



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

**TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Mimetizar Antenas para *Wireless*.

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTOR: Solano Solano, Pablo Fabián.

DIRECTOR: Morocho Yaguana, Marco Vinicio, Mg.

LOJA – ECUADOR

2015

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Magíster.

Marco Vinicio Morocho Yaguana

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: "Mimetizar Antenas para *Wireless*" realizado por Solano Solano Pablo Fabián, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Mayo de 2015

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo, Solano Solano Pablo Fabián, declaro ser el autor del presente trabajo de fin de Titulación: “Mimetizar Antenas para *Wireless*”, de la Titulación de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, siendo Marco Vinicio Morocho Yaguana, Mg. Director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autor: Solano Solano Pablo Fabián

Cédula 1104770282

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitir que llegue este momento tan importante a mi formación profesional.

A mis hijos, David y Doménica, por ser las personitas que generan energía, dicha y felicidad a mi vida, a mi madre Aura quien siempre ha estado ahí para apoyarme, guiarme y enseñarme a tener la fuerza necesaria para luchar y seguir siempre adelante, a mí única hermana Diana que toda mi vida me ha brindado su apoyo incondicional.

A mi esposa Lilian por su apoyo constante de lucha, quien día a día me ayuda a ser una mejor persona.

Pablo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiar mi camino y darme las fuerzas para superar obstáculos y dificultades presentadas a lo largo de mi vida.

Quiero dejar en constancia mi más profundo y sincero agradecimiento al director de mi proyecto de fin de titulación, el Mg. Marco Vinicio Morocho Yaguana quien con su apoyo, sabiduría, dedicación e interés hizo que este proyecto se realice de la mejor manera.

A mi madre por enseñarme a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos.

A mi hermana, que con su apoyo económico, su cariño y comprensión pude hacer posible la realización de este sueño.

Pablo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	x
RESUMEN EJECUTIVO	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 1.....	5
ESTADO DEL ARTE DE ANTENAS PARA <i>WIRELESS</i>	5
1.1. Mimetización de antenas.....	6
1.1.1. Características de estructuras mimetizadas.	6
1.1.2. Sistemas de integración y mimetización.	7
1.1.3. Soluciones de integración y mimetización.	7
1.1.4. Impacto visual de las antenas	7
1.2. Antenas de microcinta.....	8
1.2.1. Fundamentos teóricos de antenas de microcinta.....	8
1.2.2. Tipos de antenas de microcinta.	9
1.2.3. Métodos de alimentación para antenas de microcinta.	10
1.2.4. Ancho de banda.	10
1.2.5. Arreglo para antenas parche.	11
1.3. Antena quasi-yagi	11
1.3.1. Estructura de la antena quasi-yagi.	12
1.4. Antenas fractales	12
1.4.1. Geometría fractal.....	13
1.4.2. Clasificación de las fractales.	13
1.4.2.1. Fractales Lineales.....	14
1.4.2.2. Fractales no lineales.	16

1.4.2.3.	Antenas simples basadas en geometría fractal.....	16
1.4.2.4.	Fractales para minimizar el tamaño de las antenas.	16
1.4.2.5.	Dipolos fractales.	16
1.4.2.6.	Monopolo en forma de árbol.	17
CAPÍTULO 2.....		18
DISEÑO DE ANTENAS PARA <i>WIRELESS</i> : MICROCINTA, QUASI-YAGI Y FRACTALES..		18
2.1.	Introducción	19
2.2.	Diseño de antenas de microcinta	19
2.2.1.	Línea de transmisión.	19
2.2.2.	Diseño con el método de línea de transmisión.	19
2.2.3.	Diseño de antena para 2.4 GHz.	21
2.2.4.	Alimentación por línea de microcinta.	23
2.3.	Diseño de antenas quasi-yagi	23
2.3.1.	Estructura de la antena.	23
2.3.2.	Ecuaciones de diseño.	24
2.4.	Diseño de antenas fractales	25
2.4.1.	Propiedades de las antenas fractales.....	25
2.4.2.	Isla de Von Koch.	26
2.4.2.1.	Cálculos de la dimensión para la isla de Von Koch.....	26
2.4.2.2.	Longitud.....	27
2.4.3.	Triángulo de Sierpinski.....	28
2.4.3.1.	Diseño.	28
2.4.4.	Monopolo tipo árbol.....	29
2.5.	Software de aplicación.	30
2.5.1.	Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD).	30
CAPÍTULO 3.....		32
SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS		32
3.1.	Introducción	33
3.2.	Simulación de antenas.....	33
3.3.	Resultados de la simulación.....	33
3.4.	Simulación para 2.4 GHz	33
3.4.1.	Antena de microcinta.....	33

3.4.1.1. Simulación y resultados.....	34
3.4.2. Antena quasi-yagi.....	36
3.4.2.1. Simulación y resultados.....	38
3.5. Simulación para 915 MHz.....	40
3.5.1. Antena fractal, monopolo tipo árbol.....	40
3.5.1.1. Simulación y resultados.....	41
3.5.2. Antena fractal, isla de Koch.....	43
3.5.2.1. Simulación y resultados.....	44
3.6. Implementación de prototipos.....	46
3.6.1. Implementación de prototipos para 2.4 GHz y 915 MHz.....	46
3.6.1.1. Prototipos de antena parche, quasi-yagi y fractales.....	46
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES.....	53
TRABAJOS FUTUROS.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS.....	56
ANEXO A.....	57
FIGURAS DE TORRES Y ANTENAS MIMETIZADAS.....	57
ANEXO B.....	60
MEDICIÓN EN EL ANALIZADOR DE ESPECTROS.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Antena de microcinta.	8
Figura 1.2. Elementos de una antena de microcinta.	9
Figura 1.3. Patrón de elevación y patrón de azimut.	9
Figura 1.4. Ancho de banda de la antena.	10
Figura 1.5. Diagrama de radiación 3D, a) un parche, b) dos parches.	11
Figura 1.6. Estructura de una antena quasi-yagi.	12
Figura 1.7. Isla de Koch.	13
Figura 1.8. a) Conjunto de Cantor, b) Isla de Koch, c) Triángulo de Sierpinski.	14
Figura 1.9. Dipolo de un árbol fractal.	16
Figura 1.10. Monopolo de un árbol fractal.	17
Figura 2.1. Programa para el cálculo de las variables de diseño del parche.	22
Figura 2.2. Geometría rectangular a 2.4 GHz.	23
Figura 2.3. Elementos que forman la antena quasi-yagi.	24
Figura 2.4. Isla de Koch diferentes interacciones, a) cero interacción, b) primera interacción, c) segunda interacción.	26
Figura 2.5. Generación de la isla de Koch, a) cero interacciones, b) primera interacción.	26
Figura 2.6. Antena, triángulo de Sierpinski.	28
Figura 2.7. Antena, monopolo árbol fractal.	30
Figura 3.1. Diseño de antena parche.	34
Figura 3.2. Diagrama de radiación 3D, Ganancia 4.789dB.	35
Figura 3.3 Diagrama de radiación polar: $\phi = 90^\circ$, y ancho de haz = 84.9°	35
Figura 3.4. Parámetro de dispersión S11, frecuencia de resonancia.	36
Figura 3.5. Relación de onda estacionaria VSWR.	36
Figura 3.6. Diseño de antena quasi-yagi.	37
Figura 3.7. Diagrama de radiación en 3D, Ganancia 5.766 dB.	38
Figura 3.8. Diagrama de radiación polar: $\phi = 90^\circ$, y ancho de haz = 73.3°	39
Figura 3.9. Parámetro de dispersión S11, frecuencia de resonancia.	39
Figura 3.10. Relación de onda estacionaria VSWR.	40
Figura 3.11. Diseño de antena fractal, monopolo tipo árbol.	40
Figura 3.12. Diagrama de radiación en 3D.	41
Figura 3.13. Diagrama de radiación polar: $\phi = 90^\circ$, y ancho de haz = 44.9°	42
Figura 3.14. Parámetros de dispersión S11, Frecuencia de resonancia.	42
Figura 3.15. Relación de onda estacionaria VSWR.	43
Figura 3.16. Diseño de antena fractal, Isla de Koch.	43
Figura 3.17. Diagrama de radiación 3D.	44
Figura 3.18. Diagrama de radiación polar: $\phi = 90^\circ$, y ancho de haz = 32.9°	45
Figura 3.19. Parámetros de dispersión S11, frecuencia de resonancia.	45
Figura 3.20. Relación de onda estacionaria VSWR.	46
Figura 0.1 Montaje de equipos en torres estilo pino.	58
Figura 0.2 Torres camufladas estilo palmera.	58
Figura 0.3 Torre camuflada estilo palmera con cocos.	59
Figura 0.4 Montaje de equipos en copa torres estilo palmera.	59
Figura 0.1 Esquema para realizar las mediciones del patrón de radiación.	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de la FR4.	22
Tabla 2.2. Dimensiones del parche.	22
Tabla 3.1. Valores obtenidos después de ser aplicada la optimización.	38
Tabla 3.2 Resultados experimentales de antena parche y quasi-yagi.	47
Tabla 3.3 Resultados experimentales de antenas monopolo tipo árbol, isla de Koch.	49
Tabla 0.1 Equipos para la medición de las antenas implementadas.	61
Tabla 0.2 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en azimut de la antena parche.	62
Tabla 0.3 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en elevación de la antena parche.	63
Tabla 0.4 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en azimut de la antena quasi-yagi.	64
Tabla 0.5 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en elevación de la antena quasi-yagi.	65
Tabla 0.6 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en azimut de la antena fractal monopolo tipo árbol.	66
Tabla 0.7 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en elevación de la antena fractal monopolo tipo árbol.	67
Tabla 0.8 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en azimut de la antena fractal isla de Koch.	68
Tabla 0.9 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en elevación de la antena fractal isla de Koch.	69

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente trabajo de fin de titulación se elige un conjunto de antenas para ser mimetizadas con el fin de minimizar el impacto visual de la estructura de telecomunicaciones, enfocándose principalmente en el parque nacional Podocarpus. En primer plano se escoge modelos de antenas que cuenten con características ecológicas es por ello que se opta por antenas de microcinta, quasi-yagi y fractales dichas antenas son diseñadas, simuladas e implementadas, concluyendo que los prototipos construidos experimentalmente dan resultados óptimos en los parámetros de medición como ancho de banda, ganancia, VSWR, etc.

PALABRAS CLAVES: Mimetización, *Wireless*, parche, quasi-yagi, fractal, antenas, Podocarpus.

ABSTRACT

In the present work to a set of qualifications to be camouflaged antennas in order to minimize the visual impact of the structure of telecommunications, focusing mainly on the Podocarpus National Park is chosen. In the foreground models of antennas that have ecological characteristics it is why opt for antennas microstrip quasi-yagi and fractals such antennas are designed, simulated and implemented is chosen, concluding that the prototypes built experimentally give optimal results in the parameters measurement as bandwidth, gain, VSWR, etc.

KEYWORDS: Camouflage, Wireless, patch, quasi-yagi, fractal antennas, Podocarpus.

INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de minimizar el impacto visual de la infraestructura de telecomunicaciones, principalmente en ciudades y parques ecológicos, en donde el público percibe el deterioro del paisaje, conlleva a una planificación estéticamente óptima, de instalar sistemas mimetizadores que oculten total o parcialmente las antenas.

El problema no incide únicamente en futuras instalaciones sino también en las ya construidas, ante esta necesidad se efectúa un estudio de modelos de antenas que cumplan con características físicas semejantes a las hojas de un árbol o a señales de tránsito en una ciudad.

El presente proyecto parte del estudio de la mimetización de antenas existentes, por tanto se hace un estudio de cada uno de los modelos de antenas elegidos para ser mimetizados, estas antenas deben cumplir con las características antes mencionadas, es por ello que se opta por las antenas tipo microcinta, quasi-yagi y fractales, siendo éstos los modelos a ser implementados.

Terminado el diseño de los modelos de antenas, se procede a la simulación siendo una parte previa a la implementación de los mismos, esto nos permite realizar las correcciones necesarias del modelo de antena, además nos proporciona datos que serán comparados con los obtenidos experimentalmente.

En forma general, se realiza varias simulaciones y aplicando la optimización a la impedancia, ganancia y frecuencia de resonancia se llega a los valores finales que dan lugar a los modelos óptimos para ser implementados.

Una vez terminada la implementación de cada uno de los modelos de antenas se procede a la medición experimental, para realizar dicha medición se utiliza el generador de señales y el analizador de espectros, la medición consiste en encontrar el patrón de radiación tanto en azimut como en elevación los resultados obtenidos se comparan con los resultados simulados en CST Microwave Studio.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Mimetizar Antenas para *Wireless*

Objetivos específicos

- Estado del arte.
- Establecer diseños que puedan ser implementados en un medio cualquiera (microcinta, quasi-yagi y fractales).
- Implementar los prototipos optimizados.
- Realizar mediciones y verificar su funcionamiento con los parámetros establecidos en los diseños
- Desarrollar el informe técnico.

CAPÍTULO 1
ESTADO DEL ARTE DE ANTENAS PARA *WIRELESS*

1.1. Mimetización de antenas

La mimetización de antenas para las telecomunicaciones se utiliza con el fin de disminuir la contaminación visual al medio ambiente.

Debido a la necesidad de camuflar o mimetizar la infraestructura de telecomunicaciones, principalmente las que correspondan a las comunicaciones inalámbricas se pueden diseñar modelos de antenas con aspectos ecológicos, con el propósito de instalarlas en zonas o ambientes que requieren un bajo impacto ambiental y visual como son: Los parques nacionales, las zonas protegidas, [1] el parque de una ciudad y la ciudad mismo.

Actualmente, es posible mimetizar instalaciones existentes, aplicando diferentes técnicas de simulación y camuflaje en el lugar del emplazamiento, sin que la operatividad de estos equipos emisores se vean afectados durante la instalación de su nueva fisonomía. (Anexo A) [1]

1.1.1. Características de estructuras mimetizadas. [1]

El rápido desarrollo del sector de las telecomunicaciones requiere del despliegue de nuevas redes e infraestructuras, las cuales deben ser compatibles con las preocupaciones ambientales. Como consecuencia tanto en áreas rurales como urbanas se han desarrollado diferentes tipos de torres con camuflajes. Algunas con forma de pinos, otras con forma de palmeras, etc.

Las estructuras mimetizadas que existen en el mercado, presentan diferentes características técnicas con el fin de garantizar la durabilidad de la estructura a través del tiempo, independientemente del ambiente que los rodea y donde éstas se instalen. Entre algunas de las características técnicas generales que presentan las torres mimetizadas se puede citar las siguientes:

- Transparencia de las radiaciones de antenas
- Resistencia a climas extremos y a los agentes atmosféricos
- Factibilidad de embalaje
- Resistencia a rayos ultravioleta
- Los materiales deben mantener con el tiempo sus características mecánicas y de apariencia

Las estructuras de torres mimetizadas se construyen bajo prácticas internacionales, apegadas a los estándares de construcción de infraestructuras de torres de telecomunicaciones.

- TIA/EIA 222 (Normas Estructurales para Torres y Estructuras de Acero para Antenas).
- EUROCODE 1 EN 1991 (Comité de Estandarización Europeo).

- EURONORM EN 10025 (Productos laminados en caliente, para construcciones metálicas).
- BS EN 20898-1 (*Bolts, screws and studs*).
- ASTM A123 (Especificación técnica para el galvanizado de materiales generales).
- EN 353 1/2 (Protección individual contra caídas de altura).

Principalmente la estructura mimetizada está conformada por dos partes: el cuerpo de la estructura de la torre y la parte superior donde se instala las antenas. El tronco o cuerpo de la torre, está compuesto por varias secciones dependiendo de la altura total de la estructura, que puede variar de 15 a 40 metros, la copa o parte superior de la torre principalmente está compuesta por ramas de material plástico, en donde su diseño toma en cuenta la cantidad, tipo y arreglo de los equipos que se necesitan instalar y camuflar naturalmente.

1.1.2. Sistemas de integración y mimetización. [2]

Los primeros sistemas de integración que surgieron, se fundamentan en la ocultación de las antenas o disminución del impacto visual mediante mimetización de las estaciones base.

Para el buen funcionamiento de cualquier sistema de mimetización lo fundamental es garantizar su comportamiento al paso de las emisiones radioeléctricas. Parámetros como su constante dieléctrica, la tangente de pérdida y espesor son críticos, y solo una adecuada selección de ellos según su uso y aplicación permitirán el funcionamiento de la infraestructura mimetizada.

Actualmente existen en el mercado numerosas posibilidades, tanto de materiales como estructuras ya prediseñadas que facilitan enormemente los procesos de mimetización.

1.1.3. Soluciones de integración y mimetización.

Las técnicas de integración y mimetización de estaciones base presentan una evolución histórica tanto de conceptos como de soluciones concretas muy definidas. Un mismo sistema de mimetización bien puede simular un paramento actual siendo la técnica y los materiales los mismos, solo modificando el diseño y las texturas elegidas. [2]

1.1.4. Impacto visual de las antenas

En la actualidad los sistemas de integración se centran en buscar soluciones de mimetización del impacto visual. Al mismo tiempo se busca optimizar el despliegue de red mediante la división de las macro células iniciales en células de dimensiones más reducidas. [2]

Estas antenas de bajo impacto visual, se caracterizan fundamentalmente por su reducido tamaño y la facilidad de ser camufladas en un medio cualquiera, por lo tanto éstas son el principal condicionante que define la solución a adoptar.

1.2. Antenas de microcinta

La configuración de una antena de microcinta es una superficie metálica, impresa sobre un sustrato con dimensiones en términos de longitudes de onda (λ). La estructura de la antena de microcinta se completa con un plano metálico denominado tierra, éste se encuentra en la parte posterior del sustrato. La Figura 1.1 muestra un ejemplo de una antena de microcinta de geometría rectangular.

Para el cálculo de la longitud de onda se emplea la fórmula siguiente:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 1.1$$

Donde c es la velocidad de propagación de la luz en el medio, y f la frecuencia central o frecuencia de resonancia. [3]

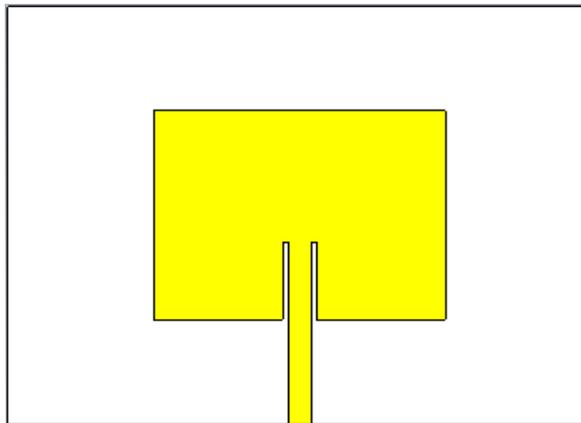


Figura 1.1. Antena de microcinta.

Las ventajas de las antenas de microcinta son su bajo peso y perfil, la posibilidad de realizar antenas conforme a superficies dando la oportunidad de mejorar la arquitectura del entorno donde se las va implementar, es decir insertándolas en el medio y pasándolas por desapercibidas lo que constituye la mimetización. Sin embargo las antenas de microcinta presentan varias desventajas a su configuración, destacando su baja eficiencia y el estrecho ancho de banda, baja pureza de polarización y las radiaciones espurias debidas a la alimentación. [4]

1.2.1. Fundamentos teóricos de antenas de microcinta.

Las antenas microcinta físicamente tienen la forma de un cuadrado o rectángulo, son muy direccionales debido a que tienen la mayoría de su potencia radiada en una dirección tanto en el plano horizontal como en el vertical. La Figura 1.2 muestra la forma física de la antena.

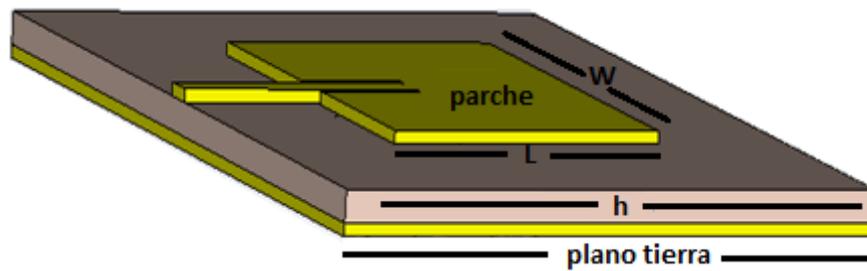


Figura 1.2. Elementos de una antena de microcinta.

Donde:

L = largo del parche

W = ancho del parche

h = altura del dieléctrico o distancia entre el plano de tierra y el parche.

El lóbulo de radiación de una antena de microcinta es direccional, en la Figura 1.3, se observa el lóbulo que genera la antena, como también el patrón de elevación y el patrón de azimut.

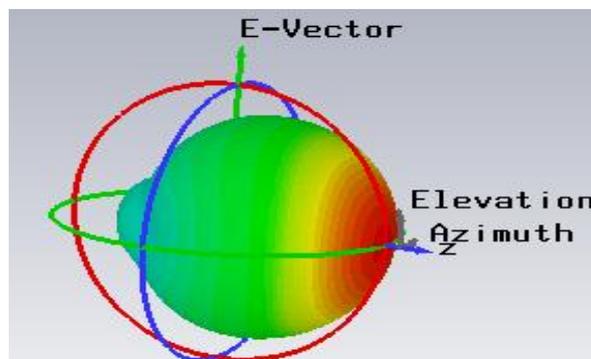


Figura 1.3. Patrón de elevación y patrón de azimut.

Este tipo de antenas pueden ser o no planas, usan modernas tecnologías de impresión de circuitos, mecánicamente robustos cuando se montan en superficies rígidas, compatibles con diseños de circuitos integrados monolíticos de microondas (MMIC's por sus siglas en inglés) donde la forma particular y el modo son seleccionados de forma versátil en términos de la frecuencia de resonancia, la polarización, el patrón de radiación y la impedancia. [5]

1.2.2. Tipos de antenas de microcinta.

Existen varios tipos de antenas de microcinta, la más común es la antena parche, esta antena es de banda estrecha y está fabricada cubriendo los elementos de la antena en un metal con sustrato dieléctrico formando una superficie plana. Las formas más comunes de

los parches son cuadrados, rectangulares, circulares y elípticas pero es posible cualquier forma. [4]

1.2.3. Métodos de alimentación para antenas de microcinta.

Existen varias formas de alimentar las antenas de microcinta, entre las más populares, está la alimentación por línea de microcinta, la alimentación por línea coaxial, acoplamiento de apertura y acoplamiento por proximidad. Estos métodos pueden ser clasificados en: métodos de alimentación directa (microcinta, coaxial) y métodos de alimentación sin contacto (acoplamiento por apertura y proximidad). [3]

1.2.4. Ancho de banda.

Las antenas de microcinta radían debido a los campos que viajan entre el borde del parche y el plano de tierra. Para el buen funcionamiento de la antena, se sugiere un sustrato grueso, que tenga una constante dieléctrica baja, esto proporciona más eficiencia, mayor ancho de banda y mayor radiación. [3] En la Figura 1.4 se observa el ancho de banda de una antena tipo parche.

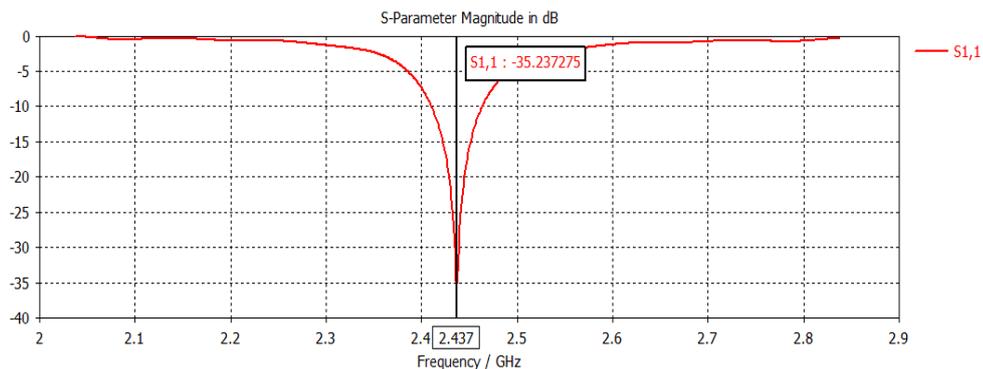


Figura 1.4. Ancho de banda de la antena.

De acuerdo a la Figura 1.4 el ancho de banda se expresa de la siguiente forma:

$$BW = \frac{(f_H - f_L)}{(f_0)} \quad 1.2$$

Donde:

B_W = Ancho de Banda

F_H = frecuencia final de ancho de banda

F_L = frecuencia inicial de ancho de banda

F_0 = frecuencia central o de resonancia

1.2.5. Arreglo para antenas parche.

El objetivo de realizar un arreglo de antenas es proporcionar un conjunto de características electromagnéticas que como elemento individual serían difíciles de conseguir.

La combinación de elementos radiadores pueden realizarse de forma lineal, planar, dependiendo como sea el arreglo de parches se puede obtener diferentes cambios en el patrón de radiación característico de una antena parche que involucra a la ganancia y directividad, que son variables de interés a analizar. [6]

En la Figura 1.5 se ve la diferencia que se da al ir incrementando el número de parches, es decir un solo parche presenta un amplio ancho de haz, por lo tanto poca directividad y poca ganancia, ahora comparando con un arreglo de dos parches se aprecia que la radiación en determinadas direcciones es atenuada, por consiguiente a ley de conservación de la energía, pasando a formar parte del lóbulo principal de radiación, haciendo que la antena sea más directiva y con una mayor ganancia, así mismo se forma lóbulos de radiación laterales.

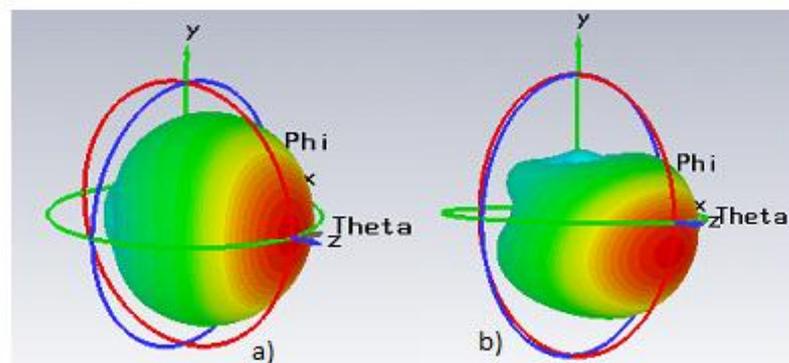


Figura 1.5. Diagrama de radiación 3D, a) un parche, b) dos parches.

1.3. Antena quasi-yagi

La quasi-yagi es un tipo de antena impresa cuyo funcionamiento es similar a las conocidas antenas yagi-uda, intentando optimizar durante el proceso de diseño la directividad y ganancia, manteniendo el ancho de banda de funcionamiento. Como punto de partida se ha tomado la antena impresa coplanar introducida por primera vez por Y. Qian y otros para aplicaciones de banda X. [7]

Las antenas quasi-yagi están formadas principalmente por un dipolo, un elemento director y un plano de masa situado en la parte inferior del sustrato, el plano de masa es usado como elemento reflector, junto con el dipolo y el elemento director proporciona una radiación de

tipo end-fire, la alimentación de la antena se realiza a través de una línea de microcinta de impedancia característica $Z_0 = 50\Omega$.

1.3.1. Estructura de la antena quasi-yagi.

La Figura 1.6 muestra el esquema funcional de la antena quasi-yagi. Como se nota, esta antena es unipolar, siendo ésta una de las principales características de la misma.

La antena está formada por un dipolo impreso, alimentado mediante un par de líneas coplanares (CPS microstrip-to-coplanar strip transition), y un elemento director, siendo utilizado para aumentar la directividad de la antena. Para la correcta alimentación del dipolo impreso (cada uno de los brazos del dipolo alimentado con una diferencia de fase de 180 grados) se utiliza un desfasador, implementado mediante tecnología microstrip, además de estos elementos se utiliza una parte de línea microstrip de $\lambda/4$ longitud como adaptador de impedancias.

En la parte posterior del sustrato se sitúa el plano de masa de los elementos microstrip, siendo éste considerado en la antena como elemento reflector.

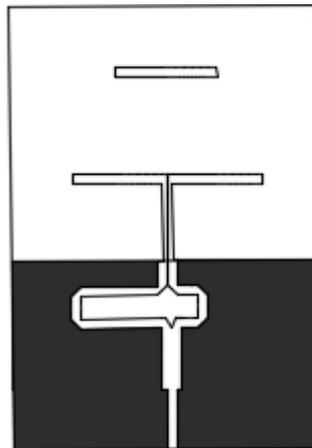


Figura 1.6. Estructura de una antena quasi-yagi.

Para formar el haz principal en la antena quasi-yagi, la energía electromagnética se acopla desde el alimentador a través del espacio entre los elementos parásitos, debido a que el dipolo radía de forma omnidireccional, puede existir un fuerte acoplamiento de energía entre el alimentador y sus elementos incluso si existe una mayor distancia. Además el patrón de radiación así como la dirección de apuntamiento del haz principal están en función del tamaño del reflector y de los elementos directores. [8]

1.4. Antenas fractales

La geometría tradicional euclidiana, es la rama de la matemática que se encarga de las propiedades de las mediciones de elementos tales como puntos, líneas, planos y

volúmenes. Sin embargo, las formas encontradas en la naturaleza, como montañas, nubes, hojas, árboles, vegetales, copos de nieve, y un sin número de otros objetos no son fácilmente descritos por la geometría tradicional. [9]

La geometría fractal permite diseñar antenas multi-frecuencia, utilizando una propiedad denominada auto semejanza. Esta propiedad nos indica que el objeto está formado por réplicas de sí mismo a escalas más reducidas.

Esta propiedad fractal es la que permite diseñar antenas fractales que representan diagramas iguales o muy parecidos en diferentes frecuencias de operación.

1.4.1. Geometría fractal.

El concepto fractal se puede abordar desde dos puntos de vista, sin embargo se acepta comúnmente que un fractal es un objeto geométrico compuesto de elementos también geométricos de tamaño y orientación variable, pero de aspecto similar. Con particularidad de que si un objeto fractal se le aumenta los elementos, vuelven a tener el mismo aspecto. [10] Un ejemplo claro es la isla de Koch que se ve en la Figura 1.7.

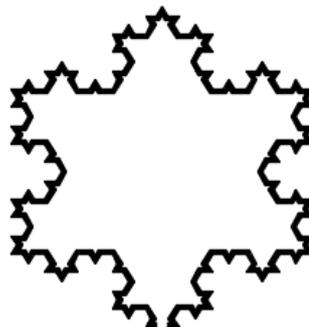


Figura 1.7. Isla de Koch.

1.4.2. Clasificación de las fractales.

Existen diferentes formas de clasificar a los fractales, algunas se encuentran en la naturaleza y otras son creadas por fórmulas matemáticas.

- Fractales lineales
- Fractales no lineales
- Antenas simples con geometría fractal, y
- Arreglos de elementos simples en disposiciones fractales

También se suele clasificar a las antenas fractales de acuerdo con las ventajas logradas frente a las geometrías ordinarias en:

- Antenas fractales miniatura, y
- Antenas fractales multibanda. [9]

1.4.2.1. *Fractales Lineales.* [10], [11]

Estas antenas son las que se construyen con un cambio en la variación de sus escalas, los fractales lineales son exactamente idénticos en todas sus escalas hasta el infinito. Es decir si se observa una parte específica muy pequeña de una forma fractal se ve igual o similar a la forma original del fractal, solamente que más pequeño. La Figura 1.8 ilustra mejor este tipo de fractales.

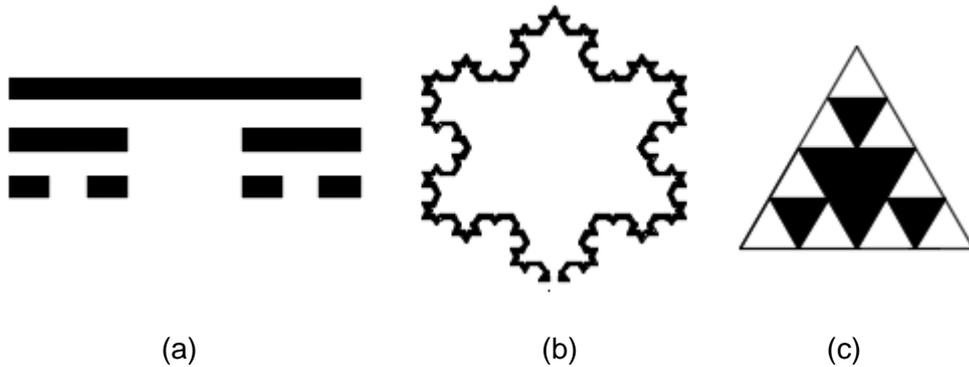


Figura 1.8. a) Conjunto de Cantor, b) Isla de Koch, c) Triángulo de Sierpinski.

El **conjunto de Cantor**. Es un destacado subconjunto fractal de intervalo real, quizá la primera estructura fractal de la que se tiene registro.

La construcción del conjunto de Cantor, fractal realizado mediante remoción de partes de una figura geométrica, se hace utilizando el siguiente algoritmo:

Estado inicial: Un segmento

Etapas 1: Se divide el segmento en tres partes iguales y se elimina la parte central

Etapas 2: Iterar la etapa 1 con cada uno de los segmentos obtenidos

La reunión de los segmentos que no han sido eliminados es el conjunto de Cantor, formado por una sucesión de segmentos cuyas longitudes tienden a cero. Es claro que los extremos de cada subintervalo pertenecen 0 y 1, $1/3$ y $2/3$, $1/9$, $2/9$, $7/9$ y $8/9$, $1/27$, hay una infinidad de puntos: los $1/3^n$ están todos incluidos, con n describiendo los naturales. Pero hay mucho más, por ejemplo $1/4$ es un elemento del conjunto de Cantor.

El conjunto es pequeño cuando se considera su longitud: el intervalo inicial $[0,1]$ mide 1, y a cada paso, se le quita un tercio, lo que hace que su longitud se multiplique por $2/3$. La sucesión geométrica $u_n = (2/3)^n$ tiende hacia cero, por lo tanto el conjunto de Cantor es de medida nula, esto implica que el conjunto de Cantor no puede contener ningún intervalo de medida no nula.

Al calcular la dimensión del conjunto de Cantor se tiene:

$$D = \frac{\ln N}{\ln \frac{1}{\epsilon}} = \frac{\ln 2}{\ln 3} = 0.63 \quad (1.3)$$

La **curva de Von Koch**. Es uno de los fractales más utilizados al momento de diseñar antenas, para este tipo de fractal, al igual que con otros fractales basta describir como se consigue las primeras interacciones. Se parte de un segmento de recta denominado interacción cero, el cual se lo divide en tres partes iguales el segmento central se lo reemplaza por un triángulo equilátero de lado igual a dicho segmento pero suprimiendo el lado que debería ir sobre él. Para cada proceso de interacción, la longitud se incrementa a:

$$\frac{4}{3} L_{k-1} \quad (1.4)$$

Donde L_{k-1} representa la longitud de la curva en el paso precedente. La letra k simboliza la interacción. Cuando el número de interacciones incrementa la longitud de la curva diverge. Debido a esto, se evidencia que la longitud no es una medida útil para describir la curva de Von Koch, puesto que no es posible definir el límite de un número infinito de interacciones.

La dimensión de autosimilaridad para la curva de Von Koch, considerando que en este caso $N = 4$ y $\epsilon = 1/3$, es igual a:

$$D = \frac{\log(4)}{\log(3)} = 1.26 \quad (1.5)$$

El **triángulo de Waclaw Sierpinski**. Como punto de partida se cuenta con un triángulo equilátero de lado igual a la unidad (interacción cero), para ir incrementando el número de interacciones se toma los puntos medios de los lados del triángulo y a través de éstos se traza un triángulo equilátero invertido de lado igual a $\frac{1}{2}$ (interacción uno), para las interacciones consecutivas se repite el mismo proceso.

La dimensión de autosimilaridad para el triángulo de Sierpinski, tomando en cuenta lo expuesto en el párrafo anterior, se ve determinada por los valores de $N = 3$ y $\epsilon = 1/2$, y es igual a:

$$D = \frac{\log(3)}{\log(2)} = 1.58 \quad (1.6)$$

1.4.2.2. Fractales no lineales.

Los fractales no lineales se generan creando distorsiones no lineales o complejas, es decir son fractales que presentan una estructura similar pero no exactamente igual a su original. [10]

1.4.2.3. Antenas simples basadas en geometría fractal. [10]

De esta forma se clasifica a cualquier antena individual cuya geometría esté basada en un fractal. Es imposible construir un verdadero fractal, por tanto se debe hablar de antenas prefractales de 'n' interacciones.

Diversos autores han estudiado las clásicas configuraciones de dipolo, monopolo y bucle, con implementaciones en alambre, impresas y microstrip, y como principal resultado es la miniaturización, el incremento de la impedancia de entrada y comportamientos multibanda.

Para el análisis de este tipo de antenas se emplean técnicas numéricas y experimentales ya que resulta muy complicado resolver analíticamente las ecuaciones resultantes sobre un contorno fractal y sería impráctico realizar este procedimiento en cada interacción.

1.4.2.4. Fractales para minimizar el tamaño de las antenas.

Cuando se hace uso de las figuras fractales como antenas éstas pueden traer una ventaja en comparación con las geometrías ordinarias contenidas en espacios clásicos, permitiendo mayores longitudes de onda en menos tamaños físicos. El principal resultado alcanzado por este tipo de antenas es la miniaturización con respecto a una antena tradicional operando a la misma frecuencia, este resultado se lo puede mostrar en los dipolos y los bucles fractales. [11]

1.4.2.5. Dipolos fractales.

El dipolo es un radiador compuesto por dos conductores lineales rectos alimentados simétricamente, en los dipolos fractales se emplea la interacción para cada brazo. En la literatura se han reportado las curvas de Von Koch y los árboles fractales como brazos del dipolo en implementación de alambres e impresos, la Figura 1.9 muestra un dipolo de árbol fractal. [11]

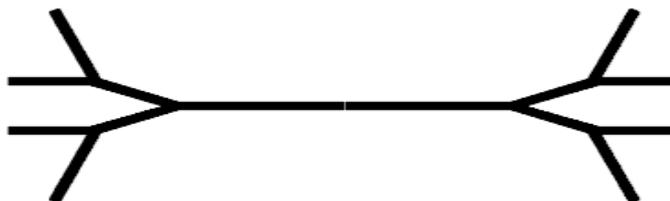


Figura 1.9. Dipolo de un árbol fractal.

1.4.2.6. Monopolo en forma de árbol.

Este tipo de antena tiene un comportamiento de banda ultra ancha, esto hace posible un comportamiento multibanda reconfigurable. [9]

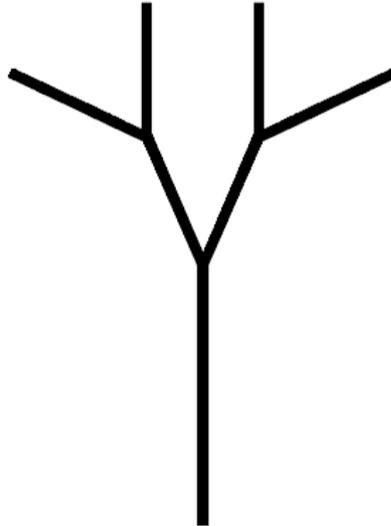


Figura 1.10. Monopolo de un árbol fractal.

Para la generación del monopolo de un árbol fractal se aplica una secuencia iterativa a la estructura inicial, comenzando con un monopolo simple. Se toma un segmento extremo y se lo divide en dos, formando un ángulo de 60° y se genera las dos primeras ramas a medida que el proceso iterativo continúa, los segmentos extremos de cada rama se van dividiendo en más ramas como se ve en la Figura 1.10.

Si definimos la longitud eléctrica total como la mínima distancia que debe recorrer un electrón desde la base del fractal hasta el extremo de cualquiera de sus ramas terminales, se observa que en los árboles fractales esta longitud permanece constante a lo largo del proceso. [12]

CAPÍTULO 2
DISEÑO DE ANTENAS PARA *WIRELESS*: MICROCINTA, QUASI-YAGI Y
FRACTALES

2.1. Introducción

En la actualidad las antenas impresas tienen una elevada acogida dentro de las comunicaciones inalámbricas, debido a su perfil plano, reducido tamaño y peso, dando la facilidad de integrarlas o empotrarlas en cualquier circuito.

Existen diversos tipos de éstas antenas, todas ellas tienen asociada de forma propia una serie de desventajas, como reducido ancho de banda, baja ganancia y eficiencia, y aparición de ondas de superficie.

Dentro de las fractales existen múltiples modelos, pero dentro del ámbito de la aplicación las más utilizadas son; Isla de Von Koch, el triángulo de Sierpinski, los fractales de árbol, de acuerdo a su forma y propiedades son aplicados a diferentes tipos de antena como las antenas de bucle, dipolos, formación de arreglos y antenas multibanda.

2.2. Diseño de antenas de microcinta

Para el diseño de antenas de microcinta tipo planar se elige trabajar con geometría rectangular siendo el modelo más factible para mimetizar, haciendo uso del método de línea de transmisión que posteriormente se resalta con el análisis electromagnético o también conocido como análisis de onda completa.

2.2.1. Línea de transmisión.

Para el diseño del parche se utiliza el modelo de línea de transmisión. La distribución de los campos irradiados en los bordes W presentan los llamados fringing effects (efecto de interferencia por difracción) que forman líneas de radiación. Dependiendo de la frecuencia de operación así como los substratos utilizados, este efecto se presenta de diferentes formas para cada diseño. [6]

En el modelo de línea de transmisión se relaciona al parche rectangular como una línea resonante. Las variaciones del campo y la resonancia del parche se determinan por la longitud del parche que comúnmente es de media longitud de onda, debiendo considerar los efectos de extensión de campos.

2.2.2. Diseño con el método de línea de transmisión. [6], [14]

1. Para el cálculo del ancho (W) del parche, se hace uso de la siguiente fórmula

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

Siendo c la velocidad de la luz, f_r la frecuencia de resonancia y ϵ_r la constante dieléctrica.

2. Para calcular el valor de la constante dieléctrica efectiva, se debe tomar en cuenta la constante dieléctrica del sustrato y la constante dieléctrica del aire debido a los efectos de borde del campo eléctrico (Fringing Effects).

Se interpreta como constante homogénea de un medio reemplazando las regiones de aire y dieléctrico en la línea de microcinta.

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \right) \quad (2.2)$$

3. Para determinar la extensión de longitud ΔL , siendo el parámetro que indica la variación de longitud del panel, esta depende de la constante dieléctrica efectiva y de la relación W/h .

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

4. Se obtiene la longitud real del parche rectangular considerando la longitud efectiva de éste (L_e) y el valor ΔL .

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

Donde la longitud efectiva se calcula como:

$$L_e = L + 2\Delta L \quad (2.5)$$

Este es el procedimiento a seguir para encontrar el ancho W y largo L del parche.

5. Una vez conocidas las dimensiones del parche, se debe encontrar la impedancia de entrada para ello se debe definir los valores de conductancia (G_1) y de resistencia de resonancia a la entrada del mismo (R_{in}).

Para encontrar estos valores se realiza lo siguiente:

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (2.6)$$

En donde:

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W \cos[\theta]}\right)}{\cos[\theta]} \right]^2 \sin[\theta]^3 d\theta \quad (2.7)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.8)$$

También hay que determinar la conductancia del modelo de transmisión equivalente G_{12} , para ello se hace uso de la función de Bessel de primera clase de orden cero como se indica a continuación:

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\text{Sin}\left(\frac{k_0 w}{2} \cos[\theta]\right)}{\text{Cos}[\theta]} \right]^2 J_0(k_0 L \text{Sin}\theta) \text{Sin}(\theta)^3 d\theta \quad (2.9)$$

Una vez obtenidos estos valores se determina el valor correspondiente a la resistencia de resonancia a la entrada del parche

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (2.10)$$

Cuando el parche presenta una ranura se necesita conocer la longitud de entrada de la ranura para ello se tiene una forma más compleja presentando el producto de un coseno como se muestra en la siguiente ecuación.

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \text{Cos}^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (2.11)$$

Para encontrar la longitud de entrada de la ranura (y_0 se tiene que hacer el despeje de este valor).

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \text{Cos}^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (2.12)$$

2.2.3. Diseño de antena para 2.4 GHz.

Una vez conocido el proceso del método de diseño, viendo su flexibilidad para el desarrollo de los cálculos se hace uso del mismo. Para simplificar el cálculo de las dimensiones del parche se lo realiza en el software Matlab, a través de la interfaz gráfica, donde pide ingresar los datos tales como:

- La frecuencia de resonancia
- Permitividad relativa
- Espesor del dieléctrico

Una vez ingresados los datos se simula el programa dando los resultados que vienen a ser las variables con las que está diseñado el parche.

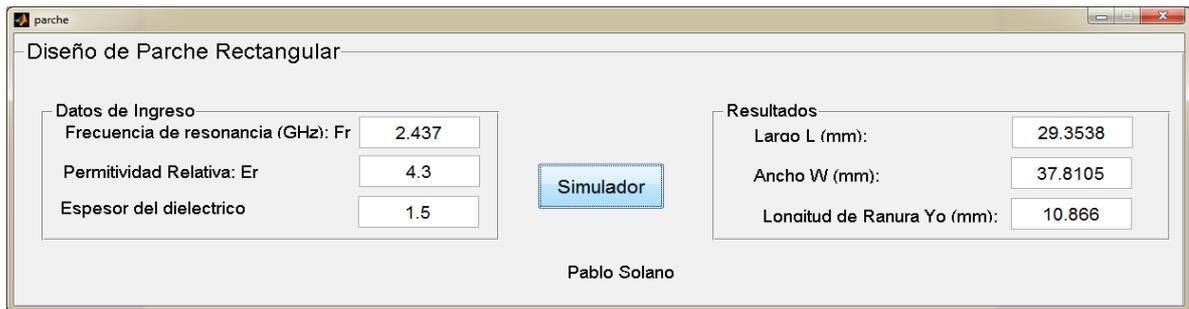


Figura 2.1. Programa para el cálculo de las variables de diseño del parche.

El material que se usa como dieléctrico es la Fibra de Vidrio FR4 por sus características adecuadas y disponibilidad en el mercado en la Tabla 2.1 se describe sus características.

Tabla 2.1. Características de la FR4.

Material	ϵ_r	Rh	Tan	H	T
FR4	4.3	1	0.0054	1.5mm	30 μ m

Siendo ϵ_r el valor de la permitividad utilizada para encontrar los valores con que se diseña el parche, en la Tabla 2.2 se muestra los valores que se obtuvieron con el software Matlab los mismos que se mostraron en la Figura 2.1.

Tabla 2.2. Dimensiones del parche.

Frecuencia GHz	Largo L (mm)	Ancho W ()
2.4	29.35	37.81

La impedancia de entrada al parche se calcula internamente en el programa realizado en Matlab, si el valor obtenido excede al de referencia (50 Ω) la solución a este problema es reducir la impedancia de la línea de alimentación y de entrada al parche por medio de la ranura (Inset-Fed) dentro del mismo cuya longitud de ingreso determina la impedancia de entrada.

La Figura 2.2 muestra la geometría del parche rectangular con las dimensiones obtenidas anteriormente.

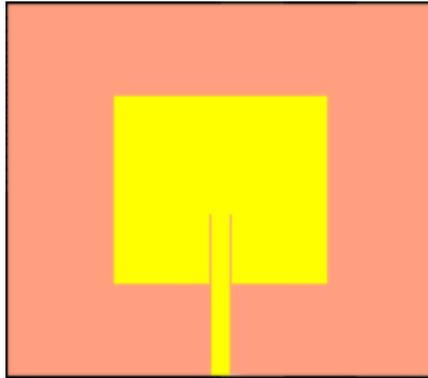


Figura 2.2. Geometría rectangular a 2.4 GHz.

2.2.4. Alimentación por línea de microcinta. [15]

Con esta técnica de alimentación, una cinta conductora se conecta directamente al borde del parche radiador, la línea es más angosta comparada con el parche y se tiene la ventaja de que la línea puede grabarse sobre el mismo sustrato.

La impedancia presentada en el extremo del parche, debe acoplarse a una impedancia característica de 50Ω por medio de un transformador de impedancias. La alimentación puede estar centrada o descentrada a lo largo del ancho W , y dependiendo de la ubicación del punto de alimentación se determina el modo electromagnético. La introducción de alimentación provoca un desplazamiento en la frecuencia de resonancia pero el patrón de radiación permanece inalterado.

2.3. Diseño de antenas quasi-yagi

2.3.1. Estructura de la antena. [8]

La antena quasi-yagi mostrada en la Figura 2.3 está compuesta principalmente por un dipolo, un elemento director y un plano de masa (situado en la parte inferior del sustrato), de ahí que el principio de operación de esta antena guarde ciertas similitudes con las antenas tradicionales yagi-Uda. El plano de masa es usado como elemento reflector y junto con el dipolo y el elemento director proporciona una radiación de tipo end-fire. La alimentación de la antena se realiza mediante una línea de microcinta de impedancia característica $Z_{in} = 50\Omega$.

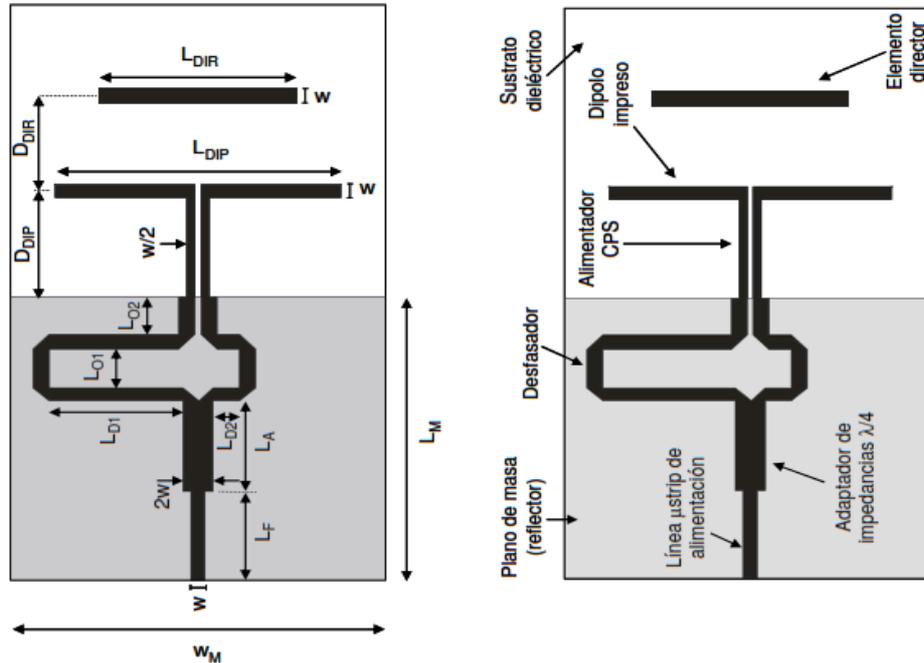


Figura 2.3. Elementos que forman la antena quasi-yagi.

Como se aprecia en la Figura 2.3, esta antena es unipolar, siendo ésta una de las principales características de la antena. La antena está formada por un dipolo impreso alimentado mediante un par de líneas coplanares (CPS), y un elemento director, utilizado para aumentar la directividad de la antena. Para realizar la correcta alimentación del dipolo impreso (cada uno de los brazos del dipolo alimentado con una diferencia de fase 180 grados), se utiliza un desfasador, implementado mediante tecnología microstrip. Además de estos elementos se utiliza un tramo de línea de microstrip de longitud $\lambda/4$ como adaptador de impedancias. En la cara inferior del sustrato se sitúa el plano de masa de los elementos microstrip, que actuará también como elemento reflector de la antena.

2.3.2. Ecuaciones de diseño. [16]

Se parte de la frecuencia de resonancia en la banda ISM y sustrato de Fibra de Vidrio ($\epsilon_r = 4.3$, $h = 1.5$ mm). A partir de éste se realiza el diseño de antenas quasi-yagi con frecuencia de resonancia en la banda 2.4 GHz, estos diseños serán simulados en el siguiente capítulo, en función de los resultados obtenidos se modificará hasta conseguir exactamente la frecuencia de resonancia deseada.

Las ecuaciones que proporcionan un método para calcular todas las dimensiones que componen la antena son las siguientes:

$$L_F = L_A = L_{DIR} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} K_{L_F} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} 35.53E^{-2} \quad (2.13)$$

$$L_{D2} = L_{D5} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} K_{L_{D2}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} 16.15E^{-2} \quad (2.14)$$

$$L_{D1} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} K_{L_{D1}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} 51.66E^{-2} \quad (2.15)$$

$$L_{O1} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} K_{L_{O1}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} 19.34E^{-2} \quad (2.16)$$

$$L_{DIP} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} K_{L_{DIP}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} 41.99E^{-2} - L_{O1} \quad (2.17)$$

$$L_{DIR} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} K_{L_{DIR}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} 32.29E^{-2} \quad (2.18)$$

$$L_{DIP} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} K_{L_{DIP}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} 93.65E^{-2} \quad (2.19)$$

Esta formulación es precisa dentro del rango de frecuencias 2 a 4 GHz, perdiendo validez a medida que nos alejamos de éstas.

Es importante mencionar que este procedimiento tan solo constituye una aproximación a las dimensiones finales de la antena, no pretende ser un método definitivo a seguir en el diseño de cualquier antena quasi-yagi. Con este procedimiento no es necesario conocer los parámetros de diseño previo, eliminando la tarea del escalado en frecuencia, y evitando un buen número de simulaciones.

2.4. Diseño de antenas fractales

2.4.1. Propiedades de las antenas fractales. [10]

Las razones que incentivan al desarrollo de antenas utilizando la geometría fractal se detallan a continuación.

1. Las fractales presentan geometrías autisimilares, es decir contienen varias copias de sí misma a diferentes escalas, lo que permite que al aplicar dicha forma una antena, esta adquiera propiedades multibanda.
2. La dimensión fractal de algunos fractales (tendencia a longitudes infinitas en áreas finitas), permite la reducción del tamaño de las antenas a realizar respecto a una hecha en base a geometrías euclidianas.
3. Muchos de los fractales cuentan con formas irregulares, bordes afilados, discontinuidades y esquinas, los cuales mejoran notablemente la radiación electromagnética, por lo que estas geometrías se constituyen elementos radiantes eficientes.
4. Las antenas que se realizan en base a geometrías fractales, suelen tener incrementos notables respecto a la impedancia de entrada, lo cual permite facilitar el acople entre la antena y la línea de transmisión.

Cabe recalcar que no todas éstas propiedades se evidencian simultáneamente en todas las estructuras fractales. Por lo general se presentan estructuras fractales para dipolos como la curva de Von Koch, los fractales de árbol etc., donde el objetivo es reducir la altura de la antena y el aumento de la impedancia, así mismo sucede con las antena de bucle al utilizar fractales como la isla de Von Koch.

2.4.2. Isla de Von Koch.

Fue inventada por Von Koch, con el fin de demostrar sus estudios matemáticos en la obtención de curvas continuas sin tangente en punto alguno. Luego de su publicación Ernesto Césaro demostró que la curva en cuestión es auto-semejante y junto con otras características como dimensión fraccionaria y formación por interacción, permiten a esta figura el obtener la denominación de fractal. [11]

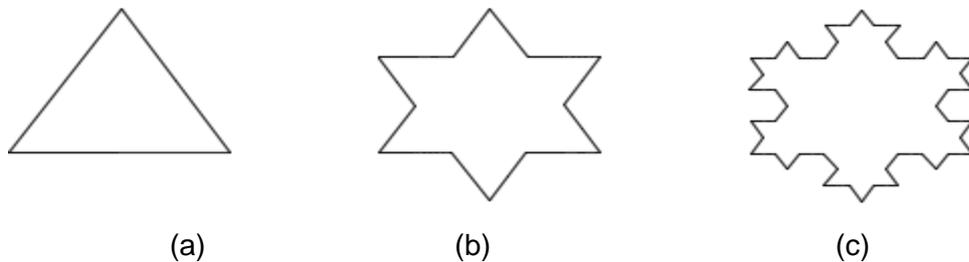


Figura 2.4. Isla de Koch diferentes interacciones, a) cero interacción, b) primera interacción, c) segunda interacción.

Como se observa en la Figura 2.4, la longitud de la curva aumenta significativamente con la interacción, así mismo el área no se mantiene constante.

2.4.2.1. Cálculos de la dimensión para la isla de Von Koch.

Para obtener la dimensión de la Isla de Von Koch, se inicia con un segmento de recta de longitud L , luego a este se lo divide en tres partes iguales, y la parte del centro es reemplazado por dos segmentos de longitud $L/3$, ubicados de tal forma que cada segmento esté unido al otro formando un ángulo 60° , esto se puede ver en la Figura 2.5. [11]

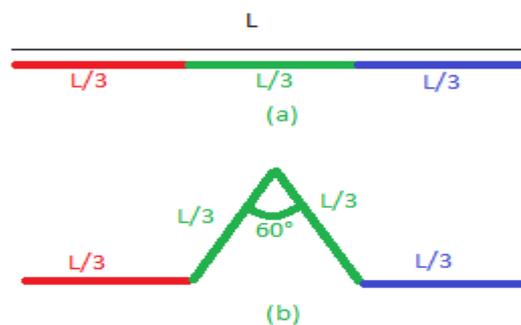


Figura 2.5. Generación de la isla de Koch, a) cero interacciones, b) primera interacción.

Para obtener las dimensiones se utiliza la fórmula 1.3, donde el valor de N es 2, cuyo tamaño es un tercio de la longitud original de ahí que el valor de ϵ es 1/3, por lo tanto la dimensión de la curva de Koch es: [10]

$$D = \frac{\log(2)}{\log\left(\frac{1}{1/3}\right)} \quad (2.20)$$

$$D = 0.63 \quad (2.21)$$

Como se observa el resultado es un número fraccionario que es de donde los fractales obtienen su nombre. [10]

2.4.2.2. Longitud.

Como se pudo ver anteriormente la característica de este tipo de fractal es la capacidad que tiene de aumentar su longitud una proporción de 4/3 por cada interacción, sin aumentar significativamente el área que esta ocupa, esta característica es muy importante al momento de elegir esta figura, dado que permite diseñar antenas con un tamaño mucho menor de lo habitual. La longitud total en cualquier interacción está dado por la fórmula siguiente.

$$L = l * \left(\frac{4}{3}\right)^n \quad (2.21)$$

Donde L es la longitud total de la curva, l es la longitud inicial de la curva y n es la interacción a la que se desea determinar la longitud. Por ejemplo si se desea determinar a la tercera interacción de la curva de Koch, cuyo segmento inicial sea 9 cm, se tiene: [10]

$$L = 9 * \left(\frac{4}{3}\right)^3 \quad (2.22)$$

$$L = 21.33 \text{ cm} \quad (2.23)$$

En este ejemplo se puede observar la ventaja de este modelo, su tamaño seguirá siendo de 9 cm pero su longitud real es de más del doble, lo cual hace idóneo a este fractal para la reducción del tamaño de la antena.

Para el diseño de la antena Koch, primero se define los parámetros a tomarse en cuenta, como longitud, interacción, espesor de la cinta y otros que se describirán conforme avance el proceso.

Para la longitud es decir el perímetro de la Isla de Koch es infinito, no se lo puede determinar debido a que la interacción también es infinita, por tanto es común realizar solamente cierto número de interacciones a un determinado fractal. Para obtener la longitud de onda se utiliza la ecuación 1.1. [11]

2.4.3. Triángulo de Sierpinski.

Este fractal presenta propiedades mutibanda al ser aplicado a una antena, dando en los resultados de los diagramas de radiación de campo lejano similares para diferentes frecuencias cuyo número va en proporción al de interacciones con los que se trabaja. [11]

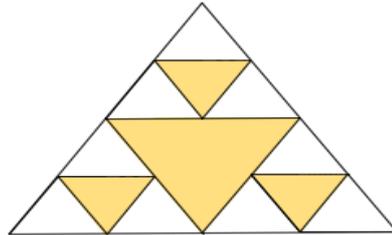


Figura 2.6. Antena, triángulo de Sierpinski.

Para este tipo de fractal se parte de un triángulo del cual se toma los puntos medios de sus lados formando un triángulo invertido interior el cual se sustrae de la estructura, este proceso se repite para cada uno de los triángulos restantes para las interacciones deseadas la Figura 2.6 muestra la estructura de la antena.

Generalmente se utiliza un triángulo equilátero pero puede tomarse un triángulo cualquiera, pero se debe tomar en cuenta que la variación del ángulo contenido por los lados afecta la impedancia de la antena así mismo modifica el factor de separación de las frecuencias para los cuales trabajará la antena. Para un triángulo equilátero se tiene que el ángulo es de 60° , por tanto el factor de obtención de las frecuencias es 2. Esta estructura es la más aconsejable debido a que mantiene un factor estable para todas las interacciones.

2.4.3.1. Diseño.

Este diseño se ve definida por dos parámetros: la altura de la antena (h) y el ángulo de apertura (θ) siendo las variables para interactuar el momento de establecer el diseño. La altura permite establecer las frecuencias de trabajo, la altura máxima se ve definida por la frecuencia menor de operación y de igual forma la altura menor corresponde con la frecuencia mayor de trabajo. [10]

Para determinar la altura máxima se utiliza la formula siguiente: [11]

$$h_{\max} = k \frac{c}{f_n} \cos(\theta/2) \delta^n \quad (2.24)$$

En donde:

f_n = frecuencia de resonancia del triángulo formado por la n -ésima interacción.

c = velocidad de la luz.

h = altura superior de un lado del dipolo.

θ = ángulo de apertura.

δ = periodo de operación.

n = número de interacción.

k = constante igual a: 0,152

La constante k depende del substrato dieléctrico y del espesor usado.

El periodo de operación para un dipolo de Sierpinski se define por la relación entre las diferentes frecuencias de operación como se muestra en la formula siguiente:

$$\delta = \frac{f_{n+1}}{f_n} \approx 2 \quad (2.25)$$

Siendo:

f_n = frecuencia de resonancia del triángulo formado por la n -esima interacción.

f_{n+1} = frecuencia de resonancia del triángulo formado por la $n+1$ interacción.

δ = periodo de operación.

Como ya se mencionó anteriormente las alturas de los triángulos formados por las interacciones se relacionan con las frecuencias de operación. Por tanto se tiene:

$$\delta = \frac{h_n}{h_{n+1}} \approx 2 \quad (2.26)$$

A través de estas fórmulas se puede determinar el valor de las alturas correspondientes para el diseño. [10]

2.4.4. Monopolo tipo árbol

La construcción de una antena monopolo árbol fractal se lo realiza partiendo de un segmento de longitud λ , que llamamos el iniciador y este lo dividimos en partes iguales de longitud $\lambda/2$, se sustituye el segmento dos, por dos segmentos de tamaño $\lambda/2$ separados por un ángulo de 60° y obtenemos el llamado generador, resultando la primera interacción, la operación se puede repetir con cada uno de los dos segmentos para obtener la segunda interacción y así sucesivamente hasta la interacción n -sima.

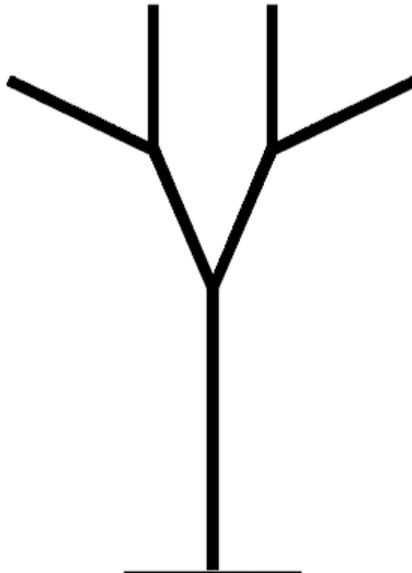


Figura 2.7. Antena, monopolo árbol fractal.

Para obtener el segmento de longitud L se parte de la expresión 2.21. Cada interacción agrega su propia longitud al árbol y produce una longitud total que es $4/3$ veces la geometría original. Sin embargo, la altura del fractal no cambia de una interacción a otra. Entonces, si el proceso se lleva a cabo un número infinito de veces, el árbol tendría una longitud infinita, mientras que la altura no cambiaría. [10]

Donde h representa la longitud del generador recto inicial y n al número de interacciones. La miniaturización de la antena fractal se puede alcanzar aumentando la interacción y aumentando la longitud total constante, determinada por la frecuencia a la cual se desea establecer la resonancia, para diseñar un monopolo de árbol con una frecuencia de resonancia se procede igual que un monopolo recto tradicional.

2.5. Software de aplicación.

2.5.1. Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD).

El FDTD utiliza el rango de frecuencias para realizar las operaciones, esto presenta la ventaja de dar resultados a toda la banda calculada.

Existen algunas aplicaciones que utilizan este método, por ejemplo tenemos CST, Microwave Studio, aplicación muy completa para análisis electromagnético.

El método FDTD, posee mayor eficiencia en la simulación de materiales dieléctricos. Por ello la aplicación CST Microwave Studio es la solución idónea para simular los modelos de antenas planteados en el presente trabajo, da gran facilidad en la creación de las antenas, realiza un mallado automático tomando en cuenta los efectos de borde, y con una sola ejecución del

mismo proporciona todos los parámetros requeridos para analizar el funcionamiento de la antena como son los parámetros S, corrientes, frecuencia de resonancia, VSWR, diagrama de radiación, etc. Considerando lo expuesto el software CST Microwave Studio es completo y factible para ser utilizado en la simulación de las antenas. [6]

CAPÍTULO 3
SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS

3.1. Introducción

Una vez terminado el diseño de los modelos de antenas, se procede a su respectiva simulación siendo una parte previa a la implementación de los mismos, esto permite realizar las correcciones necesarias del modelo, además nos proporciona datos que serán comparados con los obtenidos experimentalmente.

Dentro de la simulación se cuenta con un factor importante que es la optimización, éste se emplea para variar las dimensiones del modelo, permitiendo reducir el VSWR, así mismo obteniendo una resonancia óptima.

En forma general, se simula algunos modelos tomando en cuenta sus características, el objetivo es escoger los modelos que se puedan mimetizar en un medio cualquiera.

3.2. Simulación de antenas

Para la respectiva simulación de las antenas se emplea el software CST Microwave Studio, así como también se emplea el software AutoCAD para precisar las dimensiones y el proceso de impresión.

Para la antena de microcinta se parte del modelo básico de antena parche, sus características y dimensiones finales se las encuentra a través de la optimización. Como ya se mencionó en el capítulo dos los pasos a seguir para encontrar las dimensiones, se procede a implementar el parche en el software de simulación, los parámetros a evaluar son: Parámetros de dispersión (S), permitiendo ver los resultados de impedancia, frecuencia de resonancia, también se puede conocer parámetros tales como ganancia, directividad, campo eléctrico y magnético, y lo más importante el VSWR, conocidos estos parámetros se puede definir si la antena es o no eficaz para cumplir con lo requerido en los objetivos de la investigación.

3.3. Resultados de la simulación

Primeramente se simula con los valores obtenidos de las ecuaciones que se encuentran en el capítulo 2, siendo diferentes para cada diseño, en el software CST Microwave Studio se define las características del sustrato a utilizar que en este caso sería FR-4, que se encuentra en las librerías del mismo, una vez conocidos estos puntos se procede a simular la antena.

3.4. Simulación para 2.4 GHz

3.4.1. Antena de microcinta.

Ya definidas las dimensiones y características del parche, se procede a calcular las dimensiones del sustrato, del plano tierra y la longitud del mismo, siendo uno de los modelos de antenas para mimetizar se escoge una figura tipo hoja donde se inserta la antena para

ser simulada e implementada, el tipo de hoja escogida es principalmente porque se encuentra en el parque nacional Podocarpus, esta hoja de cumplir con una superficie mayor a la antena por tanto se cumple que:

$$W_g = 2W$$

$$L_g = 2L$$

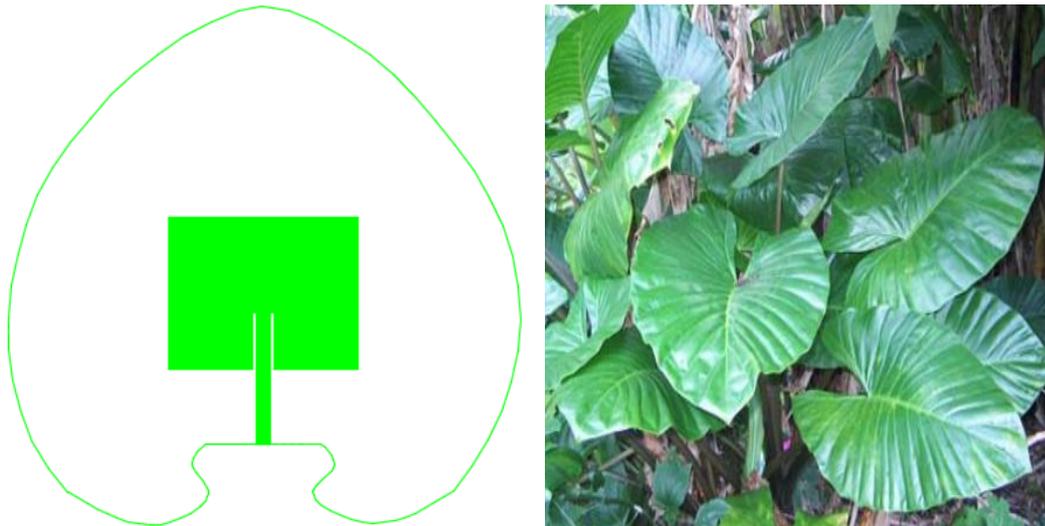


Figura 3.1. Diseño de antena parche.

El modelo de hoja escogido cuenta con las características de la hoja de Alocasia siendo una planta que se desarrolla en diferentes suelos, incluyendo los ligeramente ácidos, secos, pesados y húmedos. Esta especie crece bien a libre exposición pero alcanza un mayor desarrollo en zonas bajas, en sitios con cierto nivel de sombra. [17]

3.4.1.1. Simulación y resultados.

Para obtener las dimensiones finales de la antena se realiza varias simulaciones, llegando a realizar finalmente la optimización que es la que precisa las dimensiones tanto del parche como su ranura, a continuación se presentan los resultados obtenidos después de la optimización, siendo esta la primera antena para ser implementada.

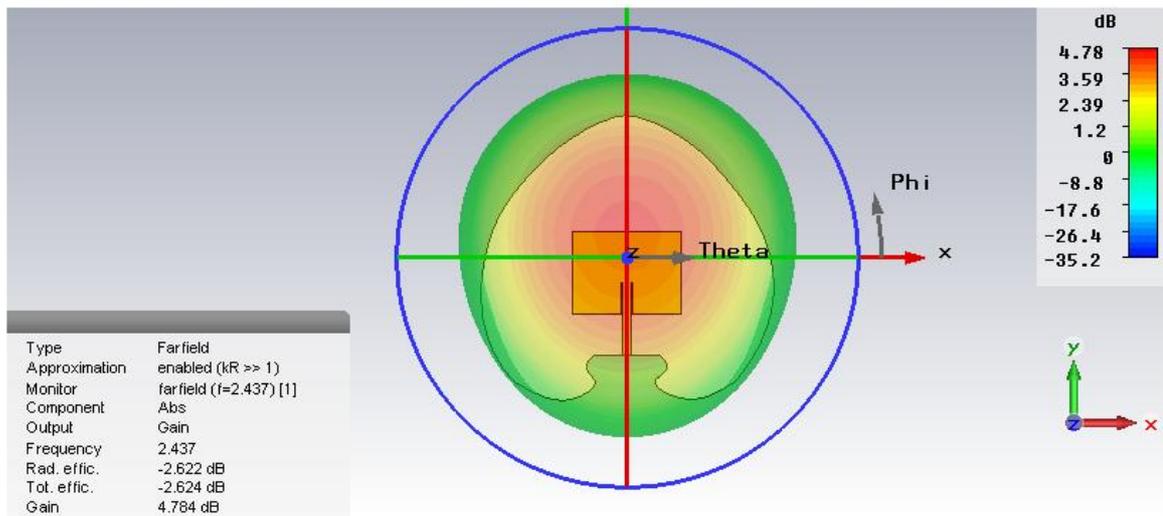


Figura 3.2. Diagrama de radiación 3D, Ganancia 4.789dB.

Los valores más óptimos con que es diseñada la antena son los que se obtiene después de aplicar la optimización estos valores son tales como el largo $L = 28.57$, el ancho $W = 37.24$, así mismo la longitud de la ranura $Y_0 = 10.69$ mm, siendo los valores del diseño final.

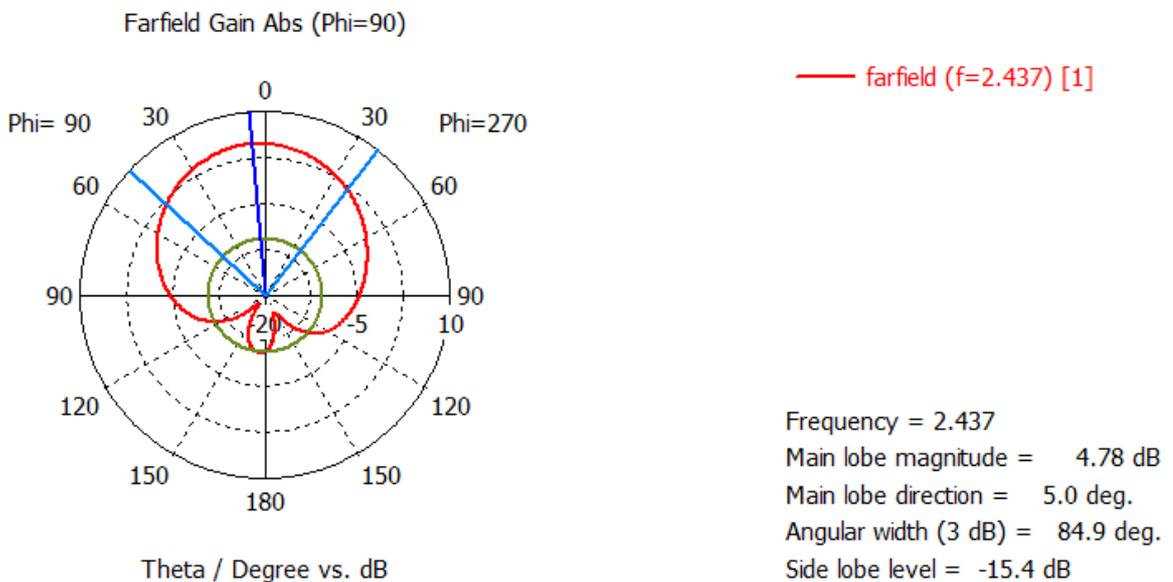


Figura 3.3 Diagrama de radiación polar: $\phi = 90^\circ$, y ancho de haz = 84.9° .

El lóbulo de radiación en tres dimensiones presenta un ancho de haz considerable dando un valor de 84.9° , como se observa en la Figura 3.3, lo que garantiza tener una cobertura sectorial en su patrón de radiación.

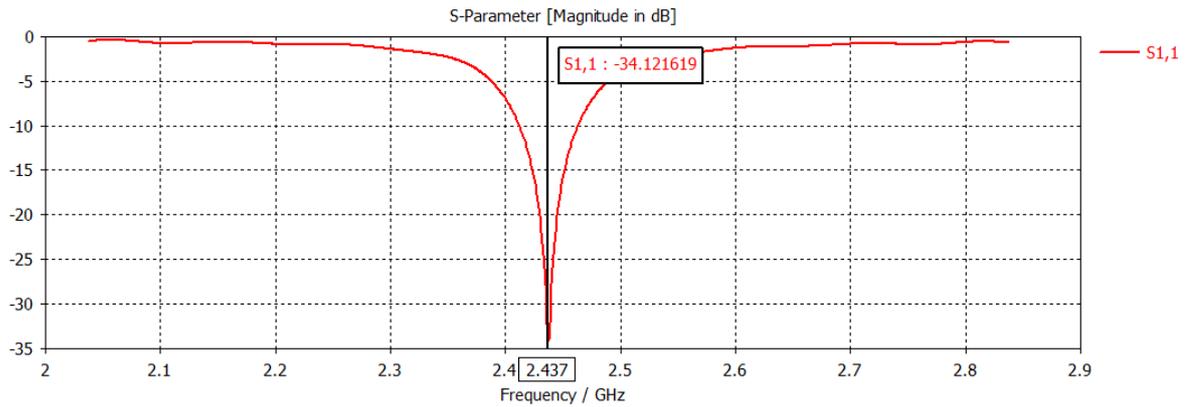


Figura 3.4. Parámetro de dispersión S11, frecuencia de resonancia.

El resultado presentado en la Figura 3.4, nos indica que la frecuencia de resonancia se encuentra a 2.437 GHz, siendo la frecuencia central de la banda de trabajo, la magnitud que presentan los parámetros S en la frecuencia, tiene un nivel de -34.12 dB, que proporciona niveles bajos de coeficiente de reflexión y de ondas estacionarias.

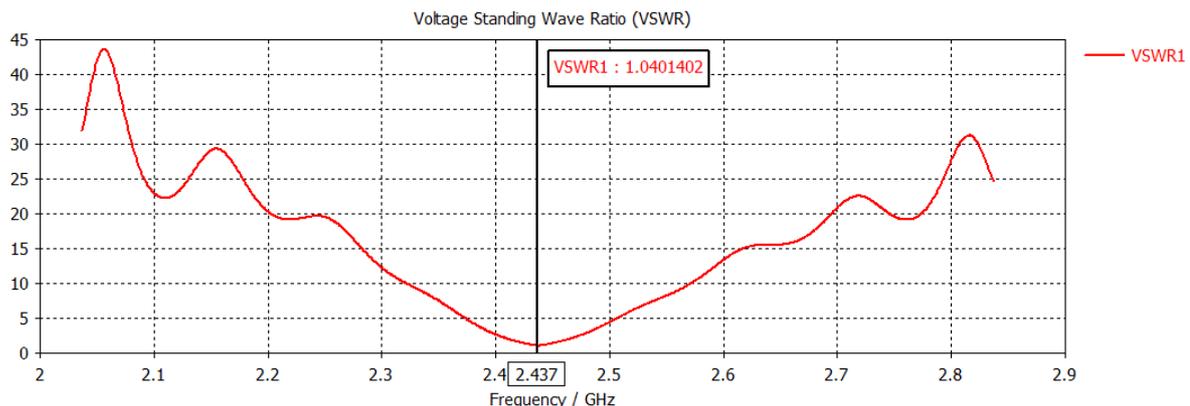


Figura 3.5. Relación de onda estacionaria VSWR.

Por ser un modelo de antena que se alimenta a través de línea de microcinta, se debe considerar que la línea de alimentación entre el puerto y el parche debe cumplir con las características de impedancia requerida, que es 50Ω . Entonces se calcula el valor del coeficiente de ondas estacionarias (VSWR) dando un valor de 1.04 por ende un valor aceptable para realizar la implementación.

3.4.2. Antena quasi-yagi.

Para definir las dimensiones de la antena quasi-yagi se hace uso de las ecuaciones definidas en el capítulo 2, una vez diseñado el modelo se aplica la optimización siendo este el que precisa los valores finales de la antena, ya obtenidos sus valores finales de diseño, se

escoge una figura tipo hoja la misma que es encontrada en el parque nacional Podocarpus en donde se camufla la antena para ser mimetizada.

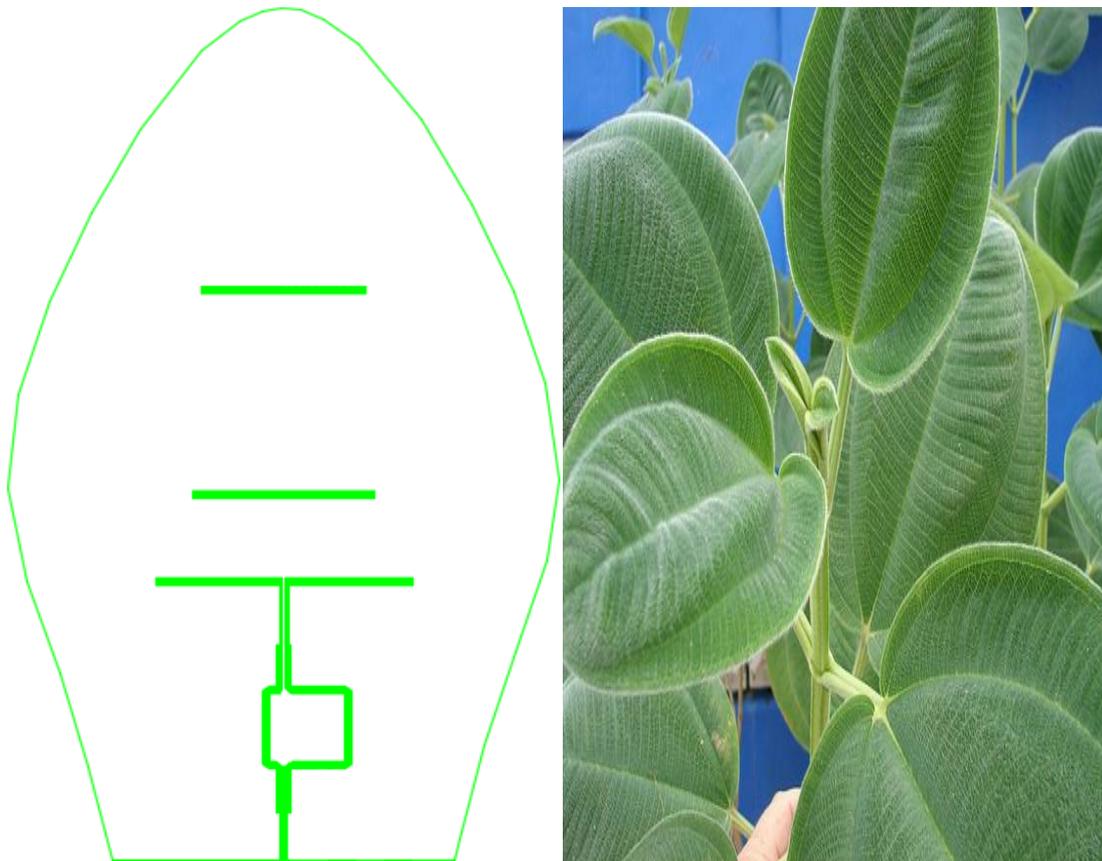


Figura 3.6. Diseño de antena quasi-yagi.

El modelo de hoja escogido cuenta con las características de la hoja de *Tibouchina granulosa*, es un tipo de árbol de hasta 4 – 5 m de altura, Requiere pleno sol o sombra parcial, suelos fértiles, ricos en materia orgánica, bien drenados y húmedos. Planta para climas suaves, donde las temperaturas no descendan de 7 a 10 °C, teme el frío, se multiplica por semillas y por esquejes. [18]

En la Figura 3.6 se muestra el esquema funcional de la antena quasi-yagi, como se observa, esta antena es unipolar, siendo una de sus principales características.

La antena está formada por un dipolo impreso, alimentado mediante un par de líneas coplanares (CPS), y un elemento director, utilizado para aumentar la directividad de la antena, para la correcta alimentación del dipolo, se utiliza un desfaseador implementado mediante tecnología microstrip.

Además de estos elementos se utiliza un tramo de línea de microstrip de $\lambda/4$ de longitud como adaptador de impedancias, este se encuentra en la parte inferior del sustrato

situándolo al plano de masa de los elementos microstrip, que además actuará como elemento reflector de la antenna.

3.4.2.1. Simulación y resultados.

Luego de varias simulaciones y aplicada la optimización, se obtiene los valores finales de diseño que precisan los parámetros S y así definir si la antenna es o no aceptable para su implementación experimental.

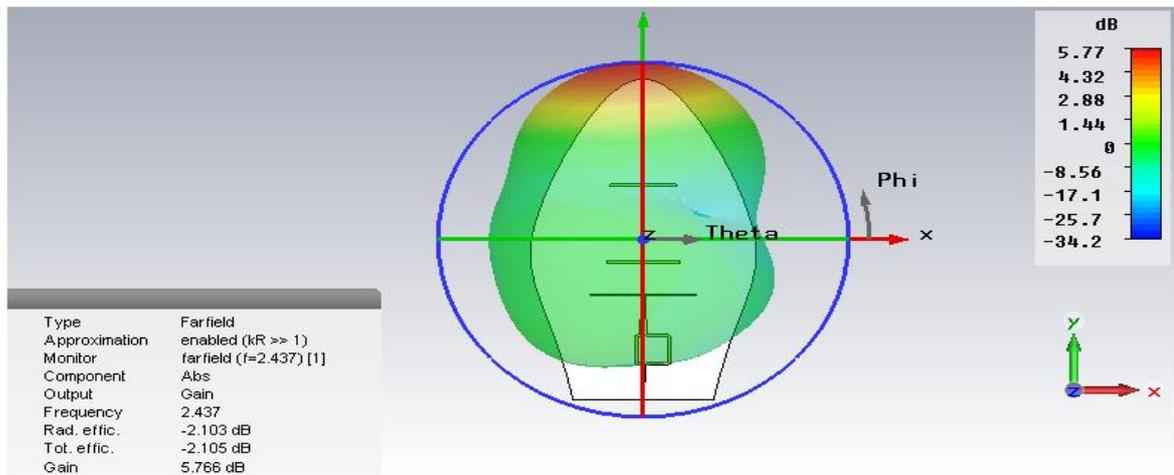


Figura 3.7. Diagrama de radiación en 3D, Ganancia 5.766 dB.

En la Figura 3.7 se observa el lóbulo de radiación en tres dimensiones que genera la antenna quasi-yagi, también se observa su ganancia que es de 5.77 dB, valor que define el alcance de la antenna. En la tabla 3.1 se tiene los valores finales con la que se realizó la simulación.

Tabla 3.1. Valores obtenidos después de ser aplicada la optimización.

Valores finales para el diseño				
W_M = 90mm	W = 1.86 mm	L _F = 10.85 mm	L _A = 9.95 mm	L _{D1} = 13 mm
L_{D2} = 3 mm	L _{O1} = 15 mm	L _{O2} = 9.35 mm	D _{DIP} = 13.59 mm	L _{DIP} = 26.69 mm
D_{DIR} = 17.64 mm	L _{DIR} = 18.99mm	D _{DIR1} = 43.70 mm	L _{DIR1} = 17.09 mm	

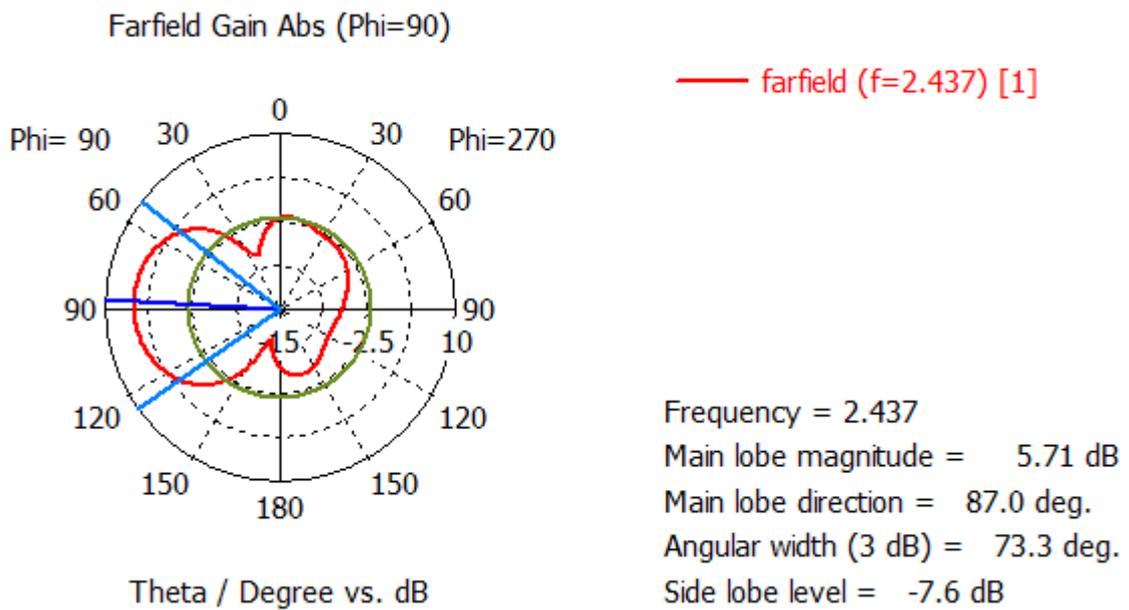


Figura 3.8. Diagrama de radiación polar: phi = 90°, y ancho de haz = 73.3°.

Como se aprecia en la Figura 3.8 el ancho que presenta el haz es de 73.3° valor que define la directividad de la antena, así mismo se puede apreciar la polarización siendo en este caso polarización vertical.

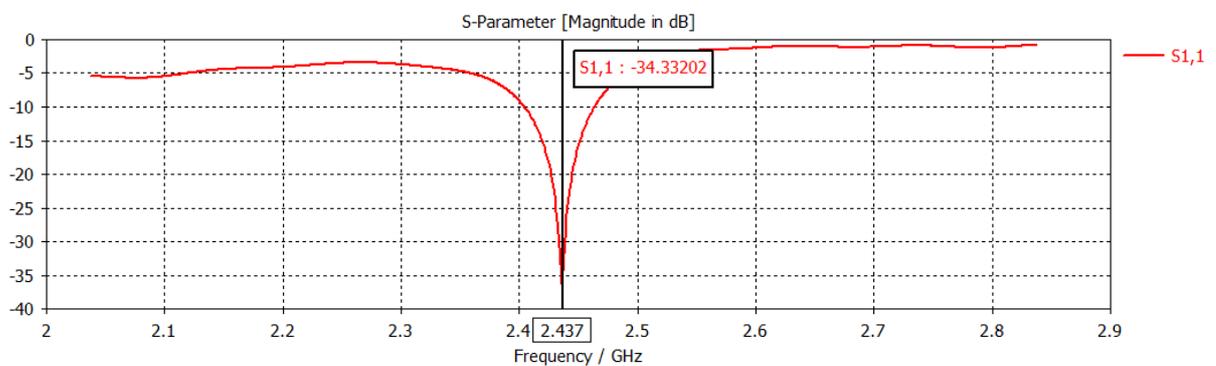


Figura 3.9. Parámetro de dispersión S11, frecuencia de resonancia.

De acuerdo al resultado obtenido en la Figura 3.9 se afirma que el diseño de antena está resonando a la frecuencia requerida que en este caso es 2.437 GHz, la magnitud que se presenta en los parámetros S11 en la frecuencia, tiene un nivel de -34,12 dB, considerándose un valor menor a -22 dB, siendo el valor mínimo para proporciona niveles bajos de coeficiente de reflexión y de ondas estacionarias

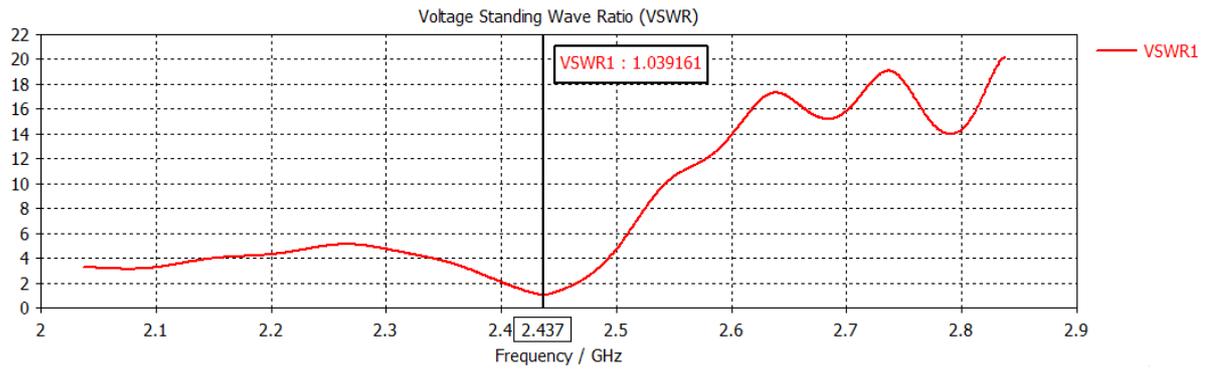


Figura 3.10. Relación de onda estacionaria VSWR.

El modelo de antena quasi-yagi, además de los elementos microstrip, se utiliza un tramo de línea microstrip de $\lambda/4$ de longitud como adaptador de impedancias y así poder cumplir con las características de la impedancia requerida de 50Ω , por tanto se procede al cálculo del coeficiente de ondas estacionarias (VSWR) obteniendo un valor de 1.04 encontrándose en el rango adecuado para la implementación.

3.5. Simulación para 915 MHz

3.5.1. Antena fractal, monopolo tipo árbol

Para el cálculo de las dimensiones del monopolo tipo árbol se parte de la ecuación 1.1, este modelo es diseñado para la frecuencia de 915 MHz.

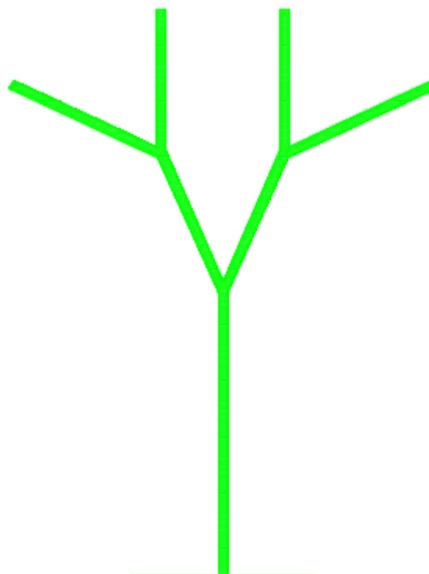


Figura 3.11. Diseño de antena fractal, monopolo tipo árbol.

Una antena es diseñada a partir del $\lambda/4$ de longitud de onda, como el modelo es diseñado para 915 MHz se utiliza la ecuación 1.1 para obtener la dimensión de la longitud de onda λ que viene a ser 328 mm, para el diseño del fractal se utiliza 82 mm que en este caso es $\lambda/4$ de longitud de onda, así mismo como a los otros modelos se aplica la optimización para precisar los valores de diseño y así obtener los parámetros S siendo estos los que definen si la antena es o no aceptable para su implementación experimental.

3.5.1.1. Simulación y resultados.

El modelo fractal, monopolo tipo árbol, es diseñado y simulado con los valores finales después de haberse aplicado la optimización quedando el $\lambda/4$ en 88.75 mm, valor tomado para el diseño final, el modelo cuenta con dos interacciones partiendo del $\lambda/4$ de longitud que viene a ser la interacción cero .

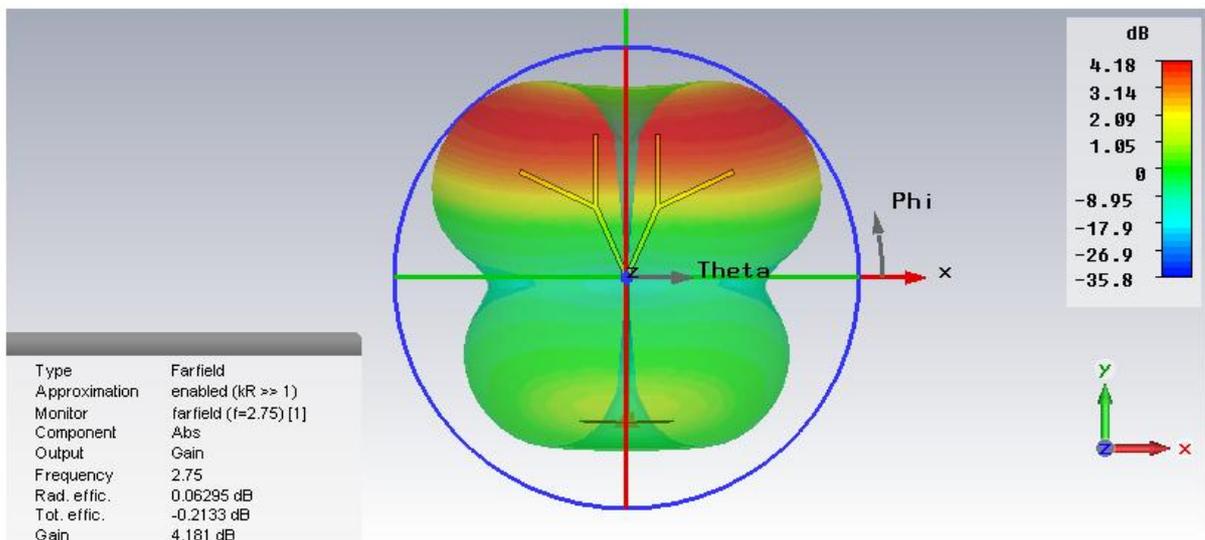


Figura 3.12. Diagrama de radiación en 3D.

Considerado un modelo de antena para multibanda se agrega un mayor rango de frecuencias para la simulación, apreciando la Figura 3.12 se nota que su ganancia mínima está en 1.05 dB y su máxima ganancia en los 4.18 dB, por ser un monopolo y contando con una ganancia considerable entra a formar parte de los modelos aceptables para la implementación.

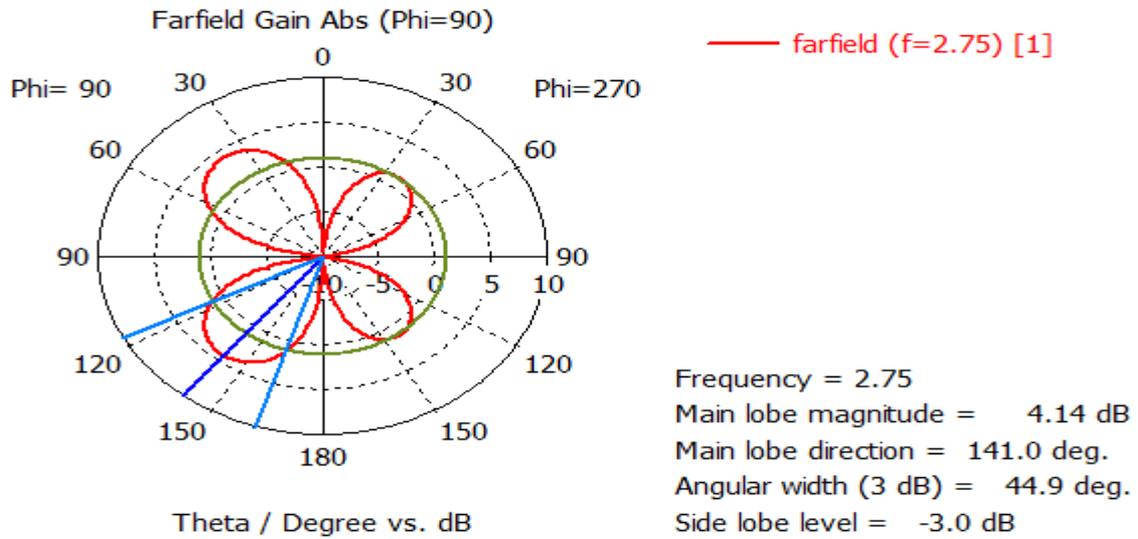


Figura 3.13. Diagrama de radiación polar: phi = 90°, y ancho de haz = 44.9°.

El ancho de haz que se muestra en un lóbulo de la Figura 3.13 es de 44.9°, como se aprecia la figura cuenta con 4 lóbulos a su alrededor, debido a que es un monopolo y que teóricamente este es omnidireccional, aquí se puede afirmar que cumple con las características estudiadas.

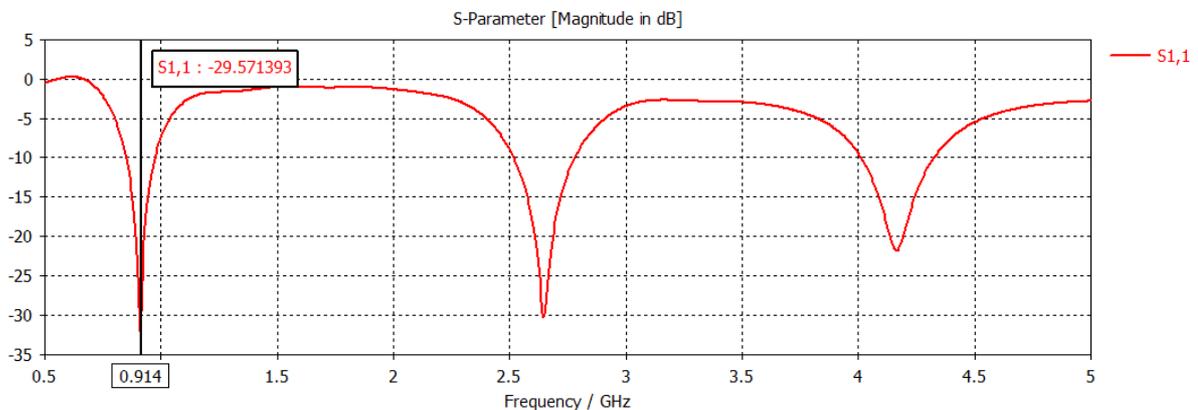


Figura 3.14. Parámetros de dispersión S11, Frecuencia de resonancia.

En la Figura 3.14 se observa que la antena resuena a la frecuencia central que corresponde a 915 MHz, la magnitud presentada por los parámetros S en la frecuencia, tiene un nivel de -29.57 dB, el cual determina el valor de coeficiente de reflexión y ondas estacionarias.

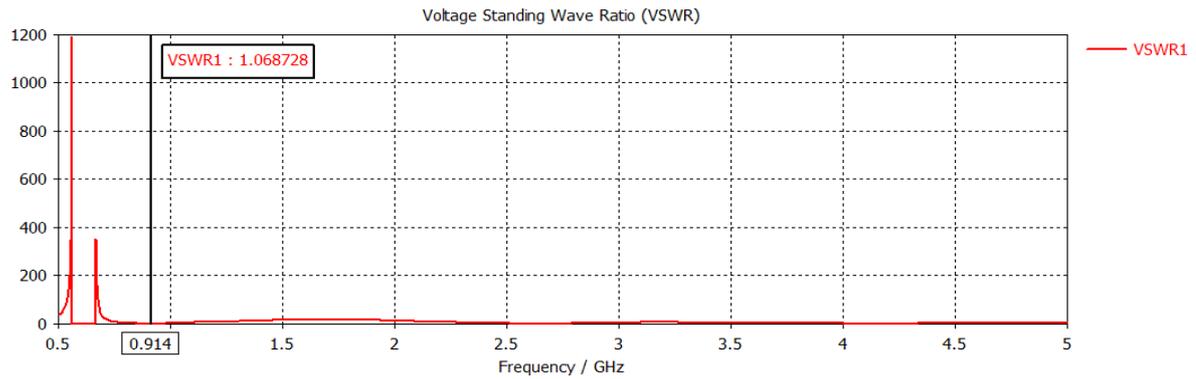


Figura 3.15. Relación de onda estacionaria VSWR.

Para el acople de impedancia en el fractal monopolo tipo árbol se agrega un reflector de radio $\lambda/32$ de la longitud de onda ya optimizada y poder cumplir con las características de la impedancia requerida de 50Ω , una vez realizado el acople se procede al cálculo del coeficiente de ondas estacionarias (VSWR) obteniendo un valor de 1.07 encontrándose en el rango adecuado para la implementación.

3.5.2. Antena fractal, isla de Koch

La característica que presenta una antena fractal tipo Koch es la capacidad que tiene al aumentar una proporción de su longitud siendo $4/3$ por cada interacción, sin aumentar significativamente el área que esta ocupa.

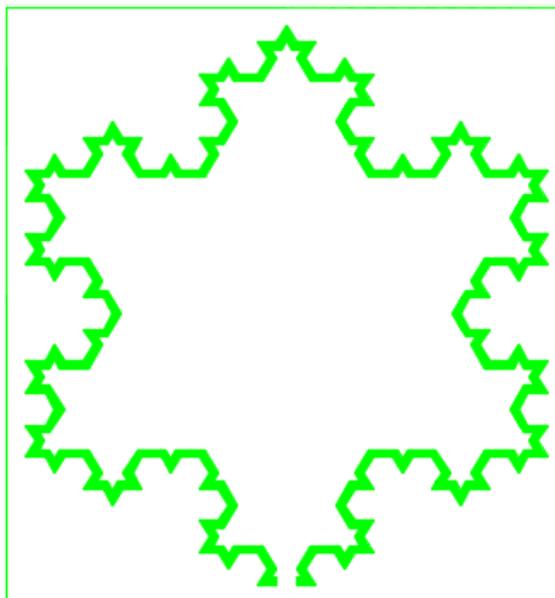


Figura 3.16. Diseño de antena fractal, Isla de Koch.

El modelo de antena fractal, isla de Koch, es diseñada para la frecuencia de 915 MHz para determinar el valor de diseño se parte de la ecuación 1.1 obteniendo la longitud de onda λ , que viene a ser 328 mm, para el diseño del fractal se utiliza 82 mm siendo un $\lambda/4$ de longitud de onda total, luego de varias simulaciones se alcanzó el propósito que es resonar a la frecuencia central de la banda establecida el valor que hizo posible esto es 136 mm considerándose como la optimización aplicada al diseño.

3.5.2.1. Simulación y resultados.

Para el diseño y simulación del modelo de antena isla de Koch primeramente se hace uso del software AutoCAD que es donde se realiza el diseño, se utiliza este software para precisar las dimensiones tanto de segmentos como ángulos que son las características que presenta la antena, luego de ser diseñada se lo guarda con formato .dxf, para luego poder ser importado desde software CST Microwave Studio para su respectiva simulación.

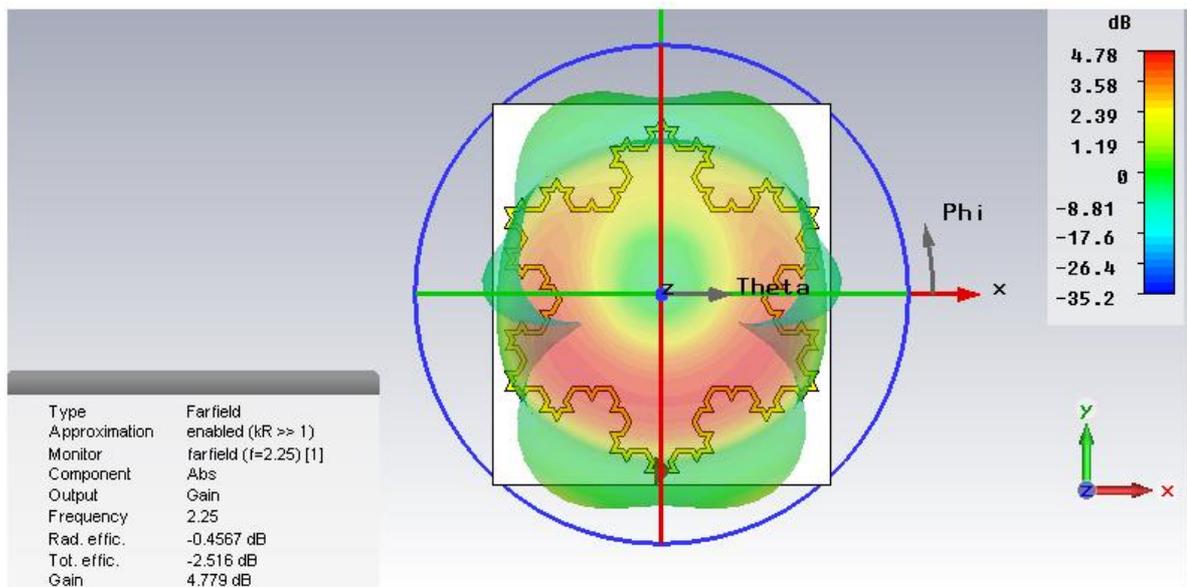


Figura 3.17. Diagrama de radiación 3D.

La antena fractal, isla de Koch, está compuesta por tres interacciones, para el cálculo de la longitud total se utiliza la ecuación 2.20 donde l es 408 mm considerada longitud de la interacción cero como también constante para las demás interacciones.

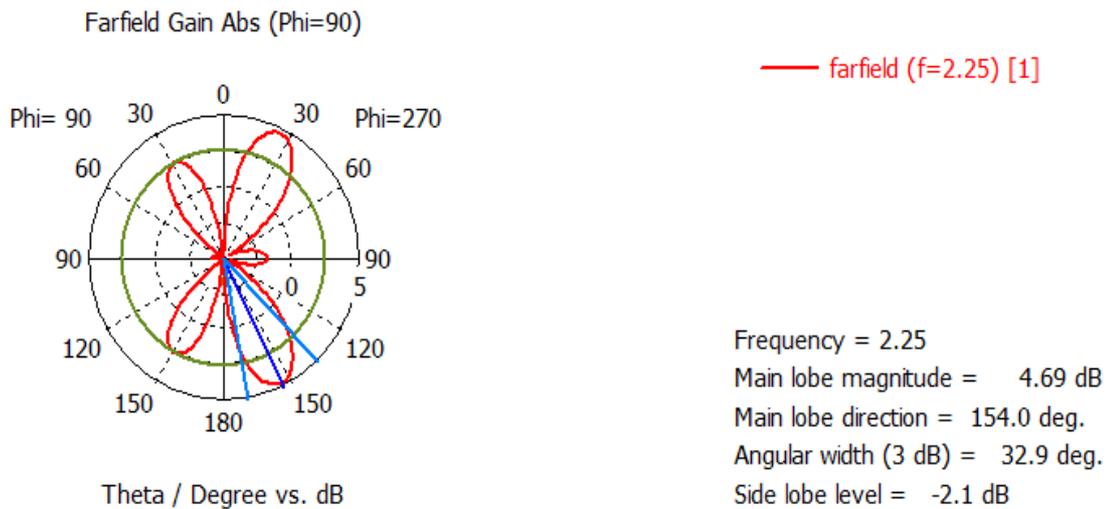


Figura 3.18. Diagrama de radiación polar: phi = 90°, y ancho de haz = 32.9°.

El ancho de haz que se muestra en la Figura 3.18 es de 32.9°, como se aprecia la figura cuenta con 4 lóbulos a su alrededor, por tanto se define que la antena está irradiando en varias direcciones.

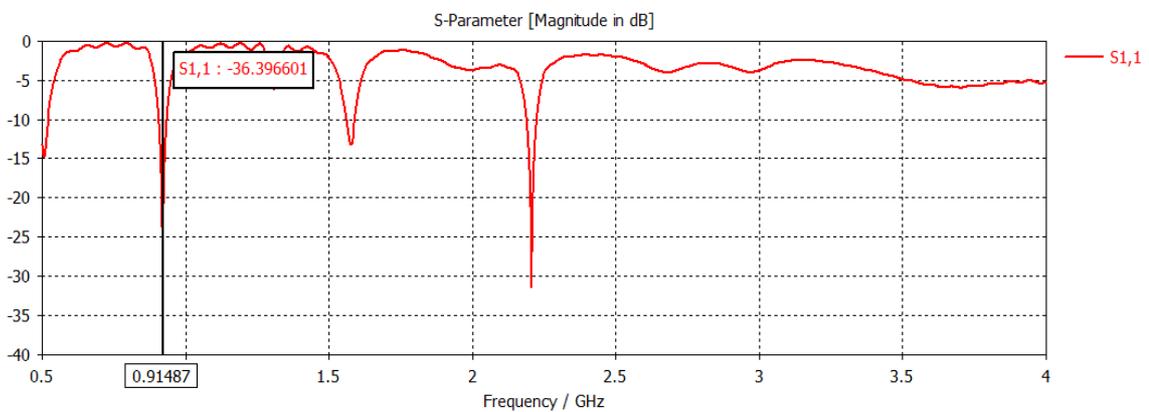


Figura 3.19. Parámetros de dispersión S11, frecuencia de resonancia.

Observando la Figura 3.19 se nota que la isla de Koch o también conocido como copo de Koch es un tipo de antena multibanda, la frecuencia de interés es la frecuencia a la que está resonando es decir 915 MHz, como se nota la antena está resonando a la frecuencia requerida.

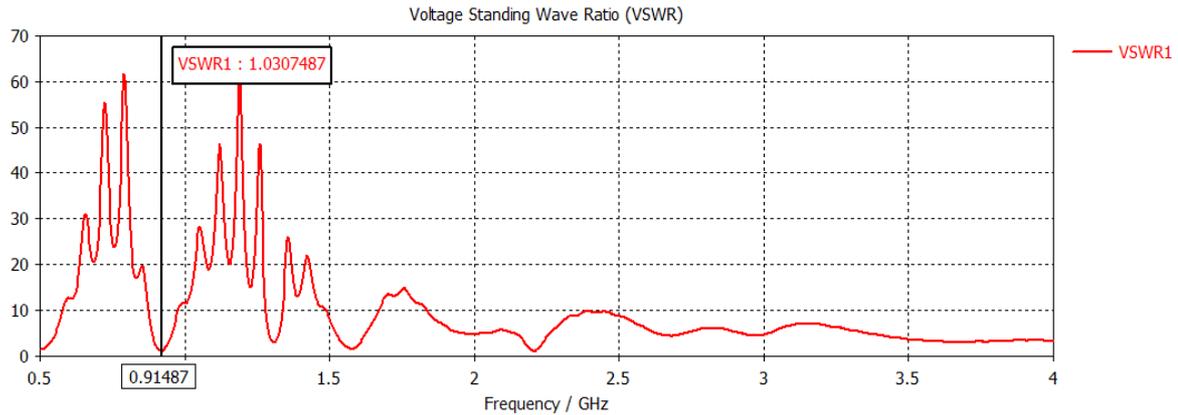


Figura 3.20. Relación de onda estacionaria VSWR.

La relación de onda estacionaria (VSWR) que presenta la antena fractal, isla de Koch, es de 1.03 considerándose un valor aceptable para la implementación experimental.

3.6. Implementación de prototipos

El proceso de construcción para cada uno de los prototipos consta de varias etapas que son llevadas a cabo con absoluto cuidado y precisión, es decir cuidando que la antena no sufra ningún cambio en la impresión ni en el oxidado del sustrato.

3.6.1. Implementación de prototipos para 2.4 GHz y 915 MHz

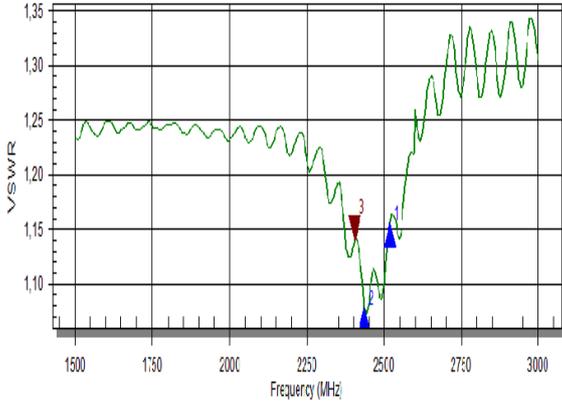
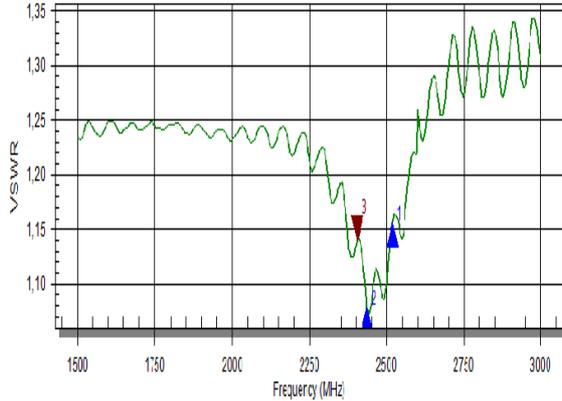
Los modelos de antena para la frecuencia de 2.4 GHz son: una antena de microcinta formada por un parche con ranura y una antena quasi-yagi formada por un desfasador el dipolo, dos directores y alimentado a través de una línea microstrip.

Los modelos de antenas para la frecuencia de 915 MHz son: un monopolo tipo árbol formado por dos interacciones y un reflector, la isla de Koch está formada por 3 interacciones.

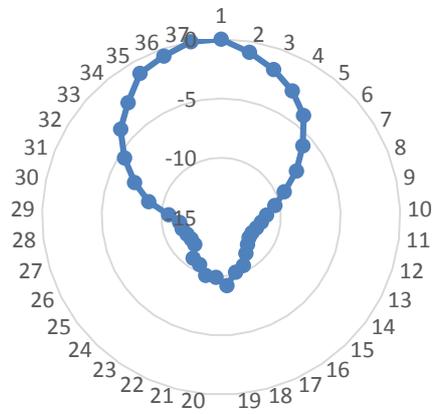
3.6.1.1. Prototipos de antena parche, quasi-yagi y fractales.

En la tabla 3.2 se muestra las antenas implementadas, los resultados de las pruebas en el analizador y el patrón de radiación tanto en azimut como en elevación.

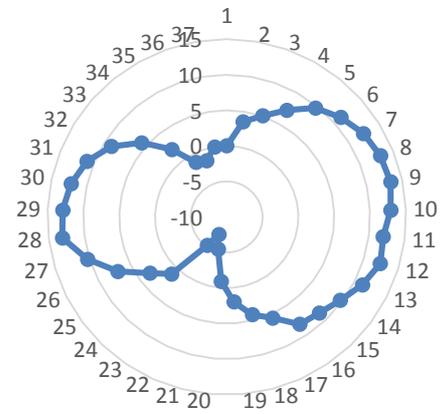
Tabla 3.2 Resultados experimentales de antena parche y quasi-yagi.

	
<p>1. Antena parche para 2,4 GHz</p>	<p>2. Antena quasi-yagi para 2,4 GHz</p>
<p style="text-align: center;">VSWR Frequency: 1500 MHz - 3000 MHz 4/2/2015 13:57:00 Location: Unknown</p>  <p>M1:2518.89, 1.16 M2:2486.71, 1.08 M3:2405.06, 1.14</p>	<p style="text-align: center;">VSWR Frequency: 1500 MHz - 3000 MHz 4/2/2015 13:57:00 Location: Unknown</p>  <p>M1:2518.89, 1.16 M2:2486.71, 1.08 M3:2405.06, 1.14</p>
<p>1.1. Frecuencia de resonancia y VSWR</p>	<p>2.1. Frecuencia de resonancia y VSWR</p>

Patrón de radiación en azimuth

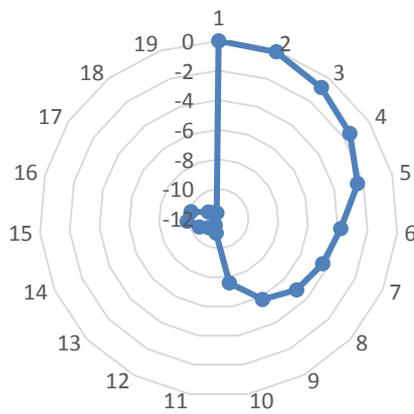


Patrón de radiación en Azimuth



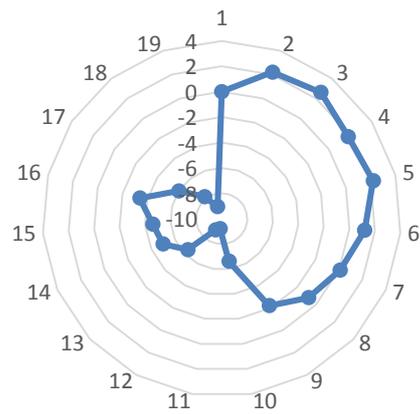
1.2. Patrón de radiación en azimuth

Patrón de radiación en elevación



2.2. Patrón de radiación en azimuth

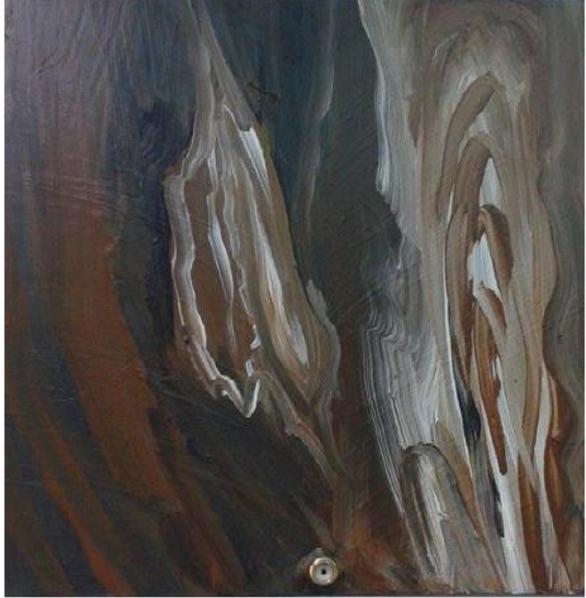
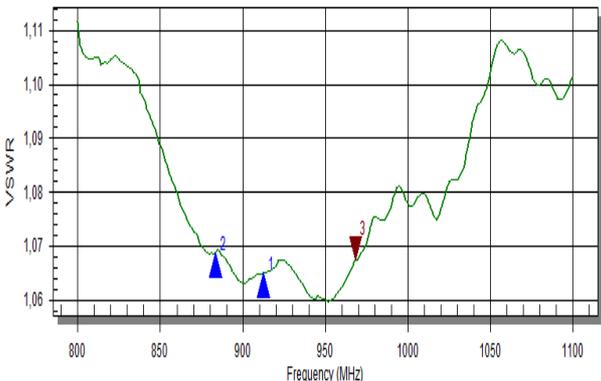
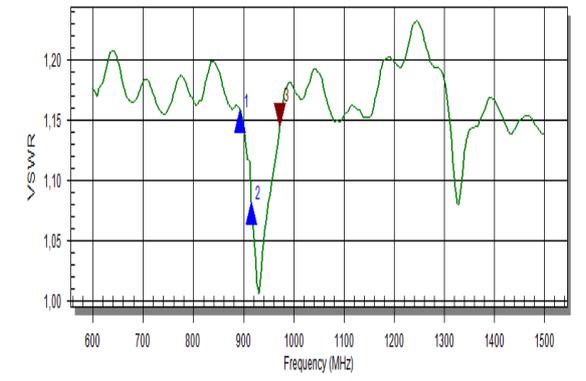
Patrón de radiación en elevación

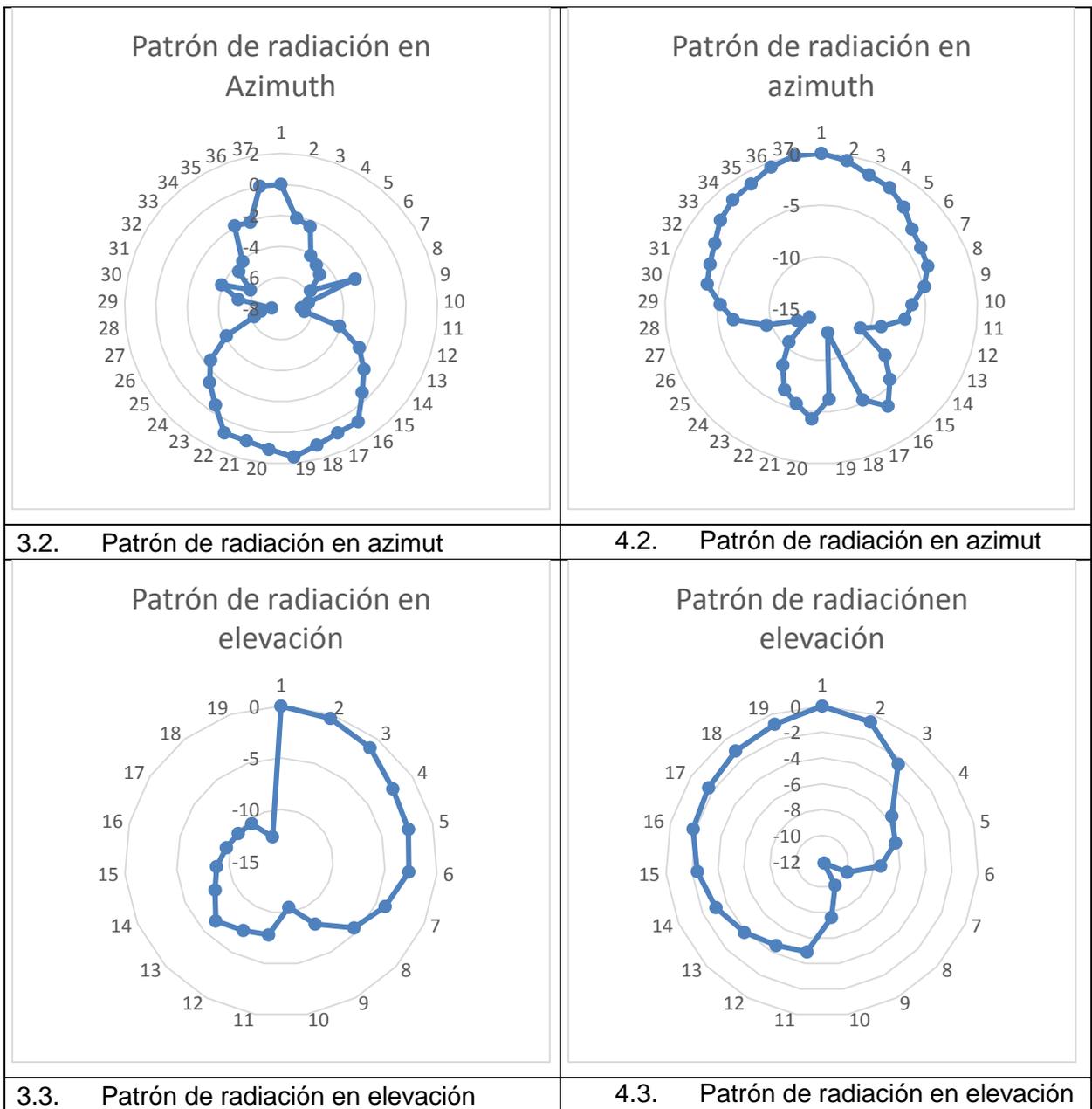


1.3. Patrón de radiación en elevación

2.3. Patrón de radiación en elevación

Tabla 3.3 Resultados experimentales de antenas monopolo tipo árbol, isla de Koch.

	
<p>3. Antena fractal monopolo tipo árbol</p>	<p>4. Antena fractal isla de Koch</p>
<p style="text-align: center;">VSWR Frequency: 800 MHz - 1100 MHz 4/2/2015 13:03:00 Location: Unknown</p>  <p>M1:(912.66, 1.07) M2:(883.54, 1.07) M3:(968.35, 1.07)</p>	<p style="text-align: center;">VSWR Frequency: 600 MHz - 1500 MHz 4/20/2015 12:42:00 Location: Unknown</p>  <p>M1:(892.41, 1.16) M2:(915.19, 1.08) M3:(972.15, 1.14)</p>
<p>3.1. Frecuencia de resonancia y VSWR</p>	<p>4.1. Frecuencia de resonancia y VSWR</p>



Los prototipos de las diferentes antenas están cubiertas por una capa de pintura tipo acrílica satinada, se usa esta pintura por no presentar pigmentos metálicos de lo contrario afecta al funcionamiento de la antena.

Para la medición del patrón de radiación se utilizan equipos certificados que dispone el laboratorio de telecomunicaciones de la UTP, se arma el sistema de medición para cada banda de frecuencia, para la frecuencia de 2.4 GHz en un lado se conecta la antena grilla al analizador de espectros, esta antena recibe la señal transmitida por la antena a medir la misma que se encuentra al otro lado conectada al generador de señales, las antenas deben estar en vista directa y de esta forma obtener una medición óptima, los valores de medición

se obtienen de girar la antena a medir cada 10 °, este procedimiento se realiza para cada antena tanto en azimut como en elevación. Para la frecuencia de 915 MHz se cambia la antena grilla receptora por una antena yagi y se realiza el mismo procedimiento. (Anexo B)

CONCLUSIONES

- Se puede lograr la mimetización de antenas en donde se requiere antenas de ganancias medias
- Los modelos de antenas que mejor prestaciones tienen para la mimetización son las antenas de características planas.
- Los modelos de antenas microcinta y quasi-yagi se elaboran para 2.4 GHz, de manera que sus dimensiones son próximas a las dimensiones de las hojas de los árboles del parque nacional Podocarpus.
- Al variar la forma de los modelos de las antenas microcinta y quasi-yagi a las formas de las hojas, sus parámetros no cambian de manera sustancial.
- Al variar el área del sustrato para la antena fractal isla de Koch, sufre variaciones en la frecuencia de resonancia.
- Para el modelo de antena fractal principalmente al monopolo no se elige ninguna figura para mimetizarla ya que ésta antena cuenta con las características de una rama de árbol por lo tanto ya está lista para ser mimetizada.

RECOMENDACIONES

- Para la implementación de los modelos de antena parche, quasi-yagi e isla de Koch es recomendable que la impresión y el oxidado de los diseños sean precisos de lo contrario afectará al funcionamiento de las antenas.
- Al pintar las antenas el tipo de pintura a utilizar no debe contener pigmentos metálicos ya que esto afecta a los parámetros S de las antenas, es por ello que se elige pintura acrílica satinada.
- En la realización las mediciones en el analizador de espectros es recomendable asegurar la antena a medir y de esta forma mantener el equilibrio de la misma, con el fin de poder observar el cambio que realiza la antena a medir es necesario realizar las mediciones cada 10 grados y de esta forma obtener los patrones de radiación los mismo que serán comparados con los simulados.
- A diferencia de las antenas parche, las antenas quasi-yagi presentan una mayor ganancia por tanto es recomendable optar por este tipo de antena para enlaces punto a punto.
- La mimetización de antenas es recomendable cuando se requiere de antenas con ganancia media
- La antena receptora debe ser de ganancia elevada, para que se pueda notar la variación al cambiar el ángulo de medición.

TRABAJOS FUTUROS

- Mimetizar arreglos de antenas parche o quasi-yagi para realizar enlaces punto a punto,
- Desarrollo de Redes de Sensores Inalámbricos para la Recolección de variables medio ambientales de los Bosques Altos de Montaña.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rectoría de telecomunicaciones, Alejandro Berrocal Valverde. 2011. Mimetización de torres y antenas celulares.pdf.
- [2] Catálogo de Técnicas de Mimetización, [en Línea], disponible en:<http://www.coruna.es/infoambiental/uploads/File/telefonía_movil/Catalogo_de_Tecnicas_de_Mimetizacion/Catalogo%20de%20Tecnicas%20de%20Mimetizacion.pdf>[Consulta del 05-07-2014].
- [3] Universidad Ramos Llull, Jaume Anguera y Antonio Peres. 2008. Teoría de Antenas.pdf.
- [4] Jiménez Martín, José Luis. 2001. Diseño de Antenas de Parche en Tecnología Microstrip.pdf.
- [5] EPN, Darwin Jaramillo. 2013. Diseño y Construcción de Arreglo de Antenas Microstrip.pdf.
- [6] UTPL, Edwin Quichimbo. 2011. Diseño, simulación e implementación de antenas tipo parche.pfd.
- [7] Universidad Carlos III de Madrid, José Romero Huertas. Antenas Yagui-Uda Impresas de doble Banda.pdf.
- [8] Tesis Doctoral, Ernesto Ávila Navarro. 2008. Diseño, modelado, fabricación y medida de antenas impresas para comunicaciones inalámbricas.pdf.
- [9] Arcos cerda, Diego Alexis. 2007. SISTEMAS DE COMUNICACIONES RADIANTES.pdf.
- [10] Sandoval, Ing. Francisco. 2008. Diseño e implementación de antenas fractales.pdf.
- [11] Ramírez Arroyave, Germán Augusto. 2009. Diseño de antenas multibanda basados en fractales.pdf.
- [12] Antenas Fractales: Antenas de Árbol, [en Línea], disponible en:<http://www.dmae.upm.es/cursofractales/capitulo1/3_1_6.html>[Consulta del 05-07-2014].
- [13] Norma Aplicable a Sistemas de Comunicaciones, [en Línea], disponible en:<http://www.coit.es/foro/pub/ficheros/libroscapitulo_2_cc2064cf.pdf>[Consulta del 05-07-2014].
- [14] IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 11, NO. 1, FEB. 2013, [en Línea], disponible en:<http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol11/vol11issue1Feb.2013/11TLA1_60MartinezCampo.pdf>[Consulta del 05-07-2014].
- [15] BUENROSTRO, ING. SERGIO. 2007. Metodología para el diseño e implementación de antenas de microcinta.pdf.
- [16] MÉTODO DE DISEÑO DE ANTENAS QUASI-YAGI, [en Línea], disponible en:<https://www.academia.edu/3215298/M%C3%89TODO_DE_DISE%C3%91O_DE_ANTENAS_QUASI_YAGI>[Consulta del 05-05-2014]
- [17] Departamento de agricultura, [en Línea], disponible en:<<http://www.fao.org/docrep/006/y4435s/y4435s0i.htm>> [Consulta del 05-03-2015]
- [18] TIBOUCHINA GRANULOSA, [en Línea], disponible en:<<http://www.arbolesornamentales.es/Tibouchinagranulosa.htm>> [Consulta del 05-03-2015]

ANEXOS

ANEXO A

FIGURAS DE TORRES Y ANTENAS MIMETIZADAS

Las figuras que se muestran a continuación sirven de ejemplo de los diferentes aspectos que puede tener una estructura mimetizada, además, muestran como existen torres donde se albergan equipos con más de un operador, con el fin de aprovechar la infraestructura y disminuir la cantidad de torres instaladas.



Figura 0.1 Montaje de equipos en torres estilo pino.
Fuente: [1]



Figura 0.2 Torres camufladas estilo palmera.
Fuente: [1]



Figura 0.3 Torre camuflada estilo palmera con cocos.
Fuente: [1]



Figura 0.4 Montaje de equipos en
copa torres estilo palmera.
Fuente: [1]

ANEXO B

MEDICIÓN EN EL ANALIZADOR DE ESPECTROS

En el siguiente esquema se muestra el sistema de medición para las antenas, en las tablas se da a conocer las características de los equipos que se utiliza para dicha medición, así mismo los valores de medición obtenidos en el analizador de espectros, de estos valores se obtiene los diagramas de radiación experimentales mostrados en el capítulo 3.

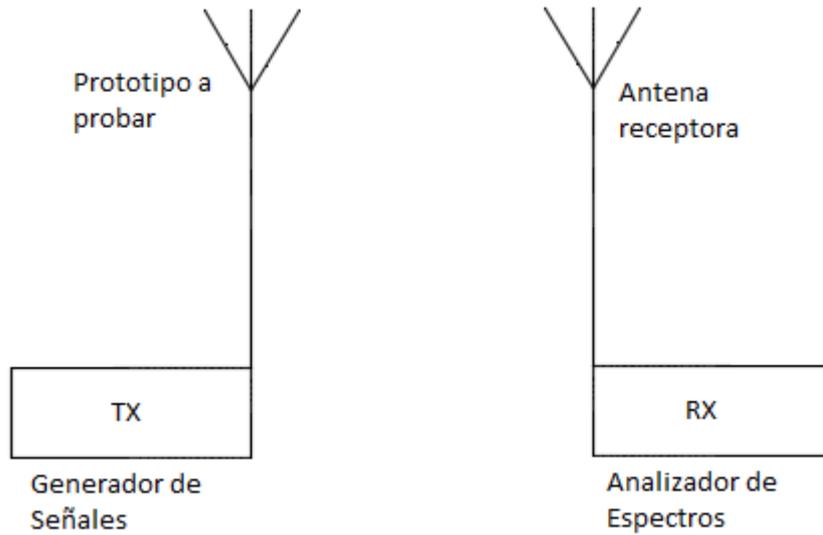


Figura 0.1 Esquema para realizar las mediciones del patrón de radiación

Tabla 0.1 Equipos para la medición de las antenas implementadas.

Analizador de Espectros	
Certificate No.	4123407-4916790-1
Manufacturer	Keysight Technologies
Model No.	N9000A
Date of calibration	11-nov-2014
Generador de Señales	
KCC-REM-ATi-15SIGGENF01	
Antena Grilla	
Model	HG2419G
Reflector Grid Antenna	
Ganancia	15 Dbi
Antena Yagi	
Ganancia	9 Dbi
Modelo	YPA10074

Tabla 0.2 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en azimut de la antena parche.

Diagrama Polar Patrón de Azimut			
Ángulo	Potencia máxima	Potencia recibida	Potencia normalizada
0	70,3	70,3	0
10	70,3	71,2	-0,9
20	70,3	72,1	-1,8
30	70,3	73,1	-2,8
40	70,3	74,3	-4
50	70,3	76,2	-5,9
60	70,3	77,9	-7,6
70	70,3	79,6	-9,3
80	70,3	80,7	-10,4
90	70,3	81,5	-11,2
100	70,3	81,9	-11,6
110	70,3	82,2	-11,9
120	70,3	82,4	-12,1
130	70,3	82,4	-12,1
140	70,3	82,1	-11,8
150	70,3	81,6	-11,3
160	70,3	80,8	-10,5
170	70,3	80,5	-10,2
180	70,3	79,5	-9,2
190	70,3	80,2	-9,9
200	70,3	80,2	-9,9
210	70,3	80,9	-10,6
220	70,3	81,1	-10,8
230	70,3	82,1	-11,8
240	70,3	82,2	-11,9
250	70,3	82,1	-11,8
260	70,3	81,9	-11,6
270	70,3	81,8	-11,5
280	70,3	80,9	-10,6
290	70,3	79,1	-8,8
300	70,3	77,5	-7,2
310	70,3	75,8	-5,5
320	70,3	74,1	-3,8
330	70,3	72,9	-2,6
340	70,3	71,4	-1,1
350	70,3	70,9	-0,6
360	70,3	70,3	0

Tabla 0.3 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en elevación de la antena parche.

Diagrama Polar Patrón de elevación			
Ángulo	Potencia máxima	Potencia recibida	Potencia normalizada
0	70,3	70,3	0
10	70,3	70,4	-0,1
20	70,3	71,1	-0,8
30	70,3	71,8	-1,5
40	70,3	72,7	-2,4
50	70,3	74,1	-3,8
60	70,3	74,7	-4,4
70	70,3	75,2	-4,9
80	70,3	76,1	-5,8
90	70,3	77,9	-7,6
100	70,3	81,3	-11
110	70,3	81,8	-11,5
120	70,3	81,4	-11,1
130	70,3	80,9	-10,6
140	70,3	80,2	-9,9
150	70,3	80,4	-10,1
160	70,3	81,5	-11,2
170	70,3	81,8	-11,5
180	70,3	81,9	-11,6

Tabla 0.4 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en azimut de la antena quasi-yagi.

Diagrama Polar Patrón de Azimut			
Ángulo	Potencia máxima	Potencia recibida	Potencia normalizada
0	74,5	74,5	0
10	74,5	70,9	3,6
20	74,5	69,4	5,1
30	74,5	67,3	7,2
40	74,5	64,8	9,7
50	74,5	63,3	11,2
60	74,5	62,1	12,4
70	74,5	61,4	13,1
80	74,5	61,1	13,4
90	74,5	61,6	12,9
100	74,5	62,5	12
110	74,5	62,1	12,4
120	74,5	63,3	11,2
130	74,5	64,8	9,7
140	74,5	65,8	8,7
150	74,5	66,3	8,2
160	74,5	68,9	5,6
170	74,5	70,3	4,2
180	74,5	72,5	2
190	74,5	75,4	-0,9
200	74,5	79,8	-5,3
210	74,5	81,8	-7,3
220	74,5	79,7	-5,2
230	74,5	73,4	1,1
240	74,5	71,2	3,3
250	74,5	67,5	7
260	74,5	64,2	10,3
270	74,5	61,4	13,1
280	74,5	61,6	12,9
290	74,5	62,3	12,2
300	74,5	63,5	11
310	74,5	65,6	8,9
320	74,5	68,7	5,8
330	74,5	72,3	2,2
340	74,5	75,7	-1,2
350	74,5	76,1	-1,6
360	74,5	74,5	0

Tabla 0.5 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en elevación de la antena quasi-yagi.

Diagrama Polar Patrón de elevación			
Ángulo	Potencia máxima	Potencia recibida	Potencia normalizada
0	65,9	65,9	0
10	65,9	63,7	2,2
20	65,9	63,3	2,6
30	65,9	64,1	1,8
40	65,9	63,7	2,2
50	65,9	64,7	1,2
60	65,9	65,8	0,1
70	65,9	66,7	-0,8
80	65,9	68,1	-2,2
90	65,9	72,5	-6,6
100	65,9	75,1	-9,2
110	65,9	74,9	-9
120	65,9	72,3	-6,4
130	65,9	70,9	-5
140	65,9	70,5	-4,6
150	65,9	69,3	-3,4
160	65,9	71,9	-6
170	65,9	73,7	-7,8
180	65,9	74,9	-9

Tabla 0.6 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en azimut de la antena fractal monopolo tipo árbol.

Diagrama Polar Patrón de Azimut			
Ángulo	Potencia máxima	Potencia recibida	Potencia normalizada
0	72,7	72,7	0
10	72,7	74,8	-2,1
20	72,7	75,1	-2,4
30	72,7	76,8	-4,1
40	72,7	77,1	-4,4
50	72,7	77,4	-4,7
60	72,7	78,5	-5,8
70	72,7	75,6	-2,9
80	72,7	78,9	-6,2
90	72,7	79,4	-6,7
100	72,7	79,2	-6,5
110	72,7	76,8	-4,1
120	72,7	75,1	-2,4
130	72,7	74,1	-1,4
140	72,7	73,2	-0,5
150	72,7	71,9	0,8
160	72,7	71,9	0,8
170	72,7	71,6	1,1
180	72,7	71,1	1,6
190	72,7	71,6	1,1
200	72,7	71,9	0,8
210	72,7	71,9	0,8
220	72,7	73,2	-0,5
230	72,7	74,1	-1,4
240	72,7	75,1	-2,4
250	72,7	76,8	-4,1
260	72,7	78,9	-6,2
270	72,7	79,4	-6,7
280	72,7	80,1	-7,4
290	72,7	77,9	-5,2
300	72,7	76,6	-3,9
310	72,7	78,4	-5,7
320	72,7	77,1	-4,4
330	72,7	76,8	-4,1
340	72,7	74,6	-1,9
350	72,7	74,8	-2,1
360	72,7	72,7	0

Tabla 0.7 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en elevación de la antena fractal monopolo tipo árbol.

Diagrama Polar Patrón de elevación			
Ángulo	Potencia máxima	Potencia recibida	Potencia normalizada
0	72,7	72,7	0
10	72,7	73,1	-0,4
20	72,7	73,8	-1,1
30	72,7	74,9	-2,2
40	72,7	75,1	-2,4
50	72,7	75,4	-2,7
60	72,7	76,8	-4,1
70	72,7	78,2	-5,5
80	72,7	80,8	-8,1
90	72,7	83,2	-10,5
100	72,7	80,5	-7,8
110	72,7	80,1	-7,4
120	72,7	79,2	-6,5
130	72,7	80,8	-8,1
140	72,7	81,5	-8,8
150	72,7	82,3	-9,6
160	72,7	82,8	-10,1
170	72,7	83,1	-10,4
180	72,7	85,2	-12,5

Tabla 0.8 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en azimut de la antena fractal isla de Koch.

Diagrama Polar Patrón de Azimut			
Ángulo	Potencia máxima	Potencia recibida	Potencia normalizada
0	67,3	67,3	0
10	67,3	67,8	-0,5
20	67,3	68,6	-1,3
30	67,3	68,9	-1,6
40	67,3	69,7	-2,4
50	67,3	70,7	-3,4
60	67,3	71,1	-3,8
70	67,3	71,3	-4
80	67,3	72,2	-4,9
90	67,3	73,6	-6,3
100	67,3	74,2	-6,9
110	67,3	76,3	-9
120	67,3	78,1	-10,8
130	67,3	74,7	-7,4
140	67,3	72,8	-5,5
150	67,3	70,9	-3,6
160	67,3	72,6	-5,3
170	67,3	79,9	-12,6
180	67,3	73,5	-6,2
190	67,3	71,6	-4,3
200	67,3	72,8	-5,5
210	67,3	73,7	-6,4
220	67,3	75,7	-8,4
230	67,3	77,8	-10,5
240	67,3	80,9	-13,6
250	67,3	79,7	-12,4
260	67,3	76,8	-9,5
270	67,3	73,8	-6,5
280	67,3	72,6	-5,3
290	67,3	71,1	-3,8
300	67,3	70,8	-3,5
310	67,3	70,3	-3
320	67,3	69,4	-2,1
330	67,3	68,8	-1,5
340	67,3	68,5	-1,2
350	67,3	67,8	-0,5
360	67,3	67,3	0

Tabla 0.9 Medición para el diagrama polar del patrón de radiación en elevación de la antena fractal isla de Koch.

Diagrama Polar Patrón de elevación			
Ángulo	Potencia máxima	Potencia recibida	Patrón de radiación en elevación
0	67,3	67,3	0
10	67,3	67,9	-0,6
20	67,3	69,8	-2,5
30	67,3	72,9	-5,6
40	67,3	73,5	-6,2
50	67,3	74,8	-7,5
60	67,3	77,2	-9,9
70	67,3	79,1	-11,8
80	67,3	77,2	-9,9
90	67,3	74,9	-7,6
100	67,3	72,2	-4,9
110	67,3	71,9	-4,6
120	67,3	71,2	-3,9
130	67,3	70,4	-3,1
140	67,3	69,7	-2,4
150	67,3	69,1	-1,8
160	67,3	68,9	-1,6
170	67,3	68,5	-1,2
180	67,3	68,1	-0,8