



INAOE

**Diseño y optimización de antenas
flexibles a 28GHz para aplicaciones 5G.**

por

Aurea Patricia Medrano Montalvo

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el
grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS EN EL
ÁREA DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA DEL ESPACIO**

por el

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica (INAOE)**

Noviembre 2023

Santa María Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Roberto Stack Murphy Arteaga

©INAOE 2023

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



ABSTRACT

The 5G technology plays a pivotal role in bolstering other emerging technologies such as Artificial Intelligence, Virtual and Augmented Reality, and, of course, the Internet of Things. In conjunction with the latter, it influences the development of key sectors including healthcare, agriculture, supply chains, and smart cities.

Utilizing a combination of millimeter-wave and sub-6GHz frequencies, this technology doesn't aim to replace existing ones but rather offers a new option promising improved latency and high network capacity. This study presents a viable antenna that meets size and flexibility requirements, with parameters deemed suitable for integration into IoT devices.

The patch dimensions measure 2.283mm x 1.537mm, yielding a total volume of 10.30 mm^3 . The antenna exhibits two resonance frequencies: the primary at 28 GHz with return losses of -38.01 dB, and the secondary at 43.8 GHz with $|S_{11}| = -33.86 \text{ dB}$. Additional parameters include a bandwidth of 1,017.3 MHz, a gain of 5.83 dB, and a radiation efficiency of 80.78%, all evaluated at the resonance frequency of 28GHz.

Although manufacturing proved unfeasible due to project dimensions surpassing the capabilities of INAOE laboratory machines, future work contemplates manufacturing the antenna at the integrated circuit level, allowing integration with signal processing systems. Despite this challenge, the proposed design exhibits competitive characteristics compared to those reported in the literature.

RESUMEN

La tecnología 5G desempeña un papel fundamental en el impulso de otras tecnologías emergentes como la Inteligencia Artificial, la Realidad Virtual y Aumentada, y el Internet de las Cosas. En conjunto con este último, influye en el desarrollo de sectores clave como la salud, agricultura, cadenas de suministro y ciudades inteligentes.

Esta tecnología, que utiliza una combinación de frecuencias milimétricas y sub-6GHz, no busca reemplazar las existentes, sino ofrecer una nueva opción con promesas de mejor latencia y una capacidad de red elevada. Este trabajo presenta una antena viable que satisface requisitos de tamaño y flexibilidad, con parámetros aceptables para su integración en dispositivos de IoT, en específico para ser utilizados en aplicaciones de salud.

Las dimensiones del parche son 2.283mm x 1.537mm, con un volumen total de 10.30 mm³. La antena posee dos frecuencias de resonancia: la principal a 28 GHz con pérdidas por retorno de -38.01 dB, y la segunda a 43.8 GHz con $|S_{11}| = -33.86$ dB. En términos adicionales, la antena tiene un ancho de banda de 1,017.3 MHz, una ganancia de 5.83 dB y una eficiencia de radiación del 80.78%, evaluados en la frecuencia de resonancia de 28GHz.

Aunque la fabricación no fue posible debido a las dimensiones del proyecto que limitaron las máquinas del laboratorio del INAOE, se contempla en futuros trabajos la fabricación de la antena a nivel de circuito integrado, lo que permitiría su integración con el sistema de procesamiento de señales. A pesar de este desafío, el diseño propuesto muestra características competitivas con las reportadas en la literatura.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis. En primer lugar, quiero reconocer al Dr. Roberto Murphy, mi asesor, cuya orientación experta y dedicación fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. Su apoyo constante y sabios consejos han sido invaluable.

Agradezco también al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada, así mismo al proyecto No. 285199 por el apoyo parcial que permitió llevar a cabo esta investigación.

Mi gratitud se extiende al Laboratorio de Altas Frecuencias y LIMEMS donde tuve el privilegio de trabajar y aprender de profesionales apasionados y comprometidos. Agradezco la colaboración y el ambiente de trabajo que enriquecieron esta experiencia.

A mi familia, les agradezco su amor incondicional y su constante aliento. Su apoyo ha sido mi mayor motivación y fortaleza. Gracias por confiar en mí.

Finalmente, a mis amigos, quienes compartieron este viaje conmigo de cerca o en la distancia, les agradezco por su compañía, comprensión y ánimo en los momentos más desafiantes.

Este logro no habría sido posible sin la contribución de cada uno de ustedes. Muchas gracias.

DEDICATORIA

Al motor de mi vida, mi familia. En especial a mi madre y mi hermano, que están siempre en primera fila.

A mi papá que dejó sembrada la espinita de la curiosidad en mí, y a mis tíos Lupita y Amílcar que fueron mis cómplices desde que me inscribí en secreto a la maestría.

Tabla de contenido

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción..... | 1 |
| 1.1 | El Internet de las cosas (IoT)..... | 3 |
| 1.2 | IoT en el área de Salud y Bienestar..... | 4 |
| 1.3 | Consideraciones, requisitos y arquitecturas de IoT enfocado en Salud y Bienestar | 9 |
| 1.4 | Propuesta | 11 |
| 1.4.1 | Problemática | 11 |
| 1.4.2 | Objetivo general | 12 |
| 1.4.3 | Objetivos específicos | 12 |
| 2 | Marco Teórico | 13 |
| 2.1 | Antenas y tipos de antenas..... | 14 |
| 2.2 | Antenas de microstrip | 15 |
| 2.2.1 | Tipos de alimentación | 16 |
| 2.3 | Diseño de antenas de microstrip rectangulares..... | 18 |
| 2.3.1 | Sustratos para antenas de Microstrip..... | 18 |
| 2.3.2 | Dimensiones de la antena..... | 20 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.4 | Figuras de mérito de antenas | 22 |
| 2.4.1 | Potencia radiada | 22 |
| 2.4.2 | Patrón de radiación | 24 |
| 2.4.3 | Intensidad de radiación | 25 |
| 2.4.4 | Directividad | 26 |
| 2.4.5 | Relación delante/atrás..... | 27 |
| 2.4.6 | Impedancia de entrada..... | 27 |
| 2.4.7 | Eficiencia..... | 28 |
| 2.4.8 | Ganancia..... | 29 |
| 2.4.9 | Polarización..... | 30 |
| 2.4.10 | Ancho de banda | 34 |
| 2.4.11 | Pérdidas por retorno S11 | 35 |
| 2.4.12 | Relación señal a ruido (SNR)..... | 36 |
| 2.5 | Estado del arte: antenas con resonancia a 28GHz..... | 36 |
| 3 | Metodología..... | 38 |
| 3.1 | Elección del sustrato..... | 38 |
| 3.2 | Diseño de la antena de parche rectangular | 39 |
| 3.3 | Optimización de la antena | 42 |
| 4 | Discusión de los resultados..... | 48 |

| | | |
|-----|------------------------------|----|
| 4.1 | Simulación de la antena..... | 48 |
| 4.2 | Fabricación | 53 |
| 5 | Conclusiones..... | 54 |
| 5.1 | Trabajo futuro | 55 |
| | Lista de figuras..... | 56 |
| | Lista de tablas..... | 57 |
| | Referencias..... | 58 |

1 Introducción

Es muy claro que en los próximos años nos enfrentaremos a un gran aumento en el tráfico de datos, esto debido a que se espera que antes de que termine la década el número de dispositivos conectados a internet supere los 100 mil millones. Además, se deberá cubrir con necesidades como procesar grandes volúmenes de datos con mínimo retardo, hacerlo con mayor rapidez y asegurar la fiabilidad de la transmisión. Todo eso no será posible sin el surgimiento de nuevas tecnologías como el 5G.

Las tecnologías de quinta generación (5G) tienen como objetivo coadyuvar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [1] de la ONU, entre los que se destacan: Ciudades y comunidades sostenibles; Industria, innovación e infraestructura y; Salud y Bienestar.

El fortalecimiento de la tecnología de 5G no implica únicamente, como se cree, una conexión telefónica más rápida, sino que es la pieza clave para el impulso de la Inteligencia Artificial (IA), la Realidad Virtual y la Realidad Aumentada (VR y AR), así como para el surgimiento y consolidación de aplicaciones industriales como lo son: la agricultura, cadena de suministro, ciudades inteligentes o servicios médicos. El resultado de la combinación de la tecnología 5G y el Internet de las cosas, influirá en el impulso de estas industrias [2].

La 5G promete tener baja latencia y una alta capacidad de red, esta tecnología no viene a reemplazar de inmediato a las tecnologías anteriores, sino que es una opción que se agrega al abanico de oportunidades, esta transición permite gestionar de una mejor manera el espectro de frecuencias,

ya que en 5G se utiliza una combinación de frecuencias de ondas milimétricas y frecuencias sub-6 GHz para asegurar una experiencia de conectividad en cualquier región con una alta velocidad.

Está claro que la mayoría de los dispositivos para 5G e IoT requieren antenas para comunicarse, que deben cumplir con los requisitos de eficiencia, confiabilidad y bajo costo. Este trabajo busca contribuir al desarrollo de estas tecnologías proponiendo el diseño de antenas inteligentes para el rango de frecuencia alrededor de los 28GHz.

En este primer capítulo se aborda la problemática y las áreas de oportunidad en materia de comunicaciones inalámbricas, se busca contribuir en el desarrollo de nuevas tecnologías como lo es la tecnología 5G, para favorecer el cumplimiento de los 17 ODS, específicamente en el área de Salud y Bienestar. En esta sección se describen los objetivos del trabajo, que buscan aportar con un diseño novedoso de una antena para aplicaciones de 5G.

En el segundo capítulo se describen los conceptos sobre la teoría básica de antenas, se aborda el proceso de la selección del sustrato, y finalmente se hace referencia a los trabajos reportados en los últimos años sobre antenas y arreglos de antenas con frecuencia de resonancia en la banda de 28 GHz y se hace una comparativa de las características de estas antenas.

En el capítulo 3 se detalla la metodología propuesta para el modelado, diseño, fabricación y caracterización la antena, que esencialmente se compone del diseño de un parche individual, comparación entre diferentes diseños, simulación y fabricación de la antena. En el capítulo 4 se comparan los resultados obtenidos a partir de las mediciones y de las simulaciones hechas en el simulador HFSS (High Frequency Structure Simulator).

Finalmente, en el capítulo quinto de este trabajo se exponen las conclusiones y el trabajo a futuro o áreas de oportunidad.

1.1 El Internet de las cosas (IoT)

El Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es una tecnología que ha revolucionado la interacción con el mundo digital. Se refiere a la interconexión de dispositivos a través de internet, permitiéndoles compartir datos y comunicarse entre sí sin la necesidad de intervención humana.

El concepto del IoT nació en la década de 1990, cuando Kevin Ashton, un empresario británico, acuñó el término para describir la idea de conectar objetos a internet. Sin embargo, no fue hasta la década de 2000 que la tecnología comenzó a tomar forma gracias al desarrollo de sensores y dispositivos cada vez más pequeños y eficientes [3].

Hoy en día, el IoT se ha convertido en una de las tecnologías más prometedoras en el mundo digital, con aplicaciones en una amplia gama de sectores, incluyendo la salud, el transporte, la agricultura, la industria, el hogar y la ciudad inteligente.

1. Hogar inteligente: los dispositivos conectados al IoT en el hogar permiten el control de las luces, el termostato, la seguridad y la vigilancia, los electrodomésticos, la música, entre otros, desde un teléfono inteligente o una tableta.
2. Salud y Bienestar: el IoT se utiliza en la monitorización de la salud, el control de la actividad física y el seguimiento de los patrones de sueño para ayudar a los pacientes a mantenerse saludables y mejorar la atención médica.
3. Ciudades inteligentes: el IoT se puede utilizar para mejorar la gestión de los recursos de la ciudad, como el tráfico, la iluminación pública, la recolección de residuos, el suministro de agua y energía, así como la seguridad pública.

4. Agricultura inteligente: el IoT se puede utilizar en el seguimiento de los cultivos, el riego automatizado, la fertilización y el control de plagas para mejorar la productividad y reducir los costos.
5. Industria 4.0: el IoT se utiliza en la monitorización de la maquinaria, el mantenimiento predictivo, la automatización de procesos y la optimización de la cadena de suministro para mejorar la eficiencia y la productividad.

Para que un dispositivo pueda formar parte del IoT, debe tener algunas especificaciones técnicas básicas, como la capacidad de conectarse a internet, la capacidad de enviar y recibir datos, la capacidad de procesar información y la capacidad de interactuar con otros dispositivos. Además, es importante que estos dispositivos sean seguros y estén diseñados para proteger la privacidad y la integridad de los datos.

1.2 IoT en el área de Salud y Bienestar

La aplicación del IoT en el área de la Salud y Bienestar propiciará el acceso a los servicios de salud de una manera más oportuna, permitirá el control y diagnóstico oportuno de enfermedades crónicas, permitiendo mejorar la calidad de vida de las personas.

En el campo de la salud el IoT se podría derivar en diferentes aplicaciones:

- Internet portátil de las cosas (WIoT): implementa la telemedicina conectando a los pacientes con sus médicos, propiciando la “salud desde el hogar”. Valiéndose de diversos sensores en el cuerpo, monitorea variables biológicas de los pacientes, y los comparte con su médico.
- Internet de las cosas sanas (IoHT): derivación basada en la combinación de aplicaciones móviles y múltiples dispositivos conectados que propician los buenos hábitos.

- Internet de las cosas médicas (IoMT): se refiere a la utilización de dispositivos portátiles o implantables conectados a un teléfono móvil que actúa como una central de actividad personal.
- Internet de las nano cosas (IoNT): aplicación del IoT en nanomedicina para monitorear, diagnosticar o proporcionar tratamientos más personalizados permitiendo un monitoreo proactivo, salud preventiva y una mejor atención a enfermedades crónicas [4].

El área de Salud y Bienestar abarca muchos ámbitos del internet de las cosas, sin embargo se podría decir que los sensores son los principales responsables del desarrollo de esta área, los hay desde muy sofisticados de uso exclusivo por parte del personal médico, hasta muy sencillos y pequeños al alcance de cualquier usuario que lo necesite como lo son los dispositivos portátiles (*wearables*), que se encuentran en diferentes modelos desde pulseras, relojes, parches, sensores de muñeca, ropa, entre otros. En los últimos años se ha observado el incremento en la aceptación del uso de estos dispositivos, que permiten el monitoreo de diferentes procesos en las actividades diarias como lo son los ciclos de sueño, los periodos de actividad física, niveles de estrés, saturación de oxígeno en la sangre, ritmo cardiaco, entre otros.

En una reciente investigación se han analizado diferentes dispositivos para el monitoreo de las variables biomédicas, que podrían ser pieza clave en la detección temprana de una enfermedad cardiovascular como lo son el ritmo cardiaco, el ritmo cardiaco promedio, la variabilidad de frecuencia cardiaca, la presión en sangre, la saturación de oxígeno en sangre, la glucosa y los niveles de colesterol. Se revisaron diferentes dispositivos entre comerciales y no comerciales, donde se encontró que el 35% de los dispositivos eran pulseras o relojes inteligentes, cerca del 58% habían pasado por un proceso de aprobación de la FDA (aprobado, parcialmente aprobado, autorizado), en general los dispositivos comerciales podían monitorear el ritmo cardíaco, la

saturación de oxígeno en la sangre y el 12% de ellos tenía la capacidad de tomar un electrocardiograma (ECG), es importante mencionar que los dispositivos no comerciales más comunes fueron las pulseras y relojes inteligentes y los parches [5].

El monitoreo del ritmo cardiaco se ha convertido en uno de los parámetros de mayor interés, para detectarlo existen diferentes métodos de detección entre los cuales se destacan: Fotopletismografía (PPG por sus siglas en inglés), Fonocardiograma (PCG), Balistocardiograma (BCG) y Electrocardiograma (ECG). Todos ellos detectan el ritmo cardiaco y generan señales muy diferentes que se observan en la Figura 1.1[6].

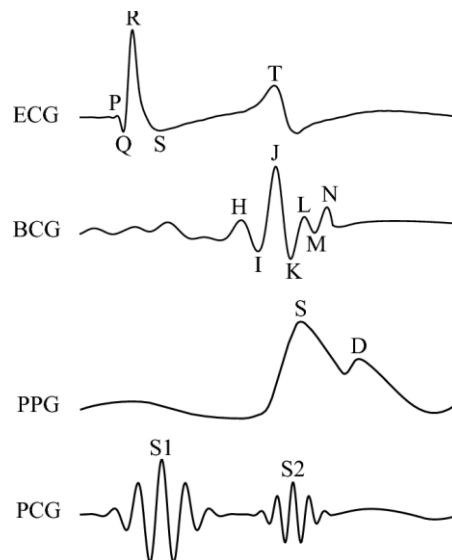


Figura 1.1 Comparación de las señales de ECG BCG PPG y PCG [6]

El método PCG graba los sonidos y soplos del corazón y así produce una señal que se compone de dos distorsiones principales S1 y S2; la primera es producida por el cierre de las válvulas mitral y tricúspide, y la segunda es el sonido que se produce cuando las válvulas aórtica y pulmonar se cierran. Un buen detector debe ser capaz de detectar estos dos sonidos con precisión y poco ruido. Este método es muy susceptible al movimiento y es utilizado en [7], [8], y uno de los principales problemas es el tratamiento de la señal ya

que necesita un robusto sistema que ayude a mejorar la amplitud y un proceso de filtrado muy cauteloso ya que este método es altamente susceptible a percibir ruido. Con un buen diseño se puede alcanzar hasta un 90% de precisión.

En [9] se hace uso del método BCG, en lo que es un parche de sustrato flexible (hilos de nylon, polyester y plata) que se adhiere a la ropa y permite identificar el movimiento del corazón, para después transmitir la información obtenida vía Bluetooth; éste es un método potencialmente en desuso que consiste en la representación gráfica del movimiento repetitivo del cuerpo humano provocado por la rápida aceleración de la sangre al ser expulsada del corazón y ser transportada a través de los vasos sanguíneos durante los periodos de relajación y contracción [10]. Este método aprovecha la deformación provocada por este proceso en lugares específicos como en la muñeca o en la carótida donde la pulsación es más perceptible.

La mayoría de los dispositivos comerciales utilizan la técnica de PPG con acelerómetros para mejorar la precisión. Este es un método no invasivo que utiliza una fuente de luz y un fotodetector en la superficie de la piel para medir las variaciones volumétricas de la circulación sanguínea. Con longitudes de onda mayores se tiene una penetración de los tejidos más eficiente, aunque la luz infrarroja es más adecuada también es la más susceptible a variaciones por el movimiento, por esto la luz verde se convierte en la mejor opción en diferentes ocasiones. Este detector puede ir acompañado de un acelerómetro para capturar la dirección del movimiento y así disminuir el ruido producido por el movimiento.

El ECG es probablemente el método que aporta más información y el más utilizado por los profesionales de la salud, éste consiste en la detección de la actividad eléctrica del músculo cardíaco haciendo uso de los potenciales de acción que provienen de la despolarización de las células cardiacas, esto

gracias a la colocación de electrodos en zonas estratégicas. La onda de la señal del ECG representa tres momentos clave de la actividad cardiaca, la onda P relacionada con la despolarización auricular, el complejo QRS corresponde a la despolarización de los ventrículos y la onda T que representa el inicio de la ventricular [11]. Este método es utilizado en [12], [13], donde buscan convertir el monitor de ECG en un monitor portable utilizando las tecnologías de ZigBee y WiFi, debido a la naturaleza de los datos concluyen en utilizar WiFi y obtienen resultados favorables al encontrar que es una forma de transmisión confiable y rápida para el monitoreo a largo plazo.

Tabla 1.1 Sensores de ritmo cardíaco con comunicación inalámbrica

| Referencia | Tamaño | Flexible (S/N) | Material | Transmisión |
|------------|-------------|----------------|-----------------------------------|--|
| [7] | 15 – 30 mm | Si | Silicona | Inalámbrica / tarjeta <i>ESP32 (WiFi/Bluetooth)</i> |
| [9] | ≈ 30 mm | Si | Hilos de nylon, polyester y plata | Inalámbrica / módulo bluetooth (no especifica modelo) |
| [12] | -- | No | -- | Inalámbrica / tarjeta <i>ESP8266-12E (WiFi)</i> |
| [13] | 25mm x 55mm | No | PCB | Inalámbrica / 2.4 GHz Inverted F antenna, Texas Instruments (Zigbee) |
| [14] | -- | No | -- | Inalámbrica / WiFi |

En la Tabla 1.1 se muestra un resumen del estado del arte de los sensores de ritmo cardiaco que tienen la capacidad de transmisión inalámbrica, en esta tabla se enuncian otras características físicas como el tamaño y tipo de material. De aquí se establecen los primeros criterios para la caracterización de la antena, idealmente se espera que sea de un tamaño menor a 20x20

mm², que sea fabricada en un sustrato flexible que posibilite adaptarse a la forma del sensor, por ejemplo, una pulsera o reloj.

1.3 Consideraciones, requisitos y arquitecturas de IoT enfocado en Salud y Bienestar

El Internet de las cosas se conforma de diferentes procesos para la adquisición de datos como lo son la identificación, el censado, la transmisión y la computación o manejo de los datos. Este trabajo está enfocado especialmente en el proceso de transmisión. En la mayoría de las aplicaciones de IoT se utilizan comunicaciones inalámbricas, ya que éstas lo proveen de disponibilidad y movilidad, importantes requerimientos en IoT. En la Figura 1.3 se observan las tecnologías inalámbricas más utilizadas en IoT, éstas se pueden dividir en Redes Centrales (*CNs Core Networks*), que permiten la conexión entre redes por ejemplo las redes centrales del 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [15], y las Redes de Acceso (*ANs Access Networks*), que proveen comunicación entre los objetos de IoT y las Redes Centrales, por ejemplo, el WiFi o la comunicación satelital.

El 3GPP es una organización que busca establecer estándares para las tecnologías de comunicaciones móviles, para garantizar la interoperabilidad y compatibilidad entre dispositivos. El 5G NR (*5G New Radio*) consta de dos fases, la primera está definida en la versión 15 del 3GPP (*3GPP Release 15*) en el que se establece la frecuencia de operación en bandas sub-6 GHz (450 MHz – 7.125GHz). La segunda fase, lanzada en octubre de 2020, definida en la versión 16 del 3GPP (*Release 16*), propone un rango de frecuencias en ondas milimétricas (24.25 – 52.6 GHz).

Diferentes investigaciones como en [16], [17] proponen una arquitectura similar que consiste principalmente en 4 capas: adquisición de datos y censado, red, servicios de intercambio de datos en segundo plano y técnicas

de encriptado y seguridad de los datos. En la Figura 1.2 se resumen los procesos y los principales actores en cada capa.

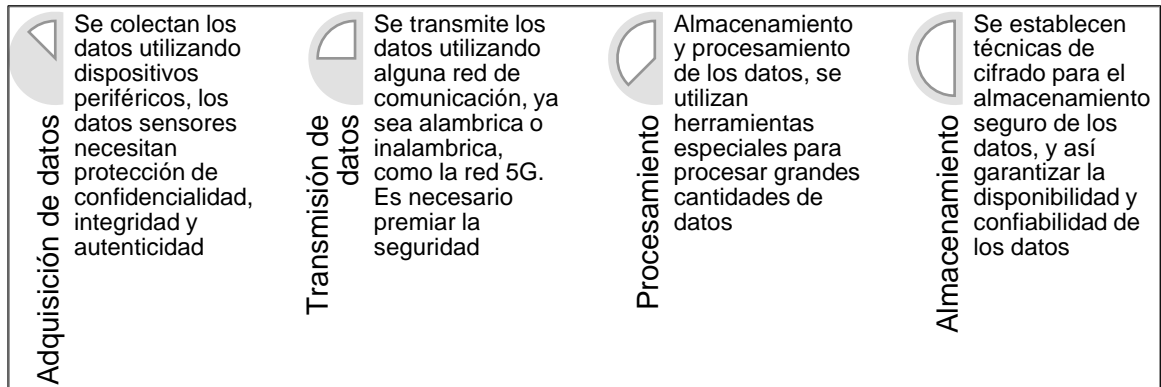


Figura 1.2 Capas de la arquitectura de IoT enfocado en Salud y Bienestar

En [17] enlistan una serie de problemáticas encontradas en diferentes aplicaciones de IoT enfocadas en Salud y Bienestar, destaca el problema de la retransmisión de los datos, normalmente el proceso comienza con el censado, después se transmite a un dispositivo de control y posteriormente se retransmite a un centro de monitoreo, esto afecta la calidad de los datos y retrasa la recepción de éstos para posteriormente poder analizarlos.

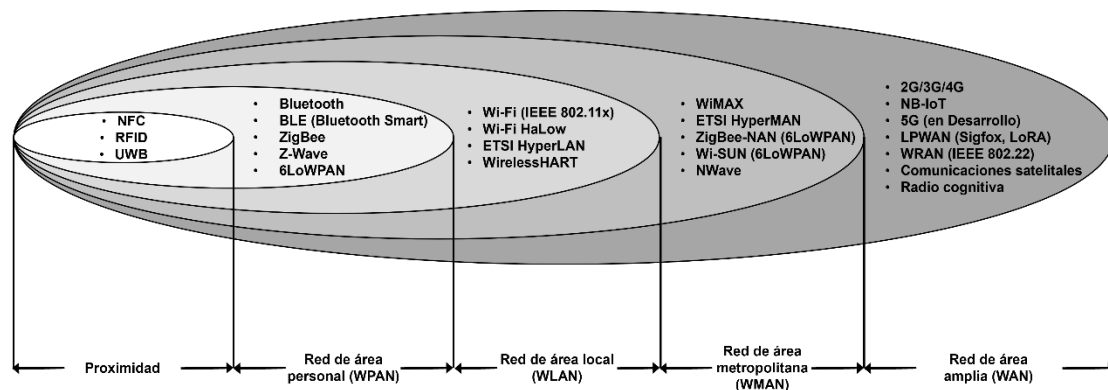


Figura 1.3 Tecnologías inalámbricas utilizadas en IoT [15]

1.4 Propuesta

1.4.1 Problemática

En los últimos años hemos sido testigos del incremento en la aceptación del uso de dispositivos *portables* que permiten monitorear actividades diarias como lo son los ciclos de sueño, los periodos de actividad física, niveles de estrés, saturación de oxígeno en la sangre, ritmo cardiaco, entre otros; este acelerado crecimiento ha propiciado que la infraestructura y las características de las redes actuales no sean suficientes para cubrir estas necesidades de comunicación.

Con el reciente lanzamiento de la versión 16 del 3GPP se ha observado un área de oportunidad en el desarrollo de sistemas de transmisión en el rango de las frecuencias milimétricas, éste estándar propone la utilización de un rango de frecuencias entre 24.25 GHz y 52.6 GHz, además este rango de frecuencias resulta ser un buen candidato para aplicaciones de IoT en el área de Salud y Bienestar.

Este trabajo busca diseñar una antena, que cumpla con características como alta ganancia y eficiencia, amplio ancho de banda (que cubra las bandas de frecuencia n58 y n62), además de ser de un tamaño compacto para aprovechar la capacidad de portabilidad, característica importante de los dispositivos móviles.

Se optimizará las dimensiones y geometría de las antenas, además que se buscará automatizar la selección del sustrato, optimizando las variables para que nos permita diseñar una antena con las características deseadas. Aunado a una saturación en la infraestructura actual y el diseño compacto deseado, se busca fabricar una antena que cumpla con los principios de disponibilidad, integridad y confidencialidad de los datos.

1.4.2 Objetivo general

Desarrollar y caracterizar una antena con tecnología de microstrip, con alta ganancia y eficiencia, que trabaje alrededor de la frecuencia de resonancia de 28 GHz cubriendo así las bandas de frecuencia destinadas para aplicaciones en comunicaciones 5G.

1.4.3 Objetivos específicos

- a) Determinar los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento de la antena.
- b) Simular la antena utilizando la herramienta de simulación HFSS (High-Frequency Structure Simulator).
- c) Fabricar la antena utilizando los parámetros propuestos.
- d) Realizar mediciones y comparar los resultados simulados y los valores obtenidos de la antena fabricada.

2 Marco Teórico

La RAE define una antena como un “dispositivo con formas muy diversas, sirve para emitir o recibir ondas electromagnéticas” [18]. En otras palabras, una antena es la estructura de transición entre el espacio libre y una línea de transmisión; en condiciones ideales, la energía generada por la fuente debería de ser transmitida totalmente por la antena, sin embargo, debido a diferentes condiciones del medio se generan pérdidas que serán discutidas más adelante en este capítulo.

Las antenas son quizá el componente más importante en los sistemas de comunicación inalámbricos. Un buen diseño mejora el rendimiento de todo el sistema y además que podría simplificar su complejidad [19].

Este capítulo está dividido en cinco secciones, en la primera describen las antenas más comunes y sus principales aplicaciones. En la segunda sección se aborda la historia de las antenas de microstrip y se definen las características principales, así como los tipos de alimentación y los sustratos comerciales. La tercera sección abarca la elección de un sustrato que por la naturaleza del proyecto deberán tener una constante dieléctrica alta, una tangente de pérdidas baja, además deberá funcionar para altas frecuencias (alrededor de 28 GHz) y tendrá que ser flexible; y el procedimiento para calcular las dimensiones de una antena de parche rectangular. En la cuarta sección se describen las figuras de mérito de antenas, que servirán para definir el modelo más adecuado para el proyecto. Finalmente, en la última sección se hace una comparación del estado del arte en antenas que trabajan alrededor de la frecuencia de 28 GHz.

2.1 Antenas y tipos de antenas

Dadas las múltiples aplicaciones de las antenas, éstas pueden adoptar diferentes geometrías y materiales para satisfacer diferentes necesidades, en general se podrían agrupar en [19], [20]:

- **Antena dipolar:** Alambre recto en forma de “T” son bien conocidas ya que se encuentran en automóviles, radios, radios portátiles y un sinnúmero de dispositivos.
- **Antena de lazo:** Alambre que forma un lazo cerrado de N vueltas, formando cualquier geometría (rectángulo, cuadrado, elipse, etc.), sin embargo, la más común es la circular.
- **Antena de apertura:** Se popularizaron debido a la demanda de antenas más complejas y de mayor frecuencia. Son la terminación de guía de onda. Muy útiles en aplicaciones aeronáuticas y espaciales.
- **Antena de microstrip:** Consiste en un parche metálico sobre un sustrato dieléctrico, el parche puede tomar casi cualquier geometría, aunque la rectangular y circular son las más comunes. Usadas en aplicaciones de alta frecuencia.
- **Antenas de reflexión:** Construidas para mejorar las características de radiación o recepción. Las más comunes son las de tipo parabólico. Éstas son la combinación de cualquiera de los tipos ya mencionados con un reflector.

Este trabajo se enfoca en las antenas de microstrip, que por sus características como bajo costo de fabricación, versatilidad en términos de su frecuencia resonante, polarización y patrón; además es fácil de montar en diferentes superficies. Por la naturaleza del proyecto se vuelven las más atractivas.

2.2 Antenas de microstrip

Los antecedentes de las antenas de microstrip, también llamadas antenas de parche, se remontan a la década de los 50's cuando diversos grupos de investigadores, como Robert Barret en 1949, propusieron utilizar circuitos impresos para aplicaciones de UHF y microondas; a partir de esto varios laboratorios trabajaron en esta tecnología [21]. En 1953 G. A. Deschamps hizo lo suyo al proponer el concepto de radiadores de microstrip por primera vez, y fue hasta 1970 que Robert E. Munson lo desarrollara en conjunto con su equipo de investigadores utilizando un sustrato de bajas pérdidas [22].

En la Figura 2.1 se muestra la estructura básica de una antena microstrip que se compone de un parche (elemento radiante), el sustrato dieléctrico, y el plano de tierra. Normalmente la constante dieléctrica del sustrato está en el rango de $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$.

Este tipo de antenas admite diversas geometrías, las formas más sencillas comprenden geometrías circulares, cuadradas, rectangulares, triangulares, de anillo, entre otras; éstas pueden ser modificadas dependiendo de las necesidades del proyecto. En [23] proponen el uso de estructuras fractales para mejorar la eficiencia de las antenas.

La Tabla 2.1 compara las principales ventajas y desventajas de este tipo de antenas.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las antenas microstrip

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Tamaño compacto | Ancho de banda limitado |
| Económicas de diseñar y construir | Ganancia limitada |
| Es posible la polarización circular y lineal | Baja eficiencia |
| Es posible configurar múltiples frecuencias de resonancia | Altas pérdidas en la red de alimentación a altas frecuencias |
| Estructura flexible y adaptable a casi cualquier geometría | |

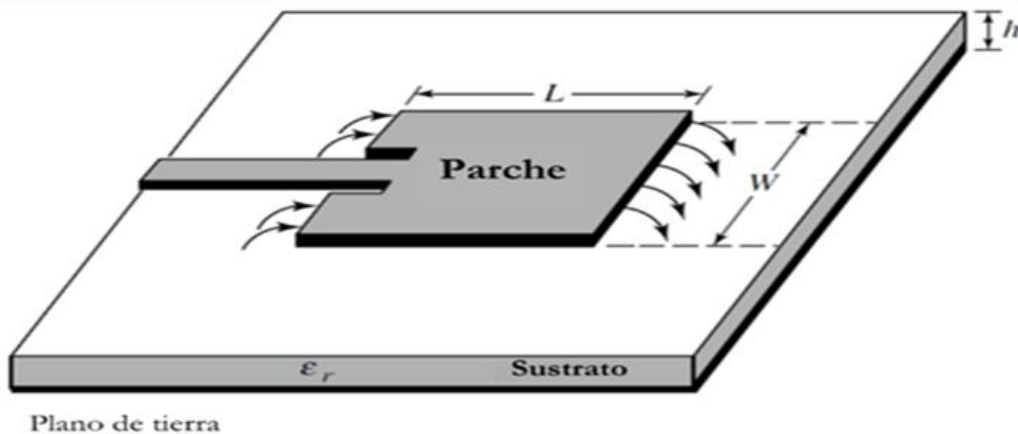


Figura 2.1 Estructura de una antena microstrip [19]

2.2.1 Tipos de alimentación

Existen diferentes técnicas de alimentación en antenas de microstrip; las cuatro más utilizadas son: línea de microtira, coaxial, apertura y de proximidad, ilustradas en la Figura 2.2. El método de línea de microtira, compuesto por una tira conductora, usualmente mucho más angosta que el parche; es fácil de fabricar, simple de ajustar y modelar, pero al aumentar el grueso del sustrato, trae consigo el aumento de radiación no deseada, limitando el ancho de banda [19].

La alimentación coaxial es ampliamente utilizada, la parte interna del conductor coaxial está unida al parche de radiación mientras que el conductor externo está conectado al plano de tierra; fácil de fabricar y de

ajustar, difícil de modelar especialmente para sustratos delgados y también tiene un ancho de banda limitado [19].

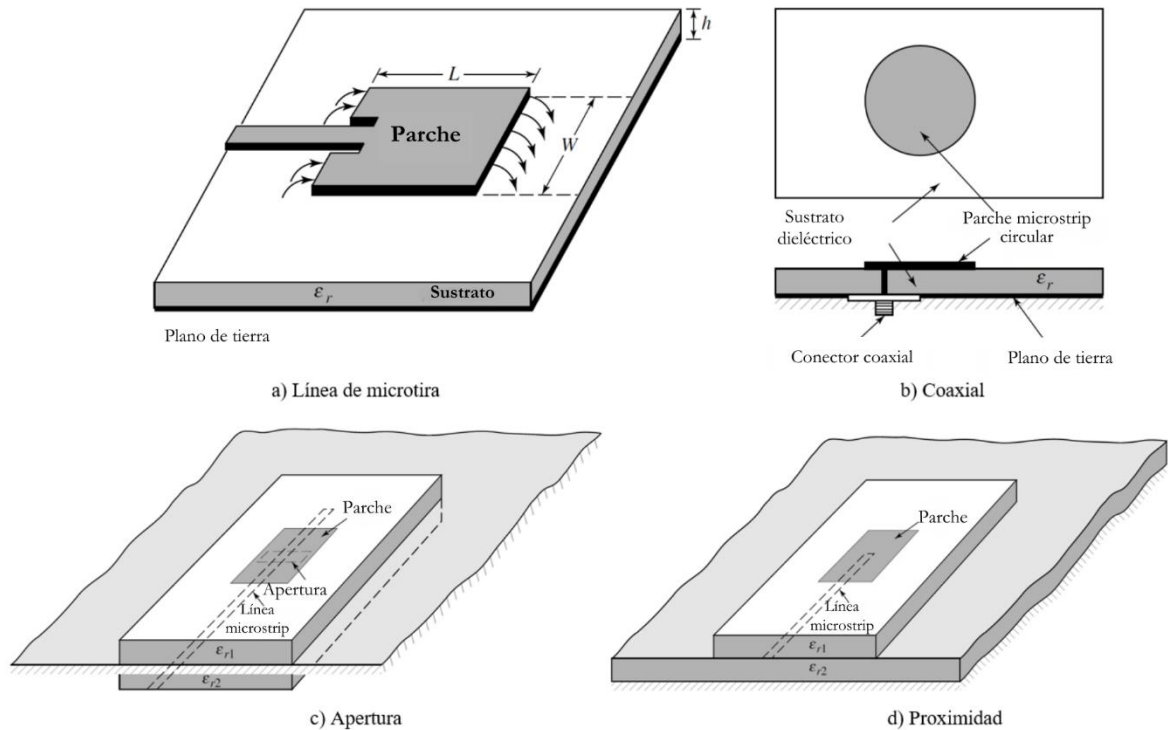


Figura 2.2 Tipos de alimentación [19]

El método más difícil de fabricar es la alimentación de apertura, éste consiste en dos sustratos separados por un plano de tierra. Tiene una línea de microtira en el lado inferior del sustrato de abajo, cuya energía se acopla al parche a través de una ranura en el plano de tierra que separa los dos sustratos. Normalmente se elige un material con un alta constante dieléctrica para el sustrato inferior y sustrato delgado con baja constante dieléctrica para el superior [19].

El método de proximidad brinda el mayor ancho de banda, alrededor del 13%, es fácil de modelar, reduce la radiación no deseada, pero el proceso de fabricación es difícil [19].

2.3 Diseño de antenas de microstrip rectangulares

2.3.1 Sustratos para antenas de Microstrip

Uno de los primeros pasos a considerar en el diseño de una antena es la elección del sustrato ya que éste es una pieza clave en el desempeño y en el tamaño de la antena. El sustrato elegido deberá de satisfacer los requerimientos eléctricos y mecánicos necesarios para la antena y su aplicación [24].

El sustrato afecta muchas propiedades de las antenas, como la impedancia, la eficiencia, el ancho de banda, la directividad o el rendimiento en general. Es importante tener en mente las siguientes consideraciones al elegir el sustrato para una antena:

1. **Permitividad dieléctrica:** Es una propiedad que afecta la velocidad de propagación de la onda en el sustrato. Un sustrato con una alta permitividad dieléctrica resultará en una onda más lenta, además de una capacitancia parásita mayor lo que aumenta las pérdidas.
2. **Pérdidas en el dieléctrico:** Se producen cuando la energía de la señal se convierte en calor en el sustrato. Esto puede reducir la eficiencia de la antena y limitar su rango de operación.
3. **Espesor del sustrato:** El espesor del sustrato es importante porque afecta la impedancia de la antena. Un sustrato más grueso puede reducir la impedancia y eficiencia de la antena, pero aumentar su ancho de banda, mientras que un sustrato más delgado puede aumentar la impedancia y eficiencia, pero reducir el ancho de banda.
4. **Conformabilidad:** Dependiendo de la aplicación de la antena podría necesitar de características de flexibilidad, como en el caso de los dispositivos portátiles para aplicaciones en la telemedicina, donde la antena de microstrip deberá ser flexible y adaptarse a la forma del dispositivo.

5. Costo y disponibilidad: Éstos también son aspectos importantes para considerar al elegir una antena de microstrip. Los sustratos más comunes y ampliamente utilizados pueden ser más asequibles y fáciles de obtener, mientras que los sustratos más especializados pueden ser más caros y difíciles de encontrar.

| Sustrato | ϵ_r | $\tan \delta$ | Frec. Máxima (GHz) | Espesor (mm) | Fabricante | Costo |
|-------------------|--------------|---------------|--------------------|----------------|----------------------|----------|
| Rogers RO3003 | 3.0 | 0.0010 | 77 | 0.13 - 1.52 | Rogers Corp. | Moderado |
| Megtron 7 | 3.11 | 0.0017 | 60 | 0.05 - 0.75 | Panasonic | Moderado |
| Nelco N4000-29 | 2.95 | 0.0017 | 50 | 0.0508 - 1.27 | Park Electrochemical | Moderado |
| Taconic TLX-8 | 2.55 | 0.0017 | 50 | 0.064 - 6.35 | Taconic | Moderado |
| Rogers RO4003 | 3.55 | 0.0027 | 40 | 0.203 - 1.524 | Rogers Corp. | Moderado |
| RT/duroid 6035HTC | 3.5 | 0.0013 | 40 | 0.254 - 1.524 | Rogers Corp. | Alto |
| Isola FR408HR | 3.66 | 0.0095 | 40 | 0.0762 - 0.254 | Isola | Moderado |
| Taconic TLY-5 | 2.2 | 0.0009 | 77 | 0.09 - 1.52 | Taconic | Moderado |
| Megtron 6 | 3.62 | 0.0042 | 110 | 0.1 - 0.5 | Panasonic | Moderado |
| RO4350B | 3.66 | 0.0037 | 40 | 0.1 - 1.52 | Rogers | Moderado |
| DuPont Pyralux TK | 2.5 | 0.002 | 25 | 0.05 - 0.1 | DuPont | Moderado |
| Isola FR408 | 3.65 | 0.0125 | 24 | 0.05 - 3.2 | Isola | Moderado |
| Nelco N7000-2 | 3.8 | 0.1 | 10 | 0.0508 - 1.27 | Nelco | Moderado |
| Nelco N4000-13 | 3.7 | 0.009 | 10 | 0.051 - 1.27 | Park Electrochemical | Moderado |
| RT/duroid 5880 | 2.2 | 0.0004 | 40 | 0.127 - 1.575 | Rogers Corp. | Alto |
| RT/duroid 6002 | 2.94 | 0.0012 | 40 | 0.13 - 3.18 | Rogers Corp. | Alto |
| Isola IS680 | 3.2 | 0.003 | 20 | 0.51 - 1.5 | Isola | Moderado |
| Arlon AD1000 | 10.2 | 0.0023 | 14 | 0.635 - 1.27 | Arlon | Alto |

Tabla 2.2 Comparativa de sustratos semiflexibles

2.3.2 Dimensiones de la antena

Existen numerosos estudios se han enfocado en la predicción y evaluación de las características de radiación de antenas, en especial las de forma rectangular, que debido a su simplicidad son ampliamente utilizadas, al igual que las antenas circulares. Sin embargo, al igual que con cualquier otra antena, no es posible obtener una solución exacta de ésta. Diversos métodos se emplean para analizar antenas de parche, y el modelo de líneas de transmisión destaca como una aproximación ampliamente aceptada. Este modelo establece una base sólida para la realización de simulaciones detalladas en etapas posteriores. Utilizando el modelo de líneas de transmisión se calcularán las dimensiones W y L del parche, no obstante, este modelo contempla el efecto de borde.

2.3.2.1 Efecto de borde

Este efecto existe debido a que el parche tiene dimensiones finitas. El efecto de borde depende del ancho y largo del parche, así como del espesor del sustrato, y se presenta en dos medios con permitividades eléctricas distintas, como se observa en la Figura 2.3 a), la distribución del campo cambia de un medio a otro, en el caso específico de una antena de microstrip los medios son el aire y el sustrato dieléctrico [25]. La mayoría de las líneas del campo se observan dentro del sustrato, sin embargo, se aprecian también algunas líneas en el aire. Se implanta el concepto de constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} , que toma en cuenta el efecto de borde de la antena, combinando las permitividades de los dos medios, supone que la antena se encuentra dentro de un solo medio con permitividad constante, como se observa en la Figura 2.3 b). Éste término es muy importante para el modelo la línea de transmisión ya que la frecuencia y la constante dieléctrica efectiva están correlacionadas.

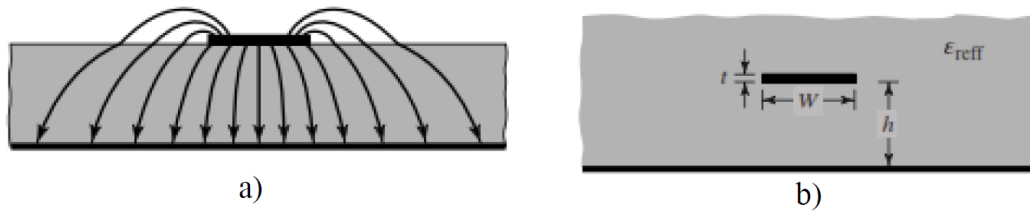


Figura 2.3 a) Distribución del campo eléctrico, en diferentes medios b) Permittividad eléctrica efectiva[19]

2.3.2.2 Dimensiones de una antena de parche rectangular

La frecuencia de resonancia, en un parche rectangular, está dado por la longitud (L) del parche, el ancho (W) tiene un efecto menor sobre la frecuencia de resonancia, pero afecta otros parámetros de la antena como lo son el ancho de banda y la eficiencia de radiación, se recomienda elegir el ancho que permita una mayor eficiencia [24].

A continuación, se describe el procedimiento para el diseño de antenas de microstrip:

1. Especificar la frecuencia de resonancia (f_r) en Hz.
2. Elección del sustrato, especificar la constante dieléctrica (ϵ_r), y el espesor del sustrato (h).
3. Determinar el ancho del parche (W), utilizando la Ecuación (2.1) [19].

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.1)$$

Donde c es la velocidad de la luz.

4. Calcular la constante dieléctrica efectiva (ϵ_{reff}) con la Ecuación (2.2), para $W/h > 1$ [19].

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.2)$$

5. Una vez calculado el ancho (W), se calcula la extensión de la longitud del parche (ΔL), con la Ecuación (2.3) extraída de [19].

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (2.3)$$

6. Y finalmente, con la Ecuación (2.4)[19], se calcula la longitud del parche (L), utilizando el valor obtenido en las ecuaciones (2.2) y (2.3).

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (2.4)$$

2.4 Figuras de mérito de antenas

2.4.1 Potencia radiada

La densidad de potencia radiada, P , es la medida de la potencia que se irradia en una dirección específica por unidad de área perpendicular a esa dirección. Matemáticamente se define como la integral del vector de Poynting, S , en una superficie cerrada que envuelve totalmente la fuente de radiación [20]:

$$P = \oint S \cdot da = P_{rad} + jP_x \quad (2.5)$$

El vector de Poynting tiene unidades de potencia por unidad de área y, describe la dirección y magnitud del flujo de energía en un punto en el espacio. Se define como el producto cruz del campo eléctrico y el campo magnético en un punto dado. El vector resultante indica la dirección en la que la energía se está propagando en ese punto y su magnitud representa la densidad de potencia radiada en esa dirección.

La potencia radiada es en general una cantidad compleja, compuesta de una parte real conocida como potencia radiativa, P_{rad} , y la parte imaginaria como

potencia reactiva, P_x . La potencia radiativa puede transferirse a un medio, mientras que la reactiva es transferida entre los campos o entre las componentes de la onda electromagnética, por lo que no puede utilizarse para transmitir energía.

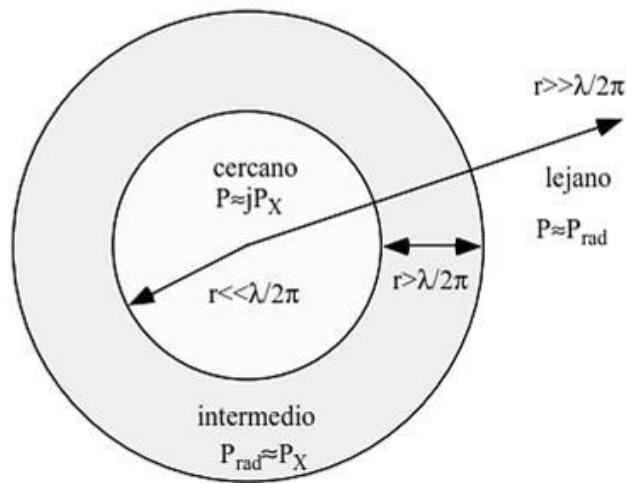


Figura 2.4 Definición de las regiones de campo de una antena [20]

Utilizando la potencia radiada se pueden definir los campos de una antena, ilustrados en la Figura 2.4, éstos son áreas específicas en el espacio que rodea una antena, se caracterizan por la forma en que se comportan los campos eléctrico y magnético de la antena, se pueden distinguir tres regiones principales de campo. En el campo cercano, la mayor parte de la potencia es reactiva, los campos eléctrico y magnético no se propagarán como ondas electromagnéticas, y por lo tanto un receptor de radio muy cerca de la antena no funcionará como tal. Después se encuentra el campo intermedio, en el que las dos componentes de la potencia, la reactiva y la radiativa, tienen magnitudes similares. Y finalmente está el campo lejano donde la potencia es principalmente radiativa, y puede transmitirse al medio o receptor [20].

2.4.2 Patrón de radiación

Es la medida de cómo una antena emite energía en el espacio, representada como una función matemática o una representación gráfica de alguna de las propiedades de radiación de la antena como función de las coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación está determinado en la región del campo lejano y es representado como función de las coordenadas de dirección [19].

El patrón de radiación se utiliza para evaluar el rendimiento de la antena en términos de su directividad, ganancia, eficiencia y otras características importantes. Este es una herramienta importante en el diseño y análisis de antenas, ya que permite visualizar cómo la antena distribuye la energía radiada en diferentes direcciones en el espacio. Se pueden medir experimentalmente o se pueden simular utilizando herramientas de software de simulación de antenas, su forma depende de varios factores, como la geometría de la antena, la frecuencia de resonancia y el entorno en el que se encuentra la antena.

La Figura 2.5 ilustra un modelo conveniente de representación de un patrón de radiación, éste está dividido en regiones cerradas donde la radiación es continua, llamadas lóbulos. El lóbulo que comprende la mayor parte de la radiación se conoce como principal [20]. Los demás lóbulos se conocen como secundarios y se dividen en laterales, que están en cualquier dirección excepto la del lóbulo principal, y los lóbulos posteriores, que son opuestos a los lóbulos principales [26]. En algunas aplicaciones se busca reducir la magnitud de los lóbulos secundarios, esto se logra con un buen diseño de la antena [20].

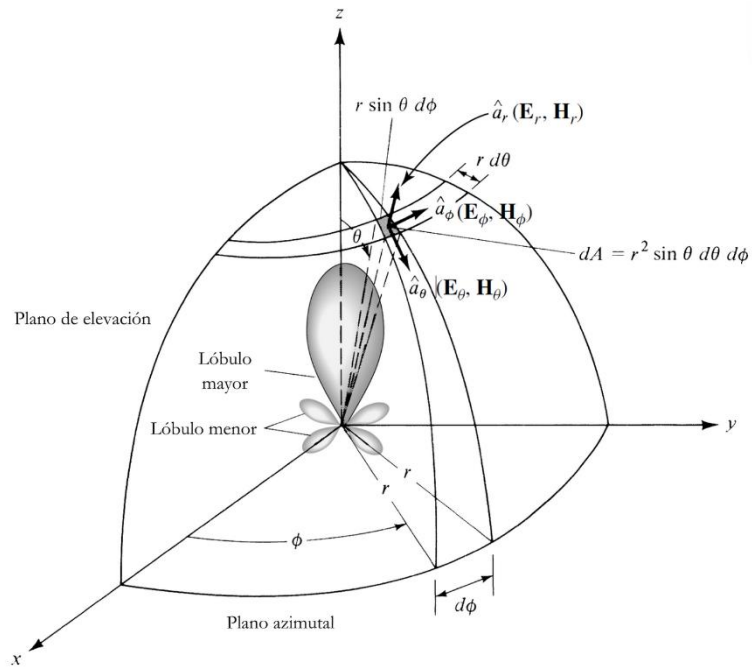


Figura 2.5 Patrón de radiación [19]

2.4.3 Intensidad de radiación

Es un parámetro importante en la caracterización de una antena, y provee información sobre la intensidad del campo electromagnético radiado por la antena en diferentes direcciones. Se define como la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una dirección particular, tiene unidades de watts por estereorradián¹ (W/sr). Matemáticamente se define como [20]:

$$U = r^2 S \quad (2.6)$$

Al integrar la intensidad de radiación sobre una superficie cerrada se puede obtener la potencia radiada, P_{rad} . Considerando una fuente isotrópica $U = U_0 = constante$, entonces:

¹ Angulo sólido con vértice en el centro de una esfera, que corta a la superficie de ésta determinando un área igual al cuadrado del radio de la esfera.

$$P_{rad} = \oint U_0 d\Omega = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} U_0 \sin\theta d\theta d\phi = 4\pi U_0 \quad (2.7)$$

Se puede interpretar a U_0 como la intensidad de radiación promedio de cualquier fuente [20]:

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.8)$$

2.4.4 Directividad

Se define como la razón de la intensidad de radiación en una dirección particular y la intensidad de radiación que se produciría si la misma cantidad de energía se radiara isotrópicamente. Matemáticamente se define como [19]:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.9)$$

Una alta directividad en una dirección dada indica un haz muy afinado en esa dirección. La directividad máxima está implícita en caso de no especificar la dirección y se define como la razón de intensidad de radiación en dirección del máximo de radiación a la intensidad de radiación promedio [20]:

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{U_0} = \frac{4\pi U_{m\acute{a}x}}{P_{rad}} \quad (2.10)$$

2.4.5 Relación delante/atrás

Es una medida de la directividad de una antena, se define como la relación entre la potencia máxima radiada en una dirección y la potencia radiada en el sentido opuesto ($\pm 180^\circ$). En un gráfico del patrón de radiación esta relación es la diferencia en dB entre el nivel de máxima radiación y la radiación a 180° [27]. También se puede definir como la capacidad de la antena para enfocar la energía en una dirección determinada y rechazar la energía que se irradia en la dirección opuesta.

2.4.6 Impedancia de entrada

La impedancia de entrada es la relación entre el voltaje y la corriente en las terminales de entrada de una antena. Se expresa como un número complejo que consta de una parte resistiva (parte real) y una reactiva (parte imaginaria), medida en ohms [19].

$$Z_i = R_A + jX_A \quad (2.11)$$

En general la parte resistiva de la ecuación (2.11) tiene dos componentes, la resistencia de radiación R_{rad} , que es la relación entre la potencia total radiada y la corriente, y la resistencia óhmica R_Ω , relación entre la potencia disipada por el efecto de pérdidas resistivas y la corriente. Se puede decir que la impedancia es la suma de la resistencia de radiación, la resistencia óhmica y la reactancia [25].

$$Z_i = R_A + jX_A = R_{rad} + R_\Omega + jX_A \quad (2.12)$$

Para una máxima transferencia de energía, es importante que la impedancia de entrada de la antena esté adaptada a la impedancia característica del sistema. Esto implica igualar la parte real de la impedancia de entrada con la parte real de la impedancia del sistema, y asegurar que las partes

imaginarias sean de signo opuesto [19]. Sin embargo, en la práctica, esto puede ser difícil de lograr debido a diversas razones, como la longitud de onda de la señal, la geometría de la antena, entre otros factores.

La impedancia de entrada de una antena es generalmente una función de la frecuencia. Ésta depende de muchos factores, incluida la geometría de la antena, el método de excitación y la proximidad a los objetos circundantes; y puede influir en el rendimiento general del sistema de comunicación, incluyendo la eficiencia de radiación, la ganancia y la razón de onda estacionaria.

2.4.7 Eficiencia

Es la medida de la potencia radiada por la antena en relación con la potencia recibida, ésta se ve afectada por diversos factores durante la construcción de la antena y la elección de sus materiales.

$$Eficiencia = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (2.13)$$

La eficiencia total de una antena, expresada en la ecuación (2.14), se usa para tomar en cuenta las pérdidas en las terminales y dentro de la estructura de la antena, dichas pérdidas pueden deberse al desacoplamiento entre la antena y la línea de transmisión o pérdidas durante la conducción.

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.14)$$

Los factores de (2.14) están acotados entre $0 \leq e_0, e_r, e_c, e_d \leq 1$, el extremo inferior representa el peor caso, y caso ideal es el extremo superior. Estos factores se definen de la siguiente manera:

- e_r : Eficiencia de reflexión, asociada con la reflexión de la señal debido al desacoplamiento de impedancias, expresada como $(1 - |\Gamma|^2)$.

- e_c : Eficiencia de conducción, asociada con las pérdidas por efecto Joule del material conductor de la antena.
- e_d : Eficiencia del dieléctrico, asociada con las pérdidas por conducción en el dieléctrico entre las terminales de la antena.

Usualmente las pérdidas en el conductor y el dieléctrico se combinan en un solo factor, ya que es prácticamente imposible separar experimentalmente los efectos de ambas pérdidas, por lo que se puede reescribir (2.14) como

$$e_0 = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (2.15)$$

La potencia radiada, comparada con la disponible en la entrada de la antena se encuentra con [20]:

$$P_{rad} = e_{cd}P_{in} \quad (2.16)$$

2.4.8 Ganancia

Se define como la relación entre la densidad de potencia radiada por una antena en una dirección en particular y la densidad de potencia que sería radiada por una antena isotrópica, con distancias y potencias entregadas iguales.

Está relacionada con la directividad y la eficiencia de la antena, en el peor de los casos es igual a cero, y en el mejor, es igual a la directividad. Se obtiene con la ecuación (2.17) [20].

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} = e_{cd}D \quad (2.17)$$

Se expresa en decibeles (dB) y normalmente está definida para una frecuencia y dirección en particular, si ésta no se especifica normalmente se utiliza la dirección de la máxima radiación.

2.4.9 Polarización

La polarización de una onda es la dirección variable en el tiempo y la magnitud relativa de la orientación, en el campo lejano, del vector de campo eléctrico, a medida que viaja a lo largo de la dirección de propagación [26].

La polarización es la curva trazada por el punto final del vector que representa el campo eléctrico instantáneo, éste debe observarse a lo largo de la dirección de propagación. La Figura 2.6 representa un trazo típico en función del tiempo [19].

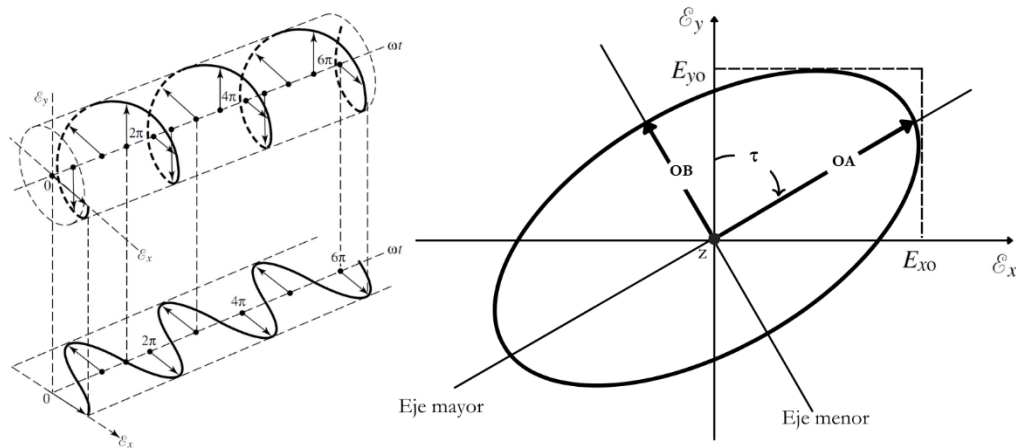


Figura 2.6 Rotación de una onda y polarización elíptica [19]

Se pueden considerar 3 tipos de polarización: lineal, circular o elíptica. En general la curva trazada por el vector del campo eléctrico siempre traza una elipse, y se dice que el campo tiene una polarización elíptica. Las polarizaciones lineal y circular son casos especiales de la polarización elíptica, y se pueden obtener cuando la elipse se convierte en una línea recta o en un círculo respectivamente.

2.4.9.1 Polarización lineal

Una onda está polarizada linealmente en un punto dado en el espacio si el vector del campo eléctrico (o campo magnético) en ese punto siempre está

orientado en la misma línea recta en cada instante de tiempo. Esto se logra si el vector de campo (eléctrico o magnético) posee:

- a. Una sola componente, o
- b. Dos componentes lineales ortogonales que están en fase de tiempo o 180° fuera de fase (o múltiplos de 180°) [19].

2.4.9.2 Polarización circular

Una onda está polarizada circularmente en un punto dado en el espacio si el vector del campo eléctrico (o campo magnético) en ese punto traza un círculo como función del tiempo.

Para que esto se cumpla, el vector de campo (eléctrico o magnético) cumple con todas las condiciones necesarias y suficientes enlistadas a continuación:

- a. El campo debe tener dos componentes lineales ortogonales, y
- b. Las dos componentes deben tener la misma magnitud, y
- c. Los dos componentes deben tener una diferencia de fase de tiempo de múltiplos impares de 90° .

El sentido de rotación se determina observando la rotación del campo a medida que la onda se aleja del observador. Si la rotación es en el sentido de las manecillas del reloj, la onda tiene polarización circular hacia la derecha (RHCP, por sus siglas en inglés) y si la rotación es en sentido contrario a las agujas del reloj, la onda está polarizada circularmente hacia la izquierda (LHCP, por sus siglas en inglés) [19].

2.4.9.3 Polarización elíptica

Una onda tiene polarización elíptica en un punto dado en el espacio si el vector del campo eléctrico (o campo magnético) traza una elipse como función del tiempo. En varios instantes de tiempo, el vector de campo cambia continuamente con el tiempo de tal manera que describe un lugar geométrico

elíptico. El sentido de rotación esta dado de la misma manera que en la polarización circular.

Para que esto se cumpla, el vector de campo (eléctrico o magnético) cumple con todas las condiciones necesarias y suficientes enlistadas a continuación:

- a. El campo debe tener dos componentes lineales ortogonales, y
- b. Los dos componentes pueden ser de igual o diferente magnitud.
- c. (1) Si las dos componentes son de la diferente magnitud, la diferencia en la fase de tiempo entre los dos componentes no debe ser 0° o múltiplos de 180° (porque entonces sería una polarización lineal).
(2) Si las dos componentes son de la misma magnitud, la diferencia en fase de tiempo entre los dos componentes no debe ser múltiplos impares de 90° (porque entonces será circular) [19].

2.4.9.4 Razón axial

Considerando una polarización elíptica observada en Figura 2.6, la razón axial se refiere a la relación entre el eje mayor y el eje menor de la elipse, expresada en la ecuación (2.18) [19].

$$AR = \frac{\text{eje mayor}}{\text{eje menor}} = \frac{O A}{O B}, 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.18)$$

Como se ha comentado anteriormente la polarización lineal y circular son casos especiales de la polarización elíptica, para el caso de la polarización lineal el valor de la razón axial tiene de a infinito y para la polarización circular esta relación tiene valor de 1, debido a que como se especificó en las condiciones para tener polarización circular, las componentes del campo deben ser ortogonales y tener la misma magnitud. Normalmente la razón axial (AR) se expresa en decibeles, expresión dada por la Ecuación (2.19), una $AR = 0 \text{ dB}$ corresponde a una polarización circular pura.

$$AR(dB) = 20 \log_{10} \frac{O A}{O B} \quad (2.19)$$

2.4.9.5 Polarización cruzada

Es la polarización ortogonal a la polarización deseada, cada tipo de polarización tiene su contraparte ortogonal, horizontal y vertical o RHCP y LHCP, ilustrados en la Figura 2.7. El término de polarización cruzada se refiere a la presencia de polarizaciones no deseadas, que producen un impacto negativo en el rendimiento de un sistema de comunicación inalámbrico reduciendo la intensidad de la señal o incrementando el nivel de interferencia y ruido.

En una antena con alta pureza de polarización el valor de la polarización cruzada tiende a ser cero, esto es la relación entre la polarización deseada y su contraparte ortogonal, aunque este caso es poco probable en la práctica [28].

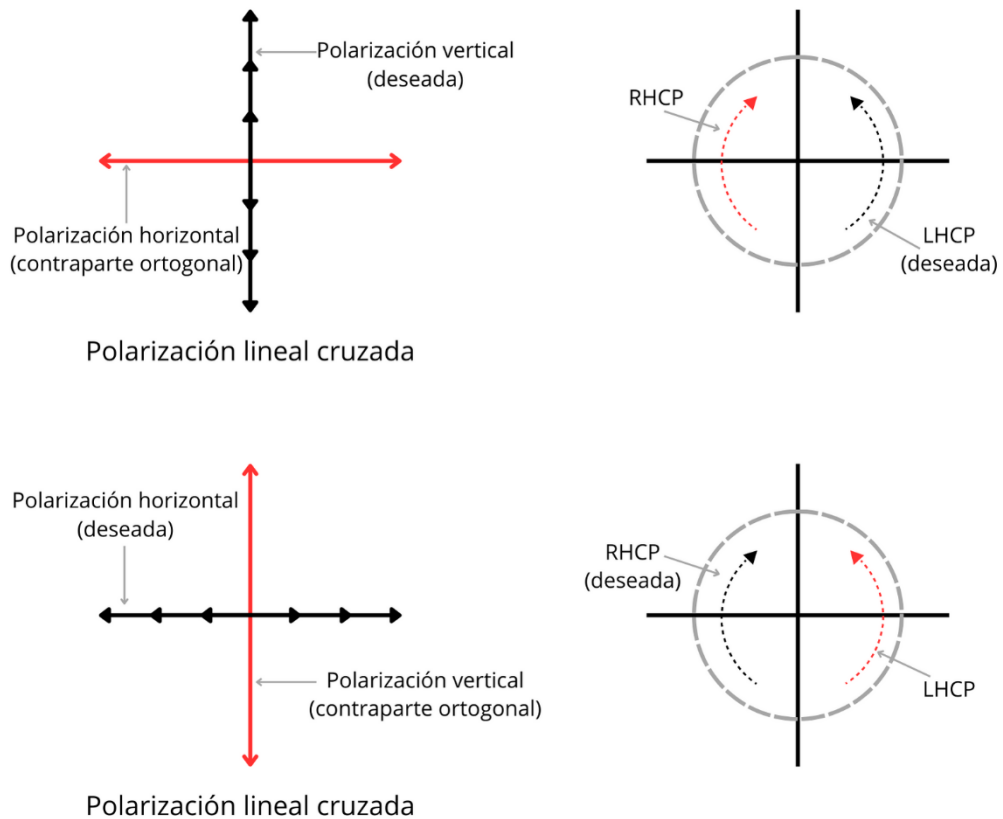


Figura 2.7 Polarización cruzada [28]

2.4.10 Ancho de banda

El ancho de banda se refiere al rango de frecuencias alrededor de la frecuencia de resonancia de la antena en el cual diversas características de la antena, como la ganancia, eficiencia y el patrón de radiación, se mantienen dentro de niveles aceptables predefinidos [19]; comúnmente el ancho de banda es el rango de frecuencias en el que las pérdidas por retorno ($|S_{11}|$) son menores a -10 dB.

En antenas con un amplio ancho de banda, éste se expresa como una razón de proporción entre la frecuencia máxima y la frecuencia mínima en las que las características de la antena cumplen con los valores aceptados. Por

ejemplo, una relación de ancho de banda de 5:1 indica que la frecuencia máxima es cinco veces mayor a la frecuencia mínima.

Por otro lado, en antenas con un ancho de banda reducido, se expresa como un porcentaje de la diferencia entre la frecuencia máxima y la frecuencia mínima con respecto a la frecuencia central, como se expresa en la ecuación (2.20). Por ejemplo, un ancho de banda de 5% indica que el rango de frecuencias aceptables se encuentra dentro de un margen del 0.05 alrededor de la frecuencia central [20].

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f} \times 100 \quad (2.20)$$

2.4.11 Pérdidas por retorno ($|S_{11}|$)

En el diseño de antenas cuando se transmite una señal, parte de la potencia de la señal es reflejada hacia la fuente, las pérdidas por retorno (RL) es la medida de cuánta de esta potencia es reflejada hacia la fuente en lugar de ser transmitida a través de la antena. Una de las razones por las que una onda es reflejada es si existe un desacoplamiento entre la impedancia de carga y la impedancia de la línea de alimentación [25].

Las pérdidas por retorno se expresan en decibeles y están definidas por el coeficiente de reflexión (Ecuación (2.22)(2.21)); o bien la razón entre la potencia reflejada P_r y la potencia de incidencia P_{in} , expresada en la ecuación (2.22) [20].

$$RL (dB) = -20 \log_{10} |S_{11}| \quad (2.21)$$

$$RL(dB) = -10 \log_{10} \frac{P_r}{P_{in}} \quad (2.22)$$

El coeficiente de reflexión ($|S_{11}|$) también es utilizado para definir la razón de onda estacionaria de voltaje (VSWR), que es otra medida de la eficiencia de

una antena. Se calcula a partir del coeficiente de reflexión y representa la relación entre la amplitud de onda incidente y la amplitud de onda reflejada. El VSWR se define como:

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (2.23)$$

Se tiene el mejor acoplamiento cuando $|S_{11}| = 0$ o $VSWR = 0$, es decir cuando la impedancia de la fuente es igual a la impedancia de carga $Z_s = Z_L$ y las pérdidas por retorno son ∞ dB [25].

2.4.12 Relación señal a ruido (SNR)

La relación señal a ruido (SNR) es la relación entre la potencia de la señal deseada y la potencia del ruido presente en un sistema de comunicación. Es un parámetro importante para medir la calidad de la señal transmitida, se expresa en decibeles utilizando la ecuación:

$$SNR (dB) = 10 \log_{10} \frac{P_{señal}}{P_{ruido}} \quad (2.24)$$

Un SNR alto indica poca presencia de ruido, lo que resulta en una mejor capacidad de detectar y recuperar la información transmitida.

2.5 Estado del arte: antenas con resonancia a 28GHz

Tabla 2.3 Comparativa de las características de las antenas con frecuencia de resonancia a 28 GHz

| Referencia | Ganancia | S11 | Ancho de banda | Eficiencia | Sustrato | Tamaño |
|------------|----------|------------|----------------|------------|----------------|-----------------|
| [29] | 7.51 dB | -57 dB | 0.78 GHz | - | R. RT5880 | 8x10x0.254 mm |
| [30] | 7.7 dB | -54.408 dB | 4.92 GHz | 0.827 | R. RT5880 | 28x20x1.575 mm |
| [31] | 3.496 dB | -50 dB | 15.4 GHz | 0.9232 | Jeans | 2x10 mm |
| [32] | 11.6 dB | -40 dB | 2.912 GHz | 0.94 | R. RO4003 | 44x14 mm |
| [33] | 7.49 dB | -30.69 dB | 4.864 GHz | - | Rogers RT5880 | 35x25 mm |
| [34] | 7.5 dB | -30 dB | 2.87 GHz | - | ABS Fingernail | 14.96x17.45 mm |
| [35] | 6.59 dB | -27.79 dB | 2.62 GHz | 0.8208 | FR4 | 7x7x0.8 mm |
| [36] | 2.1 dB | -27 dB | 2.68 GHz | - | R. RT5880 | 40x40 mm |
| [37] | 13.5 dB | -25.8 dB | 1.2 GHz | 0.993 | Rogers RT5880 | 6x6x0.578 mm |
| [38] | 8.6 dB | -25.1 dB | 6 GHz | - | Rogers RT5880 | 20x20x1.5 mm |
| [39] | 5.06 dB | -22.51 dB | 5.57 GHz | 0.8018 | R. RT5880 | 6.2x8.4x1.57 mm |
| [40] | - | -22.01 dB | 1.98 GHz | - | FR4 | 26.6x3.25 mm |
| [41] | 7.95 dB | -21.57 dB | - | 0.8989 | Rogers RT5880 | 55x110 mm |
| [42] | 9.5 dB | -16.81 dB | 1.6 GHz | 0.84 | Rogers RO4003 | 36.5x32 mm |
| [43] | 17 dB | -16.37 dB | 0.308 GHz | 0.61 | R. RT5880 | 39.3x30.7 mm |
| [44] | 7 dB | -15 dB | 1.204 GHz | - | PLA Medallion | 14x20x1 mm |
| [45] | 18.9 dB | -10 dB | - | - | PET | 32x28 mm |
| [46] | 5.29 dB | - | 10 GHz | 0.8373 | Rogers RT5880 | 4x3 mm |

3 Metodología

Este capítulo detalla la metodología empleada para alcanzar el diseño óptimo de una antena de 28 GHz, con parámetros aceptables. La aproximación se basa en el método empírico de la línea de transmisión, complementado con el diseño y modelado de la antena en un simulador de onda completa HFSS.

La sección inicial realiza un análisis exhaustivo de sustratos comerciales previamente revisados, comparando sus ventajas y desventajas, con el objetivo de seleccionar el más adecuado para el proyecto, considerando sus características clave.

La segunda parte se centra en el cálculo de las dimensiones del parche de la antena utilizando el método de la línea de transmisión. Este enfoque proporciona una base fundamental para el diseño estructural.

La tercera sección del capítulo expone y analiza los resultados de diversas simulaciones de diseños de parches. Se examinan varias configuraciones con el objetivo de elegir aquella que proporcione los parámetros óptimos, culminando en un diseño eficaz y funcional.

Este capítulo establece las bases y decisiones clave en el proceso de diseño, combinando métodos empíricos con simulaciones avanzadas para asegurar la precisión y eficacia del diseño de la antena de 28 GHz.

3.1 Elección del sustrato

La primera parte del desarrollo experimental es elegir el sustrato dieléctrico de la antena. Como se describió anteriormente, éste debe de tener

características específicas como una constante dieléctrica alta, tangente de pérdidas baja, con un espesor que le permita ser flexible y que funcione para altas frecuencias, adicionalmente se buscará que sea de bajo costo.

Inicialmente se consideraron tres posibles sustratos para el proyecto, entre ellos el Rogers RO3003, por sus características como lo son constante dieléctrica $\epsilon_r = 3.00$, tangente de pérdidas $\tan \delta = 0.0010$, con espesores de $h = 0.13mm, 0.25mm, 0.51mm, 0.76mm$ y $1.52mm$ y permite frecuencias de hasta $f = 70GHz$. El segundo fue Megtron 7 de Panasonic, con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 3.11$, tangente de pérdidas $\tan \delta = 0.0017$, y espesores de $h = 0.05mm$ a $0.75mm$, para frecuencias de hasta $f = 60GHz$. Y finalmente el Nelco N4000, que tiene una constante dieléctrica $\epsilon_r = 2.95$, tangente de pérdidas $\tan \delta = 0.0017$, y espesores de $h = 0.05mm$ a $1.27mm$, para frecuencias de hasta $f = 50GHz$. Todos ellos con excelentes características, sin embargo, el factor de decisión estuvo en la facilidad para obtener el sustrato.

Finalmente se optó por el sustrato RO3003 de Rogers Corp. ya que fueron los más rápidos en responder y cuentan además con un plan de apoyo a la investigación, con el que nos obsequiaron una muestra del sustrato, suficiente para realizar las pruebas. El sustrato que se utilizó tiene un revestimiento de 1 onza de cobre electrodepositado, con una rugosidad de $2.4 \mu m$ del lado del sustrato y $0.4 \mu m$ del lado libre, parámetros que se consideraron en la simulación de la antena.

3.2 Diseño de la antena de parche rectangular

Para el diseño de la antena se utilizó como base el diseño propuesto en [46], ya que en este trabajo se enfocan en la característica de flexibilidad, que es de mucha importancia para este trabajo.

Se calcularon las dimensiones de la antena utilizando las ecuaciones (2.1)-(2.4), las especificaciones del sustrato que se recibió: $\epsilon_r = 3.00$ y $h = 0.127mm$, y con una frecuencia de resonancia $f_r = 28GHz$. Obteniendo los siguientes resultados:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{30 \times 10^9}{2(28 \times 10^9)} \sqrt{\frac{2}{3.00 + 1}}$$

$$\mathbf{W = 0.3788 \text{ cm}}$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-1/2} = \frac{3.00 + 1}{2} + \frac{3.00 - 1}{2} \left[1 + \frac{12(0.0127)}{0.3788} \right]^{-1/2}$$

$$\mathbf{\epsilon_{reff} = 2.844}$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.412(0.127) \frac{(2.844 + 0.3) \left(\frac{0.3788}{0.0127} + 0.264 \right)}{(2.844 - 0.258) \left(\frac{0.3788}{0.0127} + 0.8 \right)}$$

$$\mathbf{\Delta L = 0.00625 \text{ cm}}$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L = \frac{30}{2(28)\sqrt{2.844}} - 2(0.00625)$$

$$\mathbf{L = 0.3051mm}$$

Al simular en HFSS, con las dimensiones obtenidas, las características del nuevo sustrato, Rogers RO3003, y reutilizando el diseño y dimensiones de [46], que utiliza una CPW como alimentación; se obtuvieron resultados poco favorables, una frecuencia de resonancia alrededor de 17 GHz con pérdidas

por retorno de -34.93 dB. En la Figura 3.1, se ilustra el diseño y las dimensiones de la antena simulada en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Dimensiones primer diseño de la antena de 28 GHz

| Parámetro | Valor (mm) | Parámetro | Valor (mm) |
|-----------|------------|-----------|------------|
| W_s | 4.288 | L_s | 4.613 |
| W_p | 3.788 | L_p | 3.051 |
| W_g | 1.984 | L_g | 1.45 |
| W_f | 0.26 | L_f | 1.5 |
| g | | | 0.03 |

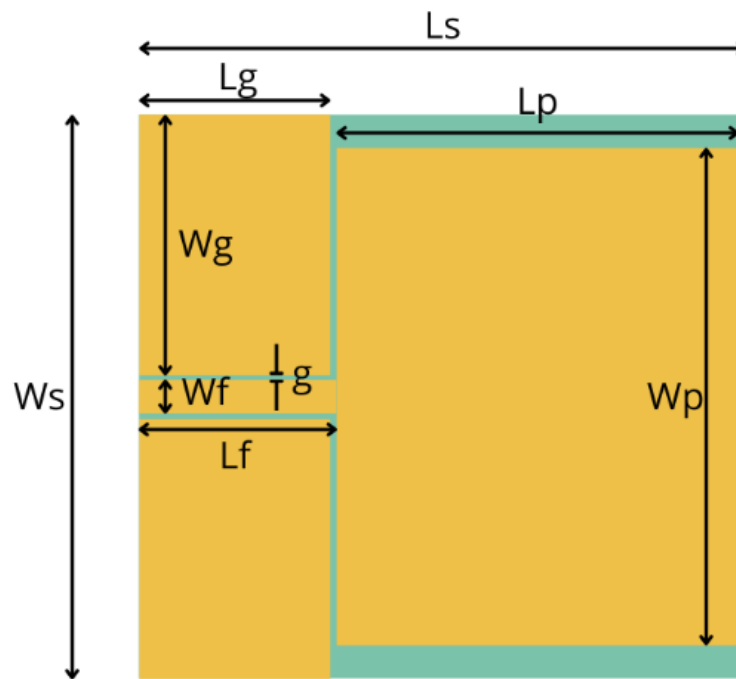


Figura 3.1 Primer diseño de la antena de 28GHz

Al agregar el plano de tierra y ajustando los valores de W_f y L_f , se obtuvieron pérdidas por retorno de -21.98 dB en 27.05 GHz. Sin embargo, el ancho de banda es menor a 1 GHz, y aparecen otras dos frecuencias de resonancia, 43.53 GHz y 50.71 GHz, como se observa en la Figura 3.2.

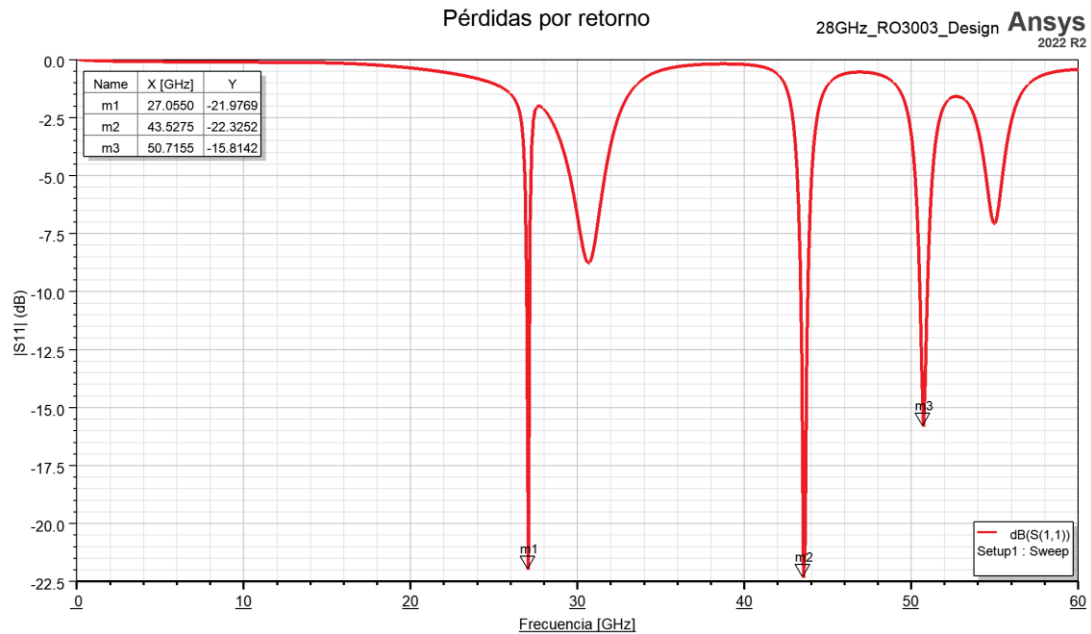


Figura 3.2 Pérdidas por retorno del primer diseño de la antena, con plano de tierra

3.3 Optimización de la antena

Como ya se mencionó en la sección 2.3.2.2, el método de línea de transmisión permite calcular de manera rápida la dimensión de una antena de parche, sin embargo, es preferible simularlo, siempre que se pueda. En este caso el simulador HFSS tiene la opción de optimizar las variables para tener un mejor resultado. Se utilizó esta herramienta para comparar el resultado al hacer variar las dimensiones del parche.

El procedimiento para optimizar los parámetros de la antena fue: ajustar los valores de longitud y ancho del parche y de la CPW, para incrementar la frecuencia de resonancia y el ancho de banda, posteriormente se agregan ranuras para mejorar otros parámetros como la ganancia y la eficiencia. Tras un primer proceso de optimización, se logró una mejora en la frecuencia de resonancia, como se observa en la Figura 3.3.

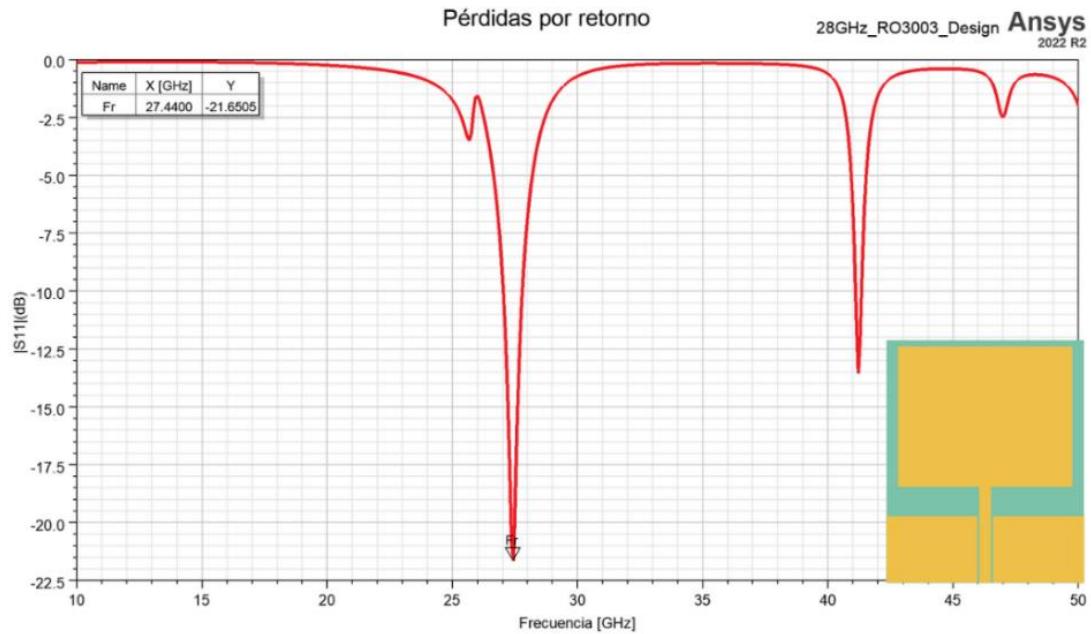


Figura 3.3 Pérdidas por retorno de la antena, después de la primera optimización

Posteriormente se optó por modificar las esquinas, para evitar ángulos rectos, esto impacta positivamente algunos parámetros como las pérdidas por retorno y el ancho de banda. Se propusieron cuatro geometrías: sin modificación, redondeando esquinas con círculos, triángulos y heptágonos. Obteniendo así que la opción de redondear utilizando círculos es la más conveniente; a pesar de que el diseño sin modificaciones tiene un valor menor de pérdidas por retorno, la geometría con círculos tiene una mejoría en la frecuencia de resonancia, a 27.68 GHz, este resultado se observa en la Figura 3.4. Con este cambio se logró además una mejoría del 3% en la eficiencia de la antena.

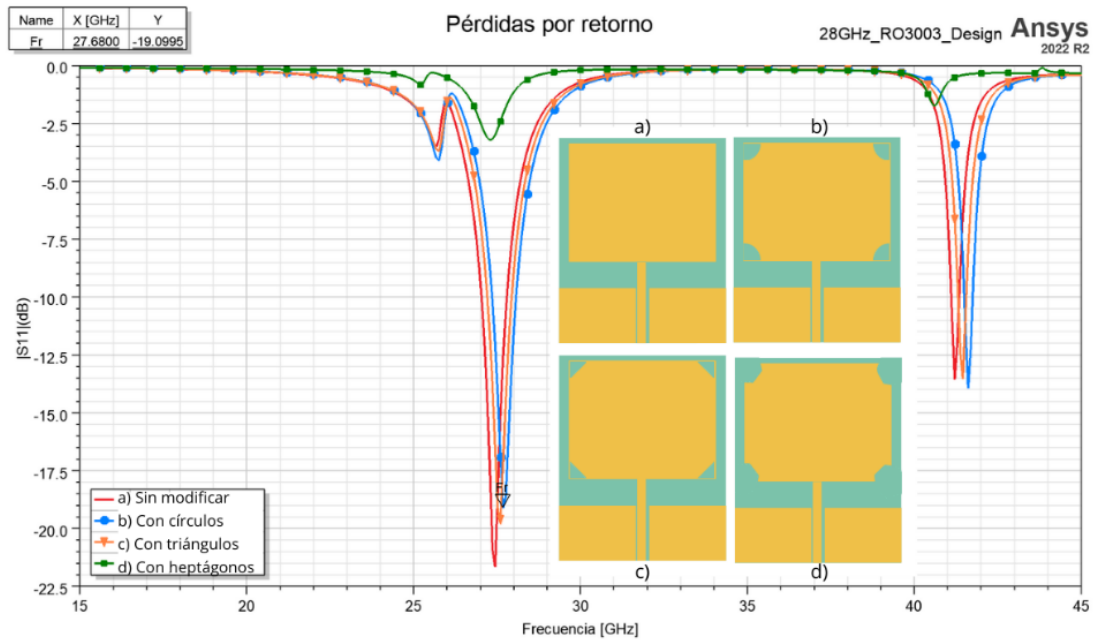


Figura 3.4 Pérdidas por retorno de la antena, cambio en las esquinas del parche

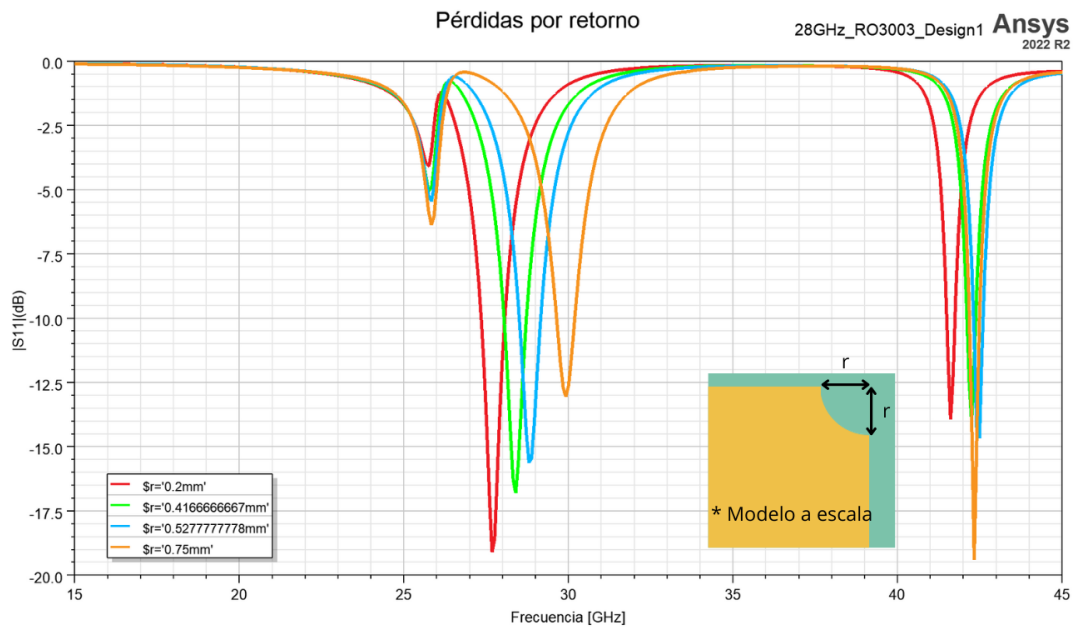


Figura 3.5 Pérdidas por retorno de la antena, cambio en el radio de las esquinas del parche

Se modificó el radio del círculo utilizado para suavizar las esquinas mediante la herramienta *Optimetrics* de HFSS. Con 11 iteraciones utilizando valores de 0.2 mm a 0.75 mm, se encontró que al incrementar el valor de radio se

incrementa la frecuencia de resonancia, pero a la vez se ven afectadas las pérdidas por retorno. Podemos observar esto en la Figura 3.5, donde se ilustran sólo cuatro casos. Finalmente se optó por utilizar el valor de $r_1 = 0.2 \text{ mm}$, que es el radio que arroja el mejor valor de pérdidas por retorno para la frecuencia de resonancia.

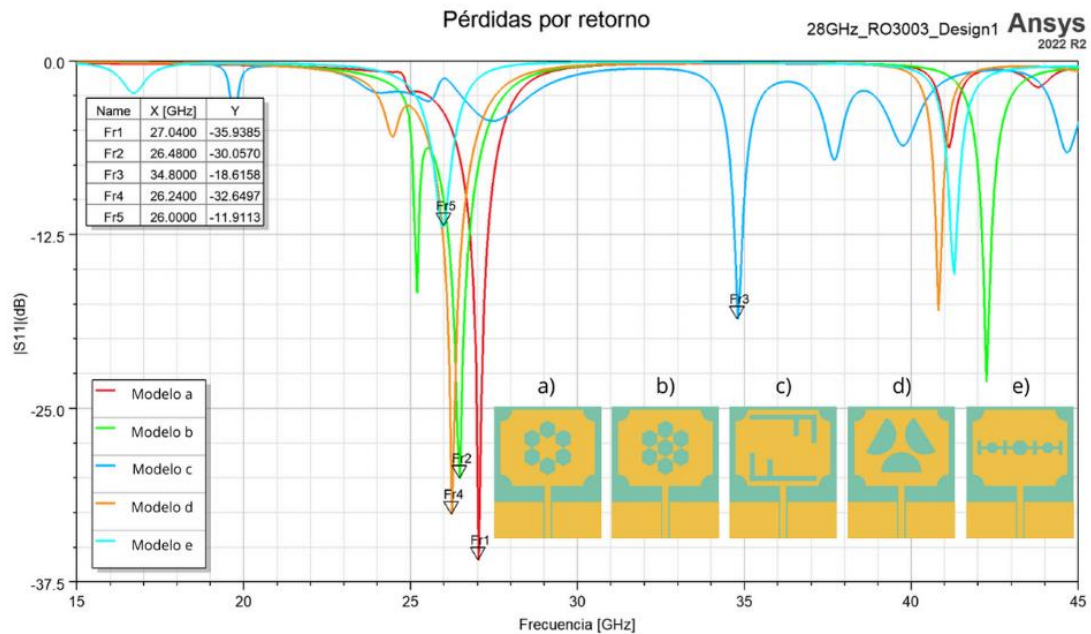


Figura 3.6 Pérdidas por retorno de la antena, diseño de ranuras en parche

Tomando como referencia el diseño anterior, se propusieron nuevas ranuras con el fin de mejorar algunos de los parámetros de la antena. Se propusieron diferentes diseños, basados en la literatura revisada, entre los que destacan ranuras circulares, hexagonales, en forma de F y lineales. Finalmente se eligió el modelo d), que tiene tres ranuras en forma de medio círculo con una rotación aproximada de 60° ; a pesar de que se observa que las pérdidas por retorno del modelo a) son más bajas, en el modelo d) se encuentra una mejoría del 8% en el ancho de banda y eficiencia. Los resultados se observan en Figura 3.6.

Nuevamente haciendo uso de la herramienta de optimización, se logró simular con diferentes valores para la variable r_2 , que es el radio del círculo con el que se forman las ranuras internas, con valores que van de los 0.2 mm a los 0.635 mm, se optó por elegir el valor de $r_2 = 0.2 \text{ mm}$, que es el valor de radio con el mejor resultado en términos de frecuencia de resonancia y pérdidas por retorno. Este resultado está ilustrado en la Figura 3.7.

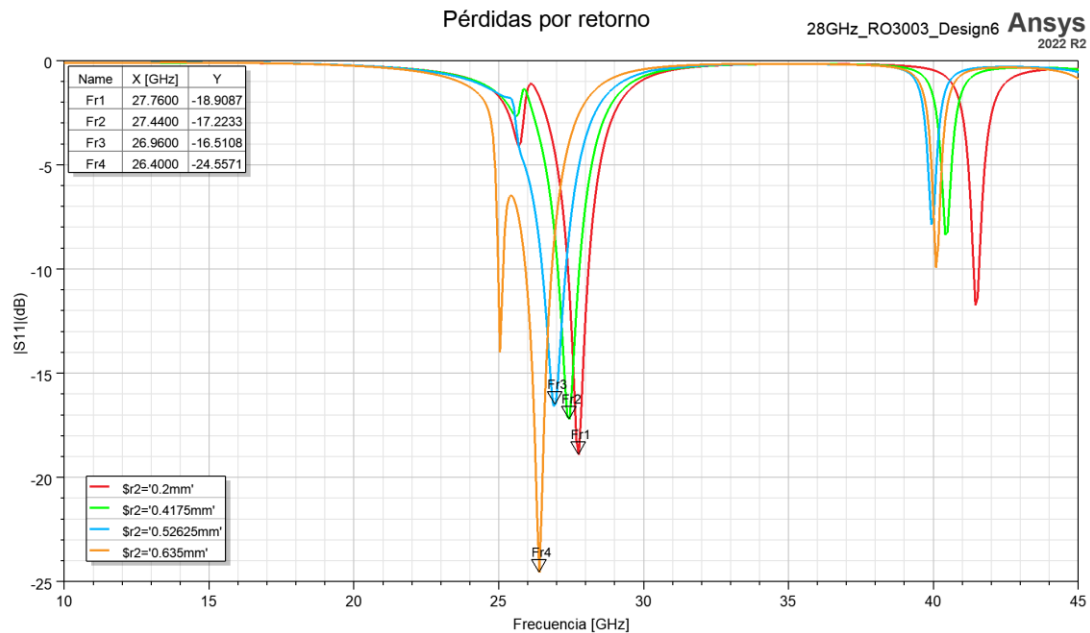


Figura 3.7 Pérdidas por retorno de la antena, cambio en el radio de la ranura interna

Y finalmente se sugiere incluir ranuras en el plano de tierra que propiciarán el incremento de ancho de banda, se hicieron cuatro sugerencias de diseño, sin embargo, en cuatro de ellos se notó que no había cambios tan notables. Finalmente se decidió utilizar una ranura de círculos concéntricos. La Figura 3.8 ilustra las pérdidas por retorno de los diseños sugeridos.

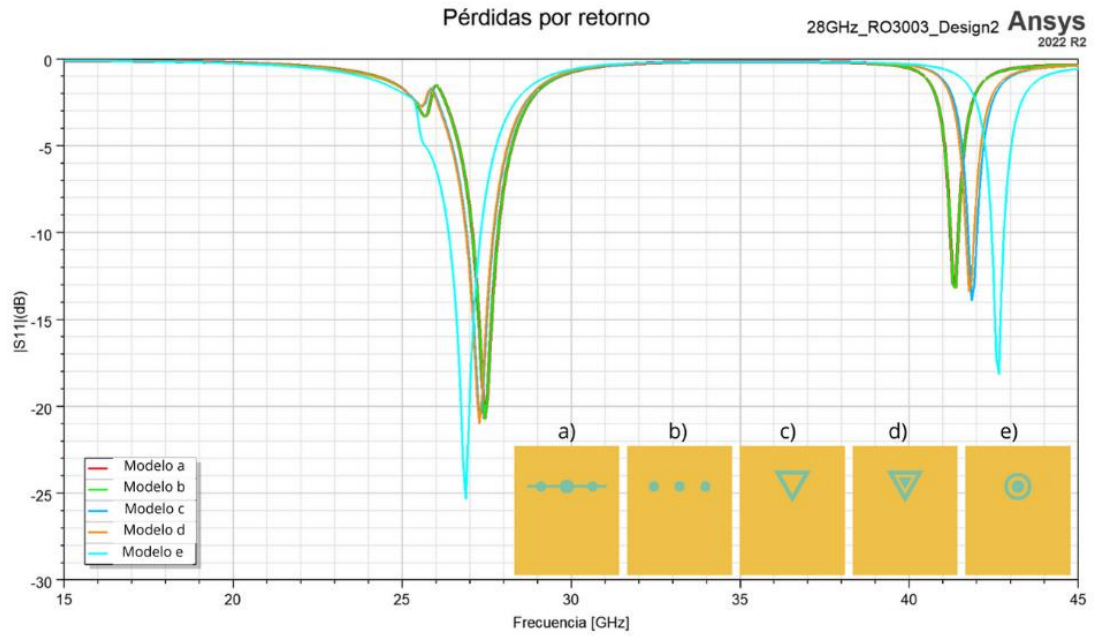


Figura 3.8 Pérdidas por retorno de la antena, diseño de ranuras en plano de tierra

Posteriormente con el diseño final ya establecido, se aplicó la herramienta *Optimetrics* para verificar si existe una combinación de variables que mejore los parámetros de la antena.

4 Discusión de los resultados

Este capítulo representa el análisis culminante de los resultados tras el proceso de diseño y optimización. La primera sección ofrece una exposición detallada del diseño final de la antena de microstrip, subrayando las dimensiones específicas empleadas en su configuración.

En la subsiguiente sección, se lleva a cabo una evaluación exhaustiva de los resultados de los parámetros, revelando una congruencia alentadora con las expectativas teóricas. Sin embargo, la travesía no carece de desafíos, y la última parte de este capítulo se dedica a una exploración minuciosa de las limitaciones que afectaron el proceso de fabricación. Se abordan con meticulosidad estas limitaciones, junto con propuestas de soluciones destinadas a mitigar dichos obstáculos, contribuyendo así a una comprensión holística de los logros obtenidos y las áreas propensas a mejoras subsiguientes.

4.1 Simulación de la antena

Se realizó la simulación considerando los valores obtenidos a raíz del análisis hecho en la sección anterior. En la Tabla 4.1 se encuentra un resumen con los valores de cada variable, y la Figura 4.1 ilustra el diseño final de la antena, vista de perfil frontal, posterior y lateral. Además, en la simulación se consideran las características del sustrato como lo son la rugosidad, la conductividad y la permitividad relativa, todos están

especificados por el proveedor en la hoja de datos del producto. Esto con el fin de que la simulación sea lo más cercana a la realidad.

Tabla 4.1 Dimensiones de la antena de parche

| Parámetro | Variable (mm) | Parámetro | Variable (mm) |
|-----------|---------------|-----------|---------------|
| W_s | 4.562 | L_s | 5.5445 |
| W_p | 4.062 | L_p | 3.09 |
| W_g | 2.283 | L_g | 1.537 |
| W_f | 0.07 | L_f | 0.855 |
| h | 0.127 | t | 0.035 |
| g | 0.033 | r_1 | 0.2 |
| r_2 | 0.2 | r_3 | 0.7 |

Con dichos valores se obtuvieron muy buenos resultados, una antena con frecuencia central de radiación a 28GHz y pérdidas por retorno de -38.01 dB, y una segunda frecuencia a 43.8 GHz con $|S_{11}| = -33.86 \text{ dB}$, como se observa en la Figura 4.2. Este resultado pone al trabajo actual dentro de las cinco antenas con mejor rendimiento en comparación con las analizadas en el estado del arte.

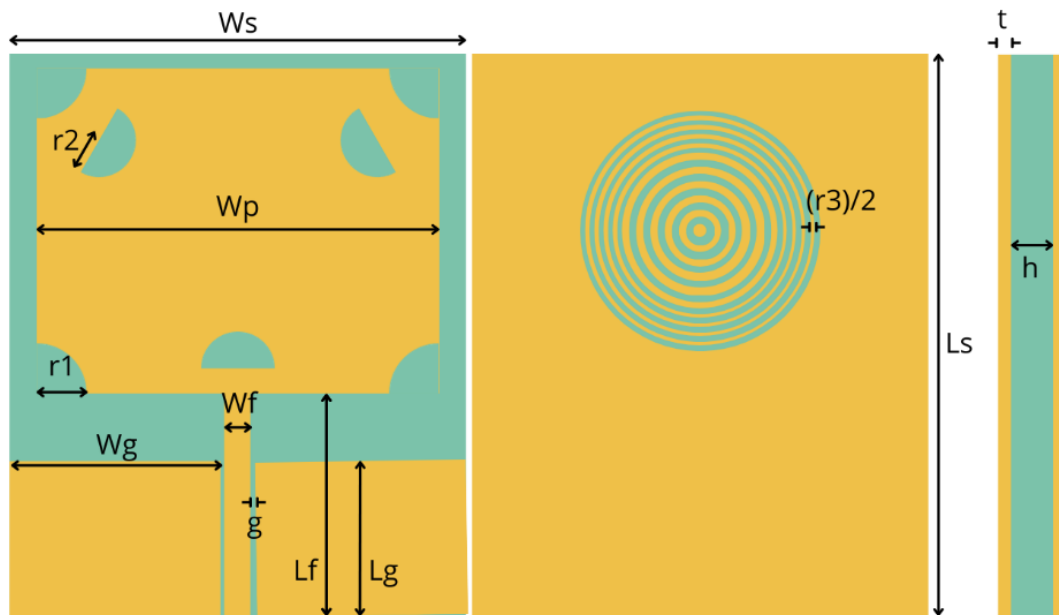


Figura 4.1 Diseño final de la antena de parche a 28 GHz

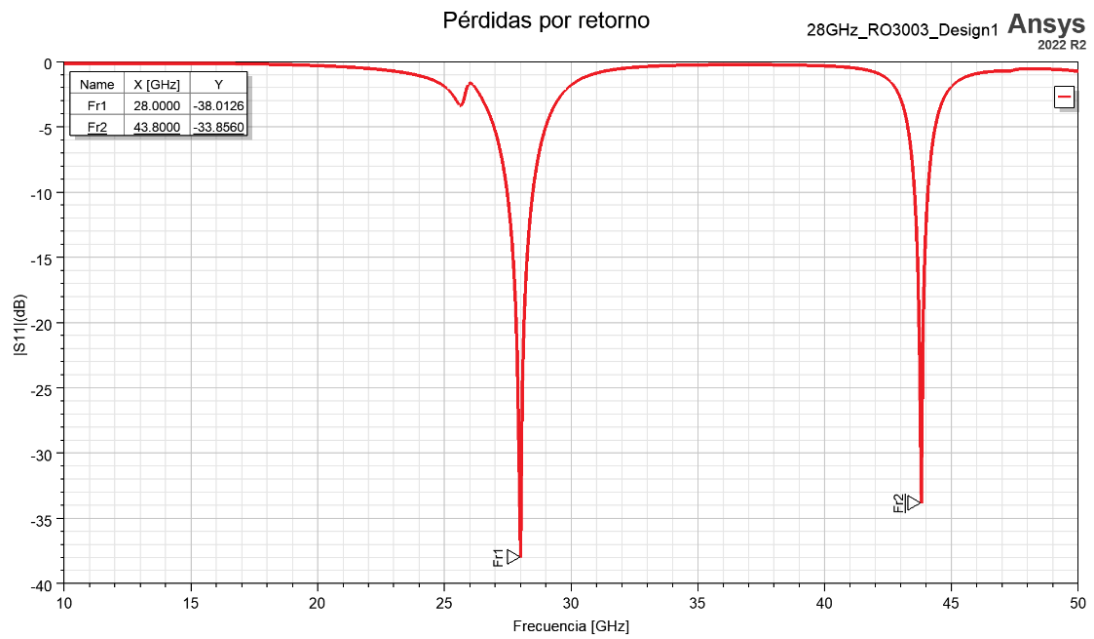


Figura 4.2 Pérdidas por retorno

Bajo estas condiciones se obtuvo un ancho de banda de 1.017 GHz en la frecuencia principal de 28 GHz y, de 0.527 GHz para la frecuencia secundaria de 43.8 GHz. Esto se observa en la Figura 4.3.

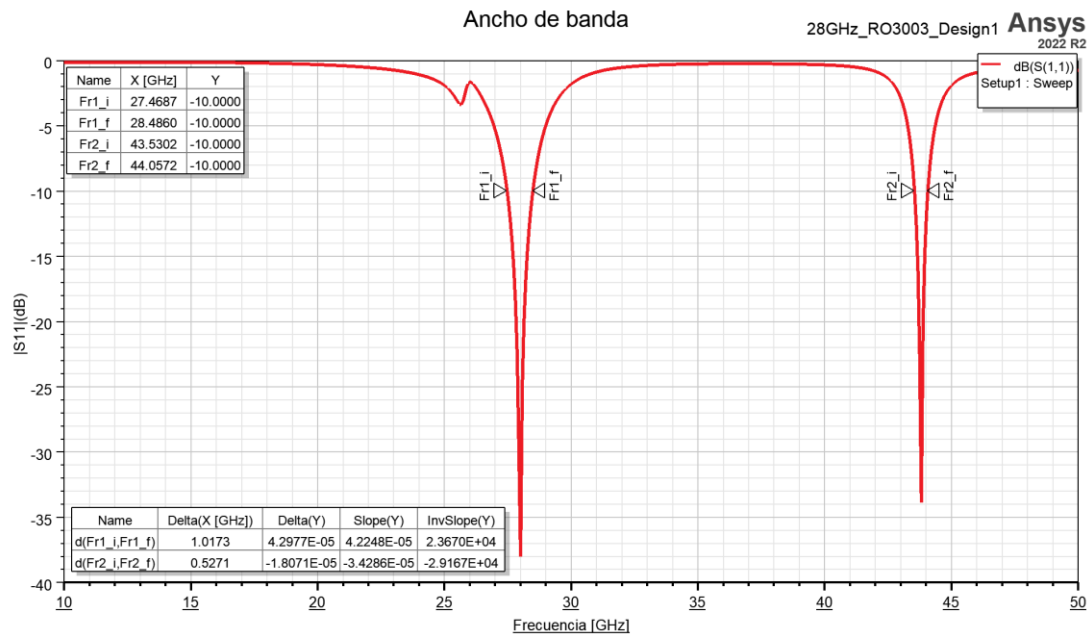


Figura 4.3 Ancho de banda

La Figura 4.4 ilustra el patrón de radiación de la antena en donde observamos claramente que tiene un lóbulo principal y uno secundario. Y finalmente se obtuvo que la antena tiene una ganancia de 5.83 dB, esto se observa en la Figura 4.5.

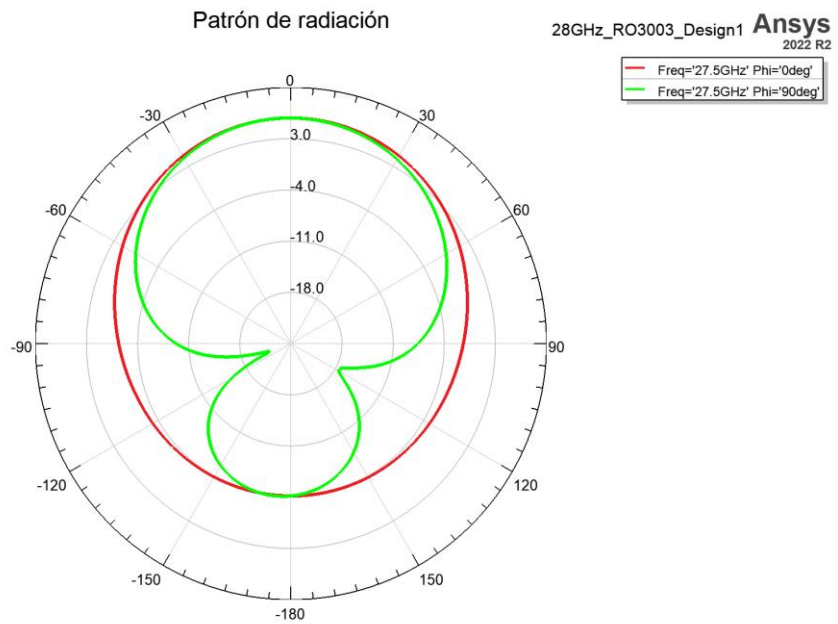


Figura 4.4 Patrón de radiación

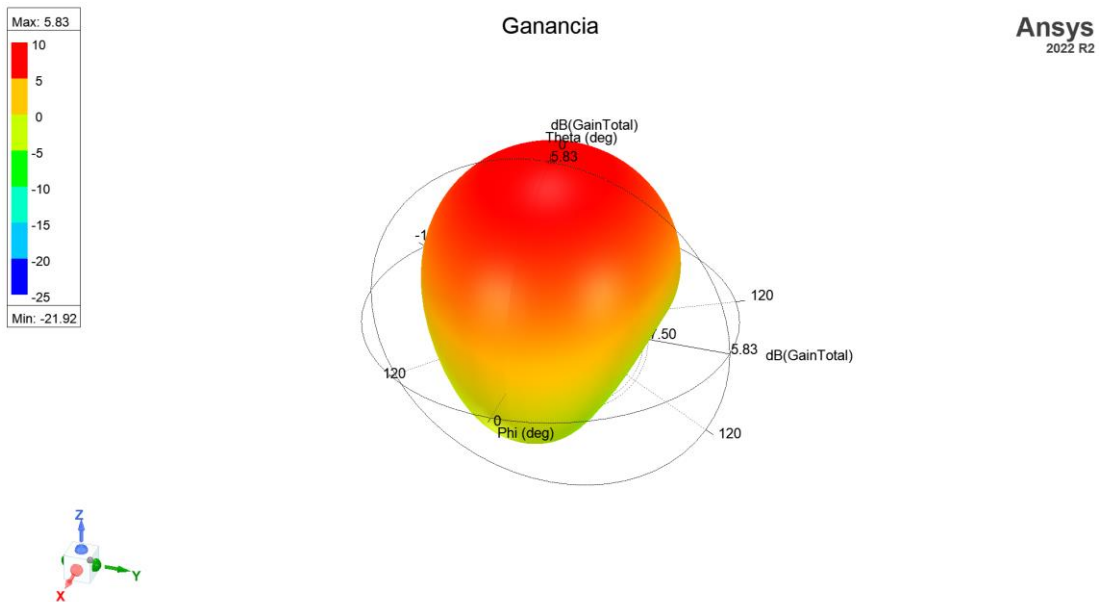


Figura 4.5 Ganancia

En la Tabla 4.2 se enlistan las figuras de mérito, de la antena de parche de 28 GHz, obtenidas en la simulación.

Tabla 4.2 Parámetros obtenidos de la simulación

| Figura de mérito | Valor |
|-------------------------|-------------|
| $ S_{11} $ a 28 GHz | -38.0126 dB |
| VSWR a 28 GHz | 0.2184 dB |
| Ancho de banda | 1.0173 GHz |
| Ganancia | 5.83 dB |
| Directividad | 6.51 dB |
| Eficiencia de radiación | 0.8078 |

4.2 Fabricación

Con base en las características recopiladas, se intentó fabricar la antena de parche utilizando el sustrato Rogers RO3003 proporcionado por el fabricante. Sin embargo, este empeño se ha encontrado con obstáculos en el Laboratorio de Altas Frecuencias del INAOE. Los métodos convencionales, como la impresión del circuito por planchado o el fresado, han demostrado limitaciones, ya que las dimensiones más pequeñas alcanzables rondan los 100 micrómetros, mientras que el diseño propuesto para la antena tiene dimensiones de hasta 30 micrómetros.

Ante esta consideración, se decidió recurrir al LIMEMS del INAOE, especializado en trabajos con dimensiones nanométricas. Sin embargo, la restricción en este laboratorio ha sido el sustrato. El método de depósito no resulta viable debido a que el sustrato ya cuenta con una película de cobre. Además, mediante el proceso de litografía, esta película es tan gruesa que las herramientas disponibles en el laboratorio podrían ocasionar devastación lateral, generando inconsistencias en las dimensiones de la antena.

En la búsqueda de soluciones, se están explorando otras opciones, como la posibilidad de redimensionar la antena con el objetivo de prevenir la devastación lateral. Esto se plantea con la intención de minimizar la discrepancia con el valor simulado al finalizar el proceso de fabricación.

5 Conclusiones

En este trabajo se realizó el diseño de una antena de parche en tecnología microstrip. Elegida por la factibilidad de uso en relación de las frecuencias en las que se puede trabajar alrededor de las bandas milimétricas, y por las dimensiones resultantes.

El diseño propuesto es muy competitivo en comparación con trabajos anteriores analizados en el estado del arte, el volumen total de la antena es de 10.30 mm^3 . Que es ideal para aplicaciones 5G, especialmente en dispositivos IoT utilizados en el ámbito de la salud, se esperaba que el área del lado posterior fuera menor de 20 mm x 20 mm, dicha consideración ha sido cumplida.

Se ha encontrado además que la antena posee una segunda frecuencia de radiación en $F_{r2} = 43.8 \text{ GHz}$, aunque el ancho de banda es pequeño se podrían hacer modificaciones para mejorar este parámetro, entonces la antena tendría otro punto fuerte, ya que esta frecuencia entra dentro de la banda de frecuencias que se espera se comiencen a utilizar en aplicaciones de 5G.

El diseño de las ranuras en ambos lados del sustrato, logran en conjunto una mejoría del 75.5% en las pérdidas por retorno, se logró recorrer la frecuencia de resonancia alrededor de 600 MHz y en los parámetros de eficiencia y ancho de banda se notó una mejoría del 30% y 26% respectivamente. El patrón de radiación presenta un lóbulo principal, con el máximo de radiación en $\theta = 0^\circ$, dando así que la máxima radiación es perpendicular al eje de la antena.

Aunque, hasta la redacción de este capítulo, el proceso de fabricación no ha concluido debido a restricciones en los laboratorios de Electrónica del INAOE, se está trabajando para superar este obstáculo. Se han evaluado diversas opciones, destacando la posibilidad de fabricar la antena a nivel de circuito integrado, lo que permitiría la integración con el sistema de procesamiento de señales mediante el proceso de litografía. Además, se busca minimizar los efectos de la devastación lateral causada por el tiempo de exposición a los químicos requeridos en este método. Se espera que el resultado de este proceso se describa en trabajos posteriores.

Se enlistan a continuación las contribuciones del trabajo realizado en el área de diseño de antenas:

- Se diseñó una antena de parche con una frecuencia de resonancia en 28 GHz y una secundaria en 43.8 GHz, con ganancia de 5.8 dB.
- Se diseñó una antena con un bajo volumen de 10.30 mm^3 , ideal para aplicaciones de sensores biomédicos con tecnología 5G.
- El grosor del sustrato utilizado es tan delgado que permitiría contar con la propiedad de flexibilidad.

5.1 Trabajo futuro

1. Finalizar con el proceso de fabricación.
2. Realizar la medición de los parámetros en la antena fabricada y compararlos con las simulaciones.
3. Analizar el comportamiento de los parámetros de la antena ante condiciones que propicien la flexibilidad del material.
4. Investigar el área de sensores biomédicos para la integración de la antena, para crear un sistema completo.

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1.1 COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES DE ECG BCG PPG Y PCG [6]..... | 6 |
| FIGURA 1.2 CAPAS DE LA ARQUITECTURA DE IOT ENFOCADO EN SALUD Y BIENESTAR..... | 10 |
| FIGURA 1.3 TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS UTILIZADAS EN IOT [15] | 10 |
| FIGURA 2.1 ESTRUCTURA DE UNA ANTENA MICROSTRIP [19]..... | 16 |
| FIGURA 2.2 TIPOS DE ALIMENTACIÓN [19] | 17 |
| FIGURA 2.3 A) DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO, EN DIFERENTES MEDIOS B) PERMITIVIDAD ELÉCTRICA EFECTIVA[19] | 21 |
| FIGURA 2.4 DEFINICIÓN DE LAS REGIONES DE CAMPO DE UNA ANTENA [20] | 23 |
| FIGURA 2.5 PATRÓN DE RADIACIÓN [19] | 25 |
| FIGURA 2.6 ROTACIÓN DE UNA ONDA Y POLARIZACIÓN ELÍPTICA [19] | 30 |
| FIGURA 2.7 POLARIZACIÓN CRUZADA [28]..... | 34 |
| FIGURA 3.1 PRIMER DISEÑO DE LA ANTENA DE 28GHZ | 41 |
| FIGURA 3.2 PÉRDIDAS POR RETORNO DEL PRIMER DISEÑO DE LA ANTENA, CON PLANO DE TIERRA . | 42 |
| FIGURA 3.3 PÉRDIDAS POR RETORNO DE LA ANTENA, DESPUÉS DE LA PRIMERA OPTIMIZACIÓN | 43 |
| FIGURA 3.4 PÉRDIDAS POR RETORNO DE LA ANTENA, CAMBIO EN LAS ESQUINAS DEL PARCHE | 44 |
| FIGURA 3.5 PÉRDIDAS POR RETORNO DE LA ANTENA, CAMBIO EN EL RADIO DE LAS ESQUINAS DEL PARCHE | 44 |
| FIGURA 3.6 PÉRDIDAS POR RETORNO DE LA ANTENA, DISEÑO DE RANURAS EN PARCHE | 45 |
| FIGURA 3.7 PÉRDIDAS POR RETORNO DE LA ANTENA, CAMBIO EN EL RADIO DE LA RANURA INTERNA | 46 |
| FIGURA 3.8 PÉRDIDAS POR RETORNO DE LA ANTENA, DISEÑO DE RANURAS EN PLANO DE TIERRA .. | 47 |
| FIGURA 4.1 DISEÑO FINAL DE LA ANTENA DE PARCHE A 28 GHZ..... | 50 |
| FIGURA 4.2 PÉRDIDAS POR RETORNO..... | 50 |
| FIGURA 4.3 ANCHO DE BANDA..... | 51 |
| FIGURA 4.4 PATRÓN DE RADIACIÓN | 52 |
| FIGURA 4.5 GANANCIA..... | 52 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1.1 SENSORES DE RITMO CARDÍACO CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA | 8 |
| TABLA 2.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ANTENAS MICROSTRIP | 16 |
| TABLA 2.2 COMPARATIVA DE SUSTRATOS SEMIFLEXIBLES | 19 |
| TABLA 2.3 COMPARATIVA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS ANTENAS CON FRECUENCIA DE RESONANCIA A 28 GHZ..... | 37 |
| TABLA 3.1 DIMENSIONES PRIMER DISEÑO DE LA ANTENA DE 28 GHZ | 41 |
| TABLA 4.1 DIMENSIONES DE LA ANTENA DE PARCHE | 49 |
| TABLA 4.2 PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN | 53 |

Referencias

- [1] M. J. Gamez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», Desarrollo Sostenible. Accedido: 22 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [2] «Casos de Uso y Aplicaciones de la Industria de la 5G», Intel. Accedido: 22 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.intel.com/content/www/xl/es/wireless-network/5g-use-cases-applications.html>
- [3] K. Rose, S. Eldridge, y L. Chapin, «LA INTERNET DE LAS COSAS—UNA BREVE RESEÑA».
- [4] L. Y. Becerra Sánchez, «Internet de las cosas para el cuidado de la salud», *Entre Cienc. E Ing.*, vol. 13, n.º 26, pp. 7-8, dic. 2019, doi: 10.31908/19098367.1167.
- [5] G. Prieto-Avalos, N. A. Cruz-Ramos, G. Alor-Hernández, J. L. Sánchez-Cervantes, L. Rodríguez-Mazahua, y L. R. Guarneros-Nolasco, «Wearable Devices for Physical Monitoring of Heart: A Review», *Biosensors*, vol. 12, n.º 5, p. 292, may 2022, doi: 10.3390/bios12050292.
- [6] R. Kahankova, J. Kolarik, J. Brablik, K. Barnova, I. Simkova, y R. Martinek, «Alternative measurement systems for recording cardiac activity in animals: a pilot study», *Anim. Biotelemetry*, vol. 10, n.º 1, p. 15, dic. 2022, doi: 10.1186/s40317-022-00286-y.
- [7] Y. Cotur, M. Kasimatis, M. Kaisti, S. Olenik, C. Georgiou, y F. Güder, «Stretchable Composite Acoustic Transducer for Wearable Monitoring of Vital Signs», *Adv. Funct. Mater.*, vol. 30, n.º 16, p. 1910288, abr. 2020, doi: 10.1002/adfm.201910288.
- [8] D. Mandal, A. Maity, y I. Saha Misra, «Low Cost Portable Solution for Real-Time Complete Detection and Analysis of Heart Sound Components», *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 107, n.º 1, pp. 523-547, jul. 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06287-0.

- [9] K. Meng *et al.*, «A Wireless Textile-Based Sensor System for Self-Powered Personalized Health Care», *Matter*, vol. 2, n.º 4, pp. 896-907, abr. 2020, doi: 10.1016/j.matt.2019.12.025.
- [10] I. Sadek, J. Biswas, y B. Abdulrazak, «Ballistocardiogram signal processing: a review», *Health Inf. Sci. Syst.*, vol. 7, n.º 1, p. 10, dic. 2019, doi: 10.1007/s13755-019-0071-7.
- [11] N. De Pinho Ferreira, C. Gehin, y B. Massot, «A Review of Methods for Non-Invasive Heart Rate Measurement on Wrist», *IRBM*, vol. 42, n.º 1, pp. 4-18, feb. 2021, doi: 10.1016/j.irbm.2020.04.001.
- [12] S. S. Sylvester, E. L. M. Su, C. F. Yeong, y F. K. C. Harun, «Miniaturized and Wearable Electrocardiogram (ECG) Device with Wireless Transmission», vol. 9, n.º 3, p. 5.
- [13] Y. Wang, S. Doleschel, R. Wunderlich, y S. Heinen, «A Wearable Wireless ECG Monitoring System With Dynamic Transmission Power Control for Long-Term Homecare», *J. Med. Syst.*, vol. 39, n.º 3, p. 35, mar. 2015, doi: 10.1007/s10916-015-0223-5.
- [14] K. A. Sunitha, S. Dixit, y P. Singh, «Design and Development of a Self-Powered Wearable Device for a Tele-Medicine Application», *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 108, n.º 1, pp. 175-186, sep. 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06394-y.
- [15] A. Čolaković y M. Hadžialić, «Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues», *Comput. Netw.*, vol. 144, pp. 17-39, oct. 2018, doi: 10.1016/j.comnet.2018.07.017.
- [16] A. Vithya Vijayalakshmi y L. Arockiam, «A Secured Architecture for IoT Healthcare System», en *Proceeding of the International Conference on Computer Networks, Big Data and IoT (ICCB - 2018)*, vol. 31, A. P. Pandian, T. Senjyu, S. M. S. Islam, y H. Wang, Eds., en *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 31. , Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 904-911. doi: 10.1007/978-3-030-24643-3_106.
- [17] S. Selvaraj y S. Sundaravaradhan, «Challenges and opportunities in IoT healthcare systems: a systematic review», *SN Appl. Sci.*, vol. 2, n.º 1, p. 139, ene. 2020, doi: 10.1007/s42452-019-1925-y.
- [18] R.- ASALE y RAE, «antena | Diccionario de la lengua española», «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Accedido: 10 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/antena>

- [19] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005.
- [20] R. S. Murphy Arteaga, *Teoría electromagnética*. México: Trillas, 2001.
- [21] J. A. Bava y A. J. Sanz, *Técnicas de diseño de amplificadores de microondas*. La Plata: D - Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 1999.
- [22] A. Mehta, «Microstrip Antenna», *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 4, mar. 2015.
- [23] A. Sabban, «Wideband Wearable Antennas for 5G, IoT, and Medical Applications», en *Advanced Radio Frequency Antennas for Modern Communication and Medical Systems*, A. Sabban, Ed., IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.93492.
- [24] R. Garg, Ed., *Microstrip antenna design handbook*. en Artech House antennas and propagation library. Boston, MA: Artech House, 2001.
- [25] K. N. Olan Nuñez, «Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas.», Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Santa María Tonantzintla, Puebla, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/1793>
- [26] K. Siwiak, *Radiowave propagation and antennas for personal communications*, 2nd ed. en Artech House antenna library. Boston: Artech House, 1998.
- [27] «Relación delante/atrás», Antenas. Accedido: 1 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://todoantenas.weebly.com/relacioacuten-delanteatraacutes.html>
- [28] «What is Cross Polarization? - everything RF». Accedido: 31 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-cross-polarization>
- [29] S. Z. Mohd Hamzah, N. F. Abdul Malek, S. Y. Mohammad, F. N. Mohd Isa, y M. R. Islam, «Design of circular patch antennas at mmWave», en *2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)*, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, jun. 2021, pp. 144-149. doi: 10.1109/ICCCCE50029.2021.9467213.
- [30] L. C. Paul y H. K. Saha, «A Dual Blade-shaped Patch Directional Array Antenna for 5G Communication», en *2021 International Conference on*

Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT), Khulna, Bangladesh: IEEE, sep. 2021, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICECIT54077.2021.9641479.

- [31] D. Sharma, S. K. Dubey, y V. N. Ojha, «Wearable Antenna for millimeter wave 5G Communications», en *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, Hyderabad, India: IEEE, dic. 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/INCAP.2018.8770921.
- [32] Z. U. Khan, Q. H. Abbasi, A. Belenguer, T. H. Loh, y A. Alomainy, «Empty Substrate Integrated Waveguide Slot Antenna Array for 5G Applications», en *2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G)*, Dublin: IEEE, ago. 2018, pp. 1-3. doi: 10.1109/IMWS-5G.2018.8484494.
- [33] Y. Rahayu y M. I. Hidayat, «Design of 28/38 GHz Dual-Band Triangular-Shaped Slot Microstrip Antenna Array for 5G Applications», en *2018 2nd International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)*, Kuching: IEEE, jul. 2018, pp. 93-97. doi: 10.1109/TAFGEN.2018.8580487.
- [34] P. Njogu, B. Sanz-Izquierdo, A. Elibiary, S. Y. Jun, Z. Chen, y D. Bird, «3D Printed Fingernail Antennas for 5G Applications», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 228711-228719, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043045.
- [35] P. Merlin Teresa y G. Umamaheswari, «Compact Slotted Microstrip Antenna for 5G Applications Operating at 28 GHz», *IETE J. Res.*, vol. 68, n.º 5, pp. 3778-3785, sep. 2022, doi: 10.1080/03772063.2020.1779620.
- [36] X. Tong *et al.*, «A Dual-Mode Multi-Polarization Millimeter Wave Wearable Antenna for WBAN Applications», en *2019 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC)*, Nanjing, China: IEEE, may 2019, pp. 1-3. doi: 10.1109/IMBIOC.2019.8777910.
- [37] M. I. Khattak, A. Sohail, U. Khan, Z. Barki, y G. Witjaksono, «ELLIPTICAL SLOT CIRCULAR PATCH ANTENNA ARRAY WITH DUAL BAND BEHAVIOUR FOR FUTURE 5G MOBILE COMMUNICATION NETWORKS», *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 89, pp. 133-147, 2019, doi: 10.2528/PIERC18101401.
- [38] F. Barneih, E. A. Majali, O. Alshaltone, N. Nasir, y A. Al-Shammaa, «5G Ring Antenna for Internet of Medical Things (IoMT) Applications», en *2021 14th International Conference on Developments in eSystems*

Engineering (DeSE), Sharjah, United Arab Emirates: IEEE, dic. 2021, pp. 198-201. doi: 10.1109/DeSE54285.2021.9719561.

- [39] R. Przesmycki, M. Bugaj, y L. Nowosielski, «Broadband Microstrip Antenna for 5G Wireless Systems Operating at 28 GHz», *Electronics*, vol. 10, n.º 1, p. 1, dic. 2020, doi: 10.3390/electronics10010001.
- [40] P. M. Sunthari y R. Veeramani, «Multiband microstrip patch antenna for 5G wireless applications using MIMO techniques», en *2017 First International Conference on Recent Advances in Aerospace Engineering (ICRAAE)*, Coimbatore: IEEE, mar. 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICRAAE.2017.8297241.
- [41] H. M. Marzouk, M. I. Ahmed, y A.-E. H. Shaalan, «NOVEL DUAL-BAND 28/38 GHZ MIMO ANTENNAS FOR 5G MOBILE APPLICATIONS», *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 93, pp. 103-117, 2019, doi: 10.2528/PIERC19032303.
- [42] T. Varum y J. N. Matos, «Compact Slot Antenna Array for 5G Communications», en *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta, GA, USA: IEEE, jul. 2019, pp. 1415-1416. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889037.
- [43] D. N. Arizaca-Cusicuna, J. Luis Arizaca-Cusicuna, y M. Clemente-Arenas, «High Gain 4x4 Rectangular Patch Antenna Array at 28GHz for Future 5G Applications», en *2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Lima: IEEE, ago. 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/INTERCON.2018.8526451.
- [44] M. Fawaz *et al.*, «3D printed patch Antenna for millimeter wave 5G wearable applications», en *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, London, UK: Institution of Engineering and Technology, 2018, p. 492 (5 pp.)-492 (5 pp.). doi: 10.1049/cp.2018.0851.
- [45] M. S. R. Bashri y N. Ramli, «Flexible milimeter-wave microstrip patch antenna array for wearable RF energy harvesting applications», *Int. J. Electr. Comput. Eng. IJECE*, vol. 11, p. 1976, jun. 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i3.pp1976-1984.
- [46] S. Ahmad *et al.*, «Design of a Tri-Band Wearable Antenna for Millimeter-Wave 5G Applications», *Sensors*, vol. 22, n.º 20, p. 8012, oct. 2022, doi: 10.3390/s22208012.