

# GENERACIÓN DE DOBLE BANDA EN ANTENAS DE MICROCINTA UTILIZANDO ESTRUCTURAS FRACTALES

## **Autor**

Andrés Felipe Hernández Acevedo

## **Maestría**

en Automatización y Control Industrial

Director: Ph.D Francisco Eugenio Lopez Giraldo  
Ms.C Oscar David Ossa Molina



**Institución Universitaria**

*Instituto Tecnológico Metropolitano*

*Facultad de Ingenierías*

Medellín, 2025

# AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, pilares fundamentales en mi vida, gracias por su amor incondicional, por su apoyo constante en cada etapa de mi formación y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A los profesores Francisco Eugenio López Girado y Oscar David Ossa Molina les agradezco profundamente por su guía, acompañamiento y dedicación, su mentoría ha sido fundamental para el desarrollo de esta tesis. También quiero extender mi gratitud al centro de laboratorios del instituto tecnológico metropolitano donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales de esta investigación.

# RESUMEN

En diversas áreas de la industria y la ingeniería, como comunicaciones, sensado, y aplicaciones aeroespaciales, existe la necesidad de desarrollar antenas compactas y eficientes que operen en múltiples bandas de frecuencia desde un mismo dispositivo. La tendencia hacia sistemas más compactos y eficientes ha impulsado la investigación en técnicas que optimicen el desempeño electromagnético sin necesidad de recurrir a múltiples antenas de diferentes tamaños, esto asociado a la frecuencia fundamental de los sistemas.

Este trabajo propone explorar la generación de múltiples bandas en antenas de microcinta mediante modificaciones geométricas basadas en la secuencia fractal de Cantor, implementadas en forma de ranuras sobre el parche radiante. Estas estructuras han demostrado su capacidad para generar múltiples bandas de frecuencia de manera efectiva. Para ello, se estudiaron metodologías previas en la literatura y se definió un modelo computacional analizado por software y posteriores pruebas experimentales.

Los resultados obtenidos muestran que la disposición de ranuras siguiendo la secuencia de Cantor hasta la cuarta iteración permite la generación de dos frecuencias de resonancia dentro del rango de 1 a 6 GHz. Además, se evidenció una buena coherencia entre los datos simulados y los obtenidos en la etapa experimental. La construcción de los prototipos de antenas se realizó utilizando un sustrato FR4 con  $\epsilon_r = 4,4$  y un espesor de 1,58 mm, validando la viabilidad del diseño mediante la caracterización de la antena para sistemas de comunicación inalámbrica.

**Palabras Clave:** Antena, parche, frecuencia, múltiple banda, fractal, Cantor

# ABSTRACT

In various areas of industry and engineering, such as communications, sensing, and aerospace applications, there is a need to develop compact and efficient antennas that operate in multiple frequency bands within a single device. The trend toward more compact and efficient systems has driven research into techniques that optimize electromagnetic performance without requiring multiple antennas of different sizes, which are typically associated with the system's fundamental frequency.

This work explores the generation of multiple bands in microstrip antennas through geometric modifications based on the Cantor fractal sequence, implemented as slots on the radiating patch. These structures have demonstrated their effectiveness to generate multiple frequency bands. To achieve this, previous methodologies from the literature were studied, and a computational model was defined, analyzed through software simulations, and subsequently validated through experimental testing.

The obtained results show that arranging slots according to the Cantor sequence up to the fourth iteration enables the generation of two resonance frequencies within the 1 to 6 GHz range. Additionally, a good level of coherence was observed between the simulated data and the experimental results. The prototype antennas were fabricated using an FR4 substrate with  $\epsilon_r = 4,4$  and a thickness of 1.58 mm, validating the feasibility of the design through the characterization of the antenna for wireless communication systems.

**Keywords:** Antenna, patch, frequency, múltiple band, fractal, Cantor.

# ÍNDICE GENERAL

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>VI</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>VII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Justificación. . . . .	1
1.2 Estado del arte . . . . .	2
1.3 Planteamiento del problema . . . . .	4
1.4 Hipótesis . . . . .	5
1.5 Objetivos . . . . .	6
1.5.1 Objetivo General. . . . .	6
1.5.2 Objetivos Específicos . . . . .	6
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1 Generalidades de las antenas tipo parche . . . . .	7
2.2 Modificaciones en antenas tipo parche . . . . .	9
2.3 Antenas Multibanda y aplicaciones . . . . .	11
2.4 Estructuras fractales . . . . .	12
2.4.1 Secuencia de Cantor . . . . .	13
<b>3 Metodología</b>	<b>16</b>
3.1 Materiales. . . . .	16
3.2 Diseño . . . . .	18
3.3 Configuración de las antenas/Modificaciones tipo ranura . . . . .	19
3.4 Simulación y Construcción . . . . .	22
<b>4 Resultados y Discusión</b>	<b>25</b>
4.1 Múltiple Banda . . . . .	25
4.2 Patrón de Radiación y VSWR . . . . .	27
4.3 Discusión . . . . .	29
<b>5 Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro</b>	<b>32</b>
5.1 Conclusiones . . . . .	32
5.2 Recomendaciones . . . . .	33
5.3 Trabajo Futuro . . . . .	33
<b>Bibliografía</b>	<b>35</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Geometrías representativas de elementos de antena tipo parche, tomada de [48]. . . . .	8
2.2. Geometría convencional Antena de Microcinta. . . . .	8
2.3. Ejemplos de modificaciones en antenas tipo parche, a) ranura en forma de U, b) SRR. . . . .	11
2.4. Fractales característicos a) Curva de Koch, b) Triangulo de Sierpinski y c) conjunto de Maldebrot, tomado de [17]] . . . . .	13
2.5. Secuencia de Cantor . . . . .	14
3.1. Antena Original (Iteración cero). . . . .	19
3.2. Antenas con ranuras en secuencia fractal de cantor, a) Cantor Iteración 1, b) Cantor Iteración 2, c) Cantor Iteración 3, d) Cantor Iteración 4. . . . .	20
3.3. a) Secuencia de cantor geométrica, b) Antenas de Cantor . . . . .	21
3.4. Antena Original Construida. . . . .	22
3.5. Antenas con ranuras en secuencia fractal de cantor construidas a)C1, b)C2, c)C3, d)C4 . . . . .	23
3.6. Metodologías empleadas en la literatura. . . . .	23
4.1. Parámetro $S_{11}$ simulado y medido para antena sin ranuras (véase Figura 3.1). . . . .	25
4.2. Parámetro $S_{11}$ simulado y medido para las antenas en cuatro órdenes de la secuencia de Cantor. a) Cantor Orden 1, b) Cantor Orden 2, c) Cantor Orden 3 y d) Cantor Orden 4 . . . . .	26
4.3. Patrón de radiación Antenas de Cantor. a) 3,7 GHz, b) 4,5 GHz . . . . .	28
4.4. VSWR Antenas de Cantor . . . . .	29
4.5. Configuración del campo eléctrico en el eje $z$ (plano $x-y$ ) para los diferentes diseños de antenas: a) parche sin modificaciones y frecuencia de resonancia fundamental ( $TM_{010}$ ). Escala normalizada con $6,66e^4$ V/m. b) secuencia de Cantor orden $C_1$ y escala normalizada con $2,5e^5$ V/m. c) secuencia de Cantor orden $C_2$ y escala normalizada con $1,1e^5$ V/m, d) secuencia de Cantor orden $C_3$ y escala normalizada con $1,05e^5$ V/m y e) secuencia de Cantor orden $C_4$ y escala normalizada con $4,72e^5$ V/m. . . . .	30
5.1. Tendencia en tecnologías de comunicación inalámbrica [97] . . . . .	33

# ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Dimensiones antena parche original . . . . .	18
3.2. Tamaños de ranuras con base en la secuencia fractal de Cantor . . . . .	20
4.1. Frecuencias de resonancia y anchos de banda Antenas de Cantor . . . . .	27
4.2. Parámetros de desempeño de las antenas diseñadas . . . . .	28

# 1

## INTRODUCCIÓN

### Índice

---

<b>1.1 Justificación</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>1.2 Estado del arte</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>1.3 Planteamiento del problema.</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>1.4 Hipótesis</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>1.5 Objetivos</b> . . . . .	<b>6</b>
1.5.1 Objetivo General . . . . .	6
1.5.2 Objetivos Específicos . . . . .	6

---

### 1.1. JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de comunicación inalámbrica, así como los sistemas para el sensado, monitoreo, ubicación (GPS), radio-navegación, sistemas satelitales, militares, entre otros, son esenciales para la mayoría de aplicaciones industriales hoy en día. Desde la implementación de una red WiFi simple para el hogar hasta la comunicación satelital, se hace necesario el uso de sistemas que permitan la transmisión, tratamiento y recepción de las señales electromagnéticas asociadas al proceso. Las antenas tipo parche, también conocidas como microstrip o patch, son estructuras planas, de bajo peso y bajo costo, de manera que son fáciles de fabricar. Además, su electrónica asociada es relativamente simple, permitiendo su integración en sistemas compactos con buen desempeño. Estas antenas se componen de dos capas conductoras y un sustrato dieléctrico en la mayoría de los casos. Cada aspecto del diseño puede ser optimizado para mejorar parámetros como la respuesta en frecuencia y la directividad, lo que las hace atractivas para diversas aplicaciones [1, 2].

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, las antenas de microcinta presentan ciertas limitaciones técnicas que deben ser abordadas para maximizar u optimizar su desempeño. La búsqueda de cómo optimizar y mejorar las diferentes características de estas antenas ha recibido especial atención en las últimas décadas, dado que el conocimiento generado en el área permitirá superar barreras como las restricciones en el número de bandas de operación o las limitaciones en la eficiencia de radiación. Específicamente, muchos trabajos han estudiado la relación entre modificaciones geométricas y el desplazamiento en frecuencia, ya que dentro del rango del espectro electromagnético se operan diversos sistemas como UHF, ISM, WiFi, Bluetooth y 5G [3, 4]. Superar estas limitaciones permite mejorar la eficiencia de los sistemas inalámbricos y reducir el costo de implementación.

Múltiples métodos han sido propuestos para superar tales limitaciones como el uso de metamateriales [5], fractales [6], y geometrías tipo ranura [7, 8]. Entre estos, las estructuras fractales han demostrado ser una solución efectiva para generar múltiples bandas sin incrementar el tamaño de la antena. Técnicas como el uso de

sustratos de alta permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) o modificaciones en el plano a tierra también han sido exploradas para mejorar el desempeño de las antenas [9, 10].

Las estructuras fractales, tipo ranura (slot) y metamateriales son estructuras ampliamente estudiadas las cuales poseen características relevantes de interés de cara a la respuesta de los sistemas, tales como el aumento de las bandas de frecuencia y la miniaturización de la antena, puesto que, a medida que la frecuencia de resonancia fundamental se ve desplazada a valores superiores, la longitud de onda disminuye, lo cual presenta una relación directa con el área empleada para la construcción de la antena [11, 12]. En particular, las estructuras fractales permiten modificar la respuesta en frecuencia de manera controlada, manteniendo un diseño compacto y eficiente. Estas características han generado un creciente interés en la investigación de antenas multibanda, ya que en consecuencia permiten reducir la cantidad de antenas necesarias en un sistema de comunicación robusto [13].

Las antenas de doble banda han adquirido un papel crucial en sistemas de telecomunicaciones modernos, ya que como se mencionó permiten la operación en múltiples frecuencias. Esto es especialmente relevante en aplicaciones como redes celulares, WiFi, IoT y sistemas de comunicación satelital, donde la demanda por dispositivos compactos y eficientes sigue en aumento. En este contexto, el uso de estructuras fractales, ha surgido como una estrategia prometedora para lograr esta respuesta multibanda, sin comprometer significativamente el desempeño de la antena en términos de radiación, eficiencia y tamaño.

Las técnicas y estudios anteriormente descritos permiten mejorar el desempeño de las antenas microcinta y lograr que una sola antena opere en una amplia gama del espectro RF. El desarrollo de antenas de doble banda es clave para mejorar la flexibilidad de los sistemas de comunicación, permitiendo su uso en múltiples aplicaciones y servicios sin necesidad de rediseño. Por ende, el adelantar estudios y generar conocimiento en este tipo de modelos es fundamental para la generación de estructuras adaptables y contribuir al avance en el campo de comunicaciones inalámbricas.

## 1.2. ESTADO DEL ARTE

El diseño de antenas ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, impulsado por la creciente demanda de sistemas de comunicación inalámbricos más eficientes y versátiles. En este contexto, se han desarrollado diversos enfoques para optimizar su desempeño, centrándose en la expansión de la cobertura en múltiples bandas de frecuencia, la reducción de pérdidas y la miniaturización de las estructuras. Estos aspectos representan desafíos clave, especialmente en aplicaciones donde el espacio es limitado, y se requieren sistemas que cubran amplios rangos de frecuencias, como en dispositivos portátiles y sistemas implantables, donde se requiere un equilibrio entre tamaño, eficiencia y capacidad de adaptación a distintos entornos electromagnéticos.

Como se mencionó en la sección anterior, y profundizaremos en los capítulos siguientes, en esencia y a efectos prácticos, una estructura fractal es aquella que está compuesta por copias de menor tamaño de sí misma, de manera que si la serie se extiende en el infinito se obtenga la estructura original. Benoit Mandelbrot demostró que muchas de las estructuras fractales provienen de formas encontradas en la naturaleza, como el crecimiento de las hojas y árboles, o en la secuencia de Fibonacci. A medida que este tipo de estudios fue aumentando, surgió el concepto de la electrodinámica fractal, el cual consiste en la extensión de los fractales aplicados a la teoría de antenas [14, 15].

Una antena fractal es una antena que utiliza un fractal como base de su estructura, diseñado para maximizar la distancia o el perímetro que puede recibir o transmitir, en un volumen o superficie dada. La clave de su aspecto es la repetición de un patrón sobre uno o más espacios. Por esta razón, las antenas fractales son muy compactas, son multibanda o de espectro expandido y tienen varias utilidades en telefonía móvil y comunicación por microondas. Las antenas fractales poseen características especiales como la auto-similitud que puede ser descrita como la misma geometría vista desde varios puntos de vista del observador; esta permite flexibilidad en el diseño y lleva a posibles reducciones de tamaño.

Los sistemas de antenas con base en estructuras fractales poseen respuesta en frecuencia diferente a las antenas tradicionales, ya que son capaces de ofrecer altas ganancias en diferentes frecuencias de manera simultánea. En la mayoría de las antenas tradicionales, existe una frecuencia para la cual ofrecen su máxima ganancia y en el resto de frecuencias la ganancia se ve rápidamente reducida. Por esto, las antenas fractales son idóneas para aplicaciones de amplio espectro frecuencial o multibanda [12].

Las antenas fractales nacen como una respuesta y solución innovadora en el diseño de sistemas de comunicación inalámbrica, aprovechando las propiedades de auto-similitud y la capacidad de miniaturización que ofrecen las estructuras fractales. Estas antenas se distinguen por su capacidad de operar en múltiples bandas de frecuencia o en bandas anchas, lo cual es ideal para aplicaciones que requieren cobertura de espectro amplia y adaptación a diversos estándares de comunicación. La repetición de patrones geométricos a diferentes escalas permite que las antenas fractales mantengan un tamaño compacto mientras incrementan su longitud eléctrica, lo que mejora su rendimiento en comparación con las antenas convencionales. Por otro lado, la naturaleza de los diseños fractales también ha demostrado mejorar la directividad de las antenas, lo que las hace adecuadas para aplicaciones de comunicación de largo alcance [16, 17].

Dentro del diseño de este tipo de antenas, se utilizan diversos tipos de fractales, cada uno en búsqueda de un propósito específico. Por ejemplo, el fractal de Sierpinski es popular para la creación de antenas multibanda debido a su capacidad para resonar en múltiples frecuencias [18] al igual que para sistemas de recolección de energía. Las curvas de Koch se emplean para diseñar antenas miniaturizadas que pueden ocupar poco espacio sin perder eficiencia [19]. El fractal de Minkowski se usa tanto en antenas como en metasuperficies debido a su versatilidad para lograr miniaturización y sintonización de fase [20], en el caso específico de [21] el fractal de Minkowski se integra a una antena con geometría circular para operación en las bandas S, C y X para aplicaciones de ultra banda ancha (UWB). Las antenas fractales de Hilbert y Peano son ejemplos de cómo la geometría fractal se utiliza para mejorar el diseño de antenas. La curva de Hilbert incrementa la longitud del monopolo con cada iteración, disminuyendo la frecuencia de resonancia, mientras que las antenas de Peano se destacan por su capacidad para la miniaturización [17]. La selección del fractal específico dependerá de los requisitos de la aplicación, como el ancho de banda deseado, la frecuencia de operación y las restricciones de tamaño. En la literatura, los autores han propuesto antenas fractales modificadas con diseños innovadores tales como formas de h invertida para mejora de patrón de radiación y aumento de ganancia hasta los 7,03 dBi, el cual es alto para antenas omnidireccionales [22], fractales con forma de flecha con tres bandas de frecuencia operativas para recolección de energía en RF [23], algunos con variación de formas de estrella o círculos iterados hasta su segundo grado para aplicaciones en banda UMTS, y PCS [24], adicional se reportan formas particulares como estructuras DGS en forma de cruz en el plano a tierra combinadas con una estructura en forma de flor iterada hasta el cuarto grado sobre el parche radiante con el objetivo de aumentar el ancho de banda, proveer ganancias sobre los 5,02 dBi las cuales las hacen idónea para aplicaciones WLAN y WiMAX [25], finalmente podemos encontrar antenas fractales con base en la antena de Vivaldi y metamateriales diseñados para la mejora de eficiencia de radiación, comunicación satelital y aplicable a sistemas que operen bajo protocolo de comunicación de la última década como el 5G [26].

En el año 2014, se presentó un novedoso sistema de antena fractal con base en la geometría de la curva de Koch, el diseño de este sistema fue iterado hasta el tercero, con el objetivo de aprovechar los beneficios de las estructuras fractales entre las cuales está el diseño de antenas multibanda y la miniaturización de los sistemas; el diseño y la simulación de parámetros como el  $S_{11}$ , VSWR, y los patrones de radiación del sistema fueron realizados con CST Microwave Studio EM ; los resultados encontrados muestran dos frecuencias de resonancia a 32,84 GHz y 34,28 GHz las cuales afirman las características de ser una antena multibanda, una pérdida de retorno mayor a los -15 dB, parámetros de directividad y ganancia mayores a los 6 dBi y 6 dB respectivamente, con la ventaja de ser un sistema compacto que puede ser usado en aplicaciones espaciales y de radioastronomía [27].

Dada la amplia gama de frecuencias que una antena fractal puede satisfacer, estas han sido estudiadas para sistemas multibanda, sensores, redes WLAN, radio cognitiva, entre otras [28]. Incluso, varios de los métodos propuestos con anterioridad se han combinado en aras de encontrar la mejor respuesta del sistema [29].

Como hemos visto en los apartados anteriores, se destaca la importancia de las geometrías fractales como herramienta valiosa en el diseño de antenas, particularmente en antenas tipo parche, debido a su capacidad de optimizar el desempeño de múltiple banda y reducir el tamaño físico del sistema sin sacrificar o manteniendo el desempeño y equilibrio de las demás variables en la antena. Cabe resaltar que este enfoque tiene sus raíces en los trabajos de Nathan Cohen, quien en 1988 introdujo los conceptos de fractales en el diseño de antenas, inicialmente aplicados a dipolos y monopolos; posteriormente, estas ideas evolucionaron para incluir configuraciones más complejas en antenas tipo parche [30–32]. Cohen construyó la primera antena fractal, explorando la auto-similitud para mejorar el rendimiento y la reducción de tamaño. Cohen, a través de su compañía Fractal Antenna Systems Inc., fue el primero en comercializar en la industria soluciones de antenas basadas en fractales, demostrando el potencial de esta tecnología en el mundo real, hasta la actualidad. La aplicación de principios fractales en las antenas parche no solo ha permitido explorar nuevos diseños, sino también ha aperturado la creación de dispositivos de comunicación más compactos, eficientes y adaptables a las crecientes demandas de los sistemas inalámbricos actuales. Dicho esto, la trayectoria de la investigación en antenas fractales tipo parche sugiere un futuro prometedor en la ingeniería de antenas, con un impacto potencial en la conectividad inalámbrica y el desarrollo de nuevas tecnologías. A medida que las investigaciones en este campo avanzan, las antenas fractales tipo parche siguen evolucionando, incorporando nuevos materiales y técnicas de fabricación que abren la oportunidad a una mayor cantidad de aplicaciones en áreas como comunicaciones 5G, 6G, Internet de las Cosas (IoT) y sistemas de comunicación satelital.

Con base en lo discutido, podemos concluir con claridad que la evolución de la tecnología de antenas ha sido un factor crucial en el desarrollo de la comunicación inalámbrica moderna. Desde los primeros modelos hasta llegar a las antenas actuales, se ha observado un progreso constante motivado por la necesidad de mayor desempeño, eficiencia, menor tamaño y mayor versatilidad. Retos que claramente se presentan dada la evolución de demás tecnologías e impulsada por los desafíos que enfrentan las industrias hoy día. Las antenas de microcinta, en particular como hemos visto, surgen como una respuesta a varios de estos desafíos y han ganado reconocimiento debido a su diseño plano, de bajo costo y con facilidad de integración en diversos dispositivos o estructuras más complejas. El análisis del rendimiento de estas antenas se puede realizar mediante diversos métodos, incluyendo el modelo de línea de transmisión que simplifica la estructura de la antena a un resonador, métodos numéricos como el FDTD, que simulan el comportamiento de las ondas electromagnéticas en el tiempo y el espacio, y el método de momentos (MoM), que es idóneo para estructuras grandes y complejas. La elección del método adecuado dependerá de la complejidad del diseño y las capacidades computacionales disponibles [33].

Las áreas de aplicación principales a nivel industrial hoy en día donde una antena tipo parche puede operar son: Comunicaciones en tecnología 5G y 6G, redes neuronales artificiales (ANN), sistemas de radar con uso de sistemas MIMO, comunicación satelital, Internet de las cosas (IoT), aplicaciones en el sector biomédico tales como imagen médica, sistemas implantables, al igual que sistemas RFID y transferencia de energía inalámbrica, entre otros.

Finalmente, las antenas de microcinta, ampliamente utilizadas en una variedad de dispositivos en la actualidad, enfrentan retos significativos que impulsan el sector de investigación, tales como los mencionados con anterioridad (limitantes de ancho de banda, materiales o técnicas de alimentación), enfoques para alcanzar la miniaturización sin comprometer el desempeño, y la integridad con nuevos materiales como el grafeno [34], lo cual a su vez apertura nuevas rutas para aplicaciones sobre los THz, con mayores tasas de transmisión y velocidades. Algunos de los nuevos enfoques de investigación están orientados al aprendizaje automático en el diseño de antenas y la combinación de técnicas derivadas de la inteligencia artificial [35].

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Múltiples sistemas de comunicación en la actualidad requieren antenas compactas, ligeras y versátiles, capaces de operar en múltiples bandas de frecuencia y adaptarse a diferentes tipos de estructuras. La miniaturización de estos dispositivos es un reto clave, puesto que la reducción de tamaño suele afectar parámetros como la efi-

ciencia de radiación, la ganancia y el ancho de banda de la antena.

En el ámbito científico e industrial, ha crecido el interés en antenas de múltiples bandas, donde diversos estudios exploran el comportamiento en frecuencia fundamental de una antena posterior a modificaciones sobre el parche radiante. Un ejemplo de ello es el trabajo de [36], donde, con la disposición de anillos resonadores sobre la estructura radiante, la antena provee respuesta en frecuencias sobre 1,4 GHz y 2,29 GHz, haciendo esta adecuada para sistemas dual-band.

En este contexto, las antenas fractales han demostrado ser una solución efectiva para lograr doble banda de frecuencia y reducir el tamaño sin afectar significativamente el desempeño electromagnético del sistema. Su diseño, basado en estructuras autosemejantes, permite operar en múltiples frecuencias sin necesidad de incrementar las dimensiones de la antena. Sin embargo, la disminución de dimensiones conlleva desafíos adicionales, como la degradación en la ganancia y la aparición de modos de resonancia indeseados. Estudios recientes, como el de [37], resaltan cómo ciertos enfoques de miniaturización pueden afectar la eficiencia de radiación y el desempeño global de la antena, reforzando la necesidad de desarrollar estrategias que mitiguen estos efectos adversos.

Las estructuras tipo ranura han demostrado ser de gran utilidad a la hora de obtener antenas dual-band [38], debido a su capacidad para mejorar la respuesta en términos de ancho de banda y ganancia; escenarios similares se presentan en el área de la sensórica [39] como es el sensado de variables relacionadas al movimiento humano como la elasticidad mecánica y los movimientos articulares, y el sensado de líquidos en sustancias [40], esto debido a las propiedades de los sustratos y su relación directa en la respuesta en frecuencia de resonancia del sistema.

A pesar de estos avances, sigue existiendo la necesidad de optimizar la relación entre la generación de doble banda, miniaturización y el desempeño electromagnético. La reducción de tamaño generalmente implica una limitación en los modos de resonancia disponibles, lo que puede afectar la adaptabilidad de las antenas a diferentes aplicaciones a pesar de su adaptabilidad en el espacio físico. Técnicas como el uso de sustratos de alta permitividad y metamateriales han sido exploradas [41, 42]. Sin embargo, la implementación física de estos sistemas presenta retos de construcción asociados a la precisión en la fabricación de patrones fractales, las tolerancias de los materiales y la estabilidad estructural del dispositivo. La necesidad de mantener un diseño reproducible y escalable agrega un nivel adicional de complejidad en su manufactura, especialmente cuando se emplean sustratos de baja rigidez mecánica o procesos de fabricación de alta frecuencia.

La búsqueda de configuraciones óptimas para antenas compactas continúa siendo un campo de investigación activo. Es necesario estudiar las estrategias que permitan mantener la eficiencia en diseños miniaturizados, logrando un equilibrio entre las dimensiones, y salidas propias del sistema como el patrón de radiación, la directividad y la adaptabilidad a distintas aplicaciones. Dado el contexto anterior, en la actualidad existe una oportunidad importante en líneas de investigación enfocadas en técnicas que permitan sobreponer estas limitantes, conservando el equilibrio entre variables, diseño y la respuesta del sistema.

## 1.4. HIPÓTESIS

Mediante la disposición de ranuras sobre la capa radiante de una antena tipo parche, cuyas dimensiones estén dadas por un arreglo fractal, se puede identificar una configuración adecuada que conduzca a la generación de doble banda en su respuesta en frecuencia.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir una antena de microcinta modificada de doble banda utilizando estructuras fractales para su uso en comunicaciones inalámbricas.

### **1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar diferentes metodologías y técnicas de modificación de antenas de microcinta para la obtención de doble banda.
- Proponer un diseño de antena de microcinta específico utilizando estructuras fractales.
- Construir y caracterizar el diseño de la antena definida en el objetivo anterior
- Evaluar la antena de microcinta para identificar sus parámetros característicos en sistemas de comunicación inalámbricos.

# 2

## MARCO TEÓRICO

### Índice

---

<b>2.1 Generalidades de las antenas tipo parche</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>2.2 Modificaciones en antenas tipo parche</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>2.3 Antenas Multibanda y aplicaciones</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>2.4 Estructuras fractales</b> . . . . .	<b>12</b>
2.4.1 Secuencia de Cantor . . . . .	13

---

### 2.1. GENERALIDADES DE LAS ANTENAS TIPO PARCHÉ

La idea de una antena microstrip se remonta al año 1953 y una patente del año 1955 bajo los conceptos desarrollados por G.A. Deschamps y Gutton - Baissinot respectivamente; luego con estas bases sobre la década de 1970, fue desarrollada la primera patente por Robert Munson la cual fue fundamental para consolidar el diseño y la aplicación práctica de las antenas microstrip; las contribuciones adelantadas por Munson permitieron desarrollar un prototipo funcional y posterior comercialización de las antenas de microcinta [43–45]. Desde entonces, estas han sido ampliamente estudiadas dada su facilidad para suplir las necesidades de múltiples aplicaciones satelitales, industriales, comerciales, de sensado, entre otras [46, 47]. Este tipo de estructuras están compuestas básicamente por un sustrato dieléctrico, un parche radiante y un plano a tierra de material típicamente cobre (Cu), sus características de diseño y operación son sus dimensiones, material del sustrato dieléctrico, frecuencias de operación, y los modos de propagación de las ondas dentro de la cavidad resonante [48].

En las antenas tipo parche existe una relación lineal directa entre las dimensiones del parche, el cual es típicamente rectangular, por lo que se hace referencia al ancho ( $W$ ) y largo ( $L$ ) y su frecuencia de resonancia fundamental, la cual se ve modificada dependiendo de estos parámetros, esto proveniente del método de análisis de líneas de transmisión, el cual se ajusta de muy buena forma al análisis de este tipo de cavidades. A su vez, existen múltiples métodos de alimentar estas antenas, unos más eficientes que otros, pero con un costo para la construcción más elevado. Como se observa en las Figuras 2.1 y 2.2. En la actualidad, con base en los desarrollos propuestos en la literatura, se pueden encontrar antenas tipo parche con geometrías modificadas, algunas de las cuales mencionaremos en los siguientes apartados.

En principio, las antenas de microcinta (*microstrip*), o parche (*patch*), consisten esencialmente en un parche metálico muy delgado cuyo tamaño es menor que la longitud de onda ( $t \ll \lambda_0$ ), el cual se dispone sobre un material dieléctrico también de dimensión delgada ( $h \ll \lambda_0$ ), donde ( $\lambda_0$ ) es la longitud de onda del espacio libre. Típicamente, los valores del grosor del sustrato suelen ser de  $0,003\lambda_0$  a  $0,05\lambda_0$  por encima del plano de tierra. [48]. Existen gran cantidad de sustratos que se pueden utilizar en el diseño de antenas microstrip, sus constantes

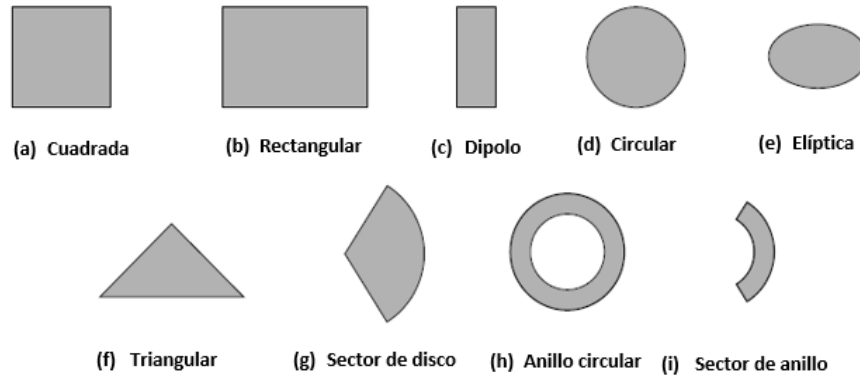


Figura 2.1: Geometrías representativas de elementos de antena tipo parche, tomada de [48].

dieléctricas están por lo general en el rango de  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Los más deseables para obtener un buen rendimiento de la antena suelen ser sustratos cuya constante dieléctrica toma valores inferiores, puesto que brinda una mejor eficiencia, mayor ancho de banda y limita la radiación no deseada en el espacio libre. No obstante, sustratos con valores muy bajos tienen como desventaja el conllevar elementos de tamaño más grandes del sistema lo cual se intenta evitar en este tipo de modelos de antenas, a diferencia de aquellos sustratos que tienen a valores altos por su aplicabilidad en circuitos de microondas ya que se puede reducir el tamaño de los elementos, minimizar radiación no deseada y mal acople; sin embargo, este enfoque puede presentar mayores pérdidas, baja eficiencia y anchos de banda angostos [48].

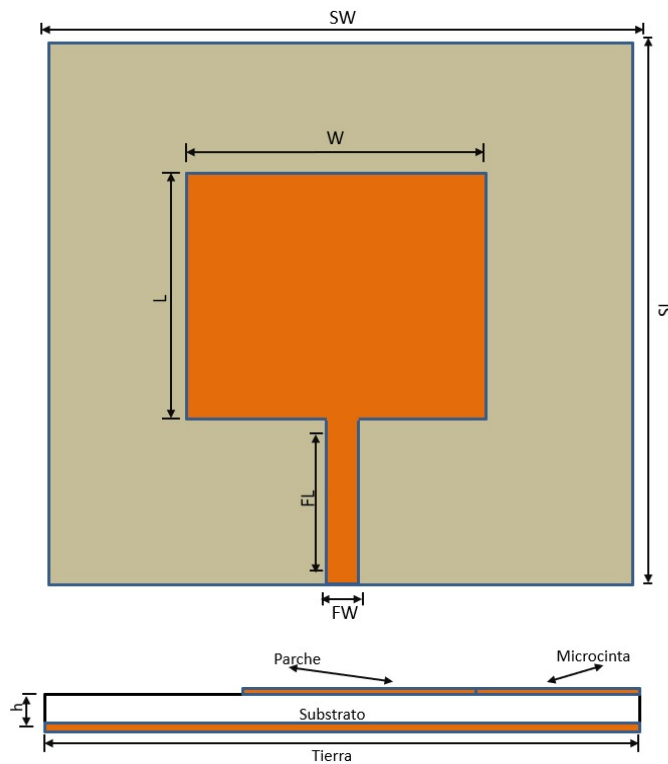


Figura 2.2: Geometría convencional Antena de Microcinta.

Para este tipo de sistemas de microcinta rectangulares, la longitud ( $L$ ) del elemento suele estar entre  $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ , y la frecuencia de resonancia para el modo fundamental está dada por la siguiente ecuación, donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío, aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s, y  $\epsilon_r$  representa la constante dieléctrica relativa del sustrato.

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

El modo de emplear las distintas geometrías y variables de la antena dependerá de la aplicación final y de los parámetros que se deseen potenciar en términos de desempeño [49]; como se mencionó, el uso de diferentes sustratos los cuales poseen distintos valores de permitividad a su vez también genera impacto sobre la antena dada la relación de esta variable en las ecuaciones fundamentales. Ahora, si bien existe esta relación, el campo de investigación posee una línea interesante sobre la cual trabajar para estudiar métodos que generen cambios positivos en la respuesta de las antenas tipo parche, teniendo en cuenta los retos mencionados como anchos de banda angostos (deseables en aplicaciones de sensado), baja eficiencia y baja polarización; en la literatura existen varios métodos para superar este tipo de problemas, como modificar la altura del sustrato y usar diferentes tipos de alimentación.

Puesto que existe una relación directa entre las dimensiones de la antena y su frecuencia, múltiples trabajos en la literatura reportan distintos tipos de modificaciones como alternativas para mejorar la respuesta de la antena, tales como mayor ganancia en la frecuencia fundamental, disminución de las pérdidas y su aplicabilidad en diferentes regiones del espectro. Particularmente en [50] se exploran ciertas modificaciones con pines sobre una antena tipo parche rectangular y su aplicación directa para sistemas WLAN/WiMAX. En [51], los autores plantean una estructura tipo meandros sobre el parche radiante de la antena y, mediante el análisis del trabajo, logran hacer esta adaptable a sistemas MIMO (Múltiple Input/Múltiple Output). Con base en lo anterior, se reportan en la literatura diversos estudios que indican que, bajo ciertas modificaciones al parche radiante o al plano a tierra de las antenas tipo parche, su respuesta se ve modificada de manera positiva, aumentando el número de bandas de operación o mejorando las condiciones de la frecuencia fundamental.

## 2.2. MODIFICACIONES EN ANTENAS TIPO PARCHÉ

Como se mencionó previamente, las antenas de microcinta son componentes ampliamente utilizados en sistemas de comunicación inalámbrica debido a su bajo perfil, facilidad de fabricación y versatilidad (adaptables a sistemas compactos y más complejos). Sin embargo, para satisfacer las demandas de las diversas aplicaciones que surgieron por el desarrollo industrial y los requerimientos de los sistemas modernos, los investigadores han explorado numerosas modificaciones sobre el diseño original. Estas alteraciones buscan mejorar parámetros esenciales propios de la respuesta de la antena como el ancho de banda, la ganancia, la directividad, la eficiencia, y la capacidad de operar en múltiples frecuencias. Estas técnicas de modificación pueden incluir el uso de sustratos con diferentes propiedades dieléctricas, la incorporación de metamateriales, modificaciones sobre el parche radiante con geometrías especiales, la adición de ranuras, estructuras fractales, entre otros. Estas modificaciones permiten a los diseñadores adaptar las antenas a necesidades específicas, optimizando su desempeño para diferentes escenarios de uso.[52]

En el estudio titulado *“Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”* los autores presentan de manera teórica el concepto de metamateriales, el cual posee diversas definiciones para el mundo de la óptica y el plano de los dispositivos RF, como las cavidades de las antenas tipo parche. Básicamente, los metamateriales son estructuras artificialmente diseñadas con propiedades electromagnéticas no encontradas en la naturaleza, las cuales se disponen de manera periódica sobre una región del espacio, en este caso, el parche radiante o el plano a tierra de la antena, los cuales son de menor dimensión que la longitud de onda de la señal incidente [53], estos causan efectos a nivel electromagnético inusuales de gran provecho para este tipo de modelos, dado que permiten, entre varios beneficios, mover la frecuencia fundamental varios MHz o GHz y mi-

nimizar el tamaño de las antenas debido a este desplazamiento en frecuencia [5]. Algunos trabajos de antenas diseñadas con base en metamateriales han sido propuestos en la literatura [54, 55] con aplicaciones específicas al sensado de humedad en diferentes tejidos y en el diseño de antenas compactas para ser usadas en sistemas de transporte inteligente (*ITS*).

Con base en este concepto de metamaterial y el conocimiento generado a partir de sus estudios, nacen los anillos resonadores, los cuales son estructuras tipo metamaterial en forma de anillo ya sea de geometría circular o rectangular las cuales poseen una separación *gap* en el medio. En el 2012 [56] los autores disponen una serie de anillos resonadores complementarios (*CSRR*) en el plano a tierra de un arreglo de dos antenas de microcinta, en este estudio mediante la disposición de este tipo de geometría se logra un corrimiento en frecuencia de varios GHz lo que directamente implica una reducción del tamaño de la antena dada la relación directa entre la frecuencia y la longitud de onda que va relacionada a su vez con las dimensiones del sistema. El término complementario proviene del *SRR* (*Split ring resonator*) el cual está compuesto de anillos concéntricos de cobre, el complementario de este a nivel geométrico consiste en retirar esas porciones de material, en múltiples casos estas modificaciones se realizan sobre el plano a tierra del sistema. El uso de metamateriales y anillos resonadores ha llevado al desarrollo de diferentes variantes con aplicaciones específicas. Tal es el caso del *TCSRR* (Triangular Complementary Split Ring Resonator) el cual es una modificación del *CSRR* que utiliza una geometría triangular en lugar de circular o rectangular. El estudio reporta que el *TCSRR* se utiliza en el diseño de una antena tipo "bowtie" para crear una doble banda de operación y una banda de rechazo entre 3,85 GHz y 4,65 GHz [55]; al igual que se encuentran otras estructuras resonadoras basadas en metamateriales como el *CRECGR* (Couple Ring Enclosed Circular Geometric Resonator), un resonador de geometría circular encerrado por anillos acoplados. El *CRECGR* se usa para crear metamateriales con alta relación de medio efectivo (*EMR*), propiedades de polarización insensible, y capacidades de absorción perfectas en la banda sub-6 GHz para aplicaciones 5G [57]. Estos metamateriales presentan propiedades de índice negativo y permeabilidad cercana a cero, lo que los hace ideales para sensores. De forma similar, el *QSSRR* (Quad-Square Split Ring Resonator) es una estructura que consta de cuatro anillos cuadrados divididos, diseñada para aplicaciones de microondas en la banda S. El *QSSRR* exhibe una alta relación de medio efectivo el cual lo hace idóneo para variedad de aplicaciones electromagnéticas, como sistemas de comunicación, sensores y dispositivos de imagen [58].

En la última década, el desarrollo de las estructuras tipo *DGS* (Defected Ground Structures) ha marcado un hito importante en el diseño de dispositivos de microondas debido a las propiedades que estas ofrecen. Estas estructuras tienen como base realizar modificaciones intencionales en el plano de tierra de los dispositivos, diseñadas con el objetivo de alterar sus propiedades electromagnéticas, como en el caso de las antenas. Estas modificaciones, que pueden tomar formas de ranuras, agujeros o patrones grabados [59] se utilizan para mejorar el rendimiento de las antenas, especialmente en sistemas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), donde se emplean múltiples antenas para la transmisión y recepción de señales, en donde particularmente las *DGS* juegan un papel importante para la reducción del acoplamiento mutuo entre los elementos de la antena, lo que a su vez mejora la diversidad y la calidad de la señal [60].

Finalmente, retomando las estrategias de retirar material en pequeñas porciones de la antena, surgen las geometrías tipo *slot* (ranura), las cuales consisten en retirar porciones de material (generalmente cobre) en forma de ranura. Este tipo de cambios en la estructura generan respuestas particulares en el sistema, dado que los modos de propagación cambian puesto que la corriente debe tomar distintas direcciones para recorrer la cavidad, ocasionando que la pérdida por retorno ocurra en frecuencias diferentes a la fundamental, incluso aumentando el número de frecuencias o bandas de la antena. Miroslav Joler y Mosho Kucan, plantearon un estudio sobre el impacto que tiene una sola ranura en el parche de una antena y el efecto ocasionado sobre las tres primeras frecuencias de resonancia de esta, variando el largo, ancho y la posición de la ranura, Joler y Kucan presentan resultados claros y concisos sobre la relación directa que tiene el modificar la antena y los cambios en frecuencia generados [61]. Algunas de estas ranuras modificadas se basan en geometrías en forma de U o en forma de V [62, 63], ya que estas permiten altas ganancias y aumentar el ancho de banda, con la ventaja de ser diseños de estructuras simples. El enfoque de la mayoría de estas investigaciones es explorar de manera analítica los cambios generados en una antena de microcinta rectangular mediante la adición de una ranura en forma de U, V, o L (frecuencias de resonancia y propiedades de radiación) sobre el parche y se indaga sobre la relación

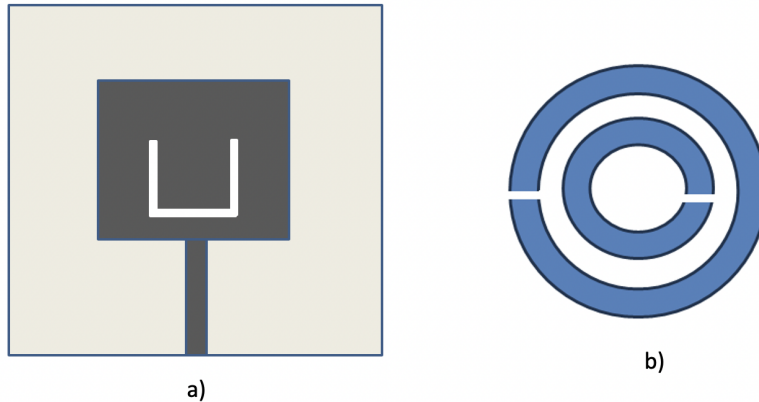


Figura 2.3: Ejemplos de modificaciones en antenas tipo parche, a) ranura en forma de U, b) SRR.

que puede tener la geometría del sistema y su efecto sobre los parámetros característicos de la antena. Este tipo de geometrías en efecto generan una nueva tendencia en materia de investigación dado que permiten modificar las frecuencias de resonancia del sistema a conveniencia del diseñador con cambios relativamente simples, no solo ocasionando desplazamientos en frecuencia sino también miniaturizando el sistema y aumentando los parámetros de ancho de banda y ganancia [7, 64]. Con base en el detalle anterior parte del enfoque de este trabajo consiste en utilizar ranuras para el modelado de una antena tipo parche, en conjunto con los elementos y conceptos que proceden a continuación.

### 2.3. ANTENAS MULTIBANDA Y APLICACIONES

El concepto de múltiples bandas o múltiple frecuencia ha adquirido relevancia con la incorporación de metamateriales en dispositivos de radiofrecuencia, como es el caso de las antenas tipo parche. La ventaja clave de estos modelos es que con una sola antena se puedan cubrir varias aplicaciones del espectro (WLAN, WiFi, Bluetooth, WiMax, 5G, redes MIMO, sensores, etc.), lo que la hace de gran demanda para múltiples aplicaciones donde el tamaño y el desempeño del sistema jueguen un papel crucial [65].

Para alcanzar esta múltiple banda en la literatura se han propuesto varios métodos entre los que se encuentran los anteriormente expuestos, metamateriales, anillos resonadores, estructuras DGS, y geometrías tipo slot; no obstante, en la mayoría de estos métodos se presenta el escenario de requerir alto costo computacional debido al análisis electromagnético asociado a los elementos en la etapa de modelado y simulación (demasiada cantidad de elementos para enmallar), lo que lleva al investigador a replantear el modelo en ciertas ocasiones y volver a empezar el proceso de análisis y estudio de los resultados. En ciertas ocasiones se vuelve un “trabajo empírico” dado que se debe remodelar el sistema en varias etapas con el fin de encontrar la mejor respuesta, lo que conlleva simular cada escenario diferente y obtener de este la solución esperada. Este proceso puede llevar bastante tiempo dado el análisis electromagnético de cada elemento de la antena; para hacer frente a este tipo de situaciones, los simuladores actuales permiten realizar barridos paramétricos del sistema, permitiendo obtener soluciones a cada valor que se asigne (ya sea en frecuencia, parámetros de diseño como el ancho, largo, material, etc.). Sin embargo, este proceso se vuelve cíclico al tomar grandes tiempos de computación. Para hacer frente a este tipo de problemas, se han propuesto múltiples técnicas derivadas de la optimización y las geometrías propias de la antena que conlleven menores tiempos de análisis computacional. En [66] los autores llevan a cabo el estudio de diseño y desempeño para antenas multibanda en aplicaciones MIMO para redes WLAN, los autores con este trabajo, muestran que la combinación de una estructura periódica simple y una antena tipo parche se puede optimizar para obtener múltiples bandas las cuales satisfagan las necesidades de las aplicaciones MIMO en el espectro. Sin embargo, los autores reportan tener problemas con el acoplamiento del sistema, para los cuales proponen varias alternativas a ser estudiadas en investigaciones futuras.

Los diseños de antenas de microcinta con base en ranuras permiten obtener varias bandas de operación, y cubren múltiples aplicaciones de comunicación inalámbrica como WiFi, GPS, radar, WiMax, WLAN, comunicación punto a punto, entre otras. En los últimos años este tipo de estructuras ha recibido especial atención por su aplicación en tecnologías de la última década como el 5G [67, 68]. La demanda actual referente a sistemas de comunicación inalámbrica es alta, y es necesario o se hace más óptimo que los sistemas tiendan a disminuir en tamaño y aumentar en eficiencia y rendimiento; varios modelos han sido propuestos con el objetivo de lograr esta reducción de tamaño [69, 70]. Existen varias formas de obtener dos bandas en una antena tipo parche; en general, se puede clasificar en tres formas [71]: utilizando la primera resonancia asociada a cada una de las dos dimensiones del parche rectangular, mediante la utilización de múltiples parches sobre el mismo plano o en diferentes planos y mediante la utilización de cargas reactivas como puntas, muescas, cortocircuitos, perforaciones, capacitores y ranuras.

Las antenas reconfigurables (*FRAs*) han emergido como una solución versátil para los sistemas de comunicación modernos, donde la necesidad de acceder a múltiples servicios y estándares inalámbricos es cada vez mayor. En lugar de depender de varias antenas para cada servicio, las antenas reconfigurables ofrecen la capacidad de modificar de manera dinámica sus características de operación, como la frecuencia de resonancia, la polarización o el patrón de radiación, adaptándose a las necesidades específicas del entorno y del servicio requerido. Esta capacidad permite que una sola antena pueda cumplir múltiples propósitos, reduciendo el número de componentes necesarios en el dispositivo inalámbrico y optimizando el uso del espectro electromagnético. Esta reconfiguración de frecuencia se puede lograr mediante técnicas varias, incluyendo el uso de interruptores electrónicos, ópticos o MEMS, la introducción de cambios mecánicos en la estructura de la antena, o el uso de materiales sintonizables. Este tipo de antenas se pueden clasificar según el mecanismo utilizado para lograr la reconfiguración. Una técnica común es emplear interruptores para variar la distribución de corriente y modificar la apertura de la antena. También se emplean cambios mecánicos, como motores y actuadores para alterar la geometría de la antena y así su respuesta en frecuencia. Otros métodos incluyen el uso de cristales líquidos y plasmónicos para modificar la corriente o la topología de la antena, así como diseños con formas particulares, como los basados en origami o formas fractales. Estas antenas reconfigurables encuentran aplicaciones en sistemas de radio cognitiva, donde los dispositivos deben adaptarse a los cambios en el entorno inalámbrico, así como en sistemas de satélites y radios definidos por software [72].

## 2.4. ESTRUCTURAS FRACTALES

El concepto de Fractal fue introducido formalmente por Benoit B. Mandelbrot en la década de 1970, tiene sus raíces en trabajos matemáticos anteriores que datan del siglo XIX [17, 73]. Mandelbrot acuñó el término "fractal", a partir del adjetivo latino "fractus", que significa roto o fragmentado, para describir formas geométricas irregulares que no podían clasificarse utilizando la geometría euclidiana tradicional. Los primeros estudios de este tipo se encuentran en obras de matemáticos como Cantor (1870) [74], von Koch (1904) [74], Sierpinski (1915) [75], Julia (1918) [76], y Fatou (1926) [77]. Estos pioneros y precursores exploraron conceptos clave como la auto-similitud, una propiedad fundamental de los fractales que describe cómo una forma puede repetirse a sí misma en diferentes escalas. Mandelbrot profundizó en la relación entre los fractales y la naturaleza [73], desarrollando modelos matemáticos y algoritmos para generar y estudiar estas formas. Su trabajo llevó a la creación del famoso conjunto de Mandelbrot, un ejemplo icónico de la complejidad y la belleza de los fractales.

El fundamento matemático de los fractales reside en la iteración de transformaciones geométricas. Estas transformaciones, como el escalado, la rotación o la traslación, se aplican repetidamente a una forma inicial o etapa cero, generando estructuras complejas con un alto grado de auto-similitud. La dimensión fractal, un concepto clave, cuantifica la complejidad de un fractal. A diferencia de la dimensión euclidiana, que siempre es un número entero (como 1 para una línea, 2 para un plano y 3 para un volumen) la dimensión fractal puede ser un número fraccionario, lo cual refleja la capacidad de un fractal para llenar el espacio de manera diferente a las figuras geométricas tradicionales [17].

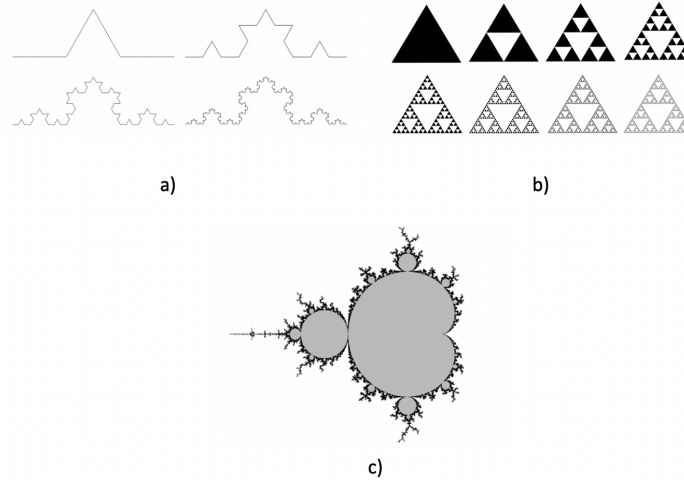


Figura 2.4: Fractales característicos a) Curva de Koch, b) Triángulo de Sierpinski y c) conjunto de Maldebot, tomado de [17]

En términos generales, la dimensión fractal  $D$  de un conjunto autosimilar puede calcularse mediante la ecuación de dimensión de similitud [78]:

$$D = \frac{\log N}{\log(1/r)} \quad (2.2)$$

Donde  $N$  es el número de copias en que se divide el objeto en cada iteración y  $r$  es la razón de escala de reducción. Esta ecuación permite determinar cómo el espacio ocupado por un fractal crece en función de su subdivisión en escalas más pequeñas.

La longitud de una curva fractal varía dependiendo del número de iteraciones de la construcción. En estructuras fractales como la curva de Koch, la longitud total de la estructura después de  $n$  iteraciones se expresa como:

$$L_n = L_0 \cdot N^n \cdot r^n \quad (2.3)$$

Donde  $L_0$  es la longitud inicial,  $N$  es el número de segmentos en cada iteración y  $r$  es la razón de escala de reducción. Este crecimiento exponencial de la longitud es importante en la caracterización de fractales, ya que implica que su perímetro puede tender a infinito mientras que el área contenida permanece finita. En algunos fractales, como el triángulo de Sierpinski, la reducción de áreas en cada iteración sigue un patrón predecible. En este caso, el área remanente después de  $n$  iteraciones puede calcularse como:

$$A_n = A_0 \cdot \left(\frac{N-1}{N}\right)^n \quad (2.4)$$

Donde  $A_0$  es el área inicial y  $N$  es el número de subdivisiones en cada iteración. Esta ecuación muestra cómo la reducción progresiva de área converge a un límite, explicando la formación de estructuras fractales con espacios vacíos dentro de ellas lo cual es consecuente a nivel visual.

#### 2.4.1. SECUENCIA DE CANTOR

El fractal o secuencia de Cantor, es uno de los fractales más antiguos y fundamentales en la geometría fractal, concebido por el matemático alemán Georg Cantor en 1870, el cual lo ideó como parte de sus investigaciones en teoría de conjuntos [73]. Este fractal se construye a partir de un segmento de línea inicial, donde se remueve el tercio medio de manera iterativa, y este proceso se repite en los segmentos restantes. El resultado es un conjunto de puntos discontinuos, pero infinitos, que sirve como base para comprender la naturaleza de los fractales y

la auto-similitud. A pesar de su construcción simple, el conjunto de Cantor demostró ser una herramienta poderosa para explorar conceptos complejos en matemáticas, influyendo en el desarrollo de la geometría fractal y sirviendo de ejemplo para otros fractales como la curva de Koch. Aunque inicialmente fue considerado una conjetura matemática, el conjunto de Cantor se ha revelado como un elemento esencial en la comprensión de muchos fractales modernos. Su importancia radica en que permite entender cómo la iteración de un proceso simple puede generar estructuras complejas con dimensiones no enteras [74].

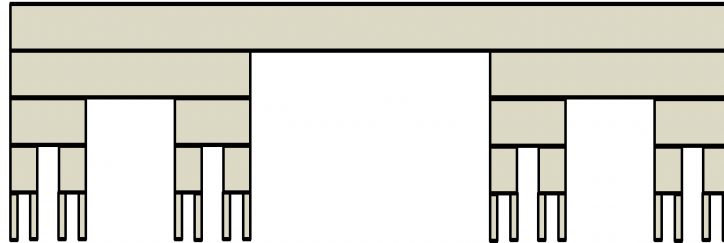


Figura 2.5: Secuencia de Cantor

El impacto del fractal de Cantor en la geometría fractal y en las matemáticas modernas marcó un hito importante. Es un ejemplo paradigmático de cómo una construcción simple puede dar lugar a un objeto con propiedades complejas, como una dimensión fractal no entera  $D = \log(2)/\log(3)$  lo cual refleja su naturaleza fragmentada y discontinua [17]. El fractal de Cantor es un ejemplo claro de cómo un objeto geométrico puede tener propiedades que no pueden ser descritas por la geometría euclidiana tradicional. Además de ser una herramienta didáctica y un modelo teórico, ha encontrado aplicaciones prácticas en áreas como la teoría de señales, la generación de antenas multibanda y el diseño de estructuras con características electromagnéticas avanzadas. Para el desarrollo de esta tesis, emplearemos el fractal de Cantor como base para la propuesta en modificación geométrica con base en ranuras, la cual detallaremos en los capítulos siguientes.

Las estructuras fractales han demostrado ser una solución efectiva para el diseño de antenas compactas y multibanda. Dentro de este enfoque, la geometría con base en la secuencia de Cantor ha sido analizada debido a su capacidad de proporcionar un diseño auto-similar con propiedades de radiación mejoradas. Según estudios previos [79, 80], el uso de fractales como la distribución de Cantor permite optimizar la distribución de corriente en la antena, lo que influye directamente en su diagrama de radiación y en su eficiencia. Específicamente, los patrones de radiación en antenas de Cantor presentan lóbulos secundarios reducidos y una mejor directividad en comparación con antenas convencionales de tamaño similar. Este tipo de antenas tienden a exhibir patrones de radiación en complejos, que pueden variar significativamente con cada banda de frecuencia [81]. La ganancia y la directividad pueden verse afectadas por el grado de iteración del fractal, donde iteraciones más altas introducen mayor complejidad geométrica, potencialmente llevando a lóbulos secundarios y una distribución de energía más dispersa en algunas frecuencias.

La teoría de fractales establece que los objetos geométricos con auto-similitud pueden ser descritos mediante relaciones recursivas y funciones iteradas, lo cual se refleja en su respuesta en frecuencia [78, 82]. En el caso de antenas con base en la secuencia de Cantor, el factor de escala y la iteración influyen en las características de impedancia y la eficiencia de radiación, lo que ha sido validado en diversos estudios experimentales [83]. La teoría en la construcción de antenas fractales no solo permite comprender mejor su comportamiento, sino que también facilita la optimización de parámetros como la resonancia y la ganancia. Modelos basados en el análisis espectral de estructuras fractales han demostrado que la impedancia de entrada y el ancho de banda pueden predecirse mediante el uso de la teoría de fractales y análisis de momentos [84]. Esta formalización permite diseñar antenas con características específicas, de menor tamaño físico sin comprometer el comportamiento electromagnético, lo cual es clave en aplicaciones de telecomunicaciones y sistemas embebidos [85].

La secuencia de Cantor se construye de manera recursiva, iniciando con un segmento lineal de longitud  $L$ ; en cada iteración  $n$ , se divide cada segmento restante en tres partes iguales y se elimina el segmento central, resultando en una reducción de la longitud efectiva de la antena. Este proceso puede describirse mediante la siguiente relación matemática:

$$L_n = \left(\frac{2}{3}\right)^n L \quad (2.5)$$

Donde  $L_n$  representa la longitud total de la estructura después de  $n$  iteraciones. La autosimilitud inherente a esta construcción fractal introduce múltiples frecuencias de resonancia, lo que es beneficioso para diversas aplicaciones. Por su parte, la dimensión fractal  $D$  de la secuencia de Cantor, puede ser calculada como:

$$D = \frac{\log 2}{\log 3} \approx 0,6309 \quad (2.6)$$

Lo anterior podría influir en el patrón de radiación y en la eficiencia de la antena. Un valor de dimensión fractal intermedio entre 1 y 0 indica que la estructura ocupa una región del espacio de manera más eficiente que una geometría lineal, permitiendo un mejor control sobre la distribución de corriente y, por ende, sobre la respuesta electromagnética de la antena. Así mismo, la disposición iterativa de los elementos radiantes genera un comportamiento multifrecuencia que puede ajustarse según el número de iteraciones, lo que permite diseñar antenas adaptadas a requisitos específicos en términos de ancho de banda y directividad. En consecuencia, la correcta elección y correlación matemática de la geometría fractal son esenciales para optimizar la eficiencia de radiación y la compatibilidad electromagnética de la antena con el sistema en el que se implementa.

Los anteriores conceptos han sido respaldados por diversos estudios que analizan la relación entre las propiedades geométricas de las antenas fractales y su rendimiento electromagnético. Por ejemplo, y como hemos mencionado, investigaciones han demostrado que las antenas basadas en geometrías fractales, como la de Sierpinski, exhiben comportamientos multibanda y una reducción significativa en el tamaño físico sin disminución de su eficiencia, debido a su estructura autosimilar y su dimensión fractal específica [86, 87].

# 3

## METODOLOGÍA

### Índice

<b>3.1 Materiales</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>3.2 Diseño</b> . . . . .	<b>18</b>
<b>3.3 Configuración de las antenas/Modificaciones tipo ranura</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>3.4 Simulación y Construcción</b> . . . . .	<b>22</b>

Como se mencionó en los capítulos anteriores, existe una oportunidad importante en la investigación del comportamiento de una antena tipo parche cuando se adicionan ranuras sobre el parche radiante con el objetivo de generar efectos de múltiple banda en su respuesta en frecuencia. Por otro lado, las estructuras fractales han demostrado ser respuestas innovadoras para lograr generar esta dual-band en el sistema, mejorar el desempeño, y optimizar el tamaño dispuesto para todo el sistema (parche radiante y estructura de tierra); con base en lo anterior, en este capítulo desglosaremos la metodología la cual demuestra que se puede generar respuesta en frecuencia de múltiple banda en una antena tipo parche rectangular con un set de ranuras dispuestas sobre el parche radiante, la disposición, geometría e iteraciones de las ranuras estarán gobernadas por el fractal de Cantor iterado hasta el cuarto grado. Con el objetivo de generar este modelo hemos empleado el método de elementos finitos vectorial con apoyo del software HFSS y su posterior análisis del parámetro  $S_{11}$ , posterior a la etapa de modelado, y simulación, realizamos la construcción de los cuatro modelos de antenas mediante la CNC con conectores SMA a  $50\Omega$ .

### 3.1. MATERIALES

A modo general, describiremos los insumos utilizados durante toda la etapa de la investigación del modelo de antena con ranuras en secuencia fractal de Cantor y su posterior construcción. Como primer paso, se empleó el software HFSS (High-Frequency Structure Simulator) para realizar la etapa de modelado y simulación. Como se mencionó anteriormente, HFSS emplea el método de Elementos Finitos (FEM), el cual es una técnica numérica que divide una estructura en pequeños elementos o mallas para resolver las ecuaciones de Maxwell de manera precisa en el dominio de la frecuencia. Para la construcción de las antenas se utilizó una máquina de control numérico computarizado (CNC), este dispositivo opera bajo comandos programados por medio de computadoras para controlar la velocidad y posición de los motores, para que estos sigan trayectorias definidas con el fin de modelar un diseño en específico. Con apoyo del modelo en la CNC (LPKF D104) se realizó la construcción de las antenas de microcinta presentadas en este proyecto.

Como materia base, la construcción de la antena, al igual que su etapa de simulación, se empleó el sustrato dieléctrico FR4. Este tipo de sustratos dieléctricos son materiales comúnmente utilizados para la fabricación de circuitos impresos, antenas tipo parche, resonadores, líneas de transmisión y demás elementos de RF de

bajas dimensiones. Típicamente, las antenas de microcinta están compuestas por dos capas conductoras (normalmente de cobre) y un dieléctrico intermedio. Las variaciones en estas láminas se dan principalmente en su permitividad y altura. En particular, para las antenas microstrip, el sustrato dieléctrico desempeña un papel fundamental, ya que la altura del sustrato y su permitividad eléctrica influyen directamente en las ecuaciones utilizadas para calcular sus dimensiones y la frecuencia de operación del sistema. Para la conexión entre la antena diseñada y el equipo de medición, se utilizaron conectores tipo SMA (SubMiniature versión A), el cual es un conector roscado para cables coaxiales, que cumple con el estándar MIL-C39012C de 1982. Típicamente, este es usado en aplicaciones microondas y comunicaciones por radiofrecuencia. En la industria existen varios modelos de estos conectores para frecuencias desde 12 GHz hasta 24 GHz; siendo su frecuencia máxima un parámetro definido por los fabricantes. En cuanto a sus características eléctricas, los conectores SMA son acoplados a  $50\Omega$  y presentan valores de relación de ondas estacionarias (ROE) entre 1:1,5. En este estudio, los conectores SMA facilitaron la transmisión de las señales desde la antena hacia el analizador de espectro, garantizando una conexión robusta y estable. La calidad de los conectores fue fundamental para minimizar cualquier posible degradación de las señales durante la etapa experimental.

Finalmente, con el objetivo de caracterizar las propiedades de las antenas diseñadas, se utilizó el analizador vectorial de redes VNA-FSH8 de Rohde & Schwarz el cual trabaja en un rango de frecuencia desde 100 kHz hasta 8 GHz; los VNA (Vector Network Analyzer) son instrumentos de medida de alta precisión capaces de analizar las propiedades de las redes en electrónica y telecomunicaciones. Principalmente, se utilizan para caracterizar experimentalmente propiedades asociadas con la transmisión, reflexión y recepción de señales eléctricas en un medio determinado, típicamente aire. En términos de antenas, los VNA sirven para analizar la respuesta de una antena en frecuencia, su frecuencia de resonancia, impedancia, ganancia, pérdidas y demás parámetros asociados a la interacción de estas con una señal de entrada. Específicamente, los VNA permiten obtener medidas de los parámetros de dispersión conocidos como los parámetros S los cuales son una representación gráfica de parámetros tales como ganancia, pérdidas, ROE (Relación de onda estacionaria), coeficiente de reflexión, entre otros. Algunas de las medidas de los parámetros S de importancia son las siguientes.

- $S_{11} = V1-/V1+$  Nivel de señal que se refleja en el puerto 1 por desadaptación de impedancias cuando el puerto de salida está cargado con la impedancia característica de la línea.
- $S_{22} = V2-/V2+$  Nivel de señal que se refleja en el puerto 2 por desadaptación de impedancias cuando el puerto de entrada está cargado con la impedancia característica.
- $S_{21} = V2-/V1+$  Transferencia de señal desde el puerto 1 hasta el puerto 2 cuando la salida se encuentra cargada.
- $S_{12} = V1-/V2+$  Transferencia de señal desde el puerto 2 hasta el puerto 1 cuando la entrada se encuentra cargada.

En nuestro caso para los efectos de esta tesis se analizó el parámetro  $S_{11}$  o coeficiente de reflexión en las antenas diseñadas, el parámetro  $S_{11}$  se define como la relación entre la amplitud de la onda reflejada ( $V_{\text{reflejada}}$ ) y la onda incidente ( $V_{\text{incidente}}$ ) en un sistema de transmisión. Matemáticamente, se expresa como:

$$S_{11} = \frac{V_{\text{reflejada}}}{V_{\text{incidente}}} \quad (3.1)$$

Adicionalmente, el  $S_{11}$  también se puede expresar en términos de magnitud en decibeles (dB), utilizando la siguiente fórmula:

$$|S_{11}|_{\text{dB}} = 20 \log_{10} |S_{11}| \quad (3.2)$$

Aquí,  $|S_{11}|$  representa la magnitud del coeficiente de reflexión, cuyo valor varía entre 0 y 1. Un  $S_{11}$  más cercano a 0 indica una mejor adaptación de impedancia, mientras que valores cercanos a 1 reflejan una mayor cantidad de energía reflejada. [88].

### 3.2. DISEÑO

El diseño original para el conjunto de antenas propuestas en este trabajo tiene como base una antena tipo parche rectangular tal como se muestra en la figura 3.1, esta antena se alimenta por una línea de microcinta con una impedancia característica de  $50\Omega$ , la cual como hemos mencionado es una variable esencial para la compatibilidad entre componentes de un sistema de transmisión de datos, por ende todos los elementos deben contar con la misma impedancia con el fin de evitar desacoples, pérdidas y errores en las mediciones. Con el objetivo de trabajar las iteraciones posteriores con base en el fractal de Cantor para el diseño general del sistema de antenas, se dispuso un área de 17,84 mm por 17,37 mm. Las dimensiones de la antena base (modelo cero), se presentan en la tabla 3.1.

Parámetros	Variable	Dimensiones (mm)
Ancho del sustrato	$SW$	41
Largo del sustrato	$SL$	41
Ancho del parche	$W$	17,84
Largo del parche	$L$	17,37
Largo Microcinta	$FL$	11,82
Ancho Microcinta	$FW$	2,5
Espesor Substrato	$h$	1,58

Tabla 3.1: Dimensiones antena parche original

A su vez, se buscó obtener frecuencias resultantes en los diferentes parámetros  $S_{11}$  dentro del rango de 1 GHz a 6 GHz, esto con el fin de poder realizar la ejecución de la etapa experimental. En cuanto al diseño de la antena original, la relación que describe la frecuencia de resonancia para el modo fundamental está dada por la ecuación (3.3).

$$f_r = \frac{C}{2L_{\text{eff}}\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (3.3)$$

Donde  $L_{\text{eff}}$  y  $\epsilon_{\text{reff}}$  son la longitud y constante dieléctrica efectivas de la antena, respectivamente [48], como podemos apreciar a continuación:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad (3.4)$$

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (3.5)$$

$$\Delta L = 0,412h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (3.6)$$

Si el ancho  $W$  es mucho mayor que el grosor  $h$ , la aproximación tiende a ser más precisa. A medida que  $h/W$  aumenta, el valor de  $\epsilon_{\text{reff}}$  se acerca a  $\epsilon_r$ , puesto que la mayor parte del campo eléctrico queda contenido en el sustrato. Por su parte, la longitud efectiva  $L_{\text{eff}}$  en nuestra antena parche rectangular describe cómo las ondas electromagnéticas se propagan sobre el parche radiante teniendo en cuenta los efectos de fringing (efecto de bordes) y la permitividad relativa efectiva  $\epsilon_{\text{reff}}$ . Por ende, la longitud efectiva está relacionada inversamente con la frecuencia de resonancia, de modo que a frecuencias más altas, la longitud es menor. Es de tener en cuenta que la longitud física ( $L$ ) del parche no es exactamente igual a la longitud efectiva debido a este efecto de bordes. Es por esto que se considera la corrección ( $\Delta L$ ) descrita en la ecuación 3.6. Este  $\Delta L$  representa la extensión del

campo en los bordes.

Como vimos en el capítulo anterior, el diseño de nuestra antena consta de una placa de sustrato dieléctrico cuyo material es FR4 con  $\epsilon_r = 4,4$ , el cual es comúnmente utilizado como base de muchos dispositivos electrónicos y circuitos integrados. En la parte superior del sustrato, se tiene la antena de microcinta y la línea de transmisión con impedancia de  $50\Omega$ , y en la parte posterior, el plano a tierra de la antena. Con base en estas definiciones, la antena de microcinta original presentada en la figura 3.1, posee una frecuencia de resonancia en el modo fundamental sobre los 3,9 GHz.

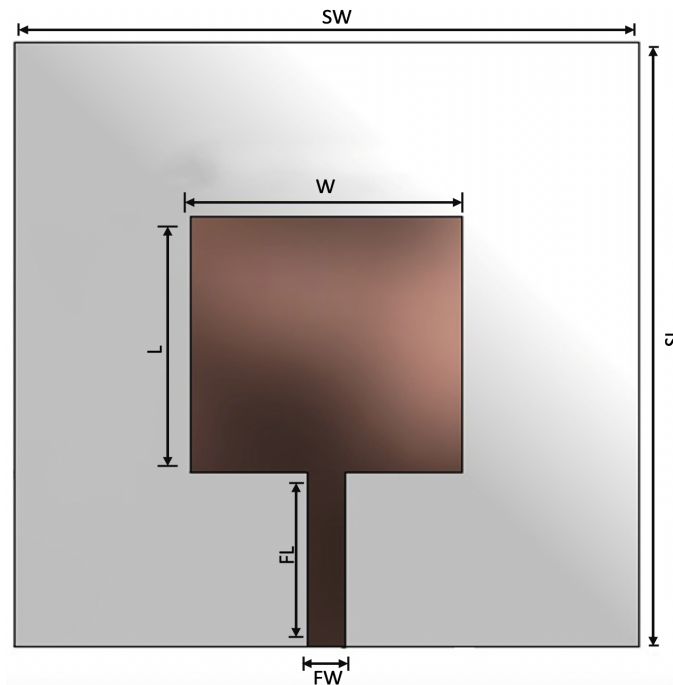


Figura 3.1: Antena Original (Iteración cero).

### 3.3. CONFIGURACIÓN DE LAS ANTENAS/MODIFICACIONES TIPO RANURA

Posterior a obtener el modelo inicial e identificada la frecuencia de resonancia del modo fundamental del sistema, se aplicaron una serie de ranuras sobre el parche radiante de la antena, cuyos tamaños obedecen a la secuencia del fractal de Cantor, detallada en el capítulo 2. Esto con el objetivo de evaluar el efecto de ambas características (ranuras y fractales) en la respuesta multibanda en frecuencia de las antenas.

Luego, para poder generar los diseños de antenas con base en la secuencia fractal y el diseño planteado en la Figura 3.1, se definió un espaciado de 0,36 mm entre los bordes de las ranuras y los bordes del parche (ambos paralelos a L), además, del total de la longitud del parche se delimitó un tramo igual a 12,96 mm, para trabajar en las iteraciones de la secuencia de Cantor. Con base en la anterior definición, se iteró la secuencia de Cantor y se dispusieron las ranuras sobre el parche radiante de la antena, tal como lo muestra la Figura 3.2; cabe mencionar que, en términos de dimensiones para el control de las ranuras el ancho es constante y el largo variable, siendo este último gobernado por la secuencia del fractal de Cantor. Esta configuración se diseñó con el objetivo de que las ranuras fueran perpendiculares a la dirección de la corriente que ingresa por la línea de microcinta. Las iteraciones de la secuencia fractal se llevaron hasta el cuarto grado (ranuras de 0,16 mm), esto por las capacidades en la fabricación que veremos en la siguiente sección.

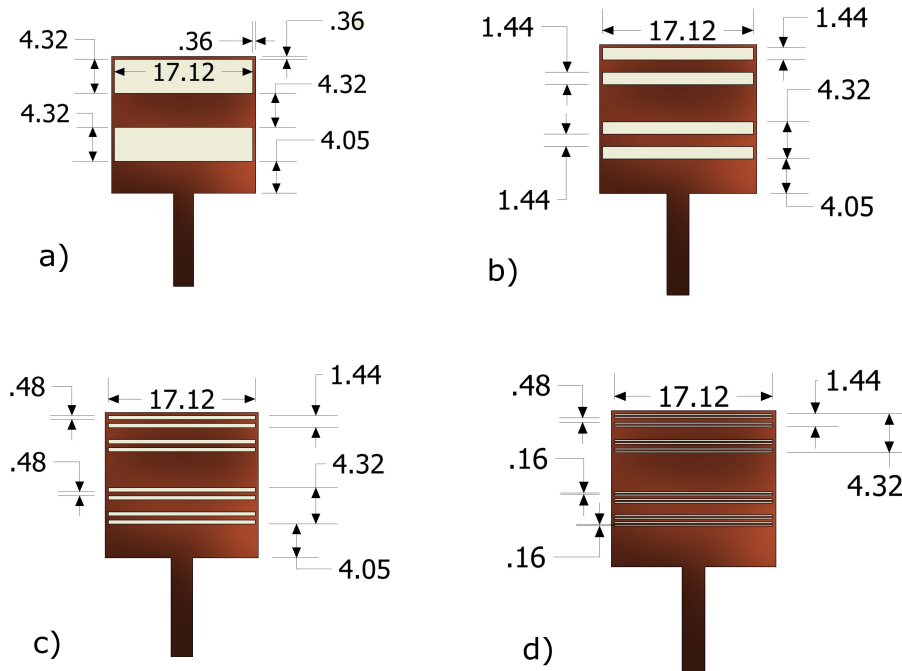


Figura 3.2: Antenas con ranuras en secuencia fractal de cantor, a) Cantor Iteración 1, b) Cantor Iteración 2, c) Cantor Iteración 3, d) Cantor Iteración 4.

Como podemos apreciar en la Figura 3.2, a medida que aumenta el orden del fractal de Cantor, los tercios centrales de cada división se rellenan con cobre. A su vez, podemos definir que el número de ranuras aumenta a medida que aumenta el orden de la secuencia. Por consiguiente, la cantidad de ranuras por iteración o grado fractal aumenta en un orden de base dos, de manera que se tienen  $2^1$  ranuras para la primera iteración, y  $2^4$  ranuras para la última iteración analizada, correspondiente al orden 4. Respecto al tamaño de las ranuras, estos disminuyen por un factor de  $1/3$  a medida que aumenta cada iteración. En la Tabla 3.2 se pueden apreciar la cantidad de ranuras por iteración, así como su tamaño.

Iteración/Grado	Cantor Orden 1	Cantor Orden 2	Cantor Orden 3	Cantor Orden 4
Cantidad de ranuras	$2^1$	$2^2$	$2^3$	$2^4$
Tamaño de las ranuras (mm)	4,32	1,44	0,48	0,16

Tabla 3.2: Tamaños de ranuras con base en la secuencia fractal de Cantor

Con base en la figura 3.3, se ilustra el desarrollo paralelo de la secuencia fractal de Cantor a nivel geométrico (figura a), y la traducción de la misma al modelo de ranurado sobre las antenas (figura b); como se aprecia, el modelo C0 al lado izquierdo es considerado nuestra antena inicial (véase figura 3.1) sin ninguna ranura sobre el parche. A medida que la secuencia se itera (C1,C2,C3,C4) los elementos tipo ranuras son generados progresivamente sobre las antenas del lado derecho (imagen b) hasta completar la iteración del modelo 4. Como se observa y siguiendo la definición de la secuencia de cantor presentada en el capítulo 2, sección 2.4.1, el proceso parte del modelo C0, cuyo segmento inicial se divide en tres partes, eliminando el tercio central. Este mismo principio se aplicó a los elementos tipo ranuras en las antenas; se tomó el área definida sobre el parche inicial y se dividió en tres segmentos, ranurando los segmentos externos y manteniendo intacto el segmento central (o, visto de otra manera, relleno con cobre el segmento del medio). Mientras que la secuencia fractal en la figura a se extiende teóricamente hasta el infinito, en la figura b se detiene en la iteración 4 debido a las limitaciones geométricas y de construcción implicadas.

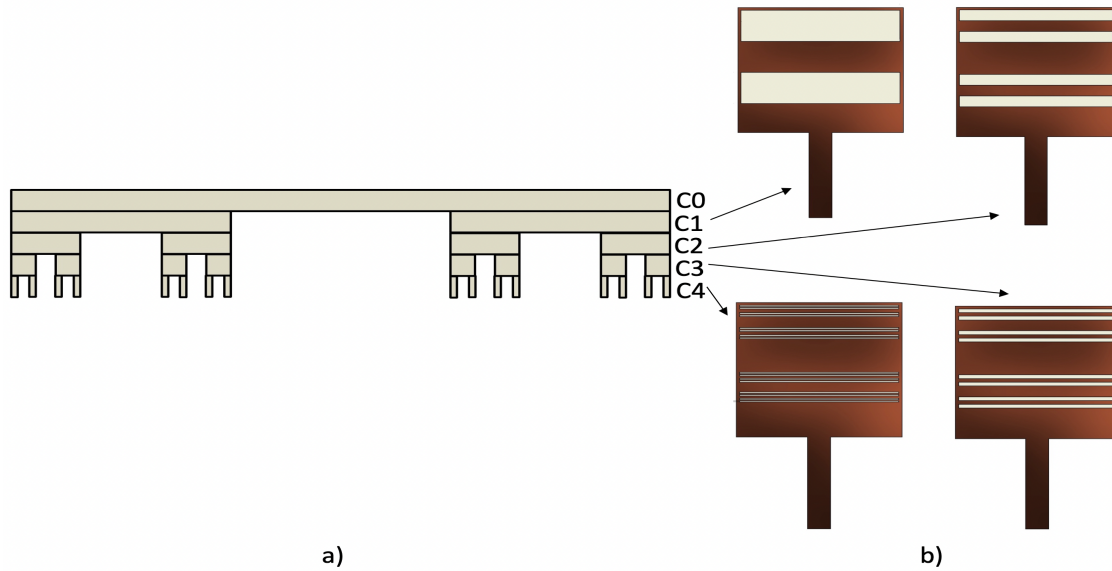


Figura 3.3: a) Secuencia de cantor geométrica, b) Antenas de Cantor

Trabajos previos con base en esta secuencia han sido estudiados en la literatura [89–91], donde la elección del diseño varía según la aplicación y los criterios de los autores. En algunos casos, la secuencia se implementa en forma de ranuras o cortes rectangulares sobre el plano de tierra o el parche. Tal es el caso del trabajo de [92], que investiga una antena de parche circular con una ranura fractal de Cantor modificada hasta la tercera iteración. Por otro lado, [93] presenta un conjunto de antenas rectangulares con cortes tipo ranura en ambos parches, extendidos hasta la tercera iteración, logrando frecuencias de operación en el rango de 4.5 GHz a 10.6 GHz. En [81] se presenta el diseño de una antena fractal multibanda con base en el conjunto de Cantor, utilizando alimentación por inserción. La geometría consiste en un parche rectangular con ranuras fractales generadas hasta la tercera iteración, con una disposición similar a la ilustrada en la Figura 3.3(a). Los resultados muestran un mejor desempeño en términos de multibanda y miniaturización, con frecuencias de operación adecuadas para aplicaciones inalámbricas. Para efectos de esta tesis, la metodología de diseño adoptó la disposición de ranuras con base en el principio de que los elementos tipo ranura favorecen la generación de múltiples bandas de operación. Además, se propuso una distribución de ranuras con el mismo largo pero ancho variable, lo que constituye un enfoque novedoso no reportado en la literatura existente.

Como se evidencia en los modelos presentados, en la primera antena se implementaron 2 ranuras, correspondientes al primer orden de la secuencia. A medida que se avanza en las iteraciones, la cantidad de ranuras se duplica, resultando en 4, 8 y 16 ranuras para las antenas de segundo, tercer y cuarto orden, respectivamente; estos modelos son consecuentes con la teoría de que la secuencia fractal de Cantor posee una definición geométrica que elimina en cada iteración el segmento abierto correspondiente al tercio central de cada intervalo, es decir, se trata de un segmento de longitud fija al que se divide en tres partes, en el cual se suprime el tercio de segmento central. Este procedimiento se repite en los segmentos que resultan de cada división. Como se ve, es un procedimiento recursivo que es siempre el mismo independientemente del nivel de construcción en el que se encuentre; por lo tanto, se trata de lo que se ha definido como fractal, la continuación de la secuencia en un espacio infinito llevaría a replicar la estructura original; en nuestro caso, la antena tipo parche de la figura 3.1 y ha sido la base del diseño de las antenas presentadas en este capítulo.

### 3.4. SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, la simulación del sistema se realizó usando HFSS. El proceso de simulación de las antenas tipo parche rectangulares incluyó cinco diseños diferentes, la primera antena corresponde al diseño original sin ranuras (Figura 3.1), mientras que las cuatro antenas restantes incorporaron las ranuras propuestas basadas en la secuencia fractal de Cantor, iteradas desde el primer grado hasta el cuarto grado (Figura 3.2). Para todas las simulaciones, se utilizó como sustrato el material FR4 con un espesor de 1,58 mm, mientras que el material del parche radiante y del plano de tierra fue cobre. Las dimensiones de las ranuras son acordes a las presentadas en la tabla 3.2. En este caso, mediante el software se modelaron detalladamente las propiedades geométricas de las cinco antenas, incorporando las dimensiones específicas del sustrato, el parche radiante, el plano de tierra y las ranuras fractales en secuencia de Cantor. Durante el proceso de simulación, el software discretizó el diseño completo de la antena en pequeños elementos finitos, resolviendo las ecuaciones de Maxwell en cada región para calcular las distribuciones de campos eléctricos y magnéticos.

Se analizó el coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ) como resultado principal para cada diseño con base en la secuencia fractal de Cantor, así como para la antena original (sin ninguna ranura), permitiendo evaluar el impacto de la introducción de ranuras fractales en el desempeño de la antena en términos de resonancia. Este análisis previo se realizó con el objetivo de entender y validar el comportamiento de las antenas antes de su fabricación.

Ahora bien, para el proceso de construcción de las antenas se empleó la CNC (PKE, D104) y se adaptó cada modelo de la antena con conectores SMA a 50 $\Omega$  como se observa en las figuras 3.3 y 3.4 respectivamente.

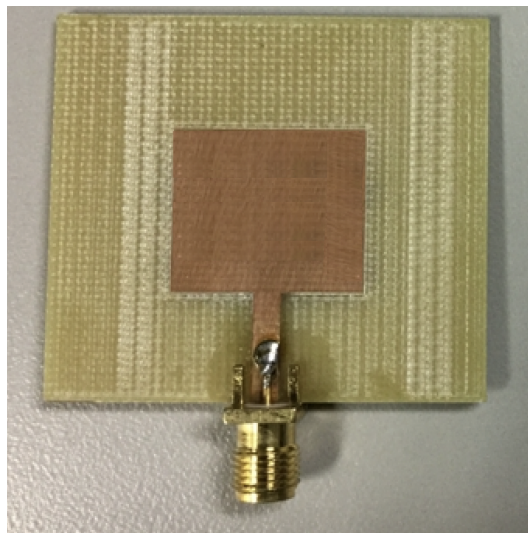


Figura 3.4: Antena Original Construida.

Es importante resaltar que el estudio en este trabajo se iteró hasta el cuarto grado del fractal (ranuras de 0,16 mm) teniendo en cuenta que el tamaño de las ranuras en esta iteración (las de menor tamaño) no fueran menores que 120  $\mu\text{m}$  dada las capacidades de fabricación de la CNC y posterior análisis a altas frecuencias con el VNA.

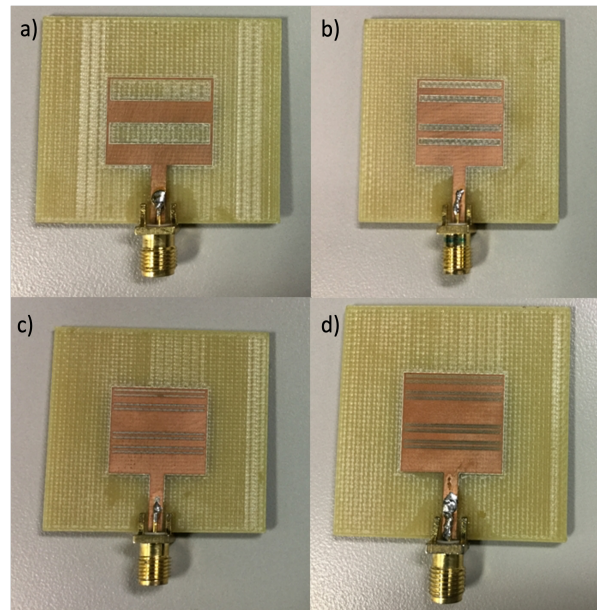


Figura 3.5: Antenas con ranuras en secuencia fractal de cantor construidas a)C1, b)C2, c)C3, d)C4

Finalmente, es importante mencionar dentro del levantamiento metodológico en la literatura las anotaciones más relevantes encontradas como metodologías y/o técnicas para obtener doble banda en antenas tipo parche. En la figura 3.6 se pueden apreciar los elementos más característicos enfocados en número de bandas de frecuencia, espectro de operación, tipos de geometría y fractal, y grado iterativo empleado. Como podemos apreciar, encontramos múltiples variedades de aplicaciones donde las antenas tipo parche han sido estudiadas. Dentro de las metodologías identificadas, se observa el uso de fractales como Sierpinski, Hilbert, Koch, Minkowski, Peano, Mandelbrot y Cantor, además de configuraciones geométricas propuestas por diversos autores, como formas en cruz, estrella, flor, árboles y círculos. La iteración de estos fractales se limita generalmente a grados entre 2 y 4, ya que una mayor iteración incrementa la complejidad de análisis y fabricación, impactando en los costos y en la factibilidad del diseño.

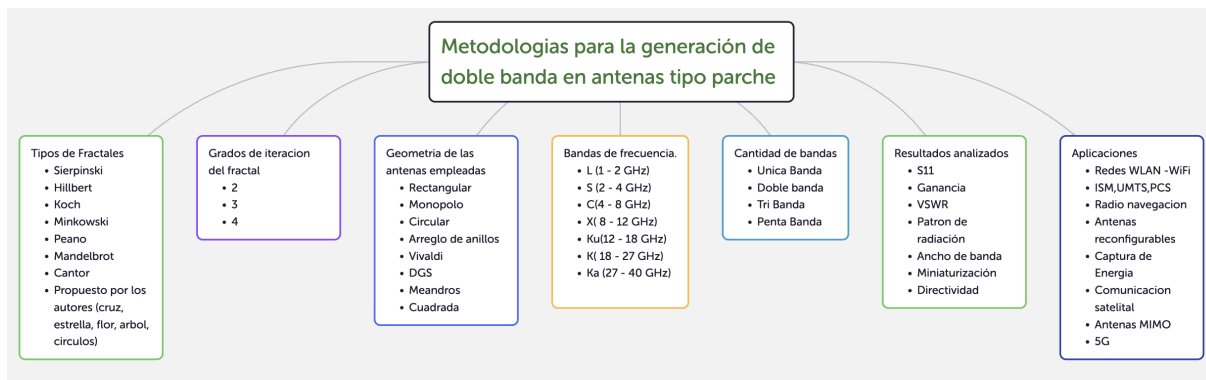


Figura 3.6: Metodologías empleadas en la literatura.

Las geometrías de las antenas analizadas incluyen configuraciones como rectangulares, monopolos, circulares, anillos, Vivaldi, DGS, tipo meandros y geometrías cuadradas, cada una con impacto en la directividad, ancho de banda y respuesta en frecuencia. Además, los estudios abarcan frecuencias desde la banda L hasta la banda Ka, lo que demuestra su adaptabilidad a distintas aplicaciones en comunicaciones móviles, radares y sistemas satelitales.

Si bien el enfoque principal es la obtención de doble banda, algunos estudios han explorado antenas tribanda y pentabanda, evidenciando el interés por estructuras multibanda optimizadas. Los análisis de la literatura en términos de resultados destacan parámetros clave como coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ), ganancia, VSWR, patrón de radiación, ancho de banda y miniaturización, aspectos esenciales para validar el desempeño de este tipo de sistemas.

Las aplicaciones identificadas incluyen una amplia gama de servicios como redes WLAN, ISM, UMTS, PCS, radionavegación, antenas reconfigurables, captura de energía, comunicación satelital, sistemas MIMO y 5G, reafirmando la importancia de este tipo de antenas en el avance de las tecnologías de comunicación y radiocomunicación actuales.

# 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Índice

4.1 Múltiple Banda . . . . .	25
4.2 Patrón de Radiación y VSWR . . . . .	27
4.3 Discusión . . . . .	29

### 4.1. MÚLTIPLE BANDA

En la sección anterior se presentaron varios modelos de antenas de microcinta modificadas en su parche radiante mediante ranuras dispuestas con base en cuatro iteraciones de la secuencia fractal de Cantor. Posterior a la simulación de los sistemas, se construyeron los prototipos y se realizaron las medidas del parámetro  $S_{11}$  usando el analizador vectorial de redes FH8 fabricado por Rohde & Schwarz. Los resultados computacionales y experimentales para la antena original sin ranuras considerada como referencia se presentan en la Figura 4.1. En esta podemos apreciar que el coeficiente de reflexión para la antena se presenta sobre los 3,9 GHz, el cual es acorde al modelo de líneas de transmisión como evidenciamos en el anterior capítulo.

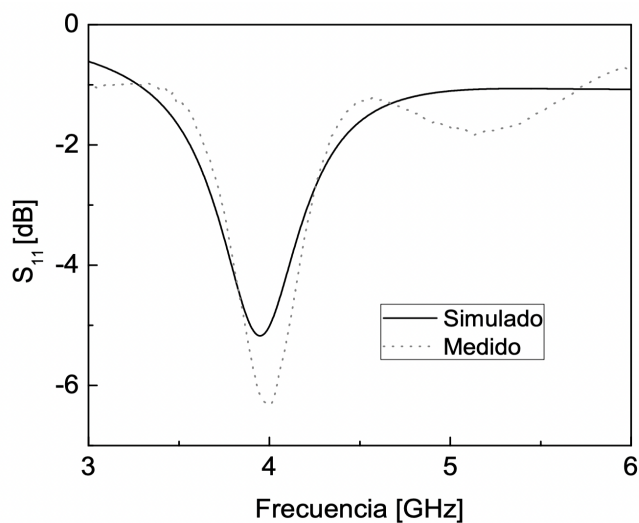


Figura 4.1: Parámetro  $S_{11}$  simulado y medido para antena sin ranuras (véase Figura 3.1).

Ahora bien, para los modelos posteriores con base en ranuras, se evidencia que el coeficiente de reflexión se ve desplazado en frecuencia y aumenta su magnitud posterior a agregar ranuras de Cantor en orden 1, teniendo en cuenta que cuando se aplica esta configuración en el diseño a iteraciones superiores se generan dos frecuencias de resonancia. Los resultados son mostrados en la Figura 4.2, donde se puede observar gran similitud en las frecuencias de resonancia de cada antenna las cuales están alrededor de 3,7 GHz y 4,5 GHz, exceptuando el modelo de orden 1 cuya única frecuencia se encuentra alrededor de 3,7 GHz.

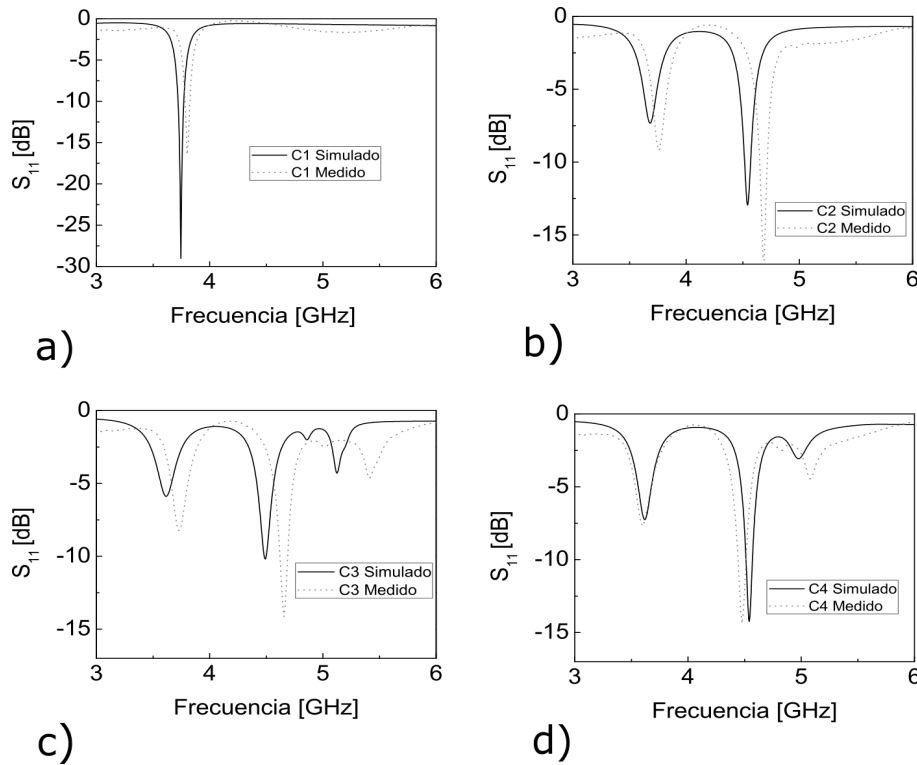


Figura 4.2: Parámetro  $S_{11}$  simulado y medido para las antenas en cuatro órdenes de la secuencia de Cantor. a) Cantor Orden 1, b) Cantor Orden 2, c) Cantor Orden 3 y d) Cantor Orden 4

En la Tabla 4.1 se pueden apreciar las frecuencias de resonancia para cada modelo y el ancho de banda para la segunda frecuencia; los resultados experimentales muestran una buena similitud a lo esperado con los resultados computacionales. En la Figura 4.1 se observa que el mínimo coeficiente de reflexión para la antenna sin ranuras se da sobre los 3,9 GHz, pero este pico no alcanza a cumplir el criterio  $\leq -10$  dB, por lo tanto, no presenta una condición adecuada para su uso en la transmisión de algún tipo de señal. Por el contrario, el coeficiente de reflexión de cada modelo en base a la secuencia de Cantor (Figura 4.2) es mucho mejor que -10dB, lo que indica que al realizar la modificación en la geometría del parche por medio de ranuras cuyos tamaños se rigen por esta secuencia, permiten mejorar el sistema, presentando dos frecuencias de resonancia en cualquiera de las iteraciones, lo que genera mejores condiciones para la operación de las antenas. En efecto y con base en lo propuesto, el modelo fractal permite evidenciar la transición de una antenna monobanda a configuraciones dual-band.

Los resultados obtenidos para el modelo de Cantor de orden 1 muestran frecuencias de resonancia en 3,7 GHz y 4,5 GHz. Estas frecuencias también se observan en los modelos de órdenes superiores, aunque con ligeras variaciones en las pérdidas. Esto sugiere que la geometría del modelo de orden 4 ofrece un mejor acoplamiento, evidenciado por una reducción en las pérdidas y una mayor eficiencia en estas frecuencias; por otro lado, la discrepancia observada entre los resultados de las simulaciones y las mediciones experimentales puede atribuirse principalmente a factores como el proceso de fabricación, las imperfecciones en el soldado y las variaciones en

Iteración	C1	C2	C3	C4
<b>Frecuencia de resonancia 1</b>	3,7 GHz	3,7 GHz	3,7 GHz	3,7 GHz
<b>Frecuencia de resonancia 2</b>	NA	4,5 GHz	4,5 GHz	4,5 GHz
<b>Ancho de banda</b>	50 MHz	50 MHz	20 MHz	50 MHz

Tabla 4.1: Frecuencias de resonancia y anchos de banda Antenas de Cantor

el acoplamiento.

Las antenas diseñadas en esta tesis alcanzan su primer modo de resonancia alrededor de los 3,7 GHz, teniendo en cuenta que la frecuencia de resonancia fundamental para una antena con las mismas dimensiones sin adición de ranuras (modelo original) en secuencia de Cantor se encuentra alrededor de los 3,9 GHz, lo que implica que el área ocupada por las nuevas antenas es un 89% de la original, indicando que el área total de las antenas propuestas puede reducirse en un 11%, algo que sustancialmente podría aportar a la reducción total de un sistema de comunicaciones con base a la secuencia de Cantor y es consecuente a los beneficios de la aplicación de geometrías tipo ranura y fractales en antenas tipo parche.

Dicho esto, hemos podido evidenciar en este punto que la inclusión de la secuencia de Cantor sobre el sistema de antena de microcinta planteado inicialmente en este trabajo, permite que se generen dos bandas de frecuencia, las cuales pertenecen a la banda SHF del espectro electromagnético; a partir de estos resultados, podemos concluir que el sistema experimenta una mejora con respecto a sus condiciones iniciales, gracias a la creación de nuevas frecuencias de resonancia. Estas frecuencias desempeñan un papel crucial, ya que, partiendo de un modelo que no posee condiciones óptimas, se llega a varios que con las mismas dimensiones presentan aumento en la eficiencia, el rendimiento y la versatilidad del sistema, ampliando así el número de aplicaciones posibles. Estos sistemas con base a la secuencia de Cantor pueden ser adecuados para aplicaciones de radiocomunicación por trayectoria directa o línea de vista, sistemas satélites, sistemas de microondas, WiMAX, redes de área personal, y redes WLAN. Es importante mencionar que al disponer diferentes tipos de ranuras sobre la capa radiante se han observado modificaciones en algunas propiedades de la polarización, tales como polarización dual [94] y polarización circular [95].

## 4.2. PATRÓN DE RADIACIÓN Y VSWR

Con base en los resultados presentados en el apartado anterior referente a la obtención de múltiple banda en las antenas, se generaron los patrones de radiación con foco en la directividad de cada antena para las frecuencias de interés resultantes (3,9 GHz y 4,5 GHz), tal como se muestra en la figura 4.3. Estos resultados permitieron comparar el efecto de la frecuencia en la distribución espacial de la radiación a medida que se adicionan ranuras en el parche.

La inclusión de ranuras en las antenas en efecto genera modificaciones en la forma y distribución del patrón de radiación y en la respuesta del VSWR que veremos a continuación (imagen 4.4). A medida que aumenta la cantidad de ranuras en la estructura, se observa un cambio progresivo en la distribución y concentración de la energía radiada. Con base en el comportamiento del patrón de radiación, podemos confirmar que aunque en algunos casos las ranuras pueden ayudar a dirigir la radiación en una dirección específica, en los demás escenarios a frecuencias superiores el aumento de ranuras genera un patrón más disperso y menos directivo, lo cual puede deberse en mayor medida a que el ranurado genera modos adicionales en la transmisión de la onda dentro de la cavidad resonante.

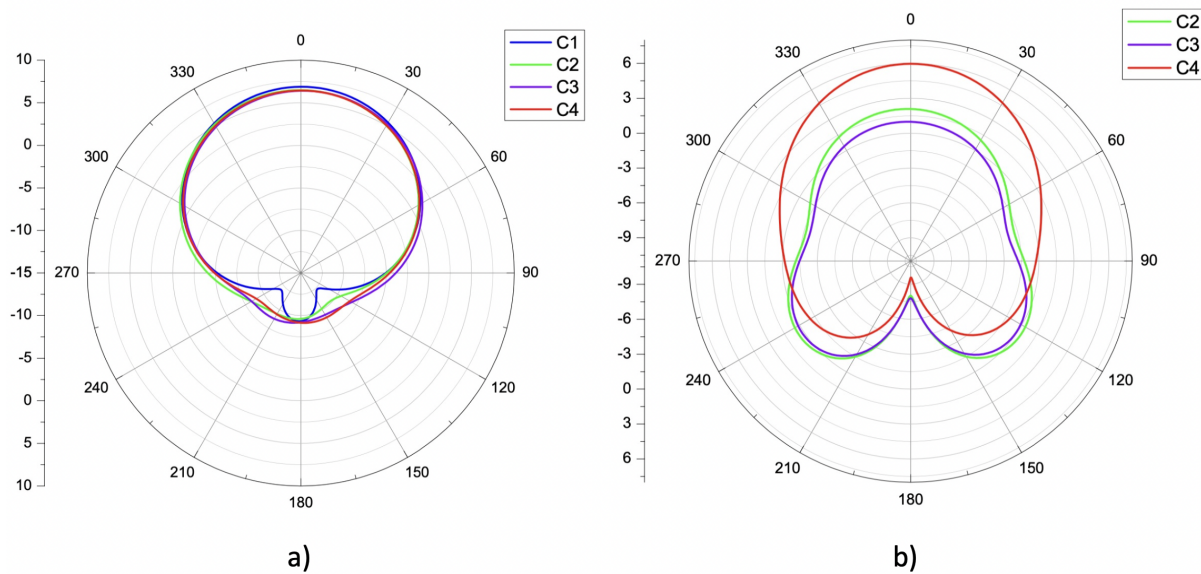


Figura 4.3: Patrón de radiación Antenas de Cantor. a) 3,7 GHz, b) 4,5 GHz

Los patrones de radiación obtenidos muestran un comportamiento direccional en ambas frecuencias, con diferencias en la apertura del haz y en la intensidad de los lóbulos principales y secundarios. A 3,7 GHz, podemos evidenciar que la antena de Orden 1 exhibe la mayor directividad (6,88 dB) y el mejor VSWR (1,2), lo que indica menores pérdidas por reflexión y una mayor eficiencia de acoplamiento con la línea de transmisión. Por otro lado, a 4,5 GHz, la antena C4 muestra el mayor nivel de directividad (5,95 dB), aunque con una eficiencia de radiación más baja, lo que sugiere que, si bien la radiación es más focalizada, la potencia radiada es menor. Es consecuente que a medida del aumento en la cantidad de ranuras en las antenas (de C1 con 2 ranuras hasta C4 con 16 ranuras) se presentan variaciones que influyen en la directividad, la eficiencia de radiación y la distribución del lóbulo principal. En C2 y C3, el lóbulo principal se vuelve más definido y la radiación en direcciones no deseadas se reduce, lo que genera cambios en la direccionalidad. En C4, con 16 ranuras, se obtiene un patrón más concentrado, con valores de 6,44 dB a 3,7 GHz y 5,95 dB a 4,5 GHz, manteniendo la directividad con ligeras diferencias, además, se observa la presencia de lóbulos secundarios más pronunciados, característicos en estructuras con mayor complejidad geométrica (ranuras de tamaño más fino).

Iteración	Frecuencia (GHz)	$\eta$ (%)	Directividad (dB)	Ángulo (°)	Ganancia (dB)	HPBW (°)	VSWR
C1	3,7	32,36	6,88	0	-6,81	84	1,2
C2	3,7	25,04	6,50	0	-9,03	90	2,2
C3	3,7	22,68	6,41	2	-9,63	88	2,2
C4	3,7	21,65	6,44	0	-10,26	88	2,3
C2	4,5	6,13	2,08	356	-21,78	290	1,4
C3	4,5	5,62	0,99	356	-22,43	300	1,7
C4	4,5	12,81	5,95	0	-12,99	96	1,2

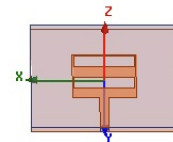


Tabla 4.2: Parámetros de desempeño de las antenas diseñadas

Ahora bien, en términos del análisis del VSWR podemos concluir con base en figura 4.4 que este es consecuente con el modelo planteado en lo que respecta a frecuencias de interés (3,7 GHz y 4,5 GHz). Para la primer frecuencia en 3,7 GHz, las antenas presentan una relación de onda estacionaria entre 1,2 y 2,2, lo cual indica una buena adaptación en la mayoría de los casos. Sin embargo, en algunas iteraciones, los valores se acercan al umbral recomendable (VSWR <2), lo que podría generar ciertas pérdidas por reflexión. En contraste, para la segunda frecuencia de interés en 4,5 GHz, los valores oscilan entre 1,2 y 1,7, lo que sugiere una mejor adaptación en comparación con la banda de 3,7 GHz.

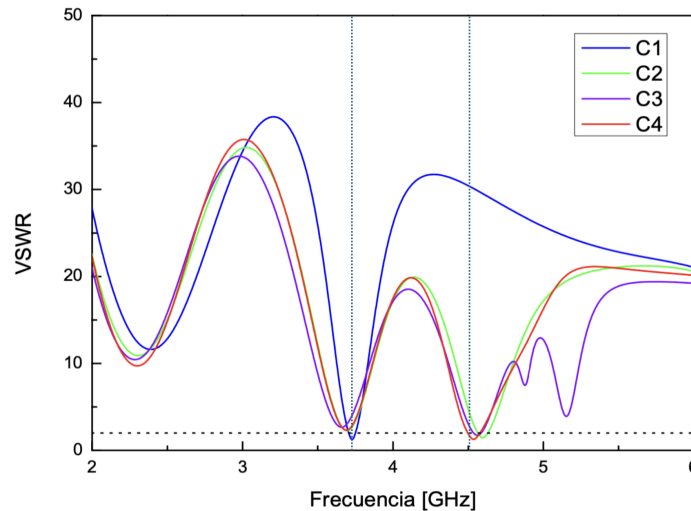


Figura 4.4: VSWR Antenas de Cantor

Los valores registrados para el factor HPBW (Half-Power Beamwidth) oscilan entre  $84^\circ$  y  $300^\circ$ , reflejando diferencias en la directividad de cada antena. Este parámetro definido a partir del ancho del haz a  $-3$  dB con respecto al punto máximo de radiación. Las antenas que presentan valores altos de HPBW indican un patrón de radiación más amplio y menos directivo, lo que puede ser deseable o no dependiendo de la aplicación, como es el caso de sistemas de comunicaciones móviles o Wi-Fi de cobertura amplia. Por el contrario, un HPBW más reducido se traduce en una mejor concentración de energía en una dirección específica, lo que favorece aplicaciones donde la directividad es un factor crítico, como en enlaces de microondas punto a punto, radares de seguimiento o sistemas de comunicaciones satelitales, donde se requiere maximizar la eficiencia de transmisión en una trayectoria bien definida.

### 4.3. DISCUSIÓN

Al estudiar el coeficiente de reflexión de la antena en la ventana de frecuencia analizada, antes de realizar modificaciones en la capa radiante, la frecuencia de resonancia corresponde al modo dominante  $TM_{010}$  con un valor aproximado de 3,9 GHz, el cual es coherente comparado con el resultado del modelo simulado. La condición de resonancia para el modo fundamental está gobernada por el parámetro de longitud  $L$  del parche radiante de la antena y corresponde a la frecuencia de resonancia de menor valor. En la frecuencia fundamental, la distribución de densidad de corriente tiene una dirección paralela a la longitud del parche radiante de la antena y, debido a que esta es continua en toda la superficie del parche (además de que se cumple  $h \ll \lambda$ , el campo eléctrico es paralelo a las capas conductoras y se distribuye en dos semiciclos de onda a lo largo de la longitud del parche.

En el momento de realizar modificaciones en el diseño de la antena con el arreglo de ranura de primer orden (C1) de la serie de Cantor, es evidente que la frecuencia de resonancia fundamental toma un valor inferior; esto se atribuye a un aumento en la longitud eléctrica del parche de la antena debido al cambio en la distribución de la corriente causado por la discontinuidad que representan las ranuras. En consecuencia, el parche de la antena se percibe eléctricamente más largo y la frecuencia de resonancia tiende a un valor inferior, lo que es acorde con el modelo de análisis de líneas de transmisión. Teniendo en cuenta la relación entre la longitud y la frecuencia de resonancia, es válido hacer la observación de que esta última se ve saturada por el espesor infinitesimal de las ranuras, la velocidad de aumento de la longitud del fractal es mayor que la de la disminución de la frecuencia de resonancia, tal como se confirma en [96].

En otras palabras, el espesor de las ranuras y la separación entre ellas tienden a tomar valores muy pequeños

a medida que aumenta el orden del fractal, y la primera frecuencia de resonancia no percibe estas variaciones, lo que ocasiona la saturación de esta frecuencia y forma una asíntota o tendencia a un valor constante a medida que aumenta el orden del fractal. Por otro lado, las modificaciones en el diseño de la antena realizadas en base a la serie de Cantor ocasionan un cambio en el patrón del campo dentro de la antena (cavidad), donde el campo en el modo fundamental que se configuraba en dos semiciclos a lo largo de  $L$  es perturbado, dando lugar a más oscilaciones a lo largo del parche, tal como se muestra en la Figura 4.3 para el campo en la componente  $z$ . Además, debido a las ranuras (discontinuidades sobre el parche radiante) el campo eléctrico presenta componentes en diferentes direcciones a  $z$ , en contraste a su comportamiento para la antena sin ninguna modificación. En la Figura 4.3, se muestran las oscilaciones del campo en la componente  $z$  a medida que aumenta el orden de la secuencia de Cantor, la figura pretende describir cómo se modifican las oscilaciones del campo en dicha componente a medida que se adicionan ranuras a la antena y hacer un contraste con el modo fundamental donde solo aparecen dos semiciclos de onda.

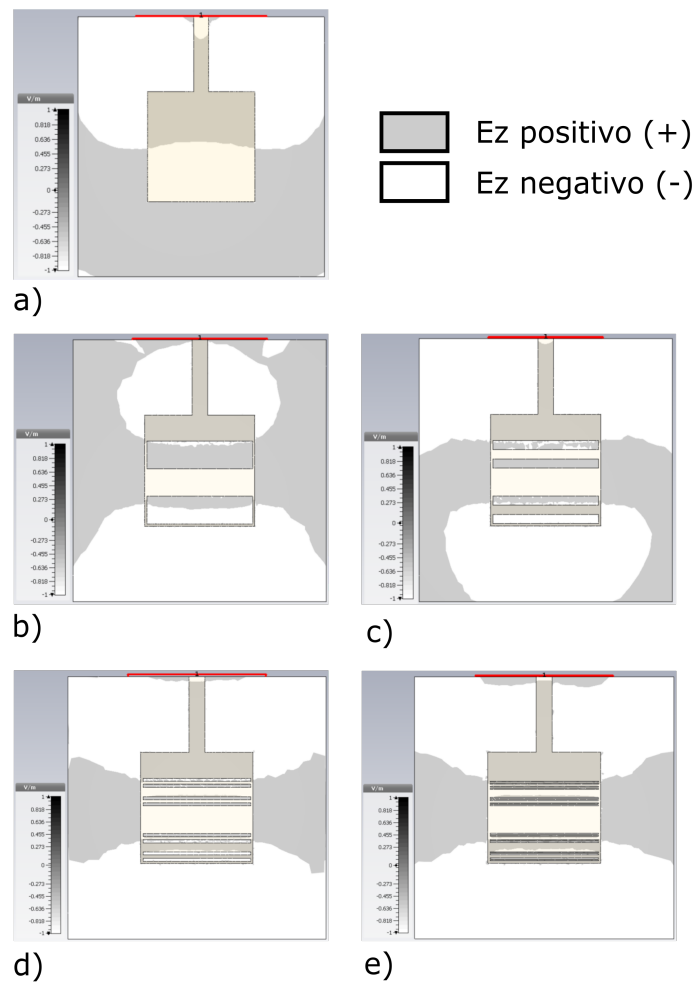


Figura 4.5: Configuración del campo eléctrico en el eje  $z$  (plano  $x-y$ ) para los diferentes diseños de antenas: a) parche sin modificaciones y frecuencia de resonancia fundamental ( $TM_{010}$ ). Escala normalizada con  $6,66e^4$  V/m. b) secuencia de Cantor orden  $C_1$  y escala normalizada con  $2,5e^5$  V/m. c) secuencia de Cantor orden  $C_2$  y escala normalizada con  $1,1e^5$  V/m, d) secuencia de Cantor orden  $C_3$  y escala normalizada con  $1,05e^5$  V/m y e) secuencia de Cantor orden  $C_4$  y escala normalizada con  $4,72e^5$  V/m.

Finalmente, dos características eléctricas que se modifican debido al fractal son el acople de la impedancia de la antena y el ancho de banda de impedancia. Para la primera, se aprecia que el diseño de la iteración  $C_1$  tiene el mejor acople, con un coeficiente de reflexión inferior a  $-15$  dB, lo cual es un valor aceptable para muchas

aplicaciones de comunicaciones inalámbricas. En cuanto al ancho de banda de impedancia, se observa una disminución debido a la modificación de la antena con la adición de las ranuras, lo cual es un resultado esperado de la aplicación de fractales en antenas.

Es claro que bajo estos modelos las antenas conservan dos propiedades fundamentales de una estructura fractal, geometría y frecuencias de resonancia. La primera, parte del concepto visual de que una estructura fractal es auto similar, es decir, las antenas están constituidas de copias de diferente tamaño de una misma figura (ranura), por más que estas se repitan en el espacio, están destinadas a conformar la unidad original de la que provienen. Por otra parte, las frecuencias de resonancia de las antenas aumentan respecto al modelo inicial, y se mantienen a medida que se aumentan las iteraciones, lo cual es una de las propiedades más importantes de las geometrías fractales aplicadas a antenas, el generar dos o más frecuencias de resonancia (multibanda).

Los resultados obtenidos en el análisis del patrón de radiación y del VSWR permiten identificar las antenas con mejor desempeño y aquellas que puedan requerir ajustes para mejorar su eficiencia. Se observa que la frecuencia de operación influye significativamente en la directividad y en la adaptación de impedancia. A 3,7 GHz, la antena C1 muestra el mejor desempeño en términos de directividad y VSWR, mientras que a 4,5 GHz, la antena C4 presenta una menor directividad respecto a la primer iteración del fractal.

La implementación de ranuras basadas en la secuencia fractal ha demostrado ser un factor clave en la modificación de las características de radiación de las antenas. A medida que aumenta el número de ranuras, se han observado cambios en la directividad y una mayor focalización de la radiación; sin embargo, esto también conlleva una reducción en la ganancia y la aparición de lóbulos secundarios, lo que sugiere la necesidad de un balance entre estos parámetros. Este comportamiento indica la existencia de un punto óptimo en el diseño, donde la directividad mejorada no comprometa la eficiencia debido a la radiación no deseada. En aplicaciones donde la estabilidad del patrón de radiación es crítica, podría ser conveniente limitar la cantidad de ranuras o emplear estrategias de mitigación de lóbulos secundarios, como la redistribución geométrica o técnicas de alimentación diferenciadas.

# 5

## CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

### Índice

---

<b>5.1 Conclusiones</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>5.2 Recomendaciones</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>5.3 Trabajo Futuro</b> . . . . .	<b>33</b>

---

En esta tesis se ha demostrado un proceso adecuado para la generación de doble banda en antenas de microcinta rectangulares mediante un ranurado sobre el parche radiante cuyos tamaños estuvieran gobernados por estructuras fractales, en nuestro caso la secuencia fractal de Cantor. El objetivo principal del desarrollo de esta metodología fue demostrar la aplicabilidad de las estructuras fractales para generar múltiples frecuencias en antenas de microcinta, con aplicaciones potenciales en diversos campos industriales.

Dentro de la estructura general de la investigación se abordaron varios procesos metodológicos, entre ellos el estudio del estado del arte, teorías y modelos en antenas tipo parche que llevaron a la inclusión de geometrías fractales para la transición de una antena monobanda a sistemas dual-band; luego, con las bases teóricas y matemáticas, el modelo fue diseñado y analizado por software para finalmente contrastar el mismo en un escenario experimental.

### 5.1. CONCLUSIONES

Posterior a estudiar múltiples modelos para la mejora en desempeño de antenas tipo parche, se valida que mediante las geometrías tipo ranura y las estructuras fractales se pueden llegar a resultados relevantes de cara a esta mejora de desempeño. En este trabajo se logró diseñar y evaluar antenas de microcinta rectangulares con ranuras basadas en la secuencia fractal de Cantor, obteniendo importantes avances respecto al modelo inicial. La modificación introducida permitió generar dos bandas de frecuencia en cada iteración analizada, con frecuencias de resonancia en 3,7 GHz y 4,5 GHz, cumpliendo con un parámetro  $S_{11}$  inferior a -10 dB en la segunda frecuencia de resonancia identificada, lo cual garantiza condiciones operativas óptimas en sistemas de comunicación inalámbrica. Tanto para la etapa analítica como experimental se empleó un sustrato FR4 con  $\epsilon_r = 4,4$ . Es importante destacar que se logra una buena concordancia entre los resultados experimentales y los computacionales. La inclusión de la geometría tipo ranura de Cantor genera dos frecuencias de resonancia en cualquiera de los grados analizados en este trabajo, haciendo el sistema apto para sistemas y tecnologías de comunicación inalámbrica.

Es válido resaltar que gracias a la adición de ranuras en secuencia de Cantor se observó una mejora significativa en el desempeño de la antena, tanto en términos de resonancia como de reducción de pérdidas, demosttran-

do una relación directa entre la incorporación de ranuras fractales y el coeficiente de reflexión. Adicionalmente, el desplazamiento de las frecuencias permitió una reducción del tamaño de la antena hasta en un 11 %, lo cual resulta relevante para aplicaciones en sistemas compactos.

Los modelos de antenas propuestos en este estudio presentan características relevantes para diversas aplicaciones en sistemas de comunicación inalámbrica. Su potencial capacidad para operar en múltiples bandas y su estructura compacta, las posicionan como candidatas en los siguientes ámbitos [97]:

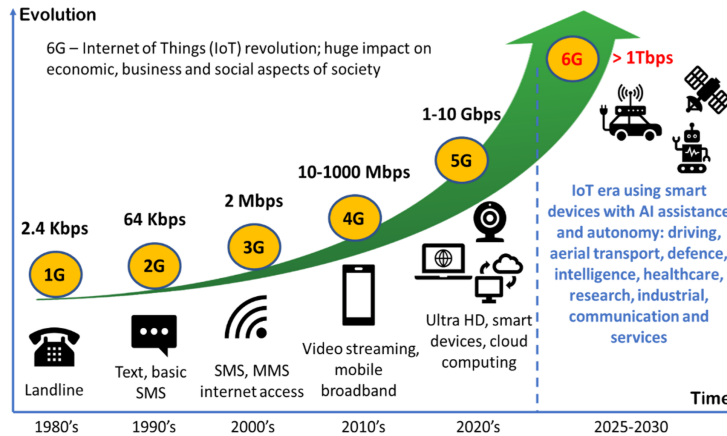


Figura 5.1: Tendencia en tecnologías de comunicación inalámbrica [97]

En el ámbito de las redes 5G, las antenas tipo parche tienen capacidad para operar en bandas dentro del margen de cobertura, como la de 3,5 GHz, las hace ideales para optimizar la cobertura y la penetración en interiores. Asimismo, en sistemas de comunicación satelital, su compatibilidad con las bandas X (8-12 GHz) y Ka (26,5-40 GHz) las posiciona como una solución eficiente para enlaces ascendentes y descendentes, mejorando la confiabilidad en este tipo de comunicaciones.

Por otro lado, las antenas fractales son aplicables en sistemas de radar y sensores inalámbricos, operando en bandas como banda X, lo que las hace útiles en aplicaciones de defensa, meteorología y control de tráfico aéreo. Su integración con el Internet de las Cosas (IoT) y redes WLAN es igualmente destacable, dada su capacidad para operar en las bandas ISM (2,4 GHz y 5 GHz) donde facilitan la implementación en entornos domésticos e industriales. Estas características confirman su relevancia en el desarrollo de tecnologías emergentes como el 6G y su potencial para futuras innovaciones en materia de comunicaciones y sistemas inalámbricos.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Es importante destacar que para precisar muy bien las frecuencias centrales de operación, se requiere una alta precisión en la fabricación de las antenas, pues las mismas presentan anchos de banda reducidos, por lo que es recomendable emplear kits de alta precisión para fabricación, medición y calibración de todos los elementos involucrados en la etapa experimental.

## 5.3. TRABAJO FUTURO

Este estudio impulsa el área a nuevas investigaciones relacionadas con el uso de geometrías fractales en el diseño de dispositivos de comunicación, potenciales líneas de trabajo se generan a partir de los resultados, las cuales podrían apuntar al estudio de ranuras en secuencia de Cantor teniendo en cuenta la variación de diferentes variables, como pueden ser la longitud y dirección de las ranuras paralelas a  $L$ , o bien aumentar el número de iteraciones de la secuencia de Cantor para analizar su efecto en el ancho de banda y las frecuencias de

resonancia (teniendo en cuenta las limitantes en la fabricación por ranuras muy delgadas o bien por el contrario la exploración del fractal en sistemas de antenas más grandes donde el tamaño no sea condicional). Es relevante observar que si bien el nivel de adaptación no alcanza el valor estándar de -10 dB para algunas bandas, sí se logra identificar el valor de la resonancia, por lo que en trabajos futuros se explorarán algunos métodos propuestos en la literatura para mejorar la adaptación en las antenas tipo parche conectadas de forma directa a la línea de alimentación, así como la implementación de diferentes materiales en los sustratos y la potencial línea de trabajo sobre los THz con antenas que involucren materiales derivados del grafito, como el grafeno.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aamir Razaq, Asim Ali Khan, Unsa Shakir, and Asim Arshad. Next generation flexible antennas for radio frequency applications. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 19(5):311–318, Oct 2018.
- [2] J. W. Sanders, J. Yao, and H. Huang. Microstrip patch antenna temperature sensor. *IEEE Sensors Journal*, 15(9):5312–5319, Sep. 2015.
- [3] Tzyh-Ghuang Ma and Shyh-Kang Jeng. A printed dipole antenna with tapered slot feed for ultrawide-band applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(11):3833–3836, Nov 2005.
- [4] M. Borhani, P. Rezaei, and A. Valizade. Design of a reconfigurable miniaturized microstrip antenna for switchable multiband systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15:822–825, 2016.
- [5] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11):2075–2084, Nov 1999.
- [6] G. J. Walker and J. R. James. Fractal volume antennas. *Electronics Letters*, 34(16):1536–1537, Aug 1998.
- [7] N. Mohamed Mohamed-Hicho, E. Antonino-Daviu, M. Cabedo-Fabrés, and M. Ferrando-Bataller. Designing slot antennas in finite platforms using characteristic modes. *IEEE Access*, 6:41346–41355, 2018.
- [8] M. Wu and M. Chuang. Multibroadband slotted bow-tie monopole antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14:887–890, 2015.
- [9] Muhammad Umar Khan, Mohammad Said Sharawi, and Raj Mittra. Microstrip patch antenna miniaturisation techniques: a review. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014.
- [10] Sang-Hoon Kang and Chul-Woo Jung. Transparent patch antenna using metal mesh. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16:678–681, 2017.
- [11] H. Oraizi and S. Hedayati. Circularly polarized multiband microstrip antenna using the square and giuseppe peano fractals. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(7):3466–3470, July 2012.
- [12] D. H. Werner and P. L. Werner. Frequency-independent features of self-similar fractal antennas. *Radio Science*, 31(6):1331–1343, Nov 1996.
- [13] Chao Sun, Huili Zheng, Lingfei Zhang, and Ying Liu. A compact frequency-reconfigurable patch antenna for beidou (compass) navigation system. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13:967–970, 2014.
- [14] Douglas H. Werner and Raj Mittra. *Frontiers in Electromagnetics*. Wiley-IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, 1999.
- [15] Nathan Cohen. Fractal antenna applications in wireless telecommunications. In *Proceedings of the Professional Program, Electronics Industries Forum of New England*, Boston, MA, USA, 1997.
- [16] Arun Raj and Durbadal Mandal. Design and implementation of hybrid fed array antennae for sub-6 ghz and 5g mm-wave communication and wireless applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 16(4):605–624, 2024.
- [17] Francesca Venneri, Sandra Costanzo, and Antonio Borgia. Fractal metasurfaces and antennas: An overview for advanced applications in wireless communications. *Applied Sciences*, 14(7):2843, 2024.

- [18] Husam Hamid Ibrahim, Mandeep Jit Singh, Samir Salem Al-Bawri, Sura Khalil Ibrahim, Mohammad Tariqul Islam, Ahmed Alzamil, and Md Shabiul Islam. Radio frequency energy harvesting technologies: A comprehensive review on designing, methodologies, and potential applications. *Sensors*, 22(11):4144, 2022.
- [19] Monika Aggarwal and Amar Partap Singh Pharwaha. Modified koch curve broadband fractal antenna for spectrum sensing in cognitive radio. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, pages 1–7, 2020.
- [20] Arun Raj and Durbadal Mandal. Design and implementation of hybrid fed array antennae for sub-6 ghz and 5g mm-wave communication and wireless applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 16(4):605–624, 2024.
- [21] Elijah Joseph, Pradeep Kumar, and Thomas Afullo. Design and performance evaluation of a second-order iterated circular minkowski fractal antenna for ultra-wideband applications. *Fractal and Fractional*, 7(11):806, 2023.
- [22] A. P. Singh and Monika Aggarwal. Development of an inverted-h shaped fractal microstrip patch antenna for cognitive radio. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series B*, pages 123–129, 2020.
- [23] Meng Wang, Lan Yang, and Yanyan Shi. A dual-port microstrip rectenna for wireless energy harvest at lte band. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 126:153451, 2020.
- [24] B.T.P. Madhav, K.V. Vineetha, Meghana, D. Arun Kumar Reddy, M.C. Rao, and Sudipta Das. Circular monopole with star shaped etched antenna for pcs, umts and wifi applications. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(4s):2046–2056, 2020.
- [25] Karteek Viswanadha and Nallanthighal Srinivasa Raghava. Design and analysis of a multi-band flower shaped patch antenna for wlan/wimax/ism band applications. *Wireless Personal Communications*, 115:2159–2184, 2020.
- [26] Adam R. H. Alhawari, Tale Saeidi, Abdulkarem Hussein Mohammed Almagwani, Ayman Taher Hindi, Hisham Alghamdi, Turki Alsuwian, Samer A. B. Awwad, and Muhammad Ali Imran. Wearable metamaterial dual-polarized high isolation uwb mimo vivaldi antenna for 5g and satellite communications. *Micromachines*, 12(12):1559, 2021.
- [27] Manas Ranjan Jena, B.B. Mangaraj, and Rajiv Pathak. An improved compact & multiband fractal antenna using the koch curve geometry. *Wireless and Mobile Technologies*, 2(1):1–6, 2014.
- [28] Y. Wang, Z. Wang, and J. Li. Uhf moore fractal antennas for online gis pd detection. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16:852–855, 2017.
- [29] W. Kuhirun, W. Silabut, V. Kesornpatumanun, and P. Boonek. Design of a dual-band patch antenna with peano-gosper fractal slot. In *2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, pages 291–292, July 2016.
- [30] Nathan Cohen and Philip Salkind. Enhanced gain antenna systems employing fractal metamaterials, Mar 2022.
- [31] Nathan Cohen. Fractal antennas and fractal resonators, Sep 2002.
- [32] Nathan Cohen. Radiative transfer and power control with fractal metamaterial and plasmonics, Nov 2016.
- [33] Brijesh Mishra, Aditya Kumar Singh, T Y Satheesha, Ramesh Kumar Verma, and Vivek Singh. From past to present: A comprehensive review of antenna technology in modern wireless communication. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 17(3):179–200, 2024.
- [34] Mohd Farman Ali, Rajarshi Bhattacharya, and Gaurav Varshney. Tunable four-port mimo/self-multiplexing thz graphene patch antenna with high isolation. *Preprint at Research Square*, Mar 2022.

- [35] Ranjana Ray, Moumita Pal, R. Umamaheswari, and Ishita Banerjee. Machine learning based microstrip antenna design in wireless communications. In *Machine Learning and IoT for Intelligent Systems and Smart Applications*, pages 11–25. CRC Press, 2021.
- [36] Óscar Quevedo-Teruel, Malcolm Ng Mou Kehn, and Eva Rajo-Iglesias. Dual-band patch antennas based on short-circuited split ring resonators. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(8):2758–2765, 2011.
- [37] Long Jin and Ruohan Zhang. A dual-band wideband high-gain slot loaded microstrip patch antenna. *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, 177:155193, 2024.
- [38] Md. Masud Rana and Md. Ariful Islam Rahil. Dual-band implantable antenna loaded with patch slots for wireless biotelemetry systems. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2024.
- [39] Kyu J. Jang, Keun-Woo Lee, Ji-Ho Park, Ji-Won Lee, Jae-Young Kim, and Woo-Jin Lee. Skin-attachable and stretchable patch antenna with fractal design for remote on-body motion sensing. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(6):3451–3457, 2021.
- [40] Mariam El Gharbi, Maurizio Bozzi, Raúl Fernández-García, and Ignacio Gil. Textile antenna sensor in siw technology for liquid characterization. *Sensors*, 23(18):7835, 2023.
- [41] Taher AlSharabati. Microstrip patch antenna miniaturization using magneto-dielectric substrates for electromagnetic energy harvesting. *Journal of Communications Software and Systems*, 17(2):116–123, 5 2021.
- [42] Surendrakumar Painam and Chandramohan Bhuma. Miniaturizing a microstrip antenna using metamaterials and metasurfaces [antenna applications corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 61(1):91–135, 2019.
- [43] Robert E. Munson. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 22(1):74–78, Jan 1974.
- [44] Robert Munson. Microstrip phased array antennas. In *73CH0777-3EI-66E*, 1973.
- [45] Robert E. Munson. Microstrip antenna structures and arrays, Nov 18 1975.
- [46] T. K. Sreeja, T. K. Sandhya, K. Radha, and J. Jaya Kumari. An efficient multiband antenna for satellite and 4g communication systems. In *2012 International Conference on Green Technologies (ICGT)*, pages 320–324, Dec 2012.
- [47] H. Huang. Flexible wireless antenna sensor: A review. *IEEE Sensors Journal*, 13(10):3865–3872, Oct 2013.
- [48] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 4 edition, 2016.
- [49] X. Dai, T. Zhou, and G. Cui. Dual-band microstrip circular patch antenna with monopolar radiation pattern. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15:1004–1007, 2016.
- [50] Y. I. Abdurraheem, G. A. Oguntala, A. S. Abdullah, H. J. Mohammed, R. A. Ali, R. A. Abd-Alhameed, and J. M. Noras. Design of frequency reconfigurable multiband compact antenna using two pin diodes for wlan/wimax applications. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, 11(8):1098–1105, 2017.
- [51] Mahesh C Bhad, Veeresh G Kasabegoudar, and Madhuri P Rodge. Electrically Small Rectangular Patch Antenna with Slot for MIMO Applications. 1(1):25–28, 2013.
- [52] Brijesh Mishra, Aditya Kumar Singh, T Y Satheesha, Ramesh Kumar Verma, and Vivek Singh. From past to present: A comprehensive review of antenna technology in modern wireless communication. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 17(3):179–200, 2024.
- [53] Tao Chen, Suyan Li, and Hui Sun. Metamaterials application in sensing. *Sensors*, 12(3):2742–2765, 2012.

- [54] Md. Bakey Billa, Mohammad Tariqul Islam, Touhidul Alam, Saleh Albadran, Ahmed Alzamil, Ahmed S. Alshammari, Haitham Alsaif, Md Shabiul Islam, and Mohamed S. Soliman. High quality factor double negative metamaterial for textile fabric and fabric moisture sensing applications. *Journal of Industrial Textiles*, 54:1–23, 2024.
- [55] Rayan Hamza Alsisi, Arshad Karimbu Vallappil, and Hafiz Abdul Wajid. A metamaterial-based double-sided bowtie antenna for intelligent transport system communications operating in public safety band. *Crystals*, 13(2):360, 2023.
- [56] H. A. Jang, D. O. Kim, and C. Y. Kim. Size reduction of patch antenna array using csrrs loaded ground plane. *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, pages 1487–1489, 2012.
- [57] Md. Mhedhi Hasan, Mohammad Tariqul Islam, M. Salaheldeen, Sami H. A. Almalki, Abdullah G. Alharbi, Haitham Alsaif, Md. Shabiul Islam, and Md. Samsuzzaman. Polarization insensitive dual band metamaterial with absorptance for 5G sub-6 GHz applications. *Sci Rep*, 12:6904, 2022.
- [58] Muhammad Amir Khalil, Wong Hin Yong, Ahasanul Hoque, Md. Shabiul Islam, Lo Yew Chiong, Cham Chin Leei, Ahmed Alzamil, and Mohammad Tariqul Islam. A compact quad-square negative-index metamaterial: Design, simulation, and experimental validation for microwave applications. *APL Materials*, 12(6):061103, 2024.
- [59] Taiwo Olawoye and Pradeep Kumar. A high gain antenna with dgs for sub-6 ghz 5g communications. *No Journal Title Available*, pages 1–10, 2023.
- [60] Poonam Tiwari, Vishant Gahlaut, Meenu Kaushik, Preeti Rani, Anshuman Shastri, and Bhupender Singh. A comprehensive review of mimo antennas for 5g applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2023:1–19, 2023.
- [61] M. Joler and J. Kucan. Impact of slot parameters on the three resonant frequencies of a rectangular microstrip antenna: Study of the impact of the slot length, width, and position. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 57(4):48–63, Aug 2015.
- [62] M. Rostamzadeh, S. Mohamadi, J. Nourinia, Ch. Ghobadi, and M. Ojaroudi. Square monopole antenna for uwb applications with novel rod-shaped parasitic structures and novel v-shaped slots in the ground plane. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11:446–449, 2012.
- [63] L. Steven and Y.M.M. Antar. Frequency reconfigurable u-slot microstrip patch antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7:379–382, 2008.
- [64] Q. Chen, H. Zhang, Y. Shao, and T. Zhong. Bandwidth and gain improvement of an l-shaped slot antenna with metamaterial loading. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(8):1411–1415, 2018.
- [65] Zhinong Ying. Antennas in cellular phones for mobile communications. *Proceedings of the IEEE*, 101(11):2317–2330, 2013.
- [66] A. Jamil, M. Z. Yusoff, N. Yahya, and M. A. Zakariya. Design and performance evaluation of multiband mimo antennas. In *2011 National Postgraduate Conference*, pages 1–5, Sep. 2011.
- [67] Jang-Soon Park, Jun-Bong Ko, Heon-Kook Kwon, Byung-Su Kang, Bonghyuk Park, and Dongho Kim. A tilted combined beam antenna for 5g communications using a 28 ghz band. 2016.
- [68] Dian Wang and Chi Hou Chan. Multiband antenna for wifi and wigig communications. 2015.
- [69] Alireza Motevasselian and William G. Whittow. Patch size reduction of rectangular microstrip antennas by means of a cuboid ridge. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, pages 1–8, 2015.
- [70] K.Z. Rajab, R. Mittra, and M.T. Lanagan. Size reduction of microstrip patch antennas with left-handed transmission line loading. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, 1(1):39–44, 2007.

- [71] S. Maci and G. Biffi Gentili. Dual frequency patch antenna. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 39(6):13–20, 1997.
- [72] Satish K. Sharma and Jia-Chi S. Chieh. *Frequency Reconfigurable Antennas*. John Wiley Sons, Inc., Hoboken, NJ, first edition edition, 2021.
- [73] Benoit B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, New York, NY, USA, 1983.
- [74] Hendrik Lauwerier. *Fractals—Endless Repeated Geometrical Figures*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 1991.
- [75] Waclaw Sierpiński. Sur une courbe dont tout point est un point de ramification. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 160:302–305, 1915.
- [76] Gaston Julia. Mémoire sur l'itération des fonctions rationnelles. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 1:47–245, 1918.
- [77] Pierre Fatou. Sur l'itération des fonctions transcendentes entières. *Acta Mathematica*, 47:337–370, 1926.
- [78] Benoit B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Company, 1983.
- [79] R. Pous X. Garcia F. Benitez C. Puente, J. Romeu. Fractal multiband antennas: a comparison between koch and sierpinski geometries. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 46(4):517–524, 1998.
- [80] Douglas H. Werner and Raj Mittra. *Frontiers in Electromagnetics*. IEEE Press, 2003.
- [81] Iqra Masroor, J. A. Ansari, and Abhishek Kumar Saroj. Inset-fed cantor set fractal multiband antenna design for wireless applications. In *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, pages 167–170, 2017.
- [82] Kenneth Falconer. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. John Wiley & Sons, 2004.
- [83] S. R. Best. On the performance properties of the koch fractal and other electrically small antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(6):1292–1300, 2003.
- [84] K. J. Vinoy. *Fractal Antennas: Design, Characterization and Applications*. Springer, 2010.
- [85] Nathan Cohen. Fractal antennas part 1: Introduction and early examples. *Communications Quarterly*, 6(3):9–22, 1997.
- [86] Carlos Puente-Baliarda, Jordi Romeu, Raquel Pous, and Angel Cardama. On the behavior of the sierpinski multiband fractal antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 46(4):517–524, 1998.
- [87] Iván Rosendo González Rangel, José Serrano Chávez, Javier Vargas Sánchez, Genaro Hernández Valdez, Edgar Alejandro Andrade González, and Mario Reyes Ayala. Antena fractal de sierpinski para operar en las bandas de 900 mhz y 1.8 ghz. *Pistas Educativas*, 38(120):144–158, 2016.
- [88] David M. Pozar. *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, 3rd edition, 2005.
- [89] Y. S. Li, X. D. Yang, C. Y. Liu, and T. Jiang. Analysis and investigation of a cantor set fractal uwb antenna with a notch-band characteristic. *Progress In Electromagnetics Research B*, 33:99–114, 2011.
- [90] Munish Kumar and Vandana Nath. Multiband cpw-fed circular microstrip antenna with modified cantor fractal slot for dcs/gps/wimax/wlan/hiperlan2 applications. *Wireless Personal Communications*, 98(5):441–447, 2018.
- [91] Sivia Jagtar Singh, Gurpreet Singh, and Gurpreet Bharti. Circular microstrip antenna with fractal slots for multiband applications. *J. Inst. Eng. India Ser. B*, 98(5):441–447, 2017.

- 
- [92] Iqra Masroor, Shadman Aslam, Jamshed A. Ansari, and Amrees Pandey. Cantor-square fractal reconfigurable circular patch antenna with low cross-polarization for x band applications. *Progress In Electromagnetics Research M*, 114:219–232, 2022.
- [93] Yingsong Li, Wenxing Li, Chengyuan Liu, and Tao Jiang. A printed diversity cantor set fractal antenna for ultra wideband communication applications. In *2012 IEEE*, pages 34–35, 2012.
- [94] Keyoor Gosalia and Gianluca Lazzi. Reduced size, dual-polarized microstrip patch antenna for wireless communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pages 1–4, 2010.
- [95] H. L. Zhu, S. W. Cheung, Kwok Lun Chung, and T. I. Yuk. Linear-to-circular polarization conversion using metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(9):4615–4623, 2013.
- [96] John P Gianvittorio and Yahya Rahmat-Samii. Fractal antennas: a novel antenna miniaturization technique, and applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 44(1):20–36, 2002.
- [97] Teodor Huminiuc. Terahertz radiation – the dawn of a new information era. *IPI Letters*, 2(1):42–44, 2024.