

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS UTILIZANDO
LA METODOLOGÍA FRACTAL Y MULTIFRACTAL**

PRESENTADA POR:

RICARDO MIGUEL GUTIÉRREZ ALVARADO

JOSÉ UZÍAS HERNÁNDEZ PERLA

JAIRO WILMAN LÓPEZ VÁSQUEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC.ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de graduación previo a la opción al grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Titulo:

**DISEÑO E IMPLMETACIÓN DE ANTENAS UTILIZANDO LA
METODOLOGÍA FRACTAL Y MULTIFRACTAL**

Presentado por:

RICARDO MIGUEL GUTIÉRREZ ALVARADO

JOSÉ UZÍAS HERNÁNDEZ PERLA

JAIRO WILMAN LÓPEZ VÁSQUEZ

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente asesor:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

San Salvador, octubre de 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 30 de septiembre de 2022, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 8:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE
Director Interino


Firma

2. MSC. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA
Secretario


Firma

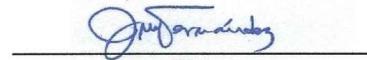


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSE MIGUEL HERNANDEZ


Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA FRACTAL Y MULTIFRACTAL

A cargo de los Bachilleres:

- GUTIÉRREZ ALVARADO RICARDO MIGUEL
- HERNÁNDEZ PERLA JOSÉ UZIAS
- LÓPEZ VÁSQUEZ JAIRO WILMAN

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.5
(OCHO PUNTO CINCO)

AGRADECIMIENTOS.

Primeramente, me gustaría agradecer a Dios por brindarme las fuerzas necesarias que hicieron posible la culminación de este arduo camino, el cual se volvió un proceso largo que parecía cada vez más sofocante, pero agradezco de todo corazón por el apoyo especial y amor que mi familia en especial mis padres me brindaba a diario.

Además, agradezco a mis compañeros de trabajo con los cuales nos impulsábamos a no rendirnos que compartimos las alegrías y tristezas entorno a nuestra investigación, también agradezco a los amigos que me motivaban a seguir siempre hacia adelante también mencionar al personal de la escuela de ingeniería eléctrica de la Universidad de El Salvador que guio de manera correcta nuestro desarrollo.

Finalmente agregar que este logro no ha de ser posible sin todos los consejos y palabras de aliento estoy enteramente agradecido por creer en mí y por las oraciones que todos pusieron en el todo poderoso para impulsar el motor de la convicción que me permite ahora expresar estas palabras.

Jairo López.

Gracias a Dios por permitirme ver la culminación de algo que con tanto esfuerzo se ha construido.

Gracias, a mi madre Evelyn Florida Perla por haber estado conmigo y jamás haber dudado de mí en este proceso tan importante como lo es la formación universitaria y por haberse esforzado tanto por mí, ella es uno de los pilares fundamentales en mi vida.

gracias, a mis amigos que siempre me brindaron su apoyo y amistad a lo largo de este arduo camino.

gracias, a mi familia por brindarme palabras de aliento cuando más lo necesitaba y no dejar que me rindiera en este proceso.

Finalmente, gracias a todas aquellas personas que han estado ahí para mí y me han ayudado aportándome su granito de arena, consejos, consuelo y amor, personas que han marcado una diferencia en mi vida y me han enseñado a ver la vida de una perspectiva diferente a lo largo de los años, han sido una parte esencial en mi andar en mis pensamientos.

Uzías Hernández.

En primer lugar, le doy gracias a Dios por permitirme llegar tan lejos y poder culminar mis estudios superiores. Por haberme brindado la paciencia y sabiduría para cumplir una meta más en mi vida.

Agradezco a mis padres Rosario del Socorro Alvarado y Miguel Antonio Gutiérrez de todo corazón por brindarme su apoyo incondicional en todo momento, por siempre estar a mi lado y guiarme hasta convertirme en la persona que soy.

A mi hermana Verónica Stephanie quien siempre me dio ánimos en los momentos difíciles y me apoyo a seguir adelante cada día, de quien estoy completamente orgulloso.

A mi asesor, Ing. Werner Meléndez quien ha sido un gran catedrático a lo largo de la carrera, agradecerle por su paciencia, comprensión y dedicación.

A toda la planta de docentes y colaboradores de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, en especial a Reinita Vides quien siempre ha velado por nuestro bienestar y ha estado siempre con la mayor disposición de ayudarnos, además a Juancito y Posada que estoy completamente agradecido por el apoyo que nos brindaron en los laboratorios de la escuela. A quien en vida fue el Ingeniero Armando Calderón quien siempre veló por el bienestar de los estudiantes e hizo posible distintos proyectos en beneficio de la escuela de Ingeniería Eléctrica.

Por último, pero no menos importante a mis compañeros de trabajo de graduación, que en todo momento estuvieron para apoyarme e impulsaron a no rendirme, a mis compañeros de carrera que me brindaron sus consejos, detalles y conocimientos, de quienes he aprendido mucho, gracias a todos.

Ricardo Miguel Gutiérrez Alvarado.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE ILUSTRACIONES.....	11
INTRODUCCIÓN.....	14
DESCRIPCIÓN DEL TEMA:	15
INTERÉS DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
OBJETIVOS.	16
OBJETIVO GENERAL.....	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
ALCANCES:	16
ANTECEDENTES.	17
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:.....	17
JUSTIFICACIÓN	18
CAPÍTULO I: FUNDAMENTO TEÓRICO.	19
1.1 ANTENAS.	19
1.2 TIPOS DE ANTENAS.....	19
1.3 PARAMETROS DE UNA ANTENA.	23
1.4 FRACTALES.	29
1.5 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN FRACTAL.	31
1.5.1 INFINITO DETALLE:.....	31
1.5.2 AUTOSIMILITUD O AUTO SEMEJANZA:	33
1.5.3 ITERATIVO O ALGORÍTMICO:.....	35
1.5.4 DIMENSIÓN NO ENTERA.....	36
1.5.5 NO DERIVABILIDAD.....	39
1.6 TIPOS DE ANTENAS FRACTALES.....	40
1.6.1 TRIÁNGULO DE SIERPINSKI.....	40
1.6.2 COPO DE NIEVE DE KOCH:	43
1.6.4 LA CURVA DE HILBERT.....	48
1.6.5 ISLA DE MINKOWSKY:	50
1.7 DEDUCCIÓN TEÓRICA DE LA ECUACIÓN DE CAMPO DE LAS ANTENAS FRACTALES.....	51
1.8 SERVICIOS DE APLICACION.....	53
1.8.1 RED INALÁMBRICOS.....	53
1.8.2 REDES DE TELEFONÍA MÓVIL.....	55
1.8.3 TELEVISIÓN DIGITAL.....	56

1.8.4 ENLACES DEL TIPO WIMAX.....	57
CAPÍTULO II: PRINCIPIOS DE DISEÑO PARA ANTENAS FRACTALES.....	57
2.1. INTRODUCCION.	58
2.2. DISEÑOS A IMPLEMENTAR DE ANTENAS FRACTALES.	59
2.3. PROPUESTA METODOLOGICA.....	64
2.4. LISTA DE MATERIALES.	64
2.5. TECNICA DE CONSTRUCCIÓN.	64
2.5.1. REVELADO DE INSOLADO.....	64
2.6. EQUIPOS A UTILIZAR.	70
2.6.1. ANALIZADOR DE ESPECTROS.....	70
2.6.2. MINI VNA.....	71
2.6.3. PRUEBAS DE LABORATORIO.....	73
CAPÍTULO III: IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO.....	74
3.1. INTRODUCCION.	74
3.2. PRUEBAS DE VSWR EN EL RIGOL RSA5065 – TG.....	74
3.3. COMPARACIÓN DE SIMULACIÓN CON PRUEBAS DE LABORATORIO.....	80
3.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	100
3.5. CONCLUSIONES.....	101
3.6. GLOSARIO TECNICO.	102
3.7. BIBLIOGRAFIA.....	107
3.8. ANEXOS.....	109

INDICE DE ILUSTRACIONES.

ILUSTRACIÓN 1 PATRÓN DE RADIACIÓN ANTENA ISOTRÓPICA (JOSÉ MANUEL HUIDOBRO, S.F.)	20
ILUSTRACIÓN 2 MODELO Y PATRÓN DE RADIACIÓN ANTENA YAGI-UDA (CISCO, S.F.).....	20
ILUSTRACIÓN 3 TIPOS DE BOCINAS DE ANTENAS DE APERTURA (JOSÉ MANUEL HUIDOBRO, S.F.)	21
ILUSTRACIÓN 4 ANTENA DE FOCO PRIMARIO (JOSÉ MANUEL HUIDOBRO, S.F.).....	21
ILUSTRACIÓN 5 ANTENA PLANA (SKY VISIÓN, S.F.).....	22
ILUSTRACIÓN 6 TIPOS DE ANTENA DE HILO (JOSÉ MANUEL HUIDOBRO, S.F.)	22
ILUSTRACIÓN 7 ARREGLO DE ANTENAS DE TELECOMUNICACIONES (WIKIPEDIA, S.F.).....	22
ILUSTRACIÓN 8 PATRÓN DE RADIACIÓN 3D (HERNÁNDEZ P, 2021)	23
ILUSTRACIÓN 9 A) CORTE VERTICAL DEL PATRÓN DE RADIACIÓN. B) CORTE HORIZONTAL DEL PATRÓN DE RADIACIÓN (JOHN D. KRAUS, 2002)	24
ILUSTRACIÓN 10 EJEMPLIFICACIÓN DE ANCHO DE BANDA (JOSÉ MANUEL HUIDOBRO, S.F.).....	26
ILUSTRACIÓN 11 ANCHO DE HAZ DE 3DB (JOSÉ MANUEL HUIDOBRO, S.F.)	27
ILUSTRACIÓN 12 RELACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN LA POLARIZACIÓN. (M OLMO R NAVE, S.F.)....	28
ILUSTRACIÓN 13 TIPOS DE POLARIZACIÓN. (M OLMO R NAVE, S.F.).....	28
ILUSTRACIÓN 14 FRACTAL DEL “CONJUNTO DE MANDELBROT” A ESCALA ORIGINAL. (ALVIN VON DIASPAR, S.F.)	32
ILUSTRACIÓN 15 FRACTAL DEL “CONJUNTO DE MANDELBROT” AMPLIADO HASTA SU LÓBULO PRINCIPAL. (ALVIN VON DIASPAR, S.F.).....	32
ILUSTRACIÓN 16 FRACTAL DEL “CONJUNTO DE MANDELBROT” AMPLIADO HASTA SU LÓBULO EXTERNO. (ALVIN VON DIASPAR, S.F.).....	33
ILUSTRACIÓN 17 FRACTAL DEL “CONJUNTO DE MANDELBROT” OBSERVADO BAJO LA CARACTERÍSTICA DE AUTOSIMILITUD. (ALVIN VON DIASPAR, S.F.)	34
ILUSTRACIÓN 18 FRACTAL DEL “CONJUNTO DE MANDELBROT” OBSERVADO BAJO LA CARACTERÍSTICA DE AUTOSIMILITUD. (KOCH H. VON, S.F.)	35
ILUSTRACIÓN 19 CURVA DE KOCH ITERADA HASTA EL ORDEN 4. (KOCH H. VON, S.F.).....	36
ILUSTRACIÓN 20 APLICACIÓN DE LA FORMULA A UNA FIGURA DE DIMENSIÓN 1.....	37
ILUSTRACIÓN 21 APLICACIÓN DE LA FORMULA A UNA FIGURA DE DIMENSIÓN 2.....	38
ILUSTRACIÓN 22 MUESTRA DE LAS PRIMERAS 3 ITERACIONES PARA UN TRIÁNGULO DE SIERPINSKI.....	40
ILUSTRACIÓN 23 IMAGEN ILUSTRATIVA DE COMO FORMAR UN COPO DE KOCH. (KOCH H. VON, S.F.)	44
ILUSTRACIÓN 24 CURVA DE HILBERT DE ITERACIÓN 5 (DAVID HILBERT,1891)	49
ILUSTRACIÓN 25 IMAGEN ILUSTRATIVA DE CÓMO FORMAR UNA ISLA DE MINKOWSKY. (HERMANN MINKOWSKY, 1908).....	51
ILUSTRACIÓN 26 ACCESS POINT WI-FI (EDIMAX, S.F.)	55
ILUSTRACIÓN 27 ESQUEMA DE PROCESOS DE LA TELEFONÍA MÓVIL (IVÁN RIVERO, S.F.).....	56
ILUSTRACIÓN 28 ARREGLO DE ANTENA DE TELEFONÍA MÓVIL. (JHON WILEY, S.F.)	56
ILUSTRACIÓN 29 ANTENA YAGI UDA (HIDETSUGU YAGI, 1926).....	57
ILUSTRACIÓN 30 ANTENA WIMAX (EION, S.F.).....	57
ILUSTRACIÓN 31 DISEÑO DE CURVA DE HILBERT.	65
ILUSTRACIÓN 32 ANTENAS FRACTALES EN PAPEL COUCHE.	66
ILUSTRACIÓN 33 PLACA DE COBRE FOTOSENSIBLE VISTA FRONTAL.	66
ILUSTRACIÓN 34 PLACA DE COBRE FOTOSENSIBLE VISTA POSTERIOR.....	66
ILUSTRACIÓN 35 CÁMARA DE INSOLADO.	67
ILUSTRACIÓN 36 PROCESO DE REVELADO (ALFREDO PONCE, S.F.).....	68
ILUSTRACIÓN 37 ANTENA FRACTAL DIPOLO DE SIERPINSKI	69
ILUSTRACIÓN 38 ANTENA FRACTAL COPO DE KOCH.	69
ILUSTRACIÓN 39 ANALIZADOR DE ESPECTROS (RIGOL, S.F.)	70

ILUSTRACIÓN 40 MINI VNA TINY.....	72
ILUSTRACIÓN 41 ANALIZADOR DE ESPECTROS (RIGOL, S.F.)	74
ILUSTRACIÓN 42 VSWR BRIDGE RIGOL.....	75
ILUSTRACIÓN 43 CONECTORES PARA ANTENAS.....	75
ILUSTRACIÓN 44 CONECTOR TIPO F-ANTENA FRACTAL.....	76
ILUSTRACIÓN 45 ANTENA FRACTAL DIPOLO DE SIERPINSKI.	76
ILUSTRACIÓN 46 VSWR ANTENA FRACTAL DIPOLO DE SIERPINSKI.....	77
ILUSTRACIÓN 47 ANTENA FRACTAL CURVA DE HILBERT.	77
ILUSTRACIÓN 48 VSWR ANTENA FRACTAL DIPOLO DE SIERPINSKI.....	78
ILUSTRACIÓN 49 GANANCIA DE ANTENA FRACTAL DIPOLO DE SIERPINSKI.	79
ILUSTRACIÓN 50 GANANCIA ANTENA FRACTAL CURVA DE HILBERT.	79
ILUSTRACIÓN 51 VSWR ANTENA WI-FI MODELO.	80
ILUSTRACIÓN 52 VSWR SIMULADO ANTENA WI-FI MODELO.....	80
ILUSTRACIÓN 53. OBTENCIÓN DE VSWR A UNA FRECUENCIA DE 850 MHZ.....	81
ILUSTRACIÓN 54. OBTENCIÓN DE SWR MEDIANTE SIMULACIÓN.....	81
ILUSTRACIÓN 55 OBTENCIÓN DE SWR A FRECUENCIA DE 650 MHZ	82
ILUSTRACIÓN 56 OBTENCIÓN DE SWR MEDIANTE SIMULACIÓN A 650 MHZ.....	82
ILUSTRACIÓN 57 OBTENCIÓN DE GANANCIA A FRECUENCIA DE 850 MHZ.	83
ILUSTRACIÓN 58 OBTENCIÓN DE GANANCIA A FRECUENCIA DE 850 MHZ.	83
ILUSTRACIÓN 59 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE COPO DE KOCH A FRECUENCIA DE 850 MHZ.	84
ILUSTRACIÓN 60 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE COPO DE KOCH A FRECUENCIA DE 850 MHZ	84
ILUSTRACIÓN 61 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE CURVA DE HILBERT A FRECUENCIA DE 850 MHZ	85
ILUSTRACIÓN 62 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE CURVA DE HILBERT A FRECUENCIA DE 850 MHZ (SIMULADA).	85
ILUSTRACIÓN 63 . OBTENCIÓN DE GANANCIA DE TRIANGULO DE SIERPINSKI A FRECUENCIA DE 850 MHZ.	86
ILUSTRACIÓN 64 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE TRIANGULO DE SIERPINSKI A FRECUENCIA DE 850 MHZ (SIMULADA).	86
ILUSTRACIÓN 65 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE ISLA DE MINKOWSKI A FRECUENCIA DE 850 MHZ.	87
ILUSTRACIÓN 66 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE ISLA DE MINKOWSKI A FRECUENCIA DE 850 MHZ (SIMULADA).	87
ILUSTRACIÓN 67 OBTENCIÓN DE GANANCIA A FRECUENCIA DE 1025 MHZ	88
ILUSTRACIÓN 68 OBTENCIÓN DE GANANCIA A FRECUENCIA DE 1025 MHZ (SIMULADA).	88
ILUSTRACIÓN 69 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE COPO DE KOCH A FRECUENCIA DE 1025 MHZ	89
ILUSTRACIÓN 70 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE COPO DE KOCH A FRECUENCIA DE 1025 MHZ (SIMULADA).	89
ILUSTRACIÓN 71 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE CURVA DE HILBERT A FRECUENCIA DE 1025 MHZ.	90
ILUSTRACIÓN 72 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE CURVA DE HILBERT A FRECUENCIA DE 1025 MHZ (SIMULADA).	90
ILUSTRACIÓN 73 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE TRIANGULO DE SIERPINSKI A FRECUENCIA DE 1025 MHZ.	91
ILUSTRACIÓN 74 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE TRIANGULO DE SIERPINSKI A FRECUENCIA DE 1025 MHZ (SIMULADA).	91
ILUSTRACIÓN 75 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE COPO DE KOCH A FRECUENCIA DE 2400 MHZ.	92
ILUSTRACIÓN 76 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE COPO DE KOCH A FRECUENCIA DE 2400 MHZ (SIMULADA).	92
ILUSTRACIÓN 77 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE COPO DE CURVA DE HILBERT A FRECUENCIA DE 2400 MHZ.	93

ILUSTRACIÓN 78 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE COPO DE KOCH A FRECUENCIA DE 2400 MHZ (SIMULADA).	93
ILUSTRACIÓN 79 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE DIPOLO SIERPINSKI A FRECUENCIA DE 2400 MHZ.	94
ILUSTRACIÓN 80 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE DIPOLO SIERPINSKI A FRECUENCIA DE 2400 MHZ (SIMULADA).	94
ILUSTRACIÓN 81 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE ISLA DE MINKOWSKI A FRECUENCIA DE 2400 MHZ	95
ILUSTRACIÓN 82 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE ISLA DE MINKOWSKI A FRECUENCIA DE 2400 MHZ (SIMULADA)..	95
ILUSTRACIÓN 83 OBTENCIÓN DE GANANCIA A FRECUENCIA DE 2400 MHZ.	96
ILUSTRACIÓN 84 OBTENCIÓN DE GANANCIA A FRECUENCIA DE 2400 MHZ (SIMULADA).	96
ILUSTRACIÓN 85 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE CURVA DE HILBERT A FRECUENCIA DE 4000 MHZ.	97
ILUSTRACIÓN 86 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE CURVA DE HILBERT A FRECUENCIA DE 4000 MHZ (SIMULADA).	97
ILUSTRACIÓN 87 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE TRIANGULO DE SIERPINSKI A FRECUENCIA DE 4000 MHZ	98
ILUSTRACIÓN 88 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE TRIANGULO DE SIERPINSKI A FRECUENCIA DE 4000 MHZ SIMULADA	98
ILUSTRACIÓN 89 OBTENCIÓN DE GANANCIA DE ISLA DE MINKOWSKI A FRECUENCIA DE 4000 MHZ.	99
ILUSTRACIÓN 90 . OBTENCIÓN DE GANANCIA DE ISLA DE MINKOWSKI A FRECUENCIA DE 4000 MHZ (SIMULADA).	99
ILUSTRACIÓN 91 PRUEBA DE GANANCIA.	109
ILUSTRACIÓN 92 PRUEBA DE VSWR.	109

INDICE DE TABLAS.

TABLA 1 TIPOS DE ANTENAS.	20
TABLA 2 TECNOLOGIAS WPAN.	54
TABLA 3 ANTENA DIPOLO DE SIERPINSKI.	59
TABLA 4 ANTENA CURVA DE KOCH.	60
TABLA 5 ANTENA CURVA DE HILBERT	61
TABLA 6 ANTENA ISLA DE MINKOWSKI.	62
TABLA 7 ANTENA ALFOMBRA DE SIERPINSKI.	63

INTRODUCCIÓN.

El concepto de telecomunicaciones ha evolucionado en gran manera en la última década y dentro del estudio de la carrera de ingeniería se han analizado y simulado únicamente el comportamiento de las antenas; para los estudiantes que han cursado electromagnetismo, análisis de circuitos y telefonía móvil tienen los conceptos básicos para poder comprender el funcionamiento de estas, sin embargo de manera práctica y las diferentes aplicaciones es muy deficiente los conocimientos con los que se cuentan por lo cual se diseñará y construirá una antena fractal para estudiarla de manera práctica.

Se presenta la investigación de varios aspectos sobre lo que comprende a las antenas de tipo fractal y multifractal, y para ello se detallará desde lo que es un fractal en la naturaleza. Según la información el mundo de los fractales no es tan simple como parece es una teoría bastante amplia y compleja, no solo es ver un sistema de figuras geométricas es una obra de arte matemática plasmada de forma física, así como por ejemplo un copo de nieve que tiene un sistema fractal.

Posterior a la explicación de los fractales, conocer sus características y ver ejemplos de fractales, se puede percibir que su aplicación a las antenas no es una tecnología tan reciente pero su uso ha ido en creciente aumento, pues se cuentan con referencias de varios años atrás donde se explica los diseños de antenas con esta tecnología donde ya era usada para las telecomunicaciones.

Se presenta un diseño de antena que hace uso de la tecnología antes mencionada de fractales, se puede apreciar el proceso de fraccionar en triángulos el área de la placa que se usará para la antena, con el apoyo de fórmulas que generará un algoritmo a manera de repetición y del cual obtendremos el diseño fractal llamativo y así de esta manera el proceso muestra indicio a poder variar aspectos según las necesidades de implementación en las que se requiera una antena.

DESCRIPCIÓN DEL TEMA:

En los últimos años, se ha experimentado una importante evolución de los sistemas de comunicaciones vía radio, derivados de las nuevas tecnologías aplicadas (especialmente) en los sistemas de telefonía móvil. Lo anterior, incluye las antenas utilizadas por dichos sistemas, las cuales han tenido que modificar su enfoque de diseño tradicional, para adaptarse a requerimientos de desempeño multibanda, estructura compacta, mejora en ganancia, directividad y funcionamiento en redes de espectro ensanchado.

Un método de diseño de antenas, que ayuda a cumplir los requerimientos anteriores, es el denominado Fractal y Multifractal. Por definición, un fractal es un objeto geométrico cuya estructura básica (fragmentada o irregular) se repite a diferentes escalas y cuando este concepto se aplica al diseño de antenas, se obtiene una mejora sustancial de desempeño, comparado con los resultados de los métodos tradicionales. En el presente trabajo se busca evaluar la aplicación de esta metodología, en el diseño y construcción de antenas para diferentes bandas de frecuencia y comprobar la mejora de desempeño, haciendo uso de instrumentos de medición apropiados (analizadores de espectro, analizadores vectoriales, etc.) con el propósito de utilizar esta metodología en la enseñanza de conceptos de ingeniería de radio en la EIE.

INTERÉS DE LA INVESTIGACIÓN.

La principal idea de este trabajo es comprobar mediante un analizador de espectros como se comportaría una antena de este tipo y a su visualizar las ventajas y desventajas que podría obtenerse de ellas y a su vez, de qué manera una antena tan grande podría funcionar como la de un teléfono móvil que es de menor tamaño pero que presentan una igual tecnología ya que se suele usar este tipo de antenas en móviles.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

Evaluar la metodología de diseño y construcción de antenas, bajo el enfoque fractal y multifractal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Analizar el desempeño de los modelos básicos fractales, aplicables en el diseño de antenas.
- Proponer metodologías de medición que permitan comprobar la mejora en el desempeño de antenas, cuando se aplica la metodología fractal.
- Aplicar esta metodología en la construcción de antenas para servicios de red inalámbricos, redes de telefonía móvil, televisor digital y enlaces del tipo WIMAX.

ALCANCES:

- Revisar los modelos más comunes, empleados en el diseño de antenas bajo el enfoque fractal (triángulo de Sierpinski, Copo de Koch, Curva de Hilbert, Alfombra de Sierpinski, islas de Minkowski, etc.)
- Demostrar el desempeño de antenas diseñadas bajo los modelos anteriores, haciendo uso de las aplicaciones de software apropiadas para ello.
- Diseñar y construir antenas para diferentes frecuencias y servicios, haciendo uso de la metodología fractal y multifractal.

- Demostrar el desempeño de antenas construidas bajo el enfoque fractal (haciendo uso de los instrumentos de medición disponibles en la EIE) y compararlo con el que se tendría al usar los métodos tradicionales de diseño.

ANTECEDENTES.

El desarrollo de dispositivos de comunicaciones vía radio (como los utilizados en telefonía móvil o en transmisión de datos inalámbricos) requieren de componentes cada vez más compactos y con capacidad de manejar un gran volumen de información. Una alternativa adoptada por los fabricantes de este tipo de equipos, es el uso de antenas diseñadas y construidas bajo el concepto fractal, lo que ha reducido (significativamente) las dimensiones de estos componentes, lo que permite ubicarlas al interior de los teléfonos celulares (por ejemplo), de forma más eficiente, sin afectar sus características radioeléctricas. Esta tecnología, también se conoce como “Geometría de la Naturaleza”, dado que la forma física de las antenas construidas bajo esta modalidad, se asemeja a copos de nieve, figuras de árboles, plantas, etc. En la actualidad, este es el método predominante utilizado para la construcción de antenas para dispositivos móviles, de ahí la importancia de familiarizarse con los conceptos asociados al método en cuestión.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

La evaluación del desempeño de los nuevos sistemas de comunicaciones vía radio, requiere comprender el funcionamiento de todos sus componentes, entre ellos, las antenas. En los últimos años, los criterios de diseño de antenas, basados en el concepto fractal y multifractal, se ha extendido en aplicaciones de telefonía móvil y redes de datos inalámbricas, por ello se hace necesario profundizar en esta metodología y a su vez, buscar alternativas que permitan cuantificar la mejora de los parámetros radioeléctricos asociados a dichos elementos.

JUSTIFICACIÓN

Los métodos tradicionales utilizados para el diseño, construcción y evaluación de antenas, requieren del dominio de conceptos asociados al electromagnetismo clásico, para justificar el comportamiento de las mismas, en cuanto a ganancia, respuesta en frecuencia, directividad, etc. Con la metodología fractal, el enfoque principal se centra en el aumento del perímetro del conductor que se utiliza para transmitir o recibir señales de radio, con lo cual, los principios de diseño mencionados al inicio, cambian sustancialmente; es por ello que se vuelve importante el estudio de los conceptos involucrados en esta metodología, incluyendo las alternativas de predicción de desempeño y las herramientas de comprobación del mismo, temas que serán objeto del presente trabajo de graduación y cuyos resultados se espera incluirlos en la enseñanza de las telecomunicaciones en la EIE.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTO TEÓRICO.

1.1 ANTENAS.

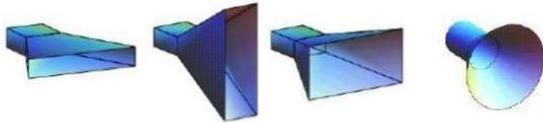
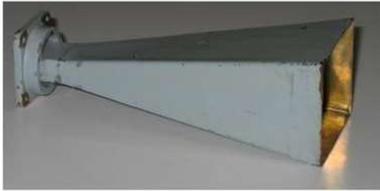
En el mundo de las telecomunicaciones es de vital importancia la transmisión de señales, las cuales son emitidas y/o recibidas por unos dispositivos llamados antenas. Una antena no es más que un dispositivo capaz de poder emitir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre o viceversa. En pocas palabras al circular una corriente a través de un conductor este generara un campo eléctrico y magnético a su alrededor, el cual formara una onda que será posible propagar por el espacio; si tenemos dos puntos y vamos jugando con la distancia entre ellos obtendremos una onda y distribución de corriente que se creara y propagará por el espacio, a su vez se verá afectado la impedancia de dicha antena.

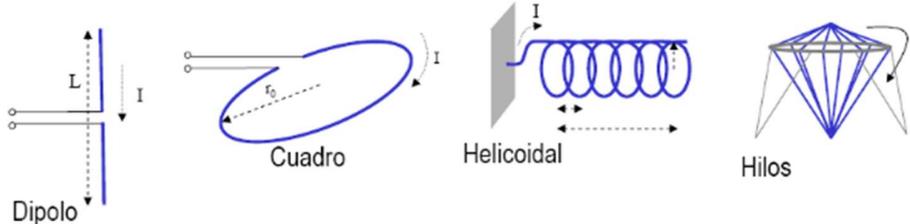
1.2 TIPOS DE ANTENAS.

En su mayoría las antenas son clasificadas en dos grandes grupos, antenas omnidireccionales y antenas direccionales, La primeras presentan un patrón de radiación de 360° aunque no lo hacen de manera uniforme pero son las que tienen mayor cobertura en cuanto a señales inalámbricas, mientras que las antenas direccionales emiten un patrón de radiación más compacto y en una sola dirección, estas son utilizadas en la mayoría de ocasiones para conectar 2 puntos o edificios que tienen visibilidad directa para realizar un enlace.

TABLA 1 TIPOS DE ANTENAS.

TIPOS DE ANTENAS.	
Antena Isotrópica	<p>The diagram illustrates an isotropic antenna. On the left, a red dipole is shown along the z-axis of a 3D coordinate system (x, y, z). A spherical radiation pattern is centered on the dipole. Labels include 'dipolo', 'Plano horizontal', 'Plano vertical', and 'Ancho de Haz 3dB=78°'. On the right, two 2D plots show the radiation patterns in the horizontal (Plano H) and vertical (Plano E) planes. The horizontal plane shows a circular pattern with a radius of 1.64. The vertical plane shows a figure-eight pattern with a vertical axis labeled 'z' and a horizontal axis labeled 'x', with a radius of 1.64.</p> <p style="text-align: center;"><i>Ilustración 1 Patrón de radiación antena Isotrópica (José Manuel Huidobro, s.f.)</i></p>
Antena Yagi-Uda	<p>This section shows four diagrams related to a Yagi-Uda antenna. (a) 'Yagi Antenna Model' shows a physical model of the antenna with its elements. (b) 'Yagi Antenna 3D Radiation Pattern' shows a 3D plot of the radiation pattern with a color gradient from red to blue. (c) 'Yagi Antenna Azimuth Plane Pattern' is a polar plot showing the radiation pattern in the azimuth plane, with angles from 0 to 330 degrees and dB values from -10 to 20. (d) 'Yagi Antenna Elevation Plane Pattern' is a polar plot showing the radiation pattern in the elevation plane, with angles from 0 to 120 degrees and dB values from -10 to 20, labeled with 'Phi = 90' and 'Phi = 270'.</p> <p style="text-align: center;"><i>Ilustración 2 Modelo y Patrón de radiación Antena Yagi-Uda (CISCO, s.f.)</i></p>

<p>Antenas de Apertura</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Plano H Plano E Piramidal Cónica</p> <p><small>*Dibujos Miguel Ferrando</small></p> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>Bocina piramidal típica</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Bocina Ridge (banda ancha)</p> </div> </div> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;"><i>Ilustración 3 Tipos de bocinas de Antenas de Apertura (José Manuel Huidobro, s.f.)</i></p>
<p>Antenas con Reflector o parabólicas</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;"><i>Ilustración 4 Antena de Foco Primario (José Manuel Huidobro, s.f.)</i></p>

<p>Antenas Planas</p>	 <p><i>Ilustración 5 Antena Plana (sky visión, s.f.)</i></p>
<p>Antenas de Hilo</p>	 <p><i>Ilustración 6 Tipos de Antena de Hilo (José Manuel Huidobro, s.f.)</i></p>
<p>Arreglo de Antenas (Arrays)</p>	 <p><i>Ilustración 7 Arreglo de antenas de telecomunicaciones (Wikipedia, s.f.)</i></p>

1.3 PARAMETROS DE UNA ANTENA.

Una antena forma parte de un sistema por lo que para poder comprender a mayor profundidad su funcionamiento y el impacto o efecto que esta tendrá debemos definir los parámetros o características principales.

1.3.1 PATRÓN DE RADIACIÓN.

En general son gráficos polares de intensidad en 3 dimensiones o de manera informal dibujos con posiciones angulares de cada antena ya que según el tipo que sea brindara un diagrama diferente y además en el mismo patrón el cual se considera el parámetro que es más importante ya que a partir de él, es posible observar todos los demás parámetros.

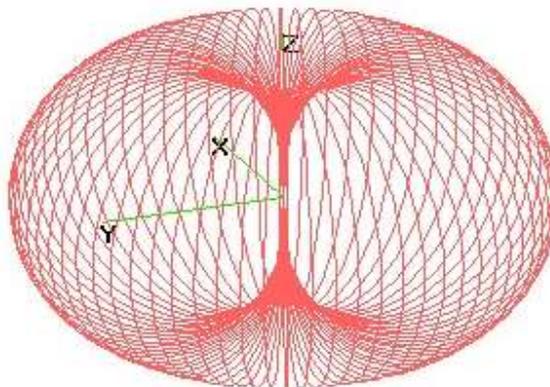


Ilustración 8 Patrón de Radiación 3D (Hernández P, 2021)

Entonces podemos decir que en el gráfico se plasma de manera más real los contextos teóricos, hasta podría decirse que: “la imagen vale más que mil palabras”, y dicho gráfico es dividido en un corte de manera vertical y otro de manera horizontal (azimut), así como es apreciable en la ilustración 9a que es el corte vertical que se le ha realizado al patrón de la ilustración y en la ilustración 9b podemos notar el corte realizado de manera horizontal mostrando la forma de radiación presente en esa posición.

De manera más general lo que expresa la ilustración 9 no es más que la representación en forma gráfica de la energía radiada por una antena con vista de perfil y que puede ser diferente para otras en esta misma posición y el patrón del azimut u horizontal que indica de forma gráfica de igual manera la energía radiada vista desde un plano superficial. Ojo no olvidar que dependiendo el tipo de antena el patrón cambiará siendo así que presenta más variaciones en otros parámetros.

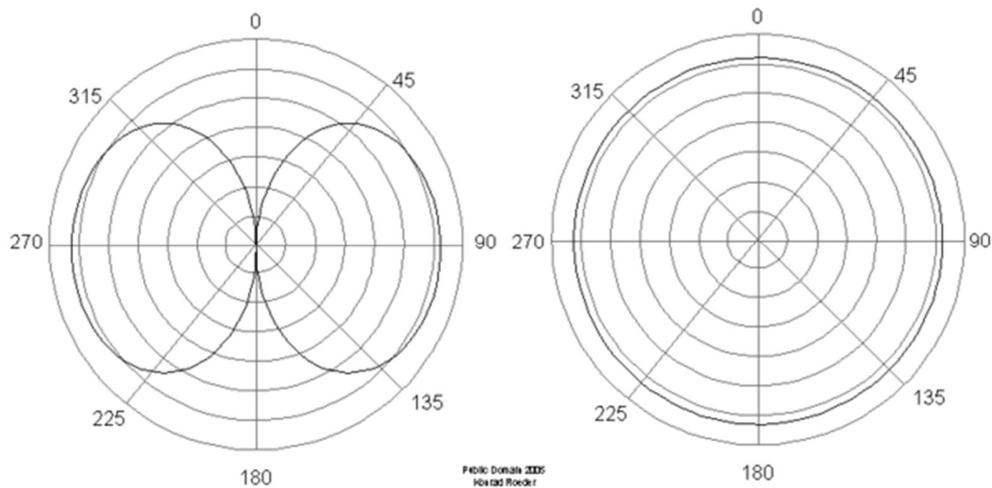


Ilustración 9 a) Corte vertical del patrón de radiación. b) Corte horizontal del patrón de radiación (John D. Kraus, 2002)

1.3.2 GANANCIA.

Es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección de una antena y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, esta se produce por efecto de directividad al concentrar la potencia en la zona indicada del patrón de radiación. Como sabemos la ganancia se relaciona con la directividad ya que si podemos de alguna manera variar la ganancia obtendremos mayor potencia lo cual nos permite un proceso de amplificación de la directividad.

1.3.3 DIRECTIVIDAD.

Como más o menos lo indica la palabra hace referencia a la dirección es decir aplicado a antenas sería la dirección en que la antena radia un intensidad aún mayor en una dirección con respecto a todas sus direcciones, va ligado a la ganancia es decir a mayor ganancia tendremos una antena muy directiva que puede transmitir a mayor distancia y con ese mismo concepto una ganancia menor relaciona una directividad aún menor, eso sí que tener aún mayor ganancia en antenas normales nos da el problema que se vuelve complicado ajustar la dirección a la que se desea llegar un ejemplo es la antena de los hogares para la recepción de señales televisivas, y también volviendo a los diagramas de radiación es muy apreciable la directividad en ellos solo nos dirigimos al punto de mayor potencia con respecto al resto de puntos del diagrama la fórmula que calcula la directividad es:

$$D(\theta, \phi) = \frac{\text{Intensidad de la radiación de la antena en dirección } (\theta, \phi)}{\text{Intensidad media de la radiación en todas las direcciones}} \quad (1)$$

Dicha fórmula es entendible también como la potencia en la máxima dirección de la antena en estudio partida el valor de la intensidad de una antena isotrópica.

1.3.4 IMPEDANCIA.

Dentro de las antenas existen la impedancia de entrada y la impedancia característica, la primera no es más que la relación entre la tensión de entrada de la antena y la corriente de entrada de esta misma.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2).$$

Este parámetro es de vital importancia debido a que la antena deberá conectarse a un transmisor o receptor para obtener la mayor potencia posible con la menor cantidad de pérdidas a través de una línea de transmisión.

Mientras que la impedancia característica (Z_0) viene dada por la relación entre la longitud y diámetro del material y la frecuencia de operación.

1.3.5 ANCHO DE BANDA.

De forma directa es la frecuencia de funcionamiento de la antena o bien dentro del rango que puede operar como se trabaje con ella, se encontrará a menudo las siglas “BW” para referirse a ancho de banda que no es más que proviene del en inglés Bandwidth, otra manera de entender cómo funciona el ancho de banda y de manera muy simple es imaginar sistemas de tuberías y que la cantidad de agua sería la señal y la tubería considerarla como el ancho de banda, entonces a mayor ancho de banda mayor transmisión o recepción de señal este ejemplo también puede observarse de manera ilustrada en la ilustración 15 de manera muy similar a la descrita anteriormente.

El ancho de banda ya en una antena puede ser relacionado con la combinación de la banda de la antena con la peculiaridad que si son patrones de radiación no cambiará dentro de la banda solo exceptuando el caso para antenas pequeñas donde un límite fundamental relaciona el con su ancho de banda, el tamaño de diseño y eficiencia. También es bueno saber que el ancho de banda en otras antenas puede ser afectado por las características de los patrones de radiación no importando que todo se encuentre en perfecto estado simplemente puede ocurrir ese error por los factores alrededor del tipo de antena.

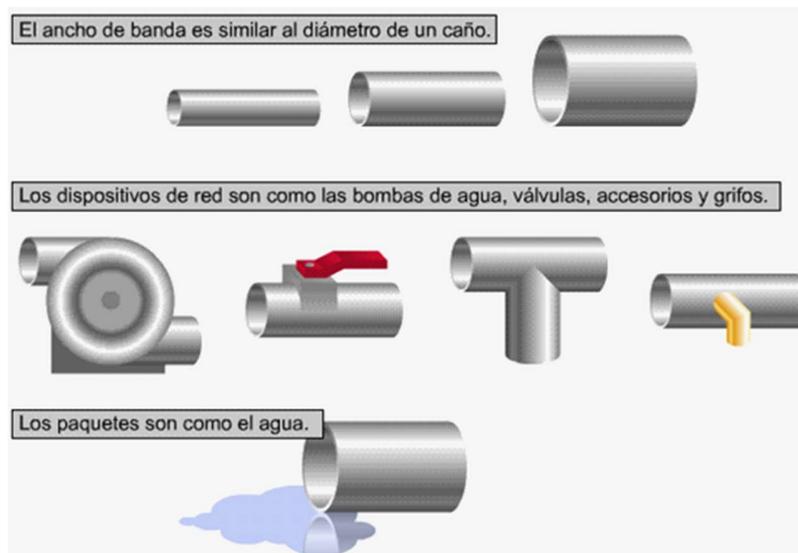


Ilustración 10 Ejemplificación de ancho de banda (José Manuel Huidobro, s.f.)

1.3.6 ANCHO DE HAZ.

Es un parámetro de radiación, ligado al diagrama de radiación. Se puede definir el ancho de haz a -3 dB, que es el intervalo angular en el que la densidad de potencia radiada es igual a la mitad de la máxima. También se puede definir el ancho de haz entre ceros, que es el intervalo angular del haz principal del diagrama de radiación, entre los dos ceros adyacentes al máximo.

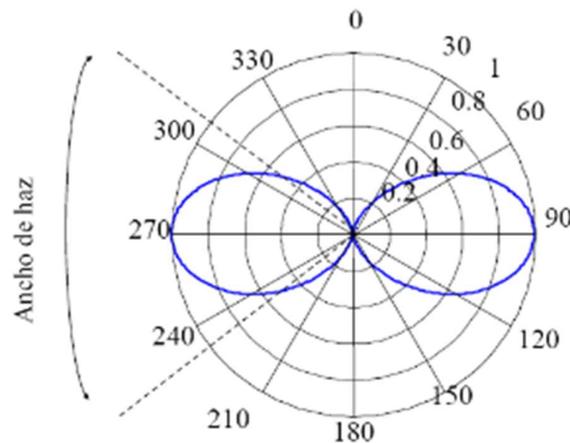


Ilustración 11 Ancho de Haz de 3dB (José Manuel Huidobro, s.f.).

1.3.7 POLARIZACIÓN.

Este parámetro tiene que ver que existe en ella un campo magnético y un campo eléctrico como en la ilustración 16, es decir; que actúan en el componente que son del tipo electromagnéticas es decir que existe un efecto que empuja o se desplaza en nuestro caso de señales puede ser más fácil entenderlo con la forma de ondas o mejor dicho se propaga en forma de ondas y se dice que ella puede presentarse de forma lineal, circular o elíptica.

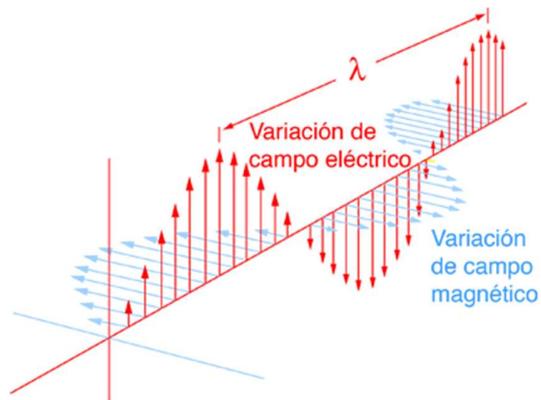


Ilustración 12 Relación de campos magnéticos en la polarización. (M Olmo R Nave, s.f.).

Un aspecto de gran importancia a considerar es que en la determinación de la polarización y sus medidas se deben realizar en la zona lejana de la antena para visualizar que la misma no cambie con la distancia. y en el momento de que se planea transmitir o recibir la antena solo puede trabajar con un tipo de onda de acuerdo a como fue estructurada su polarización de lo contrario en esa antena existirá pérdidas de potencia y a su vez es también información, la polarización lineal las variaciones del campo eléctrico se contienen en una sola dirección mientras que en la polarización circular el vector de campo eléctrico describe una trayectoria circular, que depende del sentido de rotación; y la polarización elíptica, la trayectoria descrita es elíptica como puede visualizarse en la ilustración 13.

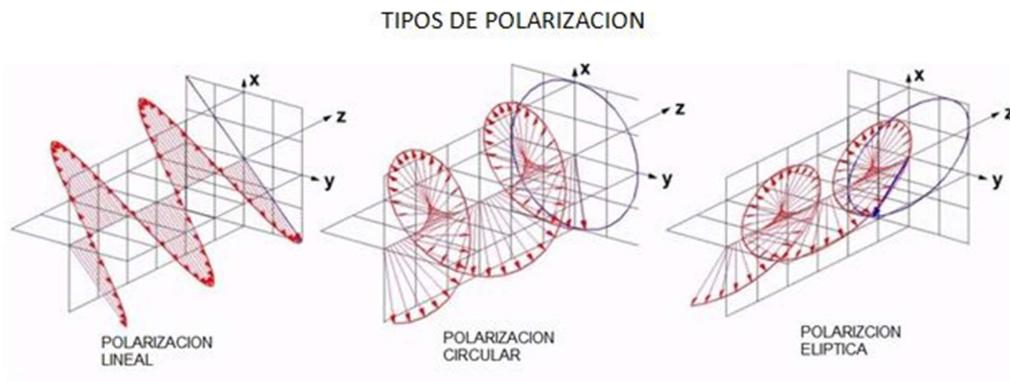


Ilustración 13 Tipos de polarización. (M Olmo R Nave, s.f.)

1.4 FRACTALES.

El presente escrito detallará en distintas secciones el desarrollo de una temática muy amplia y a su vez innovadora para el ámbito de telecomunicaciones, ya que tal tema detallado como las antenas fractal y multifractal es una tecnología poco conocida o un tema que es amplio para poder ser explicado de manera satisfactoria, y por tal motivo el escrito estructurara desde lo más básico de lo que concierne al entorno de la mezcla entre los fractales y las antenas, eventualmente que relevancia presenta, pero como se mencionó empezamos por lo más básico y la pregunta principal en este tema para muchos es la siguiente:

FRACTAL.

- “Fractal un término que puede provenir de la palabra fracción o algo fraccionado o fracturado y al ser algo fracturado debe de componerse de varias piezas”
- “La palabra tiene relación a fragmentos de un todo, como las partes muy pequeñas que se relacionan a un todo igual”
- “La idea con respecto a las fracciones se puede describir como partes iguales de algo, ya que las fracciones presentan los mencionados números quebrados que presentan partes más pequeñas de la unidad de un todo”
- “Fragmentos o figuras diferentes”

Al proponer una cantidad diferente de posibilidades notamos que el verdadero significado no está muy lejos de cómo es descrito el termino técnico de los fractales, pero un fractal se define como un patrón geométrico repetitivo de manera recursiva, es decir, que posee distintos tipos de escalas y es posible apreciarlo en distintas orientaciones ya que la repetición geométrica se da tantas veces y la idea del fractal es que esta repetición tienda a ser infinito, de ese modo; opta el termino de recursivo

ya que este se sigue repitiendo una y otra vez dentro de sí mismo por eso no importaría la escala a la que se encuentre este se verá exactamente igual.

Figura que repite un determinado patrón dando por resultado formas geométricas que se repiten una y otra vez de forma infinita es decir que es recursiva, en la medida que este patrón avanza se obtienen pequeñas variaciones generando diferentes formas pero que en esencia siguen respetando el fractal origen o la figura inicial. Y en diferentes escalas se puede apreciar figuras muy similares que respetan una única ecuación matemática que la caracteriza.

Las formas fractales pueden ser observadas en toda la naturaleza y es de ahí donde nace el pensamiento curioso de querer describir este fenómeno geométrico que como vemos es aplicado a todo lo que nos rodea ya que como se menciona anteriormente ya que si observamos detenidamente las montañas, colinas o cerros no son conos perfectos si no que son diversas figuras que tratan de asemejar un cono, de igual manera pasa en una orilla de la costa, esta no posee un cuerpo geométrico exacto sino más bien uno más fragmentado con distintos quiebres de igual forma con las fronteras, otro ejemplo es el hecho de dibujar un árbol a partir de casi una esfera cuando el árbol es aún una figura muchísimo más compleja.

El autor de este nombre fractal es un matemático de origen polaco conocido como Benoit Mandelbrot, señor el cual es bautizado como el padre de la geometría fractal, aunque los fractales datan de que civilizaciones mucho más antes, los habían observado y datan registros antiguos que lo demuestran, pero el punto de este tema no es solo hablar de historia si no que acreditar al matemático quien observó, pensó un tiempo en el problema que tenía en estudio y postuló modelos al observar las fracturas o quiebres y es ahí de donde se originó el término, el matemático en una empresa famosa en el ámbito de las telecomunicaciones observó una especie de ruido o perturbación encontrada en la red, a la cual estudió muy detenidamente y

es ahí donde al analizar el patrón de ruido a diferentes escalas observo que los quiebres se mantenían iguales y que conservaban el mismo patrón o irregularidad y es aquí donde recalcamos que las primeras hipótesis propuestas de lo que eran los fractales tenían un buen cimiento y esto nos indica que el término seleccionado por el matemático nos da una idea muy bien acertada para introducirse al mundo fractal.

1.5 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN FRACTAL.

Se postulan diferentes características que son para describir los fractales, Mandelbrot propuso los suyos, pero los que en la actualidad se consideran más relevantes o explicativas son las características que Jens Feder enumero y las cuales se enumeran a continuación:

1.5.1 INFINITO DETALLE:

Los fractales se basan en una geometría idealmente infinita que le permite en esta característica que al aumentar la escala de visión sobre el fractal de poco en poco hasta miles de veces su escala original a una que sea sumamente pequeña lo curioso es que el fractal se mantendrá sin distorsión y con ello se seguirá observando el mismo detalle, así como el que posee la figura inicial o fractal original.

Se presenta a continuación una serie de imágenes que serán capaces de describir de manera explícita en que consiste esta característica y para ello nos apoyaremos de un fractal matemático muy famoso y se le conoce con el nombre del Conjunto de Mandelbrot en honor al señor que se interesó primeramente en el estudio de los fractales, este es un fractal matemático generado en el plano complejo que se construye a partir de una sucesión recursiva y mostramos a continuación:

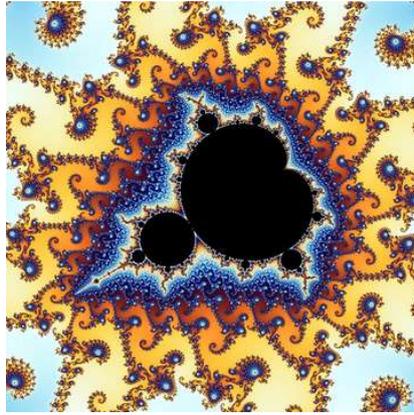


Ilustración 14 Fractal del "conjunto de Mandelbrot" a escala original. (Alvin Von Diaspar, s.f.)

En primera instancia el fractal tiene una forma muy llamativa y difícil de describir de una manera factible, pero a partir de él podemos observar cómo es que la primera característica al realizar un pequeño aumento al lóbulo saliente obtenemos lo siguiente:

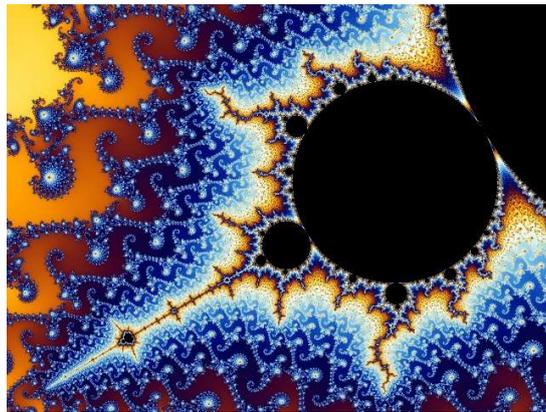


Ilustración 15 Fractal del "Conjunto de Mandelbrot" ampliado hasta su lóbulo principal. (Alvin Von Diaspar, s.f.)

Como se es capaz de observar no hay una variación significativa en el fractal ni en la imagen al aumentar la escala se sigue observando la misma cantidad de detalles como a la escala original, y si aún a esta vista se le decide observar aún más de cerca al lóbulo siguiente se tiene que:

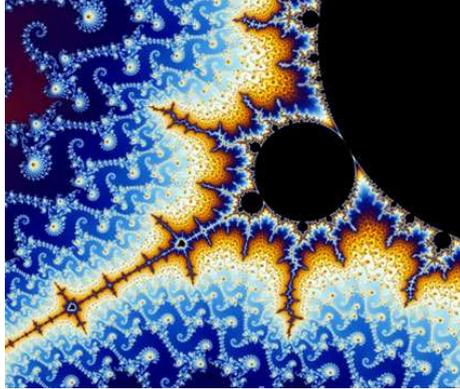


Ilustración 16 Fractal del “Conjunto de Mandelbrot” ampliado hasta su lóbulo externo. (Alvin Von Diaspar, s.f.)

De manera ideal si se sigue ampliando por cada lóbulo que aparece en cada escala nueva según el principio el detalle observado no variaría prácticamente nada puesto que tiende a la infinitud y el detalle seguirá siendo el mismo desde todos los puntos.

1.5.2 AUTOSIMILITUD O AUTO SEMEJANZA:

La mayoría de los fractales porque existe el caso de excepciones de algunos, pero en su mayoría cumplen con este principio que es de ser similares o ser igual a sí mismos es decir conserva la figura muchas veces dentro de sí, un ejemplo en la naturaleza es la ramificación interna de los pulmones si acercamos los bronquios siempre observaremos que se componen de los mismos figuras en más pequeño o como lo son ejemplo de igual manera una coliflor o un brócoli las palmitas que los componen son muy muy semejantes tanto las pequeñas a medida se observan las más pequeñas.

Explicando esta característica con respecto a la anterior tenemos que esta hace más énfasis a la figura en si no tanto al margen observable como en la anterior es decir aquí solo notaremos el parecimiento del fractal en cualquier punto de el mismo es decir la autosimilitud indica que el fractal se crea a partir de fractales de el mismo pero más pequeños unidos por un patrón repetitivo en cambio anteriormente en la

otra característica es más visual a lo que se nota en cada acercamiento si hay más detalle no perceptible a escala original.

Por ello la segunda característica tiene la condición de que no todos los fractales se parecen si hacemos referencia a los lóbulos del Conjunto de Mandelbrot el primer lóbulo posee una curvatura no visible en los lóbulos posteriores o siguientes así como es apreciable en la imagen a continuación en la cual detallamos distintos lóbulos encerrados de color verde diferentes al lóbulo original , marcando su diferencia con una curva morada, observando cierta similitud en todos a excepción del primero.

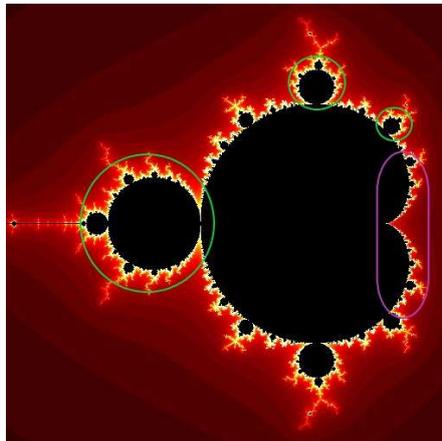


Ilustración 17 Fractal del "Conjunto de Mandelbrot" observado bajo la característica de autosimilitud. (Alvin Von Diaspar, s.f.)

Caso contrario de otros fractales que si se les amplia ciertas partes de ellos mismos podremos observar una semejanza en todos los puntos tal como es el caso continuo en donde se tiene en estudio una curva la famosa "Curva de Koch" la cual si se analiza por sus diferentes partes quebradas notamos una similitud, es decir, desde su forma original se toma la figura del cuadro azul la cual es exactamente igual a la original únicamente en escala diferente, ahora bien si tomamos la imagen del cuadro azul y la cortamos como hicimos en la imagen original obtenemos la parte del lado

verde que de igual forma es exactamente igual a la original y al segundo corte del cuadro azul es ahí donde se explica el principio de la autosimilitud.



Ilustración 18 Fractal del “Conjunto de Mandelbrot” observado bajo la característica de autosimilitud. (Koch H. Von, s.f.)

1.5.3 ITERATIVO O ALGORÍTMICO:

La información que lo genera es sumamente poca y en particular está basado en un principio de reiteración de los resultados creando así nudos o lazos que dependen mucho del dato inicial de entrada, es bastante observable ese proceso si se captura desde la más pequeña unidad (en teoría), ya que un fractal es de orden infinito que según esta característica es la que permite el patrón infinito.

Para describir de manera más visual esta característica se toma nuevamente la “Curva de Koch” como referencia a continuación vemos que si tomamos la unidad principal y la fragmentamos en 4 cortes como la segunda curva este patrón de cortes se ira aplicando a cada nueva recta que aparezca en el patrón y es ahí donde se permite ese proceso recursivo, y al ser un fractal matemático este tiende al infinito generando en su totalidad una estructura muy parecida a los copos de nieve.

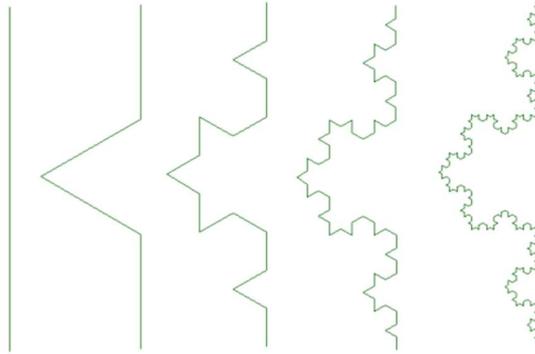


Ilustración 19 Curva de Koch iterada hasta el orden 4. (Koch H. Von, s.f.)

1.5.4 DIMENSIÓN NO ENTERA

Los fractales se caracterizan por tener una dimensión fraccionaria no entera, este tiene su lugar en ciertas excepciones dentro de las gran mayoría de fractales que serán mencionados posteriormente, ahora muy bien haciendo uso de este principio en una figura geométrica con una dimensión quebradiza nos da el indicio de que los fractales no pertenecen a ninguna de las dimensiones enteras conocidas como la lineal (primera dimensión) , la superficial donde están las áreas (segunda dimensión) y por último la volumétrica (tercera dimensión) y los principios espaciales como lo son la dimensión menos uno en donde se le considera al espacio infinito o espacio vacío y la dimensión cero que es la que plotea puntos en el espacio.

En respecto a la dimensión esta se puede determinar si es entera o no para las distintas figuras geométricas a continuación se presentará una fórmula conocida como la del “Conteo De Cajas” que nos permite analizar cómo se debe categorizar la dimensión de los diferentes fractales, a continuación, se demostrara para el caso de figuras convencionales para explicar cómo se utiliza la formula en estudio posteriormente en los modelos fractales se demostrara la dimensión a la que ellos corresponden y se verá un caso realmente curioso.

La fórmula dimensional viene dada de la siguiente manera:

$$D = \frac{\log(N)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (3)$$

Donde:

D: es la dimensión fractal.

N: número de copias de la figura geométrica en estudio.

r: factor de reducción de la figura geométrica.

Teniendo lo anterior en cuenta, llamemos a D la dimensión que se comportará tanto como Dt la dimensión topológica que se caracteriza por ser aquella que conocemos y estudiamos desde siempre y se representa de manera entera (una dimensión es una línea, dos dimensiones son un plano, tres dimensiones son una figura por ejemplo un cubo) solo si es el caso de que cumpla con “r” que sea un factor de reducción igual al original y a Df llamémosla la dimensión fraccionaria (esta presupone que una dimensión no tiene por qué ser siempre un número entero).

1/4	1/4	1/4	1/4
1	2	3	4

Ilustración 20 Aplicación de la formula a una figura de dimensión 1

Como se observa en la figura anterior tenemos una recta la cual se secciono en N=4 copias más pequeñas de ella misma y de la figura original tenemos un factor de reducción $r=\frac{1}{4}$

Entonces con esos datos tenemos al introducirlos a la formula el siguiente resultado:

$$D = \frac{\log(N)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} = \frac{\log(4)}{\log\left(\frac{1}{\left(\frac{1}{4}\right)}\right)} = 1 \text{ (4)}$$

1/3	7	8	9
1/3	4	5	6
1/3	1	2	3
	1/3	1/3	1/3

Ilustración 21 Aplicación de la formula a una figura de dimensión 2.

Como podemos observar para una superficie ocurre lo mismo se tienen N=9 copias iguales de la figura original a la cual cada lado se secciono en 3 partes es decir tenemos un factor r=1/3 al sustituir en la formula:

$$D = \frac{\log(N)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} = \frac{\log(9)}{\log\left(\frac{1}{\left(\frac{1}{3}\right)}\right)} = 2 \text{ (5)}$$

Si convirtiéramos esa superficie en un cubo la relación no sería muy diferente solo tendríamos la variación en N que sería 27 y el resultado nos daría una tercera dimensión.

1.5.5 NO DERIVABILIDAD

Por su naturaleza de composición en su estructura fraccionaria y discontinua las figuras y objetos fractales en su totalidad no poseen derivada en ningún punto de su figura por más que se trate encontrar no existe un punto para una recta tangente, esto a diferencia de la naturaleza suave y continua como lo son los ejemplos de los libros de cálculo o matemáticas básicas en donde si es posible.

Es fácil decir que no posee ningún punto diferencial por el simple hecho que se extiende de manera infinita interna, en una gran cantidad de puntos raros por así decirlo que desde el punto de vista de las curvas o figuras convencionales los fractales son demasiado raros en su estructura.

Una vez explicadas las distintas características de la geometría fractal, nos adentraremos en los fractales matemáticos más famosos o unos de los más relevantes, esto con el fin de conocer las características antes mencionadas se hacen presentes y para observar los comportamientos que estos demuestran al estudiarlos.

Posterior de describir matemáticamente lo que es un fractal se debe comprender la forma de observar y cambiar la manera en la que nos acercamos al tema central de su aplicación en la vida moderna, pero antes es de conocer los distintos tipos de fractales propuestos, como ya aprendimos que un fractal no se rige por la geometría euclidiana, esta geometría es a la que estamos acostumbrados regularmente que nos explica las dimensiones, perímetros y áreas de los objetos y formas, que nos explica que el área y el perímetro van de la mano, siendo estos proporcionales, pero a diferencia de la geometría euclidiana existe la geometría fractal, esta nos muestra que el área no tiene por qué ser proporcional al diámetro, tampoco que su relación entre dimensiones debe ser entera como en la geometría euclidiana.

Ahora bien, empecemos por los fractales matemáticos que están más relacionados a nuestro principio de estudio.

1.6 TIPOS DE ANTENAS FRACTALES.

1.6.1 TRIÁNGULO DE SIERPINSKI

Para construir el Triángulo de Sierpinski primero debemos partir de un triángulo equilátero de lado 1 como observamos en la iteración 0, luego colocamos un triángulo en el centro de nuestro triángulo de iteración 0 de tal forma que los vértices del triángulo menor tengan contacto con las bisectrices del triángulo mayor, luego volvemos a repetir la iteración siempre colocando un triángulo de equilátero que divida los triángulos antecesores en tres partes al tocar su bisectriz con sus vértices.



Ilustración 22 Muestra de las primeras 3 iteraciones para un triángulo de Sierpinski.

Si nos fijamos bien cada vez que se itera se obtiene una cantidad de triángulos de tal forma que se rige por la relación matemática 3 elevado al número de iteración, es decir la cantidad de triángulos será 3^k siendo k el número de iteración, la medida del lado será 2^{-k} debido a que en cada iteración el lado de los triángulos se reduce a la mitad, para demostrar la validez de estas ecuaciones basta con realizar las iteraciones:

Para una tercera iteración tendríamos $3^2=9$ triángulos y $2^{-2}=\frac{1}{4}$ como la longitud de lado de los triángulos equiláteros.

Con estas dos fórmulas podríamos empezar el diseño de una sencilla antena fractal sin embargo algo que debemos tomar en cuenta es el perímetro y el área efectiva para la aplicación de nuestra antena entonces debemos deducirlo y lo podemos hacer de la siguiente manera:

Deducción de Perímetro y área de un triángulo de Sierpinski.

Perímetro:

El perímetro de nuestro triángulo de Sierpinski puede ser obtenido como el perímetro de cualquier otra figura geométrica, sabemos que el perímetro de un triángulo equilátero sería $3*L$ siendo L la longitud de uno de los lados del triángulo.

Entonces:

- **Iteración 0:** Tendríamos un perímetro equivalente a $3*L$.
- **Iteración 1:** Tendríamos un perímetro equivalente a $3*L*(3^2)$ si nos fijamos, por cada iteración el número de los triángulos se triplica y la longitud del lado se divide a la mitad, siendo estos un factor constante por cada iteración podríamos expresarlo como $\frac{3}{2}$.
- **Iteración 2:** Para una iteración 2 se tiene que en este caso tendríamos 9 triángulos y la longitud de lado de cada triángulo se ha dividido de nuevo a la mitad siendo $\frac{1}{4}$ de longitud de lado original, entonces el perímetro sería equivalente a $3*L*\frac{9}{4}$ o que es lo mismo $3*L*(\frac{3}{2})^2$ como mencionamos anteriormente.
- **Iteración n:** Para una iteración n vemos que los triángulos por cada iteración se triplican y las longitudes de sus lados se reducen a la mitad entonces el número de triángulos por cada iteración es 3^n y los lados se reducen en un factor de $\frac{1}{2}^n$ pero el perímetro siempre se mantendría constante como $3*L$ (L

longitud de lado) en consecuencia tenemos la siguiente expresión general para el perímetro

$$\text{Perímetro para } n \text{ iteraciones} = 3 * L * \frac{3^n}{2} \quad (6)$$

Donde L es la longitud de lado y n es el número de iteración.

- El perímetro a medida que las iteraciones se hacen más numerosas se puede notar que va tendiendo a infinito.

Área:

El área de nuestro triángulo de Sierpinski la podríamos expresar como base por altura:

$$\frac{(b * h)}{2} \quad (7)$$

Siendo b la base y h la altura.

Sabiendo que la base en un triángulo equilátero es igual a todos sus demás lados nuestra base sería equivalente a L, y nuestra altura sería equivalente a:

$$\text{Altura} = L * \text{sen}(60) = L * \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

Tenemos que el área sería igual a:

$$\text{Área} = \frac{3}{4} * L^2 \quad (9)$$

Pero este Área sólo sería para nuestro triángulo de iteración 0, debemos hallar el área para los triángulos de las siguientes iteraciones también, recordemos lo anterior:

- Número de triángulos por iteración:

$$3^n \text{ (10)}$$

- Factor de división de la longitud de los lados:

$$2^{-n} \text{ (11)}$$

- la ecuación para el área de un triángulo de Sierpinski de n iteraciones sería:

$$\text{Área} = 3^n \cdot (2^{-n} \cdot L)^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \text{ (12)}$$

- Es importante notar que a medida que las iteraciones se hacen más numerosas el área del triángulo de koch tiende a cero. Fácilmente comprobable con solo reemplazar n y seleccionar una longitud de lado arbitraria

1.6.2 COPO DE NIEVE DE KOCH:

Para nuestro copo de nieve de koch podemos proceder de forma similar que con el triángulo de Sierpinski, de hecho, partiremos del mismo triángulo equilátero. Para formar nuestro copo de nieve primero debemos formar un triángulo equilátero y luego marcar cada una de sus bisectrices, como se muestra en la iteración 0, luego como siguiente paso formamos una superposición de triángulos equiláteros formando una estrella de seis puntas, superponemos la estrella de seis puntas que formamos en la iteración dos en cada una de las puntas de sí misma hasta que nos resulte como en la iteración 3 y así progresivamente hasta formar la

iteración 4, luego hacemos una limpieza de la figura eliminando todas las intersecciones y podremos observar como todo el contorno nos forma un copo de nieve de koch

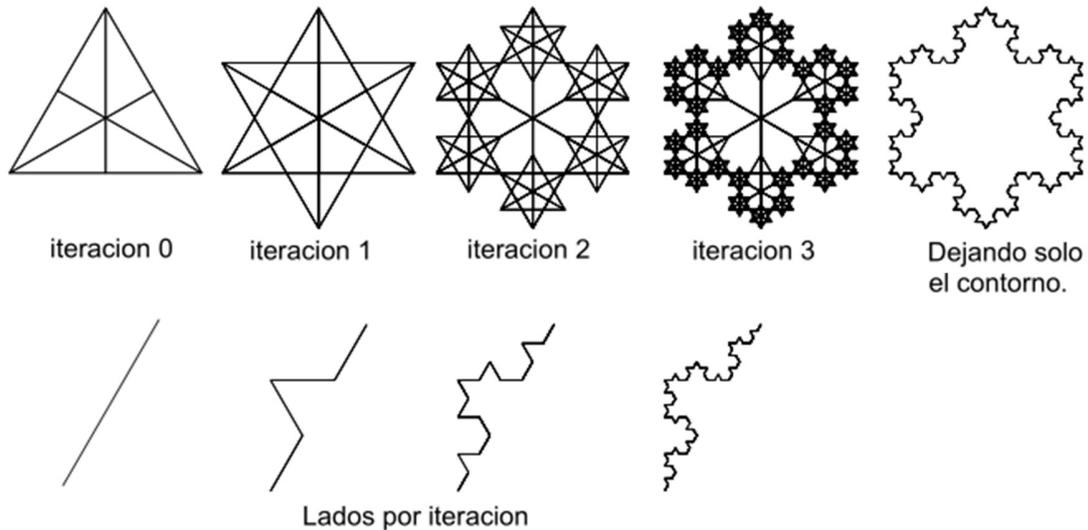


Ilustración 23 Imagen ilustrativa de como formar un copo de Koch. (Koch H. Von, s.f.)

Deducción de Perímetro y área de un copo de koch.

Perímetro.

Para deducir el perímetro del copo de koch debemos observar bien las iteraciones anteriores, en otras palabras, en la iteración 0 vemos que tenemos 3 lados, en la iteración 1 vemos que tenemos 12 lados, y en la iteración 2 vemos que tenemos 48, observamos un patrón de replicación de los lados, el siguiente:

$$\text{Lados del copo según iteración} = 3 \cdot 4^n \quad \mathbf{(13)}$$

Donde n es el número de iteración y el 3 es el número de lados originalmente en la iteración 0, con esto tenemos los lados por iteración del copo, nos faltaría saber cuál es la longitud de cada lado de los triángulos al momento de realizar cada iteración y luego multiplicar la cantidad de lados por la longitud de los lados.

¿Cuál es la longitud de los lados?

Si prestamos atención en la figura 8, en la iteración cero tenemos 1 lado, en la primera iteración tenemos 4 lados en cada costado del triángulo original, en la segunda iteración tendríamos 16 lados por costado. Podemos observar que los lados responden a una razón de:

4^n por costado, siendo 3 costados del triángulo original.
 quedaría finalmente: $3 \cdot 4^n =$ Número de lados por iteración

Con respecto a la longitud de los lados, podemos observar que por cada iteración la longitud de cada lado se va reduciendo $\frac{1}{3}$ de su tamaño original, entonces podemos establecer la relación siguiente:

$$L \cdot 3^{-n} \quad (14)$$

Siendo L , la longitud original de los lados del triángulo, y n el número de iteración.

Entonces, para deducir el perímetro bastaría con multiplicar el número de lados por la longitud de cada lado en cada iteración. tal que:

$$\text{Perímetro (P)} = L \cdot \frac{1}{3}^n \cdot 3 \cdot 4^n = L \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^n \cdot 3 \quad (15)$$

Podemos notar como el perímetro tiende a infinito debido a que el factor $\left(\frac{4}{3}\right)^n$ va en incremento con cada iteración sin límite definido hasta el infinito.

Área

Para el área la situación se vuelve un poco más complicada en análisis, pero lo describiremos paso a paso para su fácil comprensión.

Cuando tenemos un triángulo de longitud de lado igual a la unidad, es decir $L = 1$, podemos calcular su área como:

$$A = L^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \sin(60^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot (1)^2 = \frac{\sqrt{3}}{4} \quad \text{(16)}$$

Para un triángulo de longitud $L = 1/3$ tenemos un área de:

$$A = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot (1/3)^2 = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{1}{9} = \frac{\sqrt{3}}{36} \quad \text{(17)}$$

Para un triángulo de longitud $L = 1/9$ tenemos un área de:

$$A = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot (1/9)^2 = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{1}{81} = \frac{\sqrt{3}}{324} \quad \text{(18)}$$

Podemos ir notando un patrón recurrente en el escalamiento de la longitud de los lados del triángulo en relación con el área, por cada vez que los lados del triángulo se reduzcan $1/3$ por iteración, el área se reduciría $1/9$ de tamaño original por iteración.

Por cada iteración los nuevos triángulos tendrían $(1/9)$ del área de la iteración anterior entonces se puede determinar el área por:

$$A_n = A_o (1/9)^n \quad \text{(19)}$$

Siendo A_n el área de los triángulos nuevos en la iteración n y A_o el área del triángulo original

Debemos saber los triángulos añadidos con cada iteración para saber cuánta área se añade por cada iteración, para esto debemos volvernos a la figura 8 de nuevo y

observar que en la iteración 0 no tenemos ningún triángulo añadido, en la iteración 1 vemos que tenemos 3 triángulos añadidos, en la iteración 2 vemos que tenemos 12 triángulos nuevos y en la iteración 3 vemos que tenemos 48 triángulos nuevos. Podemos relacionar la cantidad de triángulos por iteración con la siguiente fórmula:

$$\text{Cantidad de triángulos/iteración} = 3 \cdot 4^{n-1} = 3 \cdot \frac{4^n}{4} = \frac{3}{4} \cdot 4^n \quad (20)$$

por cada costado del triángulo se añaden 4^{n-1} triángulos y son 3 costados del triángulo original, de ahí el origen de la fórmula.

Nuestra área total sería la suma de nuestra área original más la sumatoria de todas las áreas de los triángulos que se van agregando a nuestro triángulo con cada iteración

Área de Triángulos por iteración:

$$A = A_0 \cdot \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{4}{9}\right)^n \quad (21)$$

Área Total:

$$A_0 + A_0 \cdot k = A_0 \sum_{1}^n \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{4}{9}\right)^n \quad (22)$$

Desarrollando la sumatoria nos quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Área Total} = \frac{\sqrt{3}}{20} \left(8 - 3 \left(\frac{4}{9}\right)^n\right) \quad (23)$$

Siendo L la longitud de lado del triángulo y n el número de iteración.

Por la naturaleza y propósito de este proyecto solo se estudiarán los modelos matemáticos de estos dos fractales, los cuales a su vez se presentan como una opción viable de implementación y construcción de una antena fractal.

1.6.4 LA CURVA DE HILBERT.

La curva de Hilbert es una antena con un patrón de diseño un tanto curioso, se define a partir de una sección de área cuadrada, pero como todo fractal debe seguir una serie peculiar como en los diseños previamente presentados, el área debe dividirse en 4 cuadrados iguales sobre el cuadro original y los centros de estos cuadros deben estar unidos pero con la peculiaridad de no cerrar el trazo, es decir, el trazo tiene un inicio y un final no coincidente es una sola línea, aquí concluimos lo que sería una iteración del sistema fractal para nuestra curva.

En la segunda iteración: los cuatro cuadros anteriores se deben dividir en otros 4 cuadros idénticos logrando así que nuestro cuadro original contenga ahora 16 cuadros, a los cuales de igual manera se les deberá de conectar en los centros esto con el fin de ir creando una serie serpenteada a lo largo de nuestra área total cuadrada, lo que se sigue únicamente es que el inicio debe encontrarse en el primer cuadro de la izquierda superior y el último cuadro del patrón será el de la esquina superior derecha y así repitiendo sucesivas veces hasta la iteración que se desea de conocer.

Agregando una tercera iteración: de igual manera los 16 cuadros ahora en estudio se seccionan nuevamente generando una figura tal que contendrá un total de 64 cuadros pequeños a partir de los 16 anteriores, como en las iteraciones anteriores se unen los centros y la parte inicial y final de la curva se encuentran al mismo nivel.

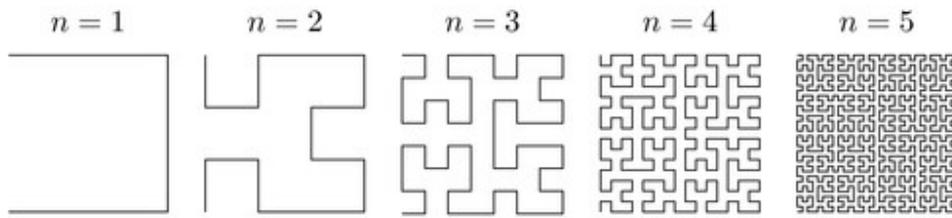


Ilustración 24 curva de Hilbert de iteración 5 (David Hilbert,1891)

La longitud o perímetro de este fractal lo contiene la siguiente expresión:

$$P = 2n - \frac{1}{2^n} \text{ (24)}$$

En donde:

L comprende la longitud inicial del cuadro donde se empezó a iterar.

n es la cantidad de iteraciones que se decide realizar para formar a la curva.

y al observar la ecuación podemos notar que si la seguimos extendiendo al infinito lo que sea nuestro perímetro de igual manera iría tendiendo al infinito, que es algo común dentro de las antenas fractales y nuestra curva aparte completa con la propiedad de ser continua y a medida se incrementan las iteraciones el área no efectiva se observa que va en disminución y adoptará el nombre también de la curva que llena el espacio y por seguir siendo curva será una figura con área igual a 0.

1.6.5 ISLA DE MINKOWSKY:

Para el fractal presente al igual como se hizo con el copo de nieve, este fractal puede realizarse de la misma manera solo que en vez de basarse en un triángulo recurriremos a un cuadrado para su creación, con la misma tendencia de la curva de Minkowsky aplicada a un sector de tipo área, como en la curva se indica que cada recta es seccionada en 4 partes como en el copo de nieve con la diferencia de que ahora se le agrega lo que es dos figuras cuadradas similares a una onda escalón.

En la primera iteración después de seccionar la línea recta en 4 partes procedemos a los que es agregar la onda escalón mencionada, con esta iteración vemos la figura quebrada que ahora consta con 8 pequeñas rectas que aparecieron a partir de una sola.

Si decidimos realizar una segunda iteración, esta es aplicada con igual característica a cada parte recta que hay en la iteración 2, se le aplicara el mismo principio de cortes en 8 secciones dando lugar a 64 nuevas rectas que nacen a partir del total que ya se tenían en un inicio.

A medida que la iteración se vaya volviendo mucho más complicada aun para la tercera seria sorprendente la cantidad de lados que esta imagen tendría y aun as curioso al aplicar esta iteración a un área cuadrada, dando lugar a lo que es la isla de Minkowsky.

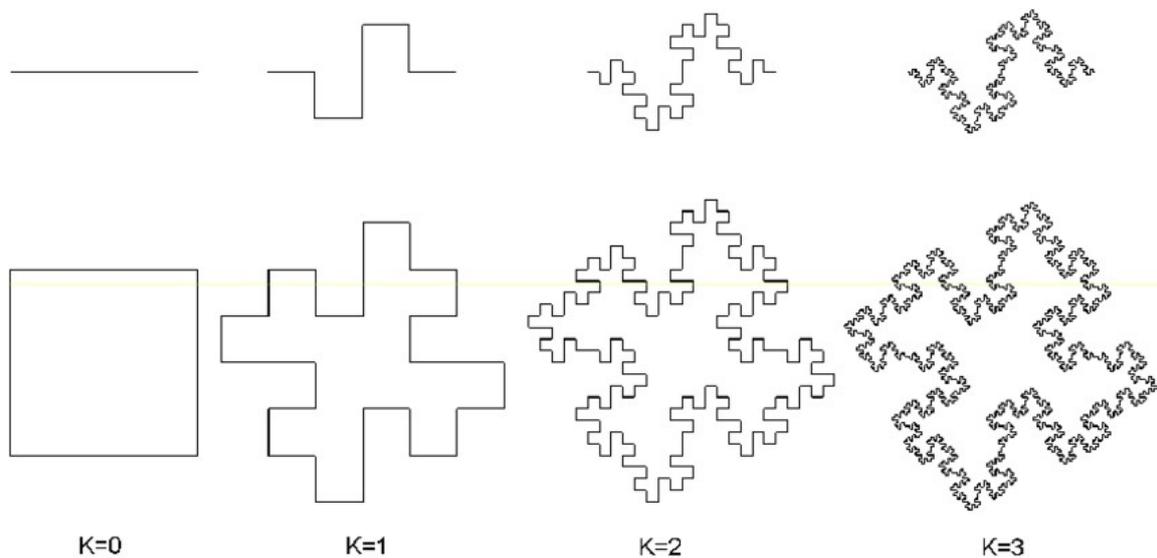


Ilustración 25 Imagen ilustrativa de cómo formar una isla de Minkowsky. (Hermann Minkowsky, 1908)

1.7 DEDUCCIÓN TEÓRICA DE LA ECUACIÓN DE CAMPO DE LAS ANTENAS FRACTALES.

En el ámbito de antenas fractales es muy complicado considerar una figura uniforme en comparación a una antena convencional, entonces nace la pregunta ¿Cómo modelo una antena fractal?, al aplicar la matemática debida y verlo desde una perspectiva de escalas nos podemos apoyar del vector de Hertz, que de la mano de las ecuaciones de Maxwell nos encaminaremos aun modelado que permitirá mostrarnos un comportamiento electromagnético muy apegado a su respuesta real.

El análisis debe ir encaminado a la forma más ideal (en el vacío), aquí se considera un vector función Q el cual se encuentra ligado a lo que es la densidad de corriente J y la densidad de carga ρ como se muestra a continuación:

$$J = -\frac{\delta Q}{\delta t} \quad (25)$$

$$\rho = \nabla \cdot Q \quad (26)$$

Pero también Q a su vez puede usarse para definir lo que es otra función vectorial anteriormente mencionada como lo es el vector de Hertz $\Pi(x, t)$ de la siguiente manera.

$$\nabla^2 \Pi - \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 \Pi}{\delta t^2} = -4\pi Q \quad (27)$$

Y los campos se definen así:

$$B(x, t) = \frac{1}{c} \nabla \times \frac{\delta \Pi(x, t)}{\delta t} \quad (28)$$

$$E(x, t) = \nabla \times \nabla \times \Pi(x, t) \quad (29)$$

Con la transformada de Fourier en el tiempo dadas por:

$$Q(x, t) = \frac{j}{\omega(J(\omega, w))} \quad (30)$$

$$J(x, \omega) = Ll(l, \omega) \quad (31)$$

Son resolubles con el vector de Hertz

$$\Pi(x, \omega) = \frac{j}{\omega} \int_0^L J(l, w) \frac{e^{jk|x-l\hat{L}|}}{|x-l\hat{L}|} dl \quad (32)$$

Con una orientación dada por L y una longitud indicada por l , siendo la frecuencia indicada por ω . Considerando aspectos en torno a las estructuras fractales como lo es el desplazamiento de un pulso de corriente con una velocidad $\beta=v/c$ en la estructura fractal, superponiendo todos los infinitos elementos de corriente de un fractal para un conjunto propio de elementos lineales el vector de Hertz esta dado de la siguiente manera:

$$\Pi(x, \omega) = \sum_{[n]} \hat{L}_n j \frac{j}{\omega} \int_0^{L_n} I_0(\omega) e^{jk(r_n+l)} \frac{e^{jk|r_n-l\hat{L}_n|}}{|r_n-l\hat{L}_n|} dl \quad (33)$$

Donde r_n es el vector que indica el comienzo del n -ésimo elemento lineal del campo de posición x . pero aun para analizar la formula anterior se vuelve demasiado complejo entonces se toma la consideración de que $r_n \gg L$ y de ese modo se aproxima el campo lejano de todos los pequeños elementos lineales y encontrar una solución en forma cerrada para la transformada de Fourier, como se observa posteriormente en las expresiones de campo para toda estructura fractal:

$$B(x, \omega) = -\sum_{[n]} \frac{k^2 e^{jkr_n}}{r_n} f(\varepsilon_n, \omega, r_n) \cdot \left[1 + \frac{j}{(kr_n)}\right] (\hat{L}_n \times \hat{r}_n) \quad (34)$$

$$E(x, \omega) = -\sum_{[n]} \frac{k^2 e^{jkr_n}}{r_n} f(\varepsilon_n, \omega, r_n) \cdot \left[\left(1 + \frac{j}{(kr_n)} + \frac{j^2}{(kr_n)^2}\right) \hat{L}_n - \hat{r}_n [\hat{L}_n \cdot \hat{r}_n] \cdot \left(1 + \frac{3j}{(kr_n)} + \frac{3j^2}{(kr_n)^2}\right) \right] \quad (35)$$

1.8 SERVICIOS DE APLICACION.

1.8.1 RED INALÁMBRICOS.

Es la tecnología que nos permite tener una conexión de nodos sin cables o red alámbrica, hoy en día es bastante utilizada por los bajos costos y buena transferencia de datos a través de puertos.

Las redes inalámbricas se pueden clasificar según su cobertura de la siguiente forma:

- **WPAN (Wireless Personal Area Network)**

TABLA 2 TECNOLOGIAS WPAN.

Tecnología	Estándar o especificación	Descripción
HomeRF	IEEE Std-802.11FH y DECT	Zona de cobertura de red personal para móviles y ordenadores en un área de 10m.
Bluetooth	IEEE Std-802.15.1	Conexión inalámbrica utilizada para la transmisión de voz y datos entre dispositivos mediante un enlace de radiofrecuencia(2.4GHz)
ZigBee	IEEE Std-802.15.4	Protocolo de alto nivel de comunicación inalámbrica con baja tasa de transmisión de datos y bajo consumo, su principal aplicación es la domótica.

- **WLAN (Wireless Local Area Network)**

Tecnología de comunicación basada en el Wi-Fi regida por el estándar IEEE 802.11, tiene un alcance máximo de 20Km. El dispositivo utilizado para crear una red inalámbrica son los Access Point.



Ilustración 26 Access Point Wi-Fi (EDIMAX, s.f.)

- **WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)**

Es utilizado para redes de área metropolitana, principalmente está basado en el estándar IEEE 802.16 que es acerca del WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, este es un protocolo que su aplicación principal es para zonas rurales en el cual el acceso alámbrico o de servicio sea limitado; su cobertura puede llegar hasta los 70KM.

1.8.2 REDES DE TELEFONÍA MÓVIL

Es el sistema de comunicación en el cual el medio de transmisión es el aire a través de ondas electromagnéticas, esta tecnología está conformada por antenas terrestres las cuales les permiten a los dispositivos móviles el acceso a la red, el ancho de banda permitido para este servicio va desde los 900 MHz hasta los 2000 MHz, obtenido una cobertura

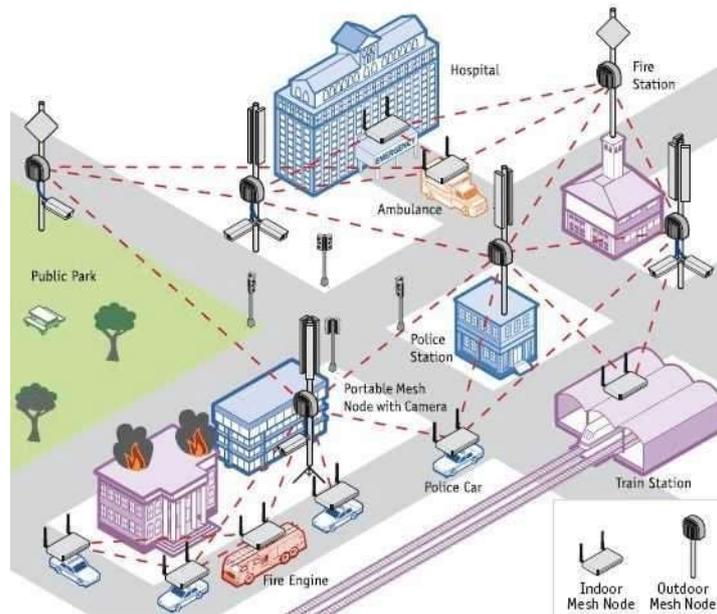


Ilustración 27 Esquema de procesos de la telefonía móvil (Iván Rivero, s.f.)



Ilustración 28 Arreglo de Antena de telefonía móvil. (Jhon Wiley, s.f.)

1.8.3 TELEVISIÓN DIGITAL

Es el conjunto de tecnología por medio del cual se transmite tanto imagen como audio a todos los dispositivos permitidos en una región, teniendo como tal una mejor

calidad de transmisión y recepción de la señal. El rango de frecuencia de operación es entre 698 – 806 MHz; para este servicio utilizamos el tipo de antena Yagi-Uda.



Ilustración 29 Antena Yagi Uda (Hidetsugu Yagi, 1926)

1.8.4 ENLACES DEL TIPO WIMAX

La tecnología de tipo Wimax es una alternativa o variante del Wi-Fi, el cual su aplicación es la transmisión y obtención de datos (Internet). Esta tecnología viene dada por el estándar IEEE 802.16 y su frecuencia de operación va desde los 2.4 GHz a los 5.8 GHz el cual tiene una cobertura máxima de 70 Km.



Ilustración 30 Antena Wimax (EION, s.f.)

CAPÍTULO II: PRINCIPIOS DE DISEÑO PARA ANTENAS FRACTALES.

2.1. INTRODUCCION.

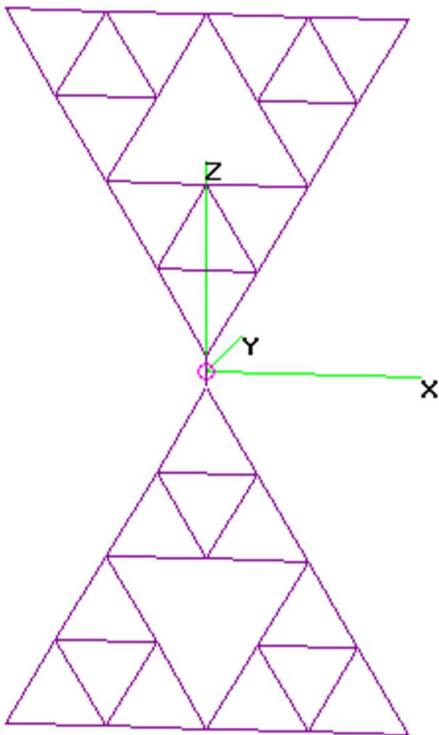
El presente capítulo pretende hacer el estudio y metodología desarrollada para obtener el diseño y la construcción tanto física como simulada para lograr el objetivo de comprobación del desempeño de las antenas en los diferentes servicios (red inalámbrica, red de telefonía móvil, televisión digital y Wimax).

A partir de las ecuaciones anteriores, generar (mediante la herramienta de software apropiada) el patrón de radiación (tridimensional y en dos dimensiones) y de estos gráficos, deducir los parámetros: ancho de haz, Ganancia, Directividad. De igual forma, comparar los patrones de radiación acá obtenidos, con los que proporciona el simulador encontrado y explicar similitudes y diferencias

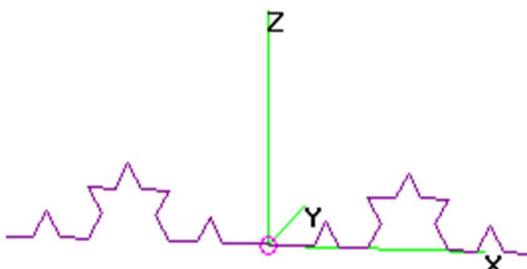
Comparación matemática, de las mejoras o ventajas que ofrecen los modelos fractales, con respecto al uso de antenas tradicionales (en este punto, lo recomendable es usar las ecuaciones de campo para cada caso: fractales y antenas tradicionales asociadas a cada aplicación)

2.2. DISEÑOS A IMPLEMENTAR DE ANTENAS FRACTALES.

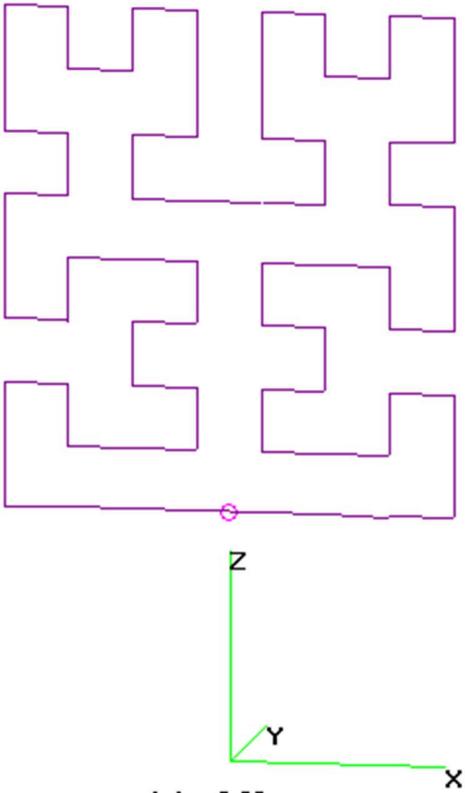
2.2.1. TABLA 3 ANTENA DIPOLO DE SIERPINSKI.

TRIANGULO DIPOLO DE SIERPINSKI	
	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones Físicas: Ancho: 0.0185 m Alto: 0.034 m
	<ul style="list-style-type: none"> • Impedancia de Entrada: 30.7 – 10.4j Ohm
	<ul style="list-style-type: none"> • Conector: Conector tipo F
	<ul style="list-style-type: none"> • VSWR: 1.724
	<ul style="list-style-type: none"> • Línea de Transmisión: Cable SG-58 50 Ohm Resistencia del conductor. 41 ohm/Km (Conductor interior) Impedancia característica. 50 ohm. Capacidad. 100 pF/m Max. Resistencia de aislamiento. >1000 MOhm*Km. Velocidad de propagación. 66% Atenuación (dB/100m) 13,1 a 50 MHz. Tª de servicio. -15°C+70°C. Radio curvatura Min. 10xD.
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de Energía Radioeléctrica: <ul style="list-style-type: none"> • Generador de Señales • Analizador de Espectro

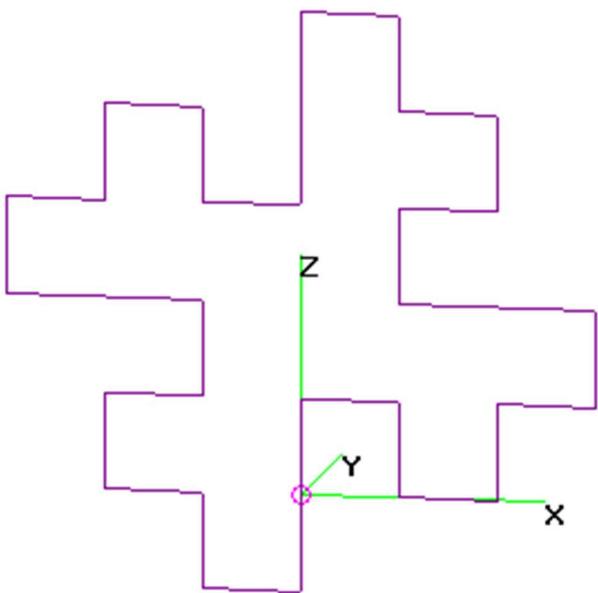
2.2.2. TABLA 4 ANTENA CURVA DE KOCH.

DIPOLO DE CURVA DE KOCH	
	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones Físicas: Ancho: 0.12 m Alto: 0.0175 m
	<ul style="list-style-type: none"> • Impedancia de Entrada: 36.2 + 110.6j Ohm
	<ul style="list-style-type: none"> • Conector: Conector tipo F
	<ul style="list-style-type: none"> • VSWR: 4.37154
	<ul style="list-style-type: none"> • Línea de Transmisión: Cable SG-58 50 Ohm Resistencia del conductor. 41 ohm/Km (Conductor interior) Impedancia característica. 50 ohm. Capacidad. 100 pF/m Max. Resistencia de aislamiento. >1000 MOhm*Km. Velocidad de propagación. 66% Atenuación (dB/100m) 13,1 a 50 MHz. Tª de servicio. -15°C+70°C. Radio curvatura Min. 10xD.
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de Energía Radioeléctrica: <ul style="list-style-type: none"> • Generador de Señales • Analizador de Espectro

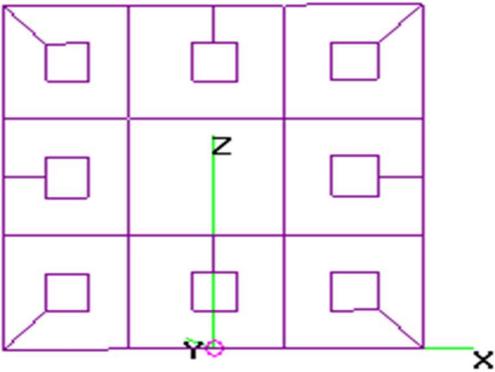
2.2.3. TABLA 5 ANTENA CURVA DE HILBERT.

CURVA DE HILBERT	
	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones Físicas: Ancho: 0.042 m Alto: 0.042 m
	<ul style="list-style-type: none"> • Impedancia de Entrada: 18.1- 21.6j Ohm
	<ul style="list-style-type: none"> • Conector: Conector tipo F
	<ul style="list-style-type: none"> • VSWR: 3.33
	<ul style="list-style-type: none"> • Línea de Transmisión: Cable SG-58 50 Ohm Resistencia del conductor. 41 ohm/Km (Conductor interior) Impedancia característica. 50 ohm. Capacidad. 100 pF/m Max. Resistencia de aislamiento. >1000 MOhm*Km. Velocidad de propagación. 66% Atenuación (dB/100m) 13,1 a 50 MHz. Tª de servicio. -15°C+70°C. Radio curvatura Min. 10xD.
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de Energía Radioeléctrica: <ul style="list-style-type: none"> • Generador de Señales • Analizador de Espectro

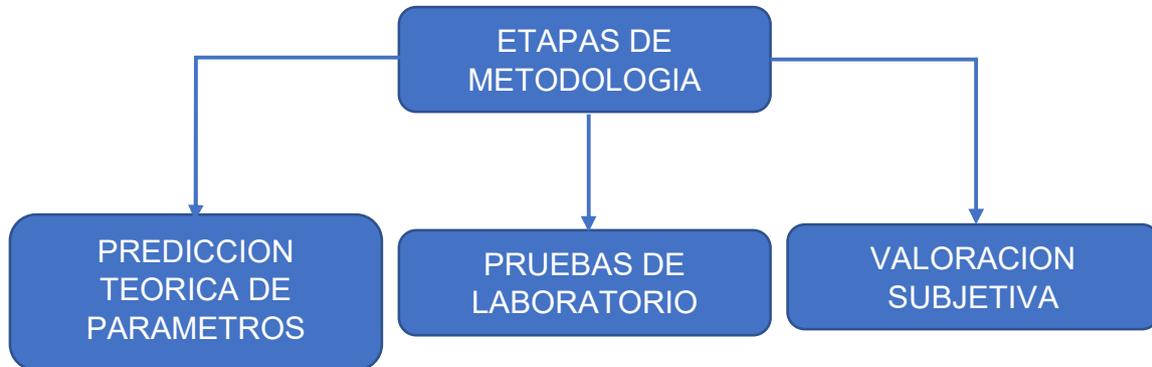
2.2.4. TABLA 6 ANTENA ISLA DE MINKOWSKI.

ISLA DE MINKOWSKI	
	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones Físicas: Ancho: 0.12 m Alto: 0.12 m
	<ul style="list-style-type: none"> • Impedancia de Entrada: 103 + 71.8j Ohm
	<ul style="list-style-type: none"> • Conector: Conector tipo F
	<ul style="list-style-type: none"> • VSWR: 3.23
	<ul style="list-style-type: none"> • Línea de Transmisión: Cable SG-58 50 Ohm Resistencia del conductor. 41 ohm/Km (Conductor interior) Impedancia característica. 50 ohm. Capacidad. 100 pF/m Max. Resistencia de aislamiento. >1000 MOhm*Km. Velocidad de propagación. 66% Atenuación (dB/100m) 13,1 a 50 MHz. T^a de servicio. -15°C+70°C. Radio curvatura Min. 10xD.
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de Energía Radioeléctrica: <ul style="list-style-type: none"> • Generador de Señales • Analizador de Espectro

2.2.5. TABLA 7 ANTENA ALFOMBRA DE SIERPINSKI.

ALFOMBRA DE SIERPINSKI	
	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones Físicas: Ancho: 0.08 m Alto: 0.08 m
	<ul style="list-style-type: none"> • Impedancia de Entrada: 10000 - 609j Ohm
	<ul style="list-style-type: none"> • Conector: Conector tipo F
	<ul style="list-style-type: none"> • VSWR: 206
	<ul style="list-style-type: none"> • Línea de Transmisión: Cable SG-58 50 Ohm Resistencia del conductor. 41 ohm/Km (Conductor interior) Impedancia característica. 50 ohm. Capacidad. 100 pF/m Max. Resistencia de aislamiento. >1000 MOhm*Km. Velocidad de propagación. 66% Atenuación (dB/100m) 13,1 a 50 MHz. T^a de servicio. -15°C+70°C. Radio curvatura Min. 10xD.
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de Energía Radioeléctrica: <ul style="list-style-type: none"> • Generador de Señales • Analizador de Espectro

2.3. PROPUESTA METODOLOGICA.



2.4. LISTA DE MATERIALES.

- Placa fotosensible positiva de Cobre.
- Papel Acetato
- Soda Caustica.
- Ácido Sulfúrico
- Agua Destilada.
- Conector tipo F Hembra

2.5. TECNICA DE CONSTRUCCIÓN.

2.5.1. REVELADO DE INSOLADO.

Primeramente, se necesita de crear el diseño formal de cómo se observará la antena fractal de manera final, para ello podemos hacer uso de distintos softwares que sean capaces de crear la escala que necesitamos, por ejemplo: podemos guiarnos para un diseño más exacto con la herramienta de AUTOCAD y si no es posible podemos aun utilizar cualquier software de la familia de los PCB que sirven para el diseño de circuitos impresos electrónicos.

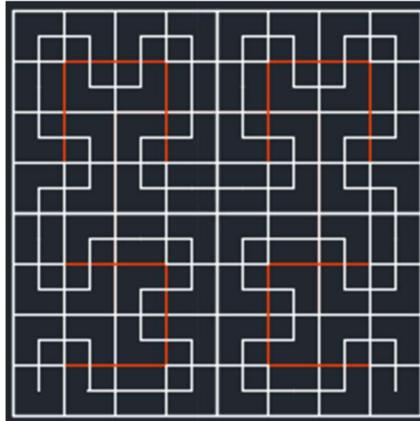


Ilustración 31 Diseño de Curva de Hilbert.

Una vez se cuenta con el diseño creado de forma virtual y se ha considerado que el diseño esta sin error alguno, se prosigue a plasmarlo en la placa de cobre sensible a laminación ultravioleta, existen varias maneras de montarlo en la placa que solo intervendrán en el tiempo de insolado, puesto que es posible utilizar casi que cualquier papel para imprimir la antena, pero el más recomendable es papel acetato por ser transparente o muy bien papel vegetal.

Se considera utilizar una placa fotosensible positiva, esto debido que cuando el impreso se obtiene debe ser la parte con tinta negra la que se conservaría en el insolado de la cámara ultravioleta en dado caso se tiene una placa negativa solo basta en convertir la parte negra de nuestra antena en la parte sin tinta ya que la placa negativa reconoce la parte insolada como la que se conserva.

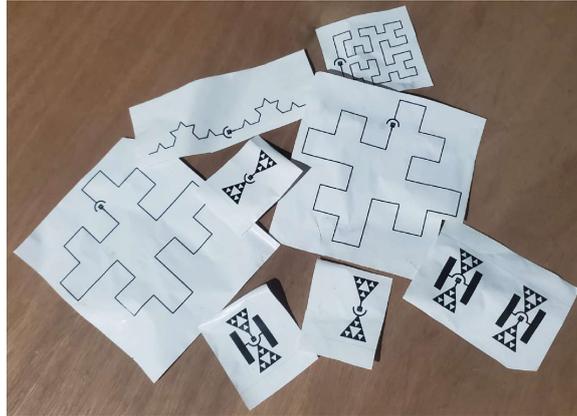


Ilustración 32 Antenas Fractales en Papel Couché.

Se debe considerar al momento de manipular la placa fotosensible sea en un lugar de poca iluminación debido que la placa cuenta con un papel adhesivo que le aísla totalmente de luz incidente para evitar dañar la tela que hace nos permite el grabado de nuestra antena, tomando estas consideraciones y utilizando las dimensiones adecuadas de la placa de cobre que serán colocadas al insolado con el fin de no malgastar el material.



Ilustración 33 Placa de Cobre Fotosensible vista Frontal.



Ilustración 34 Placa de Cobre Fotosensible vista Posterior.

No es necesario hacer limpieza a la placa debido que esta cuenta con protección, aunque si se recurriera al método de degradado por impreso común si es necesario aplicar limpieza a la placa para retirar los excesos de oxido que presenta el cobre o por manipulación la grasa que se haya podido adherir y únicamente difiere con el método de insolado que la placa corriente debe de adherir el impreso y el ácido a usar puede variar, pero es solo una posibilidad alterna que se puede recurrir.

Ahora bien una vez se retira la capa protectora de la placa fotosensible se coloca el impreso sobre ella, la ventaja que poseemos que aunque se coloque el papel acetato de manera inversa no genera ningún problema debido a que las antenas son geométricamente perfectas esta consideración es meramente de circuitos creados de la misma manera, una vez asegurado el acetato en la placa se coloca en la cámara de rayos ultravioleta en un lapso no superior a los 4 minutos y no inferior a un minuto, lo recomendable suele ser 3 minutos pero se puede considerar más o menos tiempo dependiendo la intensidad de la lámpara ultravioleta.



Ilustración 35 Cámara de Insolado.

El paso siguiente es considerar medidas de seguridad que permiten la manipulación de los diferentes químicos que se necesitan para el revelado posterior a la insolación de nuestra placa en la cámara, se debe contar con guantes plásticos para evitar quemaduras o daños en la piel ya que se manejan químicos fuertes, el uso de mascarilla al momento del degradado puesto que se liberan vapores que son tóxicos y pueden dañar lo que es el sistema respiratorio.

Una vez aplicadas las medidas se considera un espacio especial para el revelado se considera tener de 3 recipientes que cuenten con las sustancias que permitan el revelado, la limpieza y el degradado, si no se posee liquido de revelado para fotos se puede crear de manera casera con agua común y soda caustica esta mezcla desprende calor y puede ser un poco peligrosa su manipulación, pero funciona como revelador, para la limpieza se recomienda el uso de agua corriente que servirá para el baño de nuestra placa cada momento que lo requiera y por ultimo lo que sería el degradado una mezcla entre agua destilada y ácido sulfúrico que permitiría lo que es quitar el cobre que no se necesitara en el impreso de nuestra antena fractal.

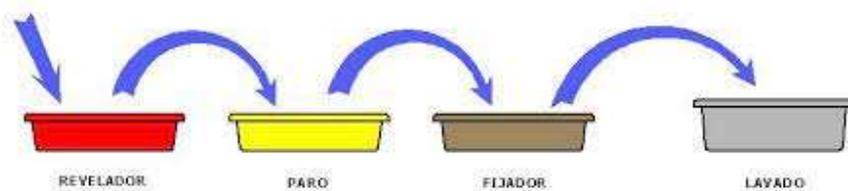


Ilustración 36 Proceso de revelado (Alfredo Ponce, s.f.)

Ahora bien posterior al insolado de nuestra placa (tiempo de 3 minutos cumplido), se procede a sumergir la placa fotosensible en el líquido de revelado el cual nos permitirá observar de poco en poco el diseño de la antena fractal sobre el cobre, es recomendable dar un tiempo en donde el diseño se observe a la perfección se puede retirar las veces necesarias del revelado limpiar en agua y si no cumple los requisitos de diseño se vuelve a sumergir en el líquido de revelado hasta obtener el resultado esperado.

Una vez el revelado es empleado se limpia bien la placa en agua y se prosigue con el paso del degradado, usando guantes y mascarilla para este proceso por seguridad de los vapores que liberara el cobre que se corroerá, en este proceso se puede sacar con un material plástico la placa las veces que sean necesarias para observar como el cobre desaparece el hecho de sacar la placa del ácido aumenta la corrosión debido a que el aire ayuda a oxidar en cierto punto el cobre y movimientos repetitivos dentro del ácido y así hasta que observemos que el exceso de cobre innecesario para nuestros fines ha desaparecido.

Con la ayuda de un taladro se hacen las perforaciones debidas para poder unir el conector por el cual permitirá la manipulación de nuestra antena utilizando a su vez un cautín y estaño para poder fijarlo a la placa de nuestra antena, así de esa manera se realizaría para todos los casos.



Ilustración 37 Antena Fractal Dipolo de Sierpinski



Ilustración 38 Antena Fractal Copo de Koch.

2.6. EQUIPOS A UTILIZAR.

La metodología en esta fase propuesta consistirá en explicar el equipo disponible para la evaluación de los parámetros de calidad principales como la ganancia, directividad, ancho de haz, etc. Los equipos que se usaran para analizar y obtener los resultados son los siguientes:

2.6.1. ANALIZADOR DE ESPECTROS.

Es un instrumento de medición utilizado con regularidad en laboratorios para realizar diversos análisis espectrales, los cuales un osciloscopio convencional no sería capaz de detectar. Para el caso de la metodología, se tiene que evaluar primeramente cuales son las prestaciones que posee un analizador de espectros sin opciones, y posteriormente después de dicha evaluación, considerar añadirle más prestaciones al equipo para que el rango de parámetros a medir sea mucho mayor.



Ilustración 39 Analizador de espectros (Rigol, s.f.)

Por ejemplo, si se toma de base un analizador de espectros comercial, en general se sabe que estos poseen ciertas características, como lo son:

- Frecuencia de trabajo bajo todos los modos, con una frecuencia que puede rondar de entre los 1 kHz hasta los 4.0 GHz.
- Capaz de obtener parámetros como lo son: la frecuencia, el ancho de banda, la amplitud, a través de un sweep (barrido), trigger, etc.
- Mediciones bajo los parámetros de modulación tales como: 2FSK, 4FSK, 8FSK, BPSK, QPSK, OQPSK, DQPSK, $\pi/4$ -DQPSK, 8PSK, D8PSK, $\pi/8$ -D8PSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM.

Ahora bien, al analizar dichas características, se puede considerar ampliar las prestaciones del analizador para poder obtener parámetros adicionales, entre las prestaciones que se pueden ampliar de manera general en los analizadores de espectro comerciales son:

- Aplicación de medición de análisis de señal vectorial, para poder evaluar los parámetros como lo puede ser mediciones relacionadas con I/Q, test de constelaciones, carta de Smith, etc.
- Software para PC analizador de espectro, para evaluar el comportamiento a través de un software utilizando una computadora.

2.6.2. MINI VNA.

Es un pequeño artefacto electrónico con una amplia gama de funciones parecidas al RIGOL presentado anteriormente con la peculiaridad que es de tamaño reducido y podemos mencionar que es un poco más barato en precio, cabe destacar que su uso es de gran ayuda en nuestra investigación por la accesible atención de datos, podemos mencionar:

- El VNA-PC cuenta con la función del generador de señal es integrada. El rango de medición es de 1MHz ~ 3000MHz, y la medición del parámetro S de S11 y S21 es compatible.
- Cuenta con el software de circuito abierto, cortocircuito, carga y calibración directa funciones.
- El software es amigable ya que admite la exportación de datos en múltiples formatos, incluidos JPEG, Excel, ZPlots, S1P, S2P y PDF y es de fácil uso en los distintos entornos Windows, Linux y Mac.



Ilustración 40 Mini VNA Tiny.

2.6.3. PRUEBAS DE LABORATORIO

Cuando hablamos de pruebas de laboratorio, estamos hablando de la acción de comprobar la transmisión bajo condiciones controladas mediante el uso de equipo acondicionado para ello.

Los parámetros de calidad a considerar en este apartado son los siguientes:

- Nivel de señal de percepción.
- Ancho de banda ocupada.
- Característica Amplitud-frecuencia.
- Señal de Entrada.
- Ganancia.
- Directividad.
- Impedancia de Entrada.
- Polarización.

CAPÍTULO III: IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO.

3.1. INTRODUCCION.

En este capítulo se describirán las pruebas experimentales realizadas con el equipo de laboratorio, en este caso el RIGOL RSA505-TG, a partir de este punto podremos analizar las principales diferencias entre el simulador y los datos reales obtenidos en laboratorio, es necesario realizar un estudio especial del fenómeno que queremos evaluar y exhibir fotografías de los diversos resultados obtenidos.

3.2. PRUEBAS DE VSWR EN EL RIGOL RSA5065 – TG



Ilustración 41 Analizador de Espectros (Rigol, s.f.)

En este apartado se presenta el procedimiento a seguir para realizar pruebas de VSWR de las antenas construidas.

Procedimiento:

- Seleccionamos el modo TG para poder habilitar la opción VSWR, una vez hemos habilitado la opción en el menú, la pestaña que antes nos aparecía como no accesible se habilitara y podremos entrar en el modo VSWR.

- Conectamos el VSWR bridge, el cual se muestra en la imagen, este nos ayudará a conocer datos como el VSWR y el Coeficiente de Reflexión.



Ilustración 42 VSWR Bridge Rigol.

- Se calibra el VSWR bridge en modo Open Circuit, en este caso el Rigol se encargará de la calibración
- Se usa la configuración siguiente: Conector Tipo N, Un acople y un Conector tipo F, como se muestra en la imagen.

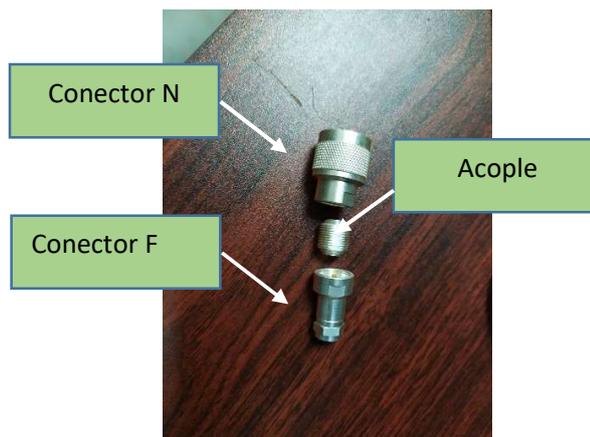


Ilustración 43 Conectores para Antenas.

- Ahora se procede a conectar la antena (en este caso una antena fractal Sierpinski Wifi, funcionando a 2. GHz), nuestras antenas usan un conector tipo F hembra.



Ilustración 44 Conector tipo F-Antena Fractal



Ilustración 45 Antena Fractal Dipolo de Sierpinski.

- Luego de conectar todo y haber calibrado el VSWR bridge estamos listos para realizar la medición.

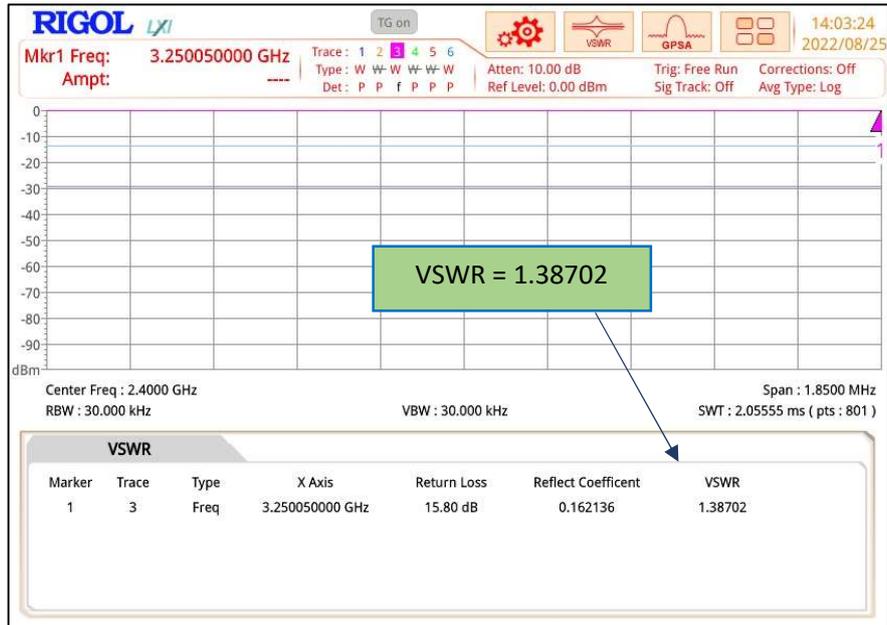


Ilustración 46 VSWR Antena fractal Dipolo de Sierpinski.

- Realizamos el mismo procedimiento para los diferentes tipos de antena:
 Antena Fractal Curva de Hilbert para Telefonía Movil.



Ilustración 47 Antena fractal Curva de Hilbert.

- Resultado de Medición.

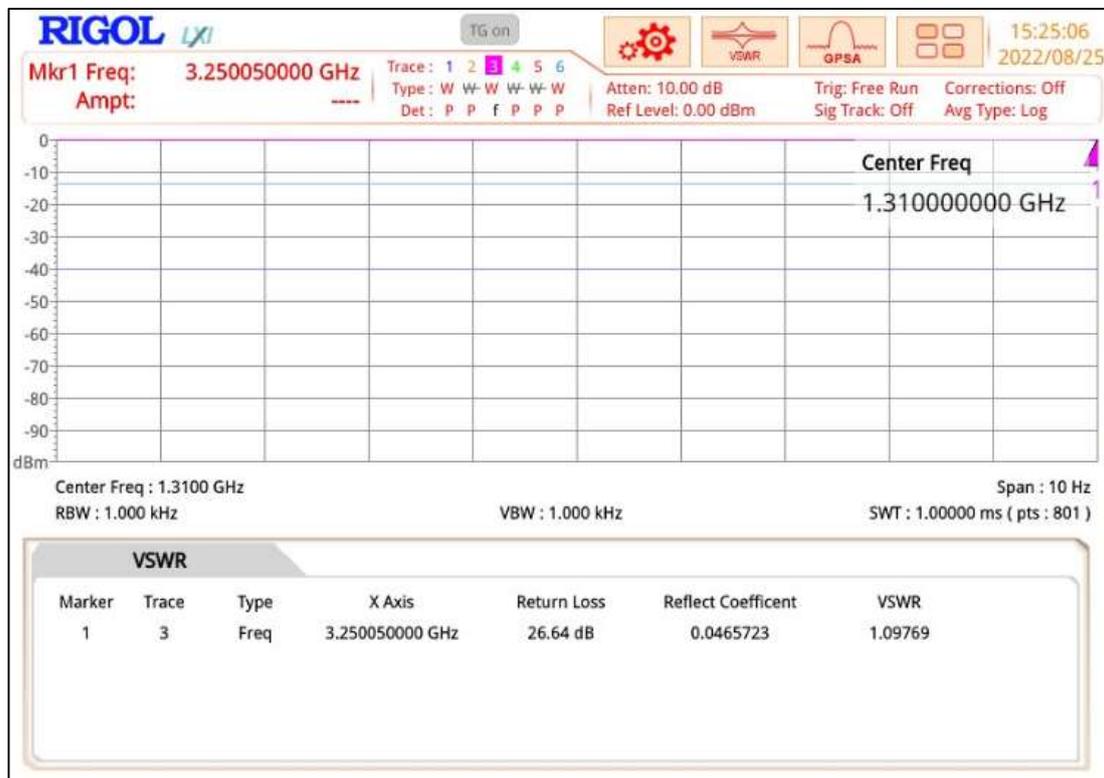


Ilustración 48 VSWR Antena Fractal Dipolo de Sierpinski.

Procedimiento para Calculo de Ganancia.

Obtención de Ganancia utilizando funciones especiales del RIGOL RSA5065-TG: Para este apartado utilizaremos el modo VSA del RIGOL el cual nos provee de un Vector Signal Analysis, es un análisis de señales vectoriales con el que evaluaremos la ganancia que posee cada antena.

El modo VSA es característica de paga que posee el Rigol, debemos conectar nuestra antena en el puerto receptor (se encuentra al lado derecho del Rigol) e ingresamos al modo VSA.

Aquí podemos observar cómo nuestra antena triángulo de Sierpinski wifi de 2.4 GHz presenta una ganancia de 6.48 dBi.

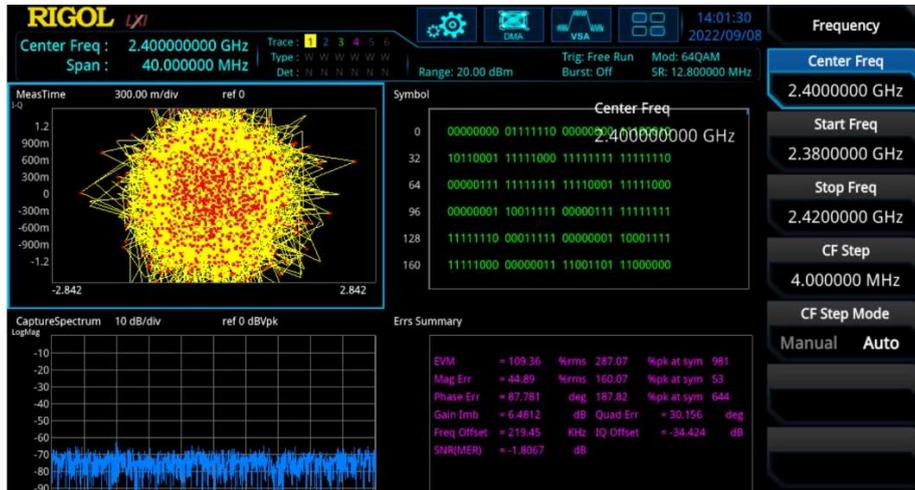


Ilustración 49 Ganancia de Antena Fractal Dipolo de Sierpinski.

Antena Fractal para Wimax funcionando a 4GHz.

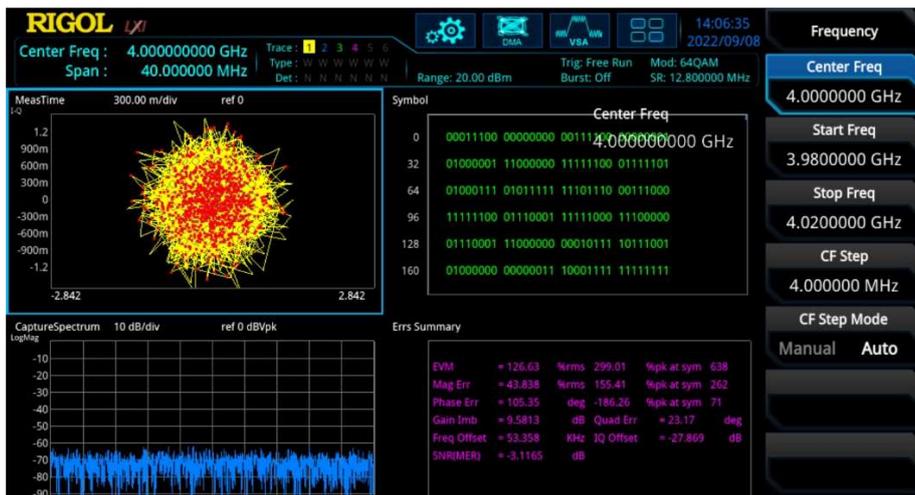


Ilustración 50 Ganancia Antena Fractal Curva de Hilbert.

3.3. COMPARACIÓN DE SIMULACIÓN CON PRUEBAS DE LABORATORIO.

VSWR.

Datos de Laboratorio de Antena WIFI de referencia.

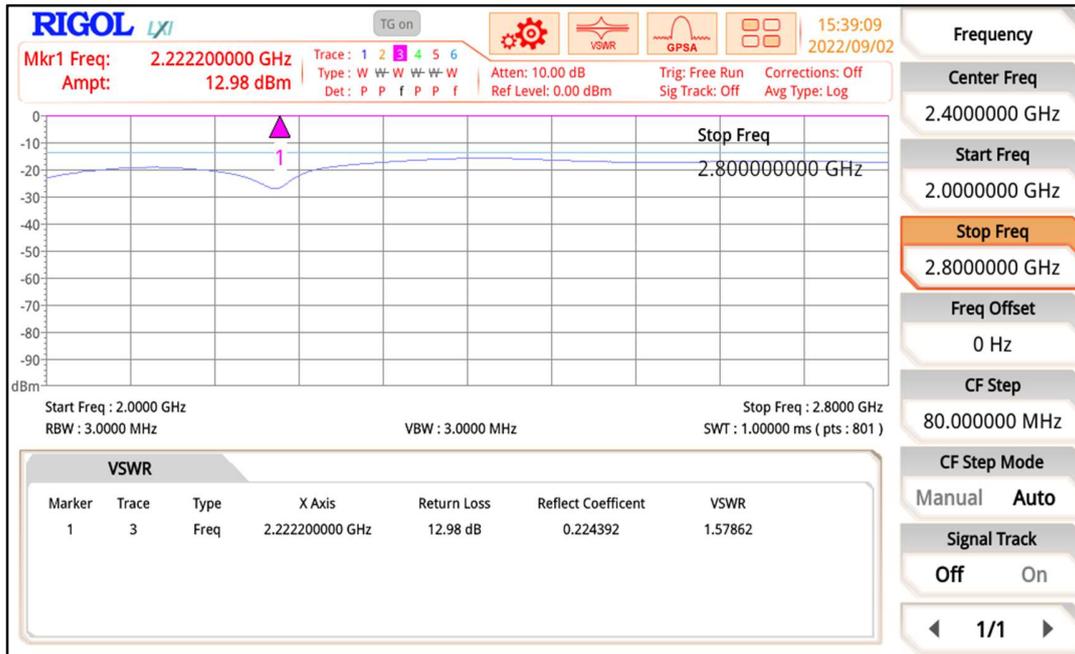


Ilustración 51 VSWR Antena Wi-Fi Modelo.

Datos de Simulación de Antena WIFI DIPOLO

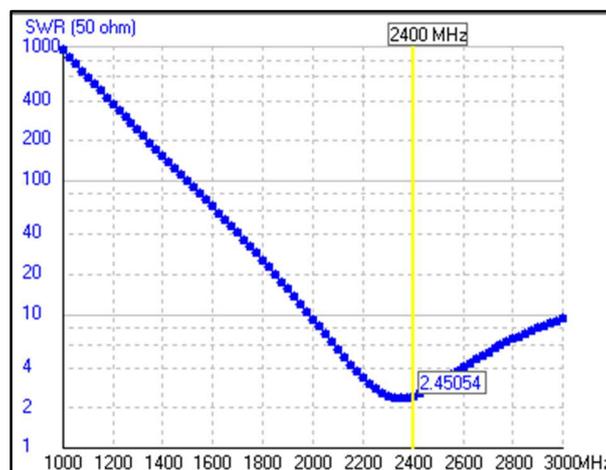


Ilustración 52 VSWR Simulado Antena Wi-Fi Modelo.

- Se observa que nuestra simulación presenta una VSWR de 2.45 y la antenna de referencia presenta una VSWR de 1.57 una variación del 156.05% con respecto a la antenna WIFI referencia.

Datos de Laboratorio de Antena de referencia a 850 MHz

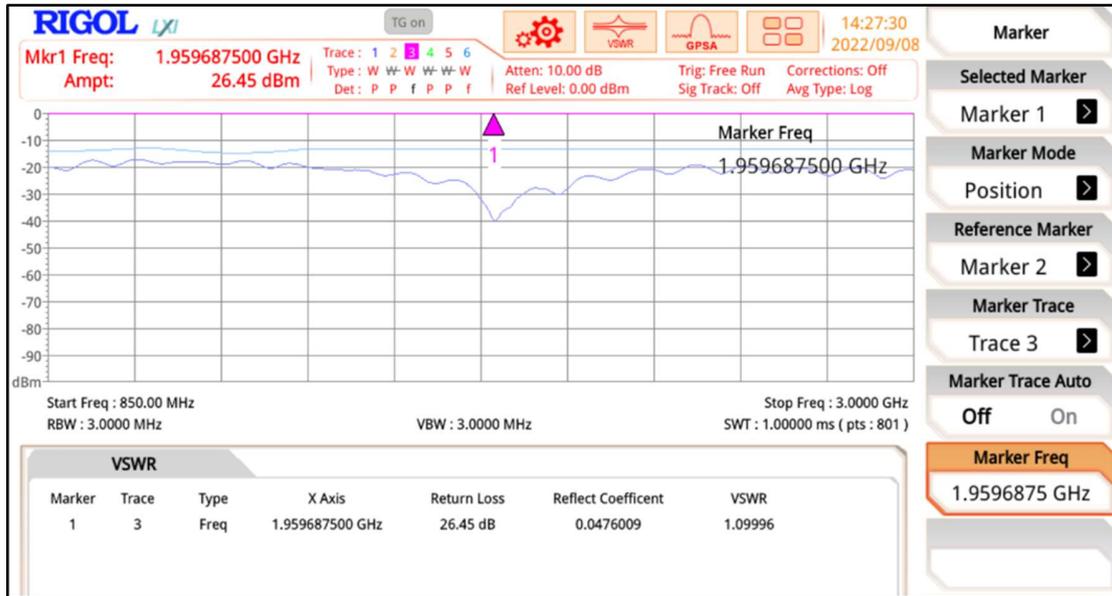


Ilustración 53. Obtención de VSWR a una frecuencia de 850 MHz

Datos de Simulación de Antena DIPOLO a 850 MHz

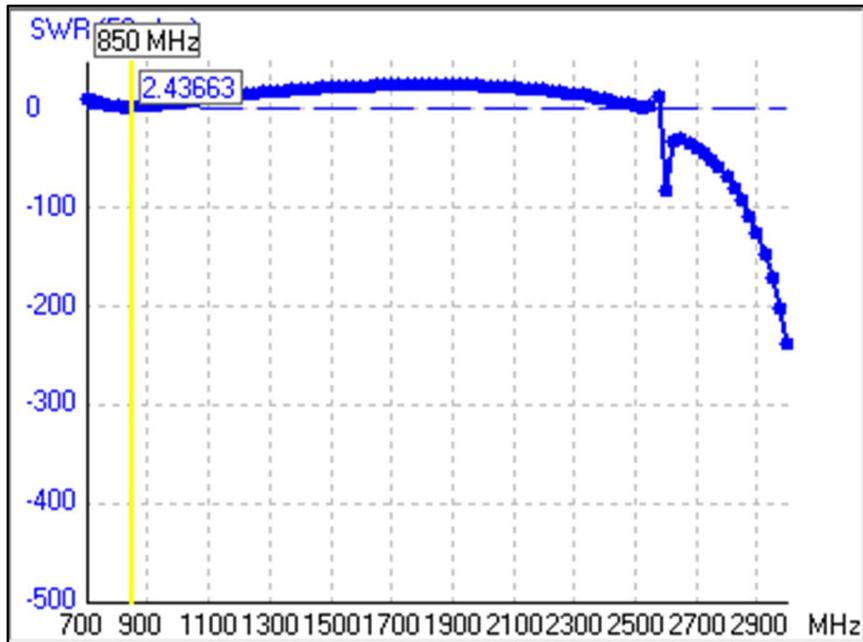


Ilustración 54. Obtención de SWR mediante simulación.

Antena de Referencia a 850 MHz con vswr de 1.09 y una antena dipolo simulada de 850 MHz con una vswr de 2.44, una variación del 224% con respecto a la antena de referencia.

Datos de Laboratorio de Antena de referencia a 650 MHz

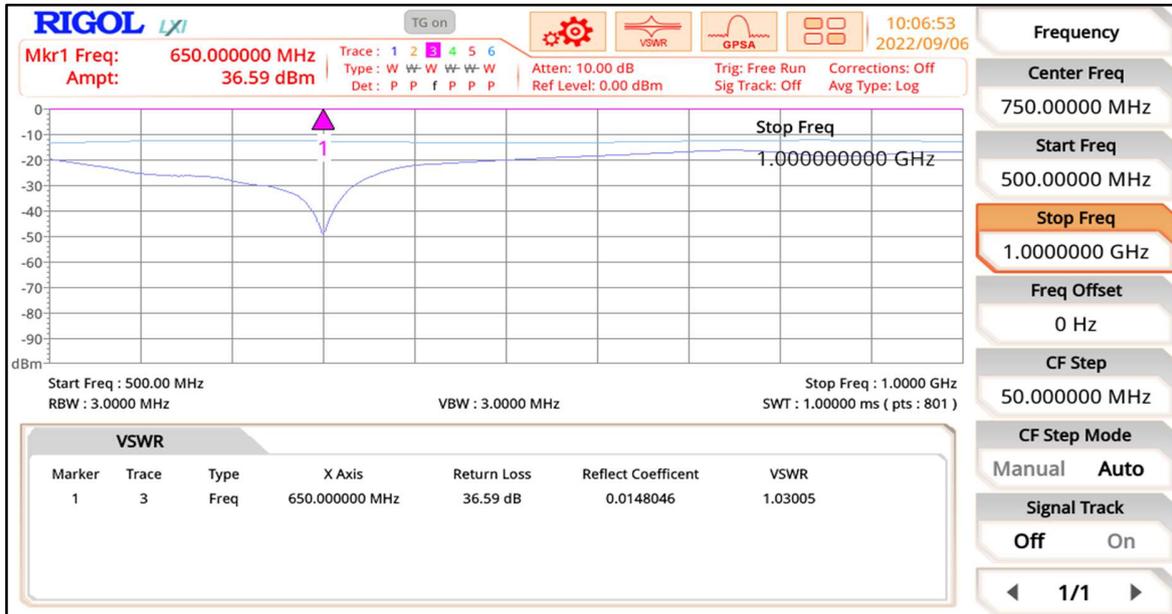


Ilustración 55 Obtención de SWR a frecuencia de 650 MHz

Datos de Simulación de Antena DIPOLO a 650 MHz

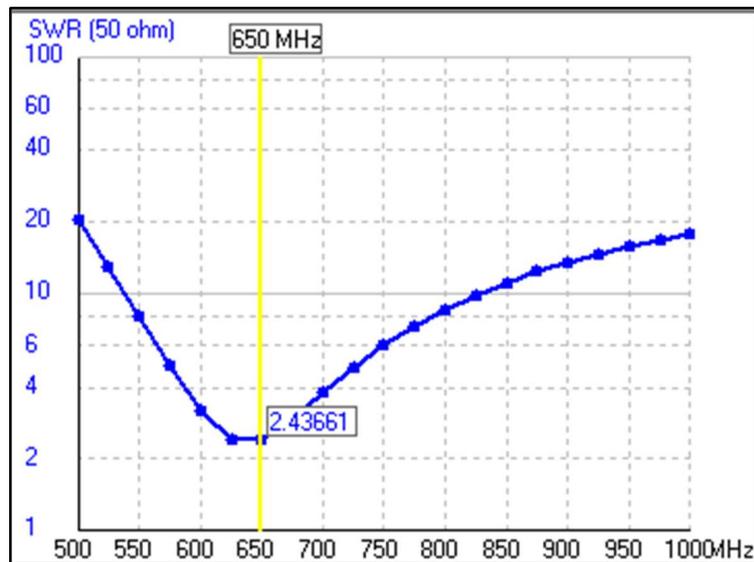


Ilustración 56 Obtención de SWR mediante simulación a 650 MHz

Antena de Referencia a 650 MHz con vswr de 1.03 y una antena dipolo simulada de 650 MHz con una vswr de 2.44, una variación del 236.89% con respecto a la antena de referencia.

GANANCIA.

Ganancia antena modelo a 850 MHz = 3.53

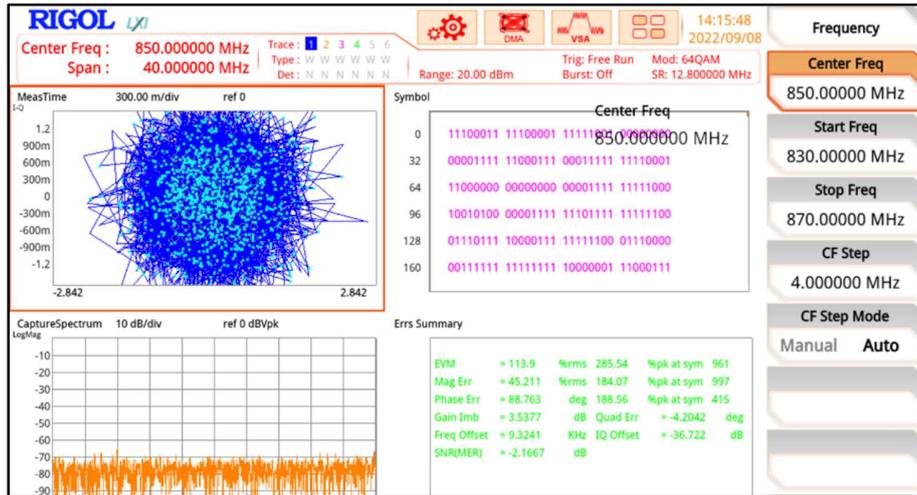


Ilustración 57 Obtención de ganancia a frecuencia de 850 MHz.

Ganancia antena dipolo simulada a 850 MHz = -0.15

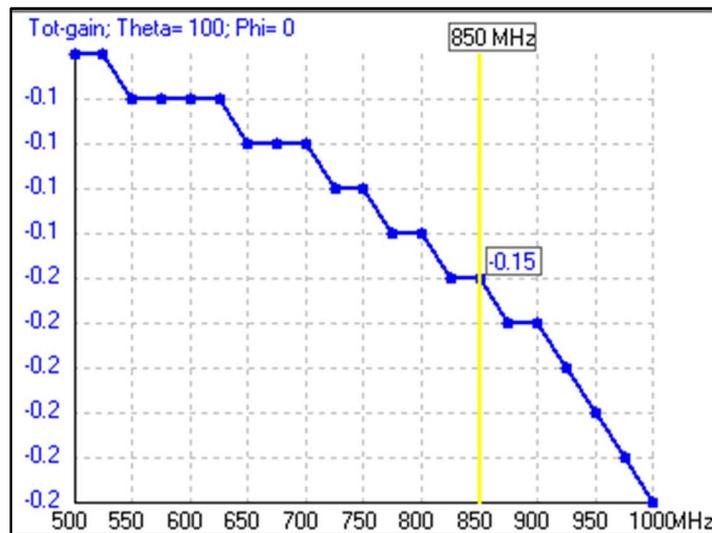


Ilustración 58 Obtención de ganancia a frecuencia de 850 MHz.

Ganancia de antena modelo = 3.53

Ganancia de antena simulada = -0.15

Ganancia de Copo de Koch GSM Real (850 MHz)

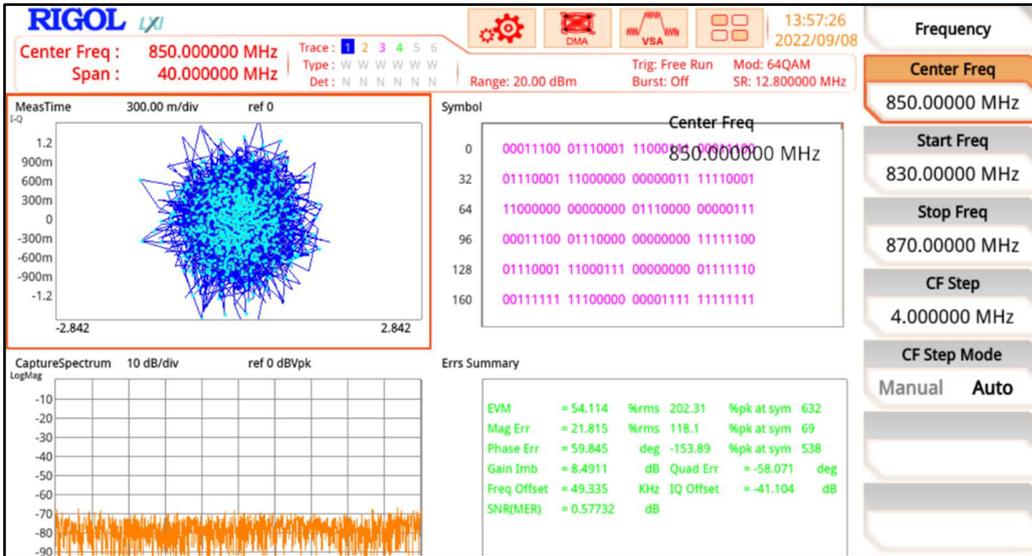


Ilustración 59 Obtención de ganancia de copo de koch a frecuencia de 850 MHz.

Ganancia de Copo de Koch Simulado (850 MHz)

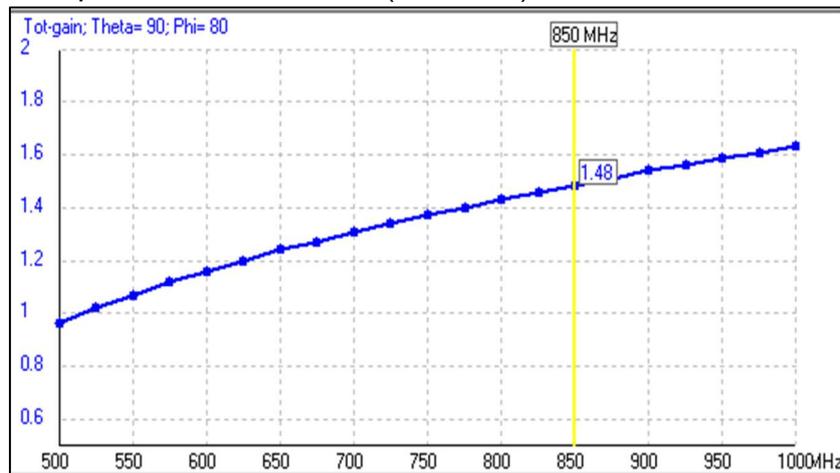


Ilustración 60 Obtención de ganancia de copo de koch a frecuencia de 850 MHz

Ganancia de antena modelo = 8.49
 Ganancia de antena simulada = 1.48

Ganancia de Curva de Hilbert GSM Real (850 MHz)

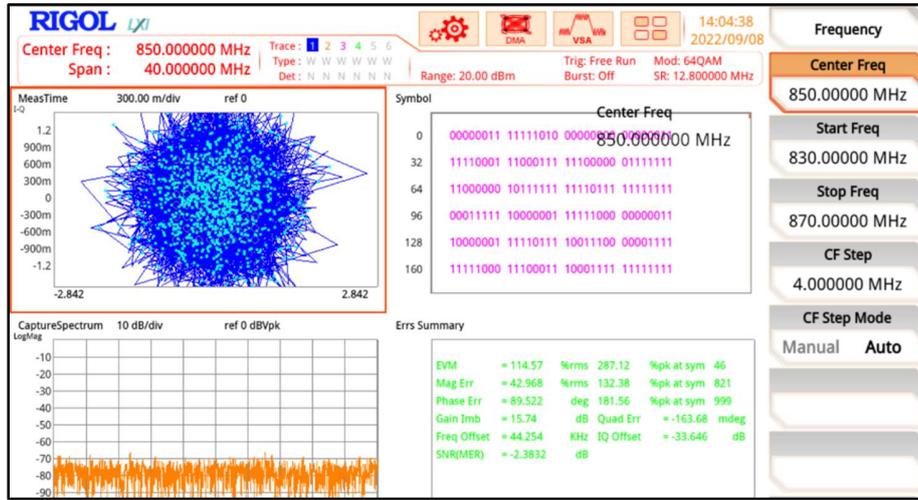


Ilustración 61 Obtención de ganancia de curva de Hilbert a frecuencia de 850 MHz

Ganancia de Curva de Hilbert GSM Simulada (850 MHz)

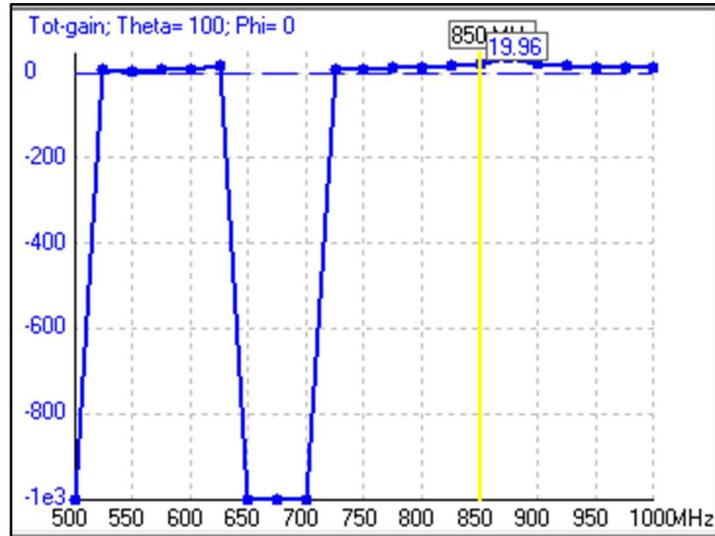


Ilustración 62 Obtención de ganancia de curva de Hilbert a frecuencia de 850 MHz (Simulada).

Ganancia de antena modelo = 15.4

Ganancia de antena simulada = 19.96

Ganancia de Triangulo de Sierpinski Real (850 MHz)

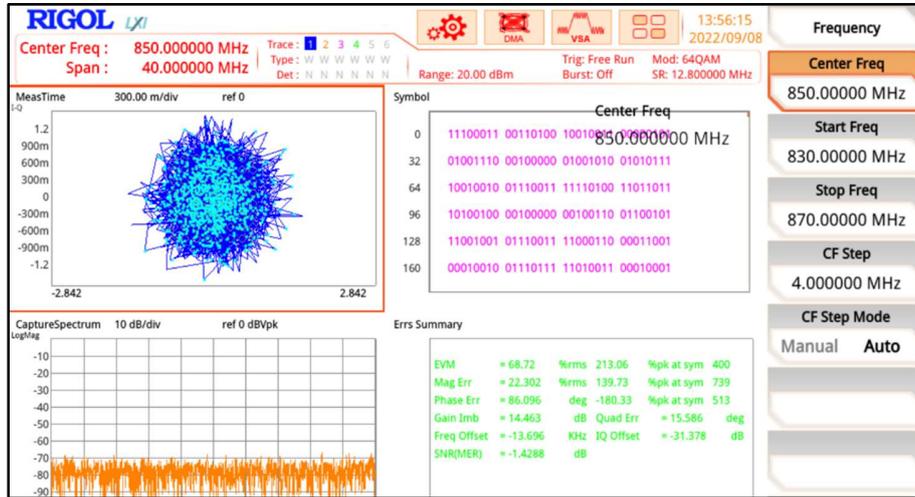


Ilustración 63 . Obtención de ganancia de triangulo de Sierpinski a frecuencia de 850 MHz.

Ganancia de Triangulo de Sierpinski Simulada (850 MHz)

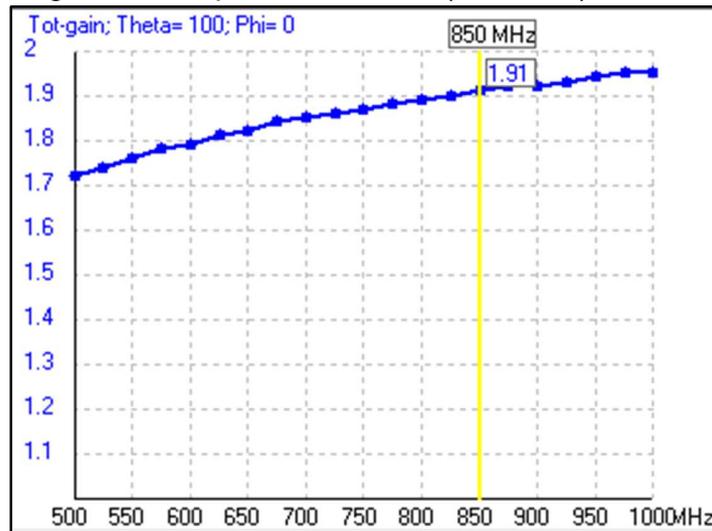


Ilustración 64 Obtención de ganancia de triangulo de Sierpinski a frecuencia de 850 MHz (Simulada).

Ganancia de antena modelo = 14.46

Ganancia de antena simulada = 1.91

Ganancia de Isla de Minkowski Real (850 MHz)

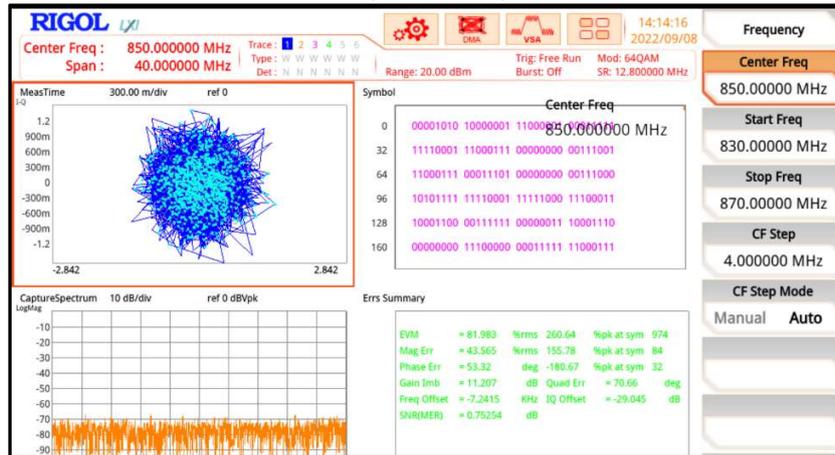


Ilustración 65 Obtención de ganancia de Isla de Minkowski a frecuencia de 850 MHz.

Ganancia de Isla de Minkowski Simulada (850 MHz)

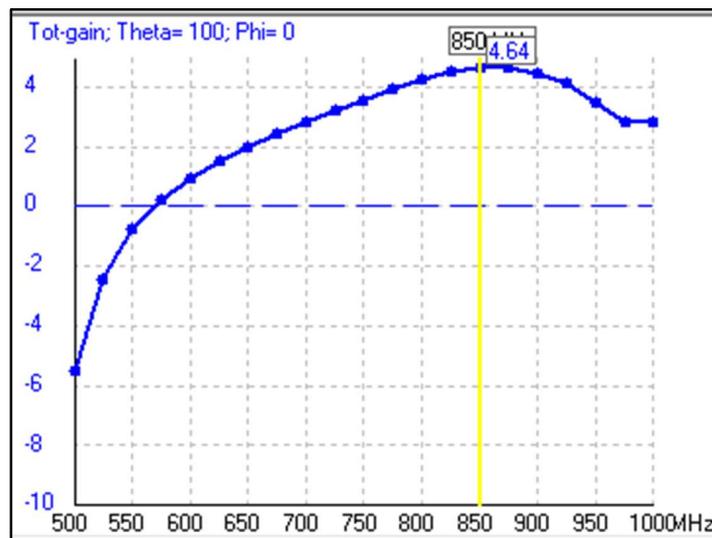


Ilustración 66 Obtención de ganancia de Isla de Minkowski a frecuencia de 850 MHz (simulada).

Ganancia Isla de Minkowski Real = 11.207

Ganancia Isla de Minkowski Simulada = 4.64

Ganancia de Antena Modelo (1025 MHz) de 7.95

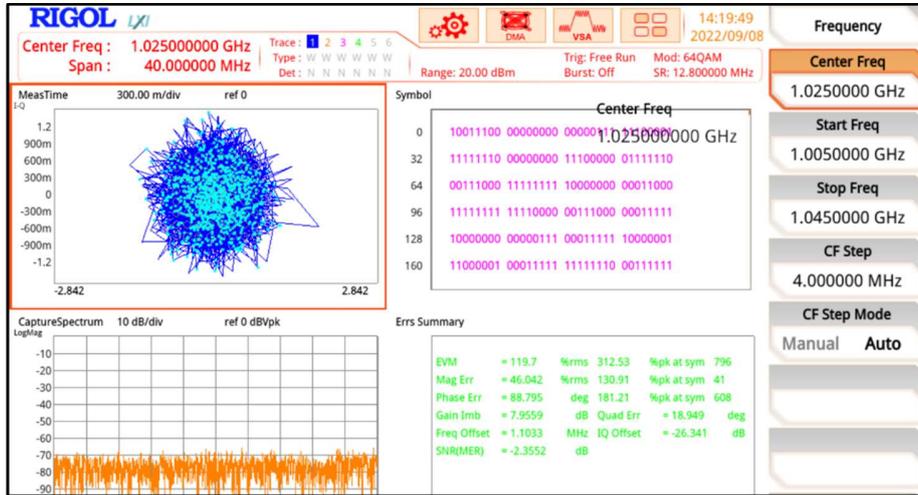


Ilustración 67 Obtención de ganancia a frecuencia de 1025 MHz

Ganancia de Antena Dipolo Simulada (1025 MHz) de -0.15

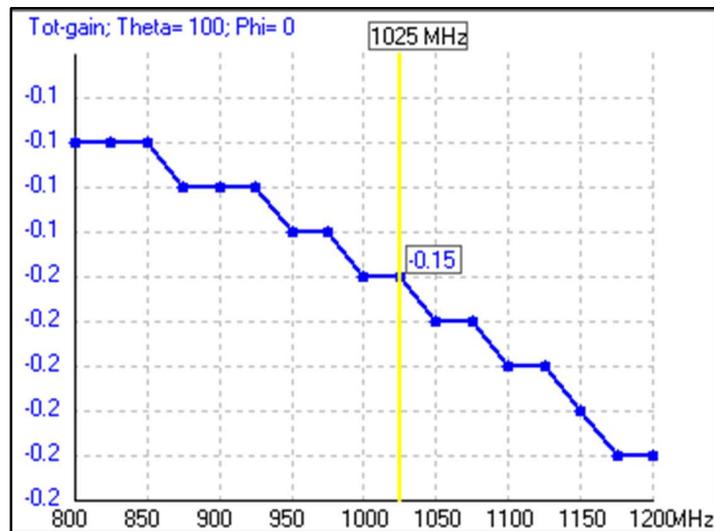


Ilustración 68 Obtención de ganancia a frecuencia de 1025 MHz (simulada).

Ganancia de Antena Modelo (1025 MHz) = 7.95

Ganancia de Antena Dipolo Simulada (1025 MHz) de -0.15

Ganacia de Copo de Koch Real (1025 MHz)= 10.3

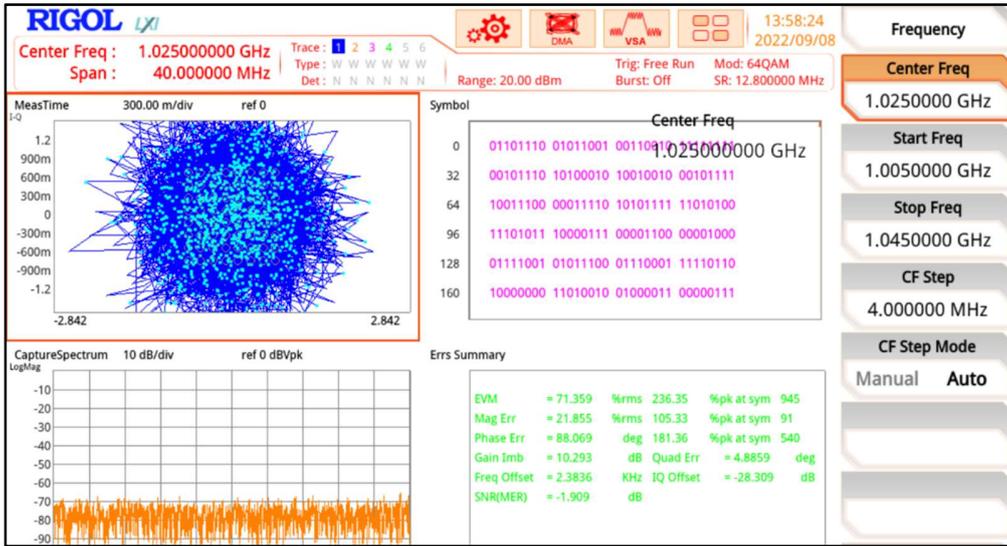


Ilustración 69 Obtención de ganancia de copo de koch a frecuencia de 1025 MHz

Ganacia de Copo de Koch (1025 MHz)= -16.36

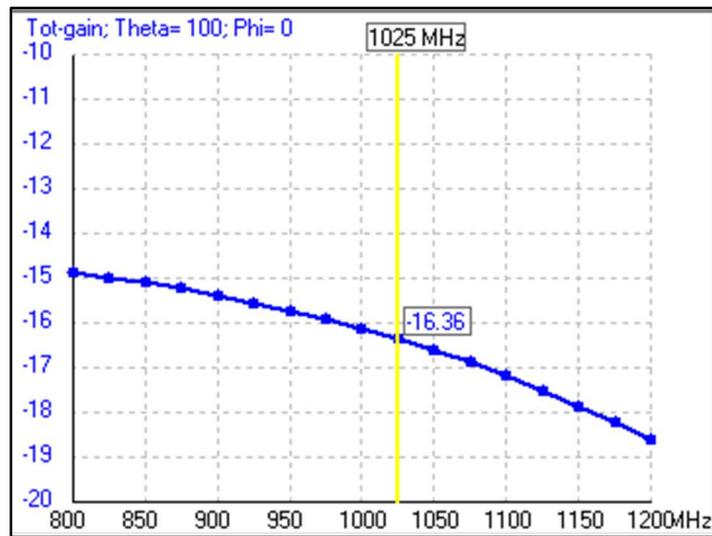


Ilustración 70 Obtención de ganancia de copo de koch a frecuencia de 1025 MHz (simulada).

Ganacia de Copo de Koch Real (1025 MHz)= 10.3

Ganacia de Copo de Koch (1025 MHz)= -16.36

Ganancia de Curva de Hilbert a 1025 GHz = 15.177

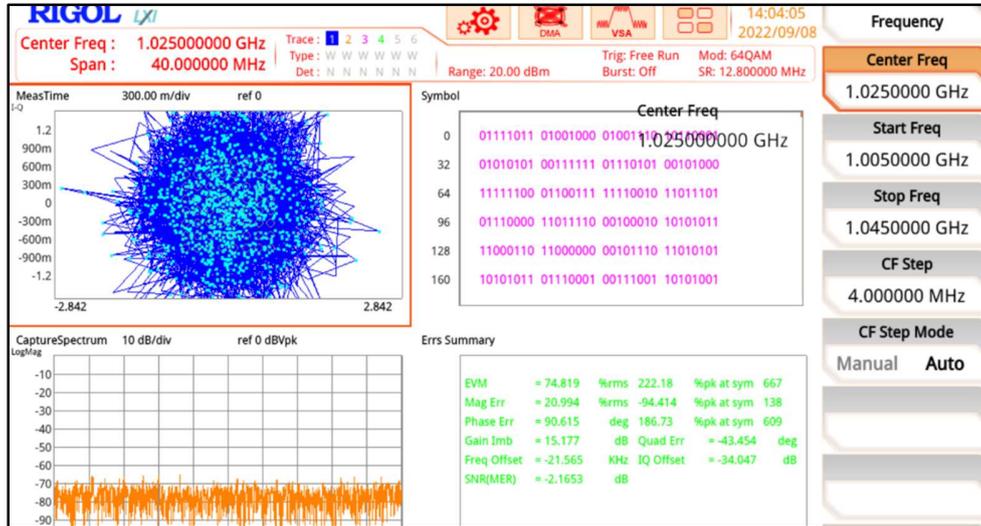


Ilustración 71 Obtención de ganancia de Curva de Hilbert a frecuencia de 1025 MHz.

Ganancia de Curva de Hilbert a 1025 GHz (Simulada) = 12.63

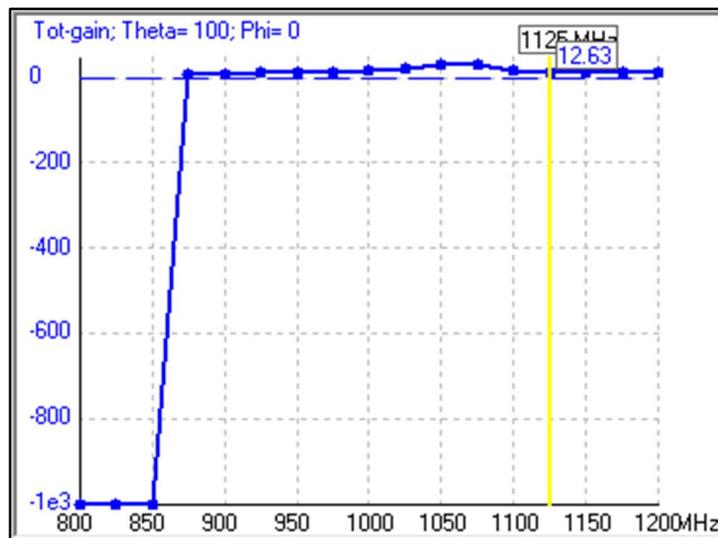


Ilustración 72 Obtención de ganancia de Curva de Hilbert a frecuencia de 1025 MHz (simulada).

Ganancia de Curva de Hilbert a 1025 GHz = 15.177

Ganancia de Curva de Hilbert a 1025 GHz (Simulada) = 12.63

Ganancia Antena Dipolo de Triangulo de Sierpinski (1025 MHz) = 4.66

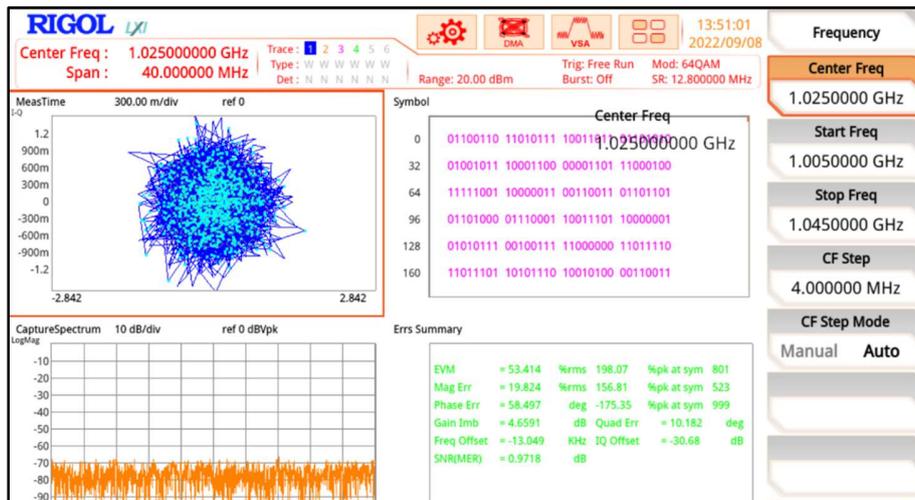


Ilustración 73 Obtención de ganancia de Triangulo de Sierpinski a frecuencia de 1025 MHz.

Ganancia Antena Dipolo de Triangulo de Sierpinski Simulada (1025 MHz) = 1.21

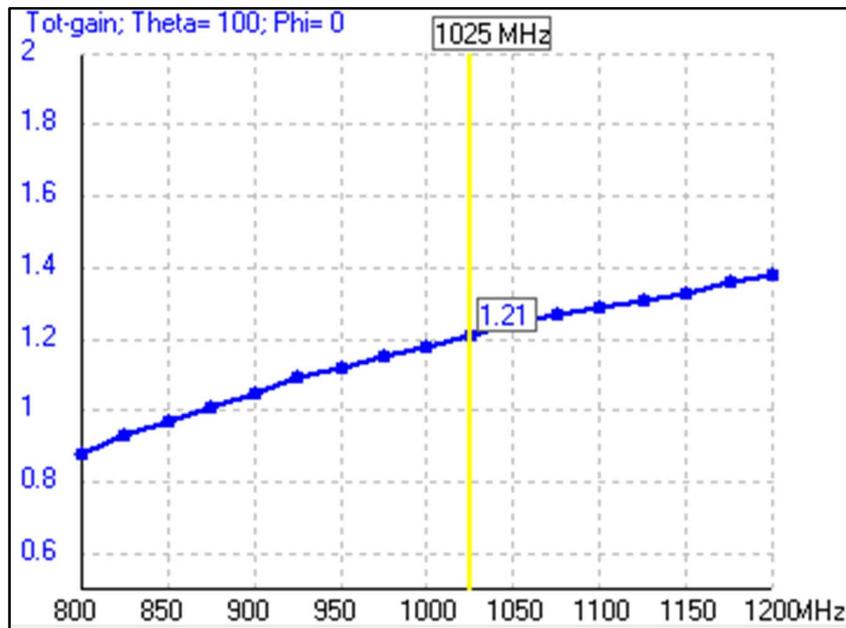


Ilustración 74 Obtención de ganancia de Triangulo de Sierpinski a frecuencia de 1025 MHz (simulada).

Ganancia Antena Dipolo de Triangulo de Sierpinski (1025 MHz) = 4.66

Ganancia Antena Dipolo de Triangulo de Sierpinski Simulada (1025 MHz) = 1.21

Ganancia Antena Koch Real (2400 MHz) = 16.14

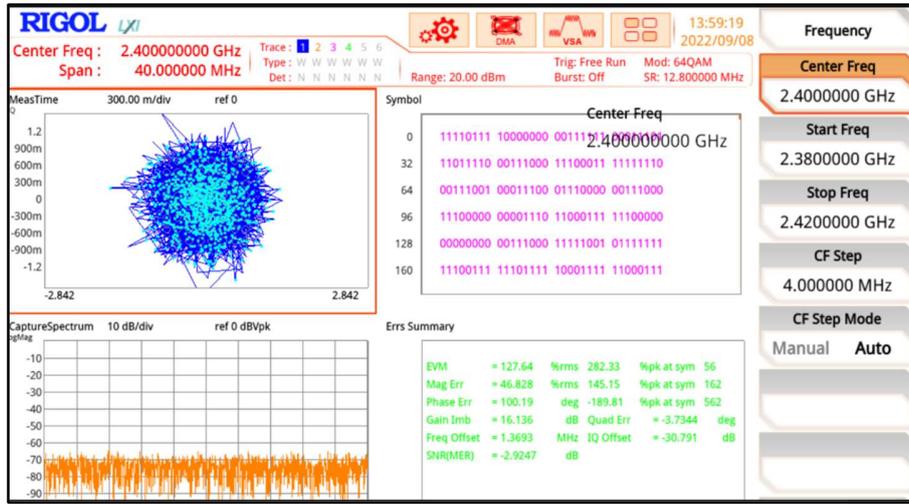


Ilustración 75 Obtención de ganancia de copo de koch a frecuencia de 2400 MHz.

Ganancia Antena Copo de Koch Simulada (2400 MHz) = 1.61

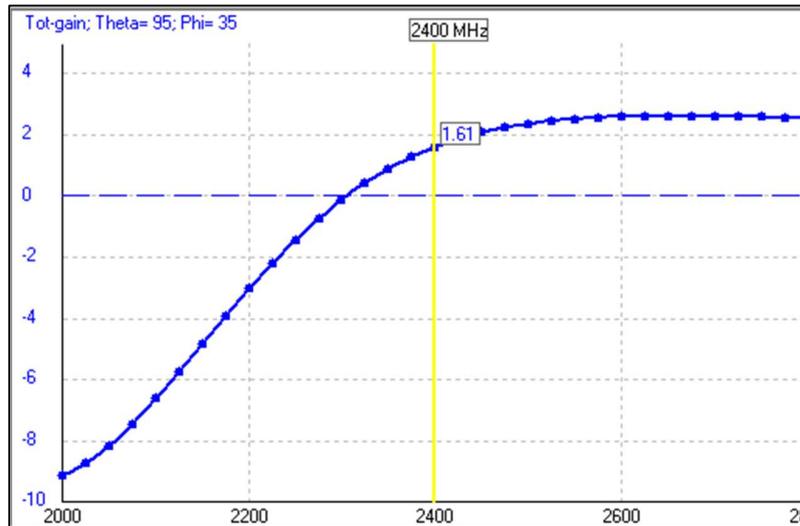


Ilustración 76 Obtención de ganancia de copo de koch a frecuencia de 2400 MHz (simulada).

Ganancia Antena Copo de Koch (2400 MHz) = 4.66

Ganancia Antena Copo de Koch Real (2400 MHz) = 1.61

Ganancia Antena Curva de Hilbert (2400 MHz) = 16.948

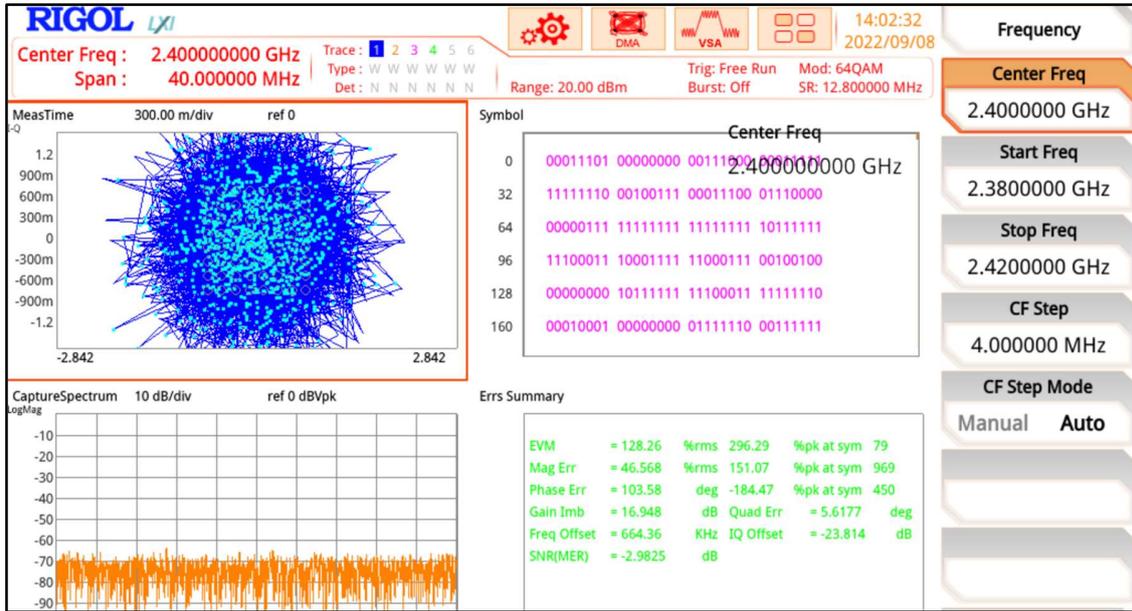


Ilustración 77 Obtención de ganancia de copo de curva de Hilbert a frecuencia de 2400 MHz.

Ganancia Antena Curva de Hilbert (2400 MHz) = 20.26

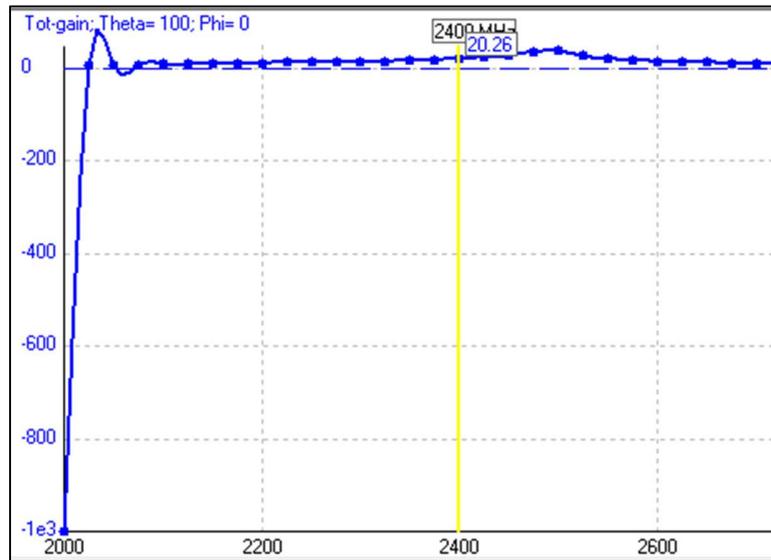


Ilustración 78 Obtención de ganancia de copo de koch a frecuencia de 2400 MHz (simulada).

Ganancia Antena Curva de Hilbert (2400 MHz) = 16.948

Ganancia Antena Curva de Hilbert (2400 MHz) = 16.948

Ganancia Antena Dipolo de Sierpinski (2400 MHz) = 15.29

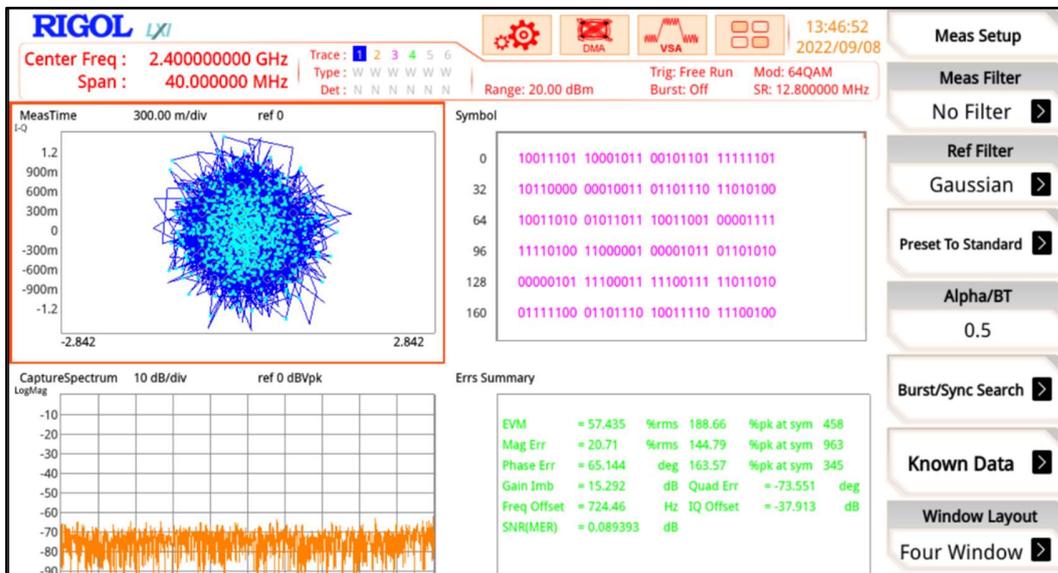


Ilustración 79 Obtención de ganancia de dipolo Sierpinski a frecuencia de 2400 MHz.

Ganancia Antena Dipolo de Sierpinski Simulada (2400 MHz) = 2.1

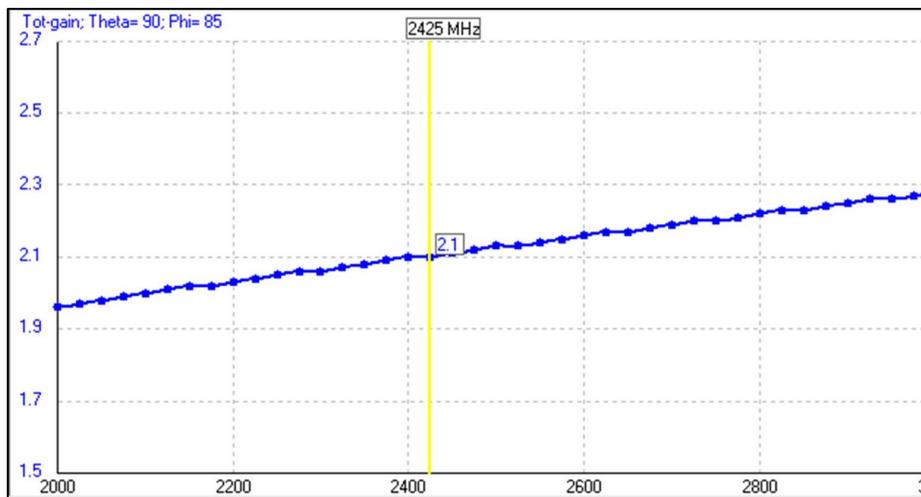


Ilustración 80 Obtención de ganancia de dipolo Sierpinski a frecuencia de 2400 MHz (simulada).

Ganancia Antena Dipolo de Sierpinski (2400 MHz) = 15.29

Ganancia Antena Dipolo de Sierpinski Simulada (2400 MHz) = 2.1

Ganancia Antena Isla de Minkowski (2400 MHz) = 12.375

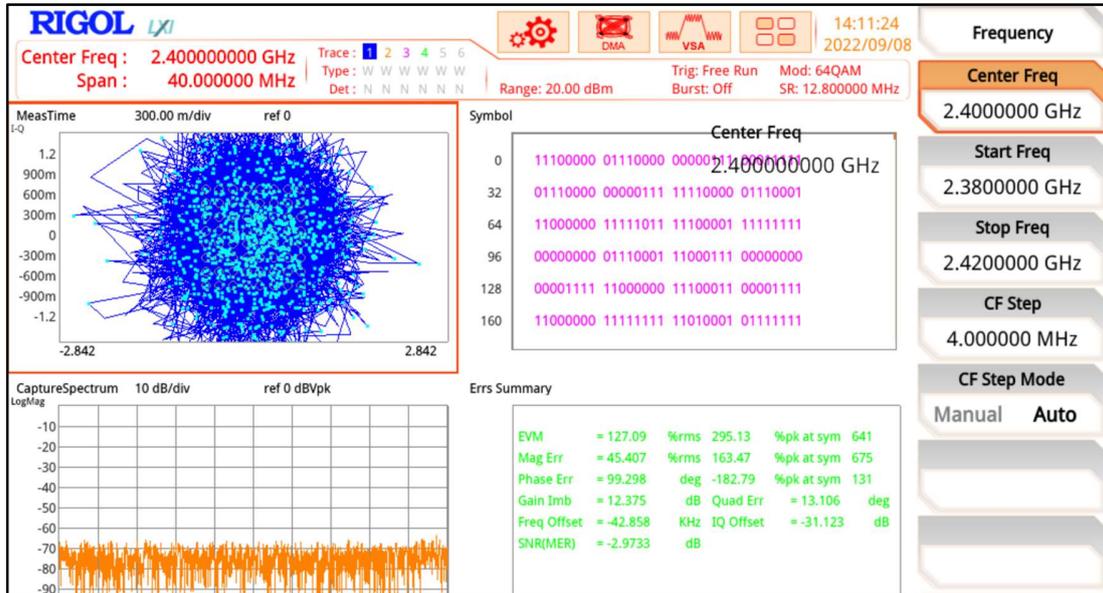


Ilustración 81 Obtención de ganancia de isla de Minkowski a frecuencia de 2400 MHz

Ganancia Antena Isla de Minkowski Emulada (2400 MHz) = 12.375

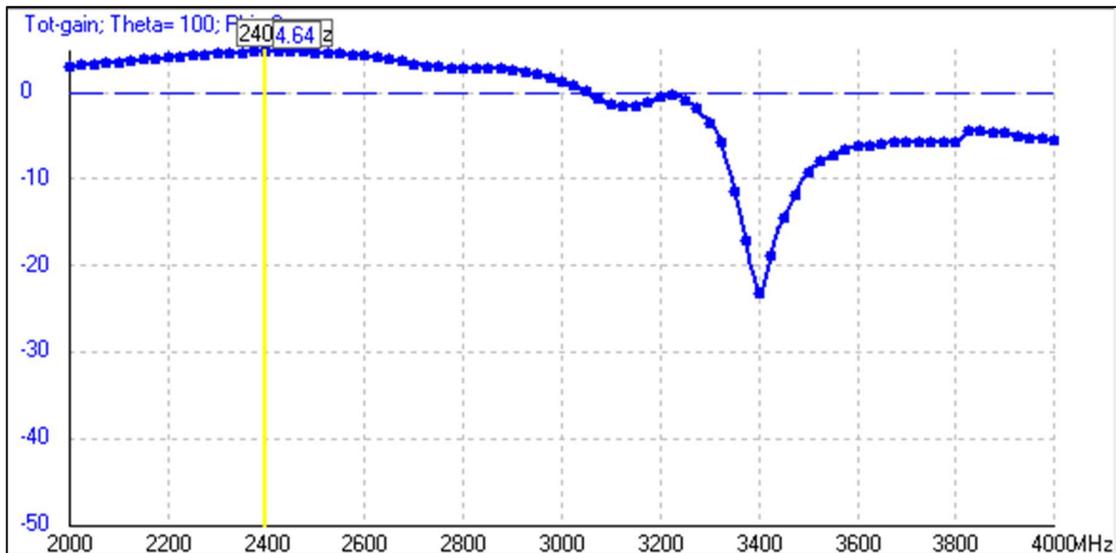


Ilustración 82 Obtención de ganancia de isla de Minkowski a frecuencia de 2400 MHz (simulada)..

Ganancia Antena Isla de Minkowski (2400 MHz) = 12.375

Ganancia Antena Isla de Minkowski Emulada (2400 MHz) = 12.375

Ganancia Antena WIFI de referencia (2400 MHz) = 30.449

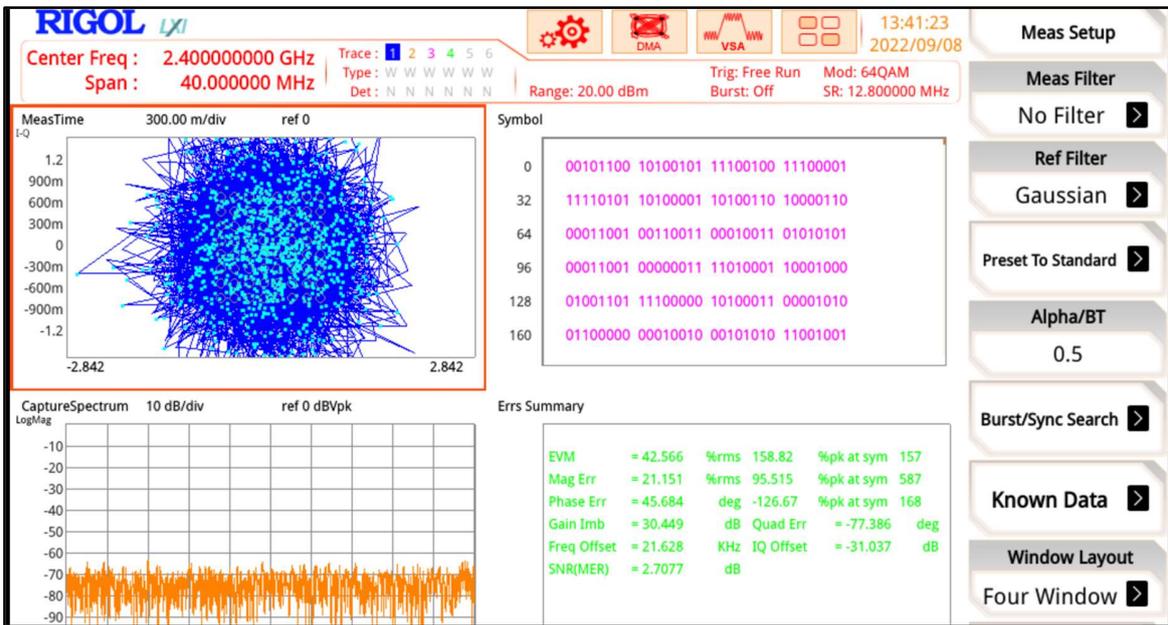


Ilustración 83 Obtención de ganancia a frecuencia de 2400 MHz.

Ganancia Antena WIFI DIPOLO Emulada (2400 MHz) = 0.04

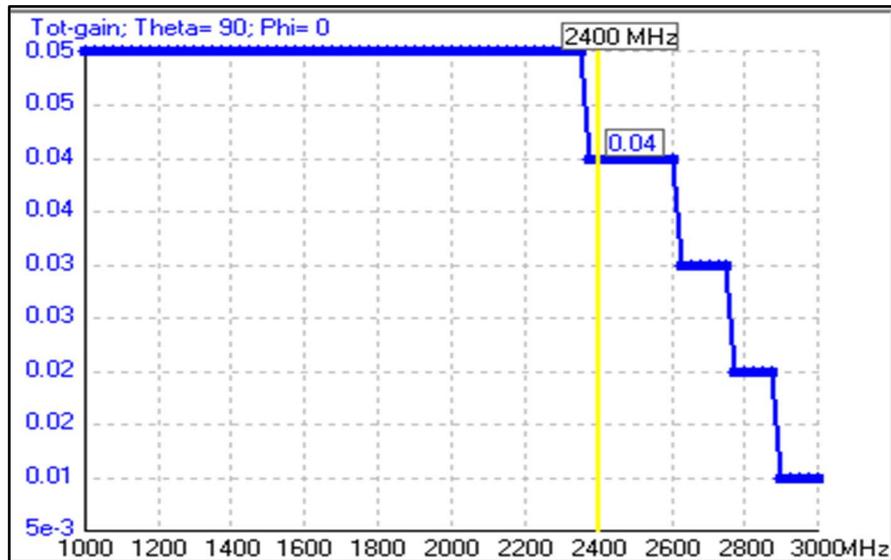


Ilustración 84 Obtención de ganancia a frecuencia de 2400 MHz (simulada).

Ganancia Antena WIFI de referencia (2400 MHz) = 30.449

Ganancia Antena WIFI DIPOLO Emulada (2400 MHz) = 0.04

Ganancia de Curva de Hilbert Wimax Real (4 GHz)

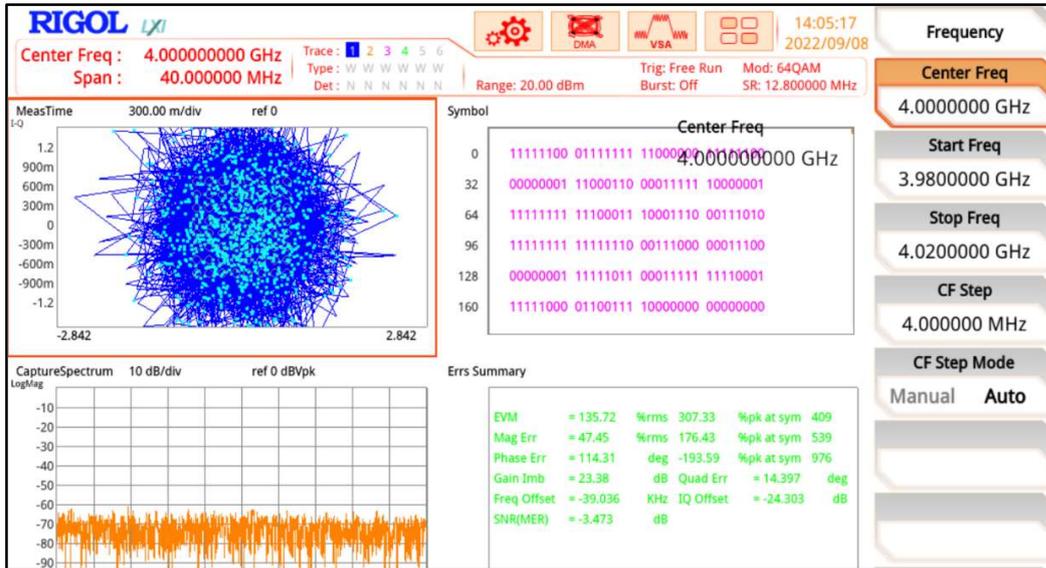


Ilustración 85 Obtención de ganancia de Curva de Hilbert a frecuencia de 4000 MHz.

Ganancia de Curva de Hilbert Wimax Simulada (4 GHz)

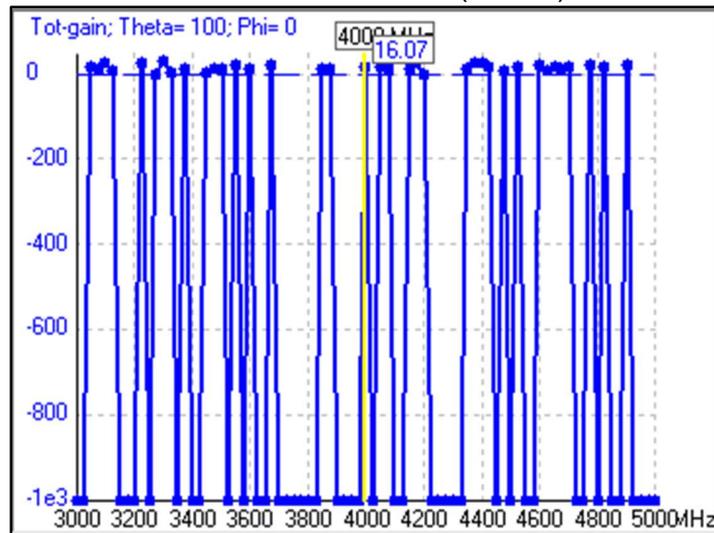


Ilustración 86 Obtención de ganancia de Curva de Hilbert a frecuencia de 4000 MHz (simulada).

Ganancia de antena modelo = 23.38
 Ganancia de antena simulada = 16.07

Ganancia Triangulo de Sierpinski (4000 MHz) = 12.48

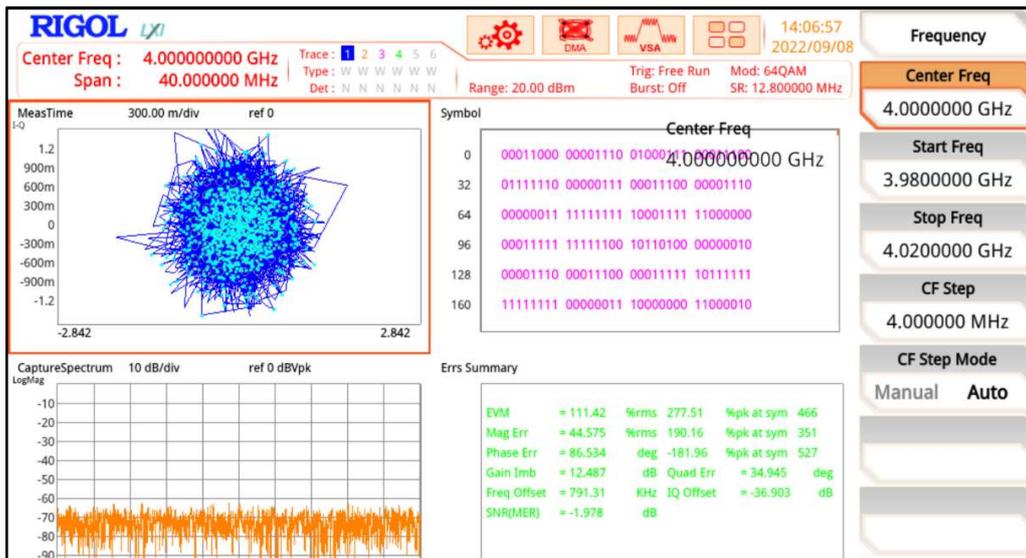


Ilustración 87 Obtención de ganancia de Triangulo de Sierpinski a frecuencia de 4000 MHz

Ganancia Triangulo de Sierpinski (4000 MHz) = 2.02

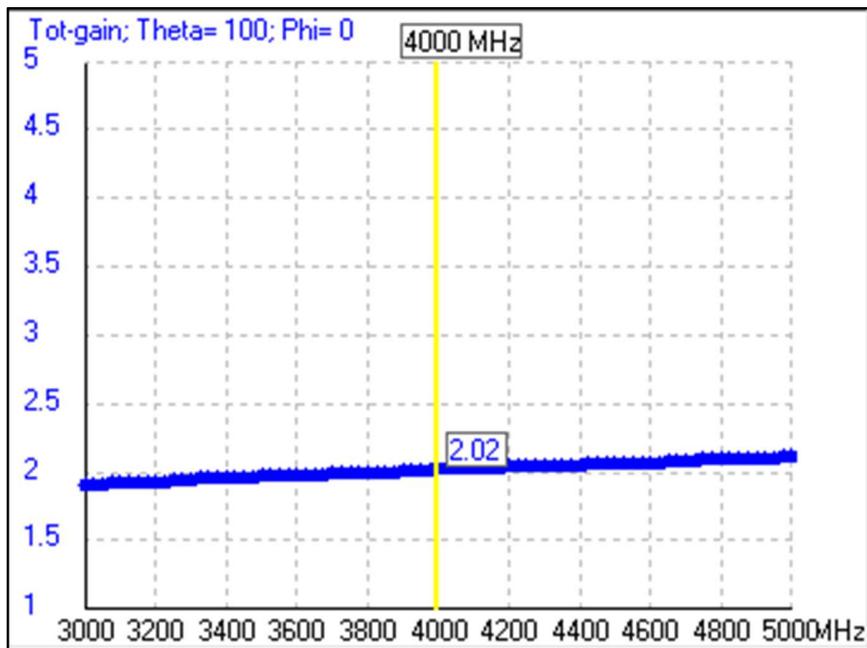


Ilustración 88 Obtención de ganancia de Triangulo de Sierpinski a frecuencia de 4000 MHz Simulada

Ganancia Triangulo de Sierpinski Real (4000 MHz) = 12.48

Ganancia Triangulo de Sierpinski Emulada (4000 MHz) = 2.02

Ganancia Isla de Minkowski (4000 MHz) = 37.36

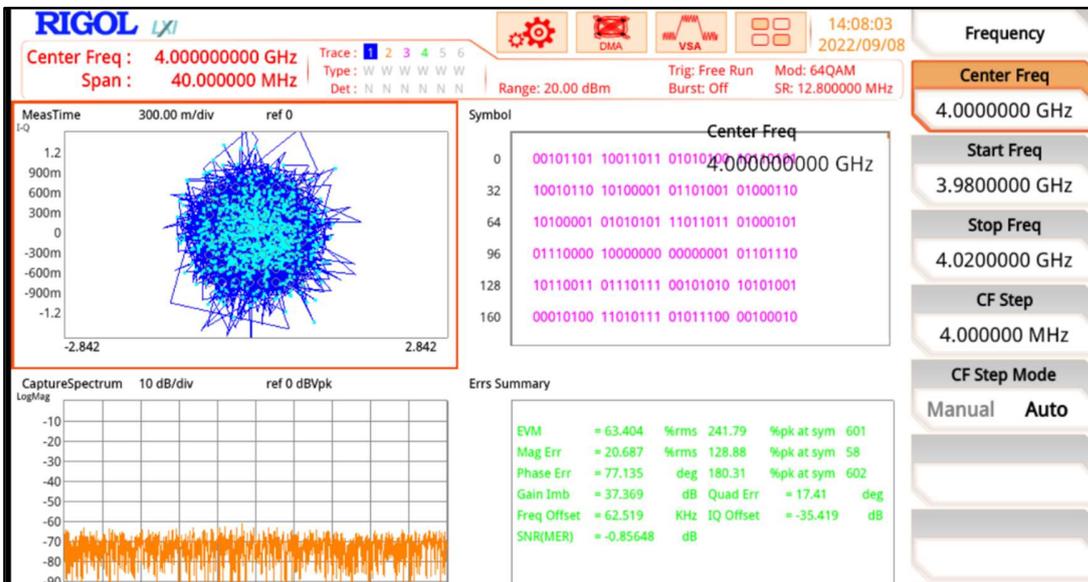


Ilustración 89 Obtención de ganancia de Isla de Minkowski a frecuencia de 4000 MHz.

Ganancia Isla de Minkowski Simulada (4000 MHz) = 4.64

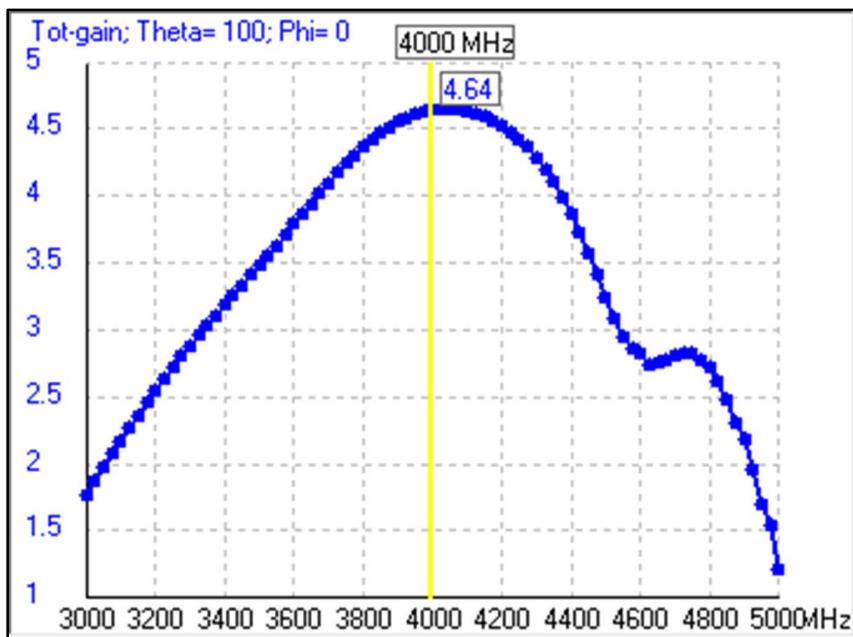


Ilustración 90 . Obtención de ganancia de Isla de Minkowski a frecuencia de 4000 MHz (simulada).

Ganancia Isla de Minkowski (4000 MHz) = 37.36

Ganancia Isla de Minkowski Simulada (4000 MHz) = 4.64

3.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Se observan en los resultados que incluso si se someten las antenas bajo las mismas condiciones de entorno, frecuencias y condiciones eléctricas el resultado puede cambiar radicalmente, además de eso encontramos divergencias bastante importantes en lo que consta a simulaciones y pruebas reales, esto puede deberse a las condiciones ambientales a las que se sometieron las antenas agregando un porcentaje de imprecisión bastante considerable a la hora de comparar entre laboratorio y simulación.

Antenas Recomendadas para WIFI:

- Copo de Koch
- Triangulo de Sierpinski
- Curva de Hilbert
- Isla de Minkowski

Antena Recomendada para GSM (850 MHz):

- Copo de Koch
- Triangulo de Sierpinski
- Curva de Hilbert
- Isla de Minkowski

Antena Recomendada para Telefonía Móvil (1025 MHz)

- Triangulo de Sierpinski
- Curva de Hilbert
- Isla de Minkowski

Antena Recomendada para Wimax:

- Triangulo de Sierpinski
- Curva de Hilbert
- Isla de Minkowski

3.5. CONCLUSIONES.

- La investigación concreta que las antenas fractales presentan una mejora significativa si tomamos en cuenta aspectos determinantes de una antena como lo son la razón de onda estacionaria, ganancia, eficiencia, longitud física, pérdidas de retorno y complejidad de fabricación en términos de asequibilidad.
- En términos de apoyo en herramientas de software, se tienen resultados más que satisfactorios aunque cabe mencionar ciertas limitantes que dificultaron el proceso de predicción de resultados, como lo es el método de modelado del software gratuito 4NEC2 el cual consiste en modelado mediante varillas y no secciones de área sólidas haciendo imposible la simulación de fractales con área sólida, en este caso al alfombra de Sierpinski que por ser un fractal de dicha naturaleza complica su simulación.
- La construcción de antenas fractales está asociada a un proceso muy delicado y muy preciso, esto se debe a que las fórmulas matemáticas que las crean requieren de mediciones con bajos porcentajes de error, y pequeñas desviaciones de estos patrones se reflejan en su funcionamiento, pues con poca variación en geometría, puede ver afectado inesperadamente el rendimiento.

3.6. GLOSARIO TECNICO.

Fractal	Objeto geométrico en el que una misma estructura, fragmentada o aparentemente irregular, se repite a diferentes escalas y tamaños.
Multifractal	es una generalización de un sistema fractal en el que un solo exponente (la dimensión fractal) no es suficiente para describir su dinámica; en cambio, se necesita un espectro continuo de exponentes (el llamado espectro de singularidad
Multibanda	menciona la característica de ser capaz de recibir una amplia gama de frecuencias de radio.
Inalámbrico	Dicho de un dispositivo o de un sistema de comunicación eléctrica: Sin alambres conductores.
WIMAX	es una norma de transmisión de datos que utiliza las ondas de radio en las frecuencias de 2,5 a 5,8 GHz y puede tener una cobertura hasta de 70 km.
Omnidireccional	Que tiene las mismas propiedades en todas las direcciones y sentidos.
Isotrópico	se refiere al hecho de que ciertas magnitudes vectoriales conmensurables dan resultados idénticos independientemente de la dirección escogida para dicha medida.
Azimut	Indicará el punto exacto en el que debemos fijar la antena en el plano horizontal. Este ángulo Azimut se mide desde el norte geográfico en sentido de las agujas del reloj.
Recursividad	es la forma en la cual se especifica un proceso basado en su propia definición
Geometría fractal	un modelo alternativo que busca una regularidad en las relaciones entre un objeto y sus partes a diferentes escalas. Esta forma de regularidad no precisa el encorsetamiento del objeto en otras formas geométricas que, aunque elementales, no dejan de ser externas al mismo, sino que busca la lógica

interna del propio objeto mediante relaciones intrínsecas entre sus elementos constitutivos cuando estos se examinan a diferentes escalas. De esta forma no se pierden ni la perspectiva del objeto global, ni del aspecto del mismo en cada escala de observación. La geometría fractal busca y estudia los aspectos geométricos que son invariantes con el cambio de escala.

Ruido	<p>toda señal no deseada que se mezcla con la señal útil que se quiere transmitir. Es el resultado de diversos tipos de perturbaciones que tiende a enmascarar la información cuando se presenta en la banda de frecuencias del espectro de la señal, es decir, dentro de su ancho de banda.</p> <p>es un método de recopilación de datos para analizar patrones complejos dividiendo un conjunto de datos, objeto, imagen, etc. en piezas cada vez más pequeñas, normalmente en forma de "caja", y analizando las piezas en cada escala más pequeña.</p>
Conteo de cajas	
Topológico	<p>se utiliza para identificar a un área de la matemática que estudia la continuidad y otros conceptos originados a partir de ella.</p>
Derivabilidad	<p>que se puede derivar y si una función es derivable en un punto $x = a$, entonces es continua.</p>
Geometría Euclidiana	<p>estudio de las magnitudes y las características de las figuras que se encuentran en el espacio o en un plano, hoy en día también se la conoce como geometría plana, o el estudio de formas en superficies planas.</p>
Bisectriz	<p>segmento de la recta que tiene la función de pasar por un ángulo y dividirlo en dos partes iguales, formando dos regiones conocidas como ángulos.</p>

Vector de Hertz	o potencial vectorial de Hertz del cual se pueden derivar tanto el potencial vectorial electromagnético, así como el potencial escalar.
Ecuaciones de Maxwell	son un conjunto de cuatro ecuaciones (originalmente 20 ecuaciones) que describen por completo los fenómenos electromagnéticos.
Campo lejano	es la región del espacio donde la onda electromagnética es radiante y está lejos del generador en términos de longitud de onda
ZigBee	es una tecnología inalámbrica que opera en las bandas libres ISM (Industrial, Scientific & Medical) de 2,4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU). Tiene una velocidad de transmisión de 250 Kbps y un rango de cobertura de 10 a 75 metros. A pesar de coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes como WiFi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado, esto es debido a su baja tasa de transmisión.
VSWR	son las siglas en inglés de Voltage Standing Wave Ratio, el cual se refiere específicamente al comportamiento del voltaje (mínimos y máximos) en un fenómeno de onda estacionaria entre una línea de transmisión y su carga en el extremo. Se denomina en español Relación de Onda Estacionaria ROE, y está implícito que se trata de la relación (razón geométrica) entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo existente.
Fotosensible	describe la sensibilidad a la luz ultravioleta (UV) de la luz solar y otras fuentes de luz.
Insolado	exponer una cierta cantidad de tiempo algún material u objeto a grandes cantidades de radiación UV
Papel couché	también conocido como papel estucado, es uno de los soportes de impresión de papelería más utilizado en artes gráficas, ya que permite que los proyectos impresos tengan una gran nitidez, calidad y opacidad en sus acabados. Es un

	<p>tipo de papel recubierto por varias capas de estuco que le dan un aspecto liso y suave.</p> <p>es un equipo de medición electrónica que permite visualizar en una pantalla los componentes espectrales en un espectro de frecuencias de las señales presentes en la entrada, pudiendo ser ésta cualquier tipo de ondas eléctricas, acústicas u ópticas.</p>
Analizador de espectros	
Osciloscopio	<p>Aparato provisto de una pantalla y que sirve para representar en ella magnitudes físicas que varían rápidamente.</p>
FSK	<p>(Frequency-shift keying), es una modulación de frecuencia donde la señal moduladora (datos) es digital. Los dos valores binarios se representan con dos frecuencias diferentes (f_1 y f_2) próximas a la frecuencia de la señal portadora f_p</p> <p>Es una forma de modulación de onda cuadrada de portadora suprimida de una señal de onda continua. Con la transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK), son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Una fase de salida representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico. Conforme la señal digital de entrada cambia de estado, la fase de la portadora de salida se desplaza entre dos ángulos que están 180° fuera de fase.</p>
BPSK	
QPSK	<p>La modulación por desplazamiento cuadrafásica se refiere a una técnica para variar la fase de una onda portadora una onda de amplitud y de frecuencia fija mediante la aplicación de una señal digital, de modo que pueda llevar una señal en las transmisiones de radio o televisión.</p>
PKS	<p>(Phase Shift Keying) modulación por desplazamiento de fase es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número determinado de valores discretos. La diferencia con la modulación de fase convencional (PM) es que mientras en esta la variación de</p>

	<p>fase es continua, en función de la señal moduladora, en la PSK la señal moduladora es una señal digital y, por tanto, con un número de estados limitado.</p> <p>(Modulación de amplitud en cuadratura) se define como la técnica de modulación que es la combinación de modulación de fase y amplitud de una onda portadora en un solo canal.</p>
QAM	<p>es un diagrama polar especial que contiene círculos de resistencia constante, círculos de reactancia constante, círculos de relación de onda estacionaria constante y curvas radiales que representan los lugares geométricos de desfase en una línea de valor constante; se utiliza en la resolución de problemas de guías de ondas y líneas de transmisión.</p>
Carta de Smith	<p>cuando se consideran medios con discontinuidades en propagación de ondas. Un coeficiente de reflexión describe la amplitud (o la intensidad) de una onda reflejada respecto a la onda incidente.</p>
Coeficiente de Reflexión	<p>El volume spread analysis es el análisis de los cambios del volumen, que es el indicador que muestra las variaciones que puede tener el precio de un activo. El objetivo del VSA es predecir las modificaciones que se puedan producir a corto plazo.</p>
VSA	

3.7. BIBLIOGRAFIA.

- [1] Antennas for all applications – Jhon D Kraus. Ronald J. Marhefka 3° Edition.
- [2] IEEE Std. 802.16
- [3] <https://www.redalyc.org/journal/614/61452676009/html/>
- [4] <https://www.sysadmit.com/2016/06/wifi-tipos-de-antena-buenas-practicas-capitulo-5.html>
- [5] https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2017-01-07_11-38-34139083.pdf
- [6] <http://www1.frm.utn.edu.ar/comunicaciones/antenas.html#3>
- [7] IEEE Std. 802.16m
- [8] IEEE Std. 802.16e
- [9] Sistemas de comunicaciones electrónicas - Tomasi Wayne - 2° Edición - Pág. 377 a 410.
- [10] Capítulos 12, 13 y 15. Antenna Theory, Analysis and Design. C.A. Balanis. John Wiley & Sons, NJ-USA, 2005, 3a ed.
- [11] Capítulo 7. Antenna Theory and Design. W.L. Stutzman, G.A. Thiele. John Wiley & Sons, NJ-USA, 1998, 2nd ed.
- [12] Capítulo 8. Antenna and EM Modeling with MATLAB. S.N. Makarov. John Wiley & Sons, NJ-USA, 2002.
- [13] IEEE Std 802.16d
- [14] IEEE Std. 802.11a
- [15] <https://www.conrad.com/p/edimax-ra21s-wi-fi-access-point-26-gbits-24-ghz-5-ghz-1491082>
- [16] <https://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html>
- [17] <https://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1208&context=etd>
- [18] https://www.academia.edu/9471295/Dise%C3%B1o_antena_hilbert

- [19] (PDF) Fractal Minkowski Antenna Loaded with Hilbert Curve as Complementary Split Ring Resonator | Amer Shaalan - Academia.edu
- [20] (PDF) IJERT-A Compact Hybrid Fractal Antenna using Koch and Minkowski Curves for Wireless Applications | IJERT Journal - Academia.edu
- [21] Frequency tuned Minkowski island fractals RHCP antenna optimised for three-band GPS receiver - Cao - 2019 - IET Microwaves, Antennas & Propagation - Wiley Online Library
- [22] (PDF) Miniaturized Minkowski-Island Fractal Microstrip Antenna Fed by Proximity Coupling for Wireless Fidelity Application | Syah Alam and Putu Elba - Academia.edu
- [23] (PDF) Minkowski island fractal patch antenna with different size of complimentary quadruple P-spiral srr (QPS-SRR) structures for broadband applications (researchgate.net)

3.8. ANEXOS.



Ilustración 91 Prueba de Ganancia.



Ilustración 92 Prueba de VSWR.