámetros importantes que pueden lograrse mediante la incorporación de antenas portátiles en la ropa que no obliguen al usuario a abandonar su comodidad.

Uno de los problemas más comunes en el diseño de las antenas es su tamaño. El tamaño de una antena va estrechamente relacionado con su frecuencia de operación y longitud de onda asociada. Adicionalmente, en el caso de las antenas textiles, el tamaño de la antena se incrementa debido a los valores bajos de las características electromagnéticas de los textiles [17].

Las antenas textiles presentadas en la literatura consisten en geometrías basadas en parches microstrip [18]. Sin embargo, el implementar una antena sobre la ropa que posea la forma de un logotipo en específico no es tarea sencilla. Estas antenas textiles tipo logotipo presentan mayor dificultad pues cada logo manifiesta diferentes impedimentos y problemas al momento de su diseño [14].

Otro inconveniente en el desarrollo de antenas textiles es las limitaciones en materiales textiles conductores que hacen que la fabricación sea difícil y lenta [5, 19]. De igual manera, al utilizar un textil como sustrato es necesario extraer las propiedades dieléctricas de cada material para poder realizar el diseño de la antena [20, 21].

Las antenas portables deben presentar una versatilidad para poder trabajar en diferentes aplicaciones, es decir, que la antena debe operar en diferentes frecuencias. Las frecuencias más utilizadas para IoT se encuentran desde los 1 GHz a 6 GHz, considerándose frecuencias medias de corto alcance. Este rango de frecuencias medias abarca tecnologías como Bluetooth, ZigBee e ISM (Industria, Ciencia y Medicina por sus siglas en inglés) operando en la banda de 2.4 GHz, WiFi a 2.4/5.1 GHz, UWB (Ultra Wide-Band o Banda Ultra Ancha) que trabaja desde los 3.1 GHz hasta los 10.6 GHz, entre otras tecnologías [21, 22].

En consecuencia, desarrollar antenas textiles compactas de bajo perfil que operen en una o más bandas de frecuencias medias, que presenten un amplio ancho de banda donde la calidad del enlace de red sea fiable y su rendimiento sea aceptable para establecer comunicación es complicado de diseñar. Debido a que en las fibras textiles pueden aparecer dobleces y discontinuidades, además de que absorben la humedad y temperatura, se afecta de manera relevante los parámetros y características de la antena dando como resultado el desplazamiento de la frecuencia de resonancia y la disminución del ancho de banda [23].

Por lo tanto, ¿es posible integrar una antena a un textil para ser empleada en redes de sensores que trabajen en tecnología vestible?, ¿se puede desarrollar un modelo que nos ayude a realizar diferentes diseños sin perder sus características técnicas y que puedan utilizarse en diferentes aplicaciones IoT?

El trabajo de investigación propuesto se centra en el diseño, desarrollo e integración de una antena textil tipo logotipo que pueda emplearse en aplicaciones IoT dentro del rango de frecuencias medias de 5G. Además, en base al estudio de los parámetros físicos de la antena, se analizará el comportamiento y funcionamiento de la misma considerando sus parámetros técnicos como coeficiente de reflexión, acoplamiento, patrón de radiación.

1.3 Justificación

En la actualidad, la sociedad ha tenido que cambiar su estilo de vida, adaptarse a las nuevas tecnologías y al uso del internet. Esto ha llevado al desarrollo de aplicaciones para mejorar la vida de las personas.

Entre estas aplicaciones, la tecnología vestible ha tomado gran relevancia debido a sus funciones

de monitoreo, localización, entre otras y utilidad en varios campos como la medicina, deporte, entre otros. Esta tecnología necesita de sensores, componentes electrónicos y antenas para la recopilación de datos de la persona y el envío y recepción de los mismos a otros dispositivos mediante la red para sus diferentes funciones dependiendo la aplicación.

Dentro de la tecnología vestible, se ha visto la manera de integrar los diferentes sistemas de comunicación a la ropa de una manera sencilla y discreta. En el caso de las antenas, el desarrollo de antenas textiles ha sido una solución. Sin embargo, este tipo de antenas, al ser un campo prácticamente nuevo y que está en desarrollo, necesita de una mayor investigación para su diseño y manufactura.

En el Ecuador, las investigaciones de este tipo de antenas son muy reducidas. El trabajo propuesto busca abrir un camino para el estudio y aplicaciones en este campo, opciones como la caracterización de sustratos textiles, el estudio de materiales conductores y las técnicas de implementación de estos en los textiles, así como nuevos modelos de antenas textiles son solo unas cuantas opciones que pueden ser objeto de investigación.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Diseñar una antena textil tipo logotipo para aplicaciones del Internet de las Cosas en el rango de 1 a 6 GHz.

1.4.2 Específicos

- Realizar un estudio del estado del arte de antenas tipo logotipo para el rango de frecuencias medias en aplicaciones del Internet de las Cosas.
- Desarrollar un logotipo como antena integrada a un textil usando un simulador electromagnético.
- Implementar la antena diseñada, caracterizar y analizar sus resultados.

CAPÍTULO II

2.1 Estado del arte

Los nuevos avances en redes de comunicaciones como la tecnología 5G, redes WPAN o WBAN permiten la investigación y desarrollo de las aplicaciones corporales. La tecnología 5G posibilita la conexión de más dispositivos a la red y la transferencia de mayor cantidad de datos a mayor velocidad; mientras que el avance en las redes inalámbricas ha permitido la estandarización de las redes destinadas a aplicaciones centradas en el cuerpo [24]. Para estas aplicaciones se han definido tres grupos: las comunicaciones sobre el cuerpo (on-body communications), comunicaciones fuera del cuerpo (off-body communications) y comunicaciones corporales o in-body communications [25]. Aunque todos estos tipos de comunicaciones tienen sus propias características, se las diferencian de mejor manera por la ubicación de los sistemas de comunicación en el cuerpo. Una de las aplicaciones que ha surgido a raíz de esto, y hace uso de las comunicaciones on-body, es la tecnología vestible.

La tecnología vestible o wearable technology (WT) es un concepto que engloba a todo accesorio o prenda adaptado con capacidades inteligentes para ser portados sobre el cuerpo de una persona [6, 26]. Sus aplicaciones se basan en el monitoreo continuo de actividades y comportamientos físicos humanos, así como de parámetros fisiológicos y bioquímicos de una persona en el día a día [27]. Su uso está enfocado en gran medida al campo de la medicina por sus soluciones innovadoras en temas de la salud [26]; sin embargo, su utilización se está difundiendo a otras áreas como el deporte, entretenimiento, industria, seguridad, etc [7, 14, 15, 28, 29].

Entre las alternativas que se han considerado para implementar la tecnología vestible, el uso de los textiles ha llamado la atención. Actualmente, han surgido ideas de conectar dispositivos electrónicos a la industria textil. Trajes que registren el estado térmico del cuerpo, ropa de baño con sensores que notifican el tiempo de exposición al sol, prendas de vestir que monitorean pulsos cardiacos o registran la actividad eléctrica de los músculos son solo algunos ejemplos en desarrollo de esta nueva tendencia de tecnología vestible [23, 30]. No obstante, el problema que comparten todos estos ejemplos es la dificultad de incorporar los sistemas electrónicos a la vestimenta. El éxito total se conseguirá cuando sensores, sistemas electrónicos y de telecomunicación puedan adaptarse por completo a materiales textiles [23], y así obtener un traje cómodo e independiente para el individuo que asegure su uso, el lavado y reutilización.

En la tecnología vestible, al hacer uso de redes inalámbricas para conectarse a los diferentes dispositivos, las antenas son componentes esenciales. Las antenas portátiles han recibido gran atención por sus ventajas y características a pesar de sus limitaciones [31]; además, poder co-

locar este tipo de antenas de manera sencilla en prendas textiles que no obliguen al usuario a abandonar su zona de confort las hace más atractivas.

Una antena textil debe operar en la frecuencia necesaria, tener un ancho de banda requerido, generar un patrón de radiación omnidireccional y reducir la exposición de radiación en el cuerpo [9, 31]. La mayoría de estas características pueden solucionarse miniaturizando la antena con la ventaja de ocupar un menor espacio sobre el cuerpo [31]. No obstante, es complicado realizar una antena de tamaño reducido con un alto rendimiento.

En la actualidad, los sistemas de comunicación inalámbrica no trabajan a una sola frecuencia; por lo tanto, las antenas textiles deben ser multibanda o banda ancha para asegurar su correcto funcionamiento independientemente de la aplicación. Deben ser flexibles para poder acomodarse al movimiento del cuerpo; ser robustas para no reducir su rendimiento considerablemente cuando se presentan ciertas condiciones como humedad, la presencia del cuerpo humano, temperatura, entre otras [31]. Todo esto pensando en su fácil fabricación y que no tenga un costo elevado de implementación. Debido a esto, diseñar una antena textil que tenga en cuenta todos estos aspectos es un verdadero desafío.

En la literatura, se han presentado diversos diseños de antenas textiles. Los modelos se basan en antenas microstrip tipo parche, antenas planas monopolo, antenas de guía de ondas integradas en el sustrato (SIW), entre otros [9, 32]. Sin embargo, la poca variedad en materiales textiles conductores y a las técnicas de implementación de estos en la tela añade mayor complejidad en el diseño de este tipo de antenas. Entre los elementos conductores más utilizados se tiene telas e hilos conductoras y láminas adhesivas de cobre; aunque se trabaja en mejorar las propiedades y funcionalidad de ciertos textiles y de algunos materiales conductores [33]. De igual forma, las técnicas de manufactura dependen del material conductor a utilizar, dando como resultado antenas bordadas, antenas integradas en polímeros, antenas 3D, antenas impresas, antenas hechas con microfluidos mediante inyección de aleaciones, entre otras [31, 32].

Una antena textil que presente un aspecto favorable sobre la ropa, como un logotipo, tiene mayor complejidad en su desarrollo y más aún si se tiene en cuenta las características antes descritas [14]. Algunos ejemplos que han utilizado como referencia las imágenes corporativas de las marcas comerciales más famosas del mundo para el diseño de elementos radiantes logrando la conectividad de las prendas con los dispositivos móviles se muestran en [12, 13, 34].

En consecuencia, las investigaciones en relación a las antenas textiles no solo se basan en la geometría de la antena sino en las propiedades mecánicas y dieléctricas de los textiles, las características de los materiales conductores, la influencia del cuerpo humano en el rendimiento de la antena, los métodos de fabricación, la miniaturización, entre otras [31, 35].

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Antenas

Una antena es un elemento utilizado en los sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Dependiendo la aplicación, la antena tendrá condiciones particulares sobre sus parámetros y geometría dando como resultado diferentes tipos y modelos de antenas [36].

2.2.2 Antenas Microstrip

Las antenas que utilizan tecnología microstrip son ampliamente usadas por las ventajas que presentan como su fácil implementación, el tamaño reducido, su peso ligero y su sencilla integración en superficies planas y no planas [36]. Entre sus principales desventajas se encuentran su baja ganancia, un ancho de banda reducido y su baja potencia [37].

Una antena microstrip, como se ve en la Fig. 2.1, está formada por un parche radiador hecho de un material conductor montado sobre un substrato dieléctrico y por bajo de este un plano conductor definido como plano de tierra.

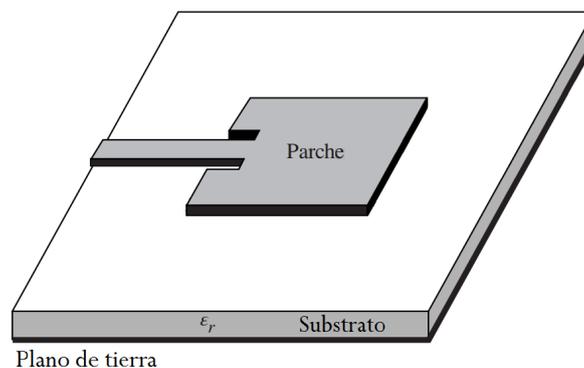


Fig. 2.1. Configuración general de una antena microstrip con parche rectangular [37].

La forma del parche conductor puede tomar diferentes geometrías y diseños dependiendo la aplicación, algunas formas más utilizadas se muestran en la Fig. 2.2.

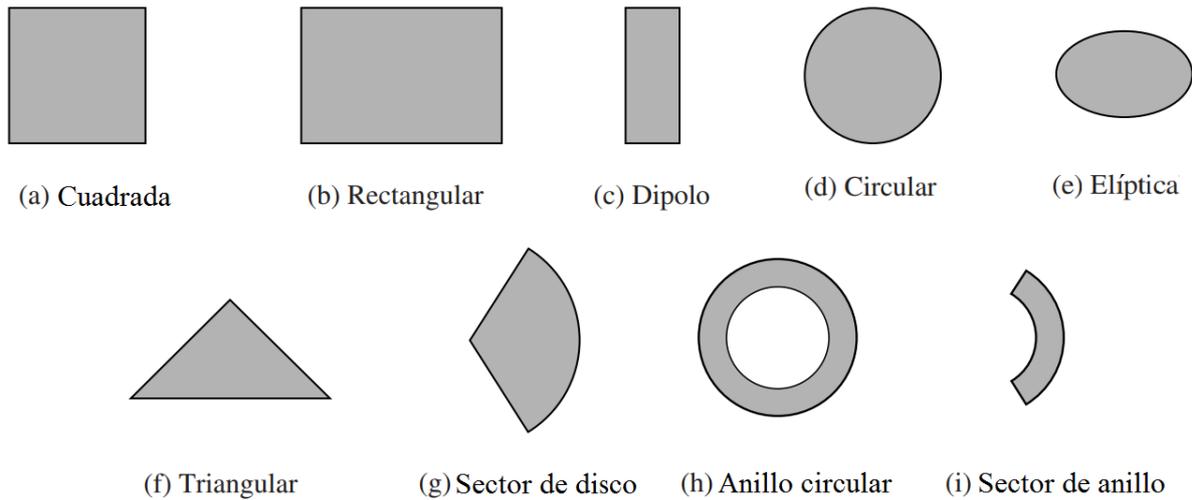


Fig. 2.2. Formas más utilizadas en las antenas microstrip [37].

Generalmente, en el diseño de antenas microstrip se utilizan sustratos rígidos con valores conocidos de permitividad relativa (ϵ_r), tangente de pérdidas ($\tan(\delta)$) y espesor (h), aportadas por el fabricante. Sin embargo, han surgido aplicaciones donde el uso de sustratos flexibles y suaves es de gran interés.

2.2.2.1 Antenas Textiles

Las antenas textiles son un tipo de antenas que utilizan materiales textiles para su fabricación. Estas antenas han tomado relevancia debido a la evolución en redes inalámbricas personales y el desarrollo de nuevas tecnologías en IoT centradas en el cuerpo humano como textiles inteligentes, tecnología vestible, entre otras. La principal ventaja de este tipo de antenas consiste en la manera en que se puede incorporar, de forma discreta y cómoda, en las prendas de vestir [38].

Para el desarrollo de las antenas textiles, varios materiales han sido empleados como elementos radiadores y planos de tierra mientras que las diferentes fibras textiles son utilizadas como sustratos dieléctricos [13]. En el caso de los sustratos textiles, al ser superficies no uniformes y presentar defectos y, al tener poca o ninguna información sobre sus propiedades electromagnéticas, se necesita de un proceso de caracterización del textil para obtener estos valores [22]. En la tabla 2.1 se describen las propiedades electromagnéticas de algunos sustratos textiles utilizando una técnica de caracterización de materiales mediante una cavidad resonante [7].

TABLA 2.1. Parámetros electromagnéticos de materiales textiles.

Material	Espesor (mm)	Permitividad Relativa (ϵ_r)	Tangente de pérdidas ($\tan(\delta)$)
Lana	1.5	1.21831	0.00183
Poliester	0.35	1.49797	0.00389
	1.5	1.62022	0.00509
Denim	1.5	1.87813	0.05942
Algodón	0.52	1.63850	0.06218
	1.5	1.63215	0.04930

Los materiales conductores utilizados para la elaboración de antenas textiles son telas conductoras, láminas adhesivas de cobre, polímeros conductores e hilos conductores (E-threads). Dependiendo del material a emplear en la elaboración de la antena, una antena textil puede ser incrustada o colocada en el textil. Una antena incrustada en el textil no puede ser removible, está fija en la tela; mientras que una antena colocada en el textil es extraíble [39]. De igual manera, cada material conductor presenta ventajas y desventajas en diseño, forma de alimentación de la antena y técnicas de fabricación [19]. Por ejemplo, el diseño de una antena textil en una lámina adhesiva de cobre es sencillo así como su fabricación; sin embargo, no es resistente al lavado de la tela o a dobleces del sustrato textil. En cambio, una antena elaborada con hilos conductores es difícil en diseño pero sencilla en implementación y presenta durabilidad.

Estas limitantes de materiales conductores e información de sustratos textiles hacen que el avance de este tipo de antenas sea lenta. No obstante, diversas investigaciones han propuesto diferentes soluciones para adaptar las partes conductoras al textil así como las técnicas para la caracterización de los sustratos textiles [21, 22].

Aunque algunos sustratos textiles han sido usados en diversas investigaciones y de las cuales ya se han obtenido sus parámetros dieléctricos (ver tabla 2.1), se debe tomar en cuenta que estos valores no son estándar. El mismo textil puede dar valores diferentes, aunque similares, dependiendo el método de caracterización que se utilice. De igual manera, la misma clase de textil puede tener distinto espesor, es diferente dependiendo el fabricante y por tanto es poco probable que dos textiles del mismo tipo sean iguales, esto también da lugar a variaciones en los parámetros dieléctricos.

Además de los materiales, se debe tomar en cuenta otros aspectos para el desarrollo de una antena textil. Dado que el sustrato textil es flexible y en algunos casos elásticos, se pueden producir en el material deformaciones, tales como arrugas o dobleces; además, las fibras textiles tienen la capacidad de absorber la humedad y temperatura, estos factores producen un desplazamiento en la frecuencia de operación, cambios en el patrón de radiación y reducción en el

ancho de banda. Debido a que la antena está en contacto con el cuerpo, existen efectos de la radiación electromagnética en el cuerpo. Este valor de radiación medida mediante el SAR (Tasa de Absorción Específica por sus siglas en inglés) debe ser lo más baja posible para cumplir con los parámetros de seguridad y salud requeridos [40, 41]. Por otra parte, la proximidad del cuerpo humano afecta el funcionamiento de la antena produciendo cambios en su rendimiento, degradación del patrón de radiación, variación en la impedancia de entrada de la antena, entre otros [7].

2.2.2.2 Técnicas de Alimentación

Escoger la técnica de alimentación apropiada para una antena microstrip puede presentar ventajas en diseño o fabricación. Se puede definir dos categorías en las técnicas de alimentación, por contacto y sin contacto. La alimentación directa conecta una línea microstrip al elemento radiante. Se puede conectar la línea al borde del parche o mediante inserciones en la antena, como se muestra en la figura 2.3. Este método es sencillo de realizar puesto que la alimentación y el parche se implementan en el mismo sustrato [42].

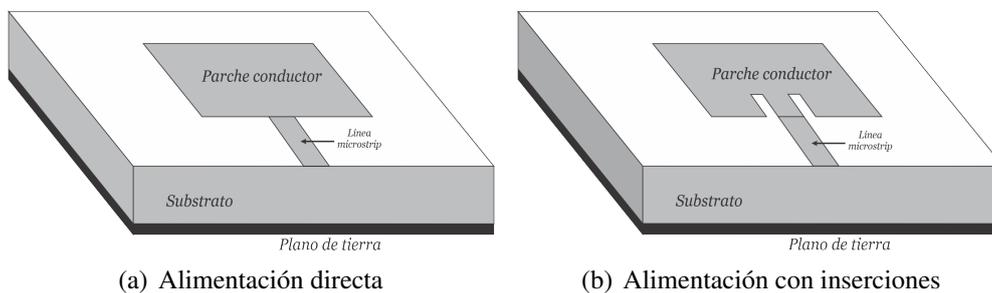


Fig. 2.3. Alimentación por línea microstrip [42].

Cuando se utiliza alimentación mediante sonda coaxial (Figura 2.4), el conductor central del cable coaxial alimenta al elemento radiante y la parte externa del cable se conecta a tierra.

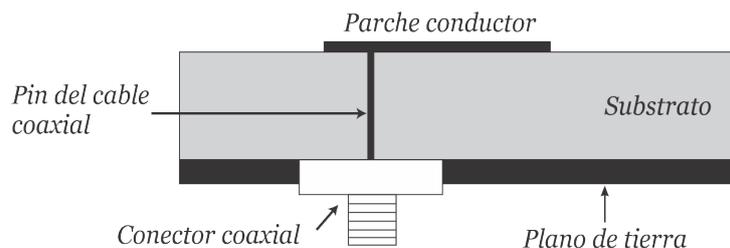


Fig. 2.4. Alimentación por sonda coaxial [42].

Otra técnica utilizada es la alimentación por proximidad. Esta técnica se diferencia porque no hay contacto directo entre la antena y la línea de alimentación, debido a esto la antena y la alimentación pueden optimizarse por separado. Como se utilizan dos substratos dieléctricos, la antena estará sobre un substrato y, en la parte inferior, estará la línea de alimentación sobre el otro substrato y el plano de masa (Figura 2.5). El funcionamiento de este método se basa en la transferencia de energía entre el parche y la línea.

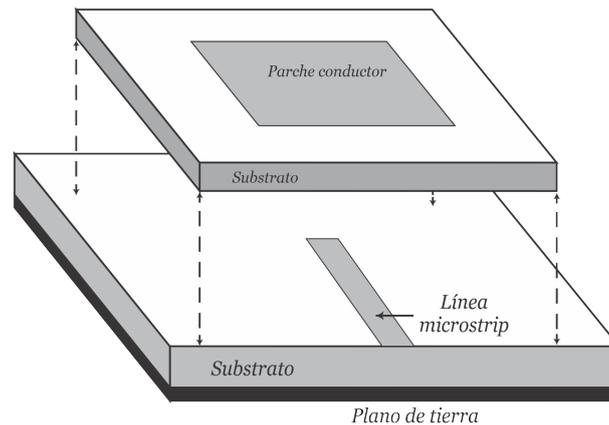


Fig. 2.5. Alimentación por proximidad [43].

Al igual que el método anterior, la alimentación por acoplamiento de apertura utiliza dos substratos dieléctricos, uno para la antena y otro para la alimentación como se ve en la Figura 2.6. Estos substratos estarán posicionados de tal manera que los separará el plano de tierra, el cual tendrá una pequeña apertura para permitir el paso de los campos que alimenta la antena [42].

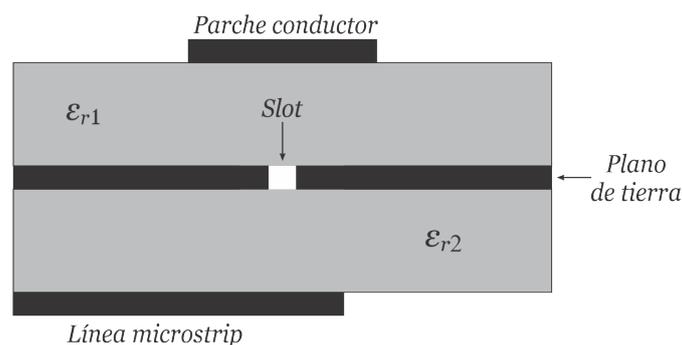


Fig. 2.6. Alimentación por acoplamiento de apertura [42].

2.2.3 Parámetros de la Antena

Para evaluar el rendimiento de una antena es necesario de un conjunto de parámetros que describan su comportamiento y efecto en el sistema de telecomunicaciones.

2.2.3.1 Impedancia de entrada

La impedancia de entrada (Z_a) es definida como la relación entre la tensión y la corriente presente en el puerto de entrada de la antena. Esta impedancia se compone de una parte real y una parte imaginaria que dependen de la frecuencia.

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (2.1)$$

La parte real consiste de dos componentes, una resistencia de radiación (R_r) y una resistencia de pérdidas (R_Ω). Dado que la antena emite energía hacia el espacio libre, la resistencia de radiación representa el valor de resistencia que disiparía la misma potencia que la radiada por la antena.

$$P_{radiada} = I^2 R_r \quad (2.2)$$

En cambio, la resistencia de pérdidas de la antena representa las pérdidas de potencia, disipada en forma de calor, que se producen en la antena, ya sea por conductores y/o dieléctricos [36].

$$P_\Omega = I^2 R_\Omega \quad (2.3)$$

Por lo tanto, la suma de estas dos potencias es la potencia total entregada a la antena.

$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_\Omega = I^2 R_r + I^2 R_\Omega \quad (2.4)$$

Entonces, la impedancia total de la antena es

$$Z_a = R_a + jX_a = R_a + jX_a = (R_r + R_\Omega) + jX_a \quad (2.5)$$

Es importante que la impedancia del generador y de la antena estén adaptadas [36,44], para que la transferencia de potencia sea la máxima posible con un mínimo de pérdidas. Si la antena no está adaptada, una parte de la potencia incidente proveniente del generador se reflejará hacia el mismo. Cuando la parte reactiva de la impedancia de entrada es nula ($X_A = 0$) se dice que la antena resuena a una frecuencia f_0 [37].

2.2.3.2 Diagrama de Radiación

Un diagrama de radiación describe gráficamente las propiedades de radiación de la antena en diferentes direcciones del espacio a una distancia fija. Ya que el diagrama de radiación es tridimensional, comúnmente se utiliza las coordenadas esféricas para representarlo (Figura 2.7), expresándose en función de las variables angulares θ y ϕ , situando a la antena en el origen y manteniendo constante la distancia [37].

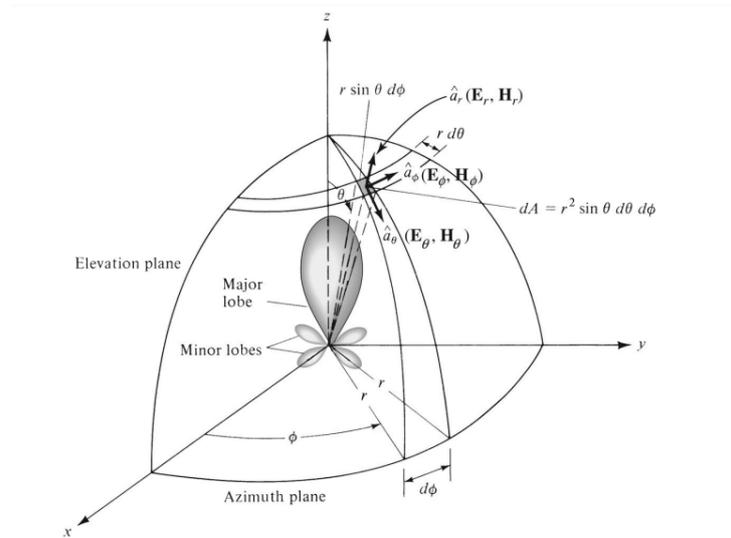


Fig. 2.7. Análisis mediante coordenadas esféricas [37].

Como el campo magnético se deriva del campo eléctrico y viceversa, esta representación gráfica puede realizarse para cualquier campo, siendo lo más habitual que el diagrama exprese el campo eléctrico (Figura 2.8).

2.2.3.3 Directividad

La directividad (D) de una antena es expresada como la relación entre la densidad de potencia radiada en cierta dirección y la densidad de potencia que una antena isotrópica radiaría en esa misma dirección con la misma potencia que la antena de interés [36]. La directividad está dada por

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (2.6)$$

Generalmente cuando se habla de directividad de una antena, se refiere a la dirección máxima

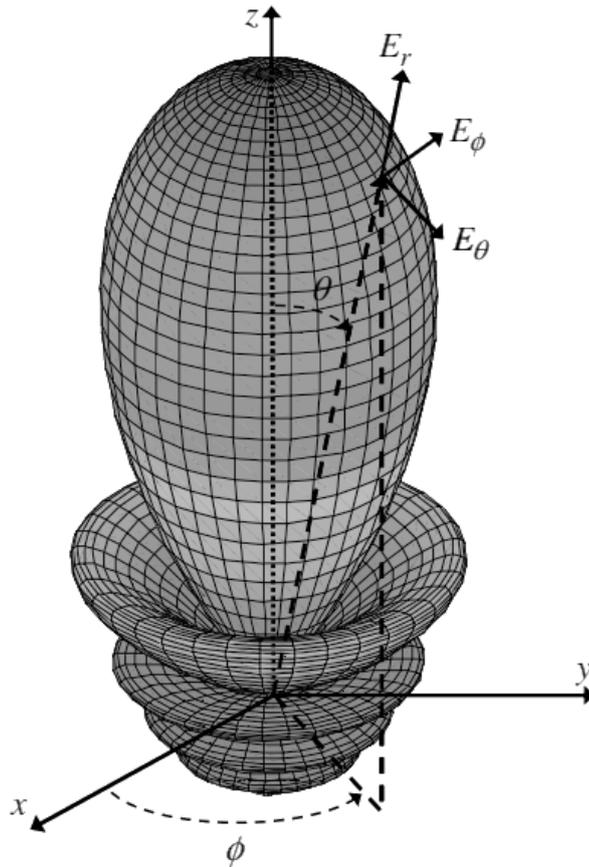


Fig. 2.8. Diagrama de radiación tridimensional del campo eléctrico [37].

de radiación de esta y se relaciona con la siguiente expresión

$$D = \frac{\rho_{max}}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (2.7)$$

2.2.3.4 Ganancia

La ganancia de una antena (G) es un parámetro que está directamente relacionado con la directividad. Mientras que la directividad relaciona la potencia radiada, la ganancia establece la relación con la potencia entregada a la antena [36].

$$G(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_{entregada} / (4\pi r^2)} \quad (2.8)$$

Este parámetro de ganancia toma en cuenta posibles pérdidas en la antena puesto que una antena real no radia toda la potencia que se le entrega. En consecuencia, la ganancia y directividad están

relacionadas por un factor denominado eficiencia de la antena.

$$G = \eta D \quad (2.9)$$

2.2.3.5 Eficiencia

La eficiencia (η) es la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena.

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{entregada}} = \frac{I^2 * R_r}{I^2 * R_a} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}} \quad (2.10)$$

2.2.3.6 Ancho de banda

El ancho de banda (BW o BandWidth) es un conjunto de frecuencias donde la antena opera de manera satisfactoria. El ancho de banda se expresa usualmente en forma de porcentaje y relaciona el margen de frecuencias que cumplen ciertas especificaciones y la frecuencia central.

$$BW = \left(\frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \right) * 100 \quad (2.11)$$

2.2.3.7 Coeficiente de reflexión

Para facilitar el análisis de los diferentes dispositivos electrónicos a frecuencias de microondas se utiliza los parámetros de dispersión [44]. Como una antena es un componente de un solo puerto, el análisis se realiza mediante el parámetro S_{11} denominado coeficiente de reflexión. Este parámetro muestra cuanta potencia es reflejada desde el puerto en comparación con la cantidad de potencia que incide en el puerto.

Si el parámetro $S_{11} = 0$ dB toda la potencia es reflejada y la antena no radiará energía, mientras que para frecuencias donde los valores de $S_{11} \leq -6$ dB o $S_{11} \leq -10$ dB, dependiendo la aplicación, la antena entrará en funcionamiento. Estos últimos valores del parámetro S_{11} también determinan el ancho de banda en el que opera la antena y el nivel de acoplamiento entre la impedancia de la antena y la impedancia característica de la línea de transmisión [23].

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

3.1.1 Tipo de Estudio

El presente trabajo de investigación emplea un estudio exploratorio, se investiga sobre las antenas textiles, sus características y la manera en la que se integra la antena al textil. Con la información y resultados de trabajos preliminares, utilizando un estudio experimental, se realiza el diseño de la antena poniendo como prioridad la forma del logotipo para que la antena sea pequeña, liviana y cómoda. Finalmente, se analizan los parámetros y características de la antena optimizada.

3.1.2 Métodos de Investigación

En este trabajo se aplican los métodos analítico, deductivo, adaptativo y experimental para el diseño, simulación, optimización e implementación de un modelo viable de antena.

3.1.3 Procedimiento

El desarrollo del presente trabajo de grado utiliza como base el diagrama de la figura 3.9.

La primera etapa se centra en el estudio, de manera general, de las antenas textiles, así como sus características y aplicaciones. En la fase de análisis y elección se realiza la investigación de los tipos de antenas textiles, su implementación, los materiales utilizados y su método de diseño.

Una vez elegido el tipo, el siguiente paso es realizar la investigación sobre diseños existentes de antenas textiles que se centren principalmente en el aspecto visual. Se presta mayor atención al tamaño de la antena, la forma de alimentación y la frecuencia de trabajo.

En la etapa de propuesta de diseño y optimización paramétrica se consideran todos los puntos de la fase anterior, se establece el logotipo a utilizar y, por consiguiente, la forma que tendrá la antena y su manera de alimentación. Se trabaja en base a la frecuencia de operación, se escoge el material textil que se utilizará como sustrato y se propone el nuevo diseño. Las simulaciones se realizan mediante el software CST STUDIO 2018 y dependiendo de los resultados se optimizan valores y configuraciones para obtener un modelo viable.

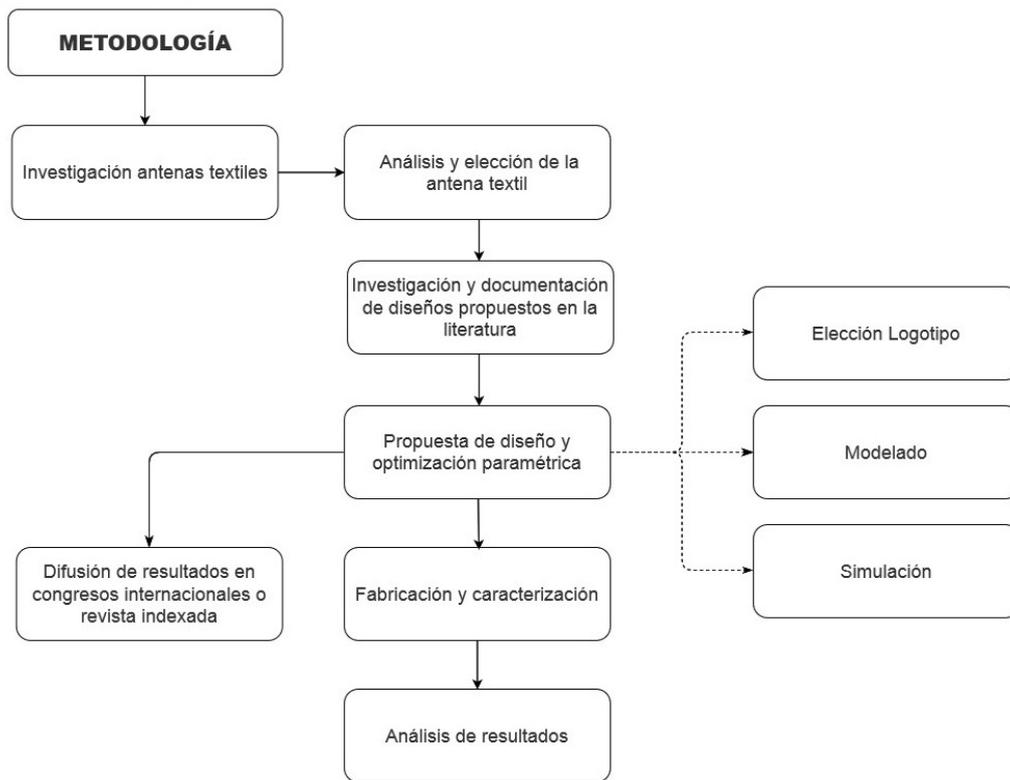


Fig. 3.9. Metodología del proyecto.

En fabricación y caracterización se implementa el diseño desarrollado y mediante el analizador de redes vectoriales (VNA) se realiza las medidas necesarias de la antena. Como paso final se hace la comparación entre los datos del simulador y los de la antena caracterizada.

3.1.4 Fuentes de Información

Se ha realizado una revisión bibliográfica de varias sociedades científicas como ResearchGate, IEEE, revistas, publicaciones científicas destacadas y tesis dedicadas al análisis de una antena textil portable que respalden la factibilidad del proyecto.

3.1.5 Población y Muestra

3.1.5.1 Población

La población está definida por los datos obtenidos en las simulaciones realizadas de la antena como son el ancho de banda, frecuencia central de operación, directividad y eficiencia.

3.1.5.2 Muestra

La muestra está compuesta por datos de la población definida anteriormente.

3.1.6 Instrumentos de la Investigación

Los instrumentos aplicados al desarrollo del presente proyecto de tesis se enmarcan dentro de dos categorías, observación directa y análisis de documentos:

- Observación directa: se analiza el objeto de estudio por medio de la visualización a través de una o varias situaciones.
- Análisis de documentos: en su mayoría publicaciones científicas, revistas y tesis con el objetivo de fundamentar la viabilidad de proyecto.

3.1.7 Operacionalización de las Variables

TABLA 3.2. Operacionalización de variables.

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES
INDEPENDIENTE		
Rango de Frecuencias	Frecuencia de Operación	Frecuencias de 1 a 6 GHz
DEPENDIENTE		
Parámetros de la Antena	Características y comportamiento de la antena	Parámetros S, diagrama de radiación

3.2 Diseño y Fabricación

La antena propuesta consta de un anillo circular exterior con un perímetro de $0,96\lambda$ a la frecuencia de 2.4 GHz y un resonador interno en forma circular con perímetro de $1,06\lambda$ a la frecuencia de 3.4 GHz. El desarrollo de la antena se basa en la deformación del resonador interno en un anillo y un disco para finalmente obtener el logotipo como se muestra en la Fig. 3.10 y así tener un análisis más detallado de la estructura.

La excitación de la estructura se realiza mediante alimentación por proximidad. Esta alimentación se logra por medio de dos líneas capacitivas conectadas a un divisor de potencia en unión T como se muestra en la Fig. 3.10(d). Para simulación, el material usado en las partes conductoras de la antena es cobre (cooper), el mismo que se encuentra por defecto en la librería de CST Studio Suite.

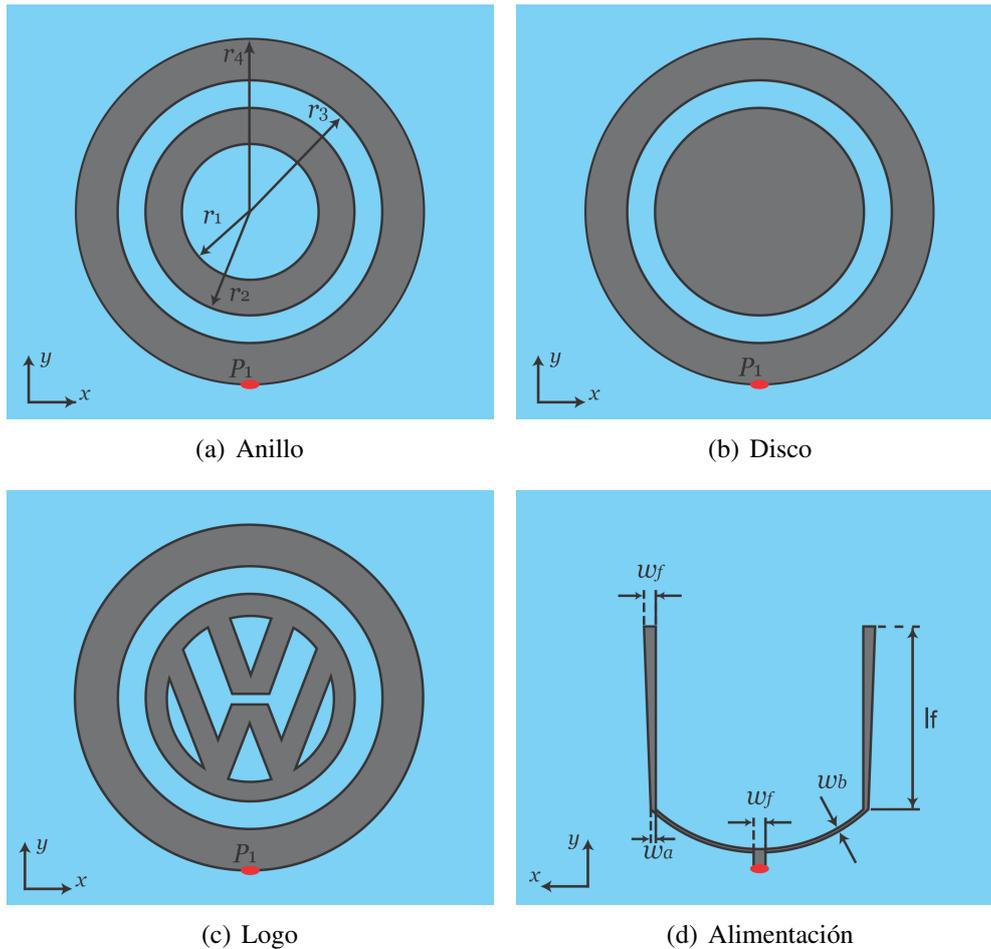


Fig. 3.10. Estructuras propuestas y alimentación de la antena.

El sustrato utilizado en el diseño de la antena es el textil jeans con un espesor de $h = 0,5$ mm, permitividad dieléctrica $\epsilon = 1,78$ y tangente de pérdidas $\tan(\delta) = 0,085$, valores especificados en [45].

Los parámetros optimizados para el diseño de la antena propuesta son: $r_1 = 10$ mm, $r_2 = 15$ mm, $r_3 = 19$ mm, $r_4 = 25$ mm, $w_f = 1,7$ mm, $w_a = 0,72$ mm, $w_b = 0,49$ mm, $l_f = 26,45$ mm, $h = 0,5$ mm.

Para la fabricación de la antena se utilizó la tela jean como sustrato textil, en la alimentación de la antena (ver Fig. 3.10(d)) se empleó cintas adhesivas de cobre y en el caso de los elementos radiantes (Fig. 3.10) se utilizaron tres diferentes materiales para su implementación, cintas de cobre, tinta conductora comercial Bare Conductive y pintura textil a base de grafito de elaboración propia.

La impresión de los elementos resonantes sobre el textil fue realizado mediante un molde, imitando la técnica de serigrafía textil, para que al momento de extender la pintura sobre la tela se

obtenga la forma deseada. Para el punto de alimentación se utilizó un conector SMA hembra teniendo precaución al momento de la soldadura para que no se estropee la antena.

Las antenas finales se muestran en la Fig. 3.11.



Fig. 3.11. Antenas textiles tipo logotipo fabricadas.

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados y Discusiones

El coeficiente de reflexión de las estructuras (ver Fig. 3.10) que se obtuvo en simulación se muestran en la Fig. 4.12.

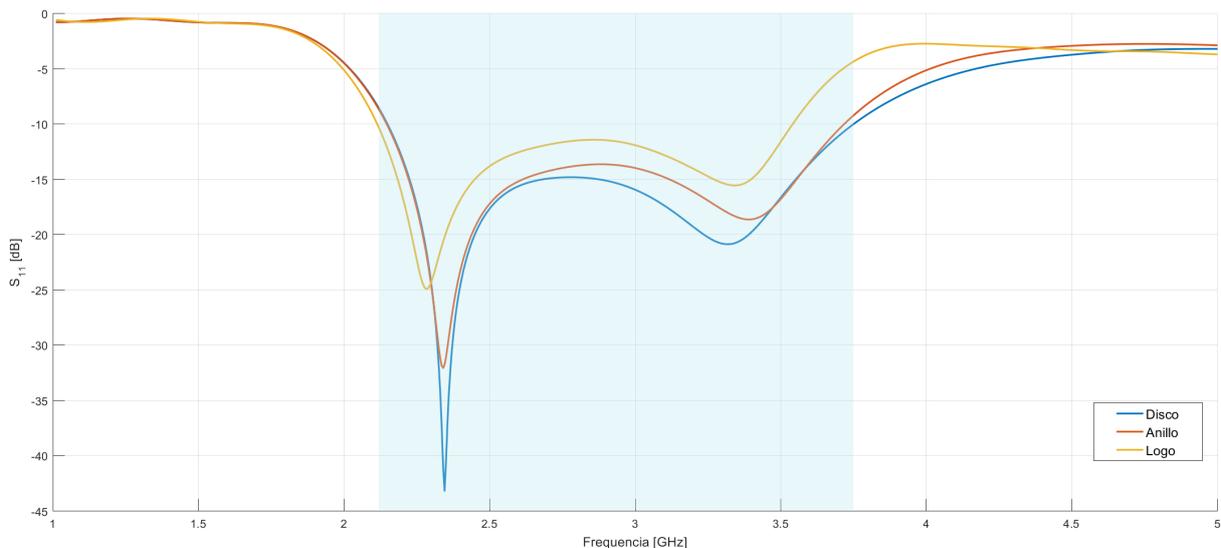


Fig. 4.12. Coeficiente de reflexión de los prototipos.

El nivel de referencia para considerar las pérdidas por retorno como aceptables es el parámetro $S_{11} \leq -10$ dB. Para el disco y el anillo los valores de S_{11} que cumplen esta condición van desde los 2.15 GHz a 3.75 GHz resultando en un ancho de banda del 54.24 %, mientras que para el logotipo se tiene un ancho de banda del 51.59 % con un rango de frecuencias desde los 2.10 GHz hasta 3.56 GHz. Las tres estructuras presentan resonancias en torno a los 2.4 GHz y 3.4 GHz. En la primera frecuencia de resonancia se tiene un acoplamiento máximo de -43 dB, -32 dB y -25 dB para el disco, el anillo y el logo respectivamente. De igual manera, para la segunda resonancia, los valores de acoplamiento de los prototipos son -21 dB, -19 dB y -16 dB.

Por lo tanto, los tres prototipos presentan el mismo comportamiento en sus parámetros S aunque con pequeñas variaciones, siendo la antena con el disco interno la que muestra los mejores resultados. Al modificar la estructura del resonador interno de la antena se presentan cambios como desplazamiento en frecuencia, disminución del ancho de banda o reducción de acoplamiento.

La ubicación de la o las líneas de alimentación para la excitación de los elementos radiantes (ver Fig. 3.10(d)) también juega un papel importante en la manera en cómo se irradia la ener-

gía. En las Fig. 4.13 y 4.14 se observa la distribución de corriente asociada a cada prototipo en las frecuencias de 2.4 GHz y 3.4 GHz. La Fig. 4.15 y Fig. 4.16 muestran los diagramas tri-dimensionales de radiación en las frecuencias de resonancia para los prototipos del disco y el logotipo.

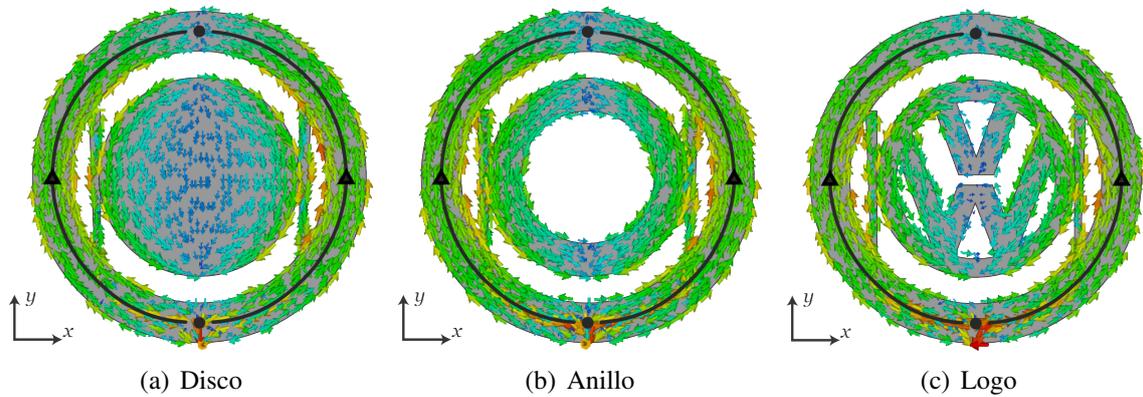


Fig. 4.13. Distribución de corrientes para la frecuencia de 2.4 GHz.

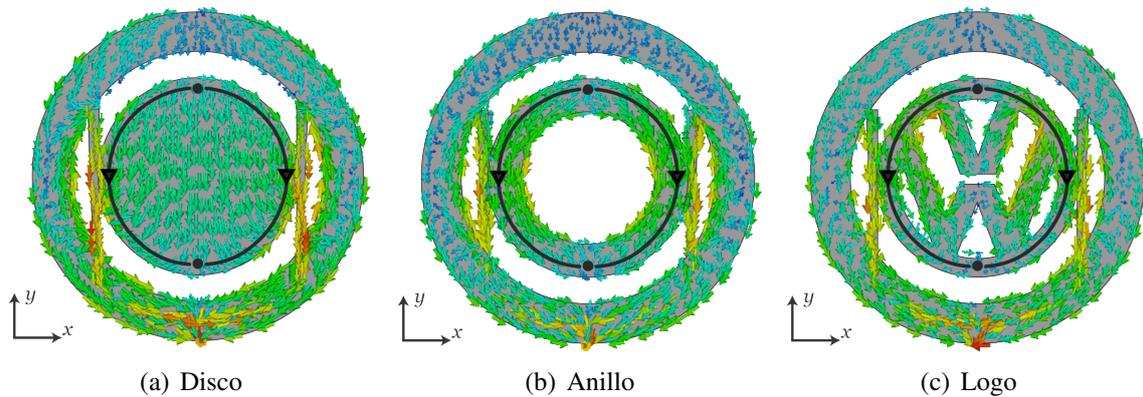


Fig. 4.14. Distribución de corrientes para la frecuencia de 3.4 GHz.

En la Fig. 4.13, la corriente en el anillo exterior de las tres estructuras fluye de y_{min} a y_{max} en forma vertical produciendo dos nulos de corriente, esta parte de la estructura genera la primera resonancia y produce un diagrama de radiación como se presenta en la Fig 4.15. Por el contrario, la segunda resonancia se produce debido al resonador interno generando dos nulos cuando la corriente se desplaza de y_{max} a y_{min} (Fig. 4.14) dando como resultado un diagrama de radiación visto en la Fig. 4.16. El mismo comportamiento de las corrientes, dependiendo de la frecuencia, en los elementos resonadores de todas las estructuras generan un patrón de radiación de similar comportamiento.

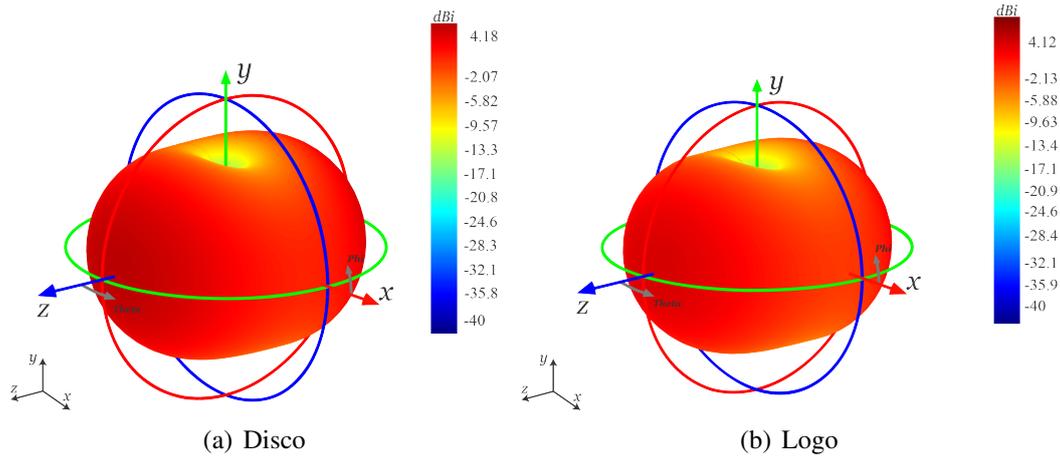


Fig. 4.15. Diagrama de radiación en la frecuencia de 2.4 GHz.

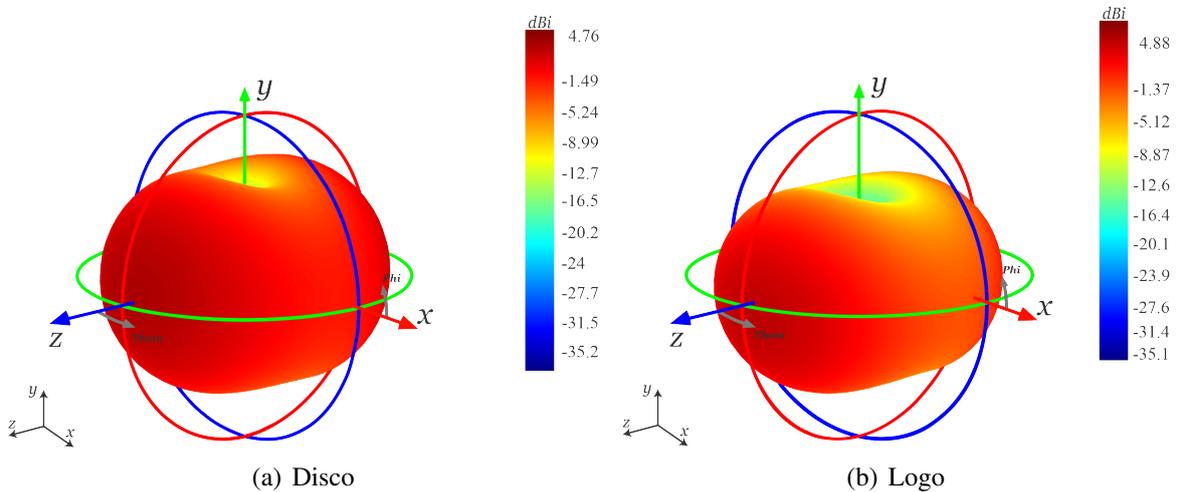


Fig. 4.16. Diagrama de radiación en la frecuencia de 3.4 GHz.

En la Fig. 4.17 se muestran los diagramas de radiación en el plano XZ para señalar la semejanza en la forma como las estructuras irradian la energía. Los patrones para la frecuencia de 2.4 GHz (Fig. 4.17(a)) como para la segunda frecuencia de resonancia (Fig. 4.17(b)) tienen la misma forma y su máxima radiación es perpendicular al plano de la antena. Esto demuestra que el patrón de radiación no varía a lo largo de la frecuencia dentro del ancho de banda de interés. La energía se irradia tanto en +z como en -z de la misma forma, consiguiendo así un patrón de radiación bidireccional estable.

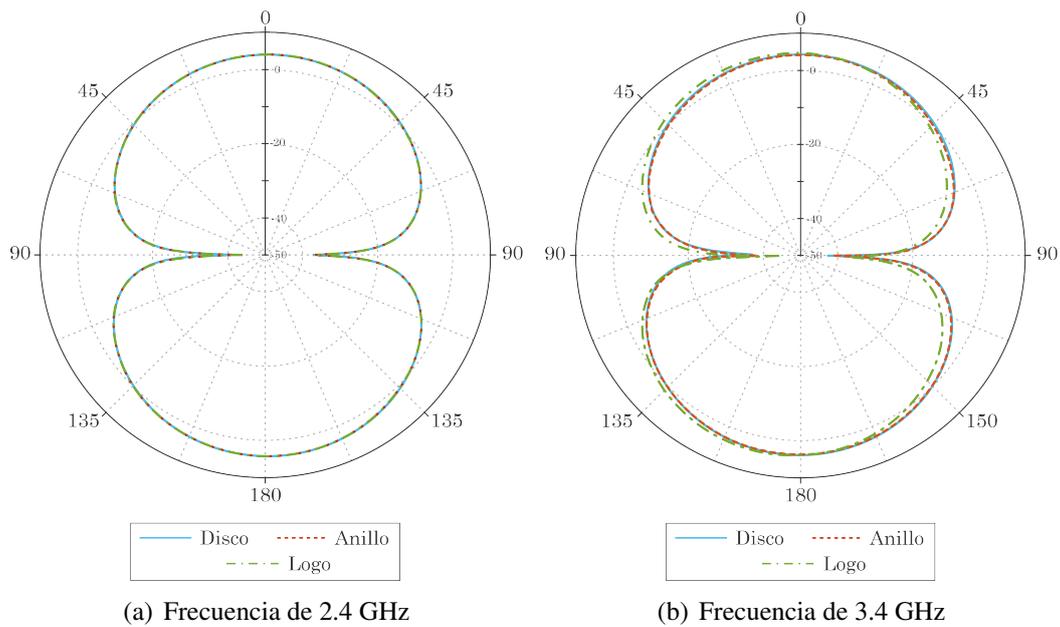


Fig. 4.17. Diagramas de radiación en forma polar.

El valor máximo de directividad y ganancia que se consiguen en los prototipos se describen en la tabla 4.3.

TABLA 4.3. Valores máximos de directividad y ganancia de las antenas textiles.

	Disco	Anillo	Logotipo
Directividad	4.762 dBi	4.794 dBi	4.879 dBi
Ganancia	3.541 dB	3.555 dB	3.387 dB

La eficiencia de las diferentes estructuras se muestra en la Fig. 4.18. Tanto la antena con el disco como con el anillo interno tienen una eficiencia favorable en todo el ancho de banda analizado mientras que la antena con el logo en el rango de frecuencias de 2.1 GHz a 3.55 GHz sufre una pequeña reducción en su eficiencia comparada con las otras configuraciones pero sigue siendo una eficiencia aceptable. Estos valores pueden ser comprobados utilizando los resultados de la tabla 4.3 en la ecuación 2.9.

Este análisis de la antena modificando la forma del resonador interno nos permite estimar los resultados si el elemento interno adquiere una forma arbitraria.

Para comprobar el funcionamiento de la antena tipo logotipo implementada sobre el textil jean, la antena ha sido caracterizada con el dispositivo miniVNA Tiny. En la Fig. 4.19 se presenta una gráfica comparativa de los resultados del coeficiente de reflexión S_{11} de la antena simulada y las antenas textiles fabricadas. Tanto la simulación como la medición de las antenas se realizaron

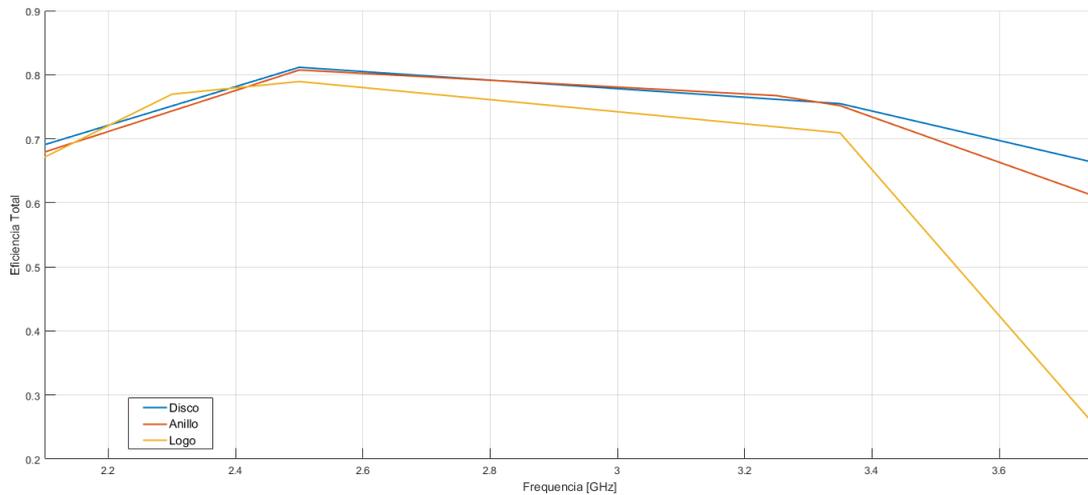


Fig. 4.18. Eficiencia de los modelos de antenas propuestos.

en el espacio libre, en ausencia del cuerpo humano. Para un mejor análisis se define a la antena fabricada con pintura a base de grafito como Antena 1, la antena realizada con cobre adhesivo es la Antena 2 y la antena con la pintura comercial Bare Conductive, Antena 3.

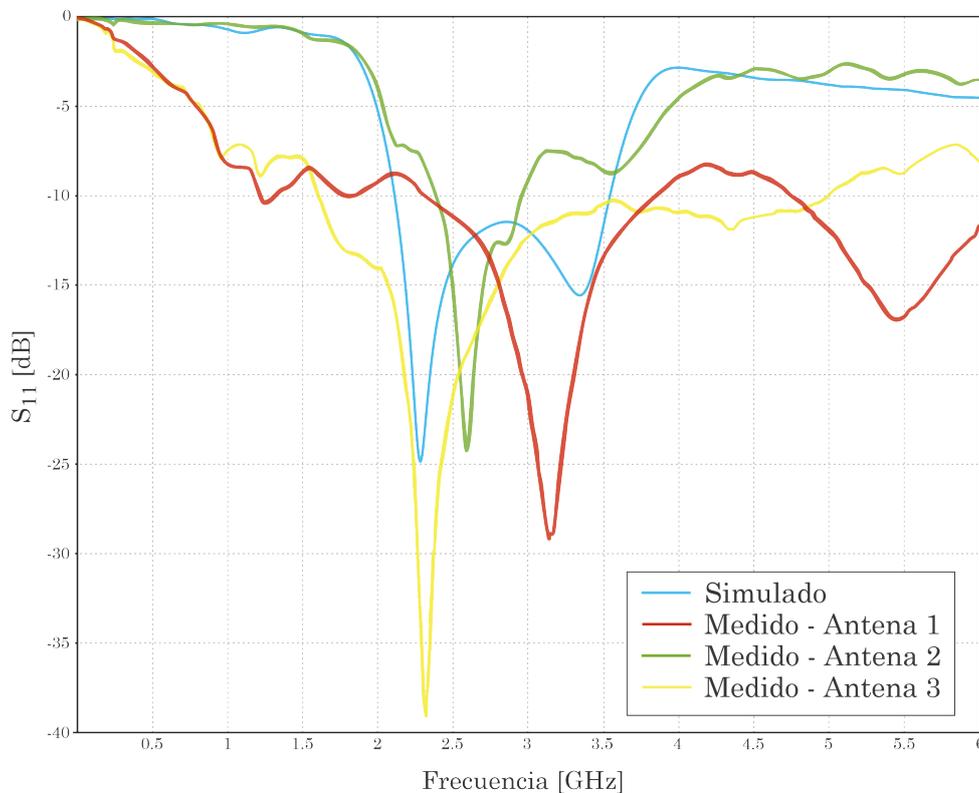


Fig. 4.19. Comparación de los resultados simulados y medidos de la antena textil tipo logotipo propuesta.

La figura muestra que el coeficiente de reflexión cambia notablemente para cada antena en

comparación con la antena simulada. Para la antena 1, el primer rango de frecuencias de trabajo va desde los 2.3 GHz hasta los 3.86 GHz obteniendo un ancho de banda del 50.65 % y el segundo rango de trabajo comienza en 4.7 GHz hasta valores superiores a 6 GHz. La primera frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 3.1 GHz teniendo un valor de acoplamiento de $S_{11} = -29$ dB y la segunda resonancia es cercana a los 5.5 GHz con un $S_{11} = -17$ dB. La antena hecha con cobre, Antena 2, consigue una buena adaptación desde 2.4 GHz hasta los 3 GHz obteniendo un ancho de banda del 22.22 % y un valor de acoplamiento máximo de $S_{11} = -24,5$ dB a los 2.6 GHz. La antena 3 alcanza valores inferiores a -10 dB en el rango de frecuencias de 1.6 GHz a 5 GHz logrando un ancho de banda del 103 %. El mayor nivel de acoplamiento se encuentra a los 2.4 GHz con un valor de $S_{11} = -39$ dB. Estos cambios pueden deberse al proceso de manufactura, al nivel de conductividad de los materiales utilizados o a un error en la ubicación de los elementos. Sin embargo, las antenas trabajan dentro del rango de frecuencias de la antena simulada.

Las antenas que presentan mejores resultados son la antena 1 y la antena 3, aunque la antena 3 presenta un mejor ancho de banda y un nivel de acoplamiento mucho mejor en la frecuencia de 2.4 GHz; la antena 1 exhibe un comportamiento multibanda que puede ser utilizada en aplicaciones del IoT para frecuencias de 2.4 GHz, 3.5 GHz o 5.2 GHz.

De igual manera, se puede predecir el comportamiento de una antena mediante sus valores de impedancia. En la Fig. 4.20 se muestra el comportamiento de impedancia de la antena 1. Se observa resonancias alrededor de 1.4 GHz, 3.3 GHz y 5.9 GHz y antiresonancias en 3.2 GHz y 5.7 GHz. El primer nivel máximo de acoplamiento tiene un valor de $Z = 48 + j \Omega$ a la frecuencia de 3.3 GHz, y su segundo máximo tiene un valor de $Z = 42 + 10j \Omega$ cerca de los 5.5 GHz. Estas frecuencias de acoplamiento concuerdan con lo mostrado en la Fig. 4.19.

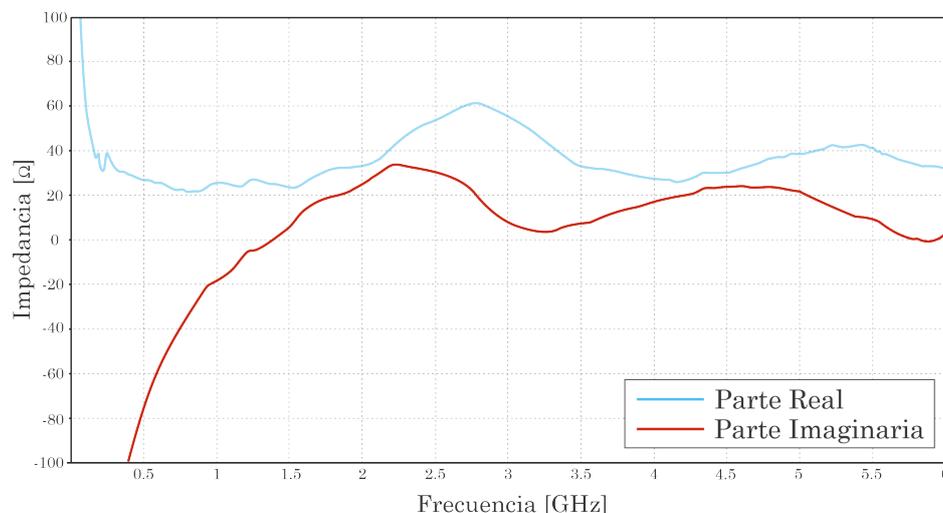


Fig. 4.20. Impedancia de la antena fabricada con pintura a base de grafito.

Para la antena 2 (ver Fig. 4.21), se presentan resonancias en las frecuencias de 1.45 GHz, 2.65

GHz y 4.20 GHz; mientras que en 2.51 GHz y 3.55 GHz se encuentran antiresonancias. Su máximo nivel de acoplamiento se encuentra a la frecuencia de 2.6 GHz con un valor de impedancia $Z = 44 - 2j \Omega$.

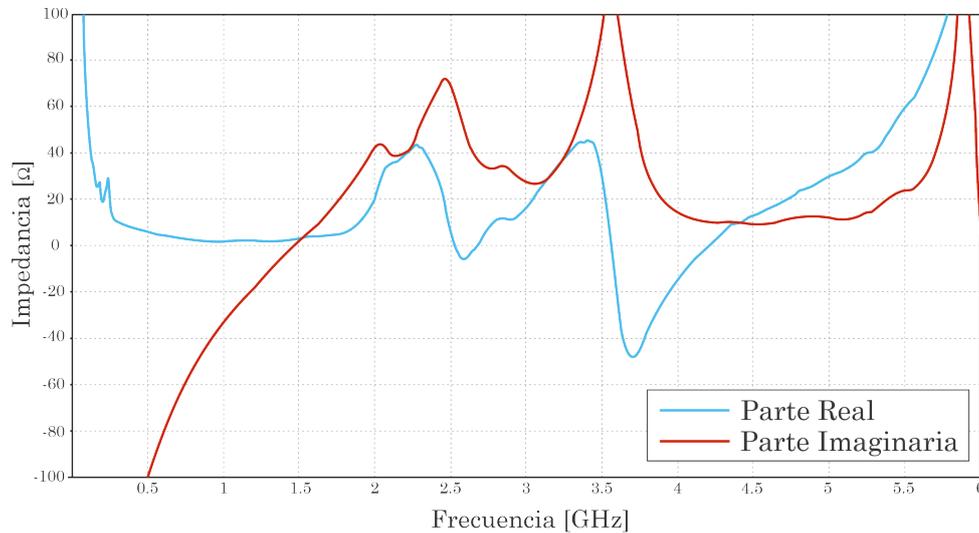


Fig. 4.21. Impedancia de la antena fabricada con lámina de cobre adhesivo.

La Fig. 4.22 presenta la impedancia de la antena 2. Se tiene una resonancia a 1.75 GHz y una antiresonancia a los 3.4 GHz, valor de frecuencia que coincide cuando la antena consigue su máximo nivel de acoplamiento. Su impedancia en esta frecuencia es $Z = 51 + 0j \Omega$.

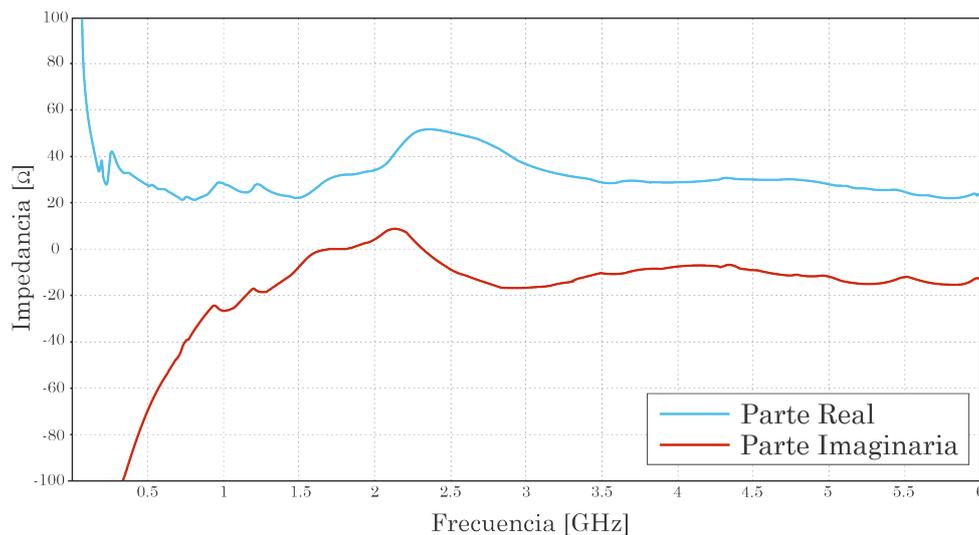


Fig. 4.22. Impedancia de la antena fabricada con pintura comercial eléctrica.

Estas oscilaciones que se observan en la parte imaginaria de las diferentes gráficas de impedancia se deben a un intercambio de energías (eléctrica y magnética) que varía en función de la

frecuencia. Para mejorar las características de las antenas lo que se trata de conseguir son valores adecuados en la parte real de impedancia y alcanzar un balance entre la energía eléctrica y magnética. Esta estabilidad en impedancia nos permite tener una buena adaptación de la antena al puerto de alimentación, evitar las pérdidas por retorno y conseguir un mejor ancho de banda.

4.2 Análisis de la antena textil propuesta comparada con una antena con forma arbitraria

En esta sección se presenta una estadística comparativa entre los resultados de ancho de banda, frecuencia central de operación (f_0), directividad y eficiencia de la antena textil propuesta y los resultados de la antena con el resonador interno en forma de disco.

4.2.1 Prueba de normalidad de muestras

Hipótesis:

$$H_0 = \text{los datos siguen una distribución normal}$$
$$H_a = \text{los datos no siguen una distribución normal}$$

Estadístico de las distribuciones:

$$\text{Shapiro-Wilk si } n \leq 50$$
$$\text{Lilliefors si } n > 50$$

Zona de rechazo:

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

Para realizar la pruebas de normalidad se utilizó el programa estadístico R. Puesto que el tamaño de muestra en cada caso es $n = 22$, se empleó el test de normalidad de Shapiro-Wilk.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados de los test de normalidad aplicados para cada parámetro. Para la frecuencia central, el ancho de banda y eficiencia se tienen P-valores > 0.05 tanto para la antena con el logotipo como para la antena con el disco interno. Entonces, se puede concluir que para estos parámetros se acepta la hipótesis nula (H_0), los datos se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza.

TABLA 4.4. Test de Normalidad.

Parámetro	Antena	Estadístico	P valor
Frecuencia central	Disco	0.916	0.064
	Logo	0.938	0.180
Ancho de banda	Disco	0.959	0.463
	Logo	0.954	0.371
Directividad	Disco	0.749	0.00008949
	Logo	0.781	0.0002544
Eficiencia	Disco	0.967	0.651
	Logo	0.952	0.349

Por el contrario, para el parámetro directividad se tiene un P-valor mucho menor a 0.05 para los dos tipos de antenas. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa H_a y se concluye que los datos no siguen una distribución normal en ambos casos. Para solucionar la falta de normalidad en este parámetro se utiliza un método no paramétrico, en este caso se emplea el test de Wilconxon.

Hipótesis:

H_0 = la antena textil tipo logotipo propuesta tiene menor o igual directividad que la antena con el resonador interno en forma de disco.

H_a = la antena textil tipo logotipo propuesta tiene mayor directividad que la antena con el resonador interno en forma de disco

Con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, la regla de decisión a una cola y realizando el test de Wilconxon para muestras independientes se obtiene los siguientes valores

Estadístico = 224

P-valor = 0.668

Debido a que el P-valor > 0.05 se acepta la hipótesis nula y se puede concluir que con un 95 % de confianza, la antena textil tipo logotipo propuesta tiene menor o igual directividad que la antena con el disco interno.

4.2.2 Prueba de Hipótesis

Una vez probada la normalidad de los datos, se establece la prueba de hipótesis que se aplica en cada parámetro. Hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

En el caso de la frecuencia central se comprobará si las medias de la f_0 de la antena tipo logotipo propuesta y de la f_0 de la antena con forma arbitraria son iguales o por el contrario hay diferencia entre ambas.

En la Fig.4.23 se tiene el resultado del estadístico de prueba T-Student con un nivel de significancia del 0.05 a dos colas. Si suponemos que las varianzas son desconocidas, tenemos un P-valor = 0,256. Como el P-valor es mayor a 0.05, no se rechaza H_0 y concluimos que las medias de la frecuencia central de operación de las antenas son iguales al 95 % de confianza.

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
fcentral	Equal variances assumed	11,044	,002	1,156	42	,254	,028773	,024886	-,021450	,078995
	Equal variances not assumed			1,156	34,712	,256	,028773	,024886	-,021764	,079309

Fig. 4.23. Estadístico de prueba para el parámetro frecuencia central.

Observando la Fig. 4.24 se puede verificar la similitud en los valores de la media de la frecuencia central de operación que se obtienen para las dos antenas.

	ANTENA	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
fcentral	disco	22	2,81164	,099669	,021250
	logo	22	2,78286	,060754	,012953

Fig. 4.24. Estadísticas de grupo para la frecuencia central.

Realizando un análisis similar para el ancho de banda, en la Fig. 4.25 se muestra el resultado de la prueba T Student. En este caso, el P-valor = 0,697; por lo tanto, la hipótesis nula es aceptada, es decir, que la media del ancho de banda de la antena tipo logo propuesta y la media del ancho de banda para la antena con resonador interno en forma de disco son iguales.

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
BW	Equal variances assumed	,519	,475	-,393	42	,697	-,73227	1,86543	-4,49687	3,03232
	Equal variances not assumed			-,393	40,683	,697	-,73227	1,86543	-4,50048	3,03593

Fig. 4.25. Estadístico de prueba para el parámetro ancho de banda.

De igual manera, la Fig. 4.26 exhibe los valores estadísticos de grupo del parámetro ancho de banda. De aquí se puede decir que la media del ancho de banda de la antenna propuesta es de 1.51 GHz y la media de la antenna arbitraria es de 1.50 GHz.

	ANTENA	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
BW	disco	22	53,4450	5,60268	1,19450
	logo	22	54,1773	6,72059	1,43283

Fig. 4.26. Estadísticas de grupo para el ancho de banda.

Por último, en la Fig. 4.27 se observa el resultado del estadístico de prueba. Como el P-valor es mayor a 0.05, la hipótesis nula es aceptada; por lo tanto, con un P-valor = 0,099 se concluye que la eficiencia en las antenas son iguales con un 95 % de confianza.

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
e	Equal variances assumed	1,288	,263	1,692	42	,098	,0231182	,0136632	-,0044553	,0506917
	Equal variances not assumed			1,692	38,884	,099	,0231182	,0136632	-,0045209	,0507573

Fig. 4.27. Estadístico de prueba para el parámetro eficiencia.

De acuerdo con la Fig. 4.28, la media de la eficiencia de la antenna propuesta es del 74,91 % y la media de la eficiencia de la otra antenna es 75,72 %; mostrando así la similitud en los valores.

	ANTENA	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
e	disco	22	,757245	,0513308	,0109438
	logo	22	,749127	,0383689	,0081803

Fig. 4.28. Estadísticas de grupo para la eficiencia.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

Se ha diseñado e implementado una antena textil tipo logotipo compacta y ligera que trabaja perfectamente dentro de la banda de frecuencias medias. La antena se compone de dos elementos resonantes, un anillo circular exterior y un disco circular deformado interior, que son excitados mediante alimentación por proximidad gracias a dos líneas de transmisión unidas por un divisor de potencia en unión T. Los resultados del análisis de esta estructura muestran dos resonancias generados por cada elemento resonante y un patrón de radiación estable en todo el rango de frecuencias donde se consigue adaptación.

Con la investigación realizada y en base al estudio de las diferentes estructuras, se desarrolló un modelo genérico que puede servir de guía para el diseño de diferentes antenas.

El substrato textil utilizado para el diseño de la antena fue la tela jean, debido a que es un textil muy comercial y del cuál se tenía aproximadamente sus valores dieléctricos. Sin embargo, sería interesante utilizar distintos textiles en el diseño de la antena y manipularlos de diferentes maneras para tener un análisis más detallado del comportamiento de la antena en diferentes situaciones.

Aunque los resultados de las antenas fabricadas con la simulación no compartieron tanta similitud; las estructuras trabajan dentro del rango de frecuencias que se obtuvo en simulación consiguiendo otras características, para el caso de la antena con pintura conductiva comercial un mayor ancho de banda y para la pintura a base de grafito un comportamiento multibanda.

El uso de diferentes materiales conductores para la elaboración de la antena textil motiva a la búsqueda de alternativas para desarrollar antenas robustas. Aquí se ha propuesto una pintura textil hecha con grafito que conduce la electricidad, esto puede servir como base para otras líneas de investigación.

El proceso de fabricación de la antena textil fue artesanal y se basó en la técnica de serigrafía; no obstante, mejorando la técnica de manufactura de la antena se puede conseguir mayor precisión en la implementación y así tener la posibilidad de tener un método sencillo de fabricación a mayor escala.

5.2 Recomendaciones

Realizar un estudio previo de las antenas textiles y temas relacionados que se encuentren en investigaciones de fuentes técnicas para tener una mayor comprensión del tema. Con esto se puede tener un punto de partida en lo que se desea hacer y cómo conseguirlo.

Para diseñar una antena textil, se debe tener en cuenta las propiedades dieléctricas del sustrato textil a utilizar. Aunque en la literatura se encuentren los valores electromagnéticos de algunos textiles, no son valores estándar como se había mencionado. Por lo tanto, es aconsejable realizar un proceso de caracterización del material textil a usar como sustrato para obtener sus valores dieléctricos reales.

Se debe tener precaución al momento de soldar el punto de alimentación en la antena textil. La forma clásica de soldar utilizando caudín y estaño en alambre no es conveniente ya que al no tener control sobre la temperatura del caudín el sustrato textil puede dañarse. De igual manera, el material conductor limita la manera de soldar; en este caso, al usar pintura textil se ha utilizado estaño en crema y una pistola de aire caliente para la unión del conector con la antena.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. B. Andrés, *Internet de las cosas*. Editorial Reus, 2021.
- [2] Q.-V. Pham, F. Fang, V. N. Ha, M. J. Piran, M. Le, L. B. Le, W.-J. Hwang, and Z. Ding, “A survey of multi-access edge computing in 5g and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116 974–117 017, 2020.
- [3] P. Khatri, “Dimensioning the anyhaul network for 5g,” *Impact of 5G on IP transport networks*, Nokia, 2018.
- [4] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, “Internet of things (iot) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5g-iot scenarios,” *Ieee Access*, vol. 8, pp. 23 022–23 040, 2020.
- [5] M. Shakhirul, A. Sahadah, M. Jusoh, A. Ismail, C. Nor, and F. Munirah, “The embroidered wearable antenna for uwb application,” in *Advanced Computer and Communication Engineering Technology*. Springer, 2015, pp. 357–363.
- [6] S. N. Mahmood, A. J. Ishak, T. Saeidi, H. Alsariera, S. Alani, A. Ismail, and A. C. Soh, “Recent advances in wearable antenna technologies: A review,” *progress in Electromagnetics Research B*, vol. 89, pp. 1–27, 2020.
- [7] N. Atanasov, G. Atanasova, and B. Atanasov, “Wearable textile antennas with high body-antenna isolation: Design, fabrication, and characterization aspects,” in *Modern Printed Circuit Antennas*. Intech Open, 2020.
- [8] A. R. Alhawari, A. Almawgani, A. T. Hindi, H. Alghamdi, and T. Saeidi, “Metamaterial-based wearable flexible elliptical uwb antenna for wban and breast imaging applications,” *AIP Advances*, vol. 11, no. 1, p. 015128, 2021.
- [9] S.-H. Li and J.-s. Li, “Smart patch wearable antenna on jeans textile for body wireless communication,” in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [10] S. Parameswari and C. Chitra, “Compact textile uwb antenna with hexagonal for biomedical communication,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, pp. 1–8, 2021.

- [11] J. Lilja, P. Salonen, T. Kaija, and P. de Maagt, “Design and manufacturing of robust textile antennas for harsh environments,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 9, pp. 4130–4140, 2012.
- [12] G. Monti, L. Corchia, and L. Tarricone, “Textile logo antennas,” in *Proceedings of 2014 Mediterranean Microwave Symposium (MMS2014)*. IEEE, 2014, pp. 1–5.
- [13] J. Tak and J. Choi, “An all-textile louis vuitton logo antenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1211–1214, 2015.
- [14] G. Monti, L. Corchia, E. Paiano, G. De Pascali, L. Tarricone, C. Tomassoni, and R. Sorrentino, “Textile wearable antenna for firefighters positioning,” in *2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [15] G. L. Atanasova, B. N. Atanasov, and N. T. Atanasov, “Fully textile dual-band logo antenna for iot wearable devices,” *Sensors*, vol. 22, no. 12, p. 4516, 2022.
- [16] A. L. Hernández, M. C. B. Cortés, A. Á. Barón, L. A. T. Tinjacá, and H. A. G. Ávila, “Tecnología vestible una ventaja competitiva en el entrenamiento deportivo,” *Ingenio Magno*, vol. 11, no. 1, pp. 98–111, 2020.
- [17] L. Yao, E. Li, J. Yan, Z. Shan, X. Ruan, Z. Shen, Y. Ren, and J. Yang, “Miniaturization and electromagnetic reliability of wearable textile antennas,” *Electronics*, vol. 10, no. 9, p. 994, 2021.
- [18] B. Chauhan, V. K. Srivastava, A. Pal, and S. Vijay, “Conformal wearable antenna design, implementation and challenges,” *Next-Generation Antennas: Advances and Challenges*, pp. 61–89, 2021.
- [19] L. Vallozzi, C. Hertleer, and H. Rogier, “Latest developments in the field of textile antennas,” in *Smart textiles and their applications*. Elsevier, 2016, pp. 599–626.
- [20] L. Alonso González *et al.*, “Design, simulation and manufacturing techniques for fully textile integrated microwave circuits and antennas,” 2018.
- [21] J. Santiso Bellón, “Diseño de una antena multimodo sobre substrato textil para aplicaciones corporales,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2012.
- [22] E. J. Tobón Ramírez *et al.*, “Antenas en sustratos textiles para aplicaciones en electrónica vestible,” B.S. thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2021.

- [23] P. A. Pillajo Garcia, “Diseño e implementación de una antena textil portable para monitoreo de señales biomédicas mediante un sistema de comunicaciones,” B.S. thesis, Riobamba Universidad Nacional de Chimborazo, 2021.
- [24] A. Arif, M. Zubair, M. Ali, M. U. Khan, and M. Q. Mehmood, “A compact, low-profile fractal antenna for wearable on-body wban applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 5, pp. 981–985, 2019.
- [25] N. Rais, P. J. Soh, F. Malek, S. Ahmad, N. Hashim, and P. Hall, “A review of wearable antenna,” in *2009 Loughborough antennas & propagation conference*. IEEE, 2009, pp. 225–228.
- [26] T. Page, “A forecast of the adoption of wearable technology,” *International Journal of Technology Diffusion (IJTD)*, vol. 6, no. 2, pp. 12–29, 2015.
- [27] M. Wu and J. Luo, “Wearable technology applications in healthcare: a literature review,” *Online J. Nurs. Inform*, vol. 23, no. 3, 2019.
- [28] B. Almohammed, A. Ismail, and 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, no. 5-6, pp. 646–663, 2021.
- [29] H. Rogier, S. Agneessens, A. Dierck, B. Spinnewyn, G.-J. Stockman, F. Declercq, P. Van Torre, L. Vallozzi, and D. V. Ginste, “Active textile antennas in professional garments for sensing, localisation and communication,” in *2013 European Microwave Conference*. IEEE, 2013, pp. 850–853.
- [30] J. A. Martínez Reyes, “Estudio y simulación de una antena multibanda para textiles inteligentes,” Master’s thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2018.
- [31] S. M. Ali, C. Sovuthy, M. A. Imran, S. Socheatra, Q. H. Abbasi, and Z. Z. Abidin, “Recent advances of wearable antennas in materials, fabrication methods, designs, and their applications: State-of-the-art,” *Micromachines*, vol. 11, no. 10, p. 888, 2020.
- [32] B. Mohamadzade, R. M. Hashmi, R. B. Simorangkir, R. Gharaei, S. Ur Rehman, and Q. H. Abbasi, “Recent advances in fabrication methods for flexible antennas in wearable devices: State of the art,” *Sensors*, vol. 19, no. 10, p. 2312, 2019.
- [33] H. Mattila, *Intelligent textiles and clothing*. Woodhead Publishing, 2006.

- [34] L. Corchia, G. Monti, E. De Benedetto, and L. Tarricone, "Wearable antennas for remote health care monitoring systems," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, 2017.
- [35] C. Hertleer, A. Van Laere, H. Rogier, and L. Van Langenhove, "Influence of relative humidity on textile antenna performance," *Textile Research Journal*, vol. 80, no. 2, pp. 177–183, 2010.
- [36] 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.
- [37] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2015.
- [38] H. Rogier, "Textile antenna systems: design, fabrication, and characterization," in *Handbook of Smart Textiles*. Springer, 2015, pp. 433–458.
- [39] G. Monti, L. Corchia, E. De Benedetto, and L. Tarricone, "A wearable wireless energy link for thin-film batteries charging," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2016, 2016.
- [40] G. Atanasova and N. Atanasov, "Small antennas for wearable sensor networks: impact of the electromagnetic properties of the textiles on antenna performance," *Sensors*, vol. 20, no. 18, p. 5157, 2020.
- [41] A. Y. Ashyap, S. H. B. Dahlan, Z. Z. Abidin, M. H. Dahri, H. A. Majid, M. R. Kamarudin, S. K. Yee, M. H. Jamaluddin, A. Alomainy, and Q. H. Abbasi, "Robust and efficient integrated antenna with ebg-dgs enabled wide bandwidth for wearable medical device applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56 346–56 358, 2020.
- [42] R. H. Aquino, "Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y wi-fi, bandas 2.4 ghz y 5.8 ghz," 2008.
- [43] A. Vico Martínez, "Diseño de antenas directivas en tecnología textil de tipo fabry-perot," B.S. thesis, 2014.
- [44] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & sons, 2011.
- [45] M. I. Ahmed, M. F. Ahmed, and A. H. A. Shaalan, "Novel electro-textile patch antenna on jeans substrate for wearable applications," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 83, pp. 255–265, 2018.

