



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO DE UNA ANTENA PARCHE A DOBLE BANDA CON
GEOMETRÍA FRACTAL PARA APLICACIONES EN LA BANDA C”**

AUTOR:

LIZETTE DEL CISNE VÉLEZ HEREDIA

DOCENTE TUTOR

ING. CARLOS EFRAÍN ANDRADE CAICHO, MSC.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2024

DECLARACIÓN AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que el trabajo de Integración Curricular con el título **“Diseño de una Antena Parche a Doble Banda con Geometría Fractal para Aplicaciones en la Banda C”**, presentado como requisito previo para la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado en cumplimiento de las normas establecidas. Afirmo que este trabajo es de mi total autoría.

Atentamente



Vélez Heredia Lizette del Cisne

C.I. 0704710151

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Vélez Heredia Lizette del Cisne** con cédula de identidad No. **0704710151**, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, declaro que el trabajo de titulación presentado en la asignatura de Integración Curricular titulado **“Diseño de una Antena Parche a Doble Banda con Geometría Fractal para Aplicaciones en la Banda C”**, es de mi responsabilidad como autor. Asimismo, reconozco que este trabajo forma parte del patrimonio intelectual de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Atentamente

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Lizette Vélez', is written over a horizontal line.

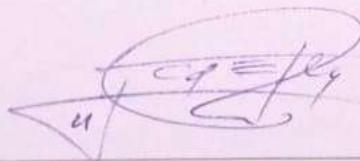
Vélez Heredia Lizette del Cisne

C.I. 0704710151

DECLARACIÓN DE DOCENTE TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación titulado “**Diseño de una Antena Parche a Doble Banda con Geometría Fractal para Aplicaciones en la Banda C**” realizado por **Vélez Heredia Lizette del Cisne**, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, declaro que, tras haber realizado el seguimiento correspondiente al desarrollo del trabajo, este cumple con los estándares académicos requeridos. Además, informo que de la revisión de tesis se obtuvo un porcentaje de 6% compuesto por un porcentaje de textos potencialmente generados por IA y una proporción entre similitudes de fuentes e idiomas no reconocidos. Por lo tanto, considero que el trabajo es apto para ser evaluado por un docente especialista.

Atentamente



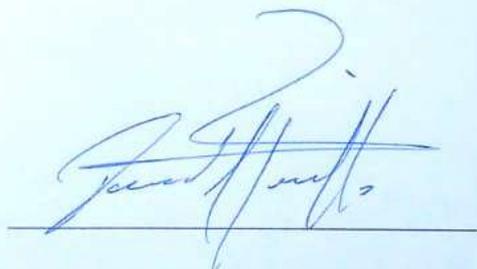
Ing. Carlos Efraín Andrade Caicho, MSC.

DOCENTE TUTOR

DECLARACIÓN DE DOCENTE ESPECIALISTA

Como docente especialista del trabajo de titulación "**Diseño de una Antena Parche a Doble Banda con Geometría Fractal para Aplicaciones en la Banda C**", realizado por **Lizette del Cisne Vélez Heredia**, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones de la Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, certifico haber revisado el desarrollo y la estructura del trabajo de investigación. Este cumple con los estándares académicos, por lo cual considero que es apto para su sustentación.

Atentamente

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniel Jaramillo Chamba', is written over a horizontal line.

Ing. Daniel Jaramillo Chamba, MGTI.

DOCENTE ESPECIALISTA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

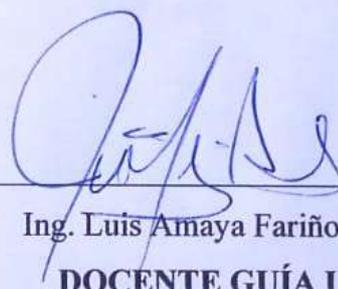
Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph.D.
DIRECTOR DE LA CARRERA



Ing. Carlos Andrade Caicho, Msc.
DOCENTE TUTOR



Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgt.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Luis Amaya Fariño, Mgt.
DOCENTE GUÍA UIC



Ing. Corina Gonzabay De La A. Mgt.
SECRETARIA

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi luz y guía a lo largo de este camino. A mi madre por su apoyo incondicional durante todo este transcurso de mis estudios; a mi hijo, por motivarme a seguir adelante y ser un buen ejemplo para él; a mis hermanos quienes estuvieron dispuestos a ayudarme con cualquier inquietud que tuviera.

A mi tutor, Ing. Carlos Andrade Caicho, por su orientación y apoyo durante el desarrollo de mi trabajo de titulación. También quiero agradecer a mis compañeros, con quienes compartí este proceso de estudios, por el apoyo mutuo que nos brindamos en los momentos más difíciles.

Extiendo mi gratitud a todos los docentes que formaron parte de este viaje académico, ya que, gracias a sus enseñanzas y dedicación, he alcanzado este logro tan significativo.

Gracias a cada uno de ustedes, sin su guía, este camino no habría sido el mismo.

Lizette del Cisne Vélez Heredia

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios, por haber sido mi luz en los momentos que más lo necesité.

A mi madre Lic. Jenny Heredia; a mi hijo, Wilson Jarrín; y a mis hermanos Patrick, Farita y Francis, gracias por motivarme siempre a seguir adelante y a no rendirme. A mi mascota, mi acompañante incondicional durante las largas madrugadas de estudio.

Finalmente, a mis compañeros a quienes aprecio tanto, por el apoyo brindado a lo largo de estos años.

A cada uno de ustedes, dedico este logro, ya que sin los ánimos que me transmitieron, no habría llegado hasta aquí.

Lizette del Cisne Vélez Heredia

RESUMEN

Esta tesis presenta el diseño, simulación e implementación de una antena parche a doble banda con geometría fractal, orientada a aplicaciones en la banda C. Utilizando el triángulo de Sierpiński como base, se optimizó el diseño mediante simulación electromagnética, enfocándose en los parámetros de adaptación de impedancia (S_{11}) en la relación de onda estacionaria (VSWR) en 4.5 y 4.8 GHz. El método incluyó simulación y pruebas experimentales con el equipo Keysight N9918A FieldFox, Logrando un diseño escalable y de bajo margen de error en su fabricación. Los resultados mostraron un desempeño satisfactorio y concordante entre simulación y medición experimental, demostrando que la antena cumple los criterios de funcionamiento en banda dual. La antena física mostró incluso una mejor adaptación en 4.5 GHz, confirmando su viabilidad en aplicaciones de comunicaciones en la banda C.

Palabras clave: Antena fractal, banda C, doble banda.

ABSTRACT

This thesis presents the design, simulation, and implementation of a dual-band patch antenna with fractal geometry, oriented to applications in the C band. Using the Sierpinski triangle as a basis, the design was optimized by electromagnetic simulation, focusing on the impedance matching parameters (S11) and the Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) at 4.5 and 4.8 GHz. The method included simulation and experimental tests with the Keysight N9918A FieldFox equipment, achieving a scalable design with a low margin of error in its manufacture. The results showed a satisfactory and concordant performance between simulation and experimental measurements, demonstrating that the antenna meets the criteria for dual-band operation. The physical antenna showed even better matching at 4.5 GHz, confirming its viability in communications applications in the C band.

Keywords: Fractal antenna, C band, dual-band.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE DOCENTE TUTOR.....	II
DECLARACIÓN AUTORÍA DEL ESTUDIANTE	III
DECLARACIÓN DE DOCENTE ESPECIALISTA.....	IV
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	V
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
DEDICATORIA	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
ÍNDICE GENERAL.....	XI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XVIII
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	XVIII
CAPÍTULO I.....	1
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Cronograma.....	5
1.5 Metodología	5
1.6 Resultados Esperados.....	7
CAPITULO II	9

2	Marco Teórico.....	9
2.1	Antenas.....	9
2.1.1	Definición de Antenas.....	9
2.1.2	Tipos de Antenas.....	9
2.1.3	Parámetros de una Antena.....	11
2.1.3.1	Parámetro S11 (Pérdida de Retorno).....	11
2.1.3.2	Parámetro VSWR.....	12
2.1.3.3	Patrón de Radiación	13
2.1.3.4	Directividad.....	14
2.1.3.5	Ganancia.....	14
2.1.3.6	Eficiencia.....	15
2.1.3.7	Ancho de Banda	16
2.2	Antenas Fractales	17
2.2.1	Definición de Fractal.....	17
2.2.2	Geometría Fractal.....	18
2.2.3	Clasificación de los Fractales.....	19
2.2.3.1	Fractales Lineales.....	19
2.2.3.2	Fractales no Lineales.....	19
2.2.4	Estructuras Fractales Clásicas	20
2.2.4.1	Conjunto de Cantor	20
2.2.4.2	Curva de Koch.....	21
2.2.4.3	Triángulo de Sierpiński	22
2.2.4.4	Alfombra de Sierpiński	23
2.2.4.5	Curva de Hilbert.....	24
2.2.5	Clasificación de Antenas Fractales	25
2.2.5.1	Antenas Monopolos y Dipolos Fractales	26

2.2.5.2	Antenas Fractales en Lazo	27
2.2.5.3	Antenas Fractales Multibanda.....	27
2.2.6	Características y Rendimiento.....	28
2.2.7	Funcionalidad Multibanda	28
2.2.8	Integración de Fractales en el Diseño de Antenas	29
2.2.9	Aplicaciones de las Antenas Fractales	30
2.2.10	Antenas Fractales Vs Antenas Convencionales	30
2.3	Frecuencia Multibanda.....	32
2.3.1	Mecanismos de Operación Multibanda.....	32
2.3.2	Aplicaciones de Antenas Multibanda.....	33
2.3.3	Teoría de la Doble Banda.....	34
2.3.4	Resonancia Doble.....	34
2.4	Bandas del Espectro Electromagnético	35
2.4.1	Bandas de Microondas	36
2.4.1.1	Banda C.....	37
2.4.1.2	Aplicaciones Principales	37
CAPÍTULO III.....		40
3	Metodología de Diseño	40
3.1	Requisitos de Diseño.....	41
3.2	Análisis de Diseño.....	41
3.2.1	Elección de la Frecuencia.....	42
3.2.2	Diseño basado en el Triángulo de Sierpiński.....	43
3.3	Cálculos para Realizar la Antena	44
3.3.1	Línea de Microcinta	46
3.4	Como realizar las Iteraciones del triángulo de Sierpiński.....	46
4	Proceso de Diseño y Simulación de la Antena Fractal	47

4.1	Diseño de la Antena (Iteración base)	48
4.2	Primera Iteración.....	51
4.3	Segunda Iteración.....	53
4.4	Tercera Iteración	54
4.5	Simulación de la Antena Fractal Optimizada.....	56
4.5.1	Pruebas de Simulación del Parámetro S11 y VSWR.....	57
4.5.2	Ganancia.....	58
4.6	Fabricación de la Antena Fractal.....	61
4.6.1	Elección de los Materiales	61
4.6.1.1	Sustrato.....	61
4.6.1.2	Patch y Plano Tierra.....	61
4.6.1.3	Conectores SMA	62
4.6.2	Proceso de Fabricación	63
CAPÍTULO IV.....		68
5	Resultados y Análisis	68
5.1	Equipo para Utilizar para las Medidas	68
5.1.1	Usos Principales	69
5.1.2	Aplicaciones Comunes.....	69
5.1.3	Características Adicionales	69
5.1.4	Configuración Inicial del Equipo	70
5.2	Resultado del Parámetro S11	71
5.3	Resultado del Parámetro VSWR.....	72
5.4	Comparación entre la Antena Simulada y la Implementada.....	74
5.4.1	Resultados del S11 (dB) en las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz..	75
5.4.2	Resultados del VSWR en las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz	76
6	Conclusiones	78

7	Recomendaciones.....	79
8	Bibliografía	80

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Diagrama de flujo del proceso metodológico.....	6
Ilustración 2.	Algunos tipos de antenas	10
Ilustración 3.	Diagrama de Radiación en coordenadas polares	14
Ilustración 4.	Relación entre ancho de banda de una antena y el coeficiente de reflexión	17
Ilustración 5.	Región de una coliflor en la curva de Koch	18
Ilustración 6.	Fractal complejo, Conjunto de Mandelbrot	20
Ilustración 7.	Como se genera el Conjunto de Cantor.....	21
Ilustración 8.	Como se genera la Curva de Koch	22
Ilustración 9.	Construcción del Triángulo de Sierpiński	23
Ilustración 10.	Construcción de la Alfombra de Sierpiński	24
Ilustración 11.	Construcción de la curva de Hilbert	25
Ilustración 12.	Espectro electromagnético	36
Ilustración 13.	Altura máxima y mínima del triángulo de Sierpiński	42
Ilustración 14.	Medidas de las iteraciones del triángulo de Sierpiński	45
Ilustración 15.	a) Iteración base, b) primera iteración, c) segunda iteración, d) tercera iteración.....	47
Ilustración 16.	Estructura de la Antena Fractal	48
Ilustración 17.	Vista frontal y lateral del sustrato, mostrando el plano tierra.....	49
Ilustración 18.	Unión del conductor con la iteración base sobre el sustrato	49
Ilustración 19.	Resultado de la simulación de la iteración base para el parámetro S11.....	50
Ilustración 20.	Resultado de la simulación de la iteración base para el parámetro VSWR.....	51
Ilustración 21.	Simulación de la primera iteración.....	51

Ilustración 22. Resultado de la simulación de la primera iteración para el parámetro S11	52
Ilustración 23. Resultado de la simulación de la primera iteración para el parámetro VSWR.....	52
Ilustración 24. Creación y simulación de la segunda iteración	53
Ilustración 25. Resultado de la simulación de la segunda iteración para el parámetro S11	54
Ilustración 26. Resultado de la simulación de la segunda iteración para el parámetro VSWR.....	54
Ilustración 27. Creación y simulación de la tercera y última iteración	55
Ilustración 28. Resultado de la simulación de la tercera iteración para el parámetro S11	55
Ilustración 29. Resultado de la simulación de la tercera iteración para el parámetro VSWR.....	56
Ilustración 30. Antena optimizada.....	56
Ilustración 31. Resultado de la simulación del parámetro S11 de la antena optimizada.....	57
Ilustración 32. Resultado de la simulación del parámetro VSWR de la antena optimizada.....	58
Ilustración 33. Diagrama polar de ganancia a 4.5 GHz.....	59
Ilustración 34. Diagrama polar de ganancia a 4.8 GHz.....	60
Ilustración 35. Conectores SMA	62
Ilustración 36. Archivo DXF abierto en AutoCAD que muestra el diseño de la antena	64
Ilustración 37. Imagen en AutoCAD del diseño de la antena fractal, para la impresión en baquelita	64
Ilustración 38. Baquelita PCB con doble capa de cobre.....	65
Ilustración 39. Baquelita pintada con spray color negro	65
Ilustración 40. Proceso de impresión en la baquelita con láser	66
Ilustración 41. Limpieza de la baquelita en ácido férrico.....	66
Ilustración 42. Limpieza de la baquelita con diluyente para remover la capa de pintura	67

Ilustración 43. Antena fractal finalizada, con el conector SMA soldado para conexión.....	67
Ilustración 44. Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer en el laboratorio de Telecomunicaciones de la UPSE, utilizado para realizar mediciones en el contexto de la investigación	68
Ilustración 45. Antena conectada al equipo mediante el cable coaxial	70
Ilustración 46. Medición en el equipo del parámetro S11 para la frecuencia de 4.5 GHz	71
Ilustración 47. Medición en el equipo del parámetro S11 para la frecuencia de 4.8 GHz	72
Ilustración 48. Medición en el equipo del VSWR para la frecuencia de 4.5 GHz	73
Ilustración 49. Medición en el equipo del VSWR para la frecuencia de 4.8 GHz	74
Ilustración 50. Comparativa de los gráficos del parámetro S11 de la simulación y de la medición con equipo.....	75
Ilustración 51. Comparativa de los gráficos del parámetro VSWR de la simulación y de la medición con equipo	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. Parámetros generales de una antena	11
Tabla 4. Comparación entre Antena fractal y Antena convencional	31
Tabla 1. Bandas del Espectro electromagnético.....	35
Tabla 2. Bandas de microondas	37
Tabla 5. Medidas de la línea de Alimentación	46
Tabla 6. Valores de las variables de cada componente de la antena.....	49
Tabla 7. Valores de las variables de cada componente de la antena optimizada .	57
Tabla 8. Resultados de la simulación de ganancia a 4.5 GHz.....	59
Tabla 9. Resultados de la simulación de ganancia a 4.8 GHz.....	60
Tabla 10. Especificaciones del sustrato.....	61

Tabla 11. Especificaciones del equipo Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer	68
Tabla 12. Valores del S11 de la antena simulada e implementada con sus observaciones.....	75
Tabla 13. Valores del VSWR de la antena simulada e implementada con sus observaciones.....	77

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Pérdida de retorno	12
Ecuación 2. Parámetro S11	12
Ecuación 3. Parámetro VSWR.....	13
Ecuación 4. Directividad.....	14
Ecuación 5. Ganancia.....	15
Ecuación 6. Relación entre ganancia, directividad y eficiencia.....	15
Ecuación 7. Eficiencia.....	16
Ecuación 8. Ancho de banda.....	16
Ecuación 9. Ecuación de Mandelbrot.....	19
Ecuación 10. Perímetro de triángulo.....	23
Ecuación 11. Área del triángulo.....	23
Ecuación 12. Perímetro Total en la n-ésima Iteración	24
Ecuación 13. Área Total en la n-ésima Iteración	24
Ecuación 14. Altura máxima por iteraciones	44
Ecuación 15. Para las demás iteraciones.....	45

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

S11: Coeficiente de reflexión

VSWR: Relación de Onda Estacionaria de Voltaje

SWR: Relación de Onda Estacionaria

IBM: Empresa multinacional de tecnología

EFHW: Antena de Media Onda Alimentada en el Extremo

Wi-Fi: Interfaz de Red Inalámbrico

WiMax: Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas

Bluetooth: Tecnología inalámbrica de corto alcance para comunicaciones entre dispositivos.

GNSS: Sistema Global de Navegación por Satélite

GPS: Sistema de Posicionamiento Global

GLONASS: Sistema Global de Navegación por Satélite Ruso

Galileo: Sistema de Navegación por Satélite de la Unión Europea

BeiDou: Sistema de Navegación por Satélite de China

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

PCB: Tarjeta de Circuito Impreso

FR-4: Material base de fibra de vidrio utilizado en PCB

SMA: Conector Subminiatura de Tipo A

DXF: Formato de Intercambio de Dibujos

CSV: Valores Separados por Comas

HF: Alta Frecuencia

RF: Radio Frecuencia

NA: Analizador de Redes

CAT: Prueba de Cable y Antena

IoT: Internet de las Cosas

CAPÍTULO I

1 Introducción

A lo largo de la historia, las comunicaciones han sido base fundamental para el desarrollo de la sociedad. Sin embargo, en el siglo XX, con la aparición de la electrónica y las comunicaciones móviles, su importancia adquirió nuevas dimensiones. Este avance ha llevado a aumentar el interés en optimizar los sistemas de comunicación y mejorar la eficiencia en el uso del espectro disponible [1].

En este contexto, las antenas de doble banda han surgido como una solución para mejorar el rendimiento en diversas aplicaciones. La incorporación de geometrías fractales en el diseño de estas antenas representa un enfoque creativo, ya que las propiedades de autosimilitud y complejidad estructural de los fractales permiten reducir el tamaño físico de la antena, mejorar la adaptabilidad y lograr operación multibanda. Estas características son beneficiosas para aplicaciones en la banda C (4 a 8 GHz), donde se requiere un equilibrio entre dimensiones y rendimiento [2].

Este proyecto se enfoca en el diseño, simulación e implementación de una antena de doble banda basada en geometría fractal para aplicaciones en la banda C. Este tipo de antena se distingue por su capacidad para operar en dos frecuencias diferentes, ideal para sistemas que requieren eficiencia y versatilidad dentro de este espectro. Mediante el análisis de parámetros, como la ganancia, el coeficiente de reflexión (S_{11}) y la relación de onda estacionaria (VSWR), permitirá evaluar su desempeño mediante pruebas de laboratorio utilizando equipos de medición especializados [2].

El aporte de esta investigación es que, hasta el momento, no se ha realizado un estudio similar en nuestra institución sobre el diseño e implementación de antenas con geometría fractal para frecuencias duales. Contribuyendo al avance en el diseño de antenas y también impulsando el desarrollo de infraestructura experimental que permita avanzar en la comprensión y desarrollo de tecnologías avanzadas en el campo de las antenas [1].

1.1 Antecedentes

En 1817, el matemático alemán Georg Cantor descubrió lo que hoy se conoce como el “polvo de Cantor”, considerado uno de los primeros ejemplos de objetos fractales. Este conjunto se caracteriza por su autosimilitud y es un precursor temprano en la historia de los fractales.

En 1890, el matemático francés Henri Poincaré realizó contribuciones iniciales a la geometría fractal, aunque en ese momento estos conceptos se consideraban meras curiosidades matemáticas y no un campo de estudio establecido [1]. En 1918, los matemáticos Gastón Julia y Pierre Fatou expandieron las ideas de Poincaré, aportaron a la comprensión de los conjuntos de Julia y Fatou, elementos importantes en la teoría de los fractales [3].

A pesar de estos avances iniciales, el estudio de los fractales se detuvo en la década de 1920 debido a la falta de herramientas computacionales y técnicas matemáticas adecuadas para analizar estas estructuras. Los fractales volvieron a ser de interés en las décadas de 1960 y 1970, impulsado por el desarrollo de la computación, que permitió realizar cálculos y representaciones gráficas eficientes de estos objetos. Benoit Mandelbrot fue fundamental en este resurgimiento y acuñó y popularizó el término *fractal* [1].

A partir de 1974, el estudio de los fractales resurgió, gracias a los avances en la tecnología de computación digital. Mandelbrot, con sus experimentos en IBM (International Business Machines), es considerado el pionero de la geometría fractal. El estudio de los fractales en IBM surgió como una solución para un problema relacionado con el ruido en las líneas telefónicas utilizadas para la transmisión de información en la red de ordenadores. A pesar de los esfuerzos para reducir el ruido, las interferencias y errores persistían. Mandelbrot aplicó su intuición geométrica y descubrió una relación entre los períodos de error y los períodos sin interferencias, lo que resultó en una representación gráfica fractal, demostrando que conceptos fractales pueden aplicarse para resolver problemas complejos en tecnología y comunicaciones [3].

En 1988, Nathan Cohen construyó la primera antena fractal conocida, lo que marcó el inicio de la investigación en el campo de las antenas fractales. En la década de 1990, Cohen realizó importantes contribuciones al publicar en 1995 la primera investigación científica sobre antenas fractales. Ese mismo año, llevó a cabo experimentos con antenas fractales de hilo y arreglos planares, demostrando que los fractales pueden reducir significativamente el tamaño de las antenas sin comprometer su rendimiento. Además, exploró la versatilidad de estas antenas al analizar el comportamiento monopolo y dipolo de la geometría de Sierpiński. En 1995, la Universitat Politècnica de Catalunya reconoció la innovación de Cohen y solicitó una patente relacionada con antenas fractales y multifractales, basada en sus resultados obtenidos. Este hito demostró la viabilidad de las antenas fractales multibanda [4].

La geometría fractal emergió como un enfoque revolucionario en el diseño de antenas, permitiendo reducir su tamaño y también ofrecer propiedades multibanda, en contraste con las antenas resonantes de banda estrecha. Esta versatilidad se debe a la autosimilaridad inherente de los fractales, lo que significa que sus diagramas de radiación son similares en diferentes bandas de frecuencia, haciéndolas adecuadas para muchas aplicaciones.

Con el paso de los años, numerosos investigadores han contribuido al desarrollo del campo de las antenas fractales, impulsando avances significativos. La introducción de los fractales en la teoría de las antenas es atribuida principalmente a Nathan Cohen, quien se inspiró en la observación de que muchas estructuras naturales presentan propiedades fractales, motivándolo a diseñar antenas más eficientes y versátiles [5].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar, simular e implementar una antena parche de doble banda basada en geometría fractal para aplicaciones en la banda C, mejorando su rendimiento y validando los resultados mediante la comparación entre simulaciones y pruebas experimentales.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una antena parche basada en geometría fractal utilizando un software especializado en simulación electromagnética.
- Simular la operación de la antena en la banda C, asegurando su funcionamiento en las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz.
- Fabricar la antena cumpliendo con los requisitos del diseño simulado.
- Evaluar el rendimiento de la antena fractal a doble banda utilizando el equipo de medición Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer mediante pruebas adecuadas que permitan comparar los resultados experimentales de los parámetros S11 y VSWR con los obtenidos en la simulación.

1.3 Justificación

La carrera de Telecomunicaciones busca contar con un espacio adecuado para realizar experimentos con antenas, especialmente aquellas que emplean tecnología de Microstrip. Para apoyar esta necesidad académica, se requiere la construcción de una antena impresa de doble banda que cumpla con los requisitos de investigación con fines educativos.

Actualmente, la falta de antenas físicas limita las prácticas en la asignatura de Propagación y Antenas, dificultando que los estudiantes puedan realizar experimentos prácticos. Aunque las simulaciones en software son una herramienta valiosa para comprender los conceptos teóricos, no reemplazan la experiencia de trabajar directamente con antenas reales.

Esta carencia no solo limita el aprendizaje, sino que también restringe el acceso a estudios en tecnologías avanzadas, como las antenas fractales, cuyo uso está en aumento en el campo de las telecomunicaciones. Por ello, la presente tesis busca contribuir al desarrollo académico en el estudio de antenas fractales, cerrando esta brecha educativa mediante el diseño, implementación y donación de una antena física de doble banda. Este aporte ayudará a los estudiantes a comprender de manera más profunda el funcionamiento de las antenas con geometría fractal y su aplicación en telecomunicaciones.

1.4 Cronograma

El propósito de este proyecto es evidenciar las ventajas que ofrece el uso de antenas con diseño fractal en comparación con las antenas convencionales. Este enfoque se basa en aprovechar las características y propiedades de las estructuras fractales. A lo largo de este estudio y análisis, se destacará la relevancia actual de las antenas fractales.

El capítulo uno introduce el tema, contextualiza la evolución histórica de las comunicaciones, justifica la investigación y detalla tanto el objetivo general como los objetivos específicos del proyecto.

El capítulo dos se establece el marco teórico, abordando conceptos sobre antenas y fractales, y se proporciona una descripción de las antenas multibanda y de las bandas microondas.

El capítulo tres trata sobre la etapa de diseño, donde se definen aspectos como la forma del fractal y la frecuencia de operación. Se incluyen análisis del diseño, proceso de diseño, simulaciones para evaluar el desempeño previsto, y la implementación práctica de la antena.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados, con énfasis en parámetros como el S_{11} y el $VSWR$, importantes para evaluar la eficacia y rendimiento de la antena. Se comparan los resultados obtenidos de la antena simulada con los de la antena implementada, utilizando equipos de medición del laboratorio de Telecomunicaciones. Finalmente, las conclusiones del estudio y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos, las cuales ofrecen orientaciones y posibles direcciones para futuras investigaciones en el diseño de la antena.

1.5 Metodología

Se optó por la metodología experimental, ya que el proceso de diseño, simulación, construcción y pruebas corresponde a una investigación experimental, permitiendo obtener datos empíricos de la antena implementada y compararlos con los resultados simulados. Para el proceso se sigue una secuencia estructurada como se muestra en el diagrama de la ilustración 1, que garantiza la validez de los resultados.

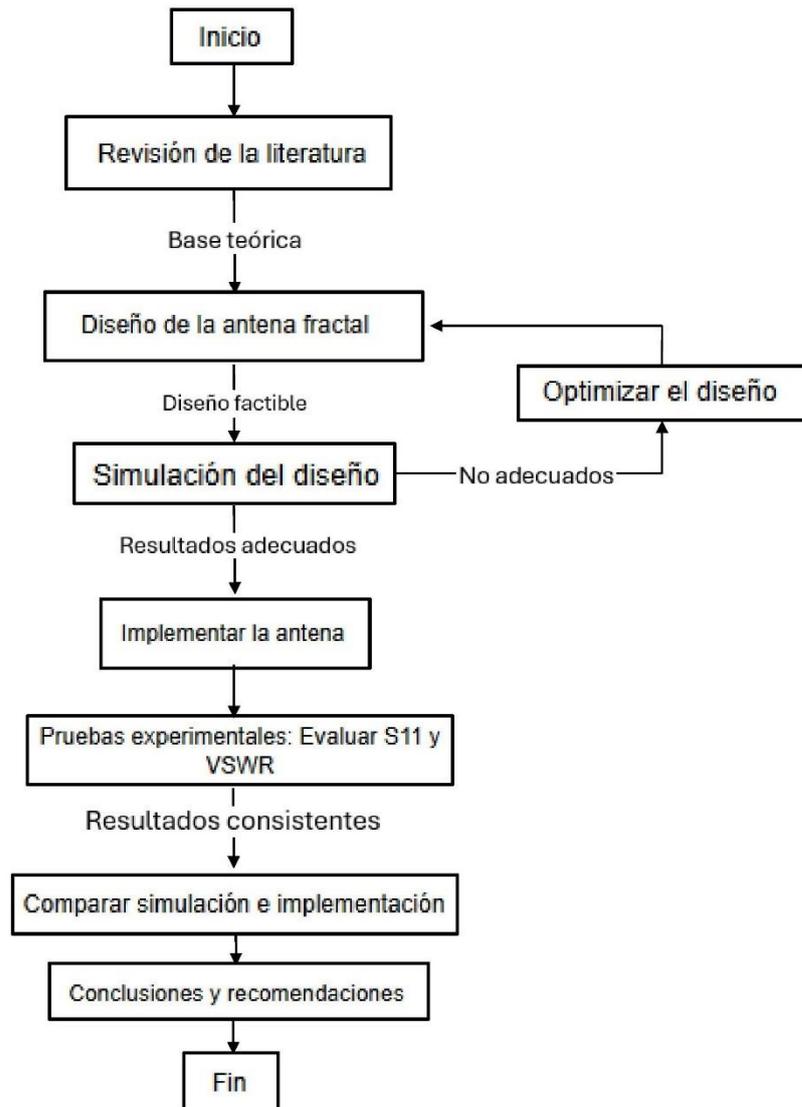


Ilustración 1. Diagrama de flujo del proceso metodológico

El trabajo inicia con la revisión de la literatura sobre antenas fractales, frecuencias multibanda y las características de las bandas del espectro electromagnético, estableciendo una base teórica para el desarrollo del proyecto.

Con este fundamento, se diseña una antena fractal considerando los requisitos técnicos y las frecuencias objetivo (4.5 y 4.8 GHz). Se realizan simulaciones en cada iteración del diseño, evaluando su desempeño y analizando los resultados obtenidos, con énfasis en parámetros como S11 y VSWR.

En caso de que los resultados no cumplan con los criterios esperados, el diseño se optimiza mediante ajustes iterativos, mejorando aspectos como la geometría, el

tamaño de la línea de alimentación y del sustrato. Una vez alcanzados los resultados esperados de la optimización, se procede a implementar físicamente la antena, manteniendo las características del diseño simulado.

Posteriormente, se llevan a cabo pruebas experimentales utilizando el equipo Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer, midieron nuevamente los parámetros S11 y VSWR para comparar los resultados experimentales con los obtenidos en las simulaciones.

Finalmente, se realiza un análisis comparativo entre los datos simulados y los experimentales, verificando ambos resultados y culminando el proceso con las conclusiones sobre el desempeño del diseño y la implementación de la antena, acompañadas de recomendaciones [3].

1.6 Resultados Esperados

El proyecto tiene como objetivo cumplir con los siguientes resultados:

- **Diseño, simulación e implementación de la antena fractal**

En el proyecto pretende desarrollar una antena fractal utilizando un software especializado en simulación electromagnética. Se realizarán simulaciones para optimizar el rendimiento de la antena, enfocándose en parámetros como el S11, VSWR, directividad y ganancia. Una vez alcanzados los resultados, se procederá a la fabricación de la antena con las especificaciones obtenidas en las simulaciones.

- **Evaluación del rendimiento de la antena**

Se realizarán pruebas de rendimiento y optimización, y se medirán los parámetros S11 y VSWR con un equipo del laboratorio de Telecomunicaciones para evaluar su desempeño.

- **Comparación entre simulación y experimentación**

Se obtendrán los resultados de los parámetros S11 y VSWR tanto en la simulación como en las pruebas experimentales. A través de esta evaluación comparativa, se

validará la precisión de las simulaciones y se identificarán posibles errores en los modelos teóricos, lo que permitirá ajustar y mejorar el diseño de la antena.

Se espera culminar exitosamente la investigación con el desarrollo de una antena a doble banda con geometría fractal que cumpla con los requisitos para aplicaciones en la banda C. Además, el proyecto demostrará la eficacia de este tipo de antena identificando tanto sus ventajas como sus limitaciones contribuyendo así al conocimiento en el campo de las antenas fractales.

CAPITULO II

2 Marco Teórico

2.1 Antenas

2.1.1 Definición de Antenas

Para el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), una antena de radiofrecuencia es un dispositivo que forma parte de un sistema transmisor o receptor y está diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas. La organización IEEE, establece estándares y normas en el campo de la ingeniería eléctrica y electrónica, por lo que su definición de antenas es ampliamente reconocida y utilizada en la industria.

Las antenas pueden presentar formas muy variadas, pero todas comparten la característica de ser una región de un sistema que interactúa con las ondas electromagnéticas. Su función es la de transmitir o recibir señales de radiofrecuencia, permitiendo la comunicación inalámbrica entre dispositivos [6].

Existen diferentes tipos de antenas, que varían en forma y características eléctricas, dependiendo de su aplicación específica. Algunos ejemplos de antenas incluyen antenas de hilo, antenas de apertura y antenas planas.

Las antenas se caracterizan eléctricamente por varios parámetros importantes, como la eficiencia, el diagrama de radiación, el ancho de banda, la directividad, la ganancia, la polarización y la anchura de haz. Estos parámetros determinan el rendimiento y las capacidades de la antena en términos de alcance, cobertura y calidad de la señal. La eficiencia y el ancho de banda de una antena pueden verse afectados por el entorno en el que se encuentra. Factores como la presencia de obstáculos, interferencias electromagnéticas y la distancia entre la antena y el dispositivo receptor pueden influir en su rendimiento [7].

2.1.2 Tipos de Antenas

Existen diferentes tipos de antenas utilizadas en diversos sistemas de radiocomunicaciones. Algunos de los tipos más comunes, son:

- **Antenas tipo Parche:** También se las denomina antenas Microstrip, son un tipo de antena planar utilizada en sistemas de comunicación de alta frecuencia. Estas antenas se distinguen por su tamaño reducido y fáciles de fabricar, haciéndolas adecuadas para usos donde el espacio es limitado, como dispositivos móviles y sistemas de comunicación inalámbrica.
- **Antena Monopolo:** También conocida como antena de Marconi, es la más sencilla y se utiliza en muchos servicios de radio y telecomunicaciones, en bajas frecuencias. Es omnidireccional, lo que significa que puede recibir y enviar ondas en todas las direcciones de forma uniforme [8].
- **Antena Dipolo:** El dipolo simple es una antena que consta de dos puntos conductores rectos. Su polarización es lineal y su composición es recta.
- **Antena Yagi:** Conocida como antena Yagi-Uda, es direccional se usa en aplicaciones de telecomunicaciones. Consiste en un conjunto de elementos conductores, como dipolos y reflectores, dispuestos en una estructura lineal. La antena Yagi es conocida por su alta ganancia direccional, puede enfocar la señal en una dirección específica y recibir o transmitir señales con mayor intensidad en esa dirección.
- **Antena Parabólica:** Esta antena es reflectora, emplea su superficie curva en forma de parábola para dirigir las señales, permitiendo que las ondas electromagnéticas se puedan reflejar y concentrar en un solo punto, mejorando la ganancia y directividad de la antena [9].

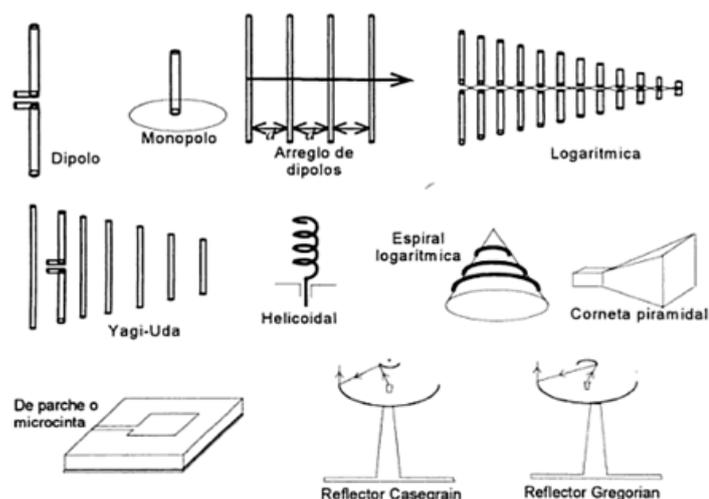


Ilustración 2. Algunos tipos de antenas [9]

Estas son algunas de las antenas utilizadas en sistemas de radiocomunicaciones, incluyen antenas dipolo, antenas Yagi, antenas de parche y más. Cada una de estas antenas tienen propiedades distintas para usos particulares, lo que las hace ideales para distintos contextos y necesidades de comunicación.

2.1.3 Parámetros de una Antena

Los parámetros como la directividad, ganancia, ancho de haz, coeficiente de reflexión, relación de onda estacionaria son importantes, para evaluar el desempeño y comportamiento de la antena.

En el campo de las radiocomunicaciones, los parámetros de una antena permiten conocer y optimizar su funcionamiento para asegurar una comunicación eficiente y adecuada transferencia de información. La eficiencia de radiación, en particular, indica la cantidad de energía que la antena puede irradiar efectivamente hacia el espacio libre a partir de la señal de radiofrecuencia. Esta eficiencia está relacionada con la ganancia de la antena, lo cual ayuda a evaluar su desempeño en términos de la radiación efectiva que emite en el entorno. Ajustar correctamente estos parámetros es importante para asegurar un buen rendimiento de la antena en diversas aplicaciones y garantizar su correcto funcionamiento [10].

Parámetros Generales de una Antena	
Patrón de Radiación	Parámetro VSWR
Diagrama de Radiación	Ganancia
Directividad	Polarización
Ancho de Banda	Eficiencia
Parámetro S11	Área Efectiva

Tabla 1. Parámetros generales de una antena [10]

2.1.3.1 Parámetro S11 (Pérdida de Retorno)

El S_{11} es un parámetro de dispersión que se utiliza para medir la cantidad de potencia reflejada en comparación de potencia aplicada en el puerto de entrada de una red de dos puertos. Este parámetro se expresa en decibelios (dB) y se calcula mediante la fórmula de pérdida de retorno:

$$\text{Pérdida de retorno (dB)} = -20 * \log_{10}(|S_{11}|)$$

Ecuación 1. Pérdida de retorno

El valor absoluto de S_{11} cuantifica la energía reflejada en relación con la energía inicial [11]. Un valor de S_{11} menor a -10 dB indica que menos del 10% de la potencia es reflejada, lo que señala una buena adaptación de impedancia. S_{11} Se refiere al coeficiente de reflexión de la señal en el puerto de entrada de una antena, es decir, a la reflexión de la onda incidente en el puerto 1 de un dispositivo o sistema. Se calcula como la relación entre la onda reflejada (b_1) y la onda incidente (a_1) en dicho puerto, y se expresa de la siguiente manera:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

Ecuación 2. Parámetro S11

Con este parámetro, podemos evaluar la eficiencia de la antena y la calidad de la señal transmitida. Un valor de S_{11} cercano a 0 dB indica una mala adaptación de impedancia, ya que gran parte de la señal es reflejada. Por el contrario, un valor inferior a -10 dB indica una mínima reflexión y, por lo tanto, una buena adaptación de impedancia [4].

2.1.3.2 Parámetro VSWR

El SWR (Standing Wave Ratio) y el VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), son dos parámetros que se relacionan con la medición de eficiencia y la calidad de la señal transmitida de una antena. El SWR es la relación entre la energía transmitida y la energía reflejada en una línea de transmisión o antena. El SWR debe ser lo más cercano a 1:1, este valor indica que la energía transmitida se transfiere sin ningún tipo de reflexión. Si el valor está muy por encima de 1 significa que parte de la energía transmitida se refleja y no se transmite de forma eficiente [12].

El VSWR es una forma de medir el SWR utilizando voltajes. Representa la relación entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo, e indica la relación entre la amplitud de la onda incidente y la onda reflejada en una línea de transmisión o antena. Este parámetro se utiliza para evaluar la eficiencia y adaptación de la impedancia en un sistema.

Tanto el parámetro S_{11} como el VSWR, son muy importantes en la optimización de sistemas de comunicación, ya que permiten minimizar las pérdidas de señal [4]. El VSWR se puede expresar como:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

Ecuación 3. Parámetro VSWR

2.1.3.3 Patrón de Radiación

En una antena, el patrón de radiación describe cómo la energía es emitida en diferentes direcciones, se representa mediante un gráfico llamado diagrama de radiación.

Este diagrama representa la intensidad de la radiación en función de la dirección. Puede ser omnidireccional, emitiendo energía uniforme en todas las direcciones, o direccional, enfocándose en una dirección específica. Factores como la forma, tamaño, frecuencia de operación y medio ambiente influyen en este patrón. Al diseñar una antena, se debe considerar el patrón de radiación para lograr una cobertura adecuada y un rendimiento óptimo.

El diagrama de radiación muestra cómo una antena emite energía en diferentes direcciones y puede ser representado en coordenadas polares o cartesianas [13].

- **Orientación Direccional:** Se refiere a la dirección donde alcanza la máxima radiación, este aspecto aborda conceptos como la Directividad y Ganancia.
- **Lóbulo Principal:** Es el rango angular alrededor de la dirección de máxima radiación.
- **Lóbulos Secundarios:** Menor radiación, cuyo valor es inferior al lóbulo principal [13].

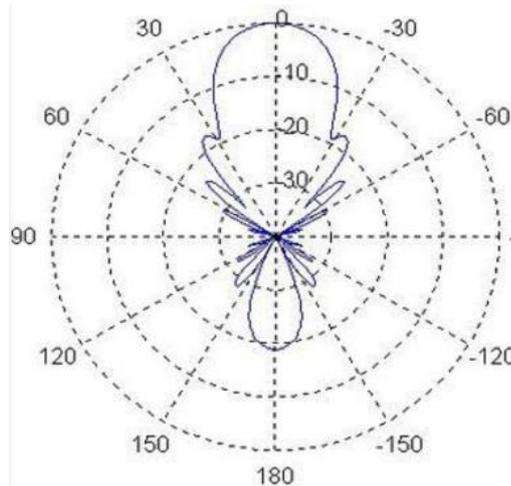


Ilustración 3. Diagrama de Radiación en coordenadas polares [13]

2.1.3.4 Directividad

La directividad de una antena (D), indica su capacidad para enfocar la energía radiada en una dirección específica, en contraste con la emisión uniforme en todas las direcciones. Se calcula como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección dada y la de una antena isotrópica, que emite en todas las direcciones a la misma distancia y potencia total. Se expresa en decibelios (dB), se visualiza mediante un diagrama de radiación. Una antena con alta directividad puede concentrar la energía en una dirección particular, útil en aplicaciones de cobertura direccional, como en sistemas de comunicación punto a punto. La directividad de una antena está relacionada con su ganancia.

Para calcular la directividad:

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$

Ecuación 4. Directividad

Donde D es la directividad (dB), U_{max} es la máxima intensidad de radiación (W), y P_{rad} es la potencia total radiada (W) [14].

2.1.3.5 Ganancia

La ganancia de una antena indica su capacidad para dirigir la energía radiada en una dirección específica, en comparación con una antena isotrópica de referencia. La ganancia varía según el diseño de la antena: una alta ganancia concentra la

energía en una sola dirección, lo cual es útil en aplicaciones que requieren una cobertura focalizada, mientras que una baja ganancia distribuye la energía de manera más uniforme en todas las direcciones.

La ganancia está relacionada con la directividad y la eficiencia de la antena, y se calcula como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia de una antena isotrópica, ver ecuación 5. Aunque la ganancia es adimensional, se expresa comúnmente en decibelios (dB). Además, se relaciona con la eficiencia η de la antena mediante la ecuación 6 [15].

$$G = \frac{4\pi U}{P_{ent}}$$

Ecuación 5. Ganancia

Donde G es la ganancia de la antena (dB), U es la intensidad radiada en una dirección (W), P_{ent} es la potencia de entrada (W)

$$G = \eta \cdot D_{ir}$$

Ecuación 6. Relación entre ganancia, directividad y eficiencia

Donde η es la eficiencia de la antena, y D_{ir} es la directividad de la antena (dB).

2.1.3.6 Eficiencia

En una antena la eficiencia se refiere a su capacidad para transmitir y recibir señales de manera efectiva. Puede verse afectada por varios factores, como la ganancia, la directividad, la polarización y la frecuencia de operación. Una antena eficiente maximiza la potencia de la señal transmitida y mejora la calidad de la señal recibida. Es una medida de cuánta energía de la señal de entrada se irradia al espacio libre en comparación con la energía que se pierde dentro de la antena.

También, puede variar en función de elementos, como el diseño de la antena, los materiales utilizados, las pérdidas por conducción y las pérdidas dieléctricas. Una antena de alta eficiencia tiene la capacidad de irradiar la mayor parte de la energía suministrada en la entrada, mientras que una antena de baja eficiencia presenta mayores pérdidas internas [14].

Para expresar la eficiencia como la relación entre la potencia radiada P_{rad} y la potencia de entrada P_{ent} , se usa la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{ent}}$$

Ecuación 7. Eficiencia

La fórmula proporciona una medida de cuán eficientemente la antena convierte la potencia de entrada en energía radiada [13].

2.1.3.7 Ancho de Banda

El valor del ancho de banda delimita el rango de frecuencias sobre el cual la antena es efectiva, este intervalo se mide a partir de un punto de referencia, como la frecuencia de corte f_0 , y se requiere que las pérdidas sean inferiores a 10 dB, asegurando su buen rendimiento. El coeficiente de reflexión debe ajustarse al análisis de la impedancia de entrada para asegurar una buena adaptación. La expresión matemática para calcular el ancho de banda es:

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0}$$

Ecuación 8. Ancho de banda

Donde f_{max} es la frecuencia superior, f_{min} es la frecuencia inferior y f_0 es la frecuencia central.

Este parámetro resulta útil en sistemas de alta frecuencia, ya que proporciona una comprensión clara del rango de operación en relación con la banda de trabajo que abarca dichas frecuencias [15].

Desde la perspectiva de la impedancia de entrada, el ancho de banda proporciona información sobre la adaptación del sistema, ya que se define como el rango de frecuencias en el cual el coeficiente de reflexión a la entrada de la antena, expresado en decibelios, se mantiene por debajo de -10 dB, como se muestra en la ilustración 4 [14].

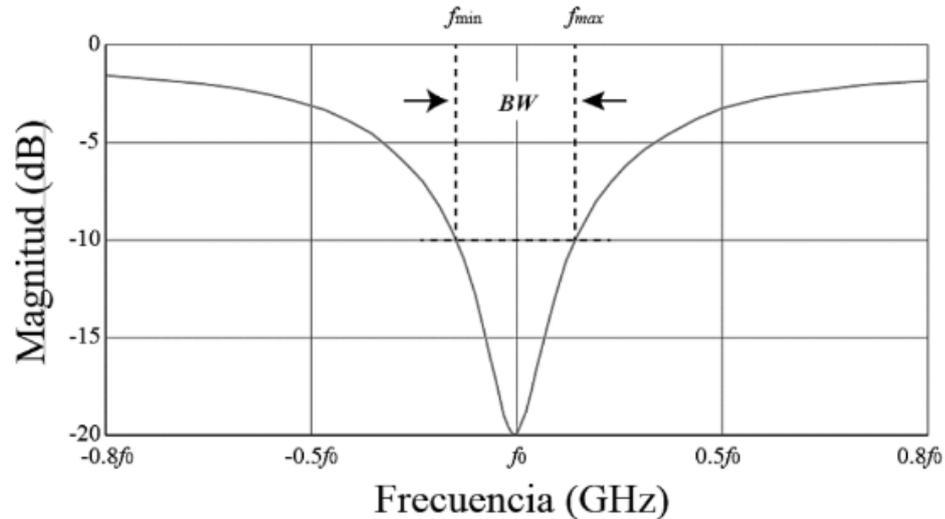


Ilustración 4. Relación entre ancho de banda de una antena y el coeficiente de reflexión [14]

2.2 Antenas Fractales

Las antenas fractales son un tipo de antena que utiliza patrones fractales en su diseño. Los fractales son estructuras geométricas que se repiten a diferentes escalas y presentan propiedades de autosimilitud, estas propiedades se aplican en el diseño de antenas fractales para mejorar su rendimiento y características.

Entre las ventajas de las antenas fractales es su capacidad para operar en diferentes frecuencias. Debido a la naturaleza autosimilar de los fractales, estas antenas fractales pueden adaptarse a diferentes longitudes de onda y frecuencias, haciéndolas adecuadas para aplicaciones de banda ancha. Además, son compactas y ocupan menos espacio en comparación con las antenas tradicionales, lo que las hace especialmente útiles en dispositivos electrónicos portátiles, como teléfonos móviles, donde el espacio es reducido [16].

Otra ventaja de las antenas fractales es su mayor eficiencia en la radiación de la señal y mejor directividad, en comparación con otras antenas. Esto se debe a que su estructura fractal permite una distribución más uniforme de la corriente y del campo electromagnético [3].

2.2.1 Definición de Fractal

Un fractal es un objeto geométrico caracterizado por una estructura que se repite a diferentes escalas y con varias orientaciones. El término “fractal” proviene del

latín *fractus*, que connota fracturas, roturas o irregularidades, concepto que viene atribuido al matemático Benoit Mandelbrot [17].

2.2.2 Geometría Fractal

La geometría fractal es una rama de la geometría que estudia los fractales, los cuales son objetos geométricos que exhiben autosimilitud a diferentes escalas. Un fractal se caracteriza por repetir el mismo patrón a diferentes niveles, mostrando una estructura compleja con detalles que se repiten una y otra vez [17].

Una característica de los fractales es su *dimensión fractal*, que puede ser fraccionaria o no entera, significa que los fractales tienen una dimensión que se encuentra en las dimensiones tradicionales de los objetos geométricos, como una línea (dimensión 1) o un plano (dimensión 2). La dimensión fractal refleja la complejidad y la auto similitud de un fractal [18].

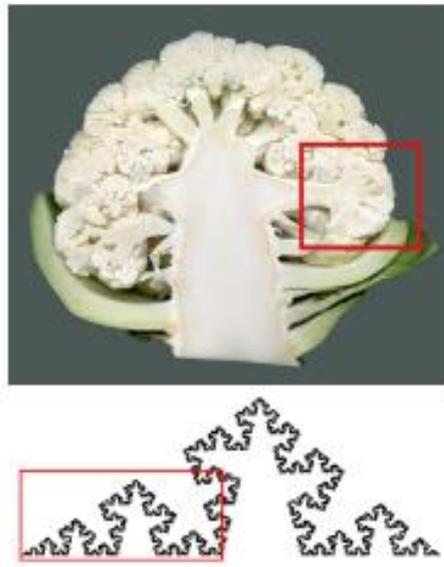


Ilustración 5. Región de una coliflor en la curva de Koch [18]

El concepto de geometría fractal fue desarrollado por Benoit Mandelbrot en la década de 1970. Su obra más importante sobre el tema es *La Geometría Fractal de la Naturaleza*, publicada en 1982. Los fractales se encuentran en muchos aspectos de la naturaleza, como las nubes, las montañas, los sistemas circulatorios, las líneas costeras y los copos de nieve [17].

La geometría fractal tiene aplicaciones en diversos campos, como la física, la biología, la economía y la informática. Se utiliza para modelar y analizar fenómenos complejos y caóticos, y ha demostrado ser una herramienta útil para comprender y describir la estructura de objetos y sistemas en el mundo real [19].

2.2.3 Clasificación de los Fractales

Los fractales pueden clasificarse en diferentes tipos, según la forma en que se construyen o generan. Existen dos categorías:

- Fractales lineales
- Fractales no lineales o complejos

La geometría fractal tiene como base, realizar operaciones especiales con el espacio, a esto se le llama iteraciones, estas pueden ser lineales o no lineales. Las iteraciones lineales siguen patrones que son predecibles y simples, mientras que las iteraciones no lineales son más complejas, generando resultados no lineales ya a menudo impredecibles [3].

2.2.3.1 Fractales Lineales

Los fractales lineales se generan a partir de elementos básicos de la geometría tradicional, como líneas o triángulos. Estos fractales están formados por elementos lineales y pueden construirse mediante trazados sencillos. El *Conjunto de Cantor*, es un ejemplo de fractal lineal, este comienza con una línea que se subdivide repetidamente de manera indefinida, manteniendo su estructura a diferentes escalas [3].

2.2.3.2 Fractales no Lineales

Los fractales no lineales, también conocidos como fractales complejos, se generan utilizando números complejos y sistemas iterativos de funciones. Estos fractales muestran autosemejanza, es decir, la repetición de patrones a diferentes escalas dentro de sí mismos. Se origina a través de iteraciones matemáticas más sofisticadas, como la ecuación:

$$Z = Z^2 + C$$

Ecuación 9. Ecuación de Mandelbrot

Donde Z es la variable compleja, que toma valores sucesivos en cada iteración y C es la constante que representa los puntos en el plano complejo.

En la ilustración 6, se muestra un ejemplo de fractal no lineal, el *Conjunto de Mandelbrot*, para realizar sus cálculos, se utiliza la ecuación 9. Otro ejemplo es el *Conjunto de Julia*, su estudio se basa a través de interacciones matemáticas complejas. Estos fractales nos ayudan a comprender el comportamiento caótico y la autosemejanza en las iteraciones, mostrando la naturaleza no lineal de objetos fractales que se encuentran en la naturaleza como en el ámbito matemático [3].

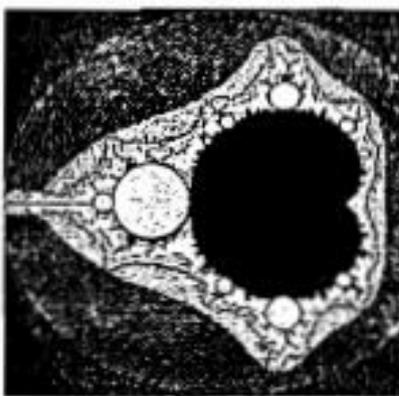


Ilustración 6. Fractal complejo, Conjunto de Mandelbrot [3]

2.2.4 Estructuras Fractales Clásicas

En la actualidad, existe una amplia variedad de fractales clásicos, muchos de los cuales fueron descubiertos a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Estos patrones geométricos complejos fueron recopilados y popularizados por Benoit Mandelbrot a mediados del siglo XX, quien buscaba desarrollar una nueva teoría geométrica basada en los fractales. Esta teoría revolucionó áreas como las matemáticas, la física y otras ciencias aplicadas, ya que permitió modelar fenómenos naturales que no podían explicarse adecuadamente con la geometría tradicional [18].

2.2.4.1 Conjunto de Cantor

En 1833, Georg Cantor introdujo el modelo fractal llamado conjunto de Cantor. Es un conjunto lineal, ha sido estudiado en matemáticas por sus propiedades, este

conjunto ha encontrado aplicaciones en diversos campos, como la teoría de conjuntos, la topología y la geometría fractal [20].

- Se construye mediante un intervalo de 0 y 1, se forma una línea recta
- La línea se divide en tres partes iguales, eliminando la parte central.
- A las dos partes enteras que quedan, se les repite el paso anterior. Este proceso se repite infinitamente, dividiendo y eliminando los segmentos centrales en cada iteración.

El resultado es un conjunto fractal que consiste en los puntos que no fueron eliminados en el proceso de construcción, como se muestra en la ilustración 7.

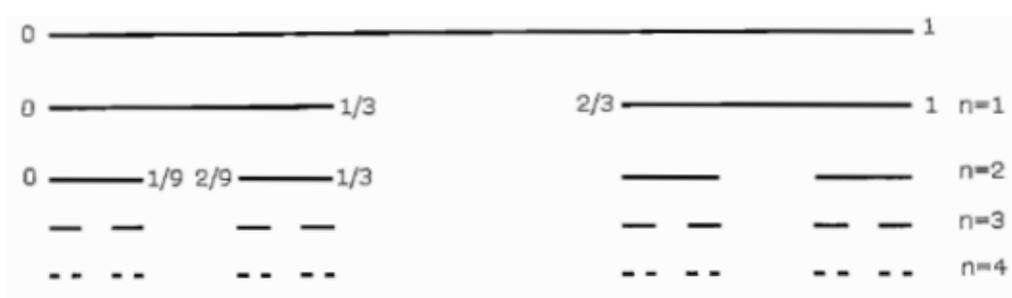


Ilustración 7. Como se genera el Conjunto de Cantor [3]

El Conjunto de Cantor es un conjunto perfecto, ya que no contiene puntos aislados y su dimensión fractal es $\frac{\log(2)}{\log(3)}$ aproximadamente 0,631 [20]. Este fractal exhibe la propiedad de autosimilitud, lo que significa que cada parte del conjunto es similar al conjunto de los números reales [3].

2.2.4.2 Curva de Koch

La Curva de Koch, descrita por el matemático sueco Helge Von Koch en 1904, es también conocida como el copo de nieve de Koch o la estrella de Koch. Este fractal se construye de la siguiente manera:

- Se toma un segmento de la línea y se divide en 3 partes iguales.
- Se reemplaza el segmento central por dos líneas de igual longitud, formando un ángulo de 60° .
- El proceso se repite para cada 1 de los cuatro segmentos resultantes, aplicando iteraciones sucesivas.

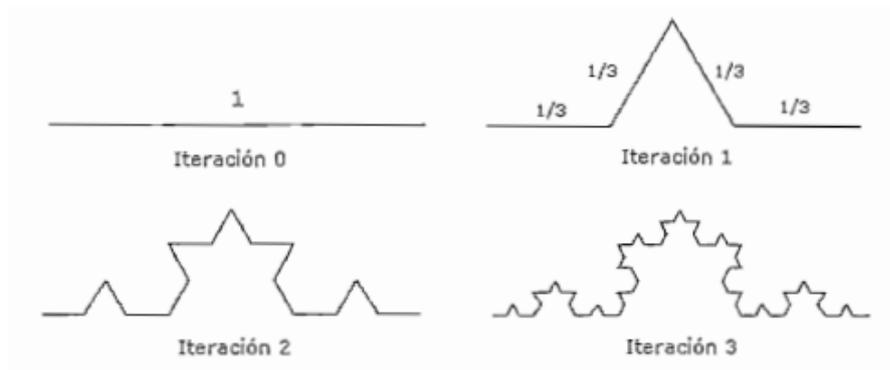


Ilustración 8. Como se genera la Curva de Koch

Como se observa en la ilustración 8, la curva de Koch parece irregular, pero se repite en diferentes escalas, mostrando propiedades autosemejantes. Tiene una dimensión fractal $\frac{\log(4)}{\log(3)}$ aproximada de 1,262. Una característica de este fractal es que, aunque su longitud es infinita, su área delimitada sigue siendo finita.

Este es un ejemplo de un fractal autosemejante, ya que cada iteración del proceso de construcción sigue el mismo patrón que la curva original, pero a una escala más pequeña. Esta propiedad la hace útil en diversos campos, como la modelización de costas y montañas en gráficos computacionales y la teoría de circuitos [3].

2.2.4.3 Triángulo de Sierpiński

Es un fractal geométrico, que fue descubierto en 1915 por el matemático polaco Waclaw Sierpiński, este fractal se puede realizar de la siguiente manera:

- Primero se realiza triángulo, este puede ser equilátero.
- El triángulo se divide en cuatro triángulos más pequeños quitando el triángulo central.
- Este procedimiento se repite para cada triángulo restante, realizando iteraciones sucesivas.

El resultado es un patrón fractal que se repite a diferentes escalas, mostrando autosimilitud en cada iteración. Cada nueva versión del triángulo sigue el mismo patrón que el triángulo original, pero a una escala más pequeña como se muestra en la ilustración 9 [4].



Ilustración 9. Construcción del Triángulo de Sierpiński [4]

Para realizar los cálculos del perímetro y el área de cada iteración en el triángulo, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Perímetro} = \left(\frac{3}{2}\right)^n \cdot P$$

Ecuación 10. Perímetro de triángulo

$$\text{Área} = \left(\frac{3}{4}\right)^n \cdot A$$

Ecuación 11. Área del triángulo

Donde P es el perímetro del triángulo inicial, A es el área, esto del triángulo inicial y n es el número de iteraciones.

Su dimensión fractal $\frac{\log(3)}{\log(2)}$ se aproxima a 1.585, ocupando un área infinita al incrementar las iteraciones, pero su longitud es finita. El triángulo de Sierpiński, es un fractal determinista, su estructura puede definirse matemáticamente sin requerir aleatoriedad [21].

2.2.4.4 Alfombra de Sierpiński

Esta figura fractal, fue descubierta en 1916 por el matemático polaco Waław Sierpiński. Para su comprensión, se describe el proceso de construcción:

- Se inicia con un cuadrado.
- Este cuadrado se divide en 9 cuadrados más pequeños, formando una cuadrícula de 3x3.
- El cuadrado central se elimina.
- Se repite el proceso para cada cuadrado restantes, hasta obtener iteraciones sucesivas.

Esta serie se repite a diferentes escalas, de manera que cada iteración sigue el mismo esquema que la alfombra original, pero a una escala más pequeña, ver ilustración 10. Como otros fractales, la alfombra de Sierpiński es autosimilar, su estructura se repite indefinidamente en diferentes niveles de incremento.

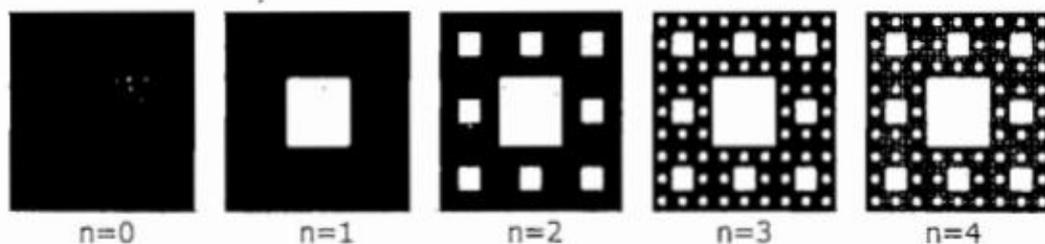


Ilustración 10. Construcción de la Alfombra de Sierpiński [3]

Las fórmulas para calcular el perímetro y el área en la n -ésima iteración son las siguientes:

$$P_n = 4L_0 \left(\frac{8}{3}\right)^n$$

Ecuación 12. Perímetro Total en la n -ésima Iteración

$$A_n = L_0^2 \left(\frac{8}{9}\right)^n$$

Ecuación 13. Área Total en la n -ésima Iteración

Donde L_0 es la longitud del lado del cuadrado base y n es el número de iteraciones.

La dimensión de este fractal $\frac{\log(8)}{\log(3)}$ se aproxima en 1,892. Al igual que el triángulo de Sierpiński, su longitud se mantiene finita. También, es un fractal determinista, ya que su construcción no depende de elementos aleatorios, sino que puede describirse mediante reglas matemáticas predefinidas [20].

2.2.4.5 Curva de Hilbert

Es un fractal continuo descrito por el matemático alemán David Hilbert en 1891. Esta curva tiene la particularidad de ser una línea continua que recorre todo el plano sin cruzarse a sí misma, convirtiéndola en una de las primeras curvas del llenado de espacio. Aunque parece una simple curva, tiene aplicaciones en áreas

como la computación, ya que se utiliza en la organización de datos en discos duros y en la comprensión de imágenes. Su construcción sigue este proceso:

- Se comienza con un cuadrado.
- Este se divide en cuatro cuadrados más pequeños
- Se conectan los cuatro cuadrados más pequeños en un determinado orden: de arriba a la izquierda, hacia abajo y luego a la derecha.
- El proceso se repite para cada uno de los cuadrados más pequeños, aplicando iteraciones sucesivas.

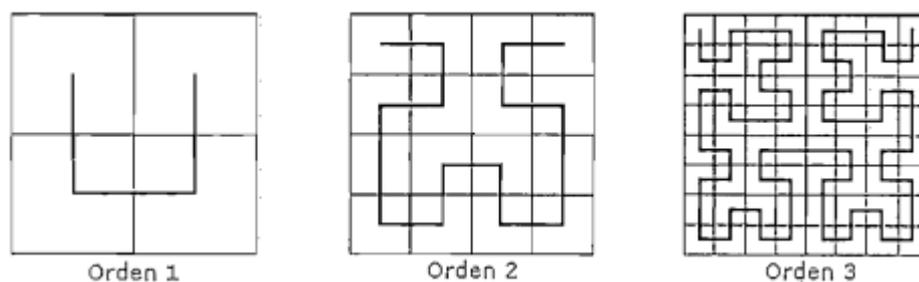


Ilustración 11. Construcción de la curva de Hilbert [3]

A medida que el número de iteraciones aumenta, la curva se vuelve más compleja y parece llenar progresivamente todo el plano, acercándose a una longitud infinita, ver ilustración 11. A pesar de su complejidad la curva no cruza ni interseca ninguno de sus segmentos.

La dimensión fractal de la curva de Hilbert se aproxima a 1.26, parece una línea continua, tiene un comportamiento más cercano al de una superficie bidimensional. Aunque la curva cubre un área infinita a medida que se realizan más iteraciones, su longitud sigue siendo finita, esto es apto en problemas de geometría y en almacenamiento de información espacial [3].

2.2.5 Clasificación de Antenas Fractales

Las estructuras fractales ofrecen dos enfoques para mejorar el diseño de antenas: el primero consiste en crear antenas miniaturizadas, aprovechando la capacidad de los fractales para ocupar el espacio de manera eficiente mediante geometrías complejas, permitiendo reducción de su tamaño sin comprometer el rendimiento. El segundo enfoque se basa en la autosimilaridad presente en la geometría fractal,

esto permite el diseño de antenas capaces de operar en multibanda o resonar en diversas frecuencias de manera simultánea.

Estos dos enfoques clasifican los distintos tipos de antenas fractales, los cuales pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Antenas monopolos y dipolos fractales
- Antenas fractales en lazo
- Antenas fractales multibanda

Esta clasificación según su estructura organizada las distintas aplicaciones y propiedades de las antenas fractales, así se puede comprender las utilidades del diseño en comunicaciones avanzadas, ofreciendo buen rendimiento con sus diseños compactos que trabajan en multifrecuencias, ideales para telefonía celular, sensores, y tecnologías inalámbricas [21].

2.2.5.1 Antenas Monopolos y Dipolos Fractales

Las antenas monopolos y dipolos fractales son tipos de antenas que aprovechan la geometría fractal para mejorar su rendimiento y eficiencia. Su diseño compacto y su capacidad multibanda, les permite operar en diversas frecuencias sin necesidad de modificar su tamaño físico.

Un *monopolo fractal* es una antena que utiliza un modelo fractal repetido a lo largo de su estructura. Gracias a esta geometría, la longitud efectiva de la antena aumenta dentro de un espacio físico reducido, mejorando su eficiencia y rendimiento en comparación con las antenas monopolo convencionales. El diseño fractal permite que el monopolo funcione en varias bandas de frecuencia, siendo ventajoso en aplicaciones que requieren la transmisión o recepción en diferentes rangos de frecuencia sin la necesidad de antenas adicionales o ajustes complicados.

El *dipolo fractal*, también hace uso de geometría fractal, pero esto en una estructura dipolar. Al igual que en los monopolos fractales, los dipolos fractales proporcionan mejor rendimiento y eficiencia que los dipolos tradicionales. Esto es gracias a la capacidad de las antenas fractales para adecuarse a varias frecuencias

y reducir la pérdida de energía, ideales para usos que necesitan flexibilidad y operación en bandas de frecuencia [5].

2.2.5.2 Antenas Fractales en Lazo

Las antenas en Lazo utilizan geometría fractal en la forma de un lazo conductor, esto mejora su capacidad para operar en varias bandas de frecuencia de manera simultánea. Estas antenas se caracterizan por su diseño compacto y eficiente, lo que las hace muy útiles en comunicaciones inalámbricas, como en tecnologías de telefonía móvil y las redes Wi-Fi.

La autosimilaridad presente en los patrones fractales permite que estas antenas resuenen en múltiples frecuencias sin necesidad de aumentar el tamaño de la estructura, esto las convierte en una opción atractiva para dispositivos móviles donde el espacio es limitado. Además, su diseño permite una distribución uniforme de la corriente, lo que reduce las pérdidas y aumenta su eficiencia general en comparación con las antenas de lazo tradicionales [5].

2.2.5.3 Antenas Fractales Multibanda

La geometría fractal por su idoneidad de autosemejanza, apta para ser implementada en antenas para operar en diferentes frecuencias. Estas antenas están diseñadas para emplear la repetición de patrones fractales en su sistema por su rendimiento.

De diseño compacto y de aptitudes multifrecuencia, son adecuadas para aplicaciones en comunicaciones inalámbricas, donde se necesita cobertura multibanda sin tener que usar más antenas. Este tipo de antena es ideal para usar en dispositivos móviles, sistemas de radar y en sensores, donde el espacio es reducido y la operabilidad son importantes [3].

El uso eficiente del espacio y la disposición de adecuarse a diferentes frecuencias, hacen que las antenas fractales multibanda sean componentes llamativos en el diseño de sistemas de comunicación modernos, brindando mayor flexibilidad en entornos donde se utilizan varias tecnologías simultáneamente [14].

2.2.6 Características y Rendimiento

Las antenas fractales utilizan diseños basados en geometría fractal para aumentar el perímetro o distancia que pueden cubrir dentro de una superficie dada. Estas antenas son de diseño pequeño, con aptitudes multibanda o de espectro extendido y sirven para una gran variedad de aplicaciones de telecomunicaciones. Entre sus características se tiene:

- **Diseño compacto:** Son de tamaño pequeño, a medida que las series geométricas fractales se repiten en diferentes escalas, logran aumentar la recepción de frecuencias dependiendo de las iteraciones. Este rasgo las hace ideales para entornos con limitaciones de espacio.
- **Capacidad multibanda:** En comparación con antenas tradicionales, las antenas fractales pueden operar en varias frecuencias al mismo tiempo, aptas para usos donde se requiere operar de forma eficiente en múltiples bandas.
- **Ancho de banda:** Pueden alcanzar un ancho de banda del 10% al 40% de la frecuencia central, significando mayor ancho banda que las antenas tradicionales (normalmente del 10% al 20%). Este beneficio se debe a la naturaleza de la geometría fractal, que ayuda a mejorar la capacidad de adaptarse a diversas frecuencias.
- **Patrones de radiación estables:** El modelo de radiación de estas antenas, es uniforme proporcionando calidad de señal óptima en varias direcciones, mejorando el rendimiento en ambientes con diferentes destinos de señal.

Estas características hacen que las antenas fractales sean una opción llamativa sobre las antenas tradicionales en una variedad de aplicaciones de telecomunicaciones, donde la eficiencia y la operatividad multibanda son esenciales [22].

2.2.7 Funcionalidad Multibanda

Las antenas fractales se distinguen por funcionar en multibanda, aprovechando la repetición geométrica en sus modelos para resonar en diferentes frecuencias a diferencia de las antenas tradicionales, que normalmente solo funcionan en una

frecuencia específica. Estas características de autosimilitud en el diseño fractal, maximiza la eficiencia de la antena para abarcar diferentes bandas del espectro [14].

La competencia multibanda de estas antenas las hace aptas para usos que requieren de transmisión y recepción de datos en un rango más extenso de frecuencias, como sistemas de comunicación celular, redes Wi-Fi (Wireless Fidelity), WiMax (World Wide Interoperability for Microwave Access) entre otras tecnologías inalámbricas [22]. Esta característica multibanda consiente mayor tolerancia al momento de asignar el espectro, resultando en mejor gestión del uso de frecuencia. También proporcionan ancho de banda más amplio a diferencia de antenas tradicionales [5].

2.2.8 Integración de Fractales en el Diseño de Antenas

Incorporar fractales en el diseño de antenas, resulta una técnica que aprovecha de las propiedades geométricas de los fractales para mejorar el rendimiento, eficiencia y versatilidad de las antenas. Al aumentar la longitud efectiva de la antena sin necesidad de ampliar su tamaño físico, la geometría fractal optimiza su funcionamiento en diversas frecuencias de manera simultánea. Algunas ventajas al integrar geometría fractal en antenas:

- **Diseño compacto:** Por la geometría fractal en el diseño, se pueden hacer antenas más pequeñas debido a la auto semejanza.
- **Función en un amplio rango de frecuencias:** Estas antenas fractales son capaces de funcionar en varias frecuencias a la vez eliminando la necesidad de ajustes estructurales para cada banda.
- **Mayor eficiencia:** La geometría fractal amplía la longitud efectiva de la antena, mejora al recibir y transmitir señales, esto ayuda a su rendimiento.
- **Flexibilidad de diseño:** Los patrones fractales ofrecen gran versatilidad, permitiendo personalizar el diseño de antenas para adaptarlas a aplicaciones específicas, aumentando las posibilidades en el campo del diseño de antenas [23].

2.2.9 Aplicaciones de las Antenas Fractales

Las antenas fractales son utilizadas en diversas áreas por sus beneficios, algunas aplicaciones son:

- **Telecomunicaciones:** Utilizadas en telecomunicaciones por proporcionar altos niveles de ganancia en varias frecuencias, A comparación con las antenas tradicionales, cuya ganancia se reduce rápidamente fuera de su frecuencia principal de operación, las antenas fractales mantienen un buen rendimiento en un amplio espectro, ideales para sistemas multibanda.
- **Dispositivos móviles:** Las antenas fractales se las puede crear en tamaños más pequeños, para usarlas en teléfonos celulares. Por su tamaño y diseño, son de alto rendimiento útiles para espacios pequeños como smartphones y dispositivos IoT.
- **Comunicación por microondas:** Adecuadas para sistemas de comunicación por microondas por sus rasgos, para maximizar la distancia de transmisión o recepción dentro de un área limitada. Su diseño compacto y multibanda las hace útiles en diversas aplicaciones de microondas y telecomunicaciones móviles.
- **Desarrollo de antenas avanzadas:** Patrones fractales, como el conjunto de Mandelbrot, han sido utilizados para crear antenas con mejor rendimiento en términos de eficiencia y ganancia. Estos modelos permiten optimizar las características de la antena, haciéndola más eficiente en su funcionamiento y adecuada para una gran variedad de usos [24].

2.2.10 Antenas Fractales Vs Antenas Convencionales

Ambos tipos de antenas tienen diferencias que tienen que ver con el diseño, el rendimiento y usos. Una comparativa de estas antenas se puede ver en la tabla 4:

Características	Antenas Fractales	Antenas Convencionales
Diseño	Basadas geometrías fractales, como el triángulo de Sierpiński o la curva de Koch, con autosemejanza.	De diseños simples, como dipolos, monopolos o parabólicas, trabajan en una frecuencia específica.

Tamaño	Más compactas debido a su diseño autosimilar, lo que permite una mayor longitud efectiva en espacios reducidos.	Su tamaño depende directamente de la longitud de onda de la frecuencia, lo que puede hacerlas más grandes.
Multibanda	Capaces de operar en múltiples frecuencias simultáneamente, adecuadas para aplicaciones que requieren un amplio rango de frecuencias.	Normalmente optimizadas para una sola frecuencia o un rango estrecho de frecuencias (monobanda)
Ganancia y Directividad	Mayor ganancia y directividad en comparación con antenas convencionales de igual tamaño, especialmente en un rango más amplio de frecuencias.	Pueden tener buena ganancia y directividad, pero esto se limita a la frecuencia para la cual están diseñadas.
Aplicaciones	Se utilizan en dispositivos donde el espacio es limitado, como marcapasos y otros dispositivos médicos portátiles.	Usadas ampliamente en telecomunicaciones, radiodifusión y aplicaciones de radar, donde el tamaño y la optimización para una sola frecuencia son aceptables.

Tabla 2. Comparación entre Antena fractal y Antena convencional [23] [24]

Las antenas fractales ofrecen ventajas en términos de tamaño compacto y capacidad multibanda, mientras que las antenas convencionales son más simples y están optimizadas para aplicaciones específicas de frecuencia [24].

2.3 Frecuencia Multibanda

Las antenas que se basan en geometría fractal se caracterizan por su capacidad de operar en múltiples bandas de frecuencia, gracias a las propiedades inherentes de su diseño. A diferencia de una antena de parche convencional, que está limitada a funcionar en una sola frecuencia, una antena fractal puede transmitir y recibir en diversas frecuencias, convirtiéndola en una solución óptima para aplicaciones multibanda. Aunque las antenas de parche ofrecen buena directividad y ganancia en una frecuencia específica, resultan ineficaces cuando se requiere cubrir varias bandas. Para superar esta limitación, las antenas fractales se presentan como una alternativa eficiente [2].

Al emplear antenas fractales, se logra mayor versatilidad al reducir el uso de varias antenas para distintas frecuencias, lo que también optimiza el uso de hardware y energía, demostrando cómo la capacidad multibanda de las antenas fractales ofrece ventajas en términos de eficiencia y simplificación del sistema [25].

2.3.1 Mecanismos de Operación Multibanda

Permiten que una sola antena funcione en diferentes bandas de frecuencia. Útil en aplicaciones donde el espacio es limitado o se requiere una solución más compacta y eficiente. Algunos aspectos de operación multibanda son:

- **EFHW (End-Fed Hald-Wave):** Es un tipo de antena de hilo largo, resonante en su frecuencia de media onda. Su ventaja principal, es más fácil de instalar y se adapta mejor en espacios pequeños, ya que solo necesita un punto de alimentación en un extremo y no necesita un soporte central [26].
- **Trampas LC:** Son dispositivos resonantes que se colocan entre un dipolo para evitar ciertas frecuencias, como resultado, el dipolo actúa como si fuese más corto, permitiendo que las ondas radio se reflejen en él. Las trampas LC bloquean ciertas frecuencias, esto permite que la antena resuene en diferentes bandas de frecuencia [27].

- **Tecnología Microstrip:** Este tipo de tecnología se usa en antenas compactas, debido a las dimensiones mínimas de los elementos radiantes. Las antenas pueden estar diseñadas para operar en ciertas bandas, como Wi-Fi (2.4 y 5 GHz) y WiMAX (3.5 GHz). Se pueden diseñar elementos radiantes simples, como monopolos, que cumplen con las especificaciones de diferentes bandas [28].

Estos mecanismos permiten que las antenas multibanda sean versátiles y eficientes, adaptándose a diversas necesidades de comunicación.

2.3.2 Aplicaciones de Antenas Multibanda

Las antenas multibanda tienen varios usos por su capacidad de operar en multibanda. Entre las aplicaciones más comunes:

- **Radioaficionados:** Son muy populares entre los radioaficionados, ya que permiten la comunicación en varias bandas de HF (High Frequency) sin tener que cambiar de antena e ideales para quienes tienen poco espacio.
- **Comunicaciones móviles:** Se usan en dispositivos móviles, como teléfonos celulares y tabletas, las antenas multibanda permiten la conexión a diferentes redes (2G, 3G, 4G y 5G) y tecnologías (Wi-Fi, bluetooth) con una sola antena [29].
- **Sistemas de navegación:** Se utilizan para sistemas de navegación por satélite GNSS, para recibir señales de diversos sistemas de satélites GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, mejorando la precisión y la fiabilidad de la localización.
- **Aplicaciones militares y de seguridad:** En este ámbito, las antenas multibanda son importantes para las comunicaciones tácticas, permitiendo a los equipos operar en diferentes bandas de frecuencia según las necesidades del entorno.
- **IoT (Internet of Things):** En los dispositivos IoT, permiten la conectividad a varias redes y protocolos, facilitando la comunicación entre dispositivos en distintos entornos y aplicaciones [30].

Estas son algunos de los usos de antenas multibanda en diferentes áreas tecnológicas y de comunicación.

2.3.3 Teoría de la Doble Banda

Se refiere al diseño y funcionamiento de antenas que pueden operar en dos bandas de frecuencia distintas. Este tipo de antenas es útil en aplicaciones donde se requiere comunicación en múltiples frecuencias, como en dispositivos móviles, sistemas de comunicación por satélite y redes inalámbricas. Las antenas de doble banda están diseñadas para resonar en dos frecuencias diferentes. Esto se puede lograr mediante varias técnicas, como el uso de elementos resonantes adicionales, estructuras de parche con resonadores, o configuraciones de dipolo plegado [31].

Las antenas de doble banda son utilizadas en dispositivos que requieren conectividad en diferentes frecuencias, un ejemplo son los teléfonos móviles que necesitan operar en dos bandas de 2.4 GHz y 5 GHz para Wi-Fi. Entre algunas ventajas y desafíos se tiene, que:

- Permiten la operación multibanda, ideal para dispositivos multifuncionales.
- Mejoran la eficiencia del espectro al permitir la comunicación en diferentes bandas sin interferencias significativas.
- El diseño para las antenas de doble banda puede ser más complejo, para asegurar que ambas bandas resuenen de forma adecuada.
- Se debe minimizar la interferencia entre las bandas para garantizar un rendimiento óptimo [32].

2.3.4 Resonancia Doble

La resonancia doble, es la capacidad que tiene una antena para funcionar eficazmente en dos frecuencias diferentes. Este principio es importante en el diseño de antenas de doble banda, que permite emitir y captar señales en dos bandas de frecuencia distintas.

La resonancia se produce cuando la longitud de la antena se multiplica por la longitud de onda que transmite la señal. Las antenas que funcionan a dos bandas hacen uso de la resonancia, o de sistemas parche. Comúnmente este tipo de

propiedad se encuentra en routers W-Fi, equipos inalámbricos, teléfonos celulares, entre otros, que necesitan funcionar en varias frecuencias para aumentar la señal y la velocidad de transmisión [33].

2.4 Bandas del Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es el rango completo de todas las frecuencias de radiación electromagnética. Se extiende desde las ondas de radio de baja frecuencia hasta los rayos gamma de alta frecuencia. Entre las principales bandas del espectro electromagnético tenemos:

Bandas del Espectro Electromagnético	Frecuencia	Aplicaciones
Ondas de Radio	3 Hz a 300 GHz	Radiodifusión, comunicación móvil, Tv.
Microondas	300 MHz a 300 GHz	Comunicación satelital, hornos microondas, radares, Wi-Fi.
Infrarrojo	300 GHz a 400 THz	Sensores térmicos, control remoto, astronomía infrarroja.
Luz Visible	430 THz a 770 THz	Iluminación, fotografía, visión humana.
Ultravioleta (UV)	770 THz a 30 PHz	Esterilización, análisis forense, astronomía UV.
Rayos X	30 PHz a 30 EHz	Imágenes médicas, inspección de equipajes, astronomía rayos X.
Rayos Gamma	> 30 EHz	Tratamiento de cáncer, detección de materiales radioactivos, astronomía de rayos gamma.

Tabla 3. Bandas del Espectro electromagnético

Cada una de estas bandas tiene características únicas que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones tecnológicas y científicas [34].

La ilustración 12, muestra con mayor claridad el espectro electromagnético, que abarca desde las ondas de radio de baja frecuencia hasta los rayos gamma de alta frecuencia.



Ilustración 12. Espectro electromagnético [35]

También muestra cómo la longitud de onda disminuye y la frecuencia aumenta a medida que avanzamos desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Esto significa que las ondas de radio tienen las longitudes de onda más largas y las frecuencias más bajas, mientras que los rayos gamma tienen las longitudes de onda más cortas y las frecuencias más altas [35].

2.4.1 Bandas de Microondas

Las microondas tienen frecuencias más altas que las ondas de radio convencionales y se utilizan en aplicaciones como Wi-Fi, telefonía móvil, radares y comunicaciones satelitales. Estas ondas electromagnéticas se encuentran en un rango de frecuencia entre 1 y 300 GHz, permitiendo una gran variedad de usos en telecomunicaciones, radiodifusión y tecnologías de detección [36].

Cada banda dentro del espectro de microondas se utiliza para propósitos específicos. En la tabla 2, se muestran las principales bandas de microondas y sus aplicaciones más comunes:

Bandas de Microondas	Frecuencia	Longitud de Onda	Aplicaciones
L	1 a 2 GHz	15 cm a 30 cm	GPS, comunicaciones móviles y satélites de comunicaciones.
S	2 a 4 GHz	7.5 cm a 15 cm	Radar meteorológico, comunicaciones satelitales y Wi-Fi (2.4 GHz).
C	4 a 8 GHz	3.75 cm a 7.5 cm	Comunicación satelital, Tv por satélite y radar.

X	8 a 12 GHz	2.5 cm a 3.75 cm	Radar militar, radar meteorológico y comunicaciones satelitales.
Ku	12 a 18 GHz	1.67 cm a 2.5 cm	Televisión por satélite, comunicaciones satelitales y radares.
K	18 a 27 GHz	1.1 cm a 1.67 cm	Radar de velocidad, comunicaciones satelitales y sistemas de detección de armas.
Ka	27 a 40 GHz	0.67 cm a 1.1 cm	Comunicaciones satelitales de alta velocidad, radar y sistemas de comunicación de datos.
W	75 a 110 GHz	2.7 mm a 4 mm	Comunicaciones de alta frecuencia, radar de imágenes y sistemas de detección avanzada.

Tabla 4. Bandas de microondas [37]

Cada banda está adaptada para diferentes condiciones atmosféricas, alcance y capacidad de penetración, esto es importante en la evolución de las tecnologías modernas de comunicación y detección [37].

2.4.1.1 Banda C

Esta banda del espectro de microondas tiene usos en diferentes áreas, se encuentra en el rango de 4 a 8 GHz, su longitud de onda va desde 3.75 cm a 7.5 cm, es conocida por su uso en comunicaciones satelitales, en la transmisión de televisión y las tecnologías emergentes del 5G.

2.4.1.2 Aplicaciones Principales

Los usos más comunes son:

- **Comunicaciones satelitales:** La banda C es utilizada para la transmisión de señales entre estaciones terrestres y satélites en órbita geostacionaria. Es una de las bandas más empleadas en comunicaciones de largo alcance debido a su capacidad de mantener la señal fuerte y estable, incluso en

condiciones meteorológicas adversas. Algunos satélites de comunicaciones comerciales, como los que proporcionan televisión satelital y servicios de internet, utilizan esta banda [38].

- **Televisión por satélite:** Durante mucho tiempo, la banda C fue el estándar para la transmisión de señales de televisión, en particular para televisión por satélite. A pesar de que otras bandas, como la banda Ku, han ganado popularidad por ofrecer mayores anchos de banda, la banda C sigue siendo una buena opción en regiones con alta humedad o lluvias intensas por su resistencia a la atenuación atmosférica.
- **Radar meteorológico:** Debido a su capacidad para penetrar las precipitaciones y el vapor de agua en la atmósfera, la banda C se emplea en radares meteorológicos para monitorear condiciones climáticas, como lluvias, tormentas y la formación de sistemas meteorológicos severos [39].
- **Comunicación punto a punto:** Se emplea para enlaces de comunicación punto a punto de gran capacidad, como en las redes de telecomunicaciones de fibra óptica y microondas. Su estabilidad y capacidad para mantener la calidad de la señal la hacen ideal para usos, como el transporte de datos para redes celulares y redes de datos empresariales.
- **Uso militar:** La banda C también viene empleada en usos militares, como radares de vigilancia y sistemas de comunicación entre fuerzas terrestres y satélites militares. Su resistencia ante interferencias atmosféricas la convierte en una opción confiable para las Fuerzas Armadas [38].
- **5G y Comunicaciones Inalámbricas:** La banda C está siendo revalorizada para su uso en redes 5G por su capacidad para ofrecer un equilibrio entre cobertura y capacidad. Las frecuencias en la banda C pueden proporcionar velocidades de datos más altas y una mejor penetración en edificios en comparación con las frecuencias más altas.

Un reto para la banda C, es la congestión del espectro en áreas con alta necesidad de comunicaciones por satélite. Con la implementación de las redes 5G, la banda C ha ido tomando importancia por proporcionar equilibrio entre cobertura y capacidad de transmisión de datos. Algunos países han iniciado el subastado de

frecuencias de la banda C con el objetivo de mejorar la rapidez y la calidad de las comunicaciones inalámbricas [40].

CAPÍTULO III

3 Metodología de Diseño

La investigación se enfoca en el diseño de una antena fractal basada en el triángulo de Sierpiński [41], con el objetivo de desarrollar una antena capaz de operar en doble banda dentro de la banda C. A continuación, se describe la metodología utilizada:

- **Definición de los criterios de diseño:** Se establecen los requisitos, como la eficiencia de radiación, la ganancia y la frecuencia de operación. SE definen los objetivos de la antena, incluyendo las bandas de frecuencia, parámetros S11 y VSWR que sean aceptables.
- **Elección del material dieléctrico:** Se consideran las propiedades dieléctricas y mecánicas, como la constante dieléctrica (ϵ_r), la tangente de pérdidas y el grosor. Este material debe garantizar buen rendimiento para reducir pérdidas de energía.
- **Descripción del espectro de frecuencia:** Se identifica el rango de operación de la antena en la banda C, delimitando las frecuencias objetivo (4.5 y 4.8 GHz) según el requerimiento del sistema.
- **Determinación de las iteraciones fractales:** Se calcula el número de iteraciones o niveles de la estructura fractal del triángulo de Sierpiński. Para asegurar el diseño, se realizarán simulaciones en cada nivel de iteración, evaluando parámetros S11 y VSWR. Estas simulaciones permiten observar el comportamiento de la antena con cada nivel fractal, para la comprensión de su respuesta en las bandas seleccionadas, antes de llegar a la base de optimización final de diseño.
- **Ajuste y optimización de parámetros:** Una vez establecidas las iteraciones, se realiza un proceso iterativo de ajustes en las dimensiones, como la altura del sustrato y la geometría del parche. La simulación numérica (software de simulación electromagnética) se utiliza para optimizar el diseño, para que funcione en las bandas seleccionadas.

- **Validación mediante simulación:** Se validan los resultados mediante simulaciones electromagnéticas, evaluando parámetros como el diagrama de radiación, el S11 y el VSWR.
- **Fabricación y pruebas experimentales:** Finalmente, se procede con la fabricación del prototipo de la antena utilizando los materiales y configuraciones de la simulación con la antena mejorada. La antena se evalúa experimentalmente para verificar que los resultados prácticos sean aceptables, empleando un analizador de redes como el Keysight N9918A FieldFox.

3.1 Requisitos de Diseño

La antena debe cumplir con algunas especificaciones técnicas:

- **Rango de frecuencias:** 4.5 y 4.8 GHz
- **Pérdidas por retorno (S11):** ≤ -10 dB
- **VSWR:** $\leq 2:1$
- **Ganancia:** ~ 2 dBi
- **Dimensiones (mm):** 78 x 90 x 1.5

3.2 Análisis de Diseño

El diseño de la antena fractal basada en el triángulo de Sierpiński se fundamenta en dos parámetros: la separación entre las iteraciones fractales y el ángulo de apertura (triángulo equilátero 60°) [41]. Estos factores influyen actúan directamente en el comportamiento electromagnético de la antena, consintiendo que funcione en varias bandas de frecuencia.

- **Espacio entre iteraciones:** En el caso del triángulo equilátero, la simetría inherente de la estructura tiene un efecto directo en las propiedades de radiación de la antena. A medida que se avanza en las iteraciones del fractal, los triángulos más pequeños que se generan tienen una mayor uniformidad en la distribución de corriente por la simetría equilátera. Esto ayuda a la antena a resonar de forma eficiente, tanto en las bandas bajas como en las altas.

- **Altura máxima y mínima de los triángulos:** La altura máxima de la estructura fractal determina la frecuencia mínima de operación de la antena, ya que una mayor longitud de trayectoria implica una mayor longitud de onda (frecuencias más bajas). En cambio, la altura mínima, que corresponde a los triángulos más pequeños generados en iteraciones superiores como se muestra en la ilustración 13, define la frecuencia máxima a la que puede operar la antena [42].

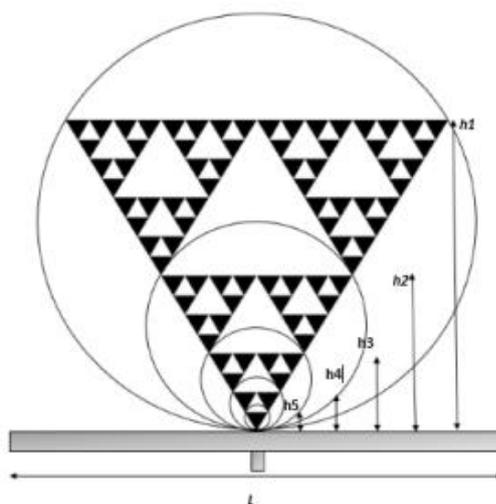


Ilustración 13. Altura máxima y mínima del triángulo de Sierpiński [42]

El objetivo es que la antena pueda operar dentro de la banda C (4 a 8 GHz), en las frecuencias seleccionadas de 4.5 GHz y 4.8 GHz. Para lograr esto, se ajustarán tanto la geometría fractal como la separación entre iteraciones, a través de simulaciones, para verificar su rendimiento en términos de ganancia, VSWR y S11 en estas frecuencias.

3.2.1 Elección de la Frecuencia

Al trabajar en la banda C, la elección de las frecuencias de 4.5 GHz y 4.8 GHz se fundamenta en las siguientes consideraciones:

- **Compatibilidad con la banda C:** Estas frecuencias se ubican dentro de la banda C, que es usar en aplicaciones como comunicaciones satelitales y radar, proporcionando una utilidad práctica para la antena.
- **Resonancia multibanda:** el diseño basado en el triángulo de Sierpiński (equilátero) permite aprovechar su simetría para operar en más de una

frecuencia, logrando un diseño multibanda sin la necesidad de estructuras adicionales [36].

- **Balance entre capacidad y cobertura:** Las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz proporcionan equilibrio adecuado en transmitir la señal y su capacidad de penetración en el entorno, ideal para usos en redes y sistemas inalámbricos. 300 MHz es la separación adecuada entre las dos frecuencias de interés, esta diferencia es suficiente para que la antena pueda operar en doble banda, manteniendo una buena distancia para que entre bandas no haya interferencias.

Para asegurar el correcto funcionamiento de la antena en estas frecuencias, se modifica la geometría fractal y se mejoran las dimensiones, teniendo en cuenta la relación entre longitud de onda y el tamaño de los triángulos que se han realizado en cada iteración. Las simulaciones se centrarán en verificar que la antena cumpla con los requisitos de pérdida de retorno ($S_{11} \leq -10$ dB) y VSWR ($\leq 2:1$) en las frecuencias seleccionadas.

3.2.2 Diseño basado en el Triángulo de Sierpiński

El triángulo de Sierpiński, es una estructura fractal utilizada en el diseño de antenas debido a sus propiedades electromagnéticas. Al aplicarse al diseño de antenas de doble banda para la banda C, ofrece varias ventajas.

Esta figura fractal se distingue por su autosemejanza, su forma se repite en diferentes escalas, preservando la geometría base sin deformarse, se puede ampliar o reducir su forma, lo cual es útil en el diseño de antenas porque permite una transmisión electromagnética uniforme en un amplio rango de frecuencias, excelente para usos multibanda [41].

Se ha optado por el diseño del triángulo de Sierpiński para este proyecto, por:

- Gracias a su estructura fractal, las antenas basadas en el triángulo de Sierpiński pueden operar en diversas frecuencias. Adecuadas para aplicaciones multibanda.
- A pesar de su complejidad estructural, el triángulo de Sierpiński puede generarse a partir de una forma inicial simple, esto permite diseñar antenas

compactas que ocupan menos espacio físico, es una ventaja para dispositivos portátiles.

- Las antenas fractales basadas en esta geometría, en comparación con antenas tradicionales, muestran un mejor comportamiento en ganancia, directividad y eficiencia. La capacidad de la estructura fractal para controlar y manipular las propiedades electromagnéticas permite optimizar el comportamiento de la antena de las frecuencias seleccionadas dentro de la banda C [36].
- La autosimilitud inherente del triángulo de Sierpiński puede reducir la susceptibilidad de la antena a las interferencias externas, aumenta la calidad de la señal y la robustez del sistema de comunicación, beneficioso en entornos de alta densidad de señales.

3.3 Cálculos para Realizar la Antena

Para realizar el modelo del triángulo de Sierpiński, se basa en una serie de fórmulas para su proceso de creación. Para calcular la altura máxima por iteraciones, se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$h_{m\acute{a}x} = k \cdot \frac{c}{f_n} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \delta^n$$

Ecuación 14. Altura máxima por iteraciones [4]

Dónde:

k = es una constante, esta depende del tipo de sustrato que se utilizará (1.5 mm)

c = velocidad de la luz $3 \cdot 10^8 m/s$

f_n = frecuencia de resonancia 1 GHz

θ = Siendo un triángulo equilátero el ángulo es de 60°

δ = factor de operación 2

n = número de iteración, se comienza con la primera que es la 1

Para obtener la iteración base, se reemplaza en la fórmula:

$$h_{m\acute{a}x} = 0.15 \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^9} \cdot \cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right) \cdot 2^1$$

$$h_{m\acute{a}x} = 0.077942 \text{ m} = \mathbf{77.942 \text{ mm}}$$

Primera iteraci3n:

$$h_1 = \frac{h_{m\acute{a}x}}{2}$$

$$h_1 = \frac{77.942}{2} = \mathbf{38.971 \text{ mm}}$$

Ecuaci3n 15. Para las dem\as iteraciones

Segunda iteraci3n:

$$h_2 = \frac{h_1}{2}$$

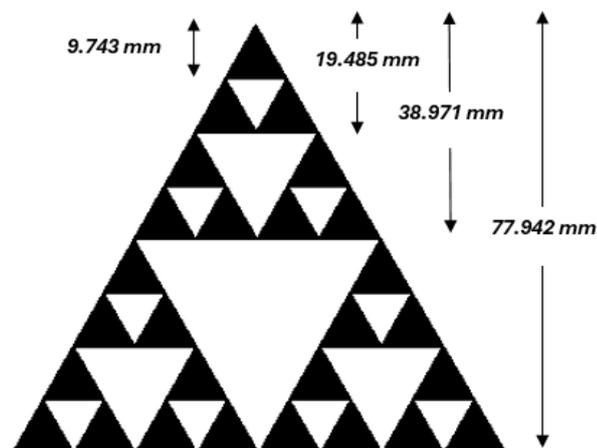
$$h_2 = \frac{38.971}{2} = \mathbf{19.485 \text{ mm}}$$

Tercera iteraci3n:

$$h_3 = \frac{h_2}{2}$$

$$h_3 = \frac{19.485}{2} = \mathbf{9.743 \text{ mm}}$$

El dise\o quedar\a de la siguiente manera:



Ilustraci3n 14. Medidas de las iteraciones del tri\ngulo de Sierpiński

3.3.1 Línea de Microcinta

La línea de alimentación de microcinta se extiende desde el borde del sustrato y se conecta directamente al parche, el cual tiene una geometría fractal. Esta tira metálica, ubicada sobre el sustrato, guía la energía de manera eficiente hacia el parche, facilitando la transferencia de la señal.

Este tipo de línea de alimentación es fácil de fabricar e integrar en circuitos impresos, ofreciendo un buen acoplamiento de la señal al parche. Está diseñada para tener una impedancia característica, generalmente de 50 ohmios, que debe coincidir con la del parche para asegurar la correcta transferencia de energía. Su simplicidad y eficacia hacen que sea utilizada en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas. Es una opción llamativa para diseños que requieren un equilibrio entre facilidad y fabricación y buen rendimiento eléctrico óptimo [43].

La línea de transmisión comparte las mismas características eléctricas del parche, estos dos elementos se unen para asegurar que la antena funcione correctamente. Para lograr un diseño bien acoplado, se utilizan las siguientes especificaciones técnicas:

- Constante dieléctrica (ϵ_r): 4.3
- Impedancia caracteriza (Z_0): 50 ohmios

Estas especificaciones permiten diseñar una línea de microcinta que se ajuste correctamente a las propiedades del parche. Asegurando el correcto desempeño del sistema en su conjunto.

Línea de Alimentación	
Descripción	Medidas
Grosor del conductor	1,5 mm
Ancho del conductor	4,5 mm
Largo del conductor	9 mm

Tabla 5. Medidas de la línea de Alimentación

3.4 Como realizar las Iteraciones del triángulo de Sierpiński

Para este proyecto, se han realizado tres iteraciones en el triángulo de Sierpiński, el desarrollo se detalla a continuación:

Se comienza creando un triángulo equilátero, llamándolo *iteración base*. Este triángulo se rota 180° , como se muestra en la ilustración 15 del literal a. Desde este punto se avanza realizando un segundo triángulo que vale exactamente la mitad de la base, se lo coloca en la mitad sin rotarlo, y se lo extrae, quedando tres triángulos enteros unidos entre sí, como se muestra en el literal b de la ilustración, a este se le llama la *primera iteración*.

Para realizar la *segunda iteración*, se realizan tres triángulos que valen la cuarta parte del primer triángulo, colocándolos en la mitad de los tres triángulos enteros y se los extrae, quedando así nueve triángulos enteros unidos entre sí, ver el literal c de la ilustración 15.

Se realizan nueve triángulos que equivalen a la octava parte del triángulo base, se los posiciona de igual manera en la mitad de los nueve triángulos enteros, se los extrae y nos quedan un total de 27 triángulos pequeños, unidos entre sí, a esto se le llama *tercera iteración*, ver literal d de la ilustración.

Concluidas las tres iteraciones, se ha completado la geometría del triángulo de Sierpiński, mostrando su autosemejanza en su forma. Se pueden realizar más iteraciones, siguiendo el mismo proceso anterior mencionado, hasta llegar a la complejidad del diseño que se desea.

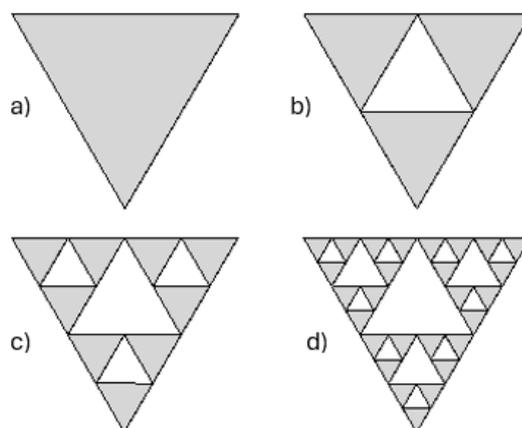


Ilustración 15. a) Iteración base, b) primera iteración, c) segunda iteración, d) tercera iteración

4 Proceso de Diseño y Simulación de la Antena Fractal

Con los valores y el diseño establecidos, se llevan a cabo para cada iteración del triángulo, considerando todos los elementos que componen la antena. En esta

etapa, se realizarán simulaciones para las cuatro iteraciones observando el comportamiento de la antena en cada una de ellas.

Es importante mencionar que, durante este proceso, ninguna de las iteraciones ha sido optimizada, lo que permite analizar y comparar los distintos parámetros y características que resultan de cada iteración de la antena.

Tras finalizar la tercera iteración, se realizarán mejoras en el diseño de la antena, con la finalidad de modificar el diseño para que la antena opere de forma eficaz en las frecuencias requeridas. Esto se realiza para establecer el diseño adecuado para distintos usos en la banda C. La estructura de la antena se compone de los siguientes elementos: el sustrato, el conductor, el parche y la tierra, estos últimos 3 elementos comparten las mismas características (cobre), ver ilustración 16.

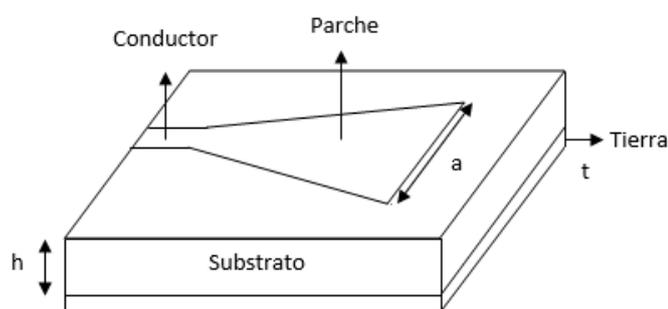


Ilustración 16. Estructura de la Antena Fractal

4.1 Diseño de la Antena (Iteración base)

Para iniciar las simulaciones de cada iteración, es necesario comenzar con la creación de la antena. El proceso comienza con el diseño del sustrato FR-4, seguido de la colocación de la capa tierra. Esta capa, compuesta de cobre, se coloca sobre una de las caras del sustrato y tiene las mismas medidas que el sustrato, solo que es más fina (0.035 mm). Las especificaciones detalladas de los materiales se presentarán en el apartado correspondiente a “Elecciones de los Materiales”.



Ilustración 17. Vista frontal y lateral del sustrato, mostrando el plano tierra

En la otra cara del sustrato, se coloca la línea de alimentación. A continuación, se diseña el primer triángulo con un valor de A , el cual se posiciona sobre la línea de alimentación. Estos dos elementos se unen para formar la iteración base, como se muestra en la ilustración 18, esto corresponde a la base del triángulo de Sierpiński. Las dimensiones de cada componente se detallan en la tabla 6.

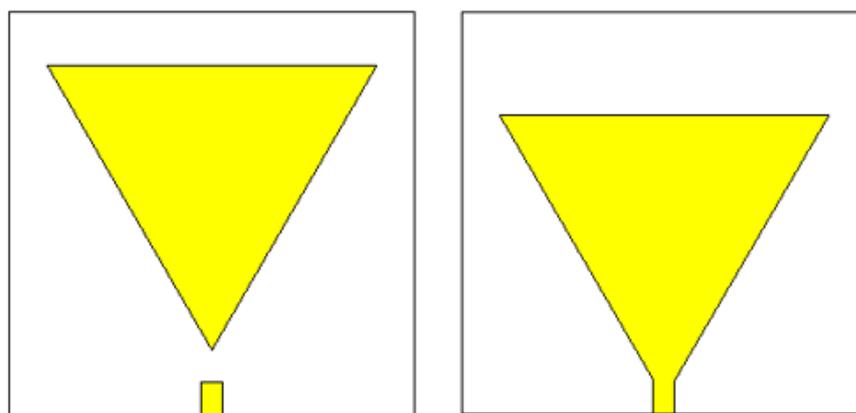


Ilustración 18. Unión del conductor con la iteración base sobre el sustrato

Variable	Valor (mm)	Descripción
T	0.035	Grosor Patch
H	1.5	Grosor Sustrato
AS	96	Ancho Sustrato
LS	96	Largo Sustrato
A	45	Medida del Patch
AC	5	Ancho Conductor
LC	8	Largo Conductor

Tabla 6. Valores de las variables de cada componente de la antena

En la tabla 6, se describen las medidas de los componentes de la antena. Para comenzar con las simulaciones, se debe colocar un puerto en el centro del ancho del sustrato, esto hace de la línea de alimentación de la antena. Este puerto permite realizar las medidas, para valorar el desempeño de la antena en cada simulación de cada iteración.

– Simulación de la iteración base

Para las simulaciones, se escogió un rango de frecuencia de 2 a 6 GHz, ya que cubren las frecuencias de interés. En la etapa inicial, los datos del parámetro S11 revelan tres picos sobresalientes como se observa en la ilustración 19. El primero en la frecuencia de 3.3 GHz, con un S11 de -17.887 dB, lo que señala una buena respuesta de adaptación. El segundo máximo se produce en 4.4 GHz, con un S11 de -17.632 dB, mientras que el tercero, en 5.7 GHz, llega a un S11 de -28.819 dB, lo cual indica una eficiencia superior en adaptabilidad de impedancia.

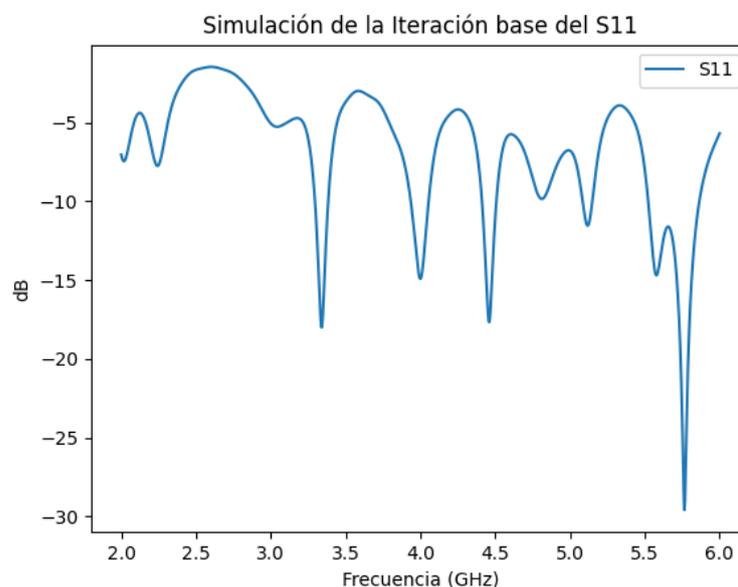


Ilustración 19. Resultado de la simulación de la iteración base para el parámetro S11

En cuanto al VSWR, los resultados para las frecuencias de 3.3 GHz, 4.4 GHz y 5.7 GHz son de 1.32, 1.32 y 1.09 respectivamente, indicando un rendimiento aceptable para las primeras dos frecuencias y un excelente nivel de adaptación para la tercera.

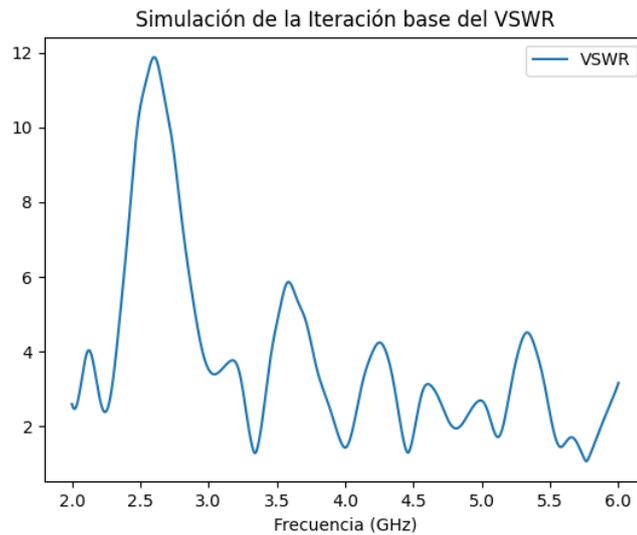


Ilustración 20. Resultado de la simulación de la iteración base para el parámetro VSWR

4.2 Primera Iteración

Se comienza con un triángulo equilátero que servirá de base, le damos un valor de A , luego se crea otro que será la mitad del primer triángulo con valor de $A/2$. Esta segunda figura se coloca en la mitad de la primera figura y se extrae, quedando tres triángulos enteros de las mismas dimensiones formando el triángulo base como se muestra en la ilustración 21. Con este procedimiento se inicia la construcción del modelo fractal del triángulo de Sierpiński.

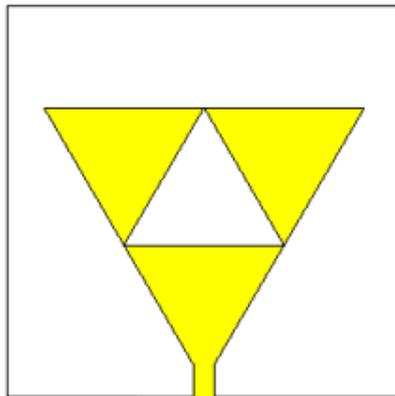


Ilustración 21. Simulación de la primera iteración

– Simulación de la primera iteración

Los resultados del S_{11} para la primera iteración, en la ilustración 22 muestra dos frecuencias pronunciadas: en 2.5 GHz es de -10.652 dB y a 4 GHz es de -13.146

dB. A diferencia de la primera simulación, solo se notan 2 frecuencias pronunciadas en este rango, debido a que se modificó la forma aumentando una iteración, en la frecuencia de 4 GHz existe mejor adaptabilidad teniendo mínimas pérdidas de señal.

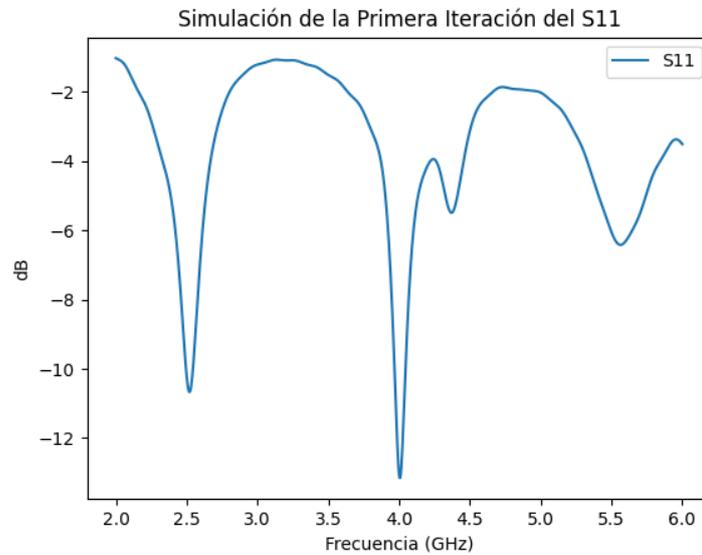


Ilustración 22. Resultado de la simulación de la primera iteración para el parámetro S11

Para los resultados del VSWR, en ambas frecuencias son: a 3.5 GHz es de 1.89 y en 4 GHz es de 1.63, estos valores están muy por encima de 1, por ende, existe menor eficiencia del sistema en esta iteración.

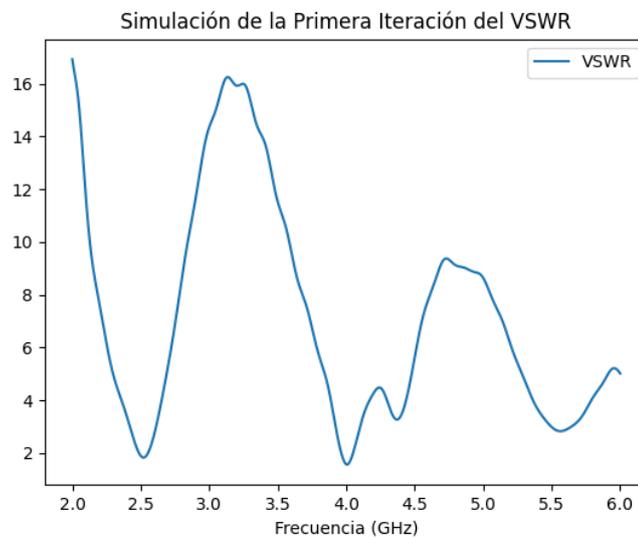


Ilustración 23. Resultado de la simulación de la primera iteración para el parámetro VSWR

4.3 Segunda Iteración

En la segunda iteración, se crean tres triángulos más pequeños, cada uno con tamaño equivalente a $A/2$. Estos triángulos se colocan en el centro de los 3 triángulos completos que quedaron después de la primera iteración. Al sustraer estos triángulos, se obtiene una nueva figura con mayor complejidad, que sigue el patrón fractal del triángulo de Sierpiński. La forma resultante es una estructura más detallada y refinada como se muestra en la ilustración 24.

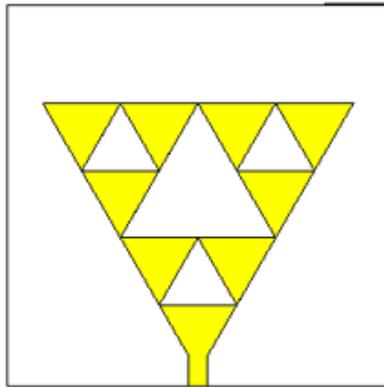


Ilustración 24. Creación y simulación de la segunda iteración

– Simulación de la segunda iteración

Durante la segunda etapa, se siguen mostrando tres picos, en respuesta del S_{11} , ver ilustración 25. Se tiene un S_{11} de -17.977 dB en la frecuencia de 2 GHz, indicando una adaptación adecuada en la zona más baja del espectro. Para los otros dos picos en 4.8 GHz (-9.349 dB) y 5.1 GHz (-8.353 dB) evidencian pérdidas en el sistema en relación con la frecuencia de 2 GHz que tiene menores pérdidas en esta iteración.

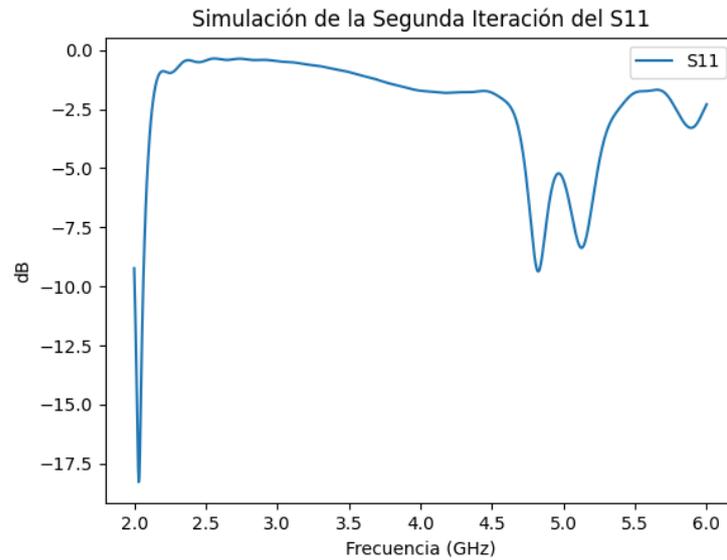


Ilustración 25. Resultado de la simulación de la segunda iteración para el parámetro S11

El VSWR en esta segunda fase indica un valor de 1.4 en 2 GHz, con mayor eficiencia y en las frecuencias de 4.8 y 5.1 GHz, los valores son de 2.1 y 2.3 respectivamente, indicando menor eficiencia en el sistema.

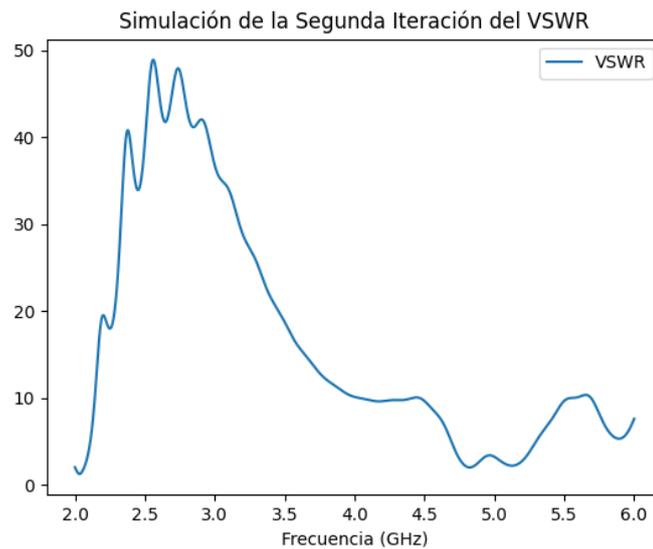


Ilustración 26. Resultado de la simulación de la segunda iteración para el parámetro VSWR

4.4 Tercera Iteración

Para la tercera y última iteración, se generan nueve triángulos, cada uno con tamaño de $A/8$. Estos triángulos se colocan en el centro de los nueve triángulos equiláteros que permanecieron intactos tras la segunda iteración. Al sustraerlos, se completa la última fase de la geometría fractal, dando lugar a una figura formada

por un total de 27 triángulos equiláteros, como se muestra en la ilustración 27. Esta configuración final del triángulo de Sierpiński presenta una simetría armoniosa, que caracteriza a esta figura fractal. Aunque es posible continuar con más iteraciones, para este diseño específico solo se han realizado tres iteraciones.

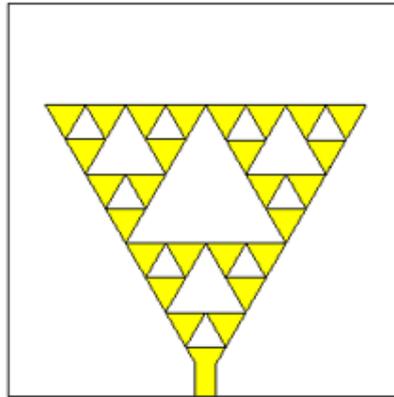


Ilustración 27. Creación y simulación de la tercera y última iteración

– Simulación de la tercera iteración

Para esta última iteración, hay dos frecuencias pronunciadas, los resultados del S11 son: en 4.2 GHz es de -13.964 dB y en 4.5 GHz es de -14.943 dB. Siendo ambos valores menores de -10 dB, existe mejor adaptación y mínimas pérdidas de señal, siendo éstas dos frecuencias más cercanas en la banda C, como objetivo del diseño final.

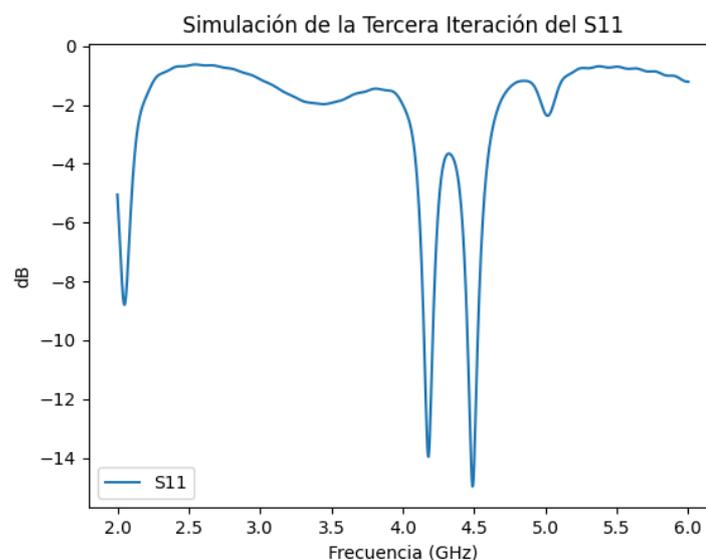


Ilustración 28. Resultado de la simulación de la tercera iteración para el parámetro S11

En cuanto al VSWR, los valores obtenidos son de 1.6 para la frecuencia de 4.2 GHz y 1.5 para la de 4.5 GHz, lo que demuestra una adaptación aceptable. Esta iteración completa el proceso de simulación, y a partir de aquí se procederá a optimizar la antena modificando componentes para obtener las frecuencias deseadas de 4.5 GHz y 4.8 GHz, Con parámetros adecuados para garantizar su correcto funcionamiento en la banda C.

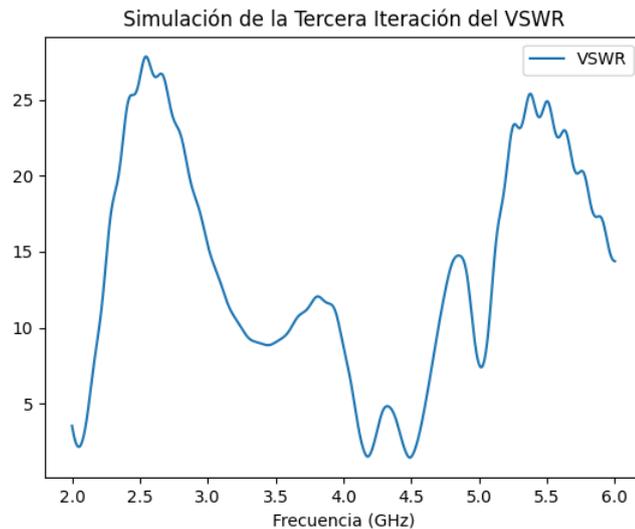


Ilustración 29. Resultado de la simulación de la tercera iteración para el parámetro VSWR

4.5 Simulación de la Antena Fractal Optimizada

Al finalizar con las simulaciones hasta la última etapa, se lleva a cabo la optimización del diseño para llegar a las frecuencias de interés (4.5 y 4.8 GHz), permitiendo que la antena funcione en doble banda en la banda C. El propósito de esta optimización es modificar las frecuencias operativas y mejorar los parámetros S11 y VSWR, con el fin de asegurar apropiadamente su rendimiento.

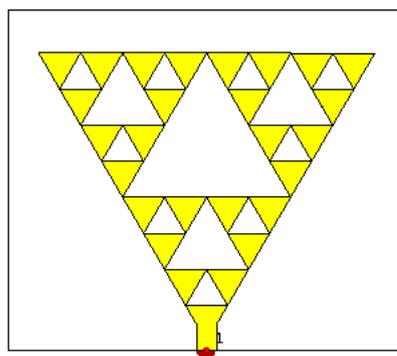


Ilustración 30. Antena optimizada

Algunos elementos se han modificado, tales como la ancho y largo del sustrato, el conductor y la forma de fractal, según se especifica en la tabla 7. Estas modificaciones han facilitado conseguir la antena mejorada con los resultados previstos, alcanzando los requisitos de adaptabilidad y eficacia para el buen funcionamiento en la banda C.

Variable	Valor (mm)	Descripción
T	0.035	Grosor Patch
H	1.5	Grosor Sustrato
AS	90	Ancho Sustrato
LS	78	Largo Sustrato
A	44	Medida del Patch
AC	4.5	Ancho Conductor
LC	8	Largo Conductor

Tabla 7. Valores de las variables de cada componente de la antena optimizada

4.5.1 Pruebas de Simulación del Parámetro S11 y VSWR

Se llevaron a cabo las simulaciones para evaluar el parámetro S11, que determina la cantidad de señal que refleja la antena.

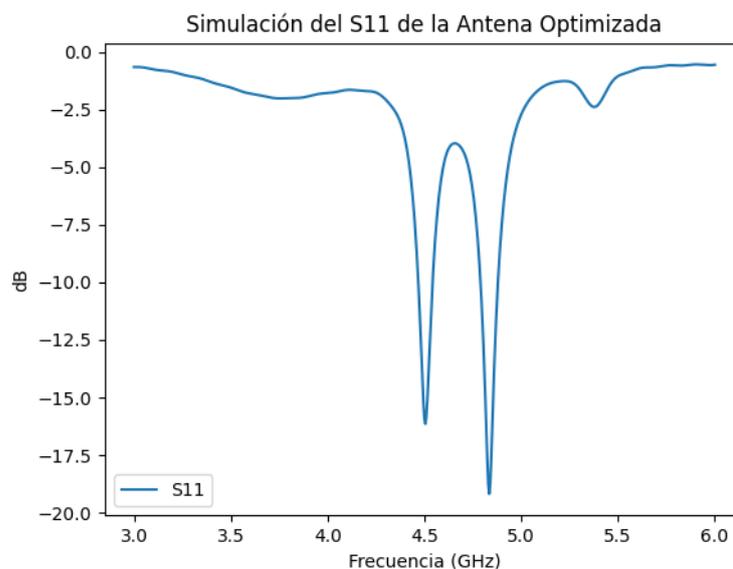


Ilustración 31. Resultado de la simulación del parámetro S11 de la antena optimizada

En la ilustración 31, para la frecuencia de 4.5 GHz el S11 fue de -16.141 dB, para la segunda frecuencia de 4.8 GHz el S11 fue de -19.181 dB, estas valoraciones

señalan una adecuada adaptación de la antena para las dos frecuencias dado que los valores del S11 se encuentran por debajo de -10 dB, indicando que hay reflexión mínima de la información.

Los resultados del VSWR en las frecuencias de 4.5 GHz es de 1.321 y en 4.8 GHz con un VSWR de 1.211, ver ilustración 32, son muy buenos, ya que están cerca de 1, ideales para aplicaciones en telecomunicaciones. Los valores normalmente deben ser menores de 2 para reducir las pérdidas de retorno, asegurando buena transmisión de información.

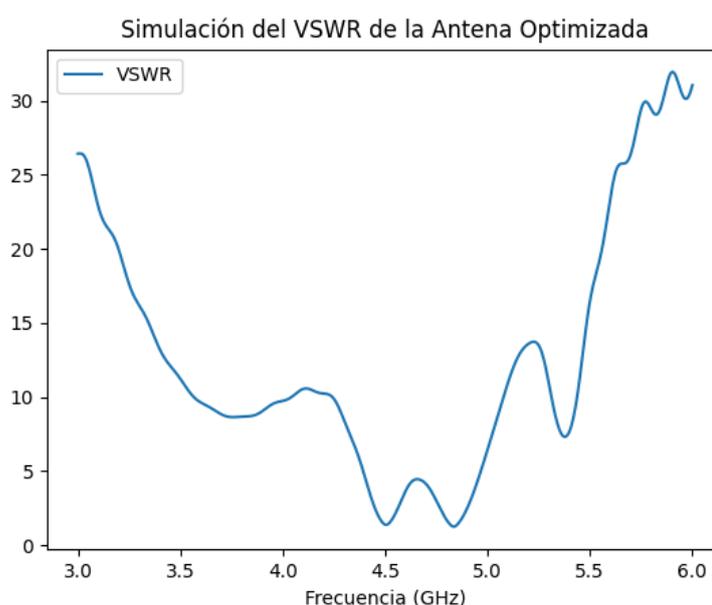


Ilustración 32. Resultado de la simulación del parámetro VSWR de la antena optimizada

Ambos resultados son óptimos, se refleja poquísima energía a la fuente y la mayor parte de energía es transmitida efectivamente. Esta antena tiene buen rendimiento en las dos frecuencias operativas, aumentando la eficiencia del sistema.

Los resultados obtenidos para ambos parámetros, S11 y VSWR, sugieren que la antena está bien adaptada para operar en las frecuencias de 4.5 GHz y 4.8 GHz, cumpliendo los requisitos de rendimiento óptimo en la banda C.

4.5.2 Ganancia

La ganancia en una antena representa la capacidad, para concentrar la energía electromagnética en una dirección específica. Una mayor ganancia indica que la

antena es más eficiente en enfocar la energía, lo que resulta en una señal más fuerte en la dirección deseada y una mejor cobertura en esa área [20].

Durante la simulación se ha analizado los valores de la ganancia de la antena dual band, en las dos frecuencias de operación: 4.5 GHz y 4.8 GHz. A continuación, el análisis de los parámetros para ambas frecuencias.

– Simulación de la ganancia a 4.5 GHz

El resultado de la simulación para la frecuencia de 4.5 GHz, se puede observar en el diagrama polar de la ilustración 33, esta muestra la ganancia máxima en la dirección principal que es de 1.08 dB, lo cual indica una baja ganancia en la dirección deseada. La anchura de 41.2° muestra que el haz de radiación principal es relativamente amplio, y los lóbulos laterales a -7.3 dB también indican que hay una presencia de radiación secundaria, pero en niveles mucho menores al lóbulo principal.

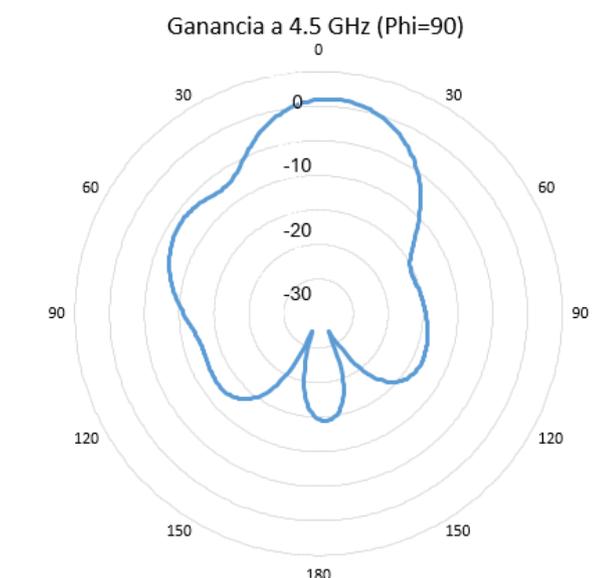


Ilustración 33. Diagrama polar de ganancia a 4.5 GHz

Frecuencia 4.5 GHz	
Ganancia del lóbulo principal	1.08 dBi
Dirección del lóbulo principal	4.0°
Ancho angular (a -3 dB)	41.2°
Nivel de lóbulos laterales	-7.3 dB

Tabla 8. Resultados de la simulación de ganancia a 4.5 GHz

– Simulación de la ganancia a 4.8 GHz

El resultado de la simulación en la frecuencia de 4.8 GHz, se observa en el diagrama polar de la ilustración 34, muestra que la ganancia del lóbulo principal es mucho mayor, de 2.23 dBi, esto significa que hay una mejor distribución de la energía en esa frecuencia. El haz principal apunta más a 43°, y el ancho angular es de 43.5°, esta apertura es parecida a la de 4.5 GHz. Sin embargo, las protuberancias laterales están en -2.2 dB, indicando que la radiación se está dispersando en otras direcciones en relación con la frecuencia de 4.5 GHz.

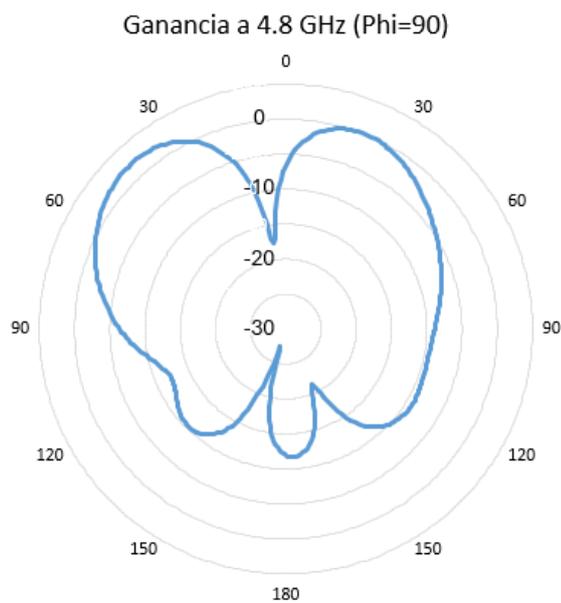


Ilustración 34. Diagrama polar de ganancia a 4.8 GHz

Frecuencia a 4.8 GHz	
Ganancia del lóbulo principal	2.23 dBi
Dirección del lóbulo principal	43.0°
Ancho angular (a -3 dB)	43.5°
Nivel de lóbulos laterales	-2.2 dB

Tabla 9. Resultados de la simulación de ganancia a 4.8 GHz

– Análisis de los resultados

El rendimiento de la antena en la frecuencia de 4.8 GHz es superior en ganancia, con valores aceptables y se podría usar aplicaciones donde se necesita señal intensa en esa frecuencia. En 4.5 GHz, la directividad es mucho mejor, podía ser

útil para lugares donde la señal es dirigida en un solo punto sin interferencia a los lados. Estas características evidencian el potencial que la antena tiene para aplicaciones duales en banda C, adaptándose a diferentes requisitos de cobertura y eficiencia en cada frecuencia.

4.6 Fabricación de la Antena Fractal

4.6.1 Elección de los Materiales

4.6.1.1 Sustrato

Se ha utilizado el sustrato FR-4, un material comúnmente empleado en la fabricación de placas PCB (Printed Circuit Board), gracias a su disponibilidad, bajo costo y adecuadas propiedades dieléctricas para diversas aplicaciones. Entre las características del sustrato FR-4, se destacan en la permitividad dieléctrica (ϵ_r), el factor de disipación ($\tan\delta$), el espesor del sustrato (h), la permeabilidad magnética (μ) y la conductividad eléctrica. Aunque el FR-4 es un dieléctrico, presenta una conductividad eléctrica finita debido a la presencia de materiales conductores en su composición [44].

Sustrato	
Material	FR-4
ϵ_r	4.3
$\tan\delta$	0.025
h	1.5 mm
μ	1 (no magnético)

Tabla 10. Especificaciones del sustrato

Son los valores del sustrato y con estos se puede construir la antena física.

4.6.1.2 Patch y Plano Tierra

El material utilizado para el parche es cobre, un tipo de cobre que ha sido tratado térmicamente para mejorar su flexibilidad y maleabilidad. Este material presenta características que lo hacen adecuado para aplicaciones en radiofrecuencia y microondas. Su permeabilidad magnética es muy cercana a la del vacío ($\mu = 1$). El cobre es un material paramagnético con contribución magnética. Además, cuenta con excelente conductividad eléctrica, lo que explica su uso en antenas, a

diferencia de los materiales dieléctricos, los conductores como el cobre no presentan pérdidas dieléctricas significativas, por lo que generalmente no se especifica un valor de $\tan\delta$ para el cobre en simulaciones electromagnéticas [20].

4.6.1.3 Conectores SMA

Los conectores SMA (SubMiniature version A) son un tipo de conector coaxial utilizado en aplicaciones de alta frecuencia, especialmente en dispositivos de telecomunicaciones, microondas, equipos RF (radiofrecuencia) y antenas [45].

Estos conectores están diseñados para operar a frecuencias de hasta 18 GHz, aunque algunos modelos especializados pueden alcanzar frecuencias más altas, llegando a 26.5 GHz o más. Con una impedancia estándar de 50 ohmios, son aptos para la transmisión de señales de alta frecuencia, minimizando las pérdidas. Cuentan con un sistema de conexión roscada que asegura un acoplamiento firme y seguro, útil en entornos con vibraciones o movimientos, donde un conector de presión podría desconectarse fácilmente [46].

Existen versiones hembra y macho, ver ilustración 35, se distinguen por la forma de sus extremos y cómo se acoplan entre sí.



Ilustración 35. Conectores SMA [47]

- **Conector SMA Macho:** Normalmente, los conectores macho se encuentran en los extremos de cables coaxiales que se conectan a los puertos hembra y en dispositivos.
- **Conector SMA Hembra:** Generalmente, los conectores hembra se encuentran en equipos o dispositivos como antenas o módulos, que

necesitan recibir la señal desde un cable coaxial que tenga un conector macho [48].

Algunas de las aplicaciones de los conectores SMA:

- **Antenas:** En sistemas de RF y microondas, como la antena fractal de esta investigación, el conector SMA es importante para conectar el sistema de transmisión/recepción de señales de alta frecuencia.
- **Equipos de laboratorio:** Los conectores SMA se usan para acoplar equipos de prueba y medición de RF.
- **Comunicación inalámbrica:** Es común encontrar estos conectores en routers, módulos Wi-Fi, y dispositivos de comunicación por microondas [45].

En este caso, se utilizará un conector SMA hembra en la antena fractal para poder conectarla fácilmente a un transmisor/receptor a través de un cable con conector SMA macho, facilitando la realización de pruebas y la transmisión de señales en la banda de frecuencias deseada.

4.6.2 Proceso de Fabricación

Tras completar el diseño y la optimización, asegurando que la antena opere en las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz, se pasa a la construcción de la antena parche doble banda con geometría fractal. Los materiales que se utilizaron para su creación son:

- Baquelita PCB con doble capa de cobre
- Spray negro
- Ácido férrico
- Diluyente
- Lija fina
- Cautín
- Conector SMA hembra

En la ilustración 36 se observan la figura fractal del triángulo y la del sustrato en un archivo DXF (Drawing Interchange Format) extraído del software de simulación electromagnética. Este archivo se abrirá en AutoCAD, mostrando el

diseño de la antena con geometría fractal. El archivo DXF contiene las dimensiones reales de la antena, esto facilita su preparación para la impresión en formato físico.

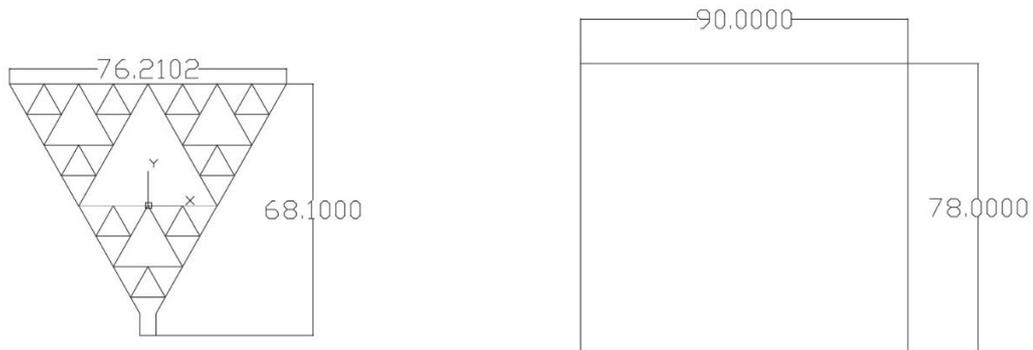


Ilustración 36. Archivo DXF abierto en AutoCAD que muestra el diseño de la antena

Con ayuda de AutoCad, se unen las dos imágenes del diseño: el sustrato y el triángulo fractal. Se cambia el color del triángulo, tal como se observa en la ilustración 37, para facilitar la impresión posteriormente.

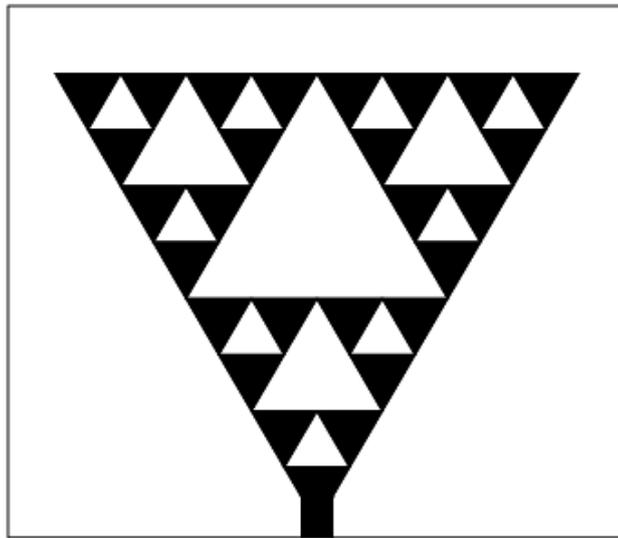


Ilustración 37. Imagen en AutoCAD del diseño de la antena fractal, para la impresión en baquelita

Una vez preparado el diseño para impresión, se procede a recortar la baquelita de acuerdo con las medidas obtenidas durante la simulación, que en este caso es de 9 x 7.8 cm. Sin embargo, se deja un margen de 1 cm para facilitar la manipulación, ajustando a las dimensiones exactas después de la impresión.



Ilustración 38. Baquelita PCB con doble capa de cobre

Se debe lijar de manera suave la superficie de la baquelita para quitar impurezas, después se aplica de spray color negro a la placa, ver ilustración 39. Este procedimiento garantiza la correcta adhesión de la impresión a la superficie, se deja que la pintura se seque antes de avanzar al paso siguiente.

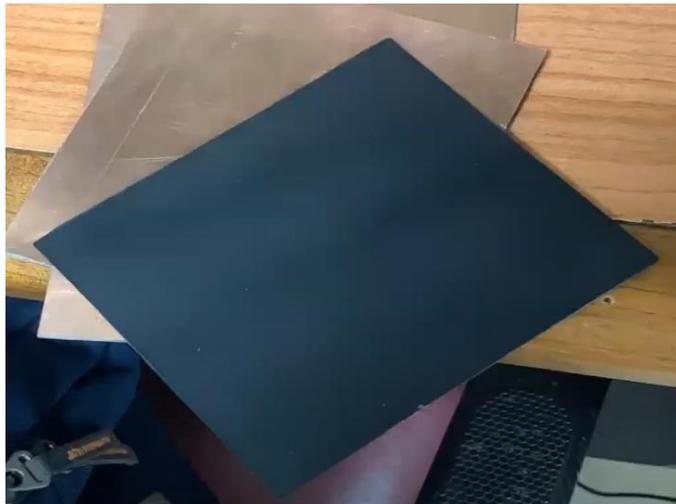


Ilustración 39. Baquelita pintada con spray color negro

Una vez que la pintura se haya secado, se puede imprimir el prototipo en la baquelita mediante un láser, ver ilustración 40. Este procedimiento dura cerca de 4 horas, dado que el láser efectúa cortes exactos, marcando con gran precisión cada borde de cada triángulo.

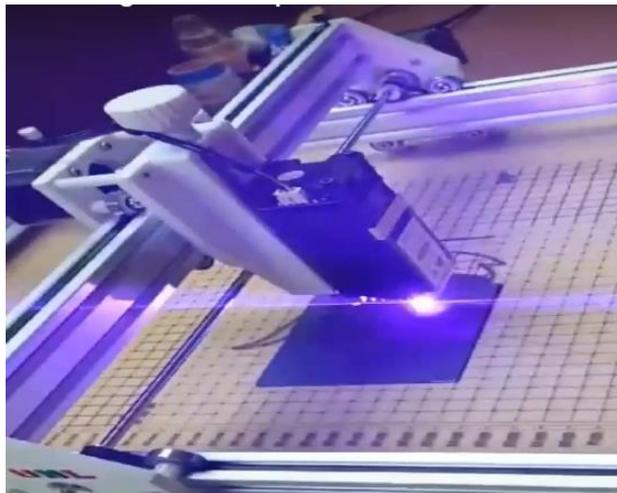


Ilustración 40. Proceso de impresión en la baquelita con láser

Concluida la impresión, se realiza la limpieza de la baquelita con ácido férrico, lo que permite eliminar el cobre en exceso, ver ilustración 41. Este procedimiento debe prolongarse por unos minutos para garantizar una limpieza correcta.



Ilustración 41. Limpieza de la baquelita en ácido férrico

Posteriormente, se utiliza diluyente para retirar la pintura negra de la figura fractal impresa, revelando el cobre limpio debajo, como se muestra en la ilustración 42.

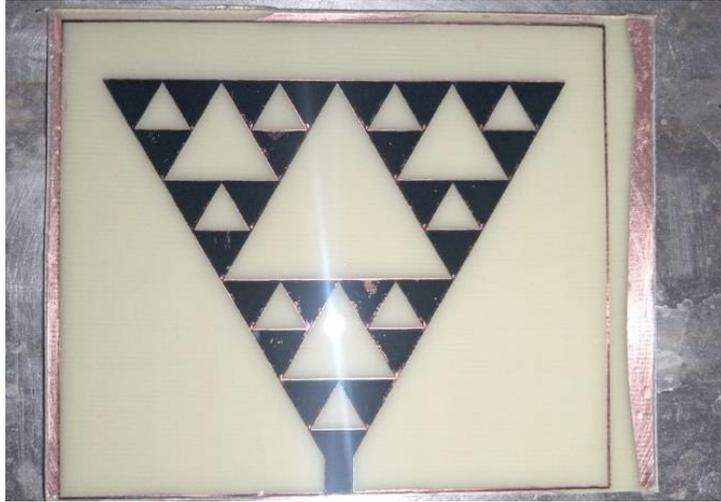


Ilustración 42. Limpieza de la baquelita con diluyente para remover la capa de pintura

Finalmente, se cortan los excesos para ajustar las medidas exactas de la antena, y con ayuda de un cautín, se suelda el conector SMA hembra, como se observa en la ilustración 43, permitiendo así la conexión con un conector SMA macho para la realización de pruebas.

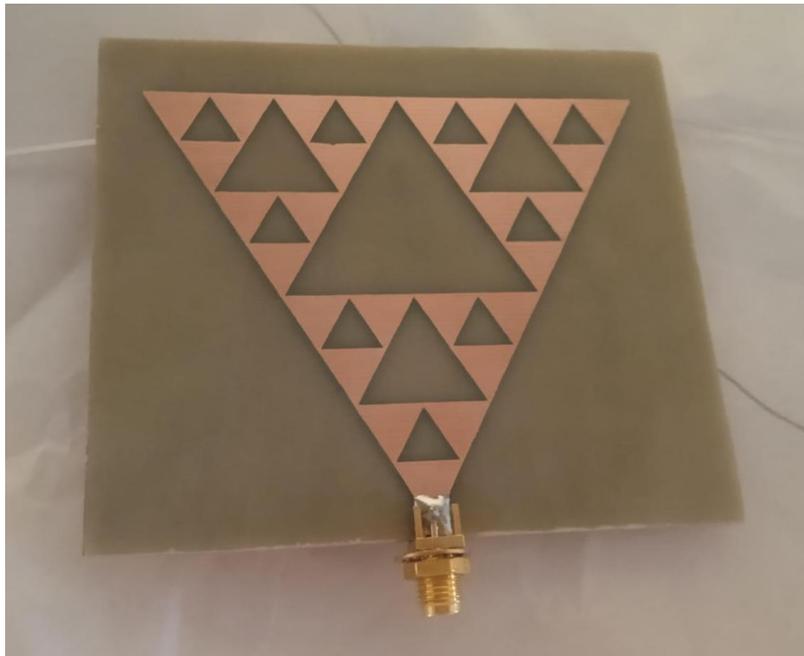


Ilustración 43. Antena fractal finalizada, con el conector SMA soldado para conexión

CAPÍTULO IV

5 Resultados y Análisis

5.1 Equipo para Utilizar para las Medidas

El Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer es un analizador de microondas portátil con una capacidad de frecuencia máxima de 26.5 GHz. Es una herramienta versátil utilizada para el análisis de señales de microondas [49].

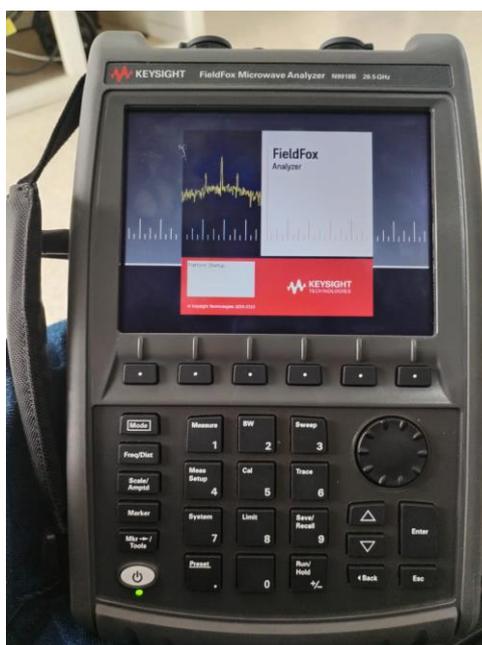


Ilustración 44. Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer en el laboratorio de Telecomunicaciones de la UPSE, utilizado para realizar mediciones en el contexto de la investigación

A continuación, se presenta una tabla con sus especificaciones:

Especificaciones del Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer	
Rango de frecuencia	30 KHz a 26.5 GHz
Potencia de salida	Hasta 1 dBm
Ruido de traza	0.004 dB rms
Rango de amplitud	100 dB
Precisión de amplitud	± 0.5 dB en todo el rango de Temperatura de -10 a +55°C
Opciones adicionales	Análisis de espectro, análisis vectorial de señales y más.

Tabla II. Especificaciones del equipo Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer [50]

5.1.1 Usos Principales

- **Análisis de espectro:** Permite medir y analizar el espectro de frecuencias de señales de microondas, identificando interferencias y verificando la calidad de las señales.
- **Pruebas de antenas:** Utilizado para medir el rendimiento de antenas, incluyendo los parámetros S y parámetros como VSWR.
- **Mantenimiento y reparación:** Ideal para técnicos de campo que necesitan diagnosticar y reparar equipos de telecomunicaciones y redes inalámbricas.
- **Análisis vectorial de señales:** Permite realizar análisis de señales moduladas incluyendo la medición de parámetros como la magnitud y fase [49].

5.1.2 Aplicaciones Comunes

- **Telecomunicaciones:** verificación y mantenimiento de redes celulares y de microondas.
- **Defensa y Aeroespacial:** Pruebas de sistema de radar y comunicaciones militares.
- **Investigación y Desarrollo:** utilizado en laboratorios para el desarrollo y prueba de nuevos dispositivos y tecnologías de microondas.
- **Industria Electrónica:** pruebas de componentes y sistemas electrónicos que operan en el rango de microondas [51].

5.1.3 Características Adicionales

- **Portabilidad:** Su diseño compacto y robusto lo hace ideal para uso en campo.
- **Interfaz intuitiva:** Pantalla y menús fáciles de navegar.
- **Conectividad:** Opciones de conectividad para transferir datos y actualizar el software del dispositivo.

Este equipo es una herramienta importante para profesionales que trabajan con tecnologías de microondas y necesitan una herramienta confiable y precisa para sus mediciones y análisis.

5.1.4 Configuración Inicial del Equipo

Para comenzar las mediciones, encendemos el equipo Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer y conectamos el cable al puerto “port 1”, que corresponde a uno de los puertos de entrada del equipo. Luego se debe realizar una calibración simple, para poder hacer uso del cable de medición y medir el parámetro S11 que es uno de los objetivos. Realizados estos pasos, se puede conectar la antena al otro lado del cable con el conector SMA, ver ilustración 45, se configura el rango de frecuencia, seleccionando *Start* en 3 GHz y *Stop* en 6 GHz para abarcar el espectro deseado, así en la pantalla del equipo de medición se puedan revelar las dos frecuencias: 4.5 GHz y 4.8 GHz.

Una vez conectada la antena al equipo mediante el cable coaxial, se pueden observar dos picos en la pantalla que corresponden a las frecuencias de trabajo. Esto indica que el equipo ha detectado correctamente ambas frecuencias y que está funcionando adecuadamente para la medición.



Ilustración 45. Antena conectada al equipo mediante el cable coaxial

Se elige el modo de operación para observar los parámetros, en este caso, se selecciona el modo NA (Network Analyzer) para medir el parámetro S11 y el modo CAT (Cable and Antenna Test) para medir el parámetro VSWR.

5.2 Resultado del Parámetro S11

Tras efectuar la configuración inicial del equipo Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer, confirmamos que las frecuencias de funcionamiento de la antena sean: 4.5 y 4.8 GHz. Para este parámetro se usa el modo NA, y colocamos la opción *S11* para medir este parámetro.

En la medición inicial, situamos un marcador en la frecuencia de 4.5 GHz, logrando un valor de -24.40 dB, como se muestra en la ilustración 46. Esta valoración señala que la antena posee muy buena adaptación de impedancia en esta frecuencia, dado que el valor se aproxima a los valores ideales de mínimo reflejo (-10 dB), lo que implica que gran parte de la señal se transmite correctamente con pocas pérdidas de reflexión.

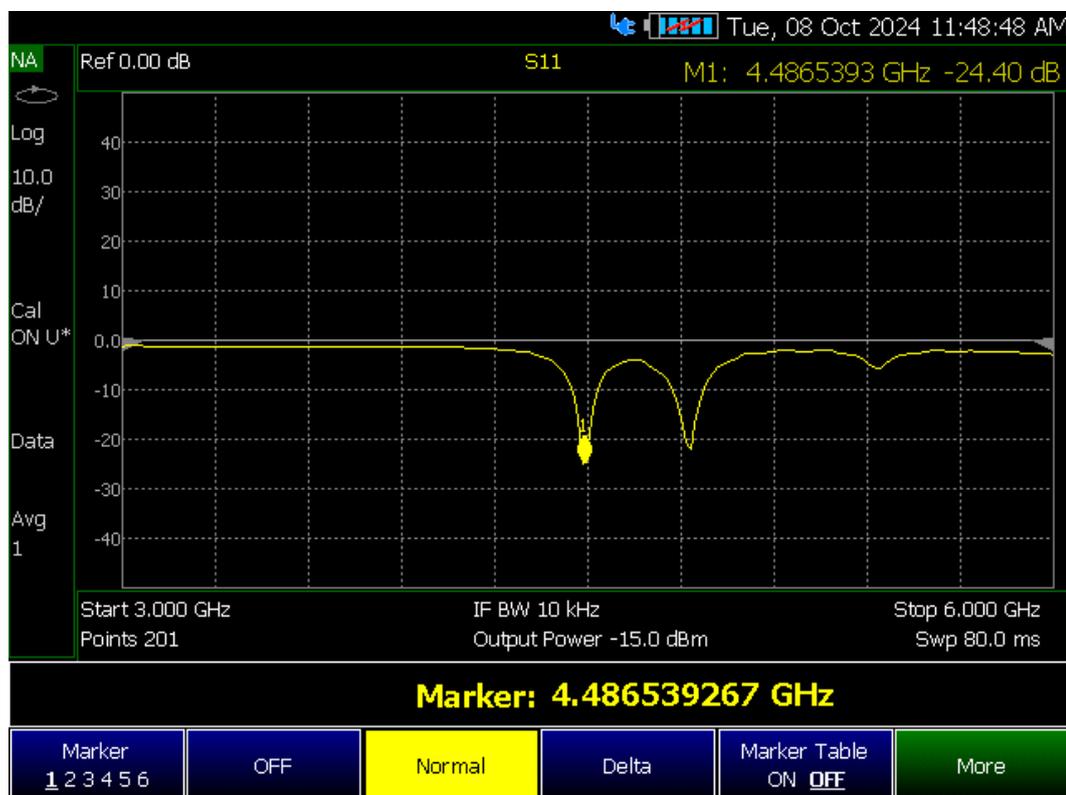


Ilustración 46. Medición en el equipo del parámetro S11 para la frecuencia de 4.5 GHz

En la frecuencia de 4.8 GHz, se ajusta el marcador, para medir el valor del S11 en esta frecuencia que es de -21.65 dB, ver ilustración 47. Este valor, como en la primera medición señala una muy buena adaptación, con escasas pérdidas de

retorno. Estas valoraciones inferiores a -10 dB señalan un rendimiento óptimo, garantizando que la antena transmite correctamente en la banda C.

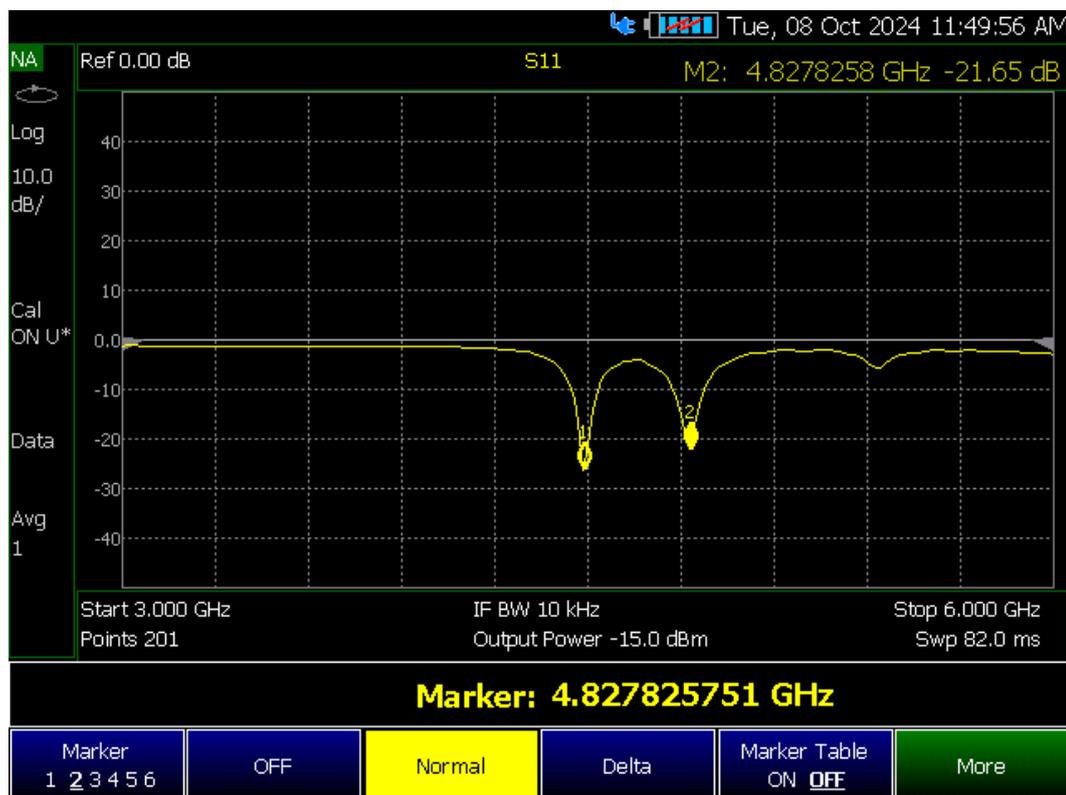


Ilustración 47. Medición en el equipo del parámetro S11 para la frecuencia de 4.8 GHz

5.3 Resultado del Parámetro VSWR

Se ajusta el equipo en modo CAT, para medir el VSWR. Este parámetro es importante para determinar el nivel de adaptación de la antena al sistema, el VSWR debe estar lo más cerca de 1, significando transferencia eficaz señal.

Situamos el marcador en la frecuencia de 4.5 GHz, para la primera evaluación, consiguiendo el valor de 1.107, ver ilustración 48. Este valor se aproxima a 1, indicando que la antena está ajustada adecuadamente y son pocas las pérdidas por reflexión, corroborando alta eficiencia de radiación.



Ilustración 48. Medición en el equipo del VSWR para la frecuencia de 4.5 GHz

Para la segunda medición, ajustamos el marker a la frecuencia de 4.8 GHz, donde el valor de VSWR es de 1.236, como se puede observar en la ilustración 49. Aunque este valor es ligeramente mayor que el de 4.48 GHz, sigue siendo muy bueno. Un valor de VSWR inferior a 1.5 indica que la antena está bien adaptada, con poca pérdida de potencia por reflexiones, esto confirma que la antena es eficiente en esta frecuencia también.



Ilustración 49. Medición en el equipo del VSWR para la frecuencia de 4.8 GHz

5.4 Comparación entre la Antena Simulada y la Implementada

Una vez obtenidos los valores de los parámetros S11 y VSWR tanto para la simulación como de la antena implementada, se procede a comparar a través de ilustraciones y tablas que organizan los resultados obtenidos en ambas pruebas. Se exportaron los datos del software de simulación electromagnética y los datos del equipo Keysight N9918A FieldFox, en el formato CSV (Comma-Separated Values), este formato ayuda a mostrar las coordenadas de los datos extraídos. Mediante el programa Python se podrán graficar y enseñar los resultados para compararlos y mostrar el margen de error de cada respuesta. En las tablas también se indicarán los valores numéricos para un mejor análisis.

Las gráficas y las tablas nos expondrán los resultados de ambas mediciones y así determinar el margen de error entre la simulación y la implementación, en las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz.

5.4.1 Resultados del S11 (dB) en las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz

El parámetro S11 representa el nivel de reflexión de la señal en la antena, donde valores más negativos indican una mejor adaptación de impedancia y menor pérdidas por reflexión.

En la ilustración 50, se muestra el parámetro S11 para las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz, esta gráfica combina los resultados simulados y los medidos permitiendo una comparación entre ambos. Al observar las curvas, se nota que los valores obtenidos en la simulación y en el equipo real presentan un comportamiento muy similar en ambas bandas, lo cual valida el diseño de la antena en términos de adaptación de impedancia.

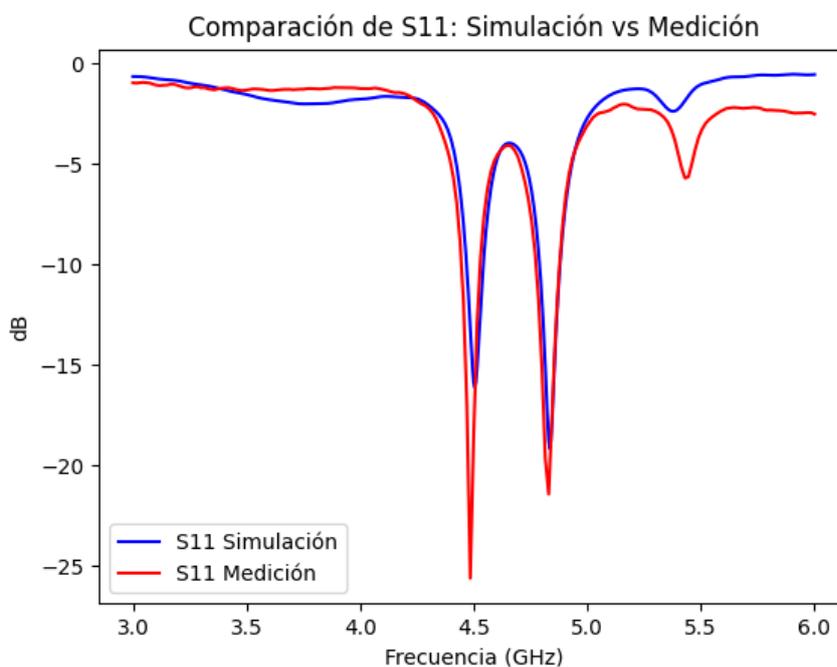


Ilustración 50. Comparativa de los gráficos del parámetro S11 de la simulación y de la medición con equipo

En la siguiente tabla se presentan los valores de los resultados obtenidos de la simulación y del equipo de medición.

Frecuencia	Antena Simulada	Antena Implementada
4.5 GHz	-16.141 dB	-24.40 dB
4.8 GHz	-19.181 dB	-21.65 dB

Tabla 12. Valores del S11 de la antena simulada e implementada con sus observaciones

Para la frecuencia de 4.5 GHz, la antena implementada muestra mejor adaptación de impedancia en comparación con la antena simulada. Esto puede ser resultado de variaciones en los materiales o en las características físicas de la antena real no consideradas en la simulación.

En cambio, en la frecuencia de 4.8 GHz, la diferencia entre los valores simulados e implementados es menor, lo que sugiere una mayor precisión de la simulación en esta banda. La antena implementada mantiene un rendimiento ligeramente superior.

5.4.2 Resultados del VSWR en las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz

El parámetro VSWR indica la eficiencia en la transmisión de potencia a la antena. Un valor de VSWR cercano a 1 es ideal, ya que indica menores pérdidas a comparación con los valores más altos que representan mayores pérdidas.

En la ilustración 51 compara el parámetro VSWR en las mismas frecuencias. Esta gráfica refleja la relación entre la simulación y los datos reales para el VSWR, donde muestra la eficiencia de la transmisión de potencia de la antena en ambas bandas. Las gráficas muestran similitud de los resultados y demuestran que el diseño dual band se ha implementado con éxito, manteniendo un rendimiento consistente tanto en el modelo simulador como en la antena física.

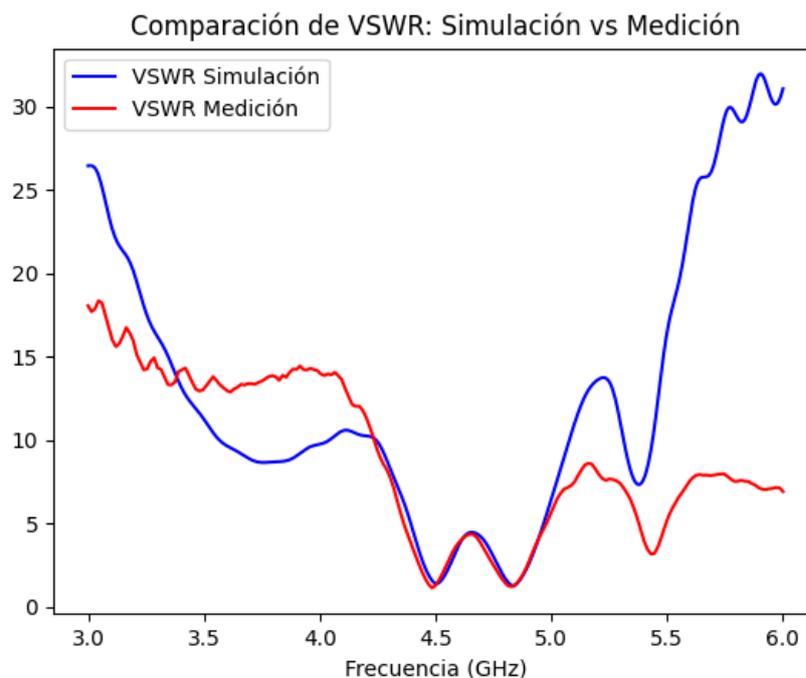


Ilustración 51. Comparativa de los gráficos del parámetro VSWR de la simulación y de la medición con equipo

Asimismo, la tabla 13 muestra los valores obtenidos sea de la simulación de la antena, como los valores del equipo de medición de la antena implementada.

Frecuencia	Antena Simulada (VSWR)	Antena Implementada (VSWR)
4.5 GHz	1.321	1.107
4.8 GHz	1.211	1.236

Tabla 13. Valores del VSWR de la antena simulada e implementada con sus observaciones

Para los resultados del VSWR en la frecuencia de 4.5 GHz, la antena física indica mejor eficiencia y menores pérdidas por reflexión en trasladar potencia, en la simulación para esa frecuencia, el resultado es aceptable, un poco menos eficiente que la antena real.

En cambio, en la frecuencia de 4.8 GHz, los valores de la simulación como de la antena física son similares, sugiriendo que la simulación puede anticipar de forma casi exacta el desempeño de la antena real a esta frecuencia.

6 Conclusiones

Se cumplió con el objetivo de diseñar una antena con geometría fractal, basada en el triángulo de Sierpiński. La elección de esta geometría fue sustentada mediante revisión de la literatura sobre antenas fractales y sus ventajas en aplicaciones de frecuencia dual. Se realizaron los cálculos necesarios para realizar las iteraciones, ajustar el tamaño y optimizar en software especializado en simulación electromagnética. Esto consintió crear una base apta para que la antena pueda funcionar en la banda C.

Se realizaron simulaciones para valorar que la antena funcione en cada iteración hasta conseguir que trabaje correctamente en las frecuencias de 4.5 y 4.8 GHz, mejorando el diseño, de elementos que componen la antena, hasta optimizar los parámetros como el S11 y VSWR, para que la antena muestre resultados ideales en adaptación y eficiencia en las dos frecuencias, para usos en la banda C.

Validando los resultados de las simulaciones, se fabricó la antena mediante el diseño virtual, extrayendo el formato en medidas reales, esto para garantizar que exista un margen de error mínimo al momento de la implementación. También, se utilizaron los materiales de acuerdo con las especificaciones del diseño en la simulación, para obtener una antena física.

Por último, se realizaron pruebas con el equipo Keysight N9918A FieldFox Microwave Analyzer para valorar el desempeño de la antena, comparando los resultados de los parámetros S11 y VSWR que se obtuvieron tanto de la simulación como de la implementación de la antena. Esto permitió determinar su desempeño, en la frecuencia de 4.5 GHz, mostró mejor adaptación de impedancia, en 4.8 GHz los valores en ambas versiones fueron muy similares, indicando un mínimo margen de error, exponiendo coherencia entre simulación e implementación. La antena física, superó los resultados de la antena simulada, esto gracias al diseño del modelo y a los materiales utilizados, permitiendo que tenga una óptima funcionalidad en usos en la banda C.

7 Recomendaciones

Se propone a los estudiantes, hacer uso de diferentes figuras con geometría fractal, para crear antenas multibanda. Se pueden tomar en cuenta algunas formas como, la curva de Koch o la alfombra de Sierpiński, con el fin de evaluar el comportamiento de las distintas geometrías fractales, para evidenciar y comparar los resultados de eficiencia en diferentes frecuencias y usos en aplicaciones multibanda.

Se recomienda adquirir las licencias oficiales de los simuladores electromagnéticos, como Ansys HFSS o CST Studio Suite, ya que estas herramientas son importantes para garantizar precisión en los diseños y simulaciones. Contar con licencias oficiales evitará posibles inconvenientes legales con las empresas licenciadoras, también permitirá acceder a soporte técnico y actualizaciones del software, asegurando un entorno de trabajo profesional.

Se sugiere establecer un laboratorio de radiofrecuencia y antenas específico para realizar prácticas experimentales en estas áreas. Este espacio debería estar equipado con analizadores de redes, generadores de señal, una cámara anecoica y otros instrumentos necesarios para medir parámetros como S11, VSWR y patrones de radiación. Además, este laboratorio fomentaría el aprendizaje práctico, facilitaría la investigación en tecnologías emergentes y promovería el desarrollo de proyectos en el campo de las telecomunicaciones.

8 Bibliografía

- [1] Á. F. T. Cruz, «Investigación y Análisis Electromagnético de Estructuras de Antenas fractales de Banda Ancha,» Centro de Investigación Científica y de Educación Superior Ensenada, Baja California, Mexico, 2018.
- [2] M. S. N. G. A. P. M. C. K. A. a. K. V. V. P. Sarin, «An Electromagnetically Coupled Dual-Band Dual-Polarized Microstrip Antenna for WLAN applications,» *Microwave and Optical Technology Letters*, Vols. %1 de %2Vol, 50, No. 7, nº pp-1867-1870, July 2014.
- [3] J. C. I. L. Mario Patricio Herrera Holguín, «Estudio y Metodología de Diseño de Antenas Utilizando Geometría Fractal,» Escuela Politécnica Nacional , Quito, octubre 2018.
- [4] E. R. L. Tulillo, «Diseño y Evaluación de Base de Simulación de una Antena Fractal-Triángulo de Sierpinski en la Banda UHF,» Escuela Politécnica Nacional - Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, octubre 2019.
- [5] H. L. A. Benyamin, «Antena Dipolo Fractal,» Google Patents, 2016. [En línea]. Available: <https://patents.google.com/patent/ES2313606T3/es>.
- [6] E. ATL, «Telecomunicaciones,» ¿Cuántos tipos de antenas de radiofrecuencia existen?, febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.atleuropa.es/tipos-de-antenas-de-radiofrecuencia/>.
- [7] L. c. P. A. Santiago Dujmovic Lantén, «Diseño, Implementación y Caracterización de una Antena Basada en Geometría Fractal,» Universidad de Cauca, Popayán, mayo 2017.
- [8] G. PORTERSA, «Tipos de antenas más comunes y cómo funcionan,» Madrid, 2023. [En línea]. Available: <https://www.portersa.com/tipos-de-antenas/>.

- [9] ONULEC, «Tipos de antenas, características y funcionamiento,» España, 2018. [En línea]. Available: <https://www.onulec.com/tipos-de-antenas-caracteristicas-y-funcionamiento/>.
- [10] I. H. Martínez, «Parámetros Fundamentales en Antenas,» Universidad Nacional Experimental Politécnica, noviembre 2018.
- [11] Z. Peterson, «Parámetro S11 vs Pérdida de retorno vs Coeficiente de reflexión,» ALTIUM, noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://resources.altium.com/es/p/s11-vs-return-loss-vs-reflection-coefficient-when-are-they-same>.
- [12] K. A. G. Jama, «Diseño y Simulación de un Proptotipo de Antena Fractal de Vicsek Tipo Parche para la Banda de 3.5 GHz,» Escuela Politécnica Nacional - Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, DMQ, abril 2022.
- [13] A. A. Luna, «Desarrollo de una GUI para la Representación 2D y 3D del Diagrama de Radiación de Antenas,» Universidad de Alicante, Escuela Politécnica Superior, julio 2017.
- [14] E. H. Limón, «Diseño de una Antena de Microcinta con Polarización Dual a 4 GHz,» Benemérita Universidad Autónoma de Puebla - Facultad de Ciencias de la Electrónica, Puebla, julio 2016.
- [15] A. M. S. Ronquillo, «Sistema de Antenas Microstrip en Bandas UHF, Mediante Modulación OFDM para la Recepción de Señales TDT,» Universidad Técnica de Ambato - Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, Ambato, 2022.
- [16] A. M. Monteluisa, «Diseño y Construcción de una Antena Fractal Monopolo Alfombra de Sierpinski para la Banda UHF,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, septiembre 2019.
- [17] B. Mandelbrot, «La Geometría Fractal de la Naturalez,» Tus Quets Editores, España, 2021.

- [18] B. Mandelbrot, «Les objets fractals. Forme, hasard et dimension,» METATEMAS - Libros para Pensar la Ciencia - koothrapali, Francia, 29 octubre 2013.
- [19] M. Barnsley, «Aprendamos Matemáticas,» <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/mrodperv/fractales/definicion-de-fractal/>, 2019.
- [20] N. G. B. Aguilar, «Diseño, Modelado y Construcción de una Antena Fractal para Recepción de Televisión Digital Terrestre en el Ecuador,» UDLA - Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas, Quito, 2018.
- [21] S. G. V. G. Francisco Alberto Sandoval Noreña, «Diseño e Implementación de Antenas Fractales para UHF,» Universidad Técnica Particular de Loja, Loja - Ecuador, 2018.
- [22] I. R. L. Hernández, «Diseño y Construcción de una Antena Fractal Multibanda para Aplicaciones de Sensor Electromagnético,» Instituto Politécnico Nacional - Secretaría de Investigación y Posgrado, Ciudad de México, 2016.
- [23] A. P. J. Anguera, «Teoría de Antenas,» Universitat Ramon Llull, Barcelona, 2018.
- [24] A. M. Lince, «Antenas fractales: Un Paso en la Evolución de las Telecomunicaciones,» Universidad de Antioquia, Medellín - Colombia, 2019.
- [25] D.-. K. D. M. A. S. P. Dr. Sudhir A. Kadam, «Design of Dual Band Microstrip Fractal Antenna,» *Mukt Shabd Journal*, n° ISSN No. 2347-3150, junio 2023.
- [26] S. Emerson, «Antena multibanda para HF, bandas de 40, 20 y 11/10 metros,» Blog de electrónica, energía, telecomunicaciones y otras artes, 06 junio 2019. [En línea]. Available: <https://eming.cl/2019/06/06/antena-multibanda-para-hf-bandas-de-40-20-y-11-10-metros/>.

- [27]S. Bill, «Utilice trampas para habilitar el funcionamiento multibanda con antenas dipolo,» *Ingeniería - Comunicación Inalámbrica - RF e Inalámbrico*, 26 mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.digikey.com.mx/es/blog/use-traps-to-enable-multiband-operation-with-dipole-antennas>.
- [28]R. P. Villar, «Antenas Multibanda,» Escuela Politécnica Superior - Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, julio 2016.
- [29]J. M. Huidobro, «Antenas de Telecomunicaciones,» *Revista Digital de ACTA*, p. 18, 2013.
- [30]Shunlongwei, «Antenas GNSS multibanda para aplicaciones de alta precisión,» Ltd de Shunlongwei, 19 junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.shunlongwei.com/es/multi-band-gnss-antennas-for-high-precision-applications/>.
- [31]M. C. Muñoz, «Estudio, Diseño y Fabricación de Antenas de Doble Banda para Automóviles,» Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, enero de 2011.
- [32]I. C. Gutiérrez, «Antenas de Parche Multifrecuencia Cargadas con Resonadores OCSR,» Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid - Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Madrid, mayo de 2014.
- [33]F. L. O. O. Andrés Hernández, «Generación de Doble Banda en Antenas de Microcinta Rectangulares Utilizando Ranuras Separadas en Secuencia de Cantor,» *Revista Chilena de Ingeniera - Instituto Tecnológico Metropolitano*, vol. Vol 28, n° 2, junio 2020.
- [34]B. Fontal, «El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones,» Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química, Venezuela, 2005.
- [35]F. Zapata, «Espectro electromagnético: características, bandas, aplicaciones,» *LIFEDER*, 13 marzo 2020. [En línea]. Available:

<https://www.lifeder.com/espectro-electromagnetico/>.

- [36] J. A. Gómez, «Diseño de un Transductor Orto-Modal para Banda C de Microondas,» Universidad Central de Venezuela - Doctoral Dissertation, Venezuela, 2009.
- [37] L. Arise, «Satellite Frequency Bands: L, S, C, X, Ku, Ka-band,» Science and Technology, Kentucky - Estados Unidos, diciembre de 2020.
- [38] R. B. G. D. P. D. Alesini, «The C-Band acceleratibg structures for SPARC photoinjector upgrade,» *Journal of Instrumentation*, vol. 8, n° 05, mayo 2013.
- [39] T. Verna, «Televisione Globale,» Gremese Editore, Roma, 2006.
- [40] H. Remmert, «¿Qué es la banda C y por qué es importante para la 5G?,» Didi International, 02 noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://es.digi.com/blog/post/what-is-c-band-and-why-is-it-important-for-5g>.
- [41] K. I. a. S. H. Ishak, «Sierpinski gasket fractal antenna with defected ground structure (DGS),» *International Conference on ICT Convergence (ICTC)*, pp. 441-446, 2012.
- [42] J. S. J. V. G. H. E. A. M. R. Iván Rosendo, «Antena Fractal de Sierpinski para Operar en las Bandas de 900 MHz y 1.8 GHz,» Tecnológico Nacional de México, México, noviembre 2016.
- [43] A. L. Jiménez, «Diseño y Desarrollo de un Array Basado en Parches Apilados para Comunicaciones Móviles,» Universidad Carlos III de Madrid, Leganés - Madrid, junio de 2012.
- [44] Z. Peterson, «Características del material FR-4 para el diseño de PCB,» ALTIUM, 23 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://resources.altium.com/es/p/fr4>.
- [45] J. A. E. J. C. Christian Tipantuña, «Desarrollo de sistemas receptores de AM, FM y ADS-B utilizando radio definida por software, hardware y software

libre,» Universidad de Cuenca, Cuenca, 2015.

- [46] J. Rodríguez, «¿Qué son los conectores SMA y qué usos tienen?,» Jt1 Electrónica, 21 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://jt1electronica.com/blog/que-son-los-conectores-sma-y-que-usos-tienen/>.
- [47] W. Electronics, «Conector SMA Macho Hembra,» [En línea]. Available: https://wolfelectronics.net/products/sma_macho_hembra.
- [48] S. M. Zafra, «Desarrollo de una Sonda Coaxial para la Medición de la Permitividad de Líquidos,» Universidad el Bosque - Facultad de Ingeniería - Programa de Ingeniería Electrónica, Bogotá - Colombia, junio 2021.
- [49] J. L. M. Ayala, «Diseño y Construcción de un Lente de Rotman en Banda Ku Utilizando Tecnología Guía Integrada en Sustrato,» ESPE - Departamento de Eléctrica y Electrónica, Sangolquí, 2017.
- [50] T. Equity, «Keysight N9918A FieldFox RF Combination Microwave Analyzer, 26.5 GHz,» KEYSIGHT, [En línea]. Available: <https://www.testequity.com/product/19687-1-N9918A>.
- [51] J. Herrera, «Diseño, Análisis e Implementación de un Acoplador de 4x4 Puertos en la Banda Ku Utilizando Tecnología SIW,» ESPE - Departamento de Eléctrica y Electrónica, Sangolquí, 2019.