

# **Diseño, implementación y caracterización de una antena basada en geometría Fractal**



**Santiago Dujmovic Llantén**  
**Laura Catalina Paz Astudillo**

Tesis de Pregado en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Director:

Jesús Mauricio Ramírez Viáfara

Magister

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Línea de Investigación Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basadas en Radio

Popayán, Mayo 2017

Santiago Dujmovic Llantén  
Laura Catalina Paz Astudillo

Diseño, implementación y caracterización de una antena  
basada en geometría fractal

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la  
Universidad del Cauca para la obtención del Título de

Ingeniero en:  
Electrónica y Telecomunicaciones

Director:  
Jesús Mauricio Ramírez Viáfara  
Popayán  
2017

# Agradecimientos

A Dios, por darnos la oportunidad de concluir esta etapa de nuestras vidas; a nuestros padres, por darnos su constante compañía y apoyo incondicional en nuestra realización como personas y profesionales.

Se agradece también a la Universidad del Cauca y los docentes por su digna labor y brindarnos su conocimiento, y de manera especial al MsC Jesús Mauricio Ramírez Viáfara por su guía y consejo en el desarrollo del trabajo de grado. También a los ingenieros MsC. Claudia Milena Hernández Bonilla y Víctor Fabián Miramá Pérez por su colaboración en el manejo de equipos, y al ingeniero Edgar Ortíz Landázuri por sus asesorías.

Y por supuesto, a todos nuestros amigos, quienes colaboraron en fases iniciales del proyecto y que estuvieron pendientes del desarrollo del mismo durante este periodo tiempo.

# Resumen Estructurado

**Antecedentes:** La geometría Euclidiana ha brindado muchos beneficios, entre ellos al área de las telecomunicaciones, con el diseño de antenas para toda aplicación radio. De igual manera, la geometría Fractal se ha ido desarrollando para dar paso a las antenas de dicha geometría.

**Objetivos:** En el presente trabajo de grado se tiene como objetivo principal el diseño y la implementación de una antena Fractal, con esto, realizar su caracterización para conocer parámetros como  $S_{11}$ , SWR, impedancia y patrón de radiación.

**Métodos:** Para el diseño de la antena se sigue la base teórica consultada, dicho diseño es llevado a una determinada herramienta de simulación y después de obtener las frecuencias deseadas, se lleva a proceso de implementación.

**Resultados:** Se diseña una antena con estructura fractal de Parany. Se obtienen los parámetros  $S_{11}$ , SWR e impedancia para cada banda de frecuencia mediante un analizador de redes vectoriales. El patrón de radiación se obtiene para cada uno de los planos, utilizando una tarjeta USRP B210 como generador de ondas sinusoidales puras.

**Conclusiones:** Dentro de las conclusiones más significativas se debe mencionar que la teoría de construcción de una antena Fractal carece de precisión, ya que no se puede tomar la antena conjunta como la unión de antenas individuales, debido a que se presentan corrimientos en las frecuencias para las cuales se diseñan inicialmente.

**Palabras clave:** geometría fractal, antena fractal, parámetro  $S_{11}$ , patrón de radiación.

# Tabla de Contenido

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b> .....	<b>xv</b>
<b>LISTA DE VARIABLES</b> .....	<b>xix</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivos generales.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Trabajos relacionados .....	2
1.4. Contribución de la Tesis .....	5
<b>Capítulo 2. Generalidades de las Antenas</b> .....	<b>7</b>
2.1. Antenas. Conceptos generales.....	7
2.1.1. Parámetros fundamentales de las antenas .....	8
2.2. Otros conceptos .....	13
2.2.1. Línea de transmisión .....	13
2.2.2. Relación de onda estacionaria (Standing Wave Ratio) .....	14
2.2.3. Adaptación o acoplamiento de una línea de transmisión .....	14
2.2.4. Carta de Smith.....	14
2.2.5. Parámetros de dispersión (S) .....	15
2.2.6. Pérdidas de retorno.....	17

2.3. Fractales .....	17
2.4. Propiedades de los fractales .....	19
2.5. Antenas Fractales .....	19
2.6. Triángulo de Parany .....	19
<b>Capítulo 3. Metodología de Diseño .....</b>	<b>21</b>
3.1. Requisitos .....	22
3.2. Análisis y Diseño .....	22
3.2.1. Elección Frecuencias de operación de algunos servicios de telecomunicaciones	22
3.2.2. Selección de la herramienta de simulación .....	24
3.2.3. Cálculos para el diseño .....	25
3.2.4. Herramienta de diseño y simulación .....	25
3.4. Pruebas.....	27
3.4.1. Equipo para la medición de antenas .....	27
4.1. Diseño y Simulación .....	31
4.3. Procedimiento implementación.....	51
4.3.1 Materiales .....	52
4.3.2. Proceso de fabricación.....	52
<b>Capítulo 5. Resultados y Análisis .....</b>	<b>55</b>
5.1. Parámetro $S_{11}$ .....	55
5.2. Parámetro SWR .....	61
5.3. Impedancia.....	66
5.4. Patrón de radiación .....	73
5.5. Ganancia.....	80
5.7 Directividad .....	81
<b>Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>87</b>



## Lista de Figuras

Figura 2.1. Patrones de radiación (a) en coordenadas polares lineales, (b) en coordenadas polares logarítmicas.....	9
Figura 2.2 Círculos ortogonales en la Carta de Smith.....	15
Figura 2.3 Red de dos puertos.....	16
Figura 2.4 Fractales lineales. (a) Curva de Gosper, (b) Curva de Koch, (c) Fractal de Vicsek, (d) Triángulo de Sierpinski.....	18
Figura 2.5 Fractales no lineales.....	18
Figura 2.6 Relación entre geometrías de Parany (izquierda) y Sierpinski (derecha).....	20
Figura 3.1 Adaptación de metodología RUP.....	21
Figura 3.2 Interfaz de Software CST Microwave Studio.....	26
Figura 3.3 Interfaz de software LibreCAD con diseño de antena fractal.....	26
Figura 3.4 Analizador de redes vectoriales.....	28
Figura 3.5 USRP B210.....	28
Figura 3.6 Antena monopolo VERT900.....	29
Figura 3.7 Antena monopolo VERT2450.....	29
Figura 4.1 Material utilizado para la estructura de la antena y el plano tierra.....	32
Figura 4.2 Material utilizado para dieléctrico.....	32
Figura 4.3 Diseño de la antena de tres iteraciones con $\delta$ variable.....	33
Figura 4.4 Curva del parámetro $S_{11}$ para la antena de tres iteraciones con $\delta$ variable.....	34
Figura 4.5 Diseño de la antena de tres iteraciones con $\delta$ igual a 2.....	35
Figura 4.6 Parámetro $S_{11}$ de antena de tres iteraciones con $\delta$ igual a 2.....	35

Figura 4.7 Curva del parámetro $S_{11}$ para el triángulo con altura de 105,28 mm. ....	37
Figura 4.8 Curva del parámetro $S_{11}$ para el triángulo con altura de 37,4230 mm. ....	37
Figura 4.9 Curva del parámetro $S_{11}$ para el triángulo con altura de 7,8933 mm. ....	37
Figura 4.10 Curva del parámetro $S_{11}$ para el triángulo con altura de 20,4120 mm. ....	38
Figura 4.11 Diseño de antena con altura de 20,412 mm.....	39
Figura 4.12 Curva del parámetro $S_{11}$ para el triángulo con altura de 114,7483 mm. ....	40
Figura 4.13 Curva del parámetro $S_{11}$ para el triángulo con altura de 142.6239 mm. ....	41
Figura 4.14 Diseño de antena de 3 iteraciones.....	42
Figura 4.15 Curva del parámetro $S_{11}$ para la antena de tres iteraciones.....	42
Figura 4.16 Curva del parámetro $S_{11}$ con una separación de 5,3 mm.....	43
Figura 4.17 Curva del parámetro $S_{11}$ para la antena de tres iteraciones con altura de segunda iteración de 30 mm. ....	45
Figura 4.18 Curva del parámetro $S_{11}$ para la antena de tres iteraciones con altura de segunda iteración de 148 mm. ....	46
Figura 4.19 Curva del parámetro $S_{11}$ para la antena de tres iteraciones con altura de tercera iteración de 24 mm.....	47
Figura 4.20 Diseño de antena de 3 iteraciones.....	47
Figura 4.21 Diseño de antena de 3 iteraciones (Versión Final).....	49
Figura 4.22 Gráfica de parámetro $S_{11}$ para diseño de antena de 3 iteraciones.....	49
Figura 4.23 Patrón de radiación en 3D para la frecuencia de 1,7432 GHz. ....	50
Figura 4.24 Patrón de radiación en 3D para la frecuencia de 2,4372 GHz. ....	51
Figura 4.25 Patrón de radiación en 3D para la frecuencia de 5,777 GHz. ....	51
Figura 4.26 Parche de la antena terminado. ....	52
Figura 4.27 Construcción final de la antena con soporte. ....	53
Figura 5.1 Gráfica de parámetros $S_{11}$ obtenidas del analizador de redes. ....	56
Figura 5.2 Curva de simulación del parámetro $S_{11}$ para banda de 1,7325 GHz.....	56
Figura 5.3 Curva experimental del parámetro $S_{11}$ para banda de 1,7325 GHz. ....	57
Figura 5.4 Curva de simulación del parámetro $S_{11}$ para banda de 2,437 GHz.....	58
Figura 5.5 Curva experimental del parámetro $S_{11}$ para banda de 2,437 GHz. ....	58

Figura 5.6 Curva de simulación del parámetro $S_{11}$ para banda de 4 GHz. ....	59
Figura 5.7 Curva experimental del parámetro $S_{11}$ para banda de 4 GHz. ....	59
Figura 5.8 Curva de simulación del parámetro $S_{11}$ para banda de 5,777 GHz.....	60
Figura 5.9 Curva experimental del parámetro $S_{11}$ para banda de 5,777 GHz.....	60
Figura 5.10 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 1,7325 GHz. ....	61
Figura 5.11 Curva experimental del parámetro SWR para banda de 1,7325 GHz. ....	62
Figura 5.12 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 2,437 GHz. ....	63
Figura 5.13 Curva experimental del parámetro SWR para banda de 2,437 GHz. ....	63
Figura 5.14 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 4 GHz. ....	64
Figura 5.15 Curva experimental del parámetro SWR para banda de 4 GHz.....	64
Figura 5.16 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 5,8 GHz. ....	65
Figura 5.17 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 5,777 GHz. ....	66
Figura 5.18 Curva de magnitud de la impedancia arrojada por CST Microstudio.....	67
Figura 5.19 Curva de magnitud de la impedancia arrojada por el analizador de redes vectoriales. ....	67
Figura 5.20 Impedancia de simulación en la banda de 1,7325 GHz. ....	68
Figura 5.21 Impedancia experimental en la banda de 1,7325 GHz.....	69
Figura 5.22 Impedancia de simulación para la banda de 2,437 GHz. ....	69
Figura 5.23 Impedancia experimental para la banda de 2,437 GHz. ....	70
Figura 5.24 Impedancia de simulación para la banda de 4 GHz. ....	70
Figura 5.25 Impedancia experimental para la banda de 4 GHz. ....	71
Figura 5.26 Impedancia de simulación para la banda de 5,777 GHz. ....	71
Figura 5.27 Impedancia experimental para la banda de 5,777 GHz. ....	72
Figura 5.28 Patrón de radiación en el plano $\theta$ para la banda de 1,7325 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental.....	74
Figura 5.29 Patrón de radiación en el plano $\phi$ para la banda de 1,7325 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental.....	75

Figura 5.30 Patrón de radiación en el plano $\theta$ para la banda de 2.437 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental. ....	76
Figura 5.31 Patrón de radiación en el plano $\phi$ para la banda de 2.437 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental. ....	77
Figura 5.32 Patrón de radiación de simulación para la banda de 4 GHz. (a) Plano $\theta$ . (b) Plano $\phi$ . ....	78
Figura 5.33 Patrón de radiación en el plano $\theta$ para la banda de 5,777 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental. ....	79
Figura 5.34 Patrón de radiación en el plano $\phi$ para la banda de 5,777 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental. ....	80

## Lista de Tablas

Tabla 3.1 Frecuencias de corte para la banda 4 LTE en la frecuencia de 1,7325 GHz. ....	23
Tabla 3.2 Canales de Wi-Fi según la FCC. ....	23
Tabla 3.3 Frecuencias de WiFi en la banda IMS. ....	24
Tabla 3.4 Frecuencias de operación de servicios seleccionados. ....	24
Tabla 4.1 Resultados de alturas para $\delta$ variable. ....	31
Tabla 4.2 Características de material dieléctrico. ....	32
Tabla 4.3 Anchos de banda para el diseño con $\delta$ variable. ....	34
Tabla 4.4 Alturas correspondientes a cada iteración con $\delta$ igual a 2. ....	35
Tabla 4.5 Resultado de antena de tres iteraciones con $\delta$ igual a 2. ....	36
Tabla 4.6 Frecuencias de operación de acuerdo a cada altura. ....	38
Tabla 4.7 Frecuencia central según la altura de cada triángulo para la banda de 5,777 GHz. ....	39
Tabla 4.8 Frecuencias obtenidas según la altura de cada triángulo para la banda de 2,416 GHz. ....	40
Tabla 4.9 Frecuencia central según la altura de cada triángulo para la banda de 1,7325 GHz. ....	41
Tabla 4.10 Parámetros de antenas con alturas individuales. ....	41
Tabla 4.11 Parámetros de diseño de antena inicial con 3 iteraciones. ....	43

Tabla 4.12 Bandas de operación al variar la separación de los planos.....	<b>44</b>
Tabla 4.13 Frecuencias resultantes para variación de segunda altura. ....	<b>45</b>
Tabla 4.14 Frecuencias resultantes para variación de segunda iteración.....	<b>46</b>
Tabla 4.15 Frecuencias resultantes para variación de la tercera iteración.....	<b>47</b>
Tabla 4.16 Frecuencias para el diseño de antena con 3 iteraciones.....	<b>48</b>
Tabla 4.17 Comparación de frecuencias objetivo y de simulación.....	<b>48</b>
Tabla 4.18 Parámetros de diseño de antena con 3 iteraciones (Versión Final). ....	<b>50</b>
Tabla 5.1 Parámetros medidos de la antena implementada. ....	<b>55</b>
Tabla 5.2 Comparación de resultados de parámetros $S_{11}$ de la banda 1,7325 GHz. ....	<b>57</b>
Tabla 5.3 Comparación de resultados de parámetros $S_{11}$ de la banda 2,437 GHz. ....	<b>58</b>
Tabla 5.4 Comparación de resultados de parámetros $S_{11}$ de la banda 4 GHz. ....	<b>59</b>
Tabla 5.5 Comparación de resultados de parámetros $S_{11}$ de la banda 5,777 GHz. ....	<b>61</b>
Tabla 5.6 Valores de simulación y experimentación de SWR para la banda de 1,7325 GHz. ....	<b>62</b>
Tabla 5.7 Valores de simulación y experimentación de SWR para la banda de 2,437 GHz. ....	<b>63</b>
Tabla 5.8 Valores de simulación y experimentación de SWR para la banda de 4 GHz. ....	<b>65</b>
Tabla 5.9 Valores de simulación y experimentación de SWR para la banda de 5,777 GHz. ....	<b>66</b>
Tabla 5.10 Impedancias obtenidas en simulación y experimentalmente.....	<b>72</b>
Tabla 5.11 Parámetros de patrón de radiación para banda de 1,7325 GHz en el plano $\theta$ . ....	<b>75</b>
Tabla 5.12 Parámetros de patrón de radiación para banda de 1,7325 GHz en el plano $\phi$ . ....	<b>76</b>

Tabla 5.13 Parámetros de patrón de radiación para banda de 2.437 GHz en el plano $\theta$ . .....	<b>76</b>
Tabla 5.14 Parámetros de patrón de radiación para banda de 2.437 GHz en el plano $\phi$ . .....	<b>77</b>
Tabla 5.15 Parámetros del patrón de radiación para banda de 4 GHz. ....	<b>78</b>
Tabla 5.16 Parámetros de patrón de radiación para banda de 5.8 GHz en el plano $\theta$ . .....	<b>79</b>
Tabla 5.17 Parámetros de patrón de radiación para banda de 5,777 GHz en el plano $\phi$ . .....	<b>80</b>
Tabla 5.18 Ganancias de la antena en simulación y experimentación. ....	<b>81</b>
Tabla 5.19 Valores de directividad de la antena.....	<b>81</b>



## Lista de Acrónimos

3D	Tercera Dimensión, Third Dimension
3G	Tercera Generación, Theird Generation
5G	Quinta Generación, Fifth Generation
AWS	Servicios Inalámbricos Avanzados, Advanced Wireless Services
BWFN	Ancho del Haz entre Primeros Nulos, Beam Width First Nulls
BWHP	Ancho del Nulo entre Puntos de Potencia Mitad, Beam Width Half Power
CAD	Diseño Asistido por computadora, Computer Aided Design
CNC	Control Numérico Computarizado, Computer Numeric Control
CST	Tecnología de simulación computacional Computing Simulation Technology
DL	Enlace de bajada, Downlink
FCC	Comisión Federal de Comunicaciones, Federal Communications Comission
FEM	Método de Elementos Finitos, Finite Element Method
FM	Frecuencia Modulada, Frecuency Modulation
FR-4	Material utilizado en el diseño de la antena.
FTBR	Relación Adelante-Atrás, Front to Back Ratio
HF	Alta Frecuencia, High Frecuency
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Institute of Electrical, and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LAN	Red de Área Local, Local Area Network
LTE	Evolución de Largo Término, Long Term Evolution
MLFMM	Método Multipolar Rápido de Varios Niveles, Multi-Level Fast Multipole Method
MoM	Método de Momentos, Moments Methods
RUP	Proceso Racional Unificado , Rational Unified Process
SMA	Subminiatura versión A, SubMiniature version A
SBR	Método de Disparo y Rebote, Shooting and Bouncing Ray
SLL	Nivel de Lóbulo Lateral Máximo, Side Lobe Level
SWR	Relación de Onda Estacionaria, Standing Wave Ratio

Tx/Rx	Tranmisión/Recepción
UL	Enlace de subida, Uplink
USRP	Universal Software Radio Peripheral
Wi-Fi	Wireless Fidelity

## Lista de Variables

$\theta$	Co-latitud del sistema
$\phi$	Azimuth del sistema
$\vec{E}$	Vector campo eléctrico
$r$	Distancia entre la antena y el punto donde se mide el campo eléctrico
$F_n(\theta, \phi)$	Patrón de radiación normalizado
$S_n(\theta, \phi)$	Patrón de potencia
$E_\theta$	Componentes del campo de radiación en las direcciones $\theta$
$E_\phi$	componentes del campo de radiación en las direcciones $\phi$
$\eta$	Impedancia característica del medio (en el espacio libre $\eta=377\Omega$ )
$D$	Directividad
$\Omega_A$	Ángulo sólido
$G$	Ganancia de la antena
$BW$	Ancho de banda
$f_c$	Frecuencia central
$SWR$	Relación de onda estacionaria, Standing Wave Ratio
$\Gamma$	Coefficiente de reflexión
$S_{11}$	Parámetros de dispersión
$h$	Altura del triángulo
$k$	Constante del sustrato dieléctrico
$\theta_a$	Ángulo de apertura del triángulo
$\delta$	Periodo de operación
$n$	Número de la iteración
$F_L$	Frecuencia de corte inferior
$F_H$	Frecuencia de corte superior
$BWFN$	Ancho del Haz entre Primeros Nulos
$BWHP$	Ancho del Nulo entre Puntos de Potencia Mitad
$SLL$	Nivel de Lóbulo Lateral Máximo
$FTBR$	Relación Adelante-Atrás

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Planteamiento del problema

Las comunicaciones a lo largo de la historia han jugado un papel fundamental en el desarrollo de la humanidad, más aún a partir del siglo XX, en el que surgieron nuevas tecnologías y desarrollos en el campo de la electrónica, dando paso a las comunicaciones móviles. La evolución de las comunicaciones en los últimos años ha motivado el estudio de diversas técnicas y estrategias que permitan aprovechar los recursos disponibles en un sistema de comunicación, tal como la potencia y el ancho de banda. En ese contexto, las antenas multibanda se constituyen como una alternativa viable para lograr un mayor grado de eficiencia en el uso del ancho de banda. El diseño de dichas antenas está inspirado en la geometría fractal [1],[2].

Una antena basada en la geometría fractal se define como una pieza metálica con una forma geométrica similar a la de un fractal, es decir, una pieza conformada por una serie de iteraciones autosimilares [3],[4].

Dado que el tamaño de una antena está íntimamente relacionado con la banda de frecuencia que ésta puede manejar, se considera el uso de antenas fractales como una opción para construir una antena multibanda, ya que las propiedades características de los fractales brindan la posibilidad de que la antena tenga diferentes “tamaños” y por ende varias bandas de frecuencia de operación [5]-[7].

La Universidad del Cauca carece de trabajos de grado relacionados con el diseño e implementación de antenas, por lo tanto, el trabajo a realizar constituye un aporte en dicha área.

En este contexto, el problema de investigación está enfocado al diseño, implementación y caracterización de una antena basada en geometría fractal, para con ello determinar sus parámetros más significativos y así evaluar su desempeño en un sistema de comunicación inalámbrico. En ese sentido, la pregunta que busca responder este trabajo de grado es la siguiente:

¿Cuáles son las características de radiación de una antena cuyo diseño obedece a la geometría fractal?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos generales**

Diseñar, implementar y caracterizar una antena basada en geometría fractal que opere en bandas de frecuencia determinadas.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Diseñar y simular la antena basada en geometría fractal de Parany con bandas de frecuencia de 1.7 GHz, 2.4 GHz y 5.8 GHz definidas previamente.
- Implementar la antena diseñada y caracterizar parámetros determinantes de la antena como patrón de radiación, directividad e impedancia con la ayuda del analizador de redes.
- Comparar los resultados obtenidos en simulación y experimentalmente.

## **1.3. Trabajos relacionados**

En el presente trabajo se realiza el diseño de una antena fractal con características previamente definidas como las bandas de frecuencia en que trabaja. A continuación

se presentan algunos trabajos de investigación relacionados con el diseño e implementación de antenas fractales y posteriormente se señalan las diferencias entre dichos artículos y el presente trabajo de grado.

**Desarrollo de una antena fractal multibanda para redes inalámbricas de área local [1].** En esta tesis de posgrado, se propuso el diseño e implementación de una antena multibanda basada en el fractal de Parany de triángulos con tres iteraciones para bandas comerciales de 2.4 GHz, 5.8 GHz y 11 GHz. De manera adicional, se diseñaron antenas Parany de semicírculos y elipses, comprobando que la figura interna no influye en las frecuencias de resonancia, sino el tamaño de las figuras circunscritas en la antena.

**Dipolo multibanda basado en el triángulo de Sierpinski [4].** En el artículo se desarrollaron dos modelos del triángulo de Sierpinski, uno de tres y otro de cuatro iteraciones con frecuencias de 900 MHz, 1800 MHz y 3600 MHz y 900 MHz, 1800 MHz, 3600 MHz y 7200 MHz respectivamente. Los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios en cuanto a la ganancia y ancho de banda.

**Diseño y construcción de una antena fractal multibanda para telefonía móvil celular [6].** El objetivo de esta tesis fue diseñar, analizar e implementar una antena fractal multibanda basada en la curva de Hilbert que operaba a las frecuencias de 0.9 GHz, 1.8 GHz y como objetivo secundario a una frecuencia de operación de 2,4 GHz. El fractal se dividió en tres secciones para modificar la longitud de cada una, las cuales fueron proporcionales a cada frecuencia de operación deseada. Se concluyó que el software CST Microwave Studio es mejor respecto a 4NEC2 ya que el primero permite analizar la influencia del sustrato que soporta la antena. Finalmente, la antena diseñada no operó de manera satisfactoria en todas las bandas propuestas inicialmente, sólo en las bandas de 1040 MHz y 1800 MHz.

**Aplicación de las antenas fractales en las telecomunicaciones [8].** Se realizó la construcción de un monopolo fractal basado en el triángulo de Sierpinski, en donde se varió tres veces el ángulo de apertura con valores de 30, 60 y 90 grados para las frecuencias de 633, 1266 y 1900 MHz, se pudo concluir que el cambio del ángulo de

apertura de la antena incide en los factores del patrón de radiación y resistencia de la antena.

**Diseño de una antena monopolo triangular fractal para GSM, Bluetooth y Wi-Fi [9].** En este artículo se propuso una antena multibanda, cuyas frecuencias de resonancia eran 0.9 GHz, 2.4 GHz y 5.5 GHz, adecuadas para aplicaciones de GSM, Bluetooth y Wi-Fi. Se tuvo en cuenta el uso de plano de tierra, que cambió de manera notable el desempeño de la antena, reduciendo el lóbulo trasero del patrón de radiación.

**Agrupación subestimada operando en modo fractón utilizando antenas microstrip inspiradas en el fractal de Sierpinski [10].** En este artículo se compararon dos arreglos de antenas, un parche circular y la pajarita de Sierpinski; con ellos se observó como el arreglo fractal basado en la pajarita de Sierpinski fue más eficiente, con un menor número de elementos en el cubrimiento de una superficie, manteniendo los requerimientos de funcionamiento.

**Diseño de una antena fractal de 2400 MHz [11].** En este artículo se planteó el diseño de una antena usando el fractal de Sierpinski a una frecuencia de 2400 MHz, en donde se comparó la longitud de un dipolo de cuarto de onda con la longitud que tenía el perímetro del fractal, para la operación en dicha frecuencia. Finalmente se obtuvo un perímetro de un cuarto de longitud de onda, pero no se comprobó que el diseño fuera realmente efectivo y que hubiese operado a esa frecuencia.

**Diseño de una antena fractal reconfigurable triángulo de Sierpinski para el servicio IEEE 802.11a y las bandas X, Ku Y K [12].** En este artículo se diseñó una antena fractal para que operara en las bandas IEEE 802.11a, banda X, Ku y K. Este diseño permitía elegir la frecuencia de operación para que trabajara en un sólo servicio específico a la vez, esto se hizo ubicando apropiadamente una serie de diodos en el fractal, los cuales aislaron parte de la antena. Los resultados de la simulación fueron satisfactorios, cumpliendo las frecuencias de operación propuestas en los objetivos propuestos.

**Determinación de las características de una antena con forma de Roseta hexagonal fractal [13].** En el artículo se presentó el estudio de una antena monopolo con forma de Roseta Hexagonal para determinar algunos de los parámetros característicos. Se compararon los cálculos con en monopolo de Sierspinski para usarlo como calibrador de la antena Roseta hexagonal. En los resultados de las simulaciones se mostraron las diferentes bandas a las cuales operó y también los patrones de radiación.

La diferencias entre los trabajos previos y la tesis propuesta radica en que la antena trabajará además de las bandas libres de 2400 y 5800 MHz también lo hará en la banda licenciada de 1700 MHz para dar soporte a la tecnología LTE. La antena se realizará basada en el diseño del fractal de Parany, manteniendo el ángulo de apertura del triángulo fijo. Además el elemento radiante será un monopolo, el cual permite la conexión directa a la fuente mediante un cable coaxial sin la necesidad de un acoplador. La tesis propuesta no sólo realizará el diseño de la antena como lo plantean varios trabajos, sino que además se realizará la implementación del dispositivo para obtener los valores de los parámetros como el patrón de radiación mediante mediciones experimentales del mismo. Finalmente se comparará los resultados simulados y reales.

## **1.4. Contribución de la Tesis**

Dadas las características que tienen las antenas basadas en geometría fractal, es posible que la estructura de éstas tiendan a disminuir su tamaño en comparación con las antenas convencionales, adicionalmente pueden operar en varias bandas de frecuencia, facilitando la comunicación entre diversos sistemas inalámbricos y así ayudar a su convergencia con las diversas tecnologías presentes actualmente.

Varias organizaciones y empresas se han dedicado a la investigación y desarrollo de estas antenas, registrando nuevas patentes, obteniendo reconocimientos académicos e industriales y teniendo éxito en el mercado, ya que en la actualidad la mayoría de los dispositivos móviles usan esta tecnología. Además, la tendencia de las nuevas tecnologías proyectadas, como 5G, las cuales requieren un gran ancho

de banda y el soporte de varias tecnologías que operen en diversas bandas de frecuencia para lograr una mayor convergencia.

La Universidad del Cauca carece de trabajos de grado relacionados con el diseño e implementación de antenas, por lo tanto, el trabajo a realizar constituye un aporte en dicha área debido a que se realizará el diseño, implementación y caracterización de una antena de geometría fractal, para su uso posterior en las tecnologías que la antena soporte. Con esto establecen los conceptos básicos para que los estudiantes continúen realizando trabajos de grado en esta área de investigación.

Finalmente, las antenas fractales tienen una amplia variedad de aplicaciones en la actualidad, en especial en redes de telefonía celular.

## **Capítulo 2**

### **Generalidades de las Antenas**

#### **2.1. Antenas. Conceptos generales**

Una antena es un componente de un sistema de comunicación inalámbrico que sirve para transformar energía no radiante en energía radiante y viceversa, esto es, convierte corrientes alternas en campos electromagnéticos (en el lado transmisor) y realiza la función inversa en el lado receptor.

Tradicionalmente, las antenas se diseñan con base en la geometría Euclidiana, y su tamaño está directamente relacionado con la longitud de onda de las señales que puede transmitir y/o recibir (generalmente la dimensión máxima de una antena es aproximadamente la décima parte de la longitud de onda de la señal portadora sobre la cual se transmite la información).

La diversidad de formas, tamaños y materiales con que se construyen las antenas permiten adecuar sus características de radiación al entorno, servicio o escenario en que tenga lugar la comunicación [1].

## 2.1.1. Parámetros fundamentales de las antenas

- **Patrón de radiación**

Es una expresión matemática que representa la intensidad relativa del campo electromagnético que la antena transmite en cada dirección del espacio. Dicho patrón se suele expresar en términos de los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  del sistema de coordenadas esféricas, donde  $\theta$  representa la co-latitud (ángulo respecto al eje  $z$ ) y  $\phi$  el ángulo de azimut (ángulo respecto al eje  $x$  en el plano  $xy$ ). Cabe anotar que el patrón de radiación es una medida del campo lejano producido por la antena en todas las direcciones, a una distancia fija de ella<sup>1</sup> [15], [16].

En general, el campo lejano de cualquier antena en un punto del espacio de coordenadas esféricas  $(r, \theta, \phi)$ , es una expresión de la forma:

$$\vec{E} = \frac{g(\theta, \phi)e^{-j\beta r}}{r} \hat{u} \quad (2.1)$$

donde  $\vec{E}$  es el vector campo eléctrico,  $r$  es la distancia entre el punto en cuestión y la antena,  $\beta$  es la constante de fase del medio ( $\beta = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$ : longitud de onda) y  $\hat{u}$  es un vector unitario arbitrario perpendicular a la línea que une al punto con la antena. Es importante aclarar que dicho campo de radiación constituye una onda esférica no uniforme. Es justamente ese carácter no uniforme lo que permite que la antena dirija la radiación en la dirección deseada.

El patrón de radiación (normalizado) de la antena estará dado entonces por:

$$F_n(\theta, \phi) = \frac{|g(\theta, \phi)|}{\max[|g(\theta, \phi)|]} \quad (2.2)$$

Para facilitar la visualización del patrón de radiación, se suelen emplear algunas trazas del mismo con los planos coordenados. Por ejemplo, el gráfico de  $F_n(90^\circ, \phi)$  vs  $\phi$ , representa la intersección del patrón de radiación con el plano  $xy$ . Así mismo, el gráfico de  $F_n(\theta, \phi = \text{const})$  vs  $\theta$  corresponde a la intersección del

---

<sup>1</sup> El campo lejano es el campo electromagnético percibido a distancias alrededor de 20 de la longitudes de onda. Su magnitud varía inversamente con la distancia a la antena.

patrón de radiación con un plano vertical que pasa por el eje z. En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo de tales trazas.

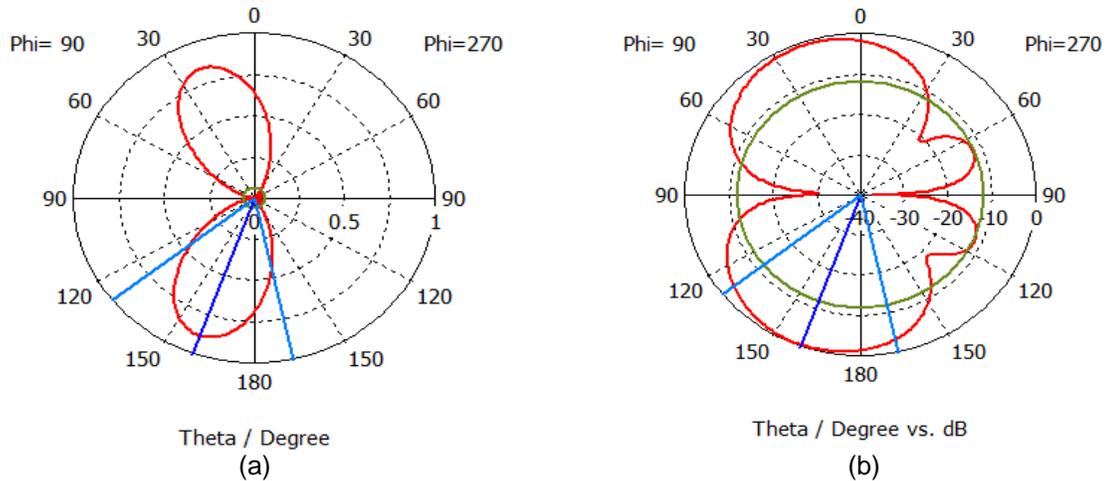


Figura 2.1. Patrones de radiación (a) en coordenadas polares lineales, (b) en coordenadas polares logarítmicas.

El patrón de radiación de potencia, por su parte, se define como:

$$S_n(\theta, \phi) = [F_n(\theta, \phi)]^2 \quad (2.3)$$

Debido a la complejidad de las funciones matemáticas que describen los patrones de radiación, existen una serie de medidas simples que facilitan su análisis, ya que brindan una noción del comportamiento general del patrón. Dentro de dichas medidas se destacan: el ancho del haz entre primeros nulos (BWFN: Beam Width First Nulls), el ancho del haz entre puntos de potencia mitad (BWHP: Beam Width Half Power), nivel de lóbulo lateral (SLL: Side Lobe Level) y la relación adelante-atrás (FTBR: Front to Back Ratio). A continuación se brinda una explicación de ellos [17]:

- **BWFN:** es el ángulo que abarca el lóbulo principal, en su totalidad. Se mide de manera independiente sobre cada traza del patrón y se expresa en radianes o grados.
- **BWHP:** es el ángulo abarcado entre los puntos de potencia mitad del lóbulo principal, esto es, el ángulo entre los puntos alrededor del máximo donde la potencia relativa radiada ha disminuido a la mitad (el patrón de campo ha disminuido al 70,7% de su valor máximo). Al igual que el BWFN, el BWHP se

mide independientemente sobre cada traza y se expresa en radianes o grados.

- **SLL:** Es la diferencia, en decibeles, entre el máximo lóbulo lateral y el lóbulo principal. Matemáticamente se define como:

$$SLL = 20 \log F_N(\theta_L, \phi_L) , \quad SLL \leq 0dB, \quad (2.4)$$

donde  $F_N(\theta_L, \phi_L)$  es el patrón de campo normalizado, evaluado en la dirección en que apunta el máximo lóbulo lateral.

- **FTBR:** Es la diferencia, en decibeles, entre el patrón de radiación evaluado en la dirección opuesta al máximo y el máximo de radiación. se define matemáticamente como:

$$FTBR = -20 \log F_N(\theta_B, \phi_B) , \quad FTBR \geq 0 dB \quad (2.5)$$

donde  $F_N(\theta_B, \phi_B)$  es el patrón de radiación en la dirección opuesta al máximo.

- **Densidad de potencia radiada**

Es la magnitud del vector de Poynting del campo lejano generado por la antena. Se puede demostrar que la densidad de potencia radiada está dada por la expresión:

$$S = \frac{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}{2\eta}, \quad (2.6)$$

donde  $E_\theta$  y  $E_\phi$  son las componentes del campo de radiación en las direcciones  $\theta$  y  $\phi$  respectivamente y  $\eta$  es la impedancia característica del medio (en el espacio libre la impedancia promedio  $\eta=377 \Omega$ ). La densidad de potencia también se puede interpretar como la potencia total radiada dividida entre el área de una esfera de radio  $r$ . Sus unidades son Watt/m<sup>2</sup>.

- **Directividad**

La directividad se define como el máximo factor de amplificación que introduce la antena en una dirección específica del espacio. Se expresa matemáticamente como [15]:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}, \quad (2.7)$$

donde  $\Omega_A$  es el ángulo sólido<sup>2</sup>, el cual a su vez está definido como:

$$\Omega_A = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} S_n(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.8)$$

La directividad, al ser una cantidad adimensional positiva, se la suele medir en escala logarítmica de la siguiente manera:

$$D_{dB_i} = 10 \log(D) , \quad (2.9)$$

- **Intensidad de radiación**

Es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en cada dirección del espacio, se expresa en Watt/srad, y se define como [15], [17]:

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2 \|\tilde{E}\|^2}{2\eta} \sin \theta \quad (2.10)$$

- **Impedancia**

La impedancia de la antena se define como la relación del voltaje y la corriente en el punto de alimentación de la misma (terminal de entrada). Si las impedancias de la antena y la línea de transmisión que la alimenta coinciden, se satisface la condición de acoplamiento, lo que maximiza la transferencia de potencia entre los terminales de la antena y la línea de transmisión [19].

- **Eficiencia de radiación**

En transmisión, es la relación entre potencia radiada por la antena y la potencia con que se alimenta la misma. Así mismo, en recepción, es la relación entre la potencia transferida a la carga (receptor) y la potencia capturada por la antena. Teniendo en cuenta el teorema de reciprocidad de Lorentz, la eficiencia de radiación es la misma tanto en transmisión como en recepción, y se calcula de la siguiente manera [17]:

$$e_r = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} , \quad (2.11)$$

donde  $R_r$  es la resistencia de radiación y  $R_\Omega$  es la resistencia de pérdidas óhmicas de la antena. Para una antena ideal,  $R_\Omega = 0$ , lo que conduce a  $e_r = 1$ .

---

<sup>2</sup> Ángulo sólido: es la superficie promedio abarcada por el patrón de radiación de la antena. Se mide en estereorradianes [srad] [18].

- **Ganancia de la antena**

Es el producto entre la eficiencia de radiación de la antena y la directividad, y representa el máximo factor de amplificación real que puede introducir la antena. La ganancia es una cantidad adimensional y una forma de calcularla es [17]:

$$G = e_r D, \quad (2.12)$$

Este parámetro también se puede expresar de decibeles, así:

$$G = D_{[dB]} + 10 \log(e_r) \quad (2.13)$$

- **Ancho de banda**

Es el rango de frecuencias donde la antena opera de manera satisfactoria. El ancho de banda es una diferencia de frecuencias que se expresa de la siguiente manera [3], [15]:

$$BW = f_H - f_L, \quad (2.14)$$

donde  $f_H$  y  $f_L$  son respectivamente las frecuencias máxima y mínima. Así mismo, el ancho de banda fraccional se expresa como:

$$BW_{fr} = \frac{BW}{f_c}, \quad (2.15)$$

donde  $f_c$  es la frecuencia central, la cual se define como:

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \quad (2.16)$$

- **Área efectiva máxima**

Es la cantidad de potencia máxima capturada por la antena dividida entre la densidad de potencia del campo electromagnético que incide sobre la antena. Mientras más grande sea su valor, mayor será la capacidad de la antena para captar potencia útil. Se puede calcular con la ecuación 2.17: [17], [19].

$$A_e = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}, \quad (2.17)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal recibida [m] y G es la ganancia. El área efectiva se mide en  $m^2$ .

## 2.2. Otros conceptos

### 2.2.1. Línea de transmisión

Una línea de transmisión es un medio guizador que permite la transferencia de información entre un generador y una carga mediante ondas de voltaje y corriente. Las líneas de transmisión, por lo general, se modelan mediante un par de conductores paralelos separados por un dieléctrico. Toda línea de transmisión tiene asociados unos parámetros distribuidos, los cuales determinan el comportamiento de las ondas que se propagan a través de ella [17]. Dichos parámetros distribuidos son:

R: Resistencia por unidad de longitud ( $\Omega$ )

G: Conductancia por unidad de longitud ( $\text{U/m}$ )

L: inductancia por unidad de longitud ( $\text{H/m}$ )

C: capacitancia por unidad de longitud ( $\text{F/m}$ )

Si tales parámetros son constantes a lo largo de toda la línea de transmisión, se dice que la línea es uniforme. En este caso, la constante de atenuación y la impedancia característica, para una frecuencia de operación  $\omega$ , se pueden obtener como:

$$= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.18)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.19)$$

Si el voltaje y la corriente que se propagan a través de la línea son armónicos con frecuencia  $\omega$ , sus respectivos fasores se pueden calcular como:

$$V(y) = I_L [Z_L \cosh(\gamma y) + \eta \sinh(\gamma y)], \quad (2.20)$$

$$I(y) = I_L \left[ \cosh(\gamma y) + \frac{Z_L}{\eta} \sinh(\gamma y) \right], \quad (2.21)$$

donde  $I_L$  es la corriente en la carga,  $Z_L$  es la impedancia de carga y  $y$  es la distancia entre el punto de observación y la carga.

### 2.2.2. Relación de onda estacionaria (Standing Wave Ratio)

Es el cociente entre las magnitudes máxima y mínima del fasor de voltaje (o corriente) en una línea de transmisión desadaptada. Mientras más grande su valor, mayor la intensidad de la onda reflejada respecto a la incidente. La relación de onda estacionaria, simbolizada con SWR, se define como [17]:

$$SWR = \frac{\max |V(y)|}{\min |V(y)|} = \frac{\max |I(y)|}{\min |I(y)|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad (2.22)$$

donde  $\Gamma$  es el coeficiente de reflexión<sup>3</sup> en la línea de transmisión (medido en la carga). A su vez,  $\Gamma$  se puede obtener de la siguiente manera:

$$\Gamma = \frac{Z_L - \eta}{Z_L + \eta}, \quad (2.23)$$

### 2.2.3. Adaptación o acoplamiento de una línea de transmisión

Una línea de transmisión está adaptada cuando no hay ondas reflejadas dentro de ella. Esto implica la inexistencia de ondas estacionarias y en efecto máxima transferencia de potencia a la carga. La condición de adaptación se puede reducir a:

$$Z_L = \eta \quad (2.24)$$

De esa forma, el voltaje y la corriente a cualquier distancia  $y$  de la carga será [17]:

$$V(y) = I_L \eta e^{\gamma y} \quad (2.25)$$

$$I(y) = I_L e^{\gamma y} \quad (2.26)$$

### 2.2.4. Carta de Smith

Es una herramienta gráfica que permite representar una posible impedancia dentro de una línea de transmisión. Se basa en el concepto del lugar geométrico de la impedancia, el cual está constituido por dos familias de círculos ortogonales, una para la parte resistiva y la otra para la parte reactiva. Dentro de sus aplicaciones más importantes están el cálculo de impedancias desconocidas y la adaptación entre

---

<sup>3</sup> Coeficiente de reflexión: es la relación del voltaje (o corriente) reflejado y el voltaje (o corriente) incidente. Está representado por la letra griega gamma mayúscula ( $\Gamma$ ) [17].

cargas y líneas de transmisión. En la Figura 2.2 se muestra un bosquejo de la carta de Smith.

Al analizar mediante carta de Smith una línea de transmisión en particular, se puede observar que todas sus impedancias se limitan a un lugar geométrico conocido como “curva SWR”. Para el caso de líneas homogéneas<sup>4</sup> sin pérdidas, la curva SWR corresponde a un círculo centrado en el origen cuyo radio es la magnitud del coeficiente de reflexión. Cuando la línea es homogénea con pérdidas, la curva SWR es una espiral que converge en el origen [16].

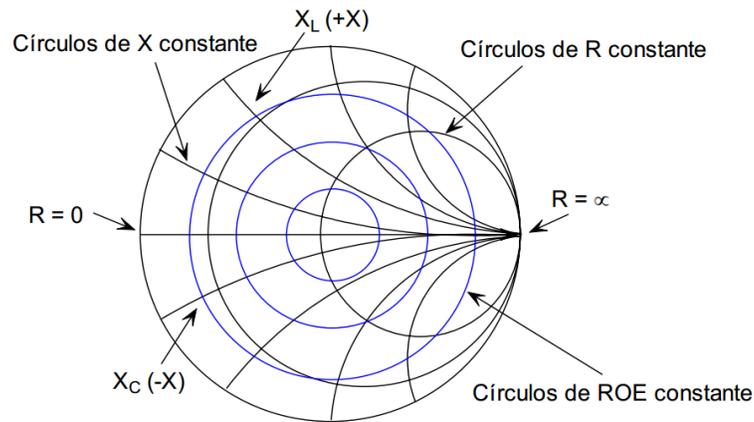


Figura 2.2 Círculos ortogonales en la Carta de Smith [15].

### 2.2.5. Parámetros de dispersión (S)

Los parámetros S son coeficientes complejos adimensionales que representan las relaciones entre ondas incidentes y reflejadas en una red de dos pares de terminales (cuadripolos). Surgen por la necesidad de caracterizar una red de alta frecuencia, a través de su impedancia (Z) y admitancia (Y). Dichos parámetros se pueden medir a través de un analizador de redes [20].

Los parámetros S se calculan a partir de una matriz de dispersión. Para el caso de una red de dos puertos como la que se muestra en la Figura 2.3, la matriz de dispersión está dada por:

<sup>4</sup> Una línea de transmisión se dice homogénea cuando sus parámetros distribuidos se mantienen constantes a lo largo de toda la línea.

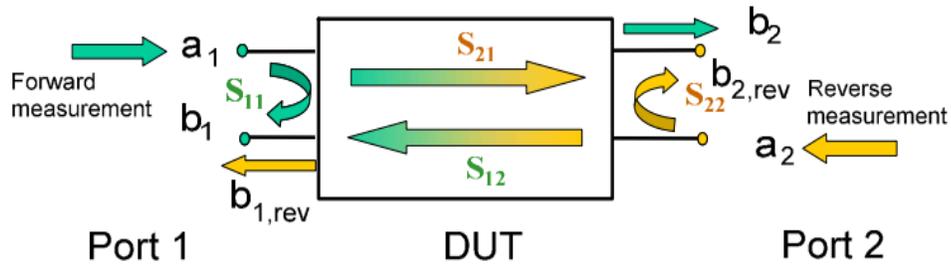


Figura 2.3 Red de dos puertos [22].

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

De la matriz anterior se obtienen dos ecuaciones:

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad (2.28)$$

donde:

- $S_{11}$  es el coeficiente de reflexión de entrada, definido como el cociente de las magnitudes de onda  $b_1/a_1$  en el Puerto 1 (medida directa con salida adaptada y  $a_2 = 0$ ).
- $S_{21}$  es el coeficiente de transmisión directa, definido como el cociente entre las magnitudes de onda  $b_2/a_1$  (medida directa con salida adaptada y  $a_2 = 0$ ).
- $S_{12}$  es el coeficiente de transmisión reflejado de entrada, definido como el cociente de las magnitudes de onda  $b_1$  (medida reflejada con entrada adaptada,  $b_{1,rev}$  y  $a_1 = 0$ ) medido en el Puerto 1 (medida directa con salida adaptada y  $a_2 = 0$ ) entre  $a_2$ .
- $S_{22}$  es el coeficiente de reflexión de salida, definido como el cociente de las magnitudes de onda  $b_2$  (medida reflejada con entrada adaptada,  $b_{2,rev}$  y  $a_1=0$ ) entre  $a_2$ , medido en el Puerto 2.

A partir de las ecuaciones 2.33 se obtienen los términos  $S_{ij}$  de la matriz [21]:

$$Z_{11} = \frac{v_1}{i_1} |_{i_2=0} \quad (2.29)$$

$$Z_{12} = \frac{v_1}{i_{12}} \Big|_{i_1=0} \quad (2.30)$$

$$Z_{21} = \frac{v_2}{i_1} \Big|_{i_2=0} \quad (2.31)$$

$$Z_{22} = \frac{v_2}{i_2} \Big|_{i_1=0} \quad (2.32)$$

### 2.2.6. Pérdidas de retorno

Constituyen un método alternativo para estimar la intensidad de las ondas reflejadas respecto a las incidentes en una línea de transmisión. Las pérdidas de retorno, en decibeles, se pueden obtener como [23]:

$$Return\ loss = 20 \log \left( \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right) \quad (2.33)$$

## 2.3. Fractales

La palabra fractal proviene del latín “fractus” que significa roto o fracturado. El concepto de fractal se introdujo en los años 70 por el matemático francés Benoit Mandelbrot, quien definió las propiedades de estos elementos, y adicionalmente encontró aplicaciones mediante la simulación de sistemas físicos complejos.

Un fractal se puede definir como una figura geométrica fragmentada donde todas sus componentes se repiten a diferentes escalas. Los fractales han tenido mucho éxito, ya que con ellos ha sido posible desarrollar diversas aplicaciones en múltiples áreas como medicina, ingeniería civil, música, telecomunicaciones, procesamiento de imágenes, entre otras [3], [24].

Los fractales pueden clasificarse de acuerdo a la forma en que se generan como lineales o complejos. A continuación se da una breve explicación de cada una de estas categorías [3], [5]:

- **Fractales lineales:** se construyen a partir de particiones iteradas de cada uno de sus lados. En cada iteración se obtiene una versión similar a la anterior,

pero con mayor número de réplicas. En la Figura 2.4 se muestran algunos ejemplos de este tipo de fractales.

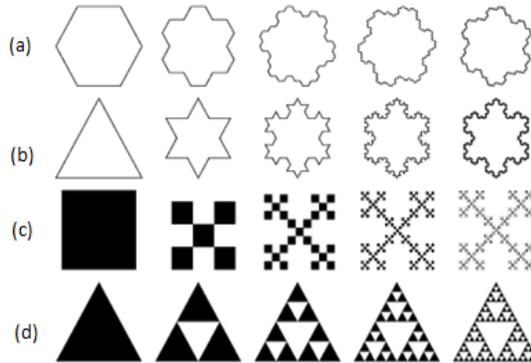


Figura 2.4 Fractales lineales. (a) Curva de Gosper, (b) Curva de Koch, (c) Fractal de Vicsek, (d) Triángulo de Sierpinski [25].

- **Fractales no lineales o Complejos:** se generan a partir de ecuaciones matemáticas exhaustivas, y el resultado de cada iteración no coincide necesariamente con la versión original. Dentro de esta categoría de fractales se destacan el conjunto de Mandelbrot y el conjunto de Julia. En la Figura 2.5 se muestran algunos ejemplos representativos.

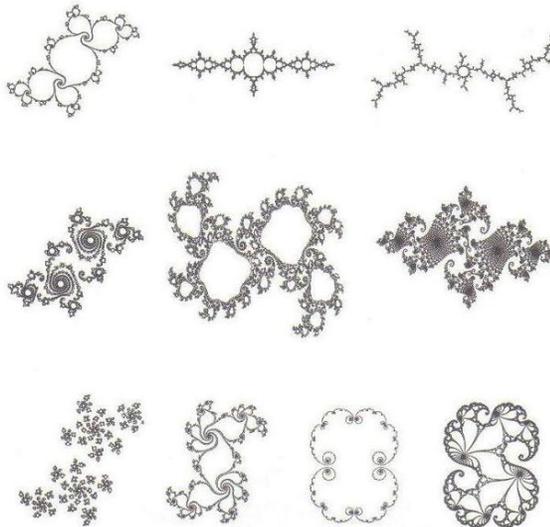


Figura 2.5 Fractales no lineales [26].

## 2.4. Propiedades de los fractales

**2.4.1. Autosimilitud o autosemejanza:** el fractal posee copias a diferentes escalas de sí mismo, por lo tanto, las iteraciones de orden superior estarán incluidas dentro la iteración principal [3], [7].

**2.4.2. Recursividad:** es la capacidad que tiene el fractal de crecer mediante procesos iterativos. [3], [6].

**2.4.3 Estructura infinita:** el fractal no pierde su aspecto macroscópico original a medida que el número de iteraciones se incrementa [6], [24].

## 2.5. Antenas Fractales

Una antena fractal es un radiador con la forma de un fractal, es decir, su estructura geométrica exhibe patrones de autosimilitud en un número finito de escalas. Como ya se dijo antes, dicha autosimilitud permite que la antena resuene a distintas frecuencias, lo que conlleva a que se considere como una antena multibanda.

## 2.6. Triángulo de Parany

El triángulo de Parany está basado en el fractal de Sierpinski, donde se toman los puntos medios de cada lado del triángulo equilátero, y a partir de ellos se traza un triángulo equilátero invertido, que es removido posteriormente (Iteración 1). De esta misma forma se obtienen las iteraciones consecutivas.

La relación gráfica de las dos geometrías se muestra en la Figura 2.6.

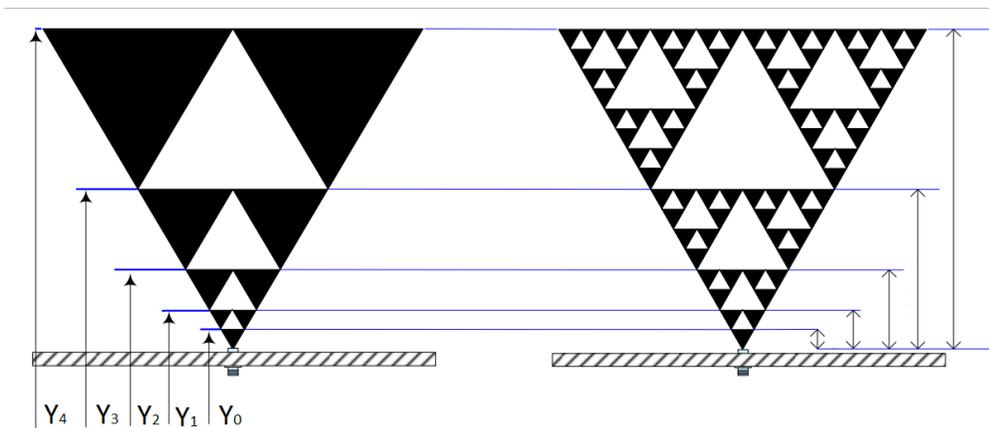


Figura 2.6 Relación entre geometrías de Parany (izquierda) y Sierpinski (derecha) [1].

Las alturas de los triángulos están dadas por la ecuación 2.34 [4]:

$$h = \frac{kC\delta^n}{f_n} \cos\left(\frac{\theta_a}{2}\right), \tag{2.34}$$

donde  $h$  es la altura del triángulo,  $k$  la constante del sustrato dieléctrico (0,152),  $C$  es la velocidad de la luz,  $f_n$  es la frecuencia de trabajo de la  $n$ -ésima iteración,  $\theta_a$  es el ángulo de apertura del triángulo (para triángulos equiláteros,  $\theta = 60^\circ$ ),  $\delta$  es el periodo de operación y  $n$  es el número de la iteración.

## Capítulo 3

### Metodología de Diseño

La metodología usada para la solución de esta tesis es una adaptación del Proceso Racional Unificado (RUP, Rational Unified Process),. Esta metodología tiene retroalimentación entre las etapas que la conforman, lo que permite regresar a la etapa inicial y verificar si el producto resultante necesita alguna adición o no. En la Figura 3.1 se muestran las etapas de desarrollo que se contemplan.

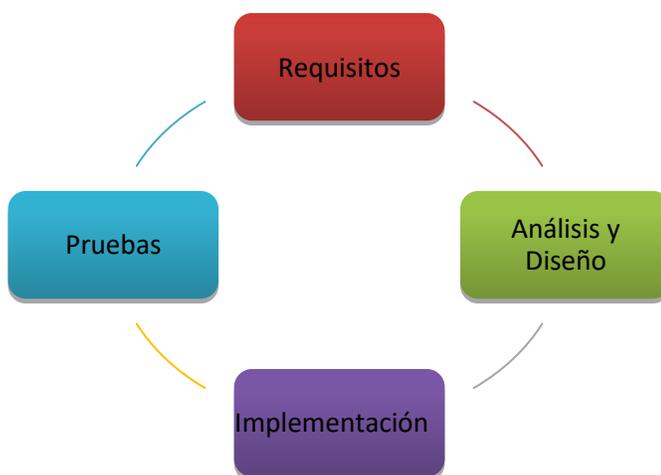


Figura 3.7 Adaptación de metodología RUP [27].

## 3.1. Requisitos

**Requerimiento 1:** Diseñar una antena basada en geometría fractal de Parany que opere en las bandas de frecuencia de 1.7, 2.4 y 5.8 GHz.

**Requerimiento 2:** Obtener los anchos de banda de operación de la antena, en cada una de las bandas de frecuencia establecidas, tomando como referencia las pérdidas de retorno de -10 dB en el simulador.

**Requerimientos 3:** Obtener los patrones de radiación en el simulador para cada una de las frecuencias centrales de operación.

**Requerimiento 4:** Medir con el analizador vectorial de redes el ancho de banda en cada una de las bandas de frecuencia establecidas, tomando como referencia las pérdidas de retorno de -10 dB en el simulador, y adicionalmente, obtener los patrones de radiación.

**Requerimiento 5:** Comparar y analizar los valores teóricos y experimentales.

## 3.2. Análisis y Diseño

### 3.2.1. Elección Frecuencias de operación de algunos servicios de telecomunicaciones

La elección de las bandas anteriores se realizó tomando como referencia diversos servicios, priorizando los más usados en bandas IMS, tales como WiFi. Además, se tomó en cuenta otra banda para el servicio de redes móviles LTE con el objetivo de evaluar el comportamiento de diversos parámetros de la antena sobre dichos servicios en específico.

- **Banda de 1,7325 GHz**

Se elige la banda 4 de LTE, en el enlace de subida el cual posee una frecuencia central de 1732,5 MHz. Esta banda es una de las más usadas en sistemas de comunicación celular en Colombia. En la Tabla 3.1 se detalla las frecuencias de corte de este segmento de espectro radioeléctrico [28].

Banda	Nombre	Ancho de Banda DL/UP (MHz)	Uplink (MHz)		
			F <sub>L</sub>	F <sub>C</sub>	F <sub>H</sub>
4	AWS-1	45	1710	1732,5	1755

Tabla 3.1 Frecuencias de corte para la banda 4 LTE en la frecuencia de 1,7325 GHz [28].

- **Banda 2,437 GHz**

El estándar IEEE 802.11 establece 14 canales para comunicación de datos inalámbricos desde los 2400 MHz hasta los 2496 MHz.

Para Estados Unidos se establece el uso de los canales del 1 al 11 como se muestra en la Tabla 3.2, cada uno con un ancho de banda de 22 MHz. Este rango de canales inicia en 2401 MHz y termina en 2473 MHz para un ancho total de 72 MHz [29].

Canal	Frecuencia Nominal (MHz)	Mínimo (MHz)	Máximo (MHz)
1	2412	2401	2423
2	2417	2405	2428
3	2422	2411	2433
4	2427	2416	2438
5	2432	2421	2443
6	2437	2426	2448
7	2442	2431	2453
8	2447	2436	2458
9	2452	2441	2463
10	2457	2446	2468
11	2462	2451	2473

Tabla 3.2 Canales de Wi-Fi según la FCC [29].

- **Banda 5,777 GHz**

Para la banda de 5,8 GHz se eligió el rango de frecuencias de la banda IMS, el cual se describe en la Tabla 3.3.

Identificador de Canal	Frecuencia Central (MHz)	Dominios Regulatorios
		América del Norte
136	5680	-
140	5700	-
149	5745	X
153	5765	X
157	5785	X
161	5805	X
165	5809	X

Tabla 3.3 Frecuencias de WiFi en la banda IMS [30].

Finalmente, las frecuencias de operación y sus respectivos anchos de banda se resumen en la Tabla 3.4 para cada servicio.

Número de la Banda	Nombre	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]
1	WIFI 5 GHz	5.745	5.809	5777	32
2	WIFI 2.4 GHz	2.400	2.474	2437	74
3	LTE AWS UpLink	1.710	1.755	1732,5	45

Tabla 3.4 Frecuencias de operación de servicios seleccionados.

### 3.2.2. Selección de la herramienta de simulación

Después de realizar la revisión bibliográfica y la selección de la herramienta de simulación, se procede a efectuar el diseño de la antena con la herramienta CST Microwave Studio, ya que es un software completo con gran variedad de herramientas para la simulación de antenas, permitiendo el análisis del efecto que tienen los materiales que constituyen la antena, como el dieléctrico; y posee una interfaz atractiva al usuario [6].

### **3.2.3. Cálculos para el diseño**

Para el diseño de la antena, se realizaron los cálculos a partir de la ecuación 2.35, en donde se asocia una altura a cada banda de frecuencia de operación.

### **3.2.4. Herramienta de diseño y simulación**

- **CST Microwave Studio (Computing Simulation Technology)**

Es una herramienta especializada para la simulación electromagnética 3D de componentes de alta frecuencia.

CST MWS permite el análisis rápido y preciso de los dispositivos de alta frecuencia (HF), tales como antenas, filtros, acopladores, estructuras planas y de múltiples capas. Tiene una interfaz amigable al usuario y fácil de manejar,. La herramienta brinda una visión sobre el comportamiento electromagnético de los diseños de alta frecuencia realizados por el usuario [31].

El software ofrece al usuario trabajar con varios módulos de gran alcance. Los módulos están basados en numerosos métodos, incluyendo el método de elementos finitos (FEM), el método de momentos (MoM), el método multipolar rápido de varios niveles (MLFMM) y de rayos de disparo (SBR), cada uno ofreciendo ventajas distintas en sus propios dominios [32].

En la Figura 3.2 se observa la interfaz del software de simulación utilizado en el presente trabajo de grado.

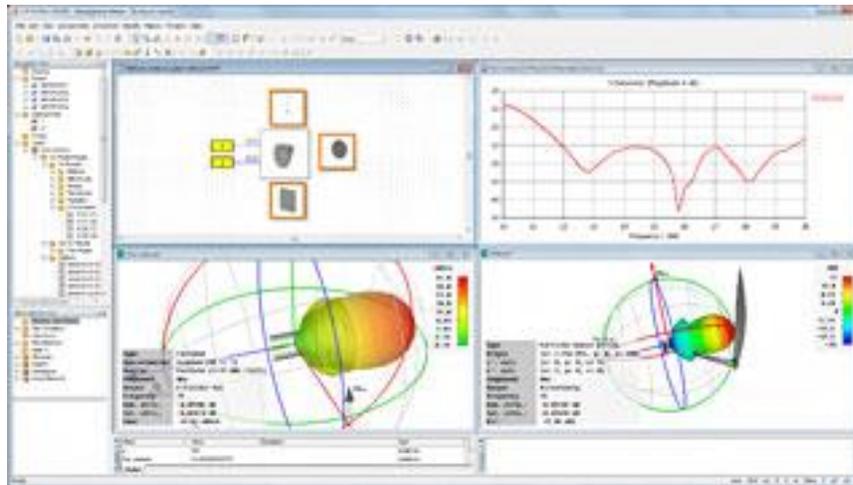


Figura 3.8 Interfaz de Software CST Microwave Studio [33].

- **LibreCAD**

Es una aplicación de CAD de código abierto para Windows, Apple y GNU/Linux. El soporte y la documentación de esta aplicación son de fácil adquisición para comunidad de usuarios, colaboradores y desarrolladores [34].

En la Figura 3.3 se observa la interfaz del software con la antena diseñada.

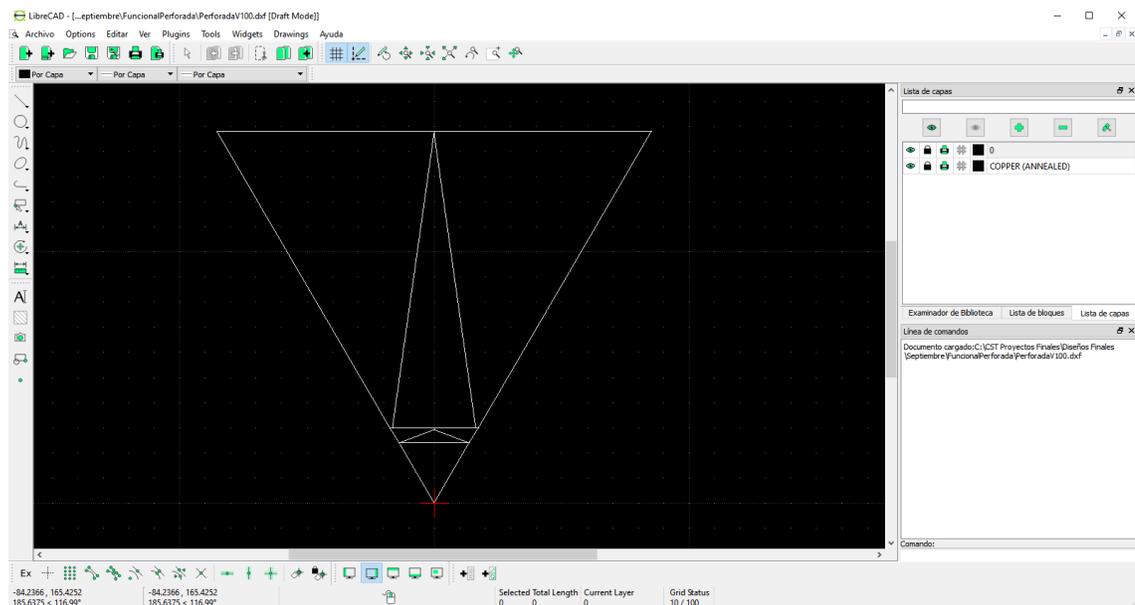


Figura 3.9 Interfaz de software LibreCAD con diseño de antena fractal.

- **MATLAB**

Es un software para analizar y diseñar diversos tipos de sistemas. Tiene aplicaciones para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos.

El lenguaje de MATLAB está basado en matrices, y sus gráficos facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. Tiene una extensa librería de toolboxes preinstaladas que le permiten trabajar con algoritmos esenciales. El código MATLAB se puede integrar con otros lenguajes, lo que le permite desplegar algoritmos y aplicaciones en sistemas web, empresariales o de producción [35].

## **3.4. Pruebas**

### **3.4.1. Equipo para la medición de antenas**

- **Analizador vectorial de Redes R&S ZVL6**

El analizador de redes cuenta con sistema operativo Windows XP, que está configurado de acuerdo a las necesidades y características del equipo. Los cambios en la configuración del sistema pueden ser necesarios para [22]:

- Establecer una conexión LAN
- Personalizar las propiedades de los accesorios externos conectados al analizador
- Llamar a herramientas de software adicionales

El analizador de redes es un equipo muy completo, que permite realizar mediciones de:

- Parámetros  $S_{11}$   $S_{12}$   $S_{21}$  y  $S_{22}$
- Impedancia
- Admitancia
- SWR

Los parámetros anteriores pueden ser visualizados en diagramas cartesianos y en la carta de Smith.

Además de analizador vectorial de redes, el dispositivo puede ser usado como analizador de espectro.

En la Figura 3.4 se puede observar el analizador vectorial de redes.



Figura 3.10 Analizador vectorial de redes [22].

- **USRP B210**

La tarjeta USRP B210 trabaja en un rango de frecuencias desde 70 MHz a 6 GHz, tiene un procesador Spartan6 y conectividad USB 3.0. Permite la experimentación en un amplio rango de señales incluyendo FM, telefonía móvil, Wi-Fi, entre otras. La USRP B210 posee dos canales de transmisión y recepción, lo que permite establecer comunicaciones full dúplex. En la Figura 3.5 se observa la tarjeta utilizada [36].



Figura 3.11 USRP B210 [37].

- **VERT 900**

Antena omnidireccional, opera en las bandas de 824 a 960 MHz, 1710 a 1990 MHz Quad-band Celular/PCS y banda ISM. Tiene una ganancia de 3 dBi [38].

En la Figura 3.6 se muestra la antena monopolo VERT900.



Figura 3.12 Antena monopolo VERT900 [38].

- **VERT 2450**

Antena omnidireccional Dual-band que opera en las bandas de 2.4 a 2.48 GHz y 4.9 a 5.9 GHz. Tiene ganancia de 3 dBi [39].

En la Figura 3.7 se observa el monopolo VERT2450.



Figura 3.13 Antena monopolo VERT2450 [39].



## Capítulo 4

### Proceso de Diseño e Implementación

#### 4.1. Diseño y Simulación

Inicialmente se lleva a cabo el cálculo de las alturas de los triángulos, con la ecuación 2.34, para las tres iteraciones. En este caso, el valor del parámetro  $\delta$  no es constante, por lo que se debe calcular individualmente para cada iteración con la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{f_{n+1}}{f_n}. \quad (4.1)$$

Para el ángulo de apertura del triángulo, se establece un valor de  $60^\circ$ , debido a que es el valor usado en gran parte de la literatura. Cabe anotar que este ángulo de apertura conduce a la formación de triángulos equiláteros en cada iteración desde el origen. En la Tabla 4.1 se consignan los parámetros resultantes de esta elección.

$F_n$ [GHz]	n	$\delta$	h [mm]
1,7325	3	1,4066	36,6
2,437	2	2,3705	52,5
5,777	1	2,3705	9,3

Tabla 4.5 Resultados de alturas para  $\delta$  variable.

Al no tener definida una cuarta frecuencia, se asigna a  $\delta$  un valor de 2,3705.

Después de tener los cálculos, se llevan a cabo las simulaciones para determinar el comportamiento de la antena en función de los parámetros calculados.

El software de simulación permite seleccionar los materiales que componen la antena.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran las características físicas más relevantes de los materiales que componen la antena.

component1:plano_tierra	
Material	Copper (annealed)
Type	Lossy metal
Mue	1
El. cond.	5.8e+007 [S/m]
Rho	8930 [kg/m^3]
Therm.cond.	401 [W/K/m]
Heat cap.	0.39 [kJ/K/kg]
Diffusivity	0.000115141 [m^2/s]
Young's Mod.	120 [kN/mm^2]
Poiss.Ratio	0.33
Thermal Exp.	17 [1e-6/K]

Figura 4.14 Material utilizado para la estructura de la antena y el plano tierra.

component1:dieléctrico	
Material	FR-4 (lossy)
Type	Normal
Epsilon	4.3
Mue	1
El. tand	0.025 (Const. fit)
Therm.cond.	0.3 [W/K/m]

Figura 4.15 Material utilizado para dieléctrico.

Las propiedades intrínsecas del material FR-4 que brinda el simulador se consignan en la Tabla 4.2:

Característica	Valor
Permitividad ( $\epsilon_r$ )	4,3
Permeabilidad ( $\mu_r$ )	1

Tabla 4.6 Características de material dieléctrico.

La herramienta cuenta con ejes de coordenadas cartesianas en la grilla de diseño de la antena. El plano cartesiano tiene la siguiente configuración:

Eje X: Base del triángulo equilátero y ancho del dieléctrico.

Eje Y: Altura del triángulo equilátero y plano tierra.

Eje Z: Espesor de las placas

Las medidas del plano tierra y dieléctrico usadas en simulación son 240 x 200 mm; el espesor del dieléctrico es 1,5 mm y del cobre de 0,035 mm, ya que las placas en el mercado tienen estos valores. Finalmente, para la separación entre el plano de la estructura de la antena y el plano tierra, se toma un valor de 4,5 mm en éste diseño, siendo un valor usado en la literatura.

En la Figura 4.3 se muestra el diseño de la antena con las alturas calculadas anteriormente. Así mismo, en la Figura 4.4 se muestran los resultados del parámetro S11. En dicha figura, el criterio utilizado para determinar el ancho de banda consiste en observar el intervalo de frecuencias donde el S11 toma valores inferiores a -10 dB. Con esto se tiene que el ancho de banda es aquella porción de frecuencia donde el porcentaje de energía reflejada es inferior al 10% [40].

En la Tabla 4.3 se muestran los anchos de banda obtenidos junto con las respectivas frecuencias de corte.

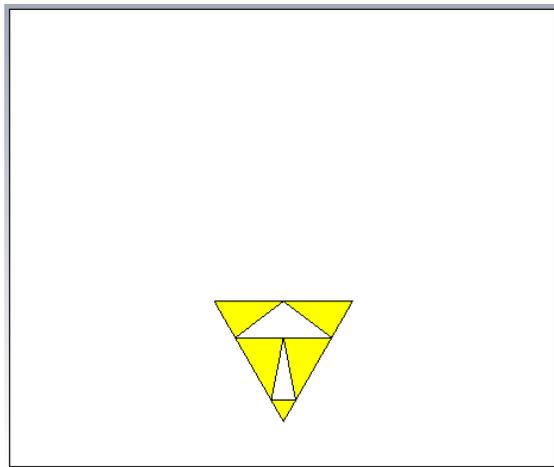


Figura 4.16 Diseño de la antena de tres iteraciones con  $\delta$  variable.

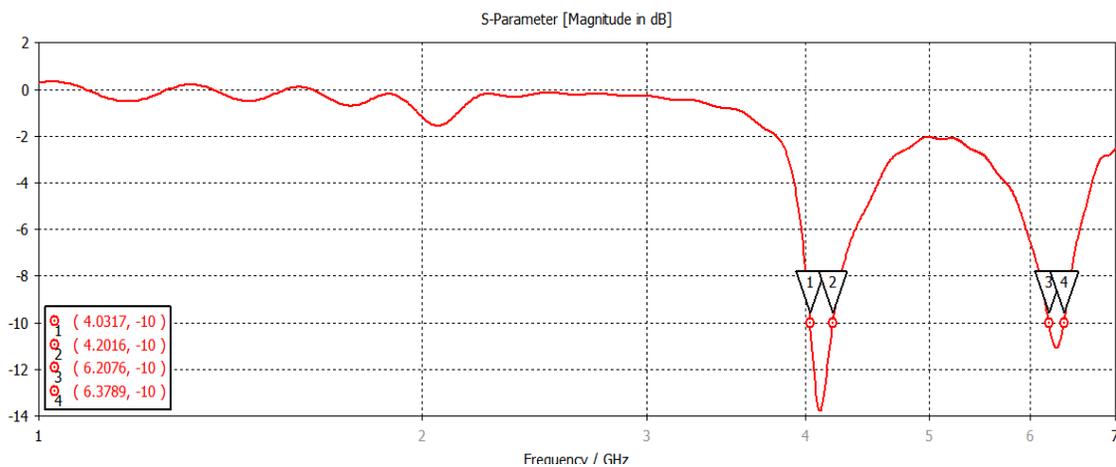


Figura 4.17 Curva del parámetro  $S_{11}$  para la antena de tres iteraciones con  $\delta$  variable.

Iteración	Altura [mm]	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]
1	9,3	6,2076	6,3789	6,2932	0,1713
2	52,5	-	-	-	-
3	36,6	4,0317	4,2016	4,1166	0,1699

Tabla 4.7 Anchos de banda para el diseño con  $\delta$  variable.

En la Figura 4.4 se observan sólo dos caídas de la magnitud del parámetro  $S_{11}$  inferiores a  $-10\text{dB}$ , indicando que son dos bandas de operación las cuales están centradas alrededor de  $4\text{ GHz}$  y  $6\text{ GHz}$ . Estos valores no son satisfactorios porque no coinciden con las bandas de operación objetivo. Por lo anterior, se toma el valor de  $\delta$  como constante (en este caso 2). Esto implica que la frecuencia central de la siguiente iteración será el doble de la actual. No obstante, en algunos trabajos de la literatura, se ha usado este valor de  $\delta$  cuando las frecuencias no son múltiplos enteros una de la otra.

En la Tabla 4.4 se muestran los valores de las alturas correspondientes a cada iteración con el nuevo valor del parámetro  $\delta$ .

$F_n$ [GHz]	n	$\delta$	h [mm]
1,7325	3	2	105,2
2,437	2	2	37,4
5,777	1	2	7,8

Tabla 4.8 Alturas correspondientes a cada iteración con  $\delta$  igual a 2.

Teniendo en cuenta lo anterior, se lleva a cabo el diseño de la antena en el simulador. La estructura de la antena se puede apreciar en la Figura 4.5 y los resultados del parámetro S11 en la Figura 4.6, los cuales muestran cuatro bandas de operación con valores diferentes a los objetivos.

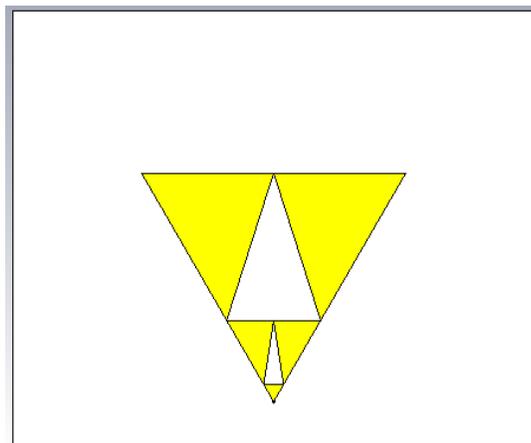


Figura 4.18 Diseño de la antena de tres iteraciones con  $\delta$  igual a 2.

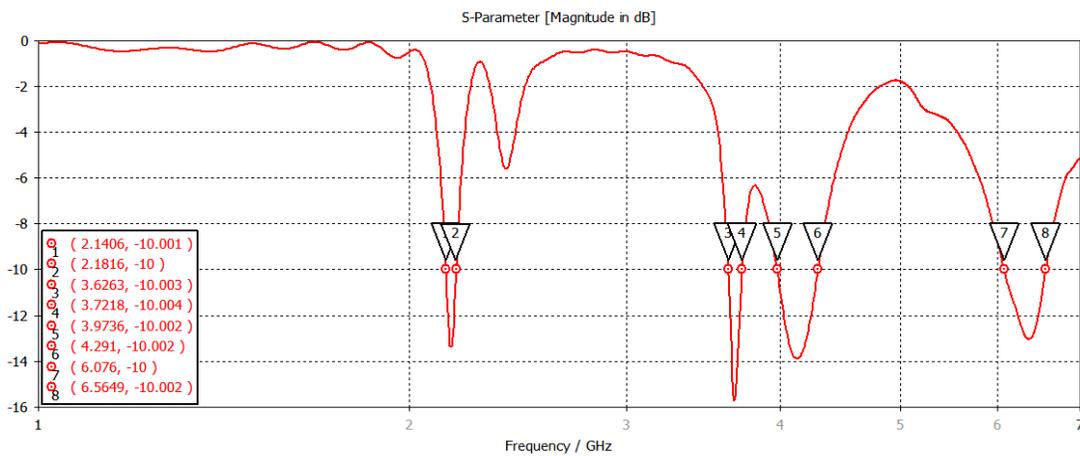


Figura 4.19 Parámetro  $S_{11}$  de antena de tres iteraciones con  $\delta$  igual a 2.

En la Tabla 4.5 se muestran las frecuencias de corte, junto con los correspondientes anchos de banda, arrojados por el simulador. Como puede notarse, no existe correspondencia con los valores esperados (ver valores objetivos en la Tabla 3.4). Se decide, entonces, simular cada triángulo de manera independiente con las alturas ya calculadas, debido a que, en teoría, cada triángulo representa una banda de operación distinta, lo que hace que cada iteración pueda ser considerada como una antena individual. Con lo anterior, se puede llevar a cabo un diseño de tres iteraciones, analizando cada una por separado.

Banda	F <sub>L</sub> [GHz]	F <sub>H</sub> [GHz]	F <sub>C</sub> [GHz]	BW [GHz]
1	2,1406	2,1816	2,1611	0,041
2	3,6263	3,7218	3,6740	0,0955
3	3,9736	4,291	4,1323	0,3174
4	6,076	6,5649	6,3204	0,4889

Tabla 4.9 Resultado de antena de tres iteraciones con  $\delta$  igual a 2.

### Simulación de triángulos de una iteración

Se toman los valores de las alturas calculadas previamente y se realiza el diseño del triángulo para cada una de ellas. En las Figuras 4.7 y 4.8 se muestra el parámetro S11 para las alturas de 105,28 mm y 37.4230 mm, respectivamente, mostrando frecuencias de operación distintas a las objetivo. En la Figura 4.9 se presenta el resultado del parámetro S11 para la altura de 7,8933 mm, con esta altura la antena no opera a ninguna banda de frecuencia, dado que no alcanza el valor del parámetro S11 de referencia.

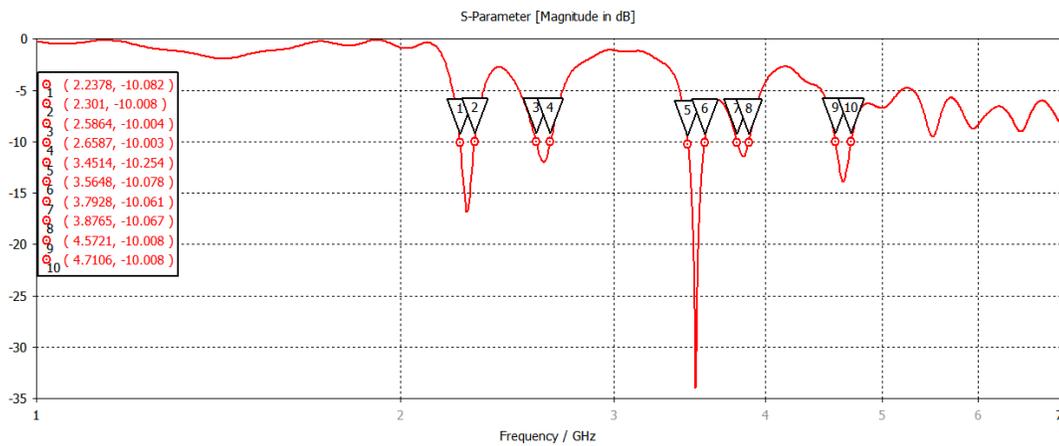


Figura 4.20 Curva del parámetro  $S_{11}$  para el triángulo con altura de 105,28 mm.

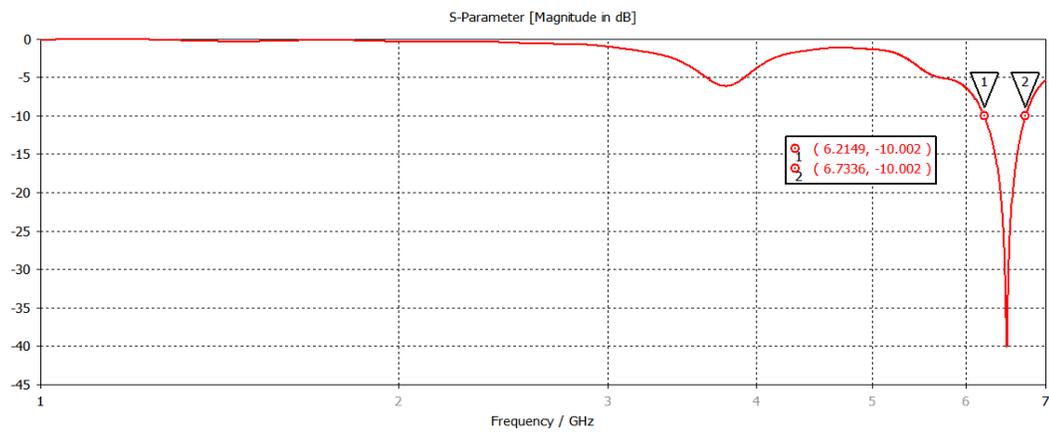


Figura 4.21 Curva del parámetro  $S_{11}$  para el triángulo con altura de 37,4230 mm.

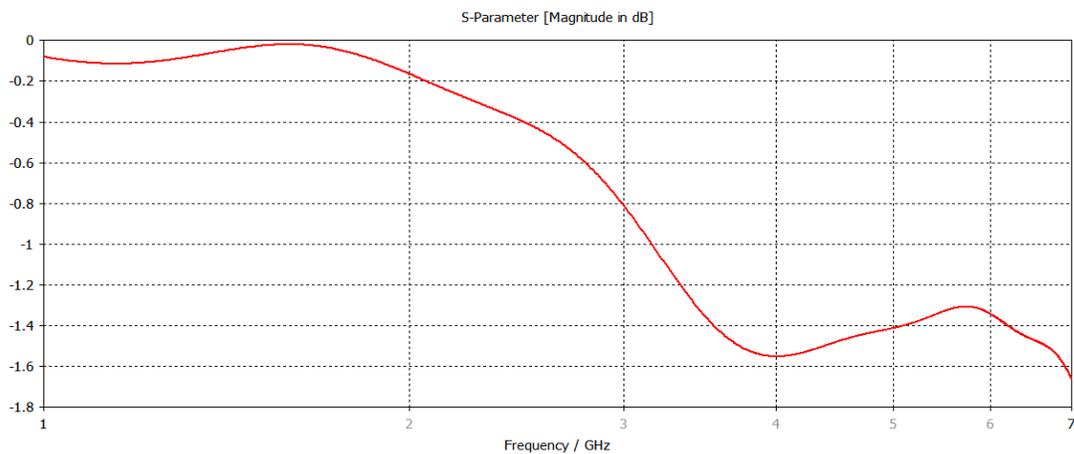


Figura 4.22 Curva del parámetro  $S_{11}$  para el triángulo con altura de 7,8933 mm.

Los resultados anteriores se resumen en la Tabla 4.6. Como las frecuencias obtenidas no coinciden con las objetivo, se decide variar cada altura, modificando las coordenadas de los vértices de cada triángulo, ya que no es posible realizar de manera automática este proceso, hasta que el resultado de la frecuencia central sea el deseado.

Altura [mm]	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]
105,281385	2,2378	2,301	2,2694	0,0632
37,4230611	6,2149	6,7336	6,4742	0,5187
7,89337026	-	-	-	-

Tabla 4.10 Frecuencias de operación de acuerdo a cada altura.

### Variación de alturas en diseños individuales

- **Banda de 5,777 GHz**

Se incrementa la altura de 7,8933 mm para que la frecuencia central de la banda de operación disminuya. El mejor resultado se da al incrementar la altura del triángulo hasta 20,4120 mm, con una frecuencia central de 5,776 GHz y un ancho de banda de 0,2262 GHz (Este valor es mucho más grande que el ancho de banda objetivo de 0,045 GHz). Los resultados del parámetro  $S_{11}$  se muestran en la Figura 4.10. Finalmente, los valores de las simulaciones se resumen en la Tabla 4.7, y el diseño de la antena, con una altura de 20,4120 mm, se observa en la Figura 4.11.

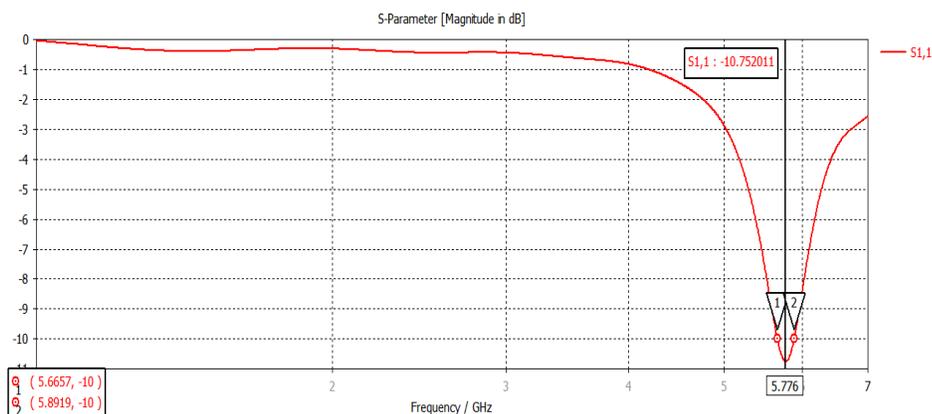


Figura 4.23 Curva del parámetro  $S_{11}$  para el triángulo con altura de 20,4120 mm.

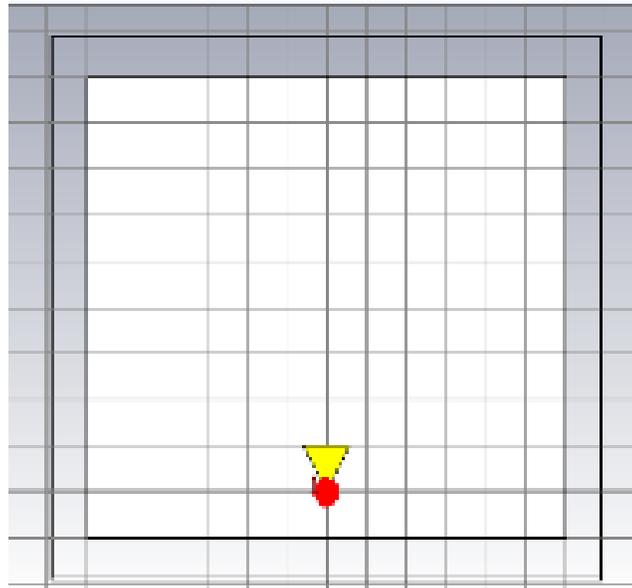


Figura 4.24 Diseño de antena con altura de 20,412 mm.

Altura [mm]	F <sub>c</sub> [GHz]
7,8	-
15,7	>7
20,4	5,776
23,6	5,56

Tabla 4.11 Frecuencia central según la altura de cada triángulo para la banda de 5,777 GHz.

- **Banda de 2,416 GHz**

Para obtener la frecuencia de 2,416 GHz se realiza el mismo procedimiento anterior, encontrando el mejor resultado en 114,7483 mm ya que la frecuencia central es de 2,4209 GHz con un ancho de banda de 0,0475 GHz. En la Figura 4.12 se encuentran los resultados del parámetro S<sub>11</sub>.

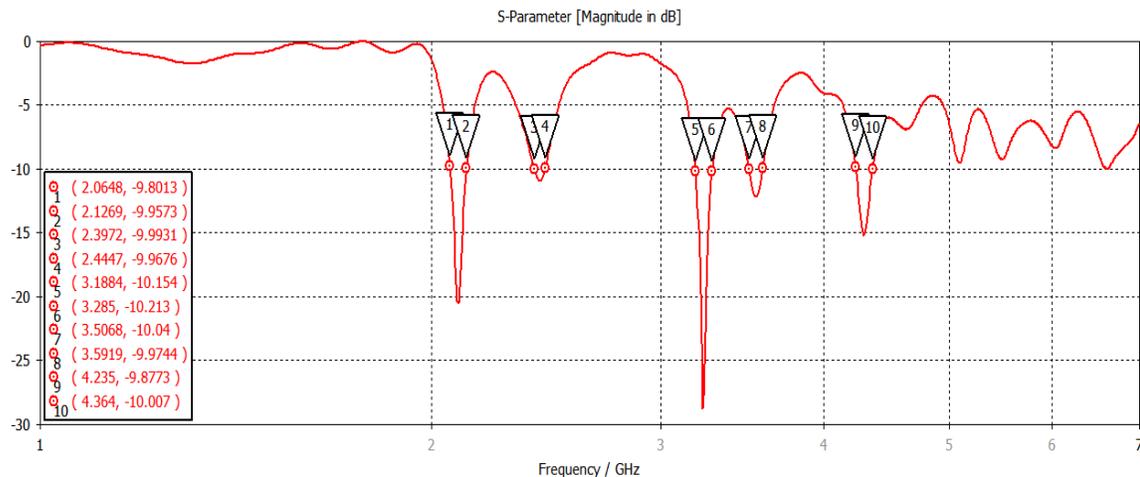


Figura 4.25 Curva del parámetro  $S_{11}$  para el triángulo con altura de 114,7483 mm.

Aunque el ancho de banda para la altura de 114,7483 mm, es menos de la mitad del ancho de banda esperado y la frecuencia de corte inferior también difiere, este diseño es el más cercano al objetivo, ya que al realizar varios ajustes del orden de los milímetros no se consigue una mejora notable.

En la Tabla 4.8 se resumen los datos obtenidos al realizar las distintas variaciones.

Altura [mm]	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]
37,4	6,2149	6,7336	6,4742	0,5187
74,8	3,5065	3,6643	3,5854	0,1578
112,2	2,1079	2,1697	2,1388	0,0618
114,7	2,3972	2,4447	2,4209	0,0475

Tabla 4.12 Frecuencias obtenidas según la altura de cada triángulo para la banda de 2,416 GHz.

- **Banda de 1,7325 GHz**

Para conseguir la banda de operación alrededor de 1732,5 MHz se realizan incrementos más pequeños, debido a que su altura es la más grande con respecto a las demás. Para un triángulo con altura de 142,6239 mm, las frecuencias de corte obtenidas son 1,681GHz y 1,726 GHz como se observa en la Figura 4.13. El resultado del ancho de banda es de 0,04548 GHz, con frecuencia central de 1,702 GHz. Aunque esto no satisface las frecuencias de corte esperadas, de 1,710 y 1,755 GHz, el ancho de banda cumple con el valor predefinido a pesar de estar desplazado.

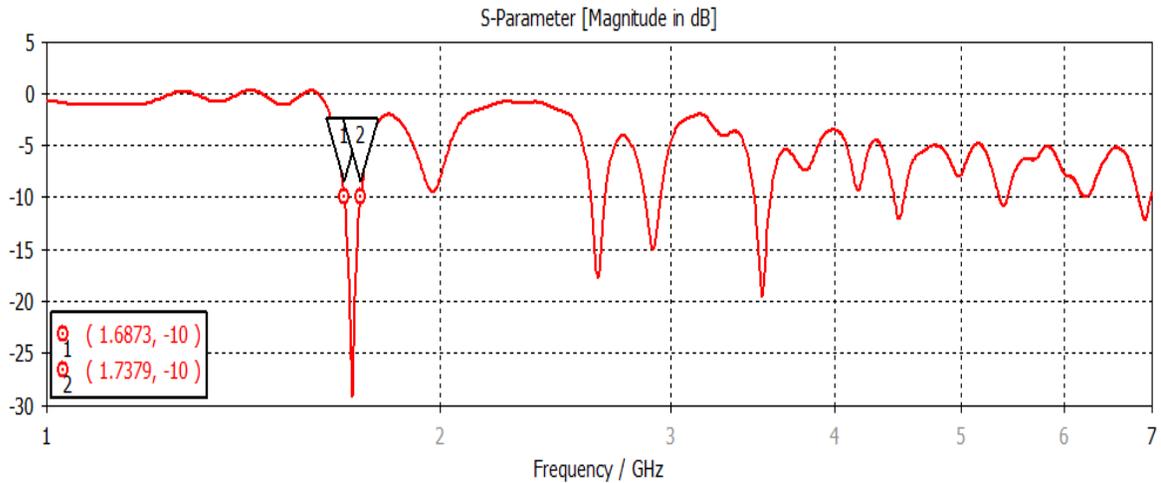


Figura 4.26 Curva del parámetro  $S_{11}$  para el triángulo con altura de 142.6239 mm.

En la Tabla 4.9 se resumen los resultados de las bandas de operación cuando es variada la altura del triángulo.

Altura [mm]	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]
105.2	2.2378	2.301	2.2694	0.0632
131.6	1.8179	1.8736	1.8457	0.0557
142.6	1.681	1.726	1.7035	0.045
147.3	1.6367	1.6854	1.6610	0.0487
157.9	1.528	1.5818	1.5549	0.0538

Tabla 4.13 Frecuencia central según la altura de cada triángulo para la banda de 1,7325 GHz.

### Mejores Resultados con diseño de triángulo Individual

En la Tabla 4.10 se resume los mejores resultados de cada altura individualmente.

Iteración Individual	Altura [mm]	FL [GHz]	FH [GHz]	FC [GHz]	BW [GHz]
1	20,4	5,5776	6,0063	5,795	0,4286
2	114,7	2,3972	2,4447	2,4209	0,0475
3	142,6	1,6811	1,7265	1,702	0,0454

Tabla 4.14 Parámetros de antenas con alturas individuales.

## Antena de tres iteraciones

Al tener el comportamiento y parámetros de cada una de las alturas de la antena, se genera el diseño basado en la geometría de Parany de tres iteraciones con las alturas de los diseños individuales. El modelo que se obtiene de esta unión se ve en la Figura 4.14.

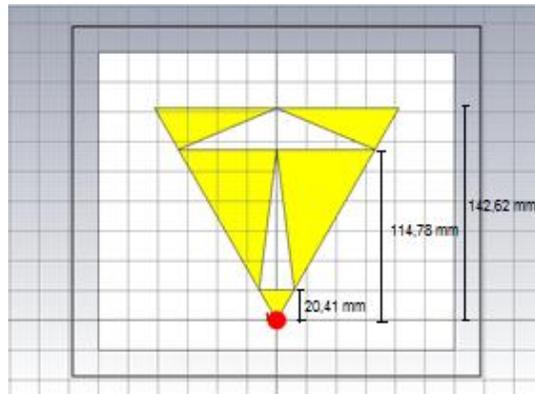


Figura 4.27 Diseño de antena de 3 iteraciones.

La Figura 4.14 muestra diferentes triángulos, cada uno de ellos está relacionado con una banda de frecuencia. Las alturas se mantienen de acuerdo a las alturas individuales como se observa en la Tabla 4.10.

- **Parámetros  $S_{11}$**

En la Figura 4.15 se presentan cuatro caídas en distintas bandas de frecuencia, pero se analizan tres, ya que son de interés para el presente trabajo de grado.

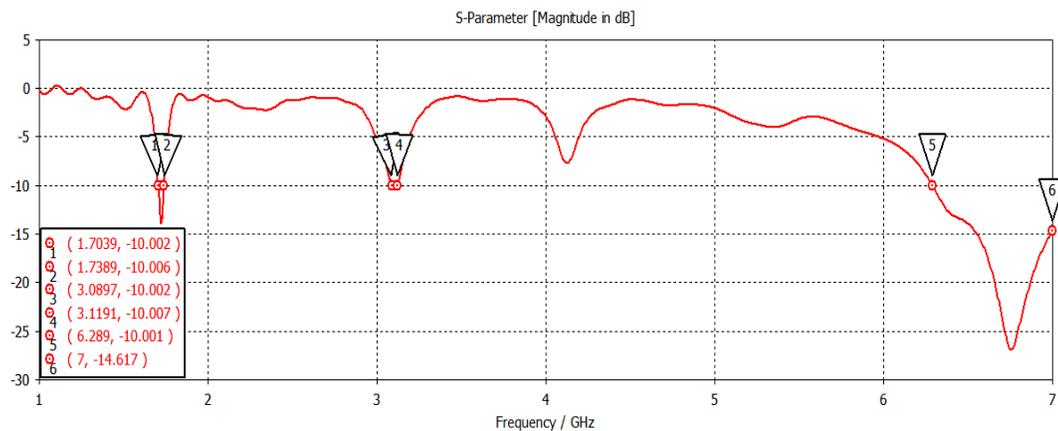


Figura 4.28 Curva del parámetro  $S_{11}$  para la antena de tres iteraciones.

En la Tabla 4.11 se muestran los parámetros que se obtienen al unir las tres alturas. Para cada banda de interés, se toma la caída más cercana a la objetivo, los valores del ancho de banda son muy bajos respecto a los objetivos, especialmente en las bandas de 1,7 y 3 GHz, por lo tanto se decide variar la separación del plano tierra y el de la parte activa de la antenna con el fin de incrementar este parámetro.

Iteración	Altura [mm]	F <sub>L</sub> [GHz]	F <sub>H</sub> [GHz]	F <sub>C</sub> [GHz]	BW [GHz]
1	20,4	6,289	7	6,6445	0,711
2	114,7	3,0897	3,1191	3,1044	0,0294
3	142,6	1,7039	1,7389	1,7214	0,035

Tabla 4.15 Parámetros de diseño de antenna inicial con 3 iteraciones.

### Variación del plano tierra y la parte activa de la antenna

En las Figura 4.16, se muestra el comportamiento del parámetro S<sub>11</sub> al realizar la variación del plano tierra y la antenna. Los resultados para dichas variaciones se resumen en la Tabla 4.12. El mejor resultado es para una separación de 5,3 mm.

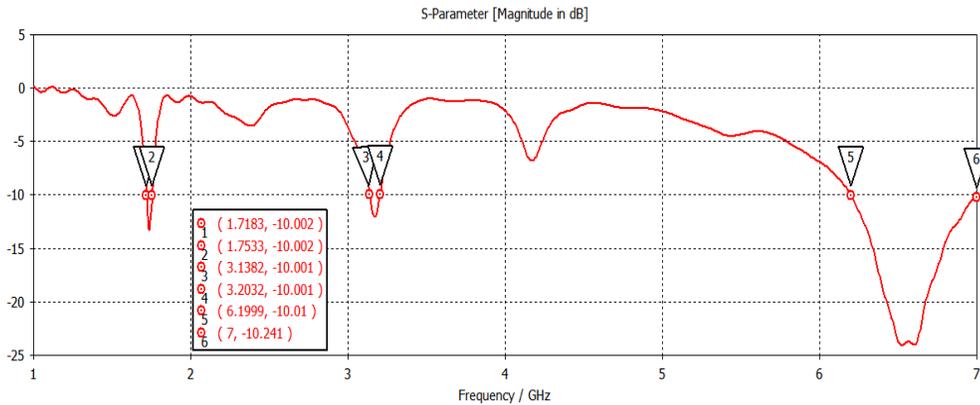


Figura 4.29 Curva del parámetro S<sub>11</sub> con una separación de 5,3 mm.

Separación [mm]	Banda de 1,7324 GHz				Banda de 2,416 GHz				Banda de 5,777 GHz			
	F <sub>L</sub> [GHz]	F <sub>H</sub> [GHz]	F <sub>C</sub> [GHz]	BW [GHz]	F <sub>L</sub> [GHz]	F <sub>H</sub> [GHz]	F <sub>C</sub> [GHz]	BW [GHz]	F <sub>L</sub> [GHz]	F <sub>H</sub> [GHz]	F <sub>C</sub> [GHz]	BW [GHz]
4	1,6892	1,7241	1,70665	0,0349	-	-	-	-	6,3242	7	6,6621	0,6758
4,5	1,7039	1,7389	1,7214	0,035	3,0897	3,1191	3,1044	0,0294	6,289	7	6,6445	0,711
5	1,7139	1,7489	1,7314	0,035	3,1224	3,1762	3,1493	0,0538	6,2421	7	6,62105	0,7579
<b>5,3</b>	<b>1,7183</b>	<b>1,7533</b>	<b>1,7358</b>	<b>0,035</b>	<b>3,1382</b>	<b>3,2032</b>	<b>3,1707</b>	<b>0,065</b>	<b>6,1999</b>	<b>7</b>	<b>6,59995</b>	<b>0,8001</b>
5,5	1,72	1,7543	1,73715	0,0343	3,1456	3,2188	3,1822	0,0732	6,1646	6,9444	6,5545	0,7798
6	1,7254	1,7566	1,741	0,0312	3,1635	3,2503	3,2069	0,0868	6,0732	6,8052	6,4392	0,732

Tabla 4.16 Bandas de operación al variar la separación de los planos.

Aunque se logra mejorar los anchos de banda, las bandas de frecuencia no son iguales a las objetivo, por lo tanto se varía la altura de los triángulos de cada iteración.

### Variación de la altura de triángulos en la antena de tres iteraciones

Debido a que la frecuencia de la segunda banda de operación está más alejada que la de la primera, respecto a las bandas objetivo, se decide variar la segunda altura con el fin de lograr que la frecuencia central esté alrededor de dicho valor, la curva del parámetro S<sub>11</sub> se muestra en la Figura 4.17.

En la Tabla 4.13 se resumen los resultados obtenidos en cada una de las gráficas. El mejor resultado se obtiene para la altura de 30 mm, ya para todas las bandas se presenta un acercamiento a las frecuencias objetivo, especialmente para la banda de 2,416 GHz. El comportamiento de los parámetros S<sub>11</sub> se muestra a continuación:

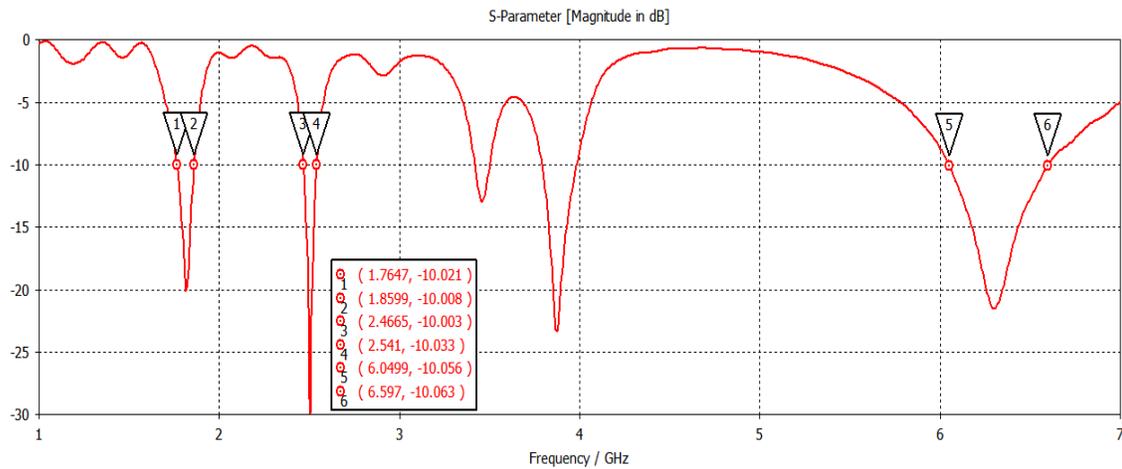


Figura 4.30 Curva del parámetro  $S_{11}$  para la antena de tres iteraciones con altura de segunda iteración de 30 mm.

Altura [mm]	Banda de 1,7324 GHz				Banda de 2,416 GHz				Banda de 5,777 GHz			
	FL [GHz]	FH [GHz]	FC [GHz]	BW [GHz]	FL [GHz]	FH [GHz]	FC [GHz]	BW [GHz]	FL [GHz]	FH [GHz]	FC [GHz]	BW [GHz]
30	1,7647	1,8599	1,8123	0,0952	2,4665	2,541	2,50375	0,0745	6,0499	6,597	6,32345	0,5471
50	1,6263	1,6714	1,64885	0,0451	2,8297	2,9009	2,8653	0,0712	6,3486	7	6,6743	0,6514
70	1,6263	1,6714	1,64885	0,0451	2,8297	2,9009	2,8653	0,0712	6,3486	7	6,6743	0,6514
90	-	-	-	-	3,9778	4,02423	4,001015	0,04643	6,2663	6,938	6,60215	0,6717

Tabla 4.17 Frecuencias resultantes para variación de segunda altura.

Ahora se varía la altura de 142 mm para lograr que la frecuencia de corte inferior sea de 1,7 GHz. En la Tabla 4.14 se resumen los resultados obtenidos en cada una de las gráficas, el mejor comportamiento de la antena se da para una altura de 148 mm como se observa en la curva del parámetro  $S_{11}$  mostrado en la Figura 4.18.

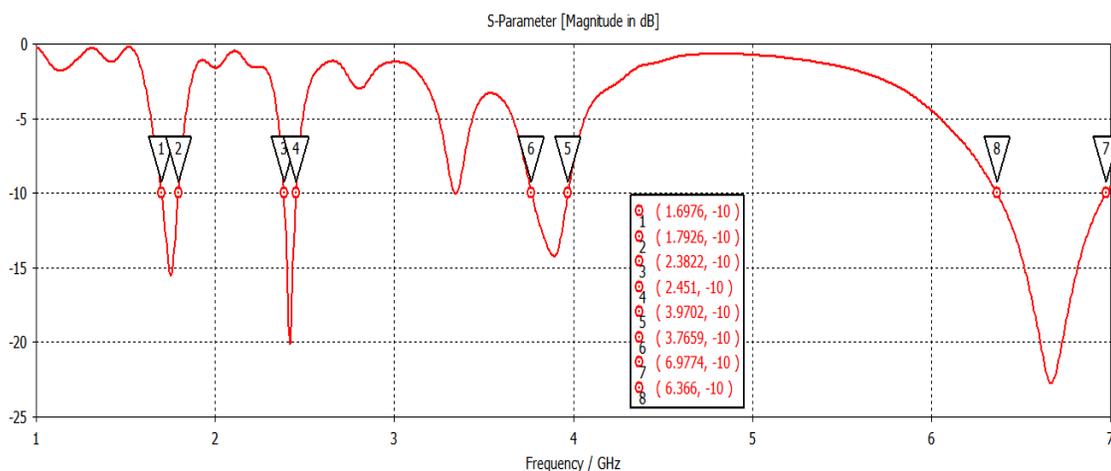


Figura 4.31 Curva del parámetro  $S_{11}$  para la antena de tres iteraciones con altura de segunda iteración de 148 mm.

Altura [mm]	Banda de 1,7324 GHz				Banda de 2,416 GHz				Banda de 5,777 GHz			
	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]
144	1,7478	1,8418	1,7948	0,094	2,4482	2,5226	2,4854	0,0744	6,4439	7	6,72195	0,5561
146	1,7226	1,8183	1,77045	0,0957	2,4148	2,4864	2,4506	0,0716	6,4563	7	6,72815	0,5437
<b>148</b>	<b>1,6976</b>	<b>1,7926</b>	<b>1,7451</b>	<b>0,095</b>	<b>2,3822</b>	<b>2,451</b>	<b>2,4166</b>	<b>0,0688</b>	<b>6,366</b>	<b>6,9774</b>	<b>6,6717</b>	<b>0,6114</b>

Tabla 4.18 Frecuencias resultantes para variación de segunda iteración.

Ahora para lograr el ajuste en la banda de 5,777 GHz se varía la altura de 20 mm, incrementando la altura inicialmente en 2 mm para que la frecuencia de operación disminuya. El mejor resultado se da con la altura de 24mm y la curva del parámetro  $S_{11}$  se presenta en la Figura 4.19.

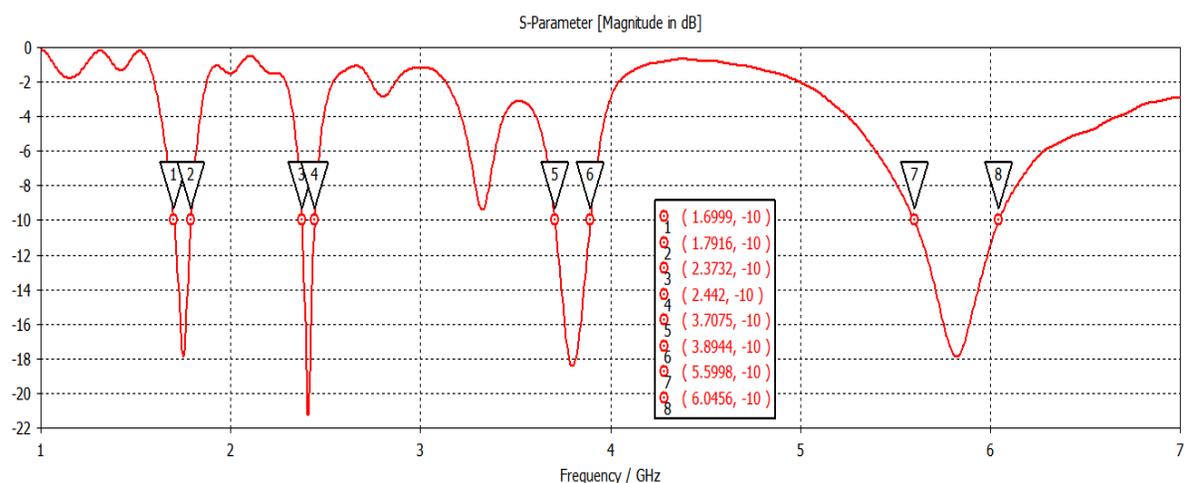


Figura 4.32 Curva del parámetro S11 para la antena de tres iteraciones con altura de tercera iteración de 24 mm.

A continuación, en la Tabla 4.15 se muestra el resumen de los parámetros para la variación de la tercera iteración.

Altura [mm]	Banda de 1,7324 GHz				Banda de 2,416 GHz				Banda de 5,777 GHz			
	FL [GHz]	FH [GHz]	FC [GHz]	BW [GHz]	FL [GHz]	FH [GHz]	FC [GHz]	BW [GHz]	FL [GHz]	FH [GHz]	FC [GHz]	BW [GHz]
22	1,6985	1,7917	1,7451	0,0932	2,3782	2,447	2,4126	0,0688	6,0265	6,6208	6,32365	0,5943
24	1,6999	1,7916	1,7457	0,0917	2,3732	2,442	2,4076	0,0688	5,9898	6,0456	6,0177	0,0558

Tabla 4.19 Frecuencias resultantes para variación de la tercera iteración.

En la Figura 4.20 se muestra el diseño de la antena con las alturas de 24, 30 y 148 mm.

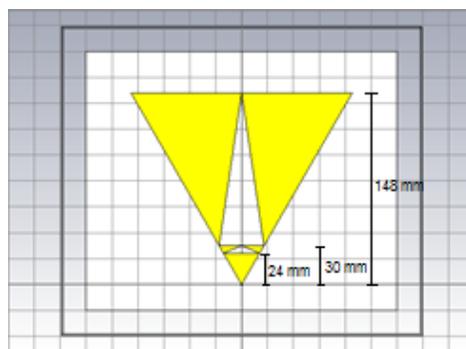


Figura 4.33 Diseño de antena de 3 iteraciones.

Los resultados de las variaciones se presentan en la Tabla 4.16.

Altura [mm]	FL [GHz]	FH [GHz]	FC [GHz]	BW [GHz]
24	1,6999	1,7916	1,74575	0,0917
30	2,3782	2,442	2,4101	0,0638
148	5,5998	6,0456	5,8227	0,4458
-	3,7075	3,8944	3,80095	0,1869

Tabla 4.20 Frecuencias para el diseño de antena con 3 iteraciones.

El mayor ancho de banda se obtiene para la banda de 5,5998 GHz con 0,4458 GHz con unas frecuencias de corte de 5,5998 y 6,0456 GHz, mientras que el menor valor lo tiene la banda de 2,3782 GHz con 0,0638 GHz.

Se decide dejar este diseño de la antena, ya que al realizar otras variaciones se presentan cambios desfavorables en los parámetros de la antena como corrimientos de las bandas de frecuencia, disminución del ancho de banda o aumento del parámetro S11, debe mencionarse también, que es el modelo que más se acerca con los requerimientos establecidos en la Tabla 3.4, aunque para la frecuencia de 2,4 GHz no se cumple dado que hay un corrimiento en las frecuencias de corte y en el ancho de banda. En la Tabla 4.17 se presenta la comparación de los parámetros de los valores objetivo y los de simulación.

Nombre de Banda	Valores Objetivo				Valores Simulados			
	F <sub>L</sub> [GHz]	F <sub>H</sub> [GHz]	F <sub>c</sub> [GHz]	BW [GHz]	F <sub>L</sub> [GHz]	F <sub>H</sub> [GHz]	F <sub>c</sub> [GHz]	BW [GHz]
WIFI 5 GHz	1,710	1,755	1,7325	0,045	1,6999	1,7916	1,74575	0,0917
WIFI 2,4 GHz	2,400	2,474	2,437	0,074	2,3782	2,442	2,4101	0,0638
LTE AWS UpLink	5,745	5,809	5,777	0,032	5,5998	6,0456	5,8227	0,4458

Tabla 4.21 Comparación de frecuencias objetivo y de simulación.

### Antena de tres iteraciones con mayor contacto entre los triángulos

Se realiza un diseño con un incremento en el contacto de los triángulos de la antena, con el fin de evitar que en la construcción de la antena perdieran contacto entre ellos. Para esta versión no se cambian las alturas de las iteraciones, si no que se amplía el ancho de los vértices internos de los triángulos en 1 mm. En la Figura 4.21 se observa el diseño de la antena y sus respectivos parámetros S11 en la Figura 4.22.

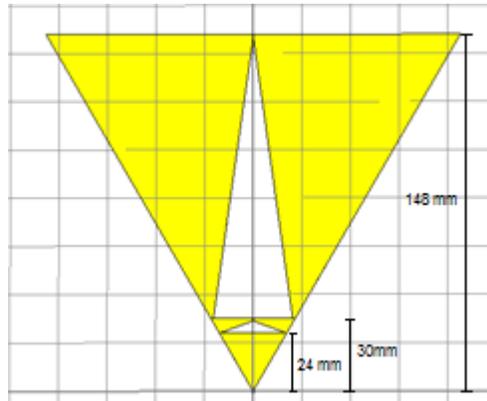


Figura 4.34 Diseño de antena de 3 iteraciones (Versión Final).

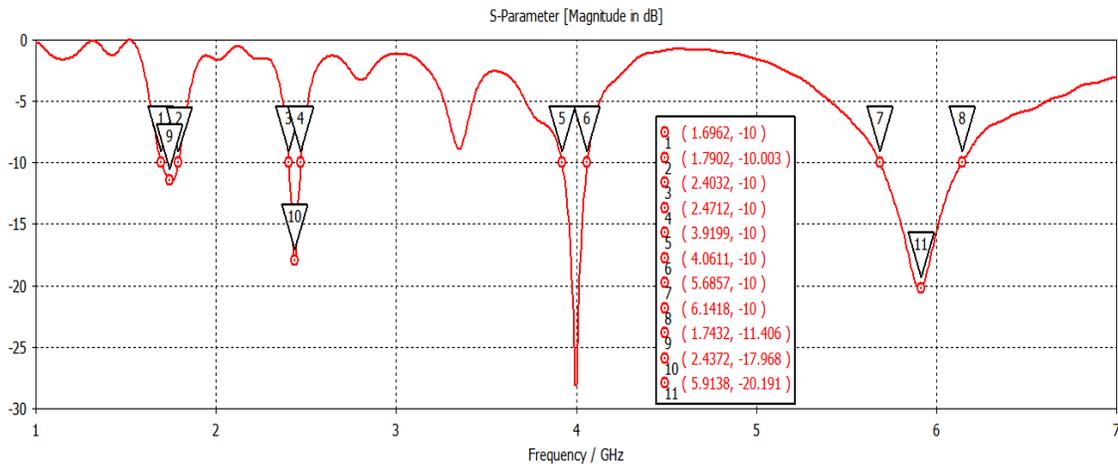


Figura 4.35 Gráfica de parámetro S<sub>11</sub> para diseño de antena de 3 iteraciones.

El ancho de banda incrementa en las frecuencias de 1,7 y 2,4 GHz en 3 y 5 MHz respectivamente, mientras que en la frecuencia de 5,7 GHz disminuye alrededor de 9 MHz, siendo este último un valor muy pequeño respecto al ancho de banda, que está alrededor de 450 MHz. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.18.

Altura [mm]	F <sub>L</sub> [GHz]	F <sub>H</sub> [GHz]	F <sub>C</sub> [GHz]	BW [GHz]
24	1,6962	1,7902	1,7432	0,094
30	2,4032	2,4712	2,4372	0,068
148	5,6857	6,1418	5,9137	0,4561
	3,9199	4,0611	3,9905	0,1412

Tabla 4.22 Parámetros de diseño de antena con 3 iteraciones (Versión Final).

A continuación, se presentan los patrones de radiación de cada una de las frecuencias en 3D para el diseño final.

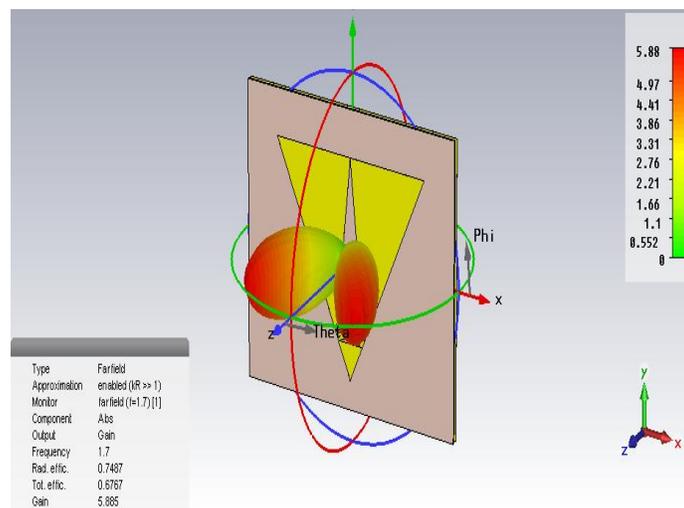


Figura 4.36 Patrón de radiación en 3D para la frecuencia de 1,7432 GHz.

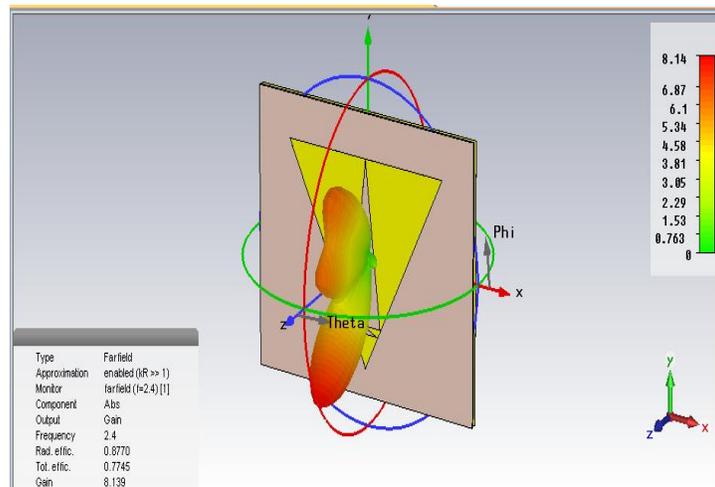


Figura 4.37 Patrón de radiación en 3D para la frecuencia de 2,4372 GHz.

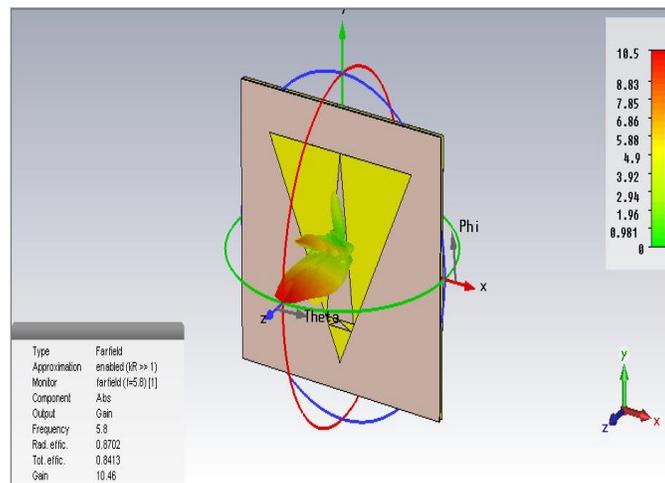


Figura 4.38 Patrón de radiación en 3D para la frecuencia de 5,777 GHz.

### 4.3. Procedimiento implementación

En esta fase se implementa el modelo optimizado de la antena diseñada. Para ello se eligieron materiales que tuvieran similitud con los que se configuraron en la simulación. El proceso de fabricación se realizó con una CNC<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> El valor de precisión de la máquina CNC es desconocido dado que no se tiene acceso directo a la máquina con que se realizó el grabado de la antena.

### 4.3.1 Materiales

Para la fabricación de la antena se tienen en cuenta los siguientes materiales

- Máquina CNC
- Dos baquetas para circuito
- Taladro
- Brocas de diferentes diámetros
- Soldadura
- Resina para soldar
- Conector SMA macho

### 4.3.2. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación consiste en los siguientes pasos:

- Cargar el diseño de la simulación
- Configurar sus correspondientes parámetros.
- Iniciar el proceso de grabado
- Abrir de los agujeros para posteriormente poner el conector
- Lijar la superficie
- Soldar el plano tierra el conector
- Pegar los separadores
- Soldar el otro extremo del conector a la antena
- Aplicar colofonia para evitar su oxidación.

En la Figura 4.26 se observa la antena después del proceso.

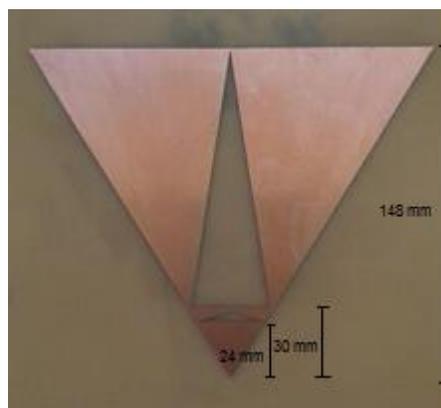


Figura 4.39 Parche de la antena fabricado.

Finalmente se adhiere una pieza en la parte posterior para dar soporte a la antena y facilitar su manipulación, esto se observa en la Figura 4.27.



Figura 4.40 Construcción final de la antena con soporte.



## Capítulo 5

### Resultados y Análisis

Inicialmente se hacen medidas con el analizador vectorial de redes. La interfaz del dispositivo muestra gráficas tales como el parámetro  $S_{11}$ , el SWR y la impedancia en función de la frecuencia.

En primer lugar, se miden las frecuencias de corte de cada banda y a partir de ellas se obtiene la frecuencia central y el ancho de banda. También se toman medidas relacionadas con las pérdidas de retorno de la antena. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.1.

Frecuencia [GHz]	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_c$ [GHz]	BW [GHz]	$S_{11}$ [dB]
1,7325	1,732	1,853	1,7925	0,121	-14,406
2,437	2,411	2,5326	2,4718	0,1216	-14,452
4	4,3539	4,4164	4,38515	0,0625	-14,541
5,777	5,9045	5,9431	5,9238	0,0386	-12,967

Tabla 5.23 Parámetros medidos de la antena implementada.

Los demás parámetros de la antena a analizar se muestran con más detalle en las siguientes secciones.

#### 5.1. Parámetro $S_{11}$

En la Figura 5.1 se muestran los resultados arrojados por el analizador de redes referentes al parámetro  $S_{11}$  para todas las bandas de operación de la antena. Así

mismo, se muestran tablas a fin de realizar una comparación entre los resultados de la simulación y los obtenidos en la fase de experimentación para cada una de las bandas de frecuencia.

En la Figura 5.1, se muestra el comportamiento de la magnitud del parámetro  $S_{11}$  en función de la frecuencia. Más adelante se muestran curvas con mayor detalle del comportamiento de este parámetro.

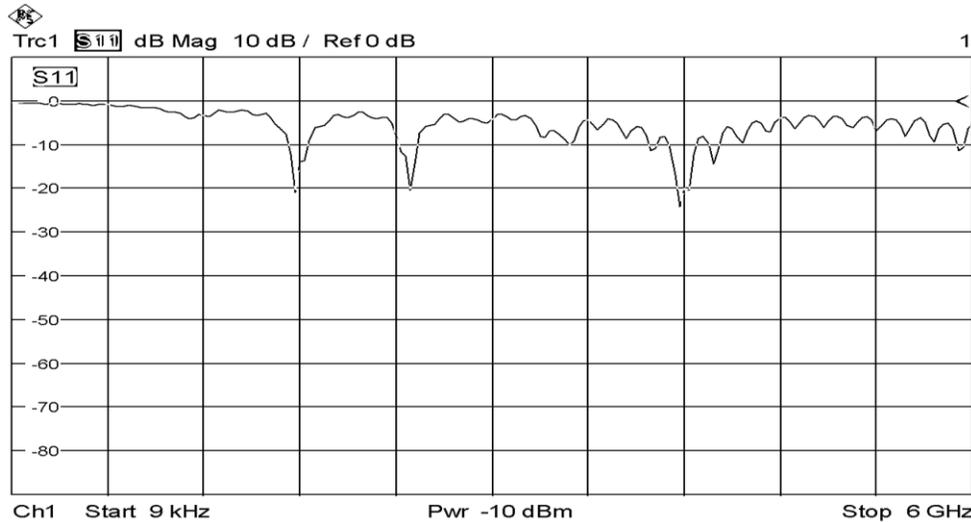


Figura 5.41 Gráfica de parámetros  $S_{11}$  obtenidas del analizador de redes.

- **Banda de 1,7325 GHz**

En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestran las gráficas del parámetro  $S_{11}$ . Dichos valores resultan de la simulación y de la medición con el analizador de redes.

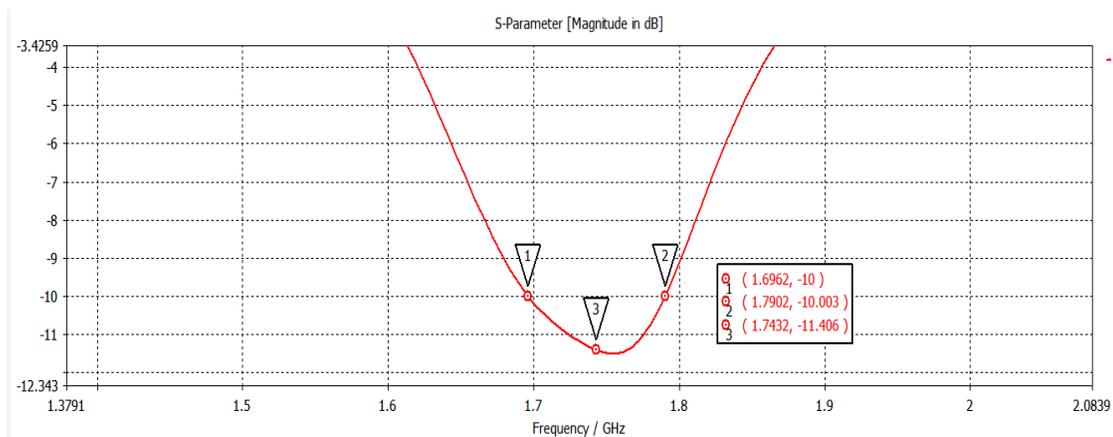


Figura 5.42 Curva de simulación del parámetro  $S_{11}$  para banda de 1,7325 GHz.

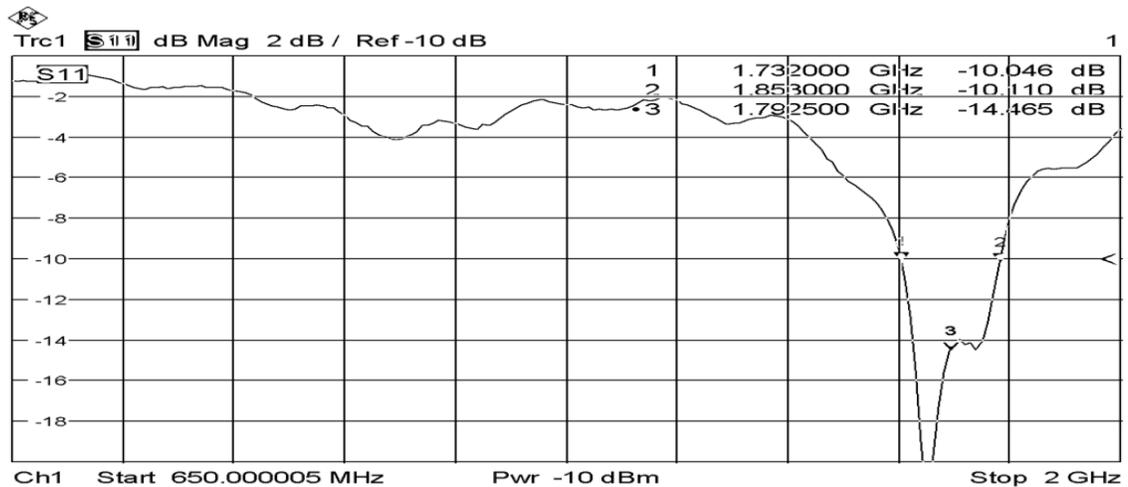


Figura 5.43 Curva experimental del parámetro  $S_{11}$  para banda de 1,7325 GHz.

Para la banda de 1.7 GHz los valores experimentales no son muy diferentes a los entregados por la simulación. La frecuencia central experimental está desplazada 50 MHz. De las gráficas en cuestión se obtuvieron los datos consignados en la Tabla 5.2.

	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_c$ [GHz]	BW [GHz]	$S_{11}$ [dB]
Simulación	1,6962	1,7902	1,7432	0,094	-11,406
Experimental	1,732	1,853	1,7925	0,121	-14,465

Tabla 5.24 Comparación de resultados de parámetros  $S_{11}$  de la banda 1,7325 GHz.

- **Banda de 2,437 GHz**

En las Figura 5.4 y 5.5 se presentan las curvas del parámetro  $S_{11}$ , en ellas están señalizadas las frecuencias de corte y la frecuencia central, y el valor del parámetro  $S_{11}$  para esta última.

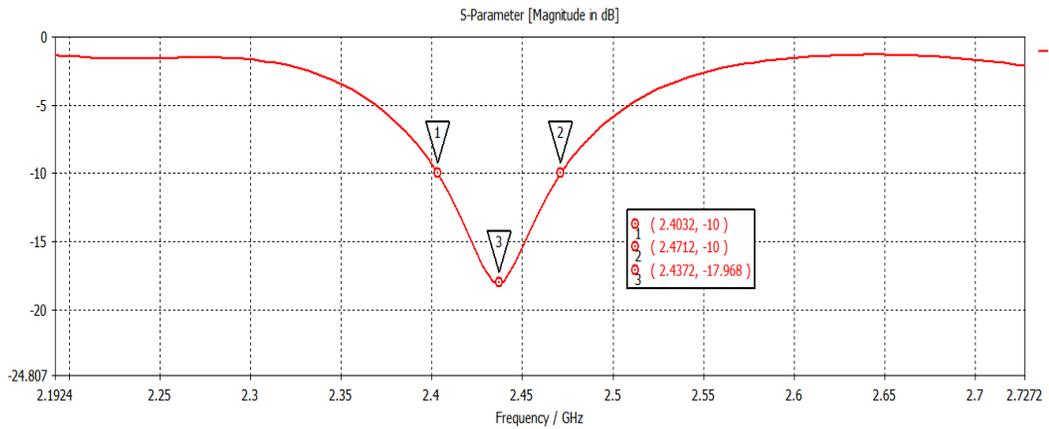


Figura 5.44 Curva de simulación del parámetro  $S_{11}$  para banda de 2,437 GHz.

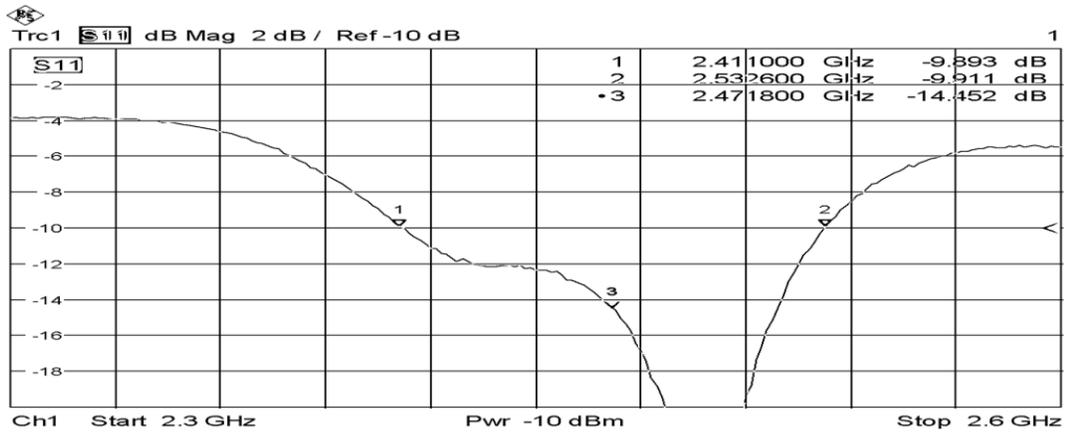


Figura 5.45 Curva experimental del parámetro  $S_{11}$  para banda de 2,437 GHz.

Para los valores obtenidos experimentalmente se da un incremento del ancho de banda y el parámetro  $S_{11}$ . Las variaciones de los parámetros se observan en la Tabla 5.3.

	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_c$ [GHz]	BW [GHz]	$S_{11}$ [dB]
<b>Simulación</b>	2,4032	2,4712	2,4372	0,068	-17,968
<b>Experimental</b>	2,411	2,5326	2,4718	0,1216	-14,452

Tabla 5.25 Comparación de resultados de parámetros  $S_{11}$  de la banda 2,437 GHz.

- **Banda 4 GHz**

En la Figuras 5.6 y 5.7 se tienen las curvas del parámetro  $S_{11}$  simulado y medido con las respectivas frecuencias.

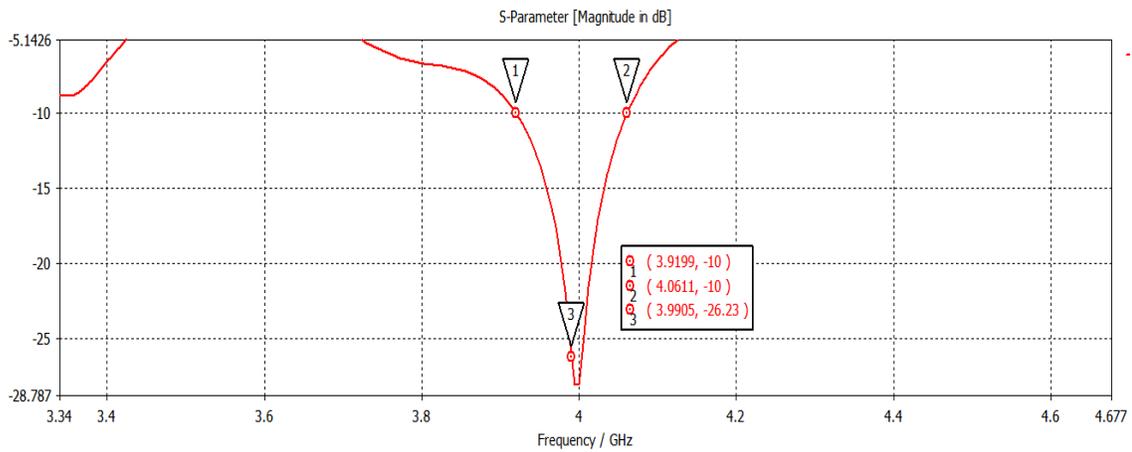


Figura 5.46 Curva de simulación del parámetro  $S_{11}$  para banda de 4 GHz.

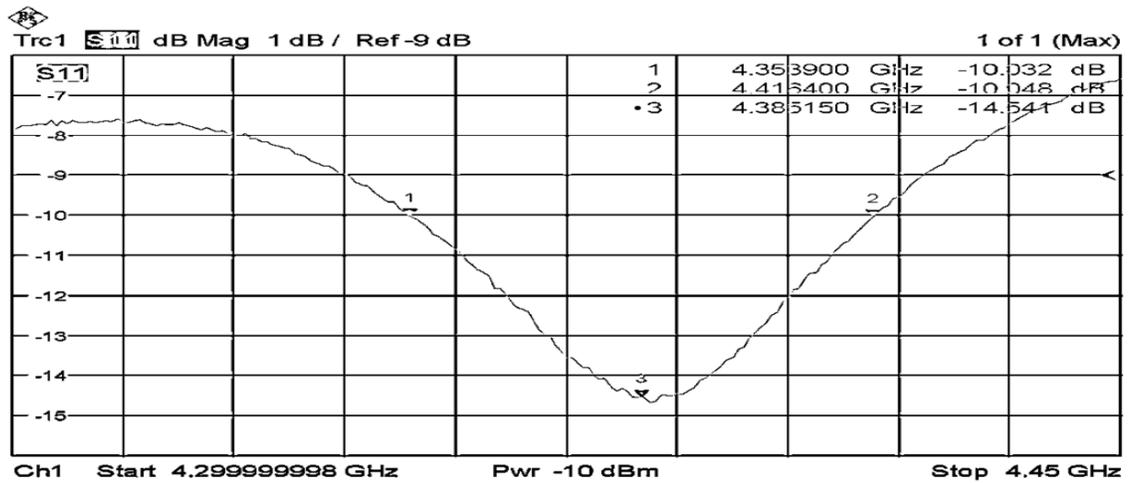


Figura 5.47 Curva experimental del parámetro  $S_{11}$  para banda de 4 GHz.

En la Tabla 5.4 se consignan los parámetros obtenidos, para el ancho de banda y el parámetro  $S_{11}$  se dan variaciones que afectan de manera negativa el comportamiento de la antena.

	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_c$ [GHz]	BW [GHz]	$S_{11}$ [dB]
Simulación	3,9199	4,0611	3,9905	0,1412	-26,23
Experimental	4.3539	4.4164	4.3851	0,0625	-14,541

Tabla 5.26 Comparación de resultados de parámetros  $S_{11}$  de la banda 4 GHz.

- **Banda de 5,777 GHz**

A continuación, las curvas del parámetro S<sub>11</sub> de simulación y experimentación, se presentan en las Figuras 5.8 y 5.9 respectivamente.

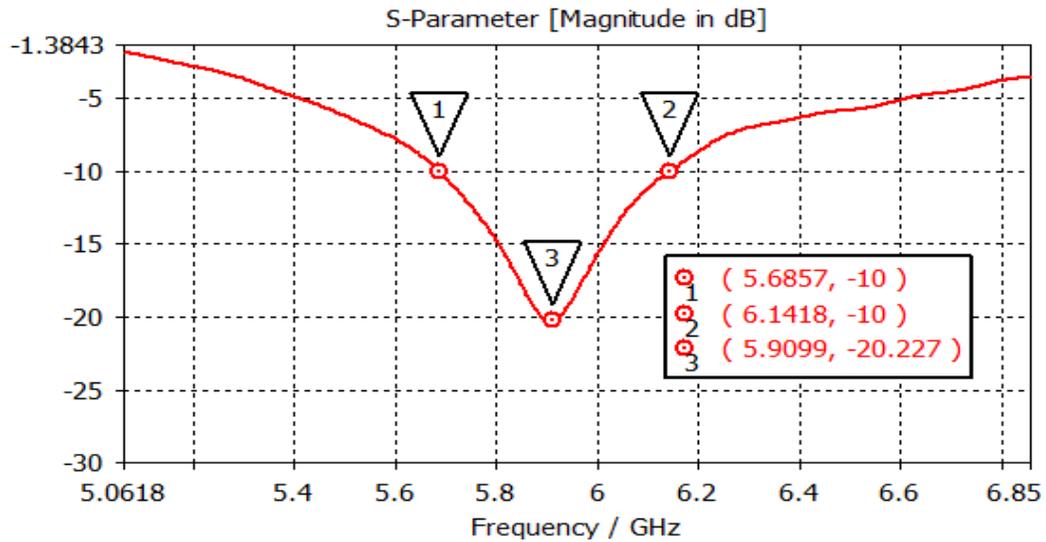


Figura 5.48 Curva de simulación del parámetro S<sub>11</sub> para banda de 5,777 GHz.

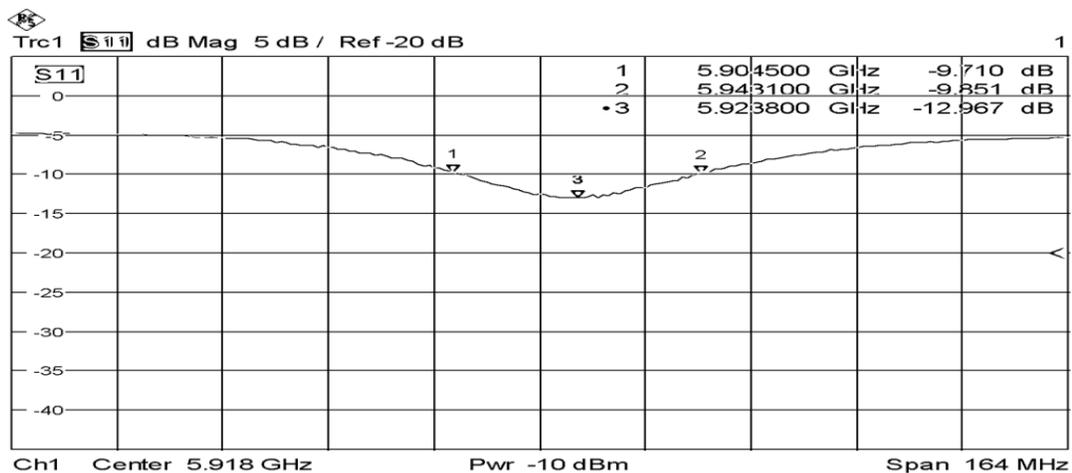


Figura 5.49 Curva experimental del parámetro S<sub>11</sub> para banda de 5,777 GHz.

En esta banda de frecuencia, se disminuye notablemente el ancho de banda. En la Tabla 5.5 se observan las variaciones resultantes.

	$F_L$ [GHz]	$F_H$ [GHz]	$F_C$ [GHz]	BW [GHz]	$S_{11}$ [dB]
Simulación	5,6857	6,1418	5,9099	0,4561	-20,227
Experimental	5,9045	5,9431	5,9238	0,0386	-12,967

Tabla 5.27 Comparación de resultados de parámetros  $S_{11}$  de la banda 5,777 GHz.

## 5.2. Parámetro SWR

Para establecer los valores de SWR, se ubican las frecuencias de corte y centrales de simulación y de experimentación para cada una de las bandas de frecuencia, dichas frecuencias se muestran en las tablas de la sección 5.1. La información recolectada se resume en tablas para cada una de las bandas de frecuencia.

- **Banda de 1,7325 GHz**

Para esta banda, se tiene un mejor comportamiento experimental, dado que se obtienen valores menores, sobretodo en la frecuencia central donde solo se devuelve el 4% de la potencia, mientras que en las bandas laterales se devuelve el 10% de la misma. A continuación, en las Figuras 5.10 y 5.11 se presentan las curvas del parámetro SWR simulada y experimental.

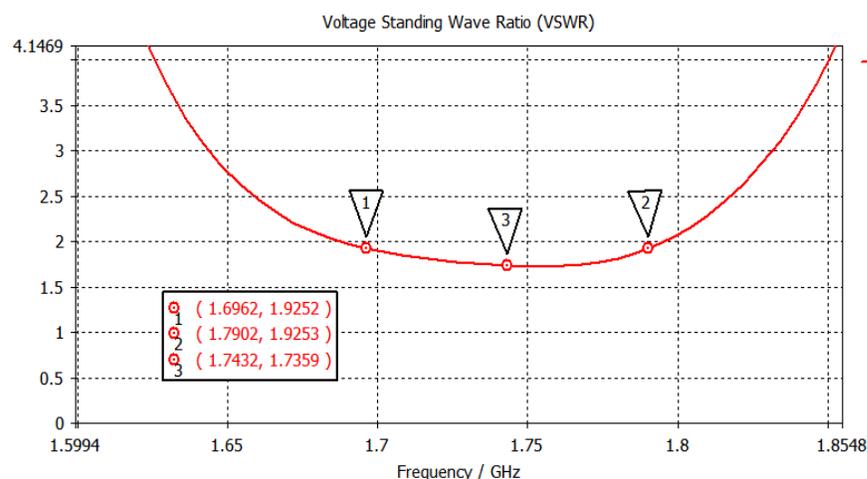


Figura 5.50 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 1,7325 GHz.

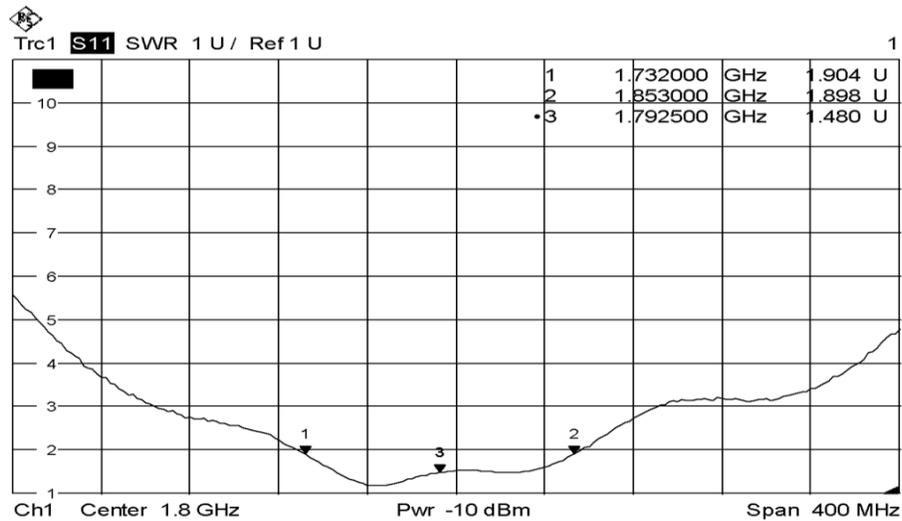


Figura 5.51 Curva experimental del parámetro SWR para banda de 1,7325 GHz.

En la Tabla 5.6 se muestran los resultados recolectados a partir de las curvas de simulación y de experimentación.

	Frecuencia de corte inferior	Frecuencia de corte superior	Frecuencia central
Simulación	1.9252	1.9253	1.7359
Experimental	1.904	1.898	1.480

Tabla 5.28 Valores de simulación y experimentación de SWR para la banda de 1,7325 GHz.

- **Banda de 2.4 GHz**

En la Figura 5.12 se observa que en el rango del ancho de banda, la curva del parámetro SWR tiende a ser una línea constante, asegurando que la antena trabaje correctamente en toda la banda, a diferencia de la Figura 5.13 que muestra el resultado experimental, con una curva que oscila entre 1 y 2.

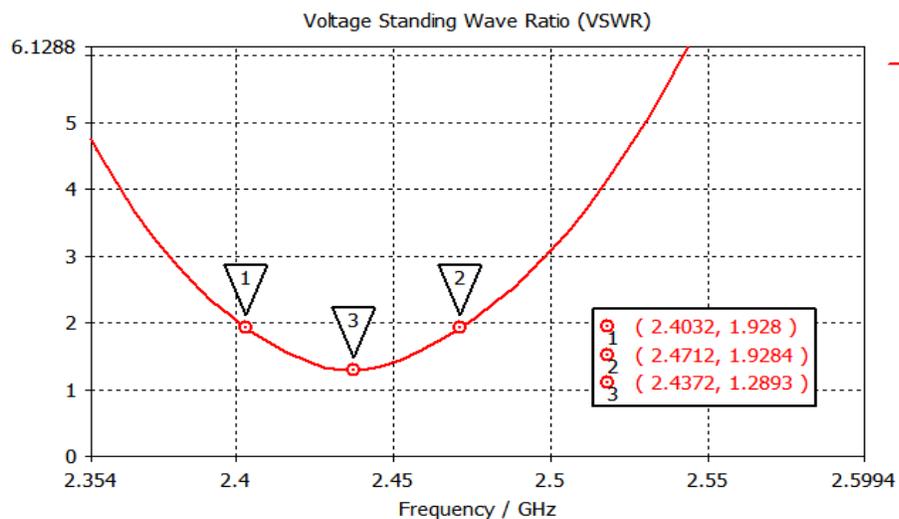


Figura 5.52 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 2,437 GHz.

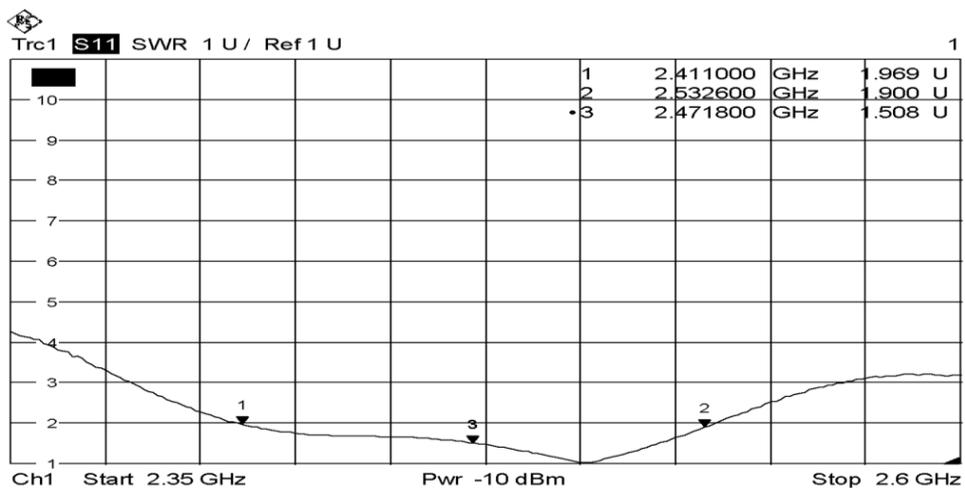


Figura 5.53 Curva experimental del parámetro SWR para banda de 2,437 GHz.

Para esta banda de frecuencia, los valores de SWR se consignan en la Tabla 5.7.

	Frecuencia de corte inferior	Frecuencia de corte superior	Frecuencia central
<b>Simulación</b>	1.928	1.9284	1.2893
<b>Experimental</b>	1.969	1.900	1.508

Tabla 5.29 Valores de simulación y experimentación de SWR para la banda de 2,437 GHz.

- **Banda de 4 GHz**

Las curvas de éste parámetro, en simulación y experimentación, se presentan en las Figuras 5.14 y 5.15 respectivamente

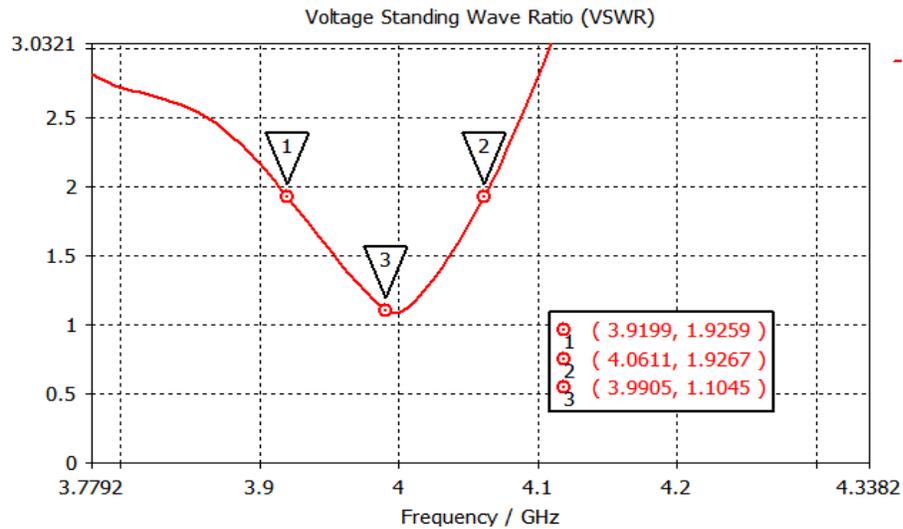


Figura 5.54 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 4 GHz.

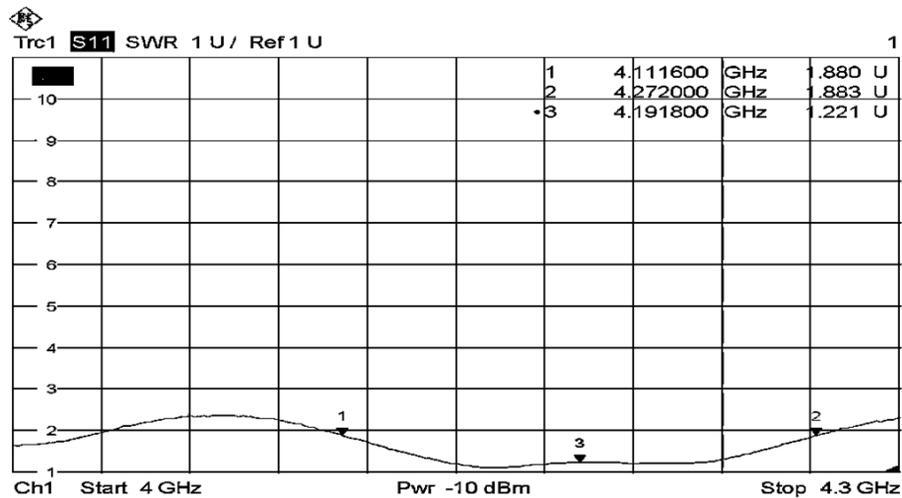


Figura 5.55 Curva experimental del parámetro SWR para banda de 4 GHz.

Seguidamente, en la Tabla 5.8 se encuentran consignados los datos recolectados para esta banda de frecuencia, en ella se observa que los valores obtenidos de la fase de simulación y experimentación, estos valores son cercanos entre sí.

	Frecuencia de corte inferior	Frecuencia de corte superior	Frecuencia central
Simulación	1.9259	1.9267	1.1045
Experimental	1.880	1.883	1.221

Tabla 5.30 Valores de simulación y experimentación de SWR para la banda de 4 GHz.

- **Banda de 5,777 GHz**

Como se ve en la Figura 5.16, el valor de SWR oscila entre 1 y 2 aproximadamente. Esta figura se puede relacionar con la Figura 5.8, por ser variables ligadas matemáticamente, al observar dichas figuras se corrobora su dependencia. De este mismo modo, también se puede hacer este análisis para la Figura 5.9 y 5.17.

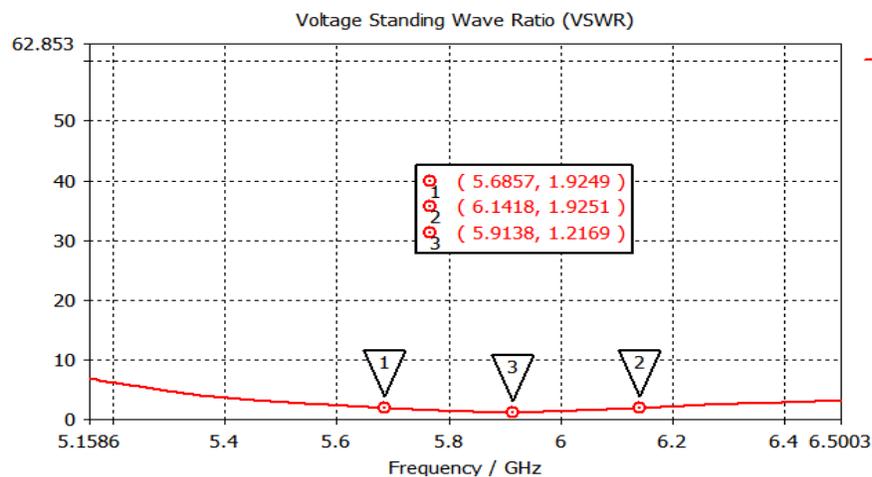


Figura 5.56 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 5,8 GHz.

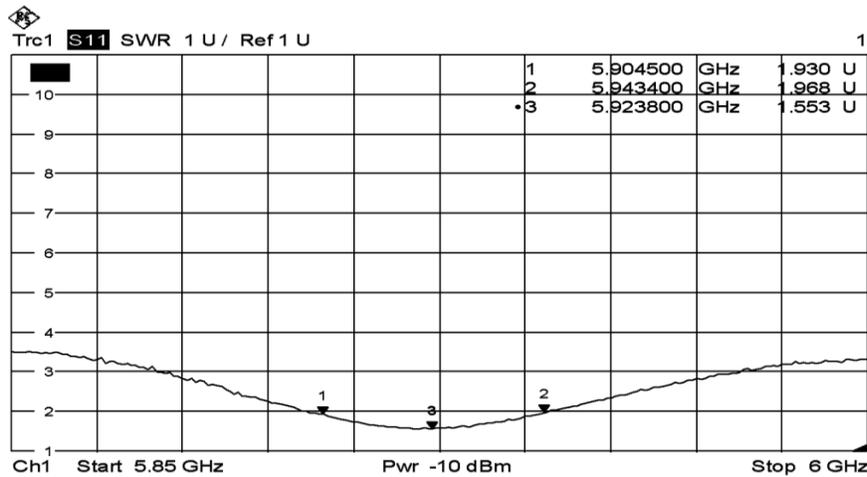


Figura 5.57 Curva de simulación del parámetro SWR para banda de 5,777 GHz.

Para esta banda los resultados de simulación de SWR son mejores que los experimentales. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 5.9.

	Frecuencia de corte inferior	Frecuencia de corte superior	Frecuencia central
Simulación	1,9249	1,9251	1,2159
Experimental	1,930	1,968	1,553

Tabla 5.31 Valores de simulación y experimentación de SWR para la banda de 5,777 GHz.

Aunque las frecuencias de trabajo de cada una de las bandas no son iguales, las curvas y los de SWR son similares, las frecuencias de corte presentan mayor valor de este parámetro (magnitud inferior a 2, este valor está relacionado con el parámetro S11 de -10 dB) que la frecuencia central, esto, para fase de simulación y medición.

### 5.3. Impedancia

En esta sección se muestran las curvas de la magnitud de la impedancia, obtenidas por simulación y experimentalmente con el objetivo de compararlas.

En la Figura 5.18 se muestra el comportamiento de este parámetro para el caso de simulación, en donde los valores de la magnitud son inferiores a 100 ohmios cuando la frecuencia está en las bandas de operación. Esta gráfica no presenta tantas variaciones como lo hace la curva experimental.

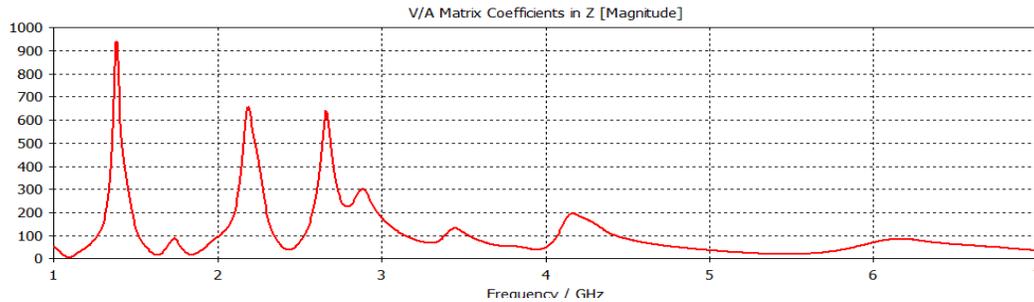


Figura 5.58 Curva de magnitud de la impedancia arrojada por CST Microstudio.

La magnitud de la impedancia experimental se muestra en la Figura 5.19, tiene un comportamiento oscilatorio, variando desde 10 hasta superar valores de 250 Ohms, cuando la variación en la magnitud no es alta, es decir, está acotado en un rango como ocurre en la banda de 1,7 GHz, 2,4 GHz y 4 GHz, en donde se marca esta tendencia, la impedancia de la antena tiende al valor de la impedancia de referencia del sistema, que en este caso es de 50 Ohm, por lo tanto la antena va a radiar más energía respecto a cuándo no tiende a acoplarse.

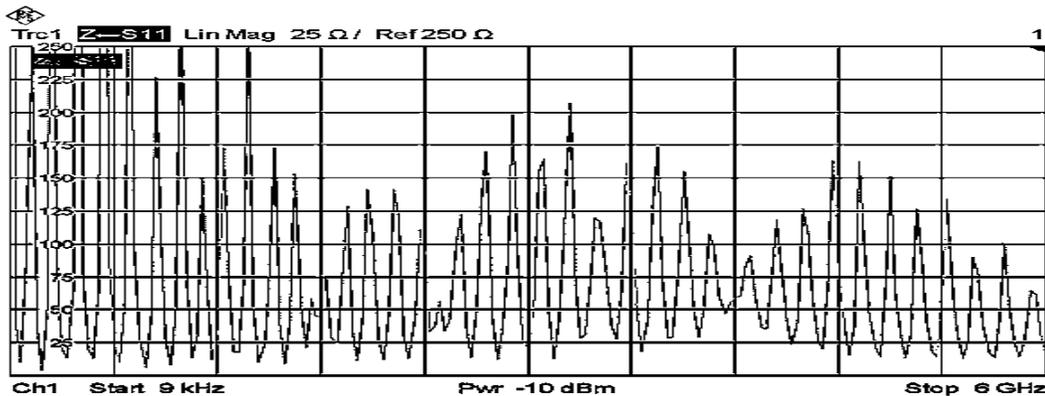


Figura 5.59 Curva de magnitud de la impedancia arrojada por el analizador vectorial de redes.

A continuación se presenta la magnitud de la impedancia para cada banda de frecuencia.

- **Banda de 1,7325 GHz**

En la Figura 5.20, el comportamiento de la magnitud de la impedancia inicia con un valor de 54 ohmios y termina en 39 ohmios, pasando por un máximo de 85 ohmios, esto indica que son varios los valores, que puede tomar la magnitud de la impedancia, en una banda de operación, definida cuando el parámetro S11 tiene una magnitud inferior a un valor de referencia, en este caso a -10dB.

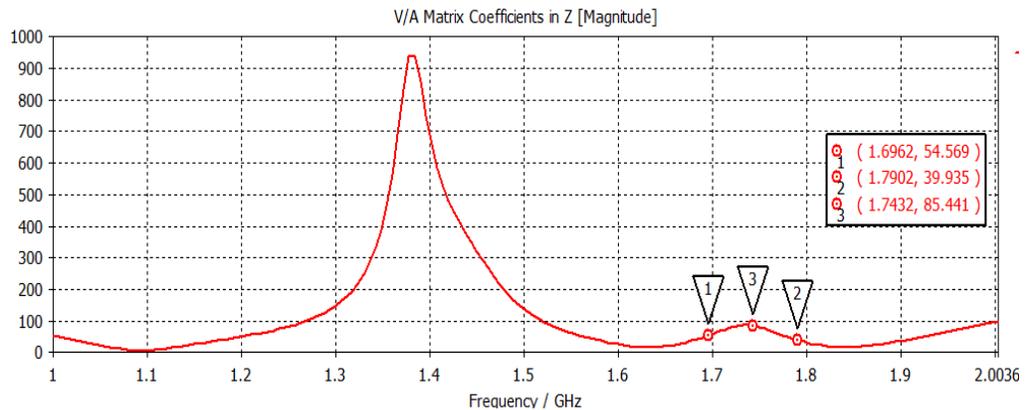


Figura 5.60 Impedancia de simulación en la banda de 1,7325 GHz.

El comportamiento de la impedancia experimental para esta banda se observa en la Figura 5.21. Se ubican los marcadores 1 y 2 en las frecuencias de corte de esta banda, en este rango de frecuencias la magnitud de la impedancia es cercana a 50 Ohms, las variaciones están alrededor de 20 y 74 Ohms lo que es causado por la variación de la longitud de onda, mientras que el tamaño de la estructura permanece constante. Además este comportamiento se ve reflejado en la Figura 5.11 en donde la magnitud del SWR es variable y es mínimo en 1734 MHz.

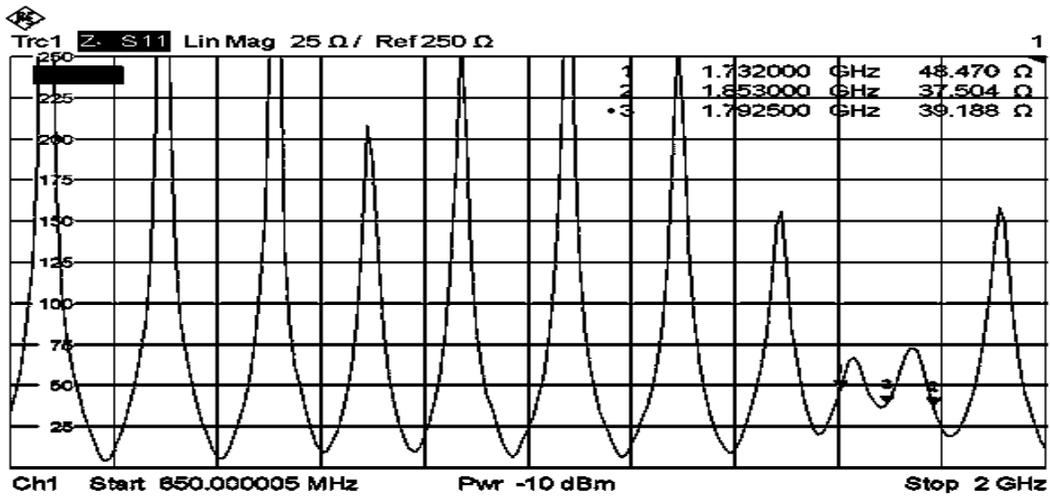


Figura 5.61 Impedancia experimental en la banda de 1,7325 GHz.

- **Banda de 2,437 GHz**

En la Figura 5.22 se muestra el comportamiento de este parámetro en la simulación, en los extremos presenta valores cercanos a 50 Ohmios, sin embargo esto no garantiza que sea puramente resistivo para compararlo con la impedancia de referencia.

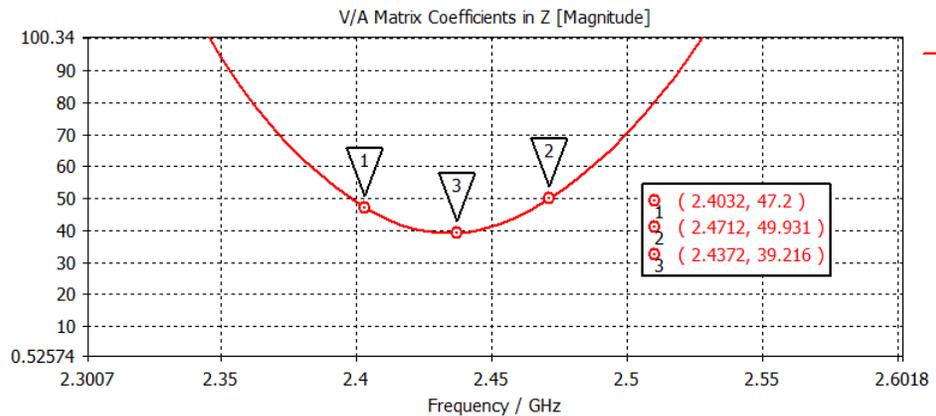


Figura 5.62 Impedancia de simulación para la banda de 2,437 GHz.

En la Figura 5.23 es mostrada la curva experimental de este parámetro, en esta banda las variaciones de la magnitud de la impedancia están entre 61 y 31 ohmios, cada uno de estos valores está en un extremo de la banda analizada que va desde 2,411 GHz hasta 2,5326 GHz, la frecuencia central 2,4718 GHz tiene un valor de 50.561 ohmios, pero esto no garantiza que la impedancia de la antena a esta

frecuencia sea sólo resistiva ya que este valor es de la magnitud, en donde interviene la parte reactiva de la impedancia. Además se observa en la gráfica del SWR en donde el mínimo no se encuentra es la frecuencia central, indicando que el máximo acoplamiento de la impedancia no se encuentra en esa frecuencia.

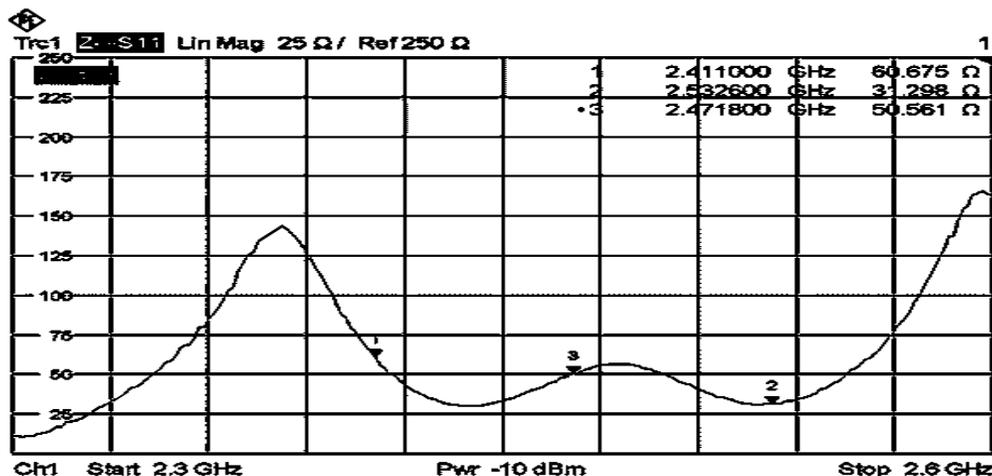


Figura 5.63 Impedancia experimental para la banda de 2,437 GHz.

- **Banda de 4 GHz**

En la Figura 5.24 se muestra el comportamiento de la simulación de la magnitud de este parámetro, en donde el comportamiento no es constante como casi en todos los casos anteriores, sin embargo estos valores están cercanos 50 Ohmios.

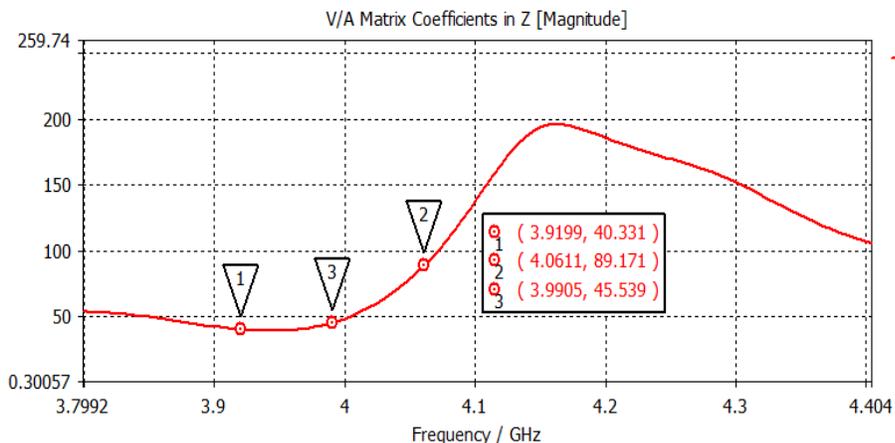


Figura 5.64 Impedancia de simulación para la banda de 4 GHz.

La magnitud de la impedancia experimental se muestra en la Figura 5.25 , en donde este parámetro toma valores de 58 y 92 Ohm en las frecuencias de corte, en este caso se tiene mejor desempeño alrededor de 4.16 GHz como se observa en la Figura 5,15 del SWR coincidiendo en con una magnitud de la impedancia cercano a 50 ohmios.

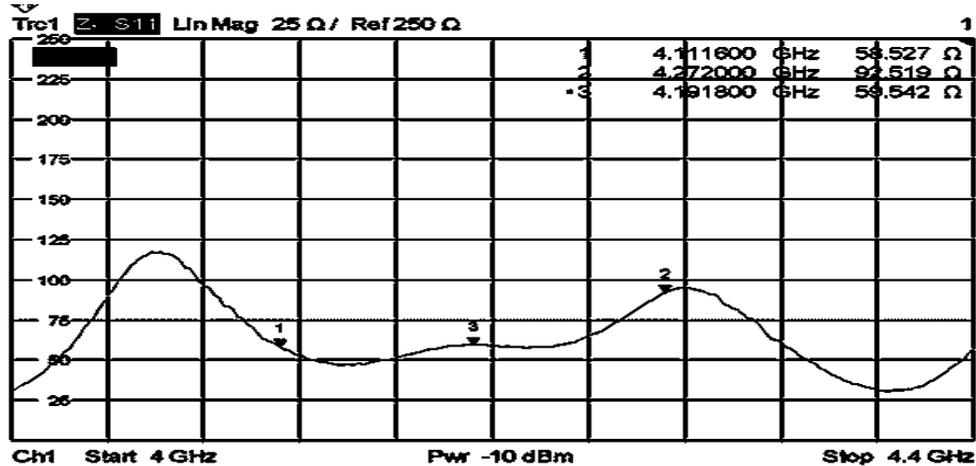


Figura 5.65 Impedancia experimental para la banda de 4 GHz.

- **Banda de 5,777 GHz**

En la Figura 5.26 se muestra la magnitud de este parámetro, en este caso toma valores desde 26 hasta 83 Ohmios, cabe resaltar que para todas las bandas de operación, tanto simuladas como experimentales, la magnitud de la impedancia están dentro de este rango.

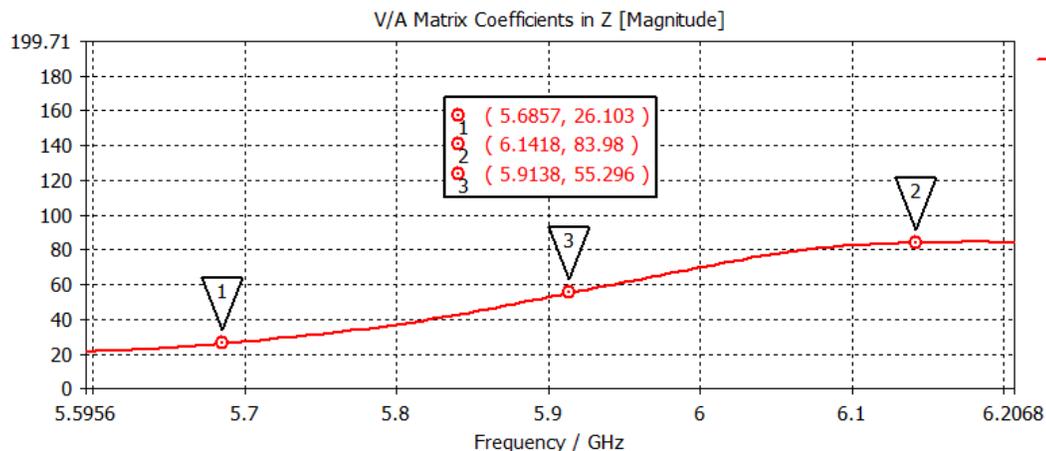


Figura 5.66 Impedancia de simulación para la banda de 5,777 GHz.

Finalmente, para esta banda en la Figura 5.27 se observa la gráfica de la magnitud de la impedancia. En este caso la magnitud de la impedancia está entre los valores de 55 y 79 ohmios, aunque en la frecuencia central de 5,9431 GHz tiene un valor de 79 ohmios es en este valor en donde se obtiene el menor valor de SWR por lo tanto su mejor desempeño en esta banda de frecuencias.

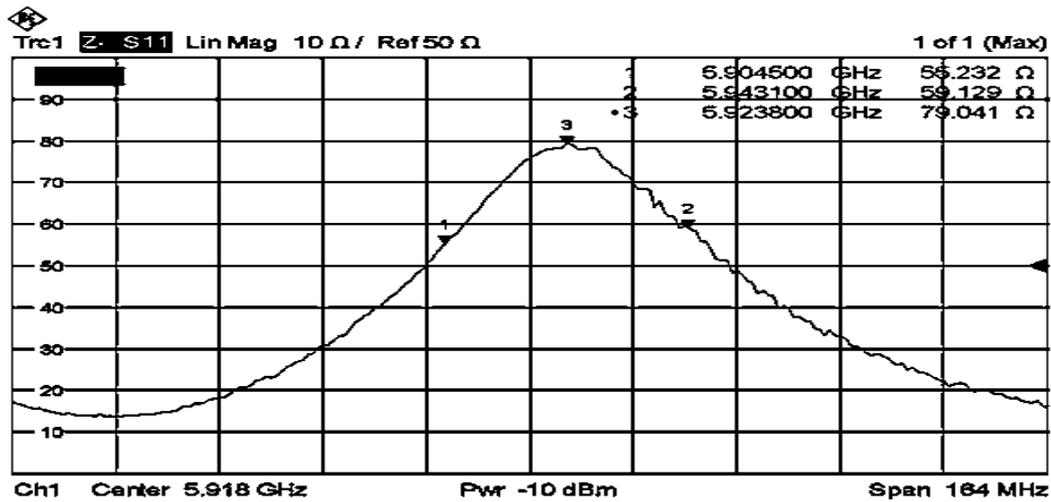


Figura 5.67 Impedancia experimental para la banda de 5,777 GHz.

Como las frecuencias de simulación y experimentación, no son iguales no se realiza un análisis detallado de las frecuencias. En la Tabla 5.10 se muestra a modo de resumen las frecuencias obtenidas para las frecuencias de corte y la frecuencia central de simulación y experimentación.

Banda [GHz]	Impedancia de simulación [Ω]			Impedancia de experimentación [Ω]		
	Frec. de corte inferior	Frec. de corte superior	Frecuencia central	Frec. de corte inferior	Frec. de corte superior	Frecuencia central
1,7325	54,569	39,935	85,441	48,470	37,504	39,188
2,437	47,2	49,931	39,216	60,675	31,298	50,561
4	40,331	89,171	45,539	58,527	92,519	59,542
5,777	26,103	83,98	55,296	55,232	59,129	79,041

Tabla 5.32 Impedancias obtenidas en simulación y experimentalmente.

## 5.4. Patrón de radiación

Para obtener los patrones de radiación experimentales, se hace uso de la USRP B210 como generador con una onda sinusoidal pura, con un diseño de bloques en Simulink, una antena VERT900 y VERT2450 como antenas receptoras, y el analizador de espectro. La antena fractal posee un conector SMA macho, que va conectado al puerto Tx/Rx de la USRP B210, mediante un cable SMA. Al analizador de espectro se conecta cualquiera de las antenas VERT mediante un conector N, el analizador muestra en la pantalla la potencia relativa que recibe la antena conectada a dicho equipo.

A continuación se analizan los patrones de radiación obtenidos en simulación y de manera experimental. Dichos patrones se muestran en coordenadas polares en escala lineal, variando la antena en los planos  $\theta$  y  $\phi$ , con el fin de observar el comportamiento de la potencia de la antena con mayor facilidad. A partir del patrón de radiación, se obtienen algunos parámetros característicos.

- **Banda de 1,7325 GHz**

En la Figura 5.28 se observa el patrón de radiación de la banda de 1.7 GHz con el plano  $\theta$  simulado y experimental. Dichos patrones difieren en que en el proceso de experimentación, solamente se obtuvo un lóbulo principal. Otra diferencia notable es la aparición de lóbulos secundarios, dichos lóbulos no son notorios en simulación por tener un nivel bajo de potencia.

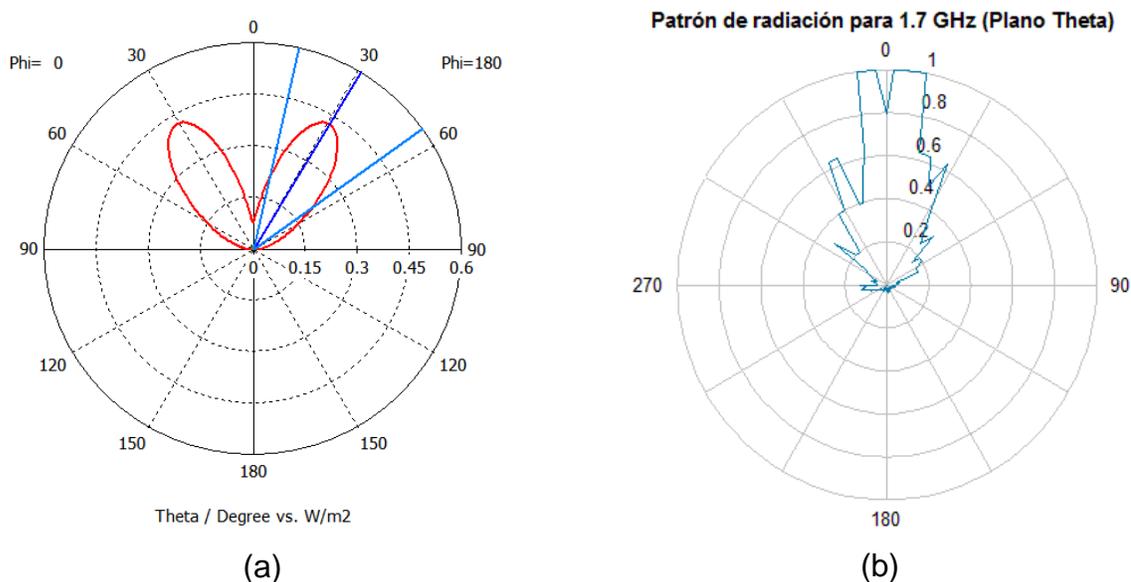


Figura 5.68 Patrón de radiación en el plano  $\theta$  para la banda de 1,7325 GHz.  
 (a) Simulado. (b) Experimental.

A partir de la Figura 5.28 se determina el BWFN y BWHP. Para el parámetro BWFN, se ubican en el patrón de radiación los puntos mínimos relativos más cercanos al valor máximo del lóbulo principal, con el fin de obtener los ángulos correspondientes para hallar la diferencia entre ellos y así obtener el parámetro. De la misma forma, para determinar el BWHP, se ubican dos puntos con una diferencia de 3 dB con respecto al máximo de potencia del lóbulo principal y se halla la diferencia de estos ángulos de potencia mitad para hallar dicho parámetro.

Los parámetros del patrón de radiación muestran que dicho patrón tiene un comportamiento directivo, siendo más angosto el haz experimental que el de simulación. Adicionalmente el parámetro SLL de simulación es mejor que el experimental, por tener menor magnitud, indicando una diferencia muy grande entre las magnitudes del lóbulo principal y el secundario. El SLL experimental aumenta debido al ruido y la multitrayectoria captada por la antena de recepción en un ambiente no controlado. Los parámetros del patrón de radiación se consignan en la Tabla 5.11.

Parámetro	BWFN (°)	BWHP (°)	SLL [dB]	FTBR [dB]
Simulación	134.9	41.639	-20.468	22.58
Experimental	43	37,02	-2	10.49

Tabla 5.33 Parámetros de patrón de radiación para banda de 1,7325 GHz en el plano  $\theta$ .

En la Figura 5.29 se encuentran los patrones de radiación simulado y experimental para la banda de 1.7 GHz en el plano  $\phi$ .

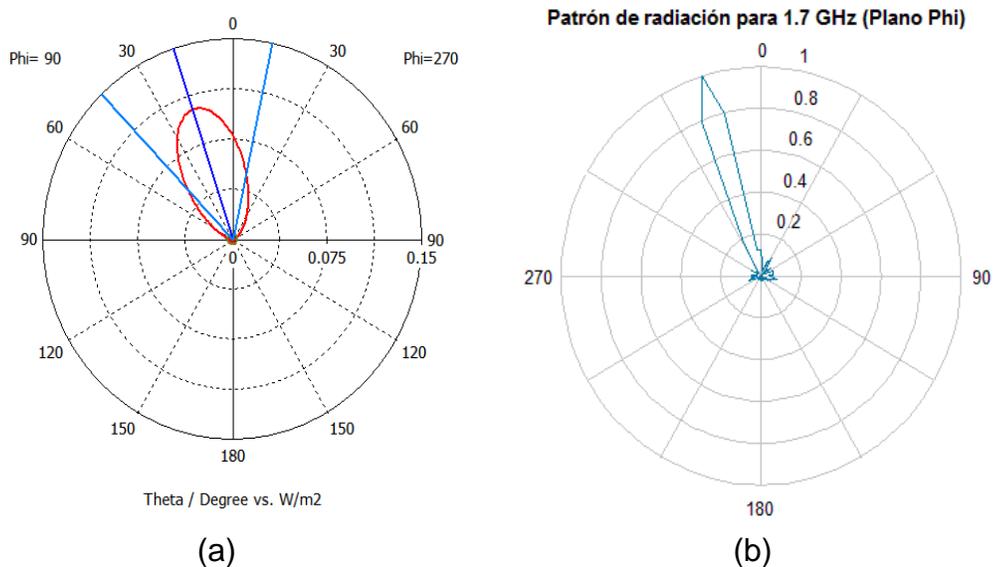


Figura 5.69 Patrón de radiación en el plano  $\phi$  para la banda de 1,7325 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental.

En la Tabla 5.12 se observan los parámetros del patrón de radiación de la banda de 1,7325 GHz para el plano  $\phi$ . La mayor diferencia que se presenta en estos parámetros (45.86 dB) es en el valor del parámetro BWHP, claramente se ve que el valor en simulación es mayor que el experimental, esto es debido a las condiciones no deseadas del ambiente en que se realizó la medición, ya que es un ambiente no controlado con presencia de otras señales que eran captadas por la antena, además de la presencia de multitrayectoria.

Parámetro	BWFN (°)	BWHP (°)	SLL [dB]	FTBR [dB]
Simulación	71.05	55.64	-13.855	13.953
Experimental	59	11.78	-10	18

Tabla 5.34 Parámetros de patrón de radiación para banda de 1,7325 GHz en el plano  $\phi$ .

- **Banda de 2,437 GHz**

Los patrones de radiación simulado y experimental de la banda de 2.4 GHz en el plano  $\theta$  se presentan en la Figura 5.30. A diferencia de la frecuencia de 1.7 GHz, los lóbulos secundarios ya no son despreciables.

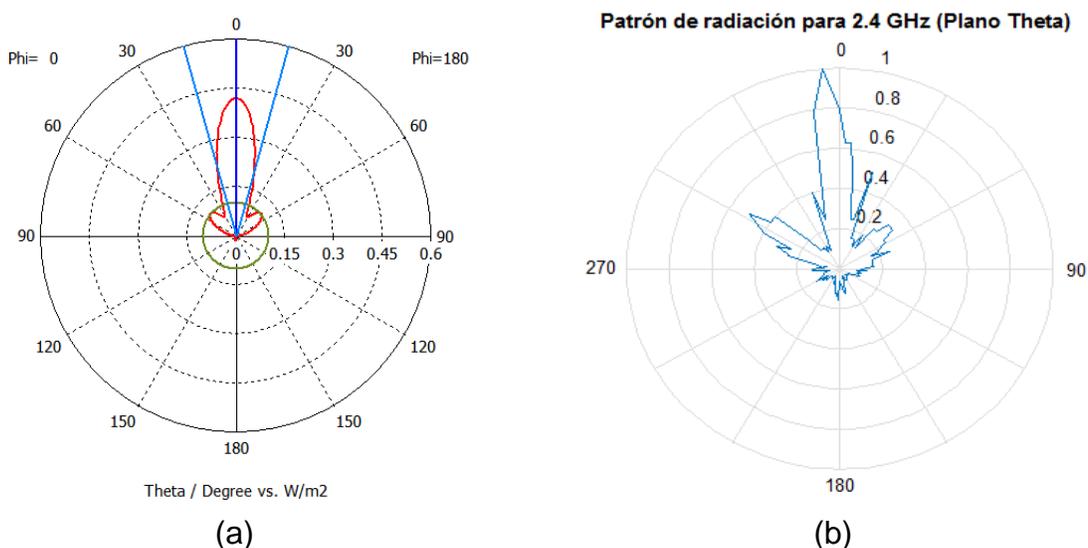


Figura 5.70 Patrón de radiación en el plano  $\theta$  para la banda de 2.437 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental.

Seguidamente se tiene la Tabla 5.13, en ella se presentan los parámetros del patrón de radiación para la banda de 2.437 GHz para el plano  $\theta$ .

Parámetro	BWFN (°)	BWHP (°)	SLL [dB]	FTBR [dB]
Simulación	61.74	31.48	-6.068	14.29
Experimental	29.1	17.9	-1.999	9.599

Tabla 5.35 Parámetros de patrón de radiación para banda de 2.437 GHz en el plano  $\theta$ .

En la Figura 5.31 se muestran los patrones de radiación del plano  $\phi$  de la frecuencia de 2.437 GHz, estos patrones son similares con respecto al lóbulo principal y los lóbulos secundarios.

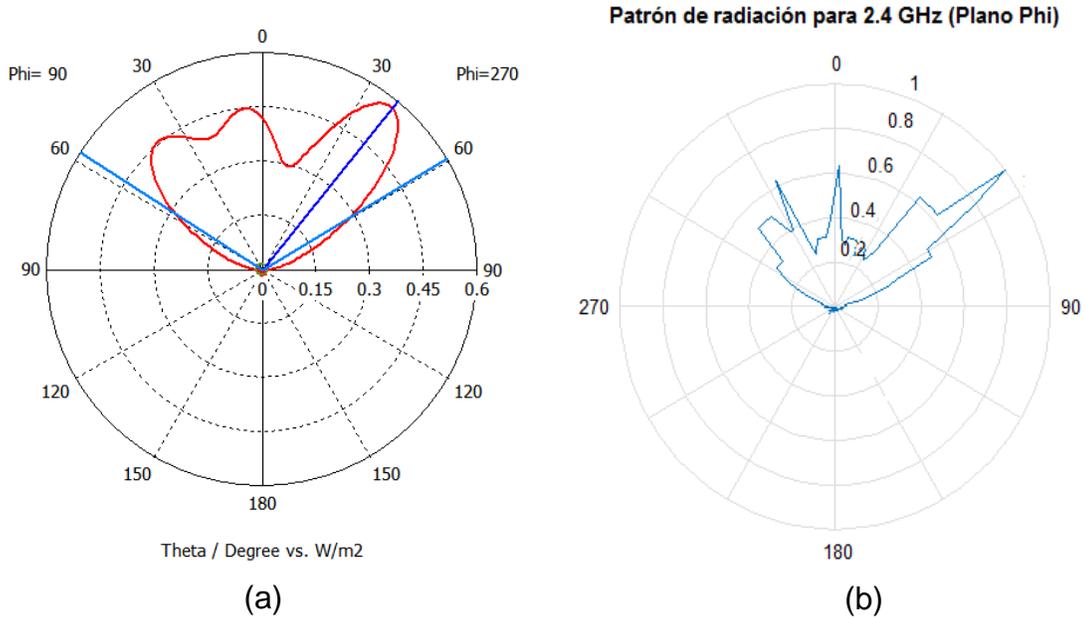


Figura 5.71 Patrón de radiación en el plano  $\phi$  para la banda de 2.437 GHz. (a) Simulado. (b) Experimental.

En la Tabla 5.14 se presentan los valores de los parámetros obtenidos.

Parámetro	BWFN (°)	BWHP (°)	SLL [dB]	FTBR [dB]
Simulación	131	116.4	-0.994	15.912
Experimental	48	24.4	-2	15

Tabla 5.36 Parámetros de patrón de radiación para banda de 2.437 GHz en el plano  $\phi$ .

- **Banda de 4 GHz**

Para esta banda, solo se obtienen los patrones de radiación simulados, ya que no se posee una antena que trabaje a dicha frecuencia. En la Figura 5.32 se encuentran los patrones de radiación en el plano  $\theta$  y  $\phi$ .

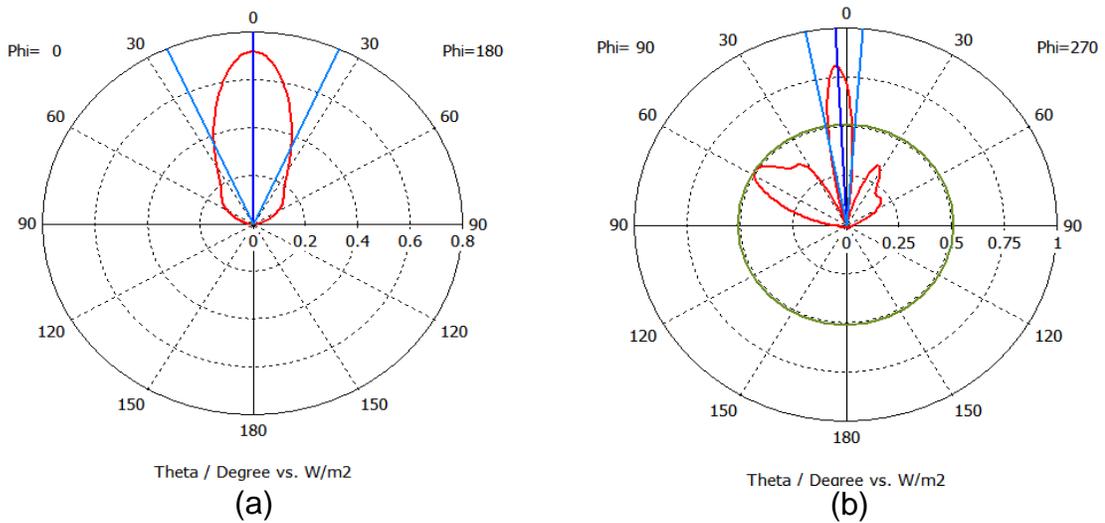


Figura 5.72 Patrón de radiación de simulación para la banda de 4 GHz.  
(a) Plano  $\theta$ . (b) Plano  $\phi$ .

De las figuras anteriores se obtienen los parámetros del patrón de radiación en los dos planos, dichos valores se consignan en la Tabla 5.15.

Plano	BWFN (°)	BWHP (°)	SLL [dB]	FTBR [dB]
$\theta$	284	48	-20.843	22.736
$\phi$	32	15.59	-1.989	34.83

Tabla 5.37 Parámetros del patrón de radiación para banda de 4 GHz.

- **Banda de 5,777 GHz**

A continuación, en la Figura 5.33 se presentan los patrones de radiación simulado y experimental en el plano  $\theta$  para la banda de 5,777 GHz, dichos patrones son casi simétricos, aunque el patrón experimental posee lóbulos secundarios notables.

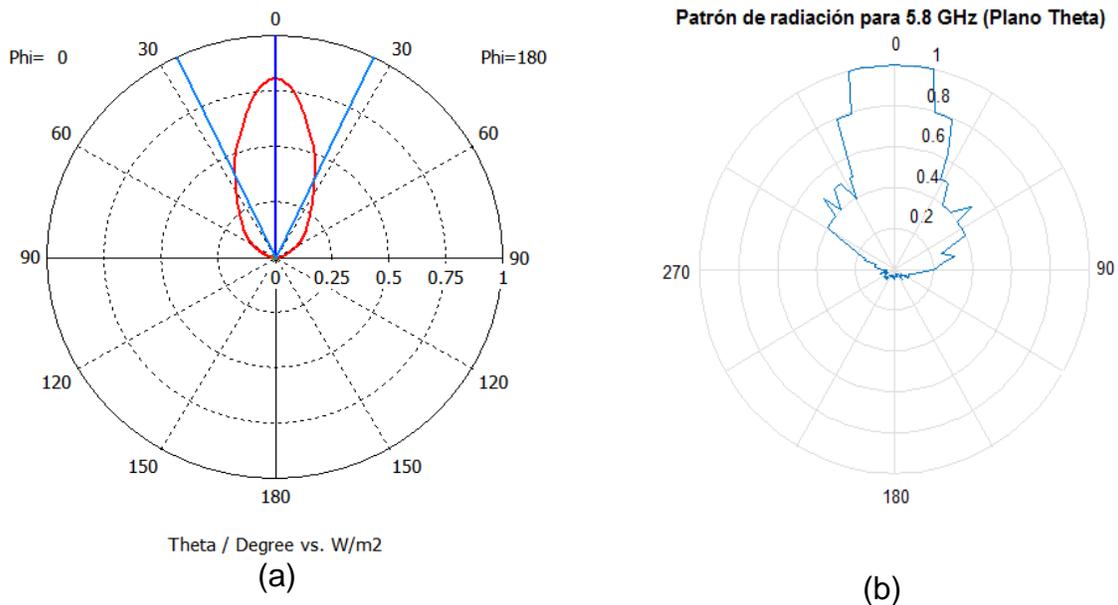


Figura 5.73 Patrón de radiación en el plano  $\theta$  para la banda de 5,777 GHz.  
(a) Simulado. (b) Experimental.

Los parámetros que se obtuvieron del patrón de radiación para este plano, se muestran en la Tabla 5.16.

Parámetro	BWFN (°)	BWHP (°)	SLL [dB]	FTBR [dB]
Simulación	120	51	-18.531	23.442
Experimental	75.5	58.07	-3	13.4

Tabla 5.38 Parámetros de patrón de radiación para banda de 5.8 GHz en el plano  $\theta$ .

Los patrones de radiación en el plano  $\phi$  de simulación y experimental se observan en la Figura 5.34. Dichos patrones pueden considerarse similares ya que presentan unos lóbulos secundarios en una dirección cercana a las de simulación, aunque en el patrón experimental presentan alteraciones por el ruido y la multitrayectoria.

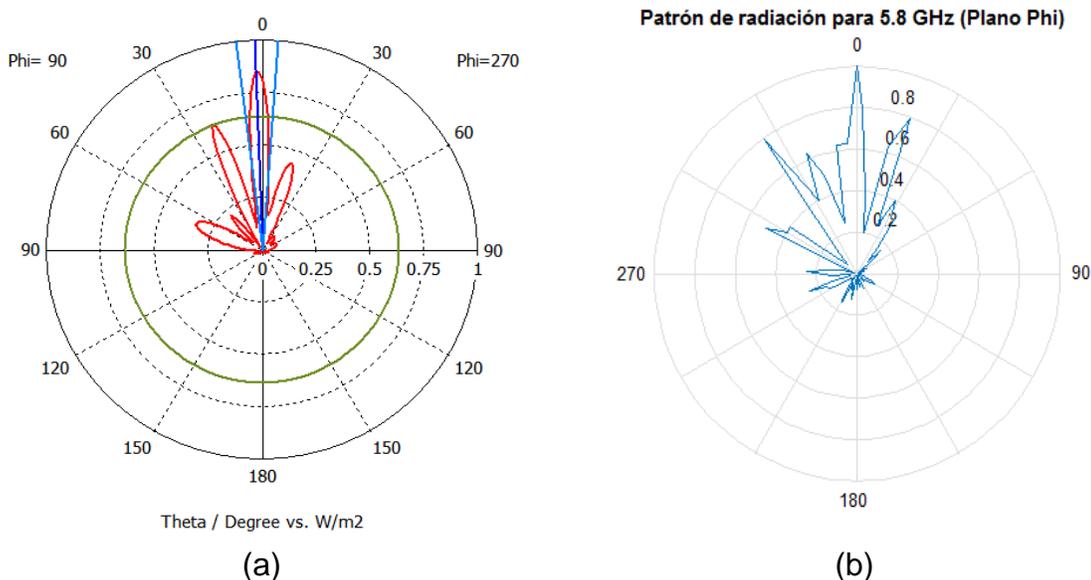


Figura 5.74 Patrón de radiación en el plano  $\phi$  para la banda de 5,777 GHz.  
 (a) Simulado. (b) Experimental.

En la Tabla 5.17 se presentan los parámetros que se obtuvieron de los patrones anteriores, es evidente que los parámetros son cercanos entre sí, exceptuando el FTBR, que indica que en el patrón experimental hay mayor magnitud en el lóbulo trasero respecto al simulado.

Parámetro	BWFN (°)	BWHP (°)	SLL [dB]	FTBR [dB]
Simulación	21	11.446	-1.226	48.055
Experimental	25	16.65	-1	19

Tabla 5.39 Parámetros de patrón de radiación para banda de 5,777 GHz en el plano  $\phi$ .

## 5.5. Ganancia

Para determinar la ganancia se conecta en transmisión una antena de monopolo de ganancia de 3 dBi, y se mide la potencia relativa en recepción. Luego el monopolo se sustituye por la antena implementada y se mide nuevamente la potencia en recepción, manteniendo la distancia y la potencia de transmisión constantes. La

razón de ser del procedimiento anterior es determinar la diferencia entre las potencias relativas recibidas con una y otra antena. Dicha diferencia será entonces la ganancia de la antena en cuestión respecto a la antena monopolar.

Los valores obtenidos de ganancia se muestran en la Tabla 5.18.

	Simulación	Experimentación	
Banda [MHz]	Ganancia [dB]	Ganancia relativa [dB <sub>x</sub> ]	Ganancia [dB <sub>i</sub> ]
1792	7.697	4	7
2450	9.105	7	10
5923	10.2	10	13

Tabla 5.40 Ganancias de la antena en simulación y experimentación.

## 5.7 Directividad

Para el cálculo de este parámetro se hace uso de las ecuaciones 2.7 y 2.8. Dado que no se conoce con exactitud la expresión para el patrón de radiación normalizado, se asume que dicho patrón es una función de variables separables en las coordenadas  $\theta$  y  $\phi$ . Con esto, la integral de la ecuación 2.8 se puede aproximar mediante la siguiente suma de Riemman:

$$\Omega_A \approx \sum_{\theta_i=1}^n S_n(\theta) \sin \theta \Delta\theta \quad (5.1)$$

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.19.

Banda de Frecuencia [GHz]	Directividad de simulación [dBi]	Directividad experimental [dBi]	Diferencia [dBi]
1.7	8.954	14.461	5.507
2.4	9.675	18.0906	8.4156
5.8	10.87	9.2624	1.6076

Tabla 5.41 Valores de directividad de la antena



## Capítulo 6

### Conclusiones y trabajos futuros

Las conclusiones que se obtuvieron del presente trabajo de grado son:

- La teoría del fractal de Parany establece que una antena de  $n$  número de iteraciones, opera en  $n$  bandas de frecuencia y es equivalente a tener  $n$  números de antenas individuales. Sin embargo, en las simulaciones, al realizar esta equivalencia se registran desplazamientos en las frecuencias de operación y cambios en el ancho de banda.
- La antena construida opera sobre segmentos de las bandas de frecuencia objetivo. Por lo tanto, para usarla en un servicio específico, se deben elegir los canales de comunicación que estén en el rango de operación de la antena.
- Es importante elegir adecuadamente los materiales para construir la antena, ya que se debe garantizar compatibilidad con los equipos de prueba y de medición.
- La principal fuente de error en la medida del patrón de radiación es la presencia de señales interferentes debidas, en su gran mayoría, al ruido y a las múltiples reflexiones que se generan en el entorno de medición. Una de estas alteraciones es el incremento de potencia de los lóbulos laterales y el aspecto ruidoso del patrón de radiación.

- Los patrones de radiación de la antena fractal implementada son similares a los de simulación, validando de esa manera el diseño y la implementación realizados.
- La distancia entre el elemento activo y el plano tierra influye sobre el ancho de banda de la antena, y su comportamiento no es monótono, ya que después de alcanzar el máximo ancho de banda, éste empieza a disminuir nuevamente.
- Para determinar las bandas de frecuencia de operación de una antena se pueden usar varios criterios, tales como la impedancia, el SWR y el parámetro  $S_{11}$ , siendo este último el más usado en la literatura.
- En el diseño de antenas fractales, el método más utilizado es el experimental, ya que el comportamiento de sus parámetros de radiación no puede describirse a través de expresiones matemáticas.
- Para que una antena opere en una banda de frecuencia específica, no es necesario que su impedancia coincida exactamente con la impedancia característica de la línea de transmisión que la alimenta, ya que es admisible un cierto margen de potencia reflejada.

Los trabajos futuros sugeridos a partir del presente trabajo de grado son:

- Medir los parámetros característicos de la antena con equipos adecuados, en donde se disminuya el ruido y se eviten efectos no deseados como la multitrayectoria, esto con el fin de obtener datos más exactos.
- A partir del diseño obtenido, agregar otra banda de frecuencia con el fin de dar soporte al enlace de bajada de LTE en la banda AWS.
- Realizar una antena con otro tipo de geometría Fractal que opere en las bandas de frecuencia de 1,7, 2,4 y 5,8 GHz y comparar los resultados obtenidos con los del presente trabajo de grado.
- Construir la antena con otros materiales, especialmente cambiando el dieléctrico y analizar su efecto en los parámetros de radiación.

- Realizar un nuevo diseño basándose en el obtenido en el presente trabajo de grado, con el fin de incrementar significativamente los anchos de banda.
- Realizar un diseño basado en el obtenido en este trabajo de grado, con el objetivo de conseguir un menor tamaño de la estructura y que opere en las mismas bandas de frecuencia.
- Diseñar un arreglo de antenas fractales con el modelo propuesto, para conocer y analizar la diferencia que se presenta entre el patrón de radiación del arreglo y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado.



## Bibliografía

- [1] C. S. Salazar, “Desarrollo de una Antena Fractal Multibanda para Redes Inalámbricas de área local”, Universidad Simón Bolívar, 2008.
- [2] R. J. Lara Carvajal and I. C. Marrero Pérez, “Diseño y Construcción de Antenas para Telefonía Móvil con Fractales del tipo Hilbert”, Universidad Católica Andrés Bello, 2012.
- [3] J. C. Herrera Holguín, Mario Patricio; Inclán Luna, “Estudio y Metodología de Diseño de Antenas utilizando Geometría Fractal (Antenas Fractales)”, Escuela Politécnica Nacional, 2004.
- [4] F. A. Sandoval and M. V Morocho, “Dipolo Multibanda Basado en el Triángulo de Sierpinski”.
- [5] D. Arcos Cerda, “Diseño e implementación de una antena yagi fractal en las bandas de 200, 400 y 800 MHz”, Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [6] A. González Oltra, “Diseño y Construcción de una Antena Fractal Multibanda para Telefonía Móvil Celular”, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [7] Montoya. A, “Antenas Fractales: Un Paso en la Evolución de las Telecomunicaciones”, Universidad de Antioquia, 2006.
- [8] A. R. VÁSQUEZ, “Aplicación de las Antenas Fractales en las Telecomunicaciones”, Universidad Católica Popular De Risaralda, 2013.
- [9] A. S. Wadekar and S. V Khobragade, “Design of multiband monopole Triangular Fractal Antenna for GSM , Bluetooth and Wi-Fi”, Lonere-Raigad, pp. 988–991, 2015.

- [10] J. Anguera Pros, G. Montesinos, C. Puente Baliarda, C. Borja, and J. Soler, “Agrupación submuestreada operando en modo fractón utilizando antenas microstrip inspiradas en el fractal de Sierpinski”, vol. 2, 2003.
- [11] F. M. Hamburger, “Diseño de una antena fractal de 2400 MHz”, *Tecnol. en Marcha*, vol. 25, pp. 71–75, 2012.
- [12] L. M. B. Canals, J. M. D. Hernández, and D. P. del Valle, “Design of a Fractal Sierpinski Triangle Reconfigurable Antenna To IEEE 802 . 11a Service And X , Ku And K Bands”, 2015, September, pp. 0–12
- [13] O. A. Contreras, A. J. Zozaya, and P. J. Del Pino, “Determinación de las características de una antena con forma de roseta hexagonal fractal”, *Rev. Ing. UC*, vol. 63, no. 1, pp. 71–73, 2009.
- [14] Comité de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. “Guía para la Elaboración de Anteproyecto de Tesis de Maestría y Doctorado”. Universidad del Cauca, 2011.
- [15] Á. Cardama Aznar, L. Jofre Roca, J. M. Rius Casals, and J. R. Robert, *Antenas*, 2nd ed. Barcelona: Edicions UPC, 2002.
- [16] C. Pérez Vega, J. M. Zamaillo Sáinz, and A. Casanueva López, *Sistemas de telecomunicación*, 1st ed. Santander: Universidad de Cantabria, 2007.
- [17] Ramírez Viáfara, Jesús Mauricio. *Notas de clase. Medios de Transmisión*. Universidad del Cauca. 2014.
- [18] J. L. Besada Sanmartín and M. Sierra Castañer, “Definición y Fundamentos de Antenas”, Universidad Politécnica de Madrid, 2004. [Online]. Available: [http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiacion-y-propagacion/contenidos/apuntes/tema1\\_2004.pdf](http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiacion-y-propagacion/contenidos/apuntes/tema1_2004.pdf).
- [19] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4th ed. México: Pearson Education, 2003.
- [20] J. A. Hernández Rueda, *Teoría de líneas de transmisión e ingeniería de microondas*. Mexicali: UABC, 1999.

- [21] G. Cornetta, "Transmisión Por Radiofrecuencia", 2014. [Online]. Available: <http://trf-eps-uspceu.blogspot.com.co/2014/03/sobre-redes-de-dos-puertos-y-parametros.html>.
- [22] Rohde and Schwarz, "R & S ® ZVL Vector Network Analyzer Operating Manual". Munich, 2006.
- [23] J. García and S. Morales, *Instalaciones de radiocomunicaciones*, 1st ed. Madrid: Paraninfo, 2012.
- [24] A. R. Germán Augusto, "Diseño de una antena multibanda basada en fractales para redes móviles inalámbricas de banda ancha en las frecuencias de 0.9, 2.4 y 3.5 GHz", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2009.
- [25] E. W. Weisstein, "Fractal." [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/Fractal.html>.
- [26] M. Á. Morales Medina, "¿Qué es el conjunto de Mandelbrot?: historia y construcción". [Online]. Available: <http://gaussianos.com/¿que-es-el-conjunto-de-mandelbrot-historia-y-construccion/>.
- [27] F. J. Toro López, *Administración de proyectos de informática*, 1st ed. Bogotá: ECOE Ediciones, 2013.
- [28] "LTE frequency band", 2016. [Online]. Available: [http://niviuk.free.fr/lte\\_band.php](http://niviuk.free.fr/lte_band.php).
- [29] "Comparing 802.11a, b, and g: Channels and Interference", 2005. [Online]. Available: <http://www.quepublishing.com/articles/article.aspx?p=413459>.
- [30] Cisco, "Radio Channel Frequencies". [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/routers/access/3200/software/wireless/3200WirelessConfigGuide/RadioChannelFrequencies.pdf>.
- [31] "CST Microwave Studio." [Online]. Available: <https://www.cst.com/products/cstmws>.
- [32] "CST MICROWAVE STUDIO® - Providing Complete Technology for High Frequency 3D EM Field Simulation". [Online]. Available: <https://www.cst.com/products/cstmws/solvers>.

- [33] “System Assembly and Modeling”. [Online]. Available: <https://www.cst.com/products/csts2/sam>.
- [34] “What is LibreCAD”. [Online]. Available: <http://librecad.org/cms/home.html>.
- [35] “El lenguaje del cálculo técnico”. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>. <http://librecad.org/cms/home.html>
- [36] “USRP B200/B210 Bus Series”. [Online]. Available: [https://www.ettus.com/content/files/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/content/files/b200-b210_spec_sheet.pdf).
- [37] “USRP B210”. [Online]. Available: <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT>.
- [38] “VERT900 Antenna”. [Online]. Available: <https://www.ettus.com/product/details/VERT900>.
- [39] “VERT2450 Antenna”. [Online]. Available: <https://www.ettus.com/product/details/VERT2450>.
- [40] F. Silveira, “Análisis de Redes de Microondas”. 2015. [Online]. Available: [https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/69982/mod\\_resource/content/3/param\\_S\\_2015.pdf](https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/69982/mod_resource/content/3/param_S_2015.pdf).