



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO, MODELADO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA FRACTAL PARA
RECEPCIÓN DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE EN EL ECUADOR

Autora

Nathaly Gabriela Barrera Aguilar

Año
2018



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

**DISEÑO, MODELADO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA FRACTAL
PARA RECEPCIÓN DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE EN EL
ECUADOR**

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniera en Redes y Telecomunicaciones

Profesor Guía

Mg. Pablo Geovanny Palacios Játiva

Autora

Nathaly Gabriela Barrera Aguilar

Año

2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo, Diseño, modelado y construcción de una antena fractal para recepción de televisión digital terrestre en el Ecuador, de Nathaly Gabriela Barrera Aguilar, en el semestre 2018-2, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Pablo Geovanny Palacios Játiva
Magister en Ingeniería de Redes y Telecomunicaciones
C.I.: 0927864454

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Diseño, modelado y construcción de una antena fractal para recepción de televisión digital terrestre en el Ecuador, de Nathaly Gabriela Barrera Aguilar, en el semestre 2018-2, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Iván Ricardo Sánchez Salazar
Magister en Calidad, Seguridad y Ambiente
C.I.: 1803456142

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Nathaly Gabriela Barrera Aguilar
C.I.: 1721815726

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiarme y bendecirme en este largo camino de la vida, a mis padres Eduardo Barrera y Amparo Aguilar por ser mi guía, por estar siempre apoyándome en el éxito y en fracaso, por esas palabras de aliento para nunca rendirme y luchar por mis objetivos, gracias a ustedes he logrado concluir mi carrera con mucho esfuerzo y dedicación. A mis tres hermanos Robín Paulo y José Luis, por ser mi ejemplo a seguir y por su apoyo incondicional.

Finalmente quiero agradecer a todos mis profesores en especial al Ingeniero Pablo Palacios por su ayuda y motivación a seguir siempre adelante.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, a mis padres Eduardo Barrera y Amparo Aguilar por todo su esfuerzo que me han brindado, a mis sobrinos Josué, Mateo, Romina y Antonella, ellos son el mejor regalo que mis hermanos me pudieron dar. A mi familia, mis amigas, amigos y a todas aquellas personas que confían en mí.

RESUMEN

La aparición de la Televisión Digital es uno de los sucesos de mayor trascendencia, la evolución a esta nueva tecnología es un hecho radical, el paso del color blanco y negro sea a la televisión a color. El presente proyecto tiene como propósito diseñar, modelar mediante parámetros ya existentes y construir una antena fractal para la recepción de televisión digital terrestre en el Ecuador, en la banda de VHF y UHF, empleando la geometría fractal la cual es una nueva técnica para el diseño de antenas multibanda.

EL capítulo I detalla una revisión de investigaciones relacionadas a antenas fractales y televisión digital, con el objetivo de recopilar información relevante acerca de su geometría, fórmulas, dimensiones y características principales de un objeto fractal, haciendo énfasis en la elaboración de antenas para telecomunicaciones.

En el capítulo II se analiza el modelo matemático de la antena fractal para el uso en la recepción de las señales de televisión digital, así como las ecuaciones de diseño para diferentes propuestas de antenas fractales, que serán utilizadas en el presente proyecto. También se simula la antena fractal y se especifica el software a utilizar, abordando los pasos para el modelamiento de la antena fractal para su correcta implementación.

Se realiza la construcción de la antena tomando como base el diseño propuesto con los parámetros calculados.

En el capítulo III se analizan y comparan los resultados obtenidos en la simulación y los resultados de las mediciones físicas con los respectivos equipos para después realizar una comparación.

En el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron después de culminar el proyecto.

ABSTRACT

The appearance of Digital Television is one of the most important events, the change to this new technology is a radical fact, the passage of black and white color to color television. The purpose of this project is to design, model using existing parameters and build a fractal antenna for the reception of digital terrestrial television in Ecuador, in the VHF and UHF bands, using fractal geometry which is a new technique for design of multiband antennas.

Chapter I details a review of research related to fractal and digital television antennas, with the objective of gathering relevant information about its geometry, formulas, dimensions and main characteristics of a fractal object, emphasizing the development of antennas for telecommunications.

Chapter II analyzes the mathematical model of the fractal antenna for use in the reception of digital television signals, as well as the design equations for different proposals of fractal antennas, which will be used in the present project. The fractal antenna is also simulated and the software to be used is specified, addressing the steps for modeling the fractal antenna for its correct implementation.

The construction of the antenna is carried out based on the proposed design with the calculated parameters.

In chapter III, the results obtained in the simulation and the results of the physical measurements are analyzed and compared with the respective equipment to make a comparison.

Chapter V presents the conclusions and recommendations that were obtained after completing the project.

ÍNDICE

1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Televisión Digital	2
1.1.1 Estándar ISDB-T.....	3
1.1.1.1 Organización del canal radioeléctrico	3
1.1.1.2 Sistema de Transmisión	4
1.1.1.3 Transmisión Jerárquica	5
1.1.1.4 Recepción Parcial	6
1.1.1.5 Separación de portadoras OFDM	6
1.1.2 Norma Técnica de la Televisión Digital en el Ecuador	7
1.1.2.1 Banda de Frecuencias y Canalización.....	7
1.1.2.2 Reserva de canales	8
1.1.2.3 Intensidad de campo	8
1.2 Parámetros de Antenas	8
1.2.1 Patrón de Radiación	10
1.2.1.1 Patrones de Lóbulos de Radiaciones	10
1.2.2 Densidad de Potencia de Radiación	11
1.2.3 Ancho del haz.....	11
1.2.4 Directividad.....	12
1.2.5 Ganancia	13
1.2.6 Eficiencia Total	14
1.2.7 Eficiencia del Haz	15
1.2.8 Ancho de Banda	16
1.3 Fractales	16
1.3.1 Geometría Fractal.....	16

1.3.2	Definición de Fractal	16
1.3.3	Características y propiedades	17
1.3.3.1	Proceso de Iteración.....	17
1.3.3.2	Autosimilitud o Auto semejante.....	17
1.3.3.3	Dimensión Fractal.....	18
1.3.4	Tipos de Fractales	18
1.3.5	Estructuras fractales	19
1.3.5.1	Conjunto de Cantor	20
1.3.5.2	Curva de Koch	21
1.3.5.3	Triángulo de Sierpinski.....	22
1.3.5.4	Alfombra de Sierpinski	23
1.3.6	Antenas Fractales.....	24
1.3.6.1	Características y Propiedades de las antenas Fractales	25
2.	DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN	25
2.1	Diseño de antenas Fractales de Koch.....	26
2.2	Diseño de antenas triángulo de Sierpinski	28
2.3	Especificaciones de la Antena a Diseñar.....	29
2.3.1	Cálculo de la altura máxima del diseño de Sierpinski	30
2.3.2	Ecuaciones de las siguientes alturas de Sierpinski	31
2.3.3	Cálculo de la longitud del triángulo de Sierpinski	31
2.4	Módulos en CST Microwave Studio	32
2.5	Simulación de la antena Fractal.....	32
2.5.1	Generación de la antena Sierpinski en CST	32
2.5.2	Sustrato Dieléctrico.....	34
2.5.3	Estructura de la antena.....	36

2.6 Construcción de la antena fractal Sierpinski	43
2.6.1 Pasos para la construcción de la antena	44
2.6.2 Estructura de la antena en el laboratorio	47
3. COMPARACION DE RESULTADOS.....	48
3.1 Resultados de la antena Sierpinski en CST Microwave Studio.....	48
3.1.1 Parámetros de Radiación	53
3.2 Resultados de la antena Sierpinski en el laboratorio.....	54
3.3 Comparación de los resultados entre la simulación y construcción	60
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
4.1 Conclusiones.....	63
4.2 Recomendaciones	64
REFERENCIAS	65
ANEXOS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Bandas de guarda superior e inferior de un canal.	3
<i>Figura 2.</i> Espectro de frecuencia del canal.	4
<i>Figura 3.</i> Sistema de transmisión.	5
<i>Figura 4.</i> Diagrama en bloques del sistema de transmisión.	5
<i>Figura 5.</i> Antena como dispositivo de transmisión.	9
<i>Figura 6.</i> Transmisión equivalente de Thevenin.	10
<i>Figura 7.</i> Patrón de antena omnidireccional.	10
<i>Figura 8.</i> Patrón de radiación.	11
<i>Figura 9.</i> Patrones de Potencia.	12
<i>Figura 10.</i> Terminales de referencia y las pérdidas de la antena.	14
<i>Figura 11.</i> Fractales Lineales.	19
<i>Figura 12.</i> Fractales No Lineales.	19
<i>Figura 13.</i> Generación del conjunto Cantor.	20
<i>Figura 14.</i> Generación de la curva de Koch.	21
<i>Figura 15.</i> Generación del Copo de nieve de Koch.	22
<i>Figura 16.</i> Construcción de un Triángulo de Sierpinski.	23
<i>Figura 17.</i> Construcción de una Alfombra de Sierpinski.	24
<i>Figura 18.</i> Triangulo de Sierpinski en configuración de monopolo.	30
<i>Figura 19.</i> Creación de un nuevo proyecto en CST.	33
<i>Figura 20.</i> Módulos disponibles de entornos en CST.	33
<i>Figura 21.</i> Solver de CST.	34
<i>Figura 22.</i> Definición de los parámetros para el Sustrato dieléctrico.	35
<i>Figura 23.</i> Selección de la Opción Brick.	35
<i>Figura 24.</i> Parámetros para crear el sustrato dieléctrico.	36
<i>Figura 25.</i> Sustrato Dieléctrico.	36
<i>Figura 26.</i> Triángulo inicial de Sierpinski.	37
<i>Figura 27.</i> Triangulo Sierpinski Iteración cero y Primera Iteración.	38
<i>Figura 28.</i> Opción Pick.	38
<i>Figura 29.</i> Selección parte frontal del sustrato.	39
<i>Figura 30.</i> Parámetros propuestos para el Triángulo.	39
<i>Figura 31.</i> Selección de la opción Extrude.	40

<i>Figura 32.</i> Definir información para crear el triángulo.	40
<i>Figura 33.</i> Desarrollo del Triángulo Principal.....	40
<i>Figura 34.</i> Opción Pick Points.	41
<i>Figura 35.</i> Alineación del plano.	41
<i>Figura 36.</i> Parámetros para la creación del triángulo Sierpinski en su siguiente iteración.	42
<i>Figura 37.</i> Primera Iteración de Sierpinski.....	42
<i>Figura 38.</i> Antena Dipolo Fractal Triangulo de Sierpinski con la segunda iteración	43
<i>Figura 39.</i> Baquelita para realizar la antena.....	44
<i>Figura 40.</i> Diseño del triángulo de Sierpinski	45
<i>Figura 41.</i> Pistas después de la reacción química	46
<i>Figura 42.</i> Perforación en los dos triángulos de Sierpinski	46
<i>Figura 43.</i> Implementación del Balun	47
<i>Figura 44.</i> Equipos utilizados en las pruebas de laboratorio.....	48
<i>Figura 45.</i> Coeficiente de reflexión.....	49
<i>Figura 46.</i> Razón de Onda Estacionaria SWR	49
<i>Figura 47.</i> Antena Dipolo Fractal Triangulo de Sierpinski con la segunda iteración Optimizada.	50
<i>Figura 48.</i> Diferencia entre la antena original y la antena optimizada.....	51
<i>Figura 49.</i> Coeficiente de Reflexión antena Optimizada.....	51
<i>Figura 50.</i> Razón de Onda Estacionaria SWR de antena Optimizada.....	51
<i>Figura 51.</i> Diagrama de ganancia para la frecuencia de 500 MHz	52
<i>Figura 52.</i> Diagrama de ganancia para la frecuencia de 600 MHz	52
<i>Figura 53.</i> Diagrama de ganancia para la frecuencia de 700 MHz	52
<i>Figura 54.</i> Parámetro de radiación para la frecuencia de 500 MHz.....	53
<i>Figura 55.</i> Parámetro de radiación para la frecuencia de 600 MHz.....	53
<i>Figura 56.</i> Parámetro de radiación para la frecuencia de 700 MHz.....	54
<i>Figura 57.</i> Coeficiente de reflexión lineal.....	55
<i>Figura 58.</i> Coeficiente de reflexión.....	56
<i>Figura 59.</i> Perdida de retorno	57
<i>Figura 60.</i> Relación de onda estacionaria o Voltaje SWR	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Parámetros del segmento OFDM</i>	6
Tabla 2. <i>Bandas de Frecuencias Principales</i>	7
Tabla 3. <i>Nivel Mínimo de Campo</i>	8
Tabla 4. <i>Dimensiones del Sustrato dieléctrico</i>	34
Tabla 5. <i>Dimensiones del triángulo Sierpinski</i>	37
Tabla 6. <i>Dimensiones de los triángulos según sus iteraciones</i>	38
Tabla 7. <i>Dimensiones de la antena Optimizada</i>	49
Tabla 8. <i>Comparación de pérdidas de retorno</i>	60
Tabla 9. <i>Comparación Relación onda estacionaria</i>	61
Tabla 10. <i>Comparación de la antena fractal Sierpinski real optimizada y construida</i>	61

1. MARCO TEÓRICO

En 1959 la televisión en Ecuador se convirtió en una de las principales fuentes de información y de entrenamiento, al pasar los años surge un avance de las tecnologías digitales ya que estas traen varias ventajas con respecto al sistema tradicional que por décadas se utilizó, denominado sistema analógico. Las telecomunicaciones fueron las primeras que optaron estos cambios como es la telefonía celular, las redes IP y finalmente la televisión, por lo tanto, todos los dispositivos convergen en una única red llamada Internet.

Con la aparición de la televisión digital existe algunos problemas entre ellos el suceso de televisores analógicos por los televisores digitales, los canales ya trabajan en diferentes bandas, por lo que se necesita una antena que cumpla con ciertas características para lograr una correcta recepción. Estas antenas deben tener el ancho de banda necesario para que funcionen correctamente, entre este tipo de antenas existe la geometría fractal que permite diseñar antenas multibandas.

Entre las ventajas de la TDT (*Televisión Digital Terrestre*) están:

- Una mejor calidad técnica de la imagen denominada HD (*High Definition*).
- Se eliminó la interferencia
- Mejoró el sonido, y existe mejor resolución en el color.
- Con esta tecnología cambio el manejo, transporte y almacenamiento de las señales.

La televisión analógica se la conoce como “la emisión de ondas electromagnéticas, que son escuchadas y visualizadas por un público (Naranjo & Zapata, 2012)

Al principio en la televisión analógica las imágenes eran solamente en blanco y negro, en los años siguientes la imagen era a color sin que esto afecte a los usuarios que querían mantener sus receptores blanco y negro. El añadir colores a la transmisión significaba aumentar el ancho de banda, y por lo tanto también apareció las normas y estándares de televisión. (Zaidán, 2010)

En el Ecuador el estándar establecido para el servicio de televisión terrestre analógico es NTSC (*National Television System Committee*), este estándar define el sistema 525 líneas con una frecuencia de 60 Hz. (Fischer, 2007)

Por mucho tiempo se empleó la transmisión y recepción de televisión analógica a pesar de sus limitaciones y falencias, entre sus principales problemas que tenía la televisión análoga era la baja calidad de video, audio y la vulnerabilidad con problemas relacionados con el efecto Doppler que es la modificación de frecuencia ocasionada por una onda en su movimiento, si se acerca la frecuencia aumenta y si se aleja por lo contrario su frecuencia disminuye, el ruido impulsivo o interferencia de canal adyacente. (Zaidán, 2010)

1.1 Televisión Digital

La Televisión digital tiene grandes beneficios con respecto a la televisión analógica, ya que brinda un mejor servicio de imagen y sonido consiguiendo, mejorar la elasticidad en la emisión de los distintos canales de la banda UHF.

La televisión digital proporciona el cambio del estándar SDTV al estándar de alta definición para televisores HDTV el cual tiene como función reducir señales de audio y video, para que al momento de transmitir ocupe el menor ancho de banda. (Saca, 2013)

La transformada discreta del coseno fue el algoritmo básico de desarrollo para comprimir imágenes fijas, después apareció el formato de comprensión MPEG *Moving Pictures Expert Group*, este grupo de desarrollo define el estándar MPEG-1 en 1992, su objetivo era lograr la codificación de las imágenes en movimiento y sonido usando medios magnéticos para el almacenamiento de información, luego se desarrolla la norma MPEG-2, aquí nace el DVD y la televisión digital donde fue implementada la TV de Alta Definición, con lo que aparece 2 estándares de televisión digital terrestre DVB-T y el ISDB-T. Después se da a conocer una generación más avanzada la norma MPEG-4 la cual tiene una mejor compresión de la imagen y video. (Fischer, 2007)

1.1.1 Estándar ISDB-T

Esta norma se adoptó después del DVB-T y el ATSC, en donde ISDB-T tiene un servicio de banda angosta denominado one seg y DVB-T tiene una modulación jerárquica H-L.

El estándar ISDB-T se originó en Japón en 1990 en donde la primera estación experimental fue instalada en la torre de Tokio, ISDB-T comenzó con once estaciones experimentales a través de Japón. (Fischer, 2007)

1.1.1.1 Organización del canal radioeléctrico

El estándar ISDB-T dispone un canal de 14 segmentos con un ancho de banda de 6MHz, en donde los 14 segmentos se dividen de la siguiente manera: 13 segmentos son destinados a las portadoras para desarrollar canales HD, SD y LD, y el segmento final se reserva para distribuir las bandas de guarda el cual evita interferencias entre los canales adyacentes. (Saca, 2013)

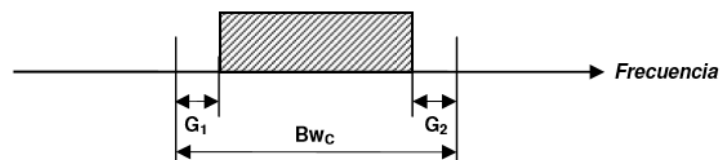


Figura 1. Bandas de guarda superior e inferior de un canal.

Adaptado de (Pisciotta, 2010).

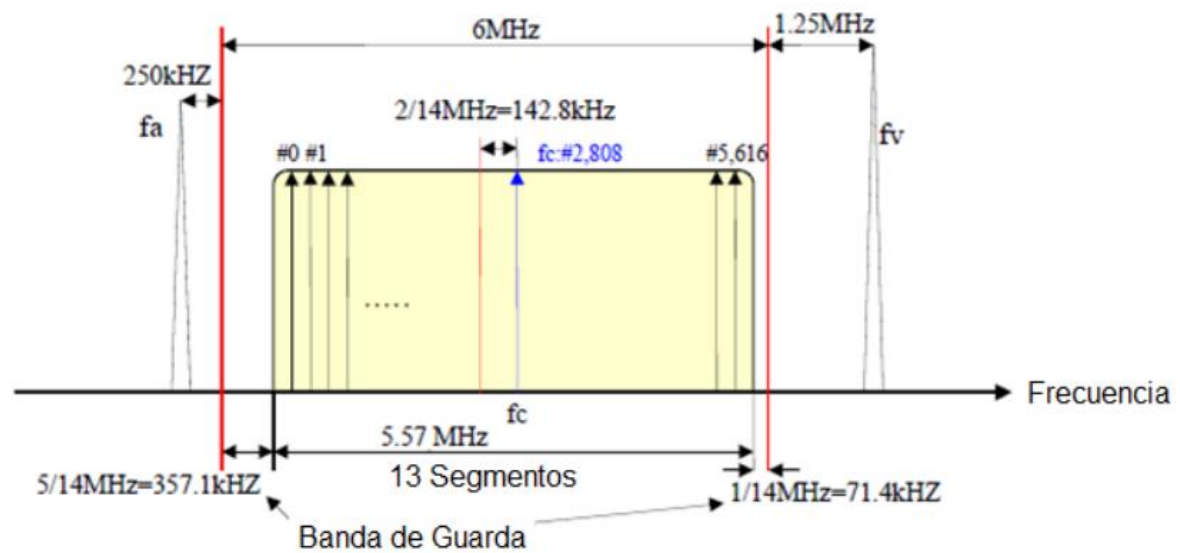


Figura 2. Espectro de frecuencia del canal.

Tomado de (Saca, 2013)

Para saber el ancho de banda de cada segmento el canal debe dividirse en 14 segmentos. Expresado de la siguiente manera:

$$B_{Wc} = \frac{\text{canal}}{N_s} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$B_{Wc} = \frac{6\text{MHz}}{14} = 428,6 \text{ KHz} \quad (\text{Ecuación 2})$$

1.1.1.2 Sistema de Transmisión

En la transmisión para agrupar flujos de transporte se debe volver a multiplexar para elaborar un único TS (*Transport Stream*) el cual debe ser codificado y enviado como una señal OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) el cual es compuesto por 13 segmentos o bloques sucesivos, al momento de emitir televisión digital terrestre se utiliza un intervalo de tiempo para lograr una codificación con un porcentaje menor de errores. (Saca, 2013)

En la Figura 3, se observa la compresión y codificación de las señales de audio y video, obteniendo a la salida un flujo de datos digitales, en la siguiente etapa el flujo de datos debe ser multiplexados para después ser modulados y

amplificados, finalmente es emitida la señal digital por medio de la antena transmisora.

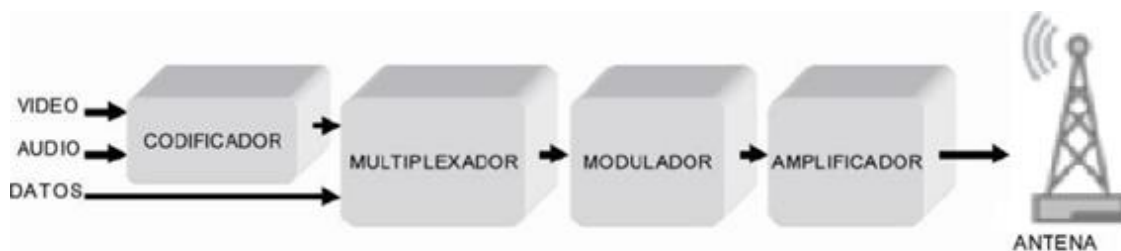


Figura 3. Sistema de transmisión.

Tomado de (Saca, 2013)

1.1.1.3 Transmisión Jerárquica

La multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*OFDM*) se utiliza en la codificación de un canal el cual debe ser usado simultáneamente para el servicio de recepción fijo y de recepción móvil, lo cual tiene el nombre de capa jerárquica donde se maneja datos como la tasa de codificación interna, la longitud de intervalo en el tiempo y el esquema de modulación de portadoras. (Saca, 2013)

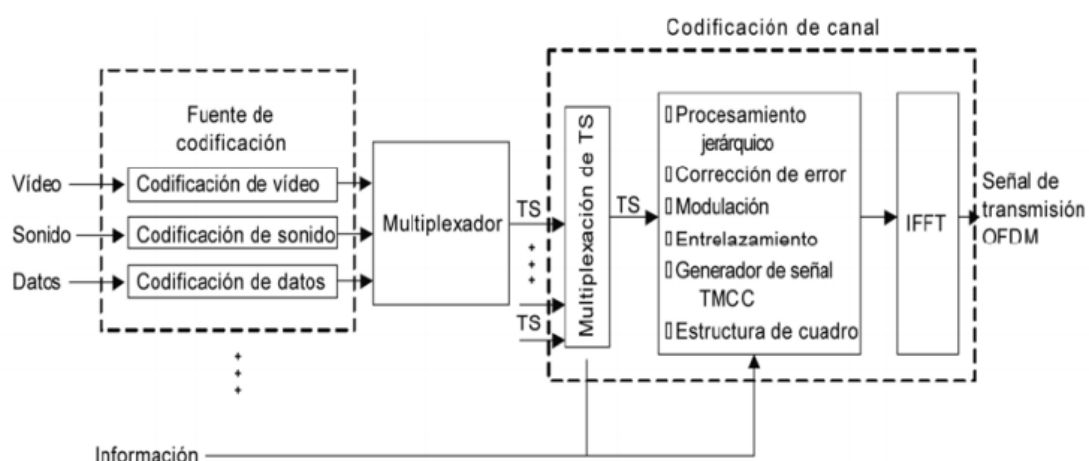


Figura 4. Diagrama en bloques del sistema de transmisión.

Tomado de (Saca, 2013)

1.1.1.4 Recepción Parcial

El servicio portátil one-seg se basa en el proceso de entrelazamiento de frecuencias las cuales consisten en 13 segmentos de OFDM evitando la participación del espectro de radiodifusión. (Saca, 2013)

1.1.1.5 Separación de portadoras OFDM

Existe 3 modos de separación de portadoras donde se garantiza una buena recepción móvil evadiendo el efecto Doppler en las alteraciones del canal al constatar la distancia entre las dos estaciones, estación repetidora y estación auxiliar. La separación de frecuencias es de 4 KHz, 2 KHz, o 1 KHz en los 3 modos, pero la tasa útil es igual para cada uno respectivamente sólo varía el número de portadoras dependiendo el modo. (Saca, 2013)

Tabla 1.

Parámetros del segmento OFDM

Parámetro	Modo 1		Modo 2		Modo 3	
Ancho de banda del segmento (B_{Ws})	3000/7= 428.57 KHz					
Separación entre portadoras (Δf)	250/63 KHz		125/63 KHz		125/126 KHz	
Numero de portadoras activas por segmento (L_s)	108	108	216	216	432	432
Numero de portadoras de datos por segmento (L_D)	96	96	192	192	384	384
Esquema de modulación de las portadoras	QPSK	DQPSK	QPSK	DQPSK	QPSK	DQPSK
	16QAM		16QAM		16QAM	
	64QAM		64QAM		64QAM	
Tamaño de símbolo efectivo	252 us		504 us		1008 us	
Frecuencia de muestreo de la IFFT	512/63= 8,12698 MHz					

Adaptado de (Pisciotta, 2010).

1.1.2 Norma Técnica de la Televisión Digital en el Ecuador

Se ha iniciado en el Ecuador la fase de migración de la televisión analógica terrestre a la televisión digital, por lo que se implementó el estándar ISDB-T Internacional, este permitirá perfeccionar el servicio a los usuarios finales.

El sistema fue diseñado para proporcionar flexibilidad, capacidad de expansión, compatibilidad e interoperabilidad.

El estándar ISDB-T Internacional (ISDB-Tb) fue adoptado el 26 de marzo de 2010, conforme a las normas técnicas para la asignación de canales y operación de las estaciones del servicio de radiodifusión de televisión digital terrestre en el territorio ecuatoriano. (Saca, 2013)

1.1.2.1 Banda de Frecuencias y Canalización

Para el servicio de televisión digital terrestre se utilizará el segmento de la banda de frecuencias de UHF comprendido en el intervalo de:

BANDA IV de 500 a 608 MHz de 614 a 644 MHz

BANDA V de 644 a 698 MHz

es decir, entre los canales 19 y 51. La separación entre canales adyacentes es de 6MHz en sus frecuencias mínimas y centrales.

Las bandas establecidas por la ITU en el Ecuador para el servicio de televisión abierta de la banda UHF, se dividen en 16 canales de 6 MHz de ancho de banda, de la siguiente manera:

Tabla 2.

Bandas de Frecuencias Principales

Banda de Radio ITU	Frecuencias MHz	Canales
--------------------	-----------------	---------

UHF	500-608	21,23,25,27,29,33,35
	614-644	39,40,41
	644-698	43,45,47,49,50,51

Tomado de (Resolución Arcotel, 2015)

El estado definió que el canal 37 sea usado exclusivamente para brindar servicios de radioastronomía, por lo tanto, no forma parte de las bandas asignadas por la TV digital.

1.1.2.2 Reserva de canales

La Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) reservo 4 canales en la norma analógica, estos son el 19, 20 48 y 49, los mismos que están libres a nivel nacional, y podrían servir para comenzar las pruebas de la transición hacia la televisión digital.

1.1.2.3 Intensidad de campo

Tabla 3.

Nivel Mínimo de Campo

	VHF (Ch. 7-13)	UHF (Ch. 14-51)
Nivel Mínimo de intensidad de Campo	43 dBuV/m	51 dBuV/m

Tomado de (Resolución Arcotel, 2015)

1.2 Parámetros de Antenas

La antena es un dispositivo constituido por un conductor para radiar o recibir ondas. Es decir, una estructura de transición entre el espacio libre y un dispositivo de guía, este dispositivo puede tener la forma de una línea coaxial o

una tubería hueca por donde transporta energía electromagnética desde la fuente de transmisión a la antena o desde la antena al receptor. (Balanis, 2005)

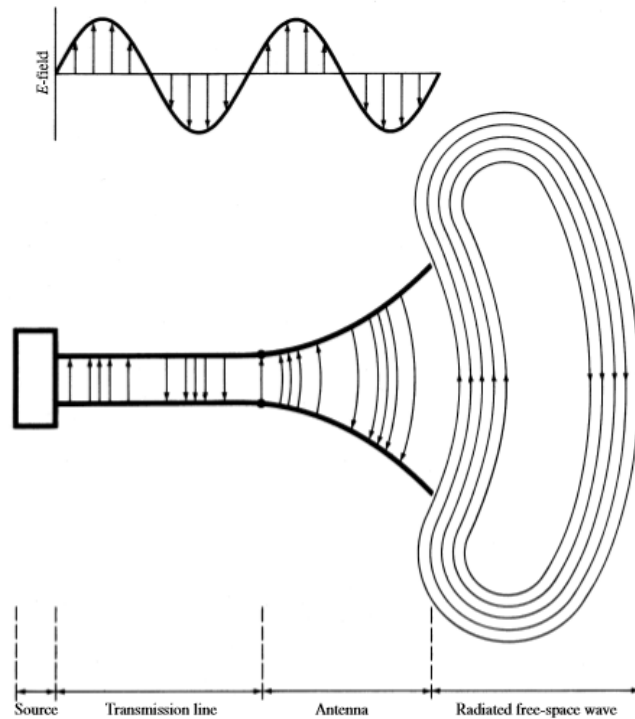


Figura 5. Antena como dispositivo de transmisión.

Tomado de (Balanis, 2005)

El transmisor se muestra como una fuente equivalente de Thevenin que está representada por un generador de tensión y varias impedancias en serie obteniendo una potencia de transmisión a la antena transmisora. Por lo tanto, la antena radia una onda esférica en donde a distancias largas se aproxima a una onda plana.

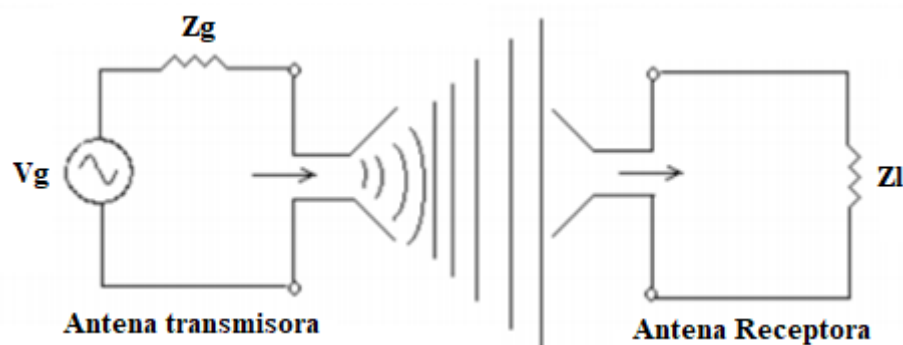


Figura 6. Transmisión equivalente de Thevenin.

Tomado de (Etxeondo, 2005)

Para llevar a cabo la construcción de una antena se deben seguir ciertos parámetros ya que existen diferentes maneras de diseñar y estas varían dependiendo la aplicación según el propósito a cumplir. A continuación, se enuncian algunos de ellos:

1.2.1 Patrón de Radiación

En una antena polarizada linealmente, el rendimiento se especifica en términos de E y H . El plano E se define como el vector de campo eléctrico y la dirección de máxima radiación, y el plano H se define como el campo magnético y la dirección de máxima radiación. (Balanis, 2005)

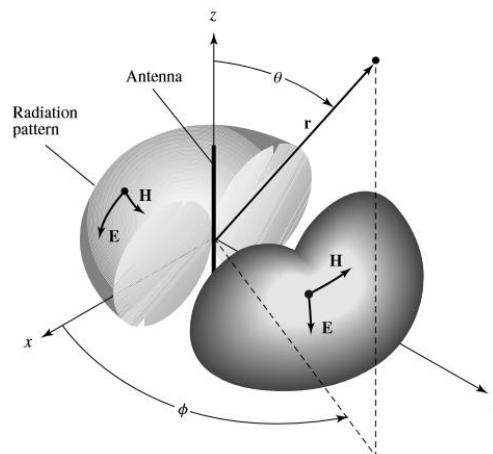


Figura 7. Patrón de antena omnidireccional.

Tomado de (Balanis, 2005)

1.2.1.1 Patrones de Lóbulos de Radiaciones

El patrón de radiación se denomina lóbulo y se clasifica en:

- Lóbulo mayor: es el lóbulo que está en la dirección de máxima radiación.
- Lóbulo menor: es otro lóbulo que no sea el principal.
- Lóbulo lateral: es el que se encuentra en cualquier dirección, pero adyacente al lóbulo principal y ocupa el hemisferio del lóbulo principal.

- Lóbulo posterior: son los lóbulos menores los cuales representan la radiación en la dirección que no desee y debe ser minimizada. (Balanis, 2005)

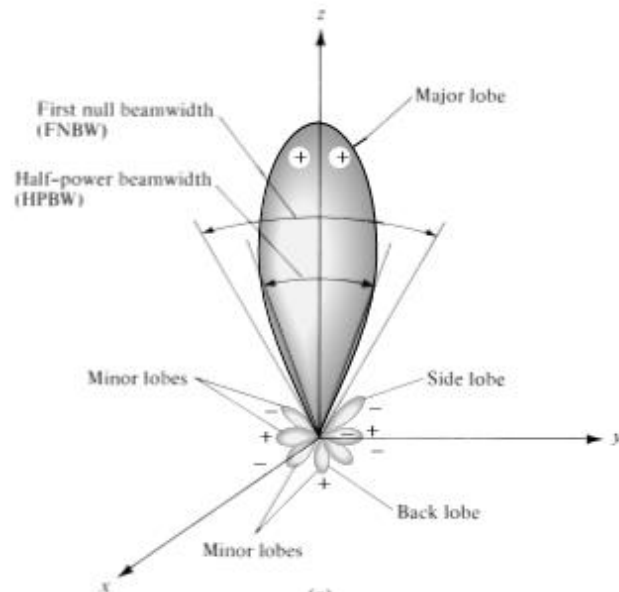


Figura 8. Patrón de radiación.

Tomado de (Balanis, 2005)

1.2.2 Densidad de Potencia de Radiación

Las ondas electromagnéticas se utilizan para trasladar los datos a través de un medio inalámbrico o una de guía, de un punto a otro. De tal forma que, la potencia y la energía están asociados con campos electromagnéticos.

A partir de los campos eléctrico y magnético se obtiene la densidad de flujo por unidad de superficie.

$$P(\theta, \phi) = E \times H \quad (\text{Ecuación 3})$$

E = intensidad instantánea del campo eléctrico (V/m)

H = intensidad de campo magnético instantáneo (A/m)

1.2.3 Ancho del haz

El ancho del haz es el ángulo de apertura en donde la mayor parte de la

energía se irradia, existen dos consideraciones principales del ancho de haz: la mitad de la potencia de ancho del haz (HPBW) y Primer Null del ancho del haz (FNBW).

El ancho de haz es un parámetro destacado de la antena ya que se usa como una compensación entre el ancho de haz y el nivel del lóbulo lateral; por lo tanto, si el ancho del haz disminuye, el lóbulo lateral aumenta y viceversa.

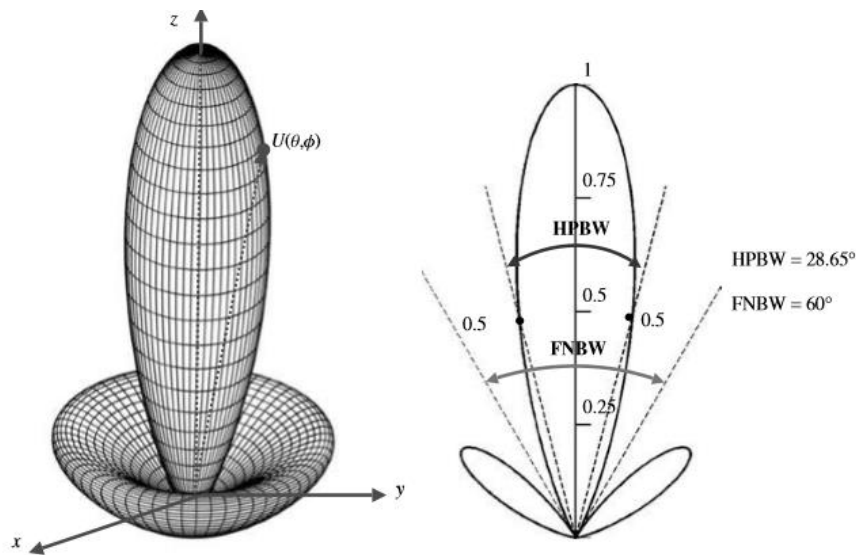


Figura 9. Patrones de Potencia.

Tomado de (Balanis, 2005)

1.2.4 Directividad

La ganancia directiva en una dirección dada se define como la relación de intensidad de radiación con la intensidad de radiación de una antena de referencia, la antena de referencia se considera la antena isotrópica. Por lo tanto, la directividad es el valor de la ganancia directiva en la dirección del máximo valor.

La intensidad de radiación promedio es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π . En forma matemática se tiene: (Balanis, 2005)

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$D_O = \frac{U_{max}}{U_O} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

D_g : Ganancia directiva

D_o : Directividad

U : Intensidad de Radiación

U_{max} : Intensidad de radiación máxima

U_O : Intensidad de radiación de una fuente isotrópica

P_{rad} : Potencia total radiada

1.2.5 Ganancia

La ganancia de la antena está relacionada con la directividad, se debe tomar en cuenta que la directividad es una medida que describe solo la propiedad direccional de la antena y se controla solo por su patrón de radiación.

La ganancia no incluye las pérdidas que surgen de las pérdidas por reflexión y por las pérdidas causadas por la polarización. En forma matemática se tiene (Balanis, 2005)

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

U : Intensidad de Radiación

P_{in} : Potencia total de entrada

La ganancia no incluye las pérdidas que surgen de las pérdidas por reflexión y por las pérdidas causadas por la polarización. En forma matemática se tiene (Balanis, 2005)

$$G_i = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in} \text{ (Fuente isotropica sin perdidas)}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

1.2.6 Eficiencia Total

La eficiencia total de la antena se usa para obtener las pérdidas en los terminales de entrada y en la estructura de la antena. Tales pérdidas pueden ser debido a: (Balanis, 2005)

- Reflexiones ya que existe desacoplamiento entre la línea de transmisión y la antena.
- Pérdidas por conducción y dieléctrico

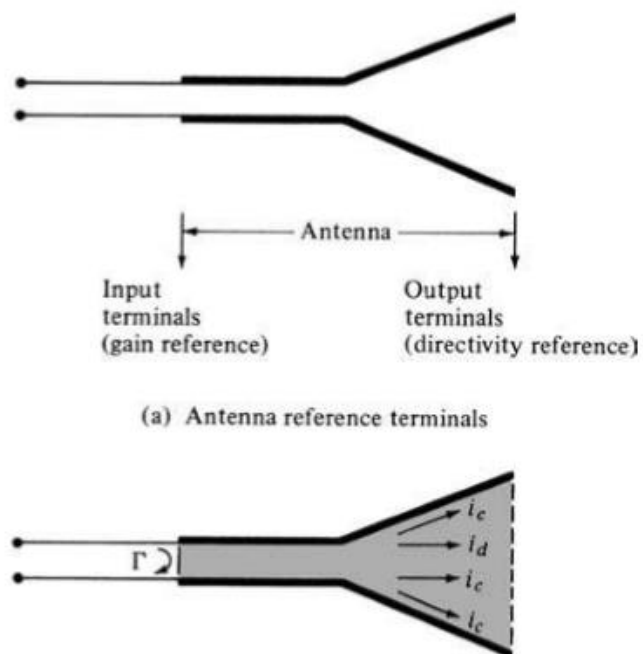


Figura 10. Terminales de referencia y las pérdidas de la antena. Tomado de (Balanis, 2005)

En general la eficiencia total se escribe como:

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (\text{Ecuación 8})$$

e_t : Eficiencia total

e_r : Eficiencia de reflexión = $(1 - |\Gamma|^2)$

e_c : Eficiencia de conducción

e_d : Eficiencia del dieléctrico

Γ : Coeficiente de reflexión de voltaje a la entrada de los terminales de la antena. Se tiene:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

Z_{in} : Impedancia de entrada a la antena

Z_o : Impedancia característica de la línea de transmisión.

1.2.7 Eficiencia del Haz

La eficiencia del haz se usa para observar la calidad de una antena transmisora y receptora. Para una antena con el lóbulo mayor dirigido a lo largo del eje z ($\theta = 0$), la eficiencia del haz se define como:

$$EH = \frac{\text{Potencia transmitida o recibida dentro de un cono } \theta_1}{\text{Potencia transmitida por la antena}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

EH : Eficiencia del haz

θ_1 : Es la mitad del ángulo del cono dentro del cual el porcentaje total de la potencia se encuentra en grados o radianes.

La ecuación anterior se reescribe como:

$$EH = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_1} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Si θ_1 se escoge como el ángulo donde el primer nulo o cero ocurre, por lo tanto la eficiencia del haz indicará la cantidad de energía en el lóbulo principal en comparación con la potencia total. (Balanis, 2005).

1.2.8 Ancho de Banda

Se define como el rango de frecuencia dentro del cual el rendimiento de la antena con respecto alguna característica que cumple el estándar específico.

Las antenas se clasifican por el ancho de banda estas pueden ser banda angosta y banda ancha.

Para las antenas de banda ancha, el ancho de banda se expresa generalmente como la relación entre las frecuencias superiores a las inferiores. Para las antenas de banda angosta, el ancho de banda se expresa como un porcentaje de la diferencia de frecuencia superior menos la inferior. (Balanis, 2005)

1.3 Fractales

Los fractales fueron creados en 1890 por el francés Henri Poincaré, después se renovaron los estudios a partir de 1974 en IBM. Luego de este análisis, el Dr. Mandelbrot fue considerado como el padre de la geometría fractal, ya que había descubierto que todo lo que rodeaba al hombre venía sobre todo en formas rugosas e irregulares. El propósito de la creación de la geometría fractal fue solucionar problemas como el ruido de las líneas telefónicas ya que era insalvable, se podía atenuar o amplificar, pero siempre aparecían interferencias. (Herrera & Inclán, 2004)

1.3.1 Geometría Fractal

La geometría Fractal se le conocía también como geometría de la Naturaleza, la geometría fractal es un agrupamiento de estructuras irregulares y complejas mediante algoritmos geométricos y matemáticos. Por lo tanto, es parte de la matemática que estudia la dimensionalidad y generación de diferentes estructuras fractales. (Herrera & Inclán, 2004)

1.3.2 Definición de Fractal

Según Mandelbrot una antena fractal tiene una forma irregular o fragmentada y sigue siendo de la misma manera en cualquier escala.

La palabra fractal viene del latín fractus que significa fragmentado esto es debido a la iteración de un proceso geométrico o matemático. Estas estructuras tienen propiedades principales como la auto similitud, también poseen una dimensión fraccionaria. (Herrera & Inclán, 2004)

1.3.3 Características y propiedades

Las propiedades de un objeto fractal se mencionan de la siguiente manera:

- Procesos de iteración
- Auto similitud o auto semejanza
- Dimensión fraccionaria o fractal

1.3.3.1 Proceso de Iteración

Los fractales se generan de una manera iterativa que lleva a la autosimilitud de las estructuras. La iteración se puede escribirse en donde un número n se repite varias veces. Por lo tanto, para generar en un proceso de iteración se destacan 2 componentes importantes.

El Iniciador: Es la figura geométrica inicial que al generar una acción proporciona un nuevo valor a la figura, esta nueva figura puede ser utilizado como iniciador para hallar el siguiente resultado ejecutando la misma acción.

El Generador: Es el proceso geométrico en donde el iniciador es analizado para producir un nuevo valor a la figura geométrica, dicho proceso puede repetirse varias veces, incluso infinitamente. (Herrera & Inclán, 2004)

1.3.3.2 Autosimilitud o Auto semejante

La autosimilitud se define como la reducción de copias a varias escalas, por lo tanto, cada parte del objeto tiene la misma información que todo el conjunto. (Herrera & Inclán, 2004)

Los fractales se clasifican en tres tipos (Villar, Sorolla, & Beruete, 2012):

1. **Autosimilitud exacta:** el fractal es idéntico pero a diferentes escalas.

2. **Cuasi-autosimilitud:** el fractal parece idéntico a diferentes escalas, contiene copias menores y distorsionadas de sí mismo.
3. **Autosimilitud estadística:** el fractal tiene medidas estadísticas o numéricas que se mantienen con el cambio de escala

1.3.3.3 Dimensión Fractal

La dimensión es fraccionaria en vez de ser unidimensional, bidimensional o tridimensional, muy pocas veces es expresado con un número entero, por lo tanto, el concepto de tamaño de un fractal no se puede asociar con la longitud, volumen, área o perímetro al que se puede ver en la geometría Euclidiana.

Existe una ecuación que describe la dimensión de objetos fractales llamada Dimensión de Hausdorff, que es la relación entre el factor reducido y el número de partes expresada matemáticamente de la siguiente manera (Herrera & Inclán, 2004):

$$D_H = \frac{\text{Log}(N)}{\text{Log}(P/p)} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

N: Número de unidades o partes

P: Tamaño del objeto

p: Tamaño de la unidad

1.3.4 Tipos de Fractales

Existen dos tipos de fractales: los lineales y los no lineales.

Los fractales lineales construyen una variación muy simple de sus escalas por lo tanto son idénticos en todas sus escalas hasta el infinito. Por ejemplo, el triángulo de Sierpinski, y la curva de Koch son fractales lineales.

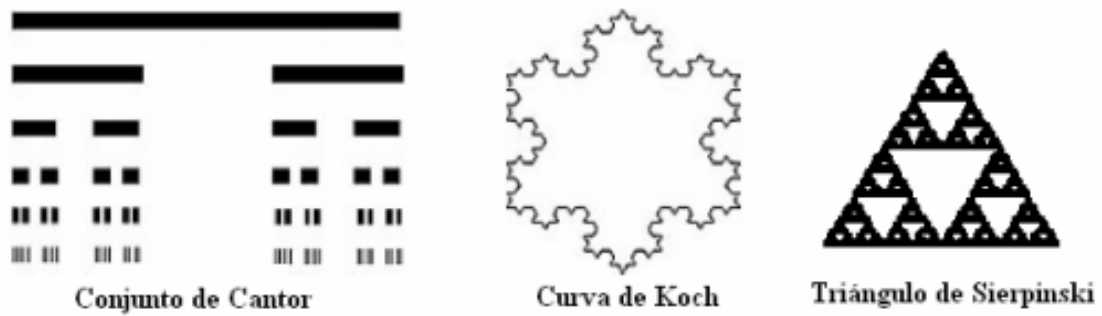


Figura 11. Fractales Lineales.

Tomado de (Herrera & Inclán, 2004)

- a) Conjunto de Cantor
- b) Curva de Koch
- c) Triángulo de Sierpinski

Los fractales no lineales, son los que se generan a partir de distorsiones complejas usan un término proveniente de la Matemática Caótica, distorsiones no lineales. La mayoría de los objetos fractales matemáticos y naturales son no lineales. Ejemplos: el Conjunto de Mandelbrot o el Conjunto de Julia.

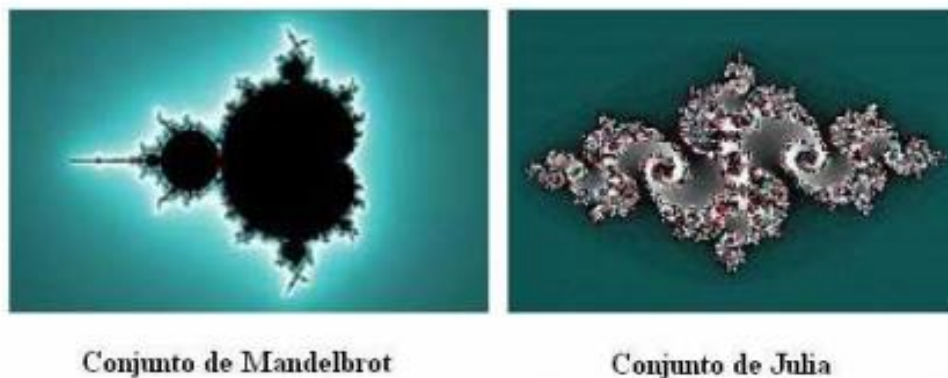


Figura 12. Fractales No Lineales.

Tomado de (Herrera & Inclán, 2004)

- a) Conjunto de Mandelbrot
- b) Conjunto de Julia

1.3.5 Estructuras fractales

Estos fractales fueron creados a finales del siglo XIX y recopilados por Mandelbrot a mediados del siglo XX.

1.3.5.1 Conjunto de Cantor

Se comienza con un segmento de $S_0 = (0,1)$ como se indica en la Figura 13 y se divide el segmento en 3 sub segmentos de un tercio cada uno. Se elimina el sub segmento central y se conserva los intervalos restantes para $n=1$. (Herrera & Inclán, 2004)

$$S_{11} = \left(0, \frac{1}{3}\right) \quad S_{12} = \left(\frac{2}{3}, 1\right) \quad (\text{Ecuación 13})$$

Repitiendo la división en tres partes a cada uno de los segmentos y borrando el segmento central de cada uno se obtiene los 4 intervalos siguientes para $n=2$.

$$S_{21} = \left(0, \frac{1}{9}\right) \quad S_{22} = \left(\frac{2}{9}, \frac{1}{3}\right) \quad S_{23} = \left(\frac{2}{3}, \frac{7}{9}\right) \quad S_{24} = \left(\frac{8}{9}, 1\right) \quad (\text{Ecuación 14})$$

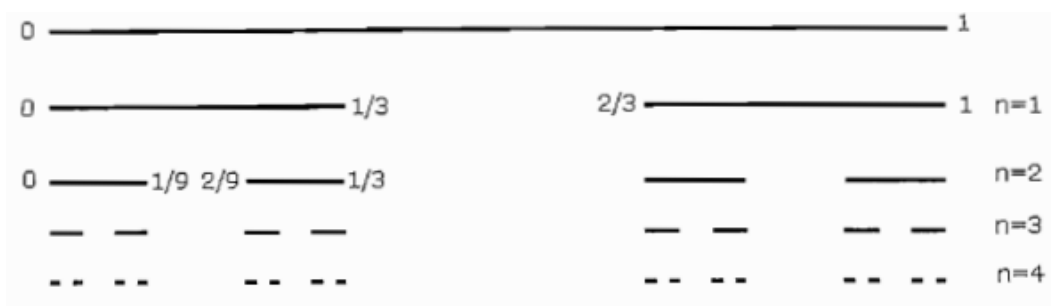


Figura 13. Generación del conjunto Cantor.

Tomado de (Herrera & Inclán, 2004)

El número de iteraciones al infinito se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{1}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n}{3^n} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{1-\frac{2}{3}} \right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

Según esto cuando se realizan infinitas secuencias de este conjunto se elimina en su totalidad la longitud del segmento inicial. Calculando la dimensión de este conjunto, se determina que es:

$$D_H = \frac{\text{Log}N}{\text{Log}\left(\frac{p}{p}\right)} = \frac{\text{Log}2}{\text{Log}\left(\frac{1}{1/3}\right)} = 0.630929 \quad (\text{Ecuación 16})$$

1.3.5.2 Curva de Koch

Se divide el segmento en tres partes iguales, y encima la parte central se elabora un triángulo equilátero eliminando el tercio de la base teniendo así cuatro segmentos de longitud un tercio de la iteración original, en la segunda iteración se repite el proceso con cada uno de los segmentos resultantes de la primera iteración y así sucesivamente con cada iteración. (Herrera & Inclán, 2004)

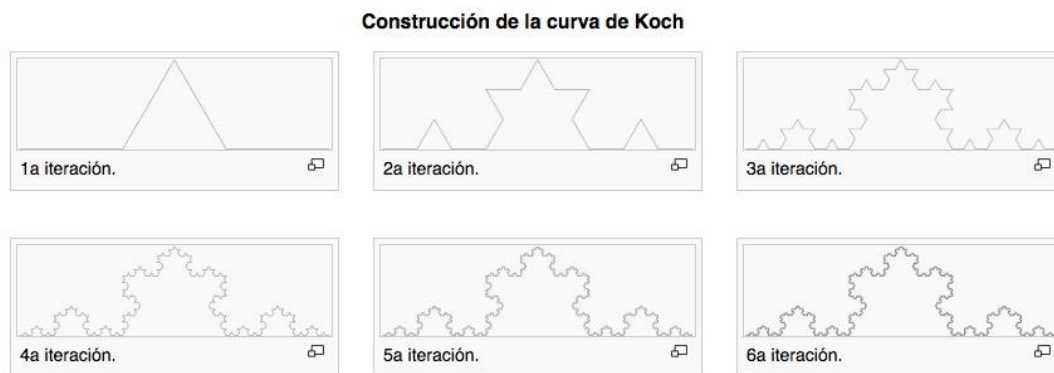


Figura 14. Generación de la curva de Koch.

Tomado de (Herrera & Inclán, 2004)

La longitud de esta curva está dada de la siguiente manera:

$$L = h(4/3)^n \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde

n: Es el número de iteraciones

h: La longitud del segmento inicial

Calculando la dimensión podemos expresar de la siguiente manera:

$$D_H = \frac{\text{Log}N}{\text{Log}\left(\frac{p}{p}\right)} = \frac{\text{Log}4}{\text{Log}\left(\frac{1}{1/3}\right)} = 1.26185 \quad (\text{Ecuación 18})$$

Este fractal es considerado entre un plano y una línea recta, si se aplica este proceso de generación a un triángulo se obtiene el copo de Nieve de Koch como se muestra en la Figura 15.

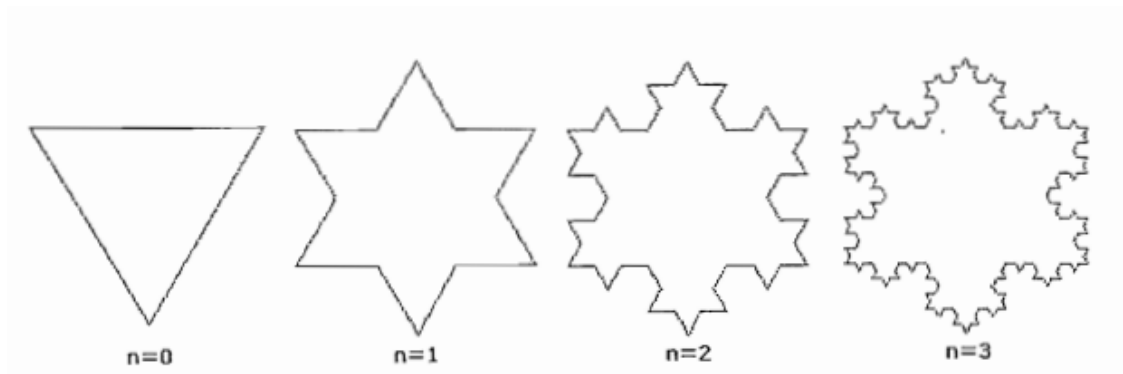


Figura 15. Generación del Copo de nieve de Koch.

Tomado de (Herrera & Inclán, 2004)

1.3.5.3 Triángulo de Sierpinski

Se inicia con un triángulo equilátero, en la parte interior del triángulo se dibuja otro triángulo equilátero, en donde los vértices deben coincidir con los puntos medios de cada lado del triángulo principal, como se muestra en la Figura 16. Formándose cuatro triángulos equiláteros iguales, después se elimina de la figura el nuevo triángulo central así conservando los tres triángulos equiláteros similares. (Herrera & Inclán, 2004)

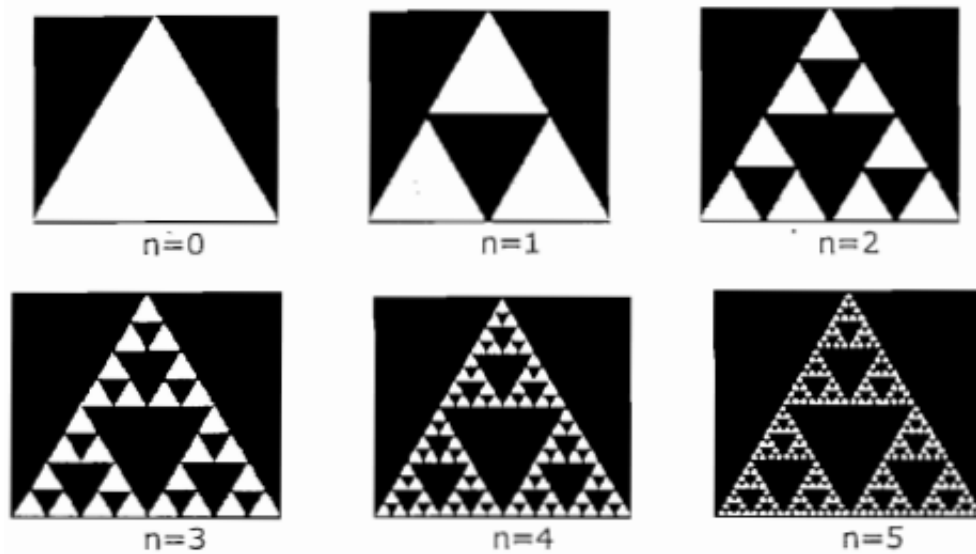


Figura 16. Construcción de un Triángulo de Sierpinski.

Tomado de (Herrera & Inclán, 2004)

El perímetro y la superficie de esta estructura fractal se puede expresar de la siguiente manera.

$$\text{Perímetro} = \left(\frac{3}{2}\right)^n * P \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$\text{Area} = \left(\frac{3}{4}\right)^n * A \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

P= Perímetro del triángulo inicial

A= Área del triángulo inicial

El valor de su dimensión de auto semejanza es:

$$D_H = \frac{\text{Log}N}{\text{Log}\left(\frac{P}{p}\right)} = \frac{\text{Log}3}{\text{Log}\left(\frac{1}{1/2}\right)} = 1.5849 \quad (\text{Ecuación 21})$$

1.3.5.4 Alfombra de Sierpinski

Se divide el cuadrado inicial en nueve cuadrados idénticos y se elimina el central, así teniendo solo ocho cuadrados de un tercio, a cada uno de los ocho cuadrados que quedan se divide otra vez en nueve cuadrados idénticos y se elimina el del

centro. Se repite este proceso en cada iteración y se obtiene la alfombra de Sierpinski. (Herrera & Inclán, 2004)

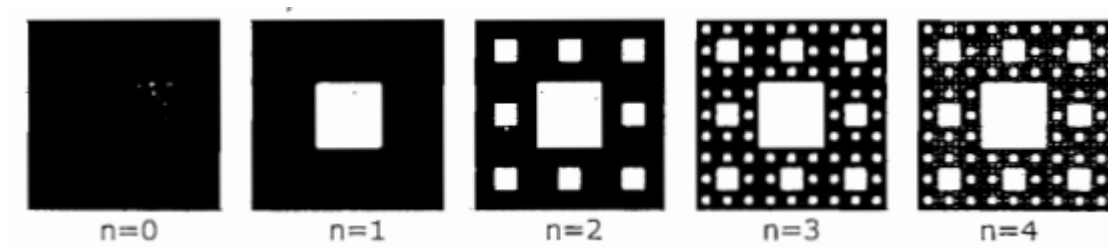


Figura 17. Construcción de una Alfombra de Sierpinski.

Tomado de (Herrera & Inclán, 2004)

El perímetro total en la n-ésima iteración será

$$P_n = 4L_0(8/3)^n \quad (\text{Ecuación 22})$$

El área total en la n-ésima iteración

$$A_n = L_0^2(8/9)^n \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

L_0 : Es la medida del lado del cuadrado inicial.

Su dimensión se expresa de la siguiente manera:

$$D_H = \frac{\text{Log}N}{\text{Log}\left(\frac{P}{p}\right)} = \frac{\text{Log}8}{\text{Log}\left(\frac{1}{1/3}\right)} = 1.8927 \quad (\text{Ecuación 24})$$

1.3.6 Antenas Fractales

Las antenas fractales más estudiadas son las de lámina y alambre, con las antenas de alambre se pueden realizar grandes longitudes en tamaños reducidos por lo que se consideran antenas miniatura, y con esto reducir considerablemente el tamaño de los equipos de comunicación.

Los fractales permiten desarrollar antenas multi banda, con la geometría fractal se obtienen antenas que contienen un solo objeto, copias de el mismo objeto en

diferentes tamaños y esto permite un idéntico comportamiento a diferentes frecuencias. (Lara & Marrero , 2012)

1.3.6.1 Características y Propiedades de las antenas Fractales

Las antenas fractales tienen varias características entre ellas están:

1.3.6.1.1 Antenas multi banda

Para tener una antena independiente de la frecuencia se debe al menos incluir algunos tamaños característicos para que de esta forma pueda operar en varias bandas de frecuencias diferentes. La estructura fractal con forma geométrica auto similar consiste en múltiples copias de esta estructura a diferentes escalas por lo tanto tiene el potencial para crear antenas independientes de la frecuencia o multi banda. Podemos mencionar un ejemplo en el modelo fractal de Sierpinski ya que este puede operar eficientemente sobre varias frecuencias y las bandas pueden seleccionarse modificando la estructura de la misma. (Herrera & Inclán, 2004)

1.3.6.1.2 Mayor efectividad y miniaturización

Las antenas fractales tienen el potencial de ser eficientes sistemas radiantes. La mayoría de los objetos fractales tienen la propiedad de presentar una longitud grande, y volumen o área pequeño. La miniaturización reduce el acoplamiento mutuo, desarrollando diseños más robustos y fiables. (Herrera & Inclán, 2004)

Con la utilización de la geometría fractal en el diseño de antenas se puede superar las limitaciones para mejorar la resistencia de entrada de las antenas ya que son difíciles de acoplar a la fuente de alimentación de las líneas de transmisión. (Herrera & Inclán, 2004).

2. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN

En la actualidad se requiere antenas con un gran ancho de banda y dimensiones más pequeñas que las antenas comunes, por lo tanto, se ha investigado formas fractales en las antenas que cumplan estas condiciones. Para este capítulo se

ha desarrollado dos tipos de antenas fractales, las cuales son geometrías útiles para disminuir el tamaño de la antena, mientras que otras ayudan a integrar características multi banda debido a que tienen propiedades de auto similitud y dimensiones fraccionarias.

Es conveniente adquirir estas antenas debido a que operan simultáneamente en varias bandas de frecuencia.

2.1 Diseño de antenas Fractales de Koch

En la estructura fractal de Koch la longitud efectiva aumenta en cada iteración, manteniéndose la dimensión máxima de la antena constante. La longitud total del monopolo está dada por la siguiente expresión (Castro, 2015) :

$$l = h \left(\frac{4}{3} \right)^n \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

l : longitud efectiva de la antena.

h : altura máxima de la antena (longitud de orden cero)

n : número de iteraciones de la curva.

La longitud para un dipolo de media onda equivale a $\frac{\lambda}{2}$, la longitud de cada brazo del dipolo es $\frac{\lambda}{4}$ por lo cual tenemos la posibilidad de expresar la longitud de cada brazo del dipolo en términos de frecuencia mediante la siguiente ecuación:

$$l = \frac{c}{4f_r} \quad (\text{Ecuación 26})$$

En donde:

l : longitud de un brazo del dipolo.

C : velocidad de la luz en el vacío con un valor de $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

f_r : frecuencia de resonancia de la antena. (MHz)

Si se cambia la ecuación anterior se obtiene la expresión para la frecuencia de resonancia de un dipolo de Koch de media onda (f_k) y se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$f_k = \frac{c}{4l_k} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Con la miniaturización de antenas se trata de diseñar un monopolo de Koch con una frecuencia de resonancia similar a la de un monopolo lineal, pero con menor tamaño. Para conseguir se mantiene la longitud efectiva del monopolo constante y se varia la altura total cada vez que se realice una iteración. (Herrera & Inclán, 2004)

La frecuencia de una antena depende de la longitud física de la misma ya que a mayor tamaño menor es la frecuencia. Al aumentar la longitud efectiva también se aumenta el número de iteraciones, se puede conseguir una resonancia a menor frecuencia a medida que se aumenta el orden del monopolo, manteniendo su altura constante. (Herrera & Inclán, 2004)

El porcentaje de compactación ofrecido por la curva de Koch se obtiene usando la ecuación:

$$\text{Compactación} = \frac{(L_1 * fr_1) - (L_2 * fr_2)}{L_1 * fr_1} * 100\% \quad (\text{Ecuación 28})$$

En donde:

fr_1 y fr_2 : las frecuencias de resonancia

L_1 y L_2 : las longitudes de los dipolos

El porcentaje de disminución entre el dipolo recto y el dipolo fractal se puede calcular así:

$$\% \text{ de reducción} = \frac{(L_{sd} - L_{fd})}{L_{sd}} * 100\% \quad (\text{Ecuación 29})$$

L_{sd} : longitud del dipolo estándar

L_{fd} : longitud del dipolo fractal

2.2 Diseño de antenas triángulo de Sierpinski

El diseño de una antena fractal basado en el triángulo de Sierpinski está dada por dos parámetros: la altura de la antena (h_{max}) y el ángulo de apertura (θ), con estos datos se puede interactuar al momento de diseñar la antena. La altura máxima está definida por la menor frecuencia de operación. (José, 2015).

Por ser un triángulo equilátero el ángulo es de 60° .

Para determinar la altura máxima se utiliza la siguiente fórmula:

$$h_{max} = k \frac{C}{F_n} \delta^n \cos(\theta/2) \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde

F_n : Frecuencia de resonancia del triángulo formado por la n-ésima iteración (MHz)

C : Velocidad de la luz en el vacío (m/s)

h_{max} : Altura superior de un lado del dipolo

δ : Período de operación

n : Número de iteración

θ : Ángulo de apertura

k : Constante depende del tipo de sustrato dieléctrico y del espesor usado 0.152

Los sustratos de micro banda deben colocarse cerca del troquel para minimizar la longitud del cable. El espaciado típico de matriz a sustrato está entre 0.076 mm a 0.152 mm (3 a 6 mils).

Al incrementar las iteraciones fractales autosimilares el triángulo de Sierpinski tiene un creciente comportamiento multi banda. Este comportamiento es periódico en relación a la estructura auto similar de la antena. (Castro, 2015).

La relación entre las diferentes frecuencias de operación de un monopolo de Sierpinski se expresa de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{f_{n+1}}{f_n} \approx 2 \quad (\text{Ecuación 31})$$

Donde:

f_n : Frecuencia de resonancia del triángulo formado por la n-ésima iteración

f_{n+1} : Frecuencia de resonancia del triángulo formado por la n+1 iteración

δ : Período de operación

Como se mencionó anteriormente las alturas de los triángulos formados por las iteraciones se relaciona con las frecuencias de operación de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{h_n}{h_{n+1}} \approx 2 \quad (\text{Ecuación 32})$$

2.3 Especificaciones de la Antena a Diseñar

Para el diseño de las antenas fractales se requiere de herramientas de simulación para obtener un análisis exacto de los mismos. La antena a construir será del método Sierpinski por su comportamiento multi banda. Como se mencionó en el capítulo I la estructura de la antena se construye a partir de un triángulo equilátero que une los puntos medios de sus lados y se obtiene el triángulo central invertido, obteniendo así tres triángulos semejantes los cuales cada uno de ellos será la mitad del tamaño original. Por lo tanto, podemos decir que son iguales al triángulo original pero escalados en un factor de dos.

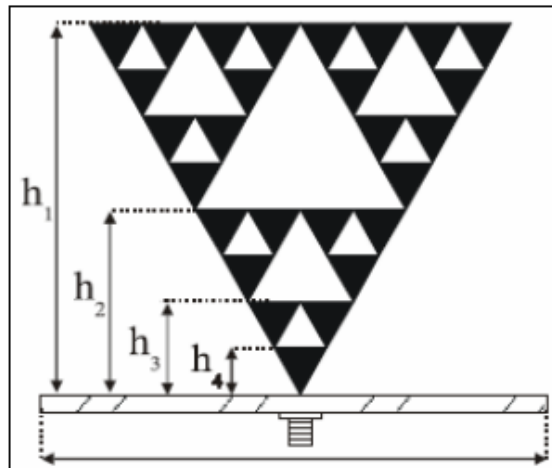


Figura 18. Triángulo de Sierpinski en configuración de monopolo.

Tomado de (Galaviz, 1996)

La frecuencia para las antenas digitales es de 500-700 MHz propuesta en el Capítulo 1, ya que son compatibles con las bandas de televisión digital terrestre. Para el diseño se parte de la frecuencia más baja en este caso será 500 MHz **por** lo tanto si utilizamos una geometría de una iteración aplicados al triángulo equilátero se tendría diagramas de radiación similares para la frecuencia de 1000 MHz.

2.3.1 Cálculo de la altura máxima del diseño de Sierpinski

Para este caso las dimensiones de la altura máxima del dipolo fractal del diseño Sierpinski sería la siguiente:

$$h_{\max} = k \frac{c}{F_n} \delta^n \cos(60/2) \quad (\text{Ecuación 30})$$

$$h_{\max} = 0.152 \frac{3 * 10^8}{500 * 10^6} 2^1 \cos(30)$$

$$h_{\max} = 0.1579 \text{ m}$$

$$\mathbf{h_{\max} = 15.79 \text{ cm}}$$

Donde h_{\max} sería igual a H_0

Para obtener las siguientes alturas se utiliza la ecuación 46

2.3.2 Ecuaciones de las siguientes alturas de Sierpinski

$$\delta = \frac{h_n}{h_{n+1}} \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde:

$$h_{n+1} = \frac{h_n}{\delta}$$

$$h_1 = \frac{15.79}{2} \text{ cm}$$

$$\mathbf{h_1 = 7.895 \text{ cm}}$$

2.3.3 Cálculo de la longitud del triángulo de Sierpinski

Mediante geometría podemos encontrar el valor del lado del triángulo equilátero expresado de la siguiente manera:

$$l = \frac{h_{max}}{\cos 30} \quad (\text{Ecuación 34})$$

Por lo tanto:

$$l = \frac{15.79 \text{ cm}}{\cos 30}$$

$$\mathbf{l = 18.23 \text{ cm}}$$

Hay que tomar en cuenta que nuestro diseño es para un dipolo el cual consta de dos brazos idénticos por lo tanto el procedimiento de diseño se realiza para uno y esos resultados son replicados en el otro brazo.

2.4 Módulos en CST Microwave Studio

CST Microwave Studio es una herramienta de simulación especializada en 3D, permite el análisis ágil y exacto de dispositivos de alta frecuencia como antenas, filtros, acopladores y estructuras planas. Es un programa creado por la empresa CST (*Computer Simulation Technology*), la cual brinda software para el diseño electromagnético en todas las bandas de frecuencia. (González, 2009).

CST Microwave Studio es necesario para la elaboración de antenas que permite realizar con las dimensiones diseñadas y los materiales del sustrato y del triángulo.

Microwave Studio permite un análisis rápido y exacto de las antenas que se van a simular, cuenta con una interfaz muy grande que genera todo tipo de superficies y volúmenes. Dispone de 5 módulos de cálculo:

Transient Solver, Eigenmode Solver, Frequency Domain Solver, Integral Equation Solver, Asymptotic Solver.

El solver que se utiliza en la simulación es el transient solver o solver en el dominio del tiempo el cual consigue resultados de los campos de propagación, además desarrolla resultados en el dominio de la frecuencia como los parámetros de Forward Transmission. Este solver también simula frecuencias con altos rangos. (Computer Simulation Technology, s.f.)

2.5 Simulación de la antena Fractal

En este capítulo se implementará el diseño anteriormente mencionado para llevarlo a cabo en la simulación en el Software CST Microwave Studio.

2.5.1 Generación de la antena Sierpinski en CST

Una vez que se ingresa al entorno de diseño de CST Microwave Studio se crea un nuevo proyecto como se indica en la Figura 19. Después se deberá elegir un área de aplicaciones donde se escogerá MW & RF & Optical en la cual se

encuentra la opción Antennas, como se muestra en la Figura 20. Para la simulación de antenas fractales se escogió la opción Planar (Patch, Slot, etc).

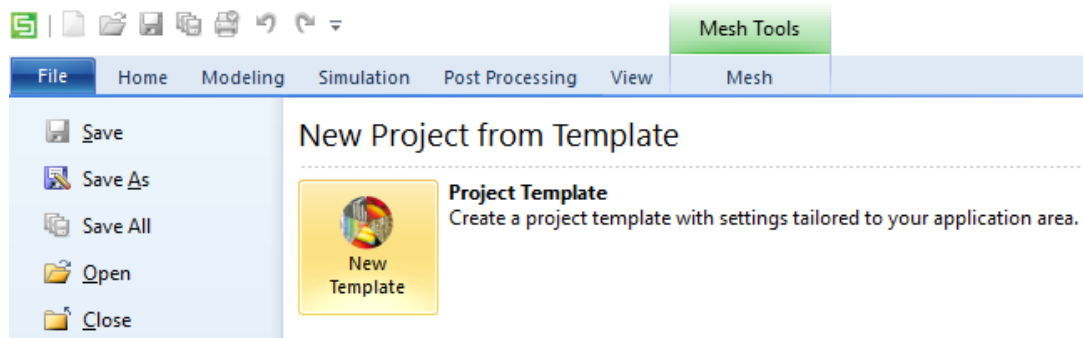


Figura 19. Creación de un nuevo proyecto en CST.

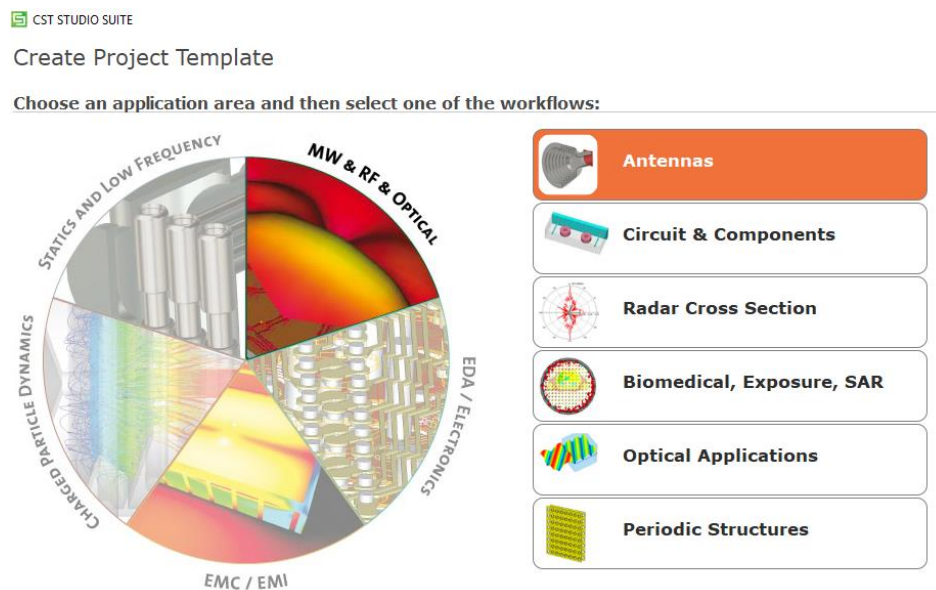


Figura 20. Módulos disponibles de entornos en CST.

Tenemos la opción de usar el solver acorde con la necesidad de nuestra antena, como se detalló en el apartado 2.4. De todos los tipos de solver el más conveniente para este proyecto es Time Domain explicado en la Figura 21, la cual se presenta más pasos para la generación de las antenas fractales que serán explicados a continuación.

Create Project Template

MW & RF & OPTICAL | Antennas | Planar (Patch, Slot, etc.) | **Solvers** | Units | Settings | Summary

The recommended solvers for the selected workflow are:

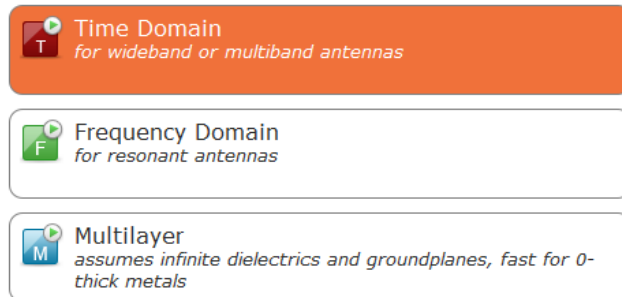


Figura 21. Solver de CST.

En las unidades se definen las dimensiones, las frecuencias, los valores de las antenas que se va a implementar, donde su longitud es expresada en cm y la frecuencia en MHz por lo que se trabaja en la banda de frecuencias UHF (*Ultra High Frequency*).

Al momento de elegir el rango de frecuencias se debe poner números absolutos, los ajustes de frecuencias son importantes debido a que el generador de mallas ajustará el refinamiento de malla.

2.5.2 Sustrato Dieléctrico

Para el diseño de la antena fractal se elaboró el sustrato dieléctrico ya que es un componente necesario en su implementación. Se utilizó el sustrato dieléctrico compuesto por el material FR-4 (*Flame Retardant*), se escogió este material para ser implementado en la construcción. Las dimensiones del sustrato dieléctrico son las siguientes:

Tabla 4.

Dimensiones del Sustrato dieléctrico

Sustrato FR-4	Dimensiones
Alto del sustrato	32 cm
Espesor del sustrato	0.152 cm
Ancho del sustrato	18 cm

- Para definir estos parámetros ubicamos en el CST en Parameter List como se muestra en la Figura 22 Hay que tomar en cuenta que esta dimensión es para un brazo del dipolo como son idénticos el sustrato aumenta el doble en sus dimensiones.

Parameter List					
	Name	Expression	Value	Description	Type
-	anchosus	= 9	9		Undefined
-	altosus	= 16	16		Undefined
-	espesor	= 0.152	0.152		Undefined

Figura 22. Definición de los parámetros para el Sustrato dieléctrico.

- Se escoge la opción de Brick para que se genere un rectángulo como se observa en la Figura 23.

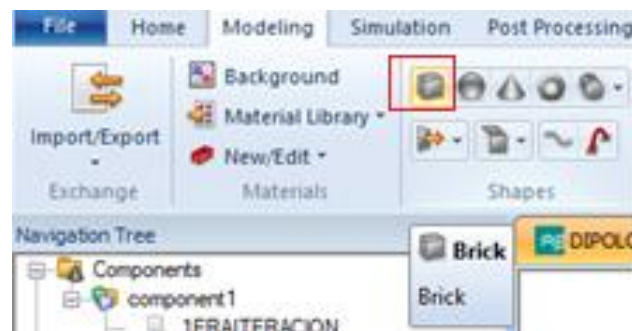


Figura 23. Selección de la Opción Brick.

- Por lo tanto, al momento de seleccionar Brick se abre una nueva ventana donde se debe llenar los datos para ubicar el sustrato y el material de que se desea que este compuesto en este caso será FR-4 como se observa en la siguiente Figura 24.

Brick

Name: SUSTRATO

Umin: ANCHOSUSTRATO Umax: ANCHOSUSTRATO

Vmin: -LARGOSUSTRATO Vmax: LARGOSUSTRATO

Wmin: 0 Wmax: ESPESORSUSTRATO

Component: component1

Material: FR-4 (lossy)

OK Cancel Preview Help

Figura 24. Parámetros para crear el sustrato dieléctrico.

- Una vez ingresado los parámetros se obtiene los resultados como se observa en la Figura 25.

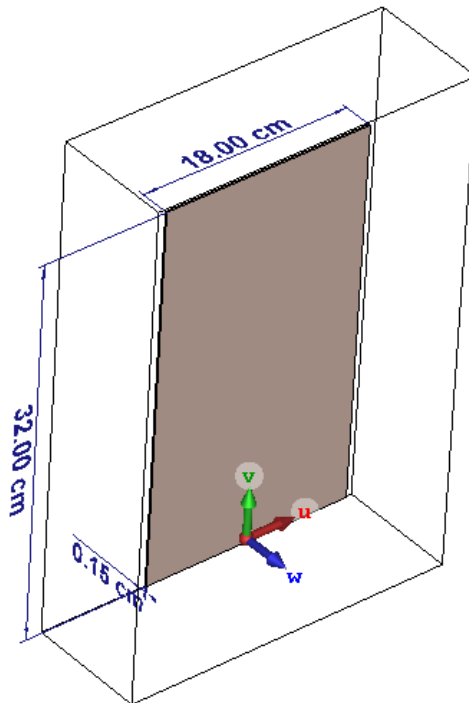


Figura 25. Sustrato Dieléctrico.

2.5.3 Estructura de la antena

La estructura se desarrolló después de obtener los cálculos en el Capítulo 2, por lo tanto, se utilizó esta información, como se observa en la Tabla 5. Cabe recalcar

que esta estructura mencionada es sólo para un brazo del dipolo, el otro será igual, y estos se acoplarán al sustrato diseñado anteriormente.

Tabla 5.

Dimensiones del triángulo Sierpinski

Triángulo	Dimensiones
Alto de Triángulo	15.79 cm
Longitud del Triángulo	18.23 cm

Estas dimensiones serán para el triángulo inicial de Sierpinski como se observa en la Figura 26.

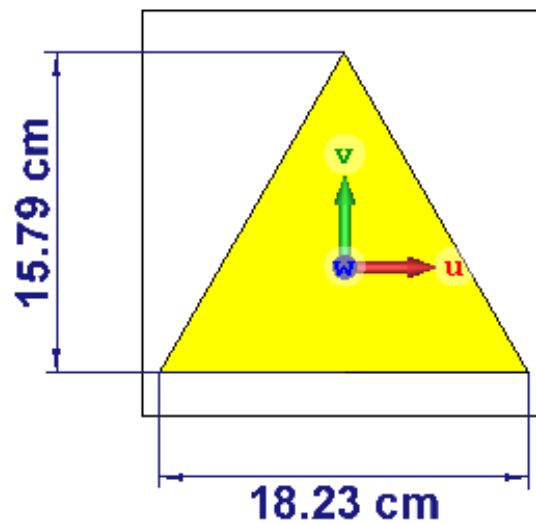


Figura 26. Triángulo inicial de Sierpinski.

Para representar la primera iteración del modelo fractal que se calculó, se dibuja otro triángulo equilátero en donde los vértices deben coincidir con los puntos medios de cada lado del triángulo inicial, por lo tanto, el triángulo será la mitad de las dimensiones de iteraciones anteriores como se muestra en la Figura 27.

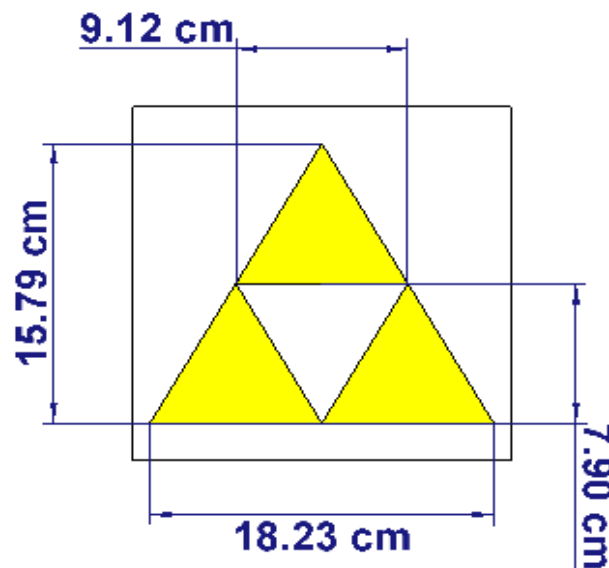


Figura 27. Triangulo Sierpinski Iteración cero y Primera Iteración.

Tabla 6.

Dimensiones de los triángulos según sus iteraciones

Triangulo	Longitud	Alto
Iteración Cero	18.23 cm	15.79 cm
Iteración Primera	9.12 cm	7.90 cm

- Para la construcción de la antena Sierpinski con las dimensiones mencionadas anteriormente, se debe centrar el plano en el sustrato dieléctrico, donde se selecciona la parte frontal del sustrato con la opción “Pick” como se observa en la Figura 28.

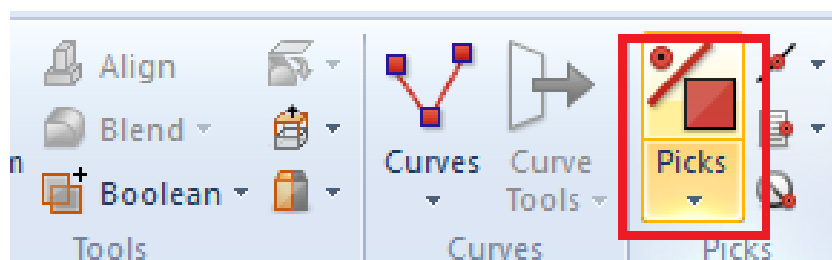


Figura 28. Opción Pick.

- Cuando se escoge esta opción se debe dar doble clic en el sustrato, pero en la parte frontal, como se observa en la Figura 29, después se escoge

la opción “Align WCS with Selected Face”, esto se realiza para poder establecer los datos del triángulo en la parte frontal del sustrato, si no se elige esa opción, se puede tener un diseño no deseado en la parte posterior, teniendo inconvenientes al momento de simular.

Los parámetros se deben ubicar en “Parameter List” como se muestra en la Figura 30.

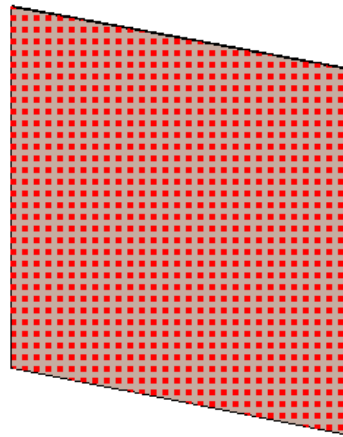


Figura 29. Selección parte frontal del sustrato.

Parameter List					
Filter	Name	Expression	Value	Description	Type
-	ANCHOSUSTR...	= 9	9		Undefined
-	LARGOSUSTR...	= 16	16		Undefined
-	ESPEORSUST...	= 0.152	0.152		Undefined
-	LONGTRIANG...	= 9.115	9.115		Undefined
-	HMAXTRIANG...	= 7.895	7.895		Undefined
<new parameter>					

Figura 30. Parámetros propuestos para el Triángulo.

- Una vez escritos los parámetros en el “Parameter List” se procede a seleccionar la opción “Extrude” como se muestra en la Figura 31, para ingresar estos parámetros presionamos la tecla “Esc” como se muestra en la Figura 32, la ventana para ingresar los datos.

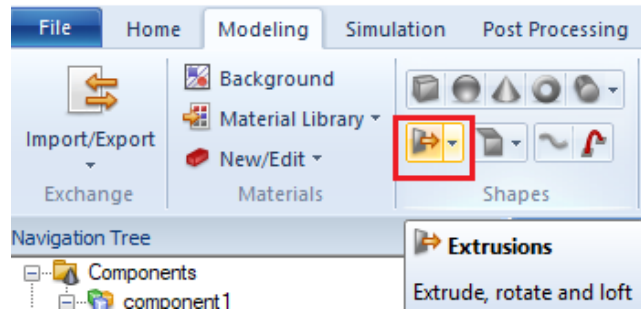


Figura 31. Selección de la opción Extrude.

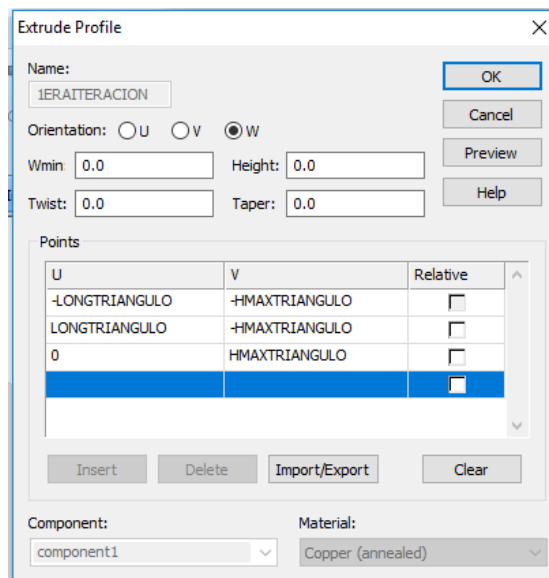


Figura 32. Definir información para crear el triángulo.

- Definiendo los parámetros anteriores se obtuvo la Figura 33.

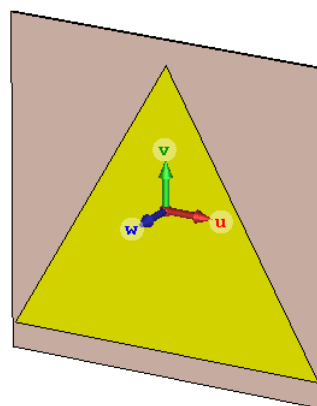


Figura 33. Desarrollo del Triángulo Principal.

- Para empezar a desarrollar las demás iteraciones tenemos que ubicar el plano con el centro del triángulo en su lado inferior, para seleccionar el centro del triángulo se tiene la opción “Pick Points” como se observa en la Figura 34.

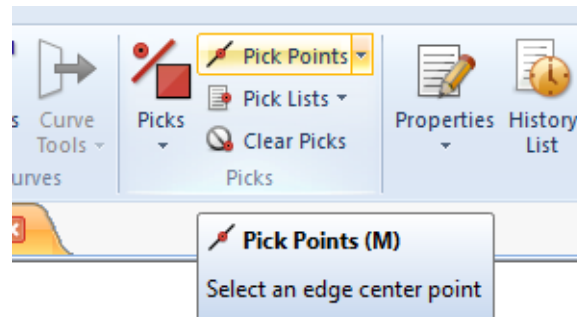


Figura 34. Opción Pick Points.

- Seleccionamos el lado donde se quiere alinear el plano y luego escogemos la opción “Align WCS with Selected” Point como se muestra la Figura 35. Una vez realizado este paso obtenemos la alineación con el centro del triángulo para proceder con la siguiente iteración.

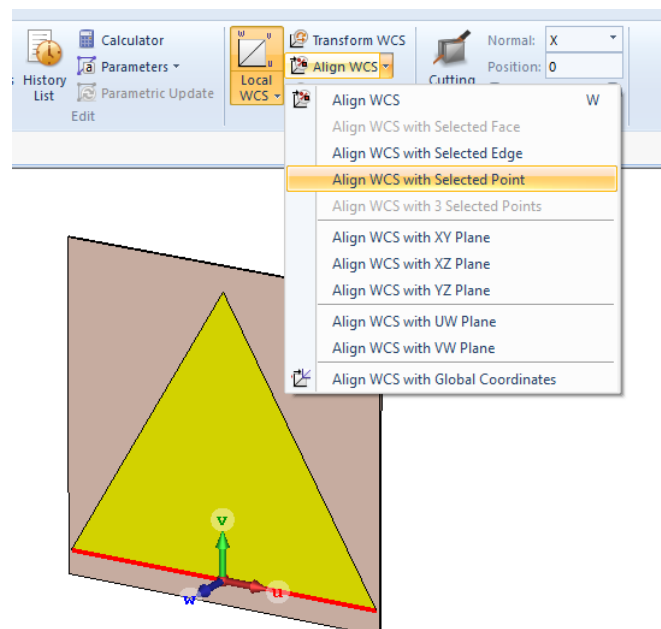


Figura 35. Alineación del plano.

- Por lo tanto, para la siguiente iteración se repite el proceso de la Figura 31 y se debe llenar los datos con los nuevos datos como se observa en la Figura 36.

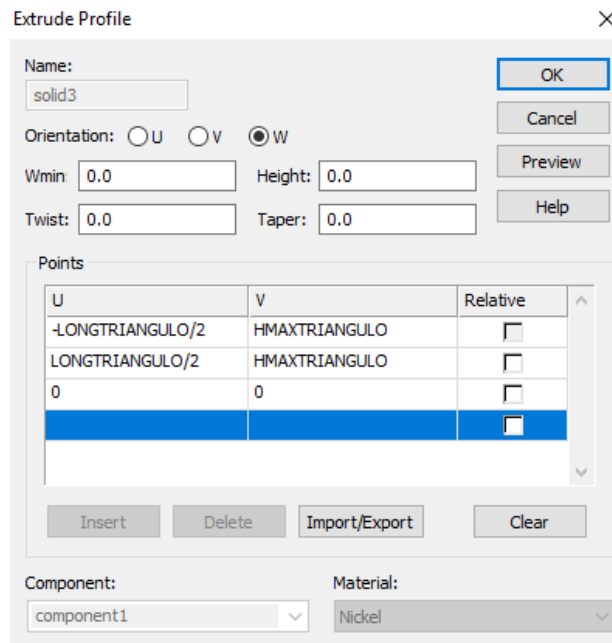


Figura 36. Parámetros para la creación del triángulo Sierpinski en su siguiente iteración.

- Una vez aceptado se despliega una nueva ventana y se escoge la opción “Cut Away Highlighted shape”, esto permite recortar el pedazo del triángulo para tener el resultado como se observa en la Figura 37.

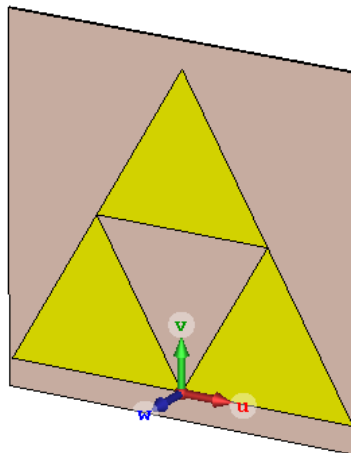


Figura 37. Primera Iteración de Sierpinski.

- Finalmente, para realizar el dipolo se necesita dos brazos. Debido a que ya se encuentra elaborado el primer brazo, se aconseja repetir los pasos de la Figura 31 hasta la Figura 37, con los mismos parámetros obteniendo como resultado la siguiente Figura 38.

- La alimentación de la antena fractal es de 300Ω la cual está representada por un puerto discreto ubicado en el centro de los dos brazos del dipolo con una distancia de 1cm como se muestra en la siguiente Figura 38.

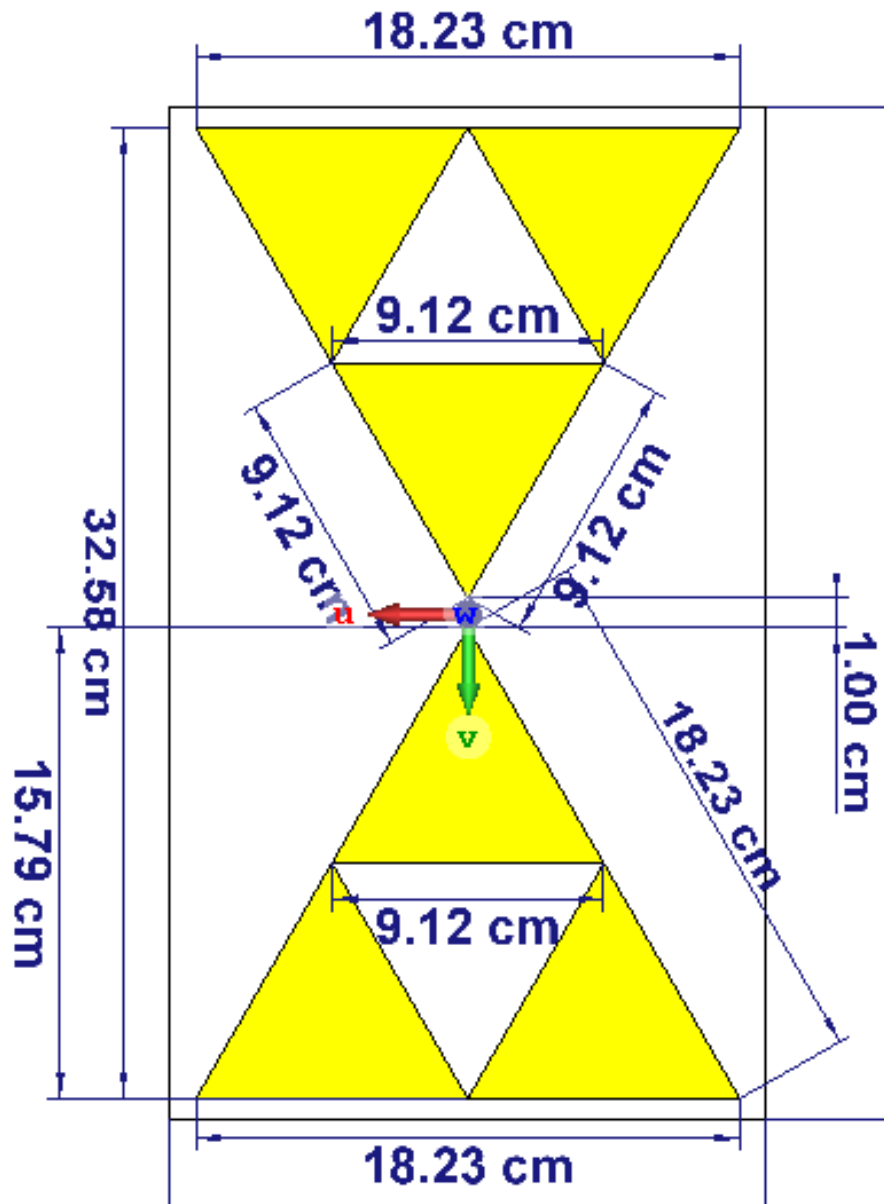


Figura 38. Antena Dipolo Fractal Triángulo de Sierpinski con la segunda iteración

2.6 Construcción de la antena fractal Sierpinski

Estas antenas Fractales son diseños innovadores y fáciles para su construcción ya que no se utilizan muchos materiales y sus partes a construir tampoco son

complejas. El diseño de antenas es un desarrollo complicado el cual puede tener errores al momento de su construcción, para esta antena se utilizó componentes de fácil acceso, permitiendo tener un desarrollo aceptable en tiempo y costo.

Por lo tanto, se presentan los elementos y pasos empleados para la construcción de la antena fractal de Siperpinski. Se utilizó una baquelita de fibra de vidrio con cobre de un solo lado de la hoja de acuerdo a las dimensiones planteadas en el diseño. Estas baquelitas se consiguen en diversas medidas y hay que adaptarlas de acuerdo al cálculo del diseño, en este caso es 32.58 cm x 18.23 cm, pero el mismo CST nos permite minimizar la altura obteniendo mejores resultados en las frecuencias, por lo cual se la construyó con las siguientes dimensiones 30.95 x 17.28 cm, como se observa en la Figura 39.

La placa posee una separación de 1 cm entre los dos triángulos de Sierpinski, como se muestra en la Figura 40, debido a que esta distancia nos permite colocar un balun, el cual es un acoplador de impedancia de 300 ohmios a 75 ohmios.

Figura 39. Baquelita para realizar la antena

2.6.1 Pasos para la construcción de la antena



Exportamos el archivo que lo trabajamos en CST en el formato (Gerber Single Layer) para poder imprimirlo en la baquelita, utilizamos una máquina que nos ayuda a cortar e imprimir con precisión de acuerdo a las medidas propuestas, después se limpió la superficie teniendo cuidado en no tocar la parte pulida para evitar algún daño en el procedimiento. La máquina está programada para que

trace el triángulo de Sierpinski de acuerdo al archivo que exportamos. Este proceso se enseña en la Figura 41.

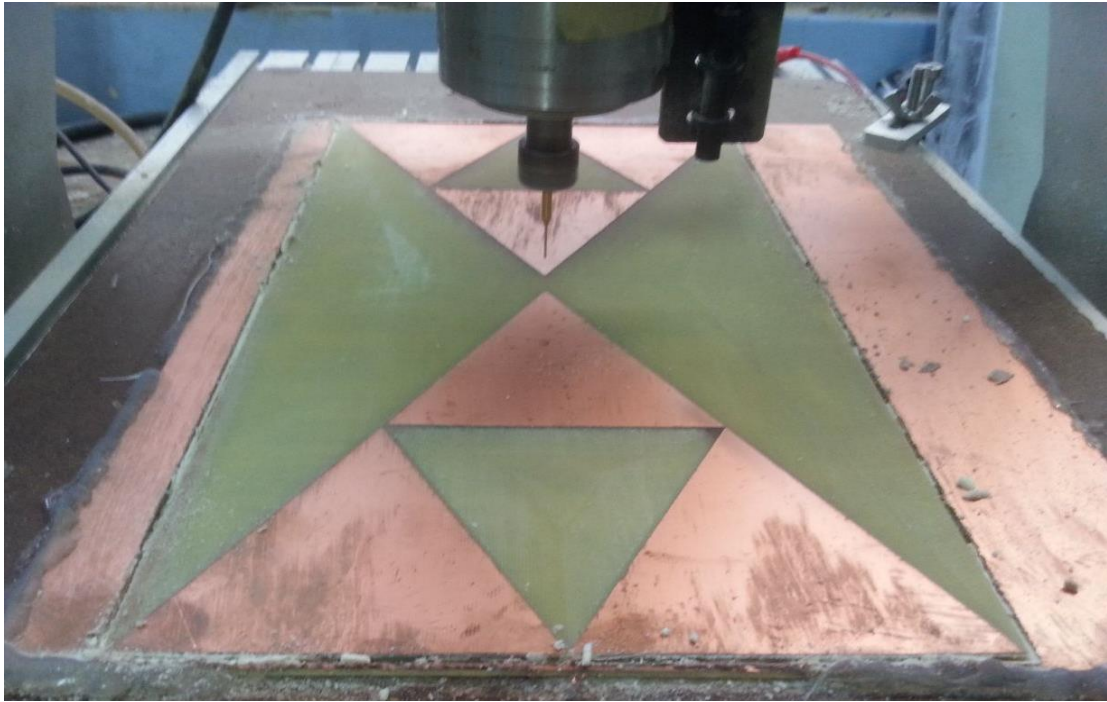


Figura 40. Diseño del triángulo de Sierpinski

Cuando la superficie se seca, se coloca la estructura en un recipiente para cubrir con el cloruro férrico toda la placa, es necesario mover varias veces para que realice el ataque químico al área completa, de esta manera se elimina todo el cobre que no es necesario.

Después de unos minutos se puede observar como el cobre se disuelve y se tienen las pistas completamente delineadas como se observa en la Figura 41.

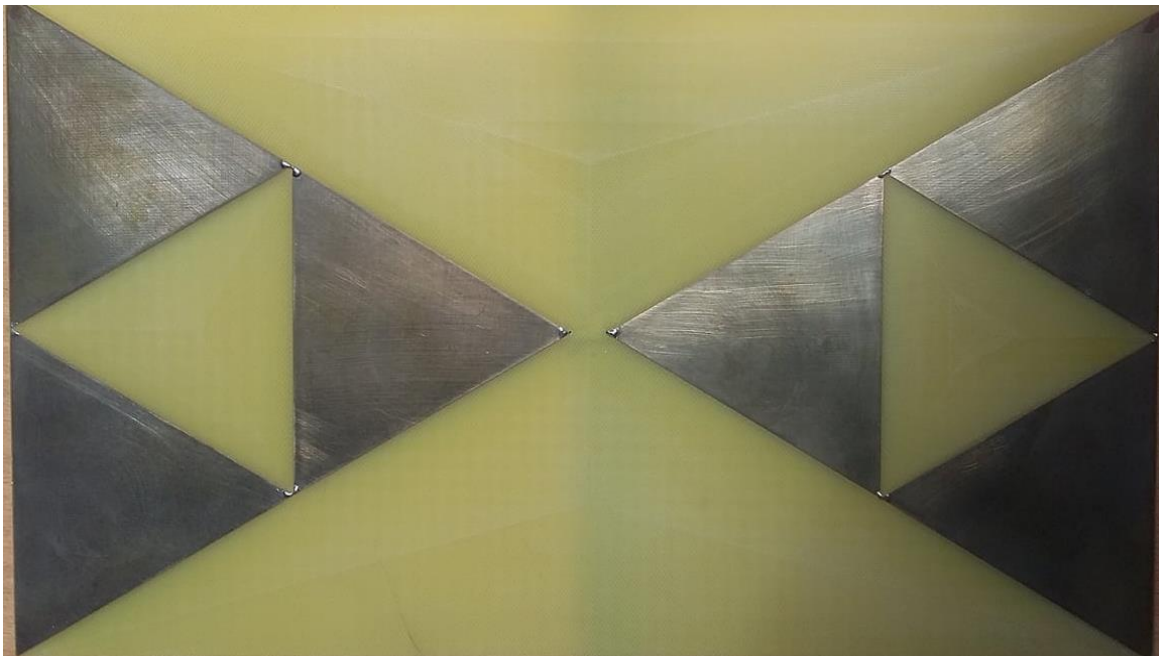


Figura 41. Pistas después de la reacción química

A continuación, se realiza con una broca pequeña el agujero en el vértice superior de cada triángulo de Sierpinski, para poder colocar el balum como se observa en la Figura 42.

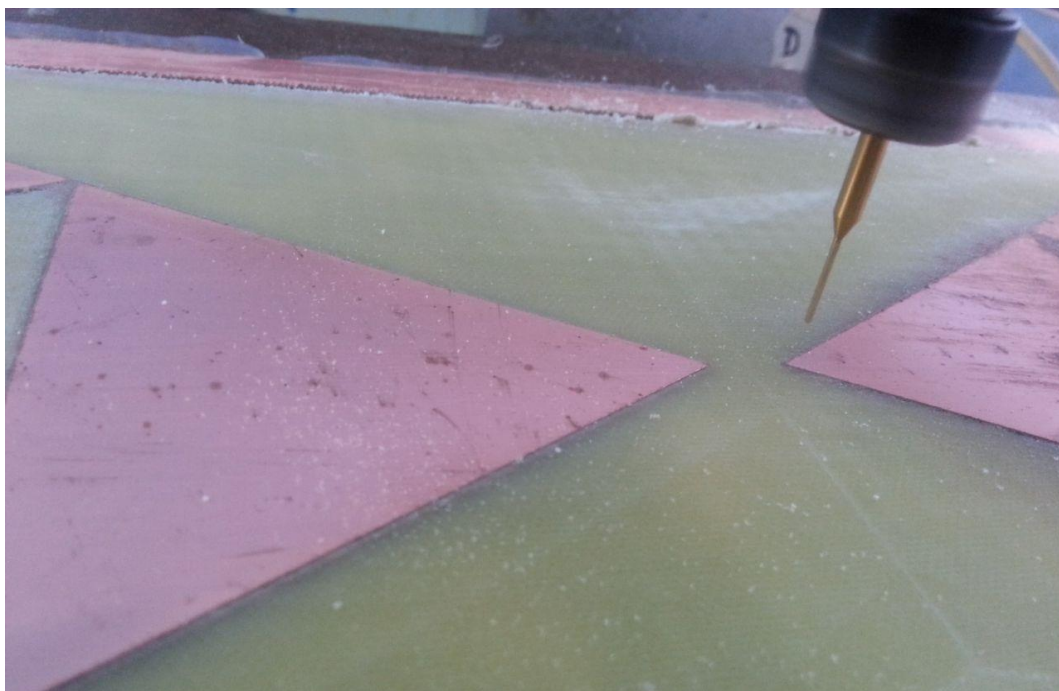


Figura 42. Perforación en los dos triángulos de Sierpinski

Finalmente se realizó el acoplamiento con un balun de 300 ohmios a 75 ohmios con el objetivo de cubrir el rango de las bandas de frecuencias de 500 a 700 MHz. Este balun es un adaptador de impedancias el cual convierte líneas de transmisión simétricas en asimétricas.

Para la medición de la impedancia de entrada de la antena realizamos las ecuaciones mencionadas en el apartado 3.2.

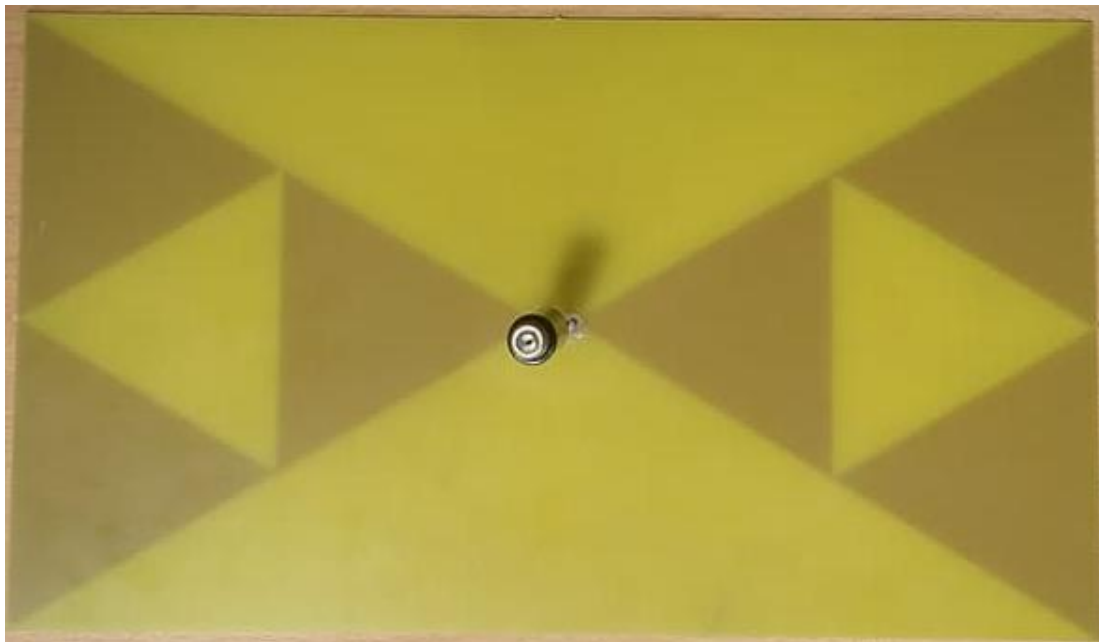


Figura 43. Implementación del Balun

2.6.2 Estructura de la antena en el laboratorio

Una vez construida la antena, se utilizó el analizador de espectro marca Keysight N9912A que posee un ancho de banda de 4 GHz a 6 GHz y una impedancia de entrada de 50 ohmios, perfecto para realizar mediciones a la antena fractal Sierpinski que tiene un rango de 500 MHz a 700 MHz, pero una impedancia de 75 ohmios.

Por lo tanto, para poder armar la antena con el equipo y obtener los resultados esperados fue necesario colocar un balun de 50 ohm N Male a 75 Ohm F Female de la marca Pasternack, así las impedancias del equipo se acoplarán con la impedancia de la antena trabajando conjuntamente a 75 ohmios.

El equipo realizó un barrido en frecuencias desde los 400 MHz hasta los 800 MHz observando las bandas de frecuencias para las que fue diseñado.

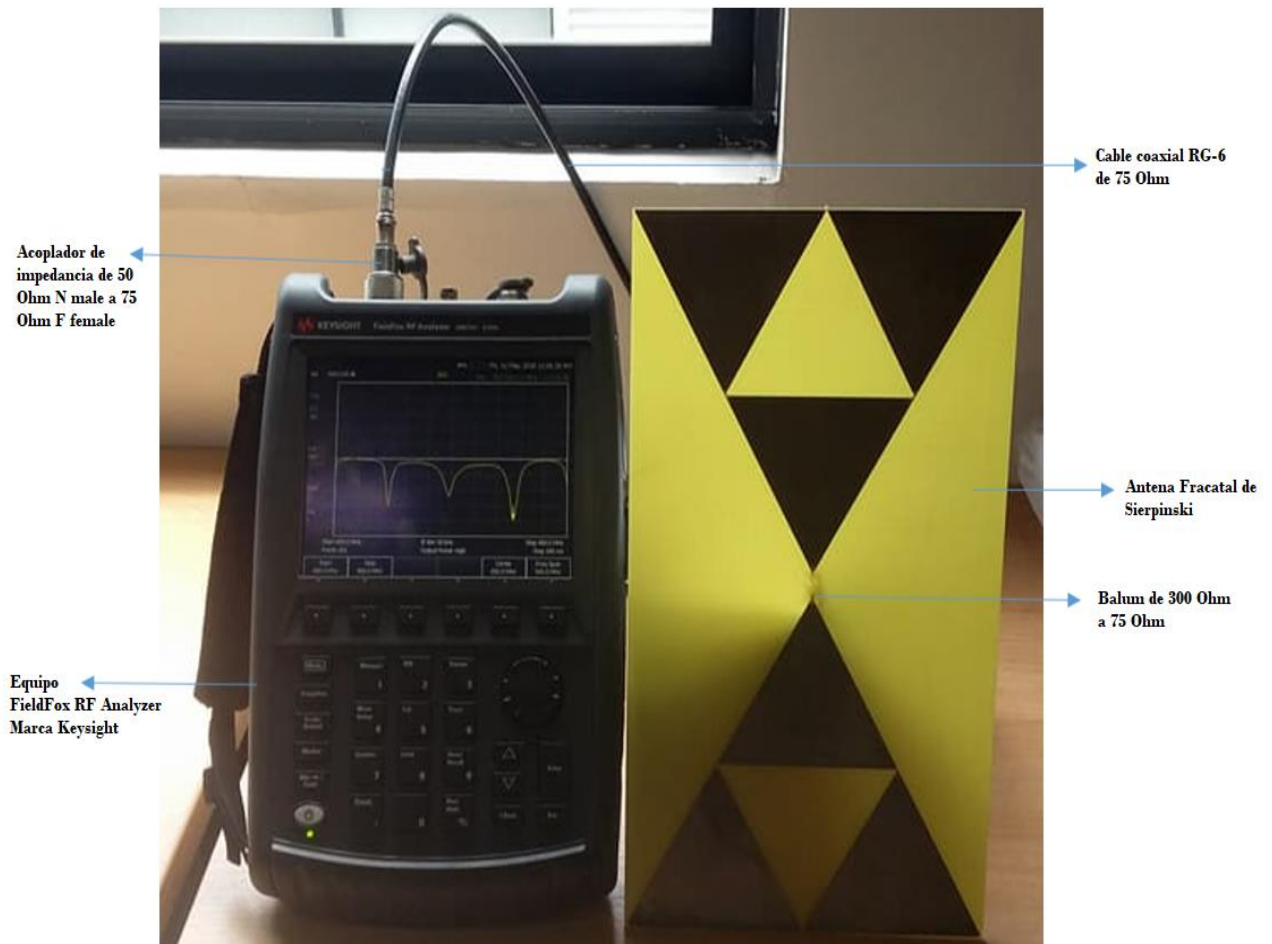


Figura 44. Equipos utilizados en las pruebas de laboratorio

3. COMPARACION DE RESULTADOS

3.1 Resultados de la antena Sierpinski en CST Microwave Studio

La antena fractal diseñada por el método de Sierpinski en su primera iteración logra tener un mejor acople en el rango especificado para las frecuencias de 475 MHz y 732 MHz. Por lo tanto, se muestra en la Figura 45 el coeficiente de reflexión S_{11} Y el voltaje de la onda estacionaria Figura 46.

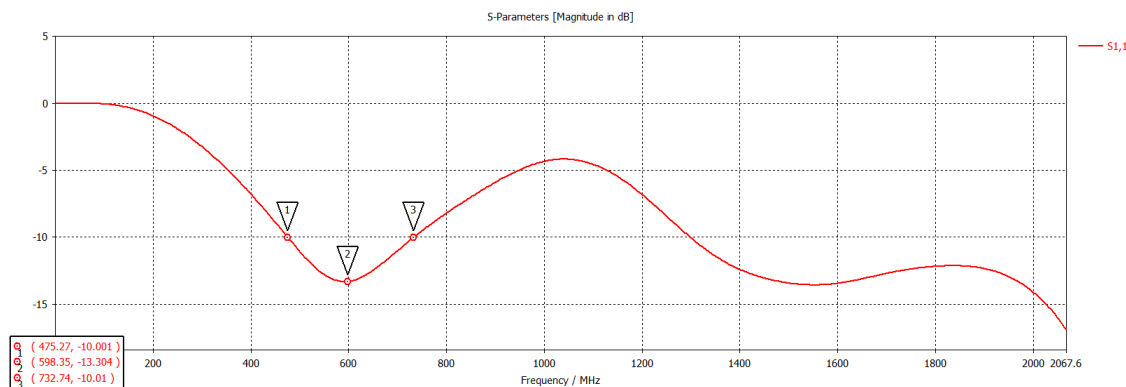


Figura 45. Coeficiente de reflexión

Podemos observar la razón de onda estacionaria (SWR) el cual es inferior a 2 en las frecuencias mencionadas.

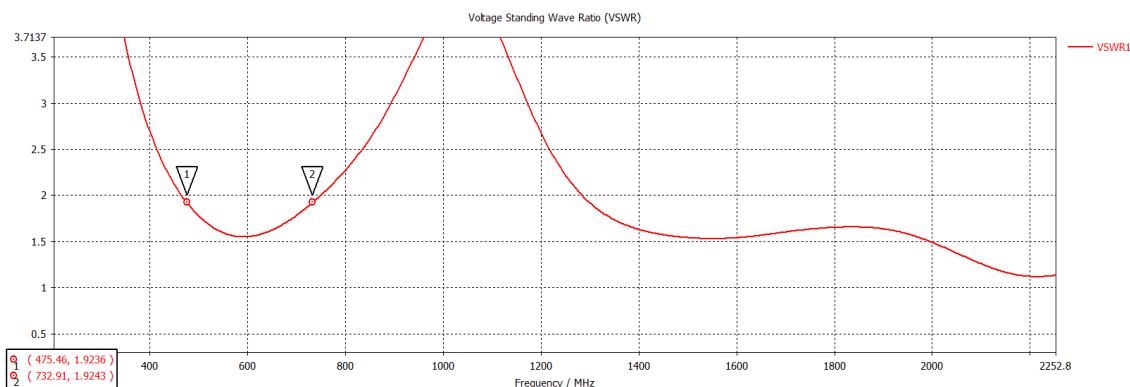


Figura 46. Razón de Onda Estacionaria SWR

Como se puede observar la antena tiene un rango de trabajo de 475 a 732 MHz, la cual ocupa un ancho de banda de 257 MHz.

En base a los resultados obtenidos se decide optimizar el diseño de la antena anterior propuesta para alcanzar las frecuencias deseadas. Obteniendo los siguientes valores:

Tabla 7.

Dimensiones de la antena Optimizada

Triangulo	Longitud	Alto
Iteración Cero	17.28 cm	14.97 cm
Iteración Primera	8.64 cm	7.485 cm

Estos valores se puede modificar en la Figura 31, y para actualizar en el CST solo se debe presionar F6.

Una vez actualizada la antena a construir se muestra en la Figura 47.

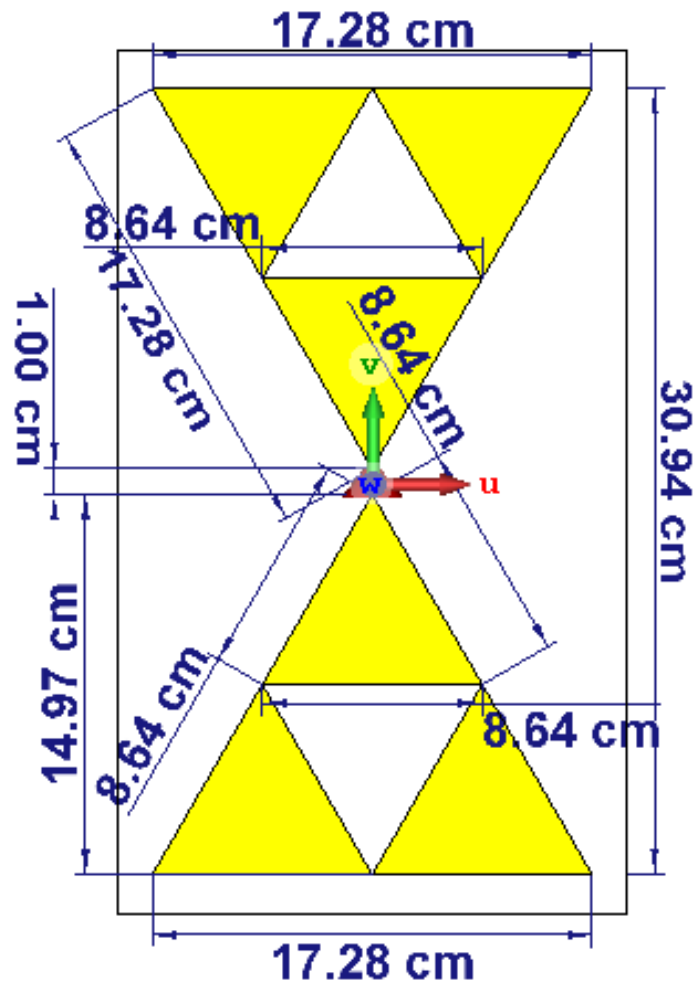


Figura 47. Antena Dipolo Fractal Triangulo de Sierpinski con la segunda iteración Optimizada.

En los parámetros S se puede analizar que optimizando la antena como se muestra la Figura 48 se puede obtener las frecuencias deseadas para televisión digital con un ancho de banda que abarca desde 500 hasta 771 MHz, un SWR menor a 2 en toda la banda de trabajo y para la frecuencia central de 635 MHz tiene un SWR= 1.55 como se muestra en la Figura 49 y Figura 50 respectivamente.

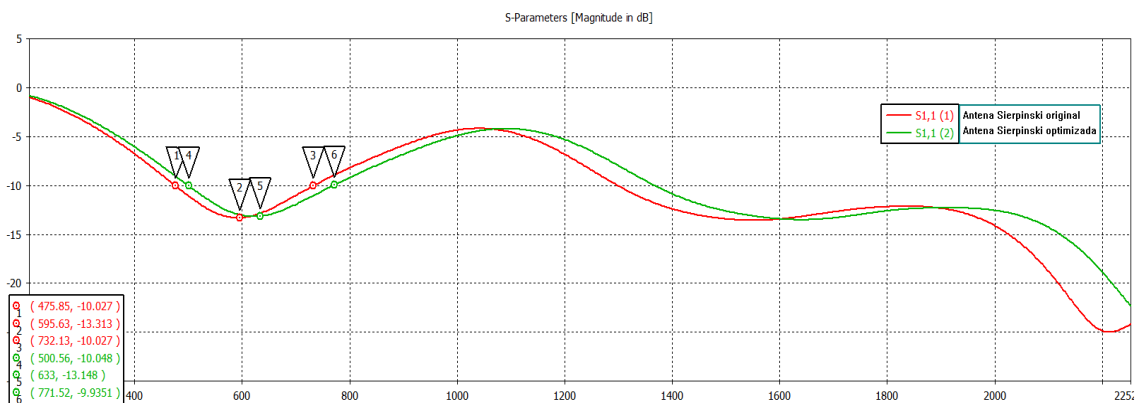


Figura 48. Diferencia entre la antenna original y la antenna optimizada

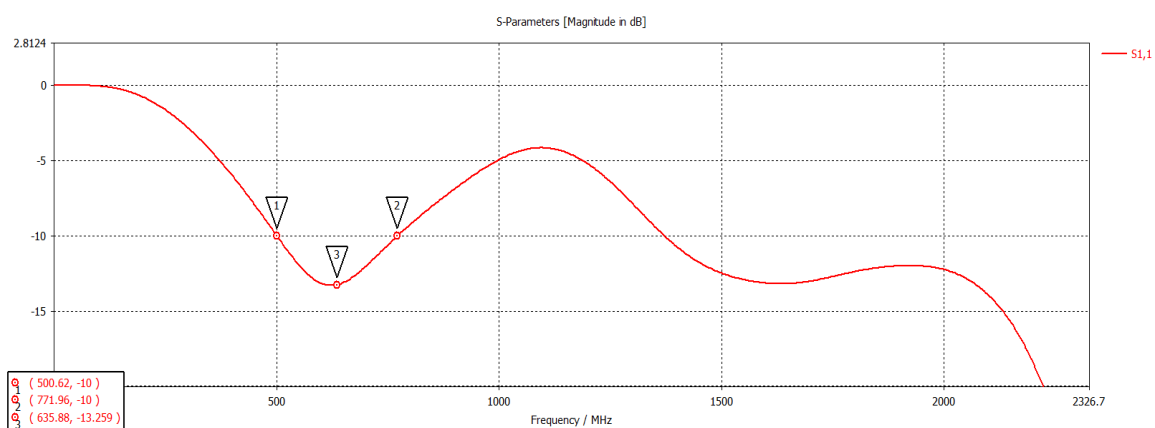


Figura 49. Coeficiente de Reflexión antenna Optimizada

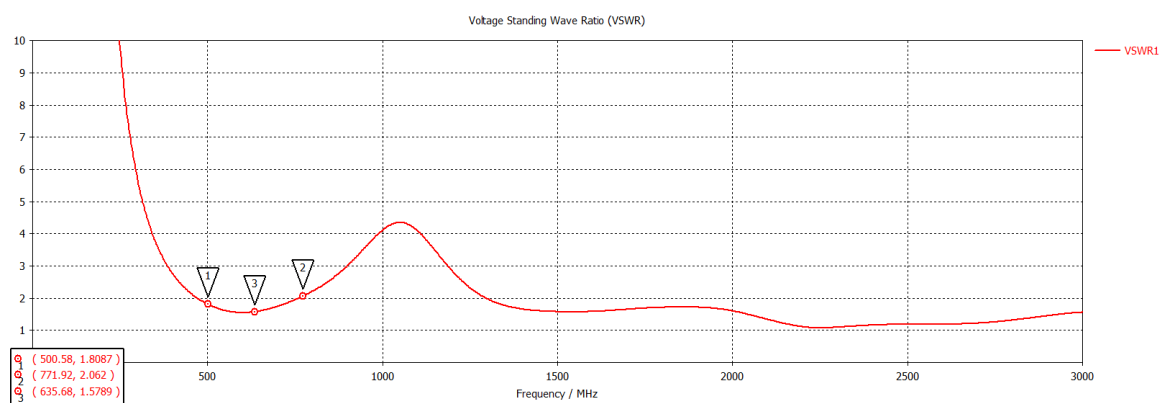


Figura 50. Razón de Onda Estacionaria SWR de antenna Optimizada

La ganancia de la antenna Sierpinski se muestra en 3 dimensiones, para la frecuencia de 500 MHz es de 2.413 dB.

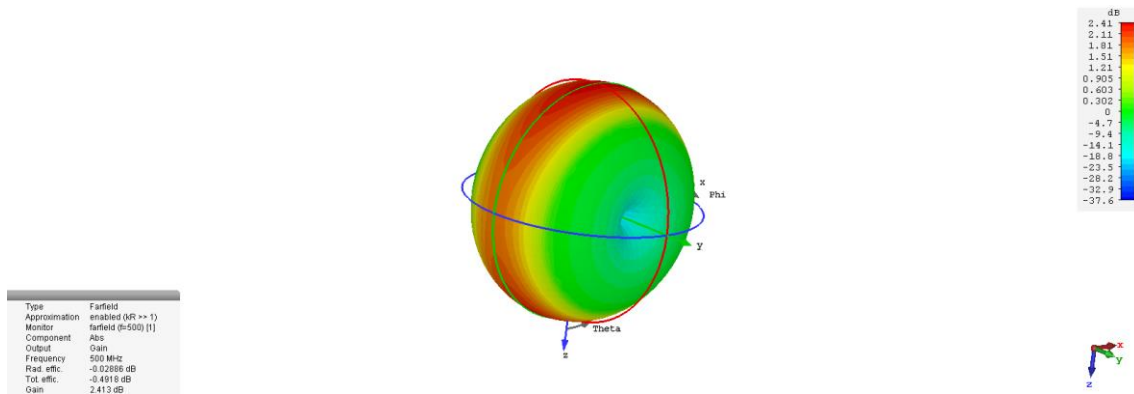


Figura 51. Diagrama de ganancia para la frecuencia de 500 MHz

La ganancia de la antena Sierpinski en la frecuencia de 600 MHz es de 2.963 dB

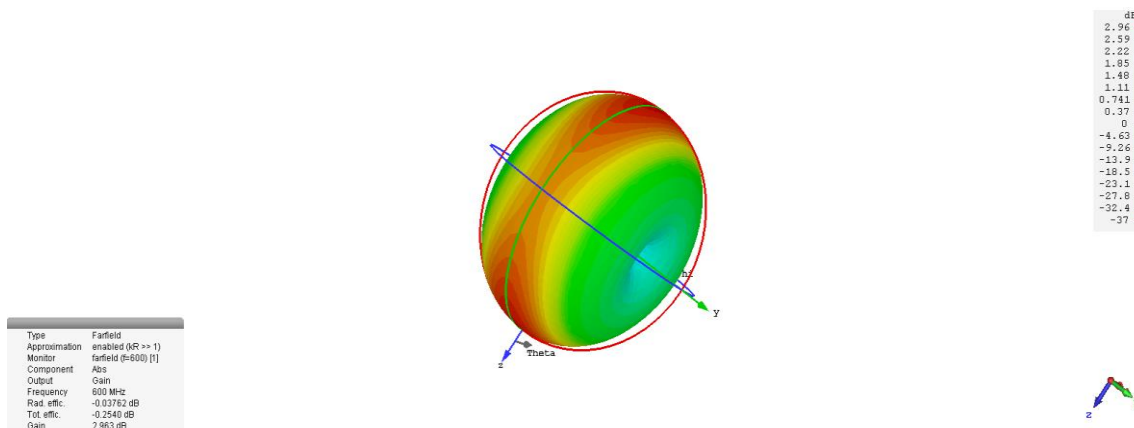


Figura 52. Diagrama de ganancia para la frecuencia de 600 MHz

La ganancia de la antena Sierpinski en la frecuencia de 700 MHz es de 3.496 dB

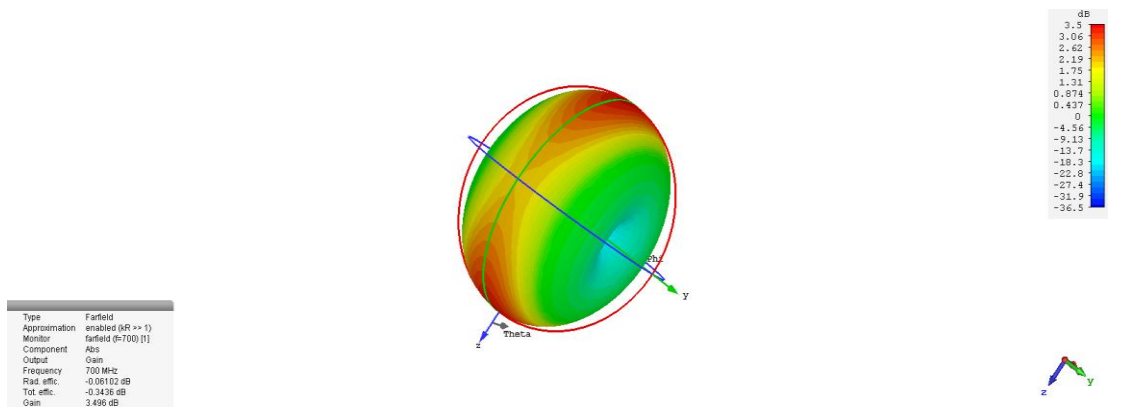


Figura 53. Diagrama de ganancia para la frecuencia de 700 MHz

En la Figura 53 se puede ver la ganancia de la antena con un valor máximo de 3.364 dB para la frecuencia de 700 MHz Mientras aumenta el rango de frecuencia la ganancia también aumenta.

3.1.1 Parámetros de Radiación

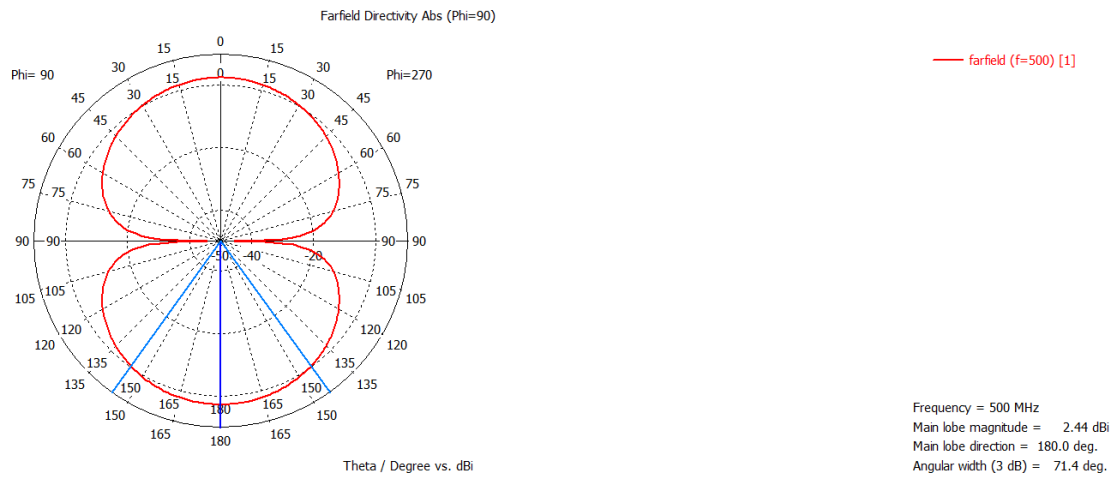


Figura 54. Parámetro de radiación para la frecuencia de 500 MHz

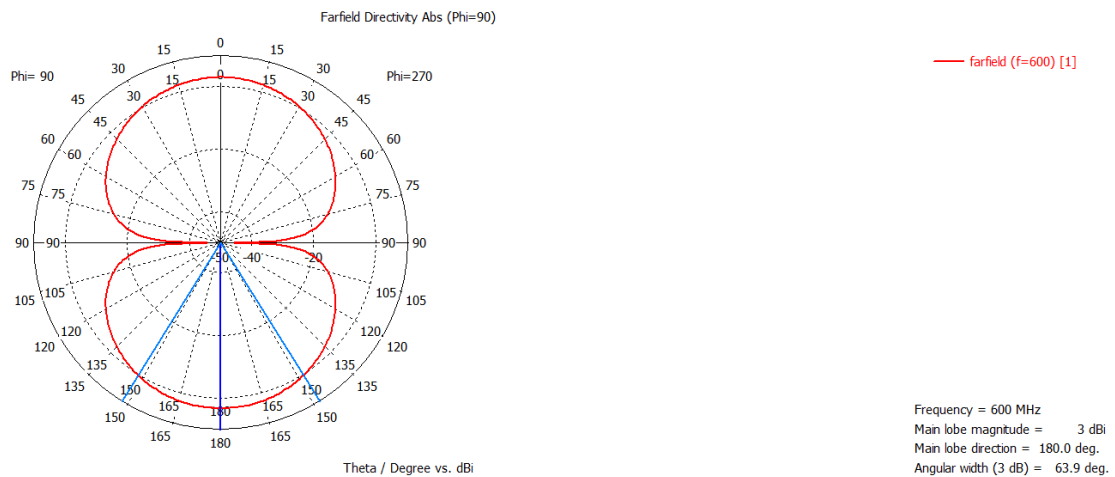


Figura 55. Parámetro de radiación para la frecuencia de 600 MHz

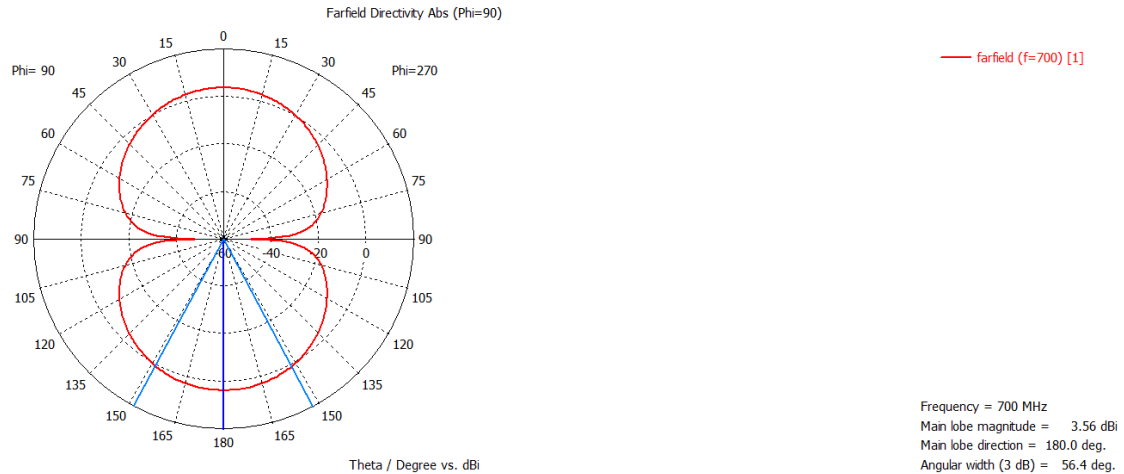


Figura 56. Parámetro de radiación para la frecuencia de 700 MHz

3.2 Resultados de la antena Sierpinski en el laboratorio

Una vez construido el prototipo de la antena fractal Sierpinski con su primera iteración, diseñada en CST Studio se llevó a cabo las mediciones en el laboratorio con el analizador de espectros especificado en el numeral 2.5.2, por lo tanto, en la Figura 57 podemos observar las frecuencias en las que resuena en forma lineal, aplicando la ecuación 35 para lograr obtener el coeficiente de reflexión en dB, teniendo en cuenta el rango en la cual fue diseñada la antena fractal. Se observa en la Figura 58 que las frecuencias resuenan en 486 MHz, 593 MHz y 706 MHz, estas frecuencias pertenecen al rango de nuestra antena a diseñar.

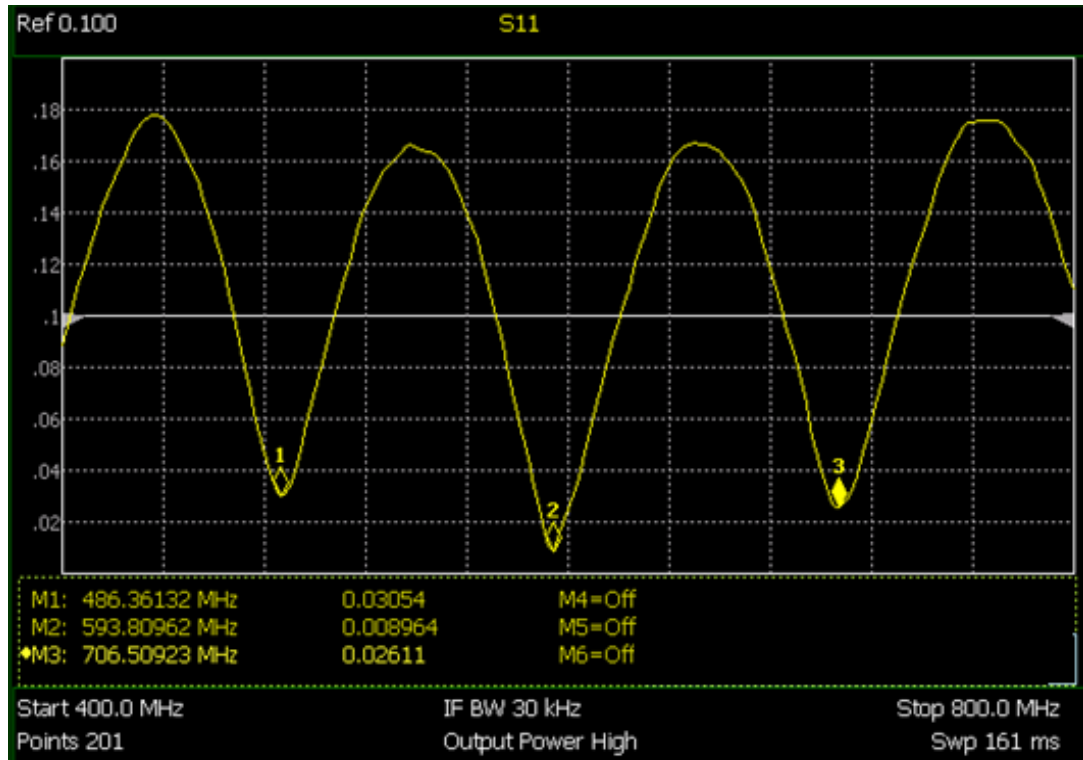


Figura 57. Coeficiente de reflexión lineal

Aplicando el coeficiente de reflexión de cada frecuencia en resonancia, se puede comparar los valores obtenidos con la Figura 58, viendo estos que son exactos con los calculados.

$$S_{11} = 20 * \log_{10} * \Gamma \quad (\text{Ecuación 35})$$

Para la frecuencia 486 MHz

$$S_{11} = 20 * \log_{10} * 0,03054 \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$S_{11} = -30,30 \text{ dB}$$

Para la frecuencia 593 MHz

$$S_{11} = 20 * \log_{10} * 0,008964 \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$S_{11} = -40,95 \text{ dB}$$

Para la frecuencia 706 MHz

$$S_{11} = 20 * \log_{10} * 0,02611 \quad (\text{Ecuación 38})$$

$$S_{11} = -31,66 \text{ dB}$$

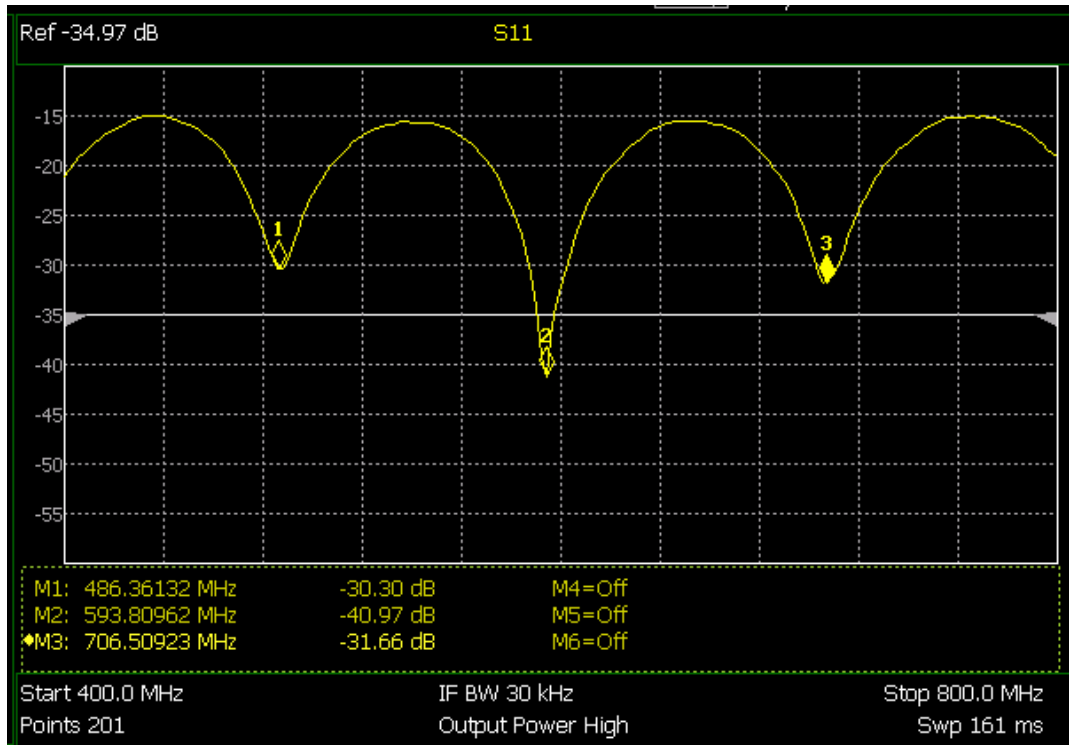


Figura 58. Coeficiente de reflexión

En la pérdida de retorno se utiliza la ecuación 36 la cual es el inverso de S_{11} en general expresado en dB como se muestra en la Figura 59.

$$RL = -20 * \log_{10} * \Gamma \quad (\text{Ecuación 35})$$

Para la frecuencia 486 MHz

$$S_{11} = -20 * \log_{10} * 0,03054 \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$S_{11} = 30,30 \text{ dB}$$

Para la frecuencia 593 MHz

$$S_{11} = -20 * \log_{10} * 0,008964 \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$S_{11} = 40,95 \text{ dB}$$

Para la frecuencia 706 MHz

$$S_{11} = -20 * \log_{10} * 0,02611 \quad (\text{Ecuación 38})$$

$$S_{11} = 31,66 \text{ dB}$$

Estos valores calculados son similares a los leídos en el analizador de espectros, como se muestra en la Figura 59, puede variar dependiendo de algunos factores en este caso por el aumento de frecuencia.

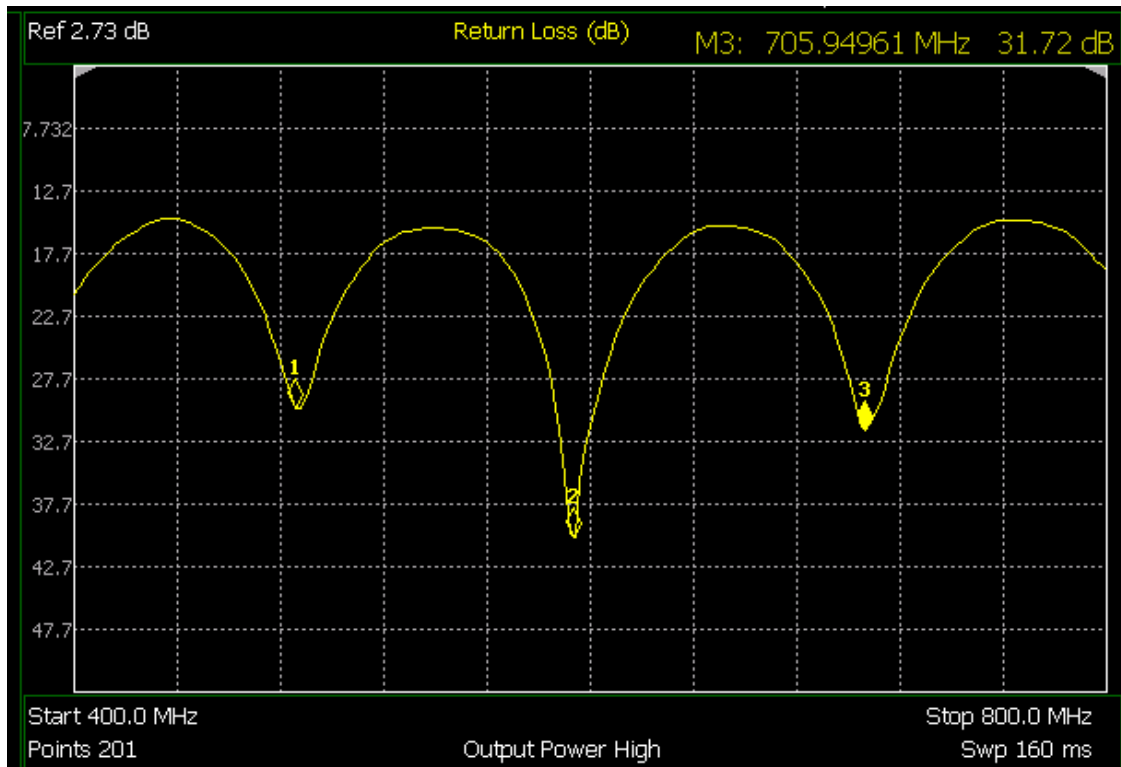


Figura 59. Perdida de retorno

También observamos que los valores obtenidos de ROE (Relación de onda estacionaria) para la banda de frecuencia modulada de 486 MHz es 1.066, 593 MHz es 1.020 y para 706 es 1.053. Estos valores son los esperados, y similares a los calculados en la simulación, debido a que se encuentran en el rango menor a 2, como se muestra en la Figura 60. Un sistema puede fallar por muchas razones, unas de las más comunes son los conectores mal ubicados o cables dañados. Con la ecuación 39 se calcula la relación de onda estacionaria como se muestra a continuación:

$$SWR = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (\text{Ecuación 39})$$

Para la frecuencia 486 MHz

$$SWR = \frac{1+0,03054}{1-0,03054} \quad (\text{Ecuación 40})$$

$$SWR = 1.06$$

Para la frecuencia 593 MHz

$$SWR = \frac{1+0,008964}{1-0,008964} \quad (\text{Ecuación 41})$$

$$SWR = 1.02$$

Para la frecuencia 706 MHz

$$SWR = \frac{1+0,02611}{1-0,02611} \quad (\text{Ecuación 42})$$

$$SWR = 1.05$$

Los valores calculados son similares a los obtenidos en el analizador de espectro como se muestra en la Figura 60.

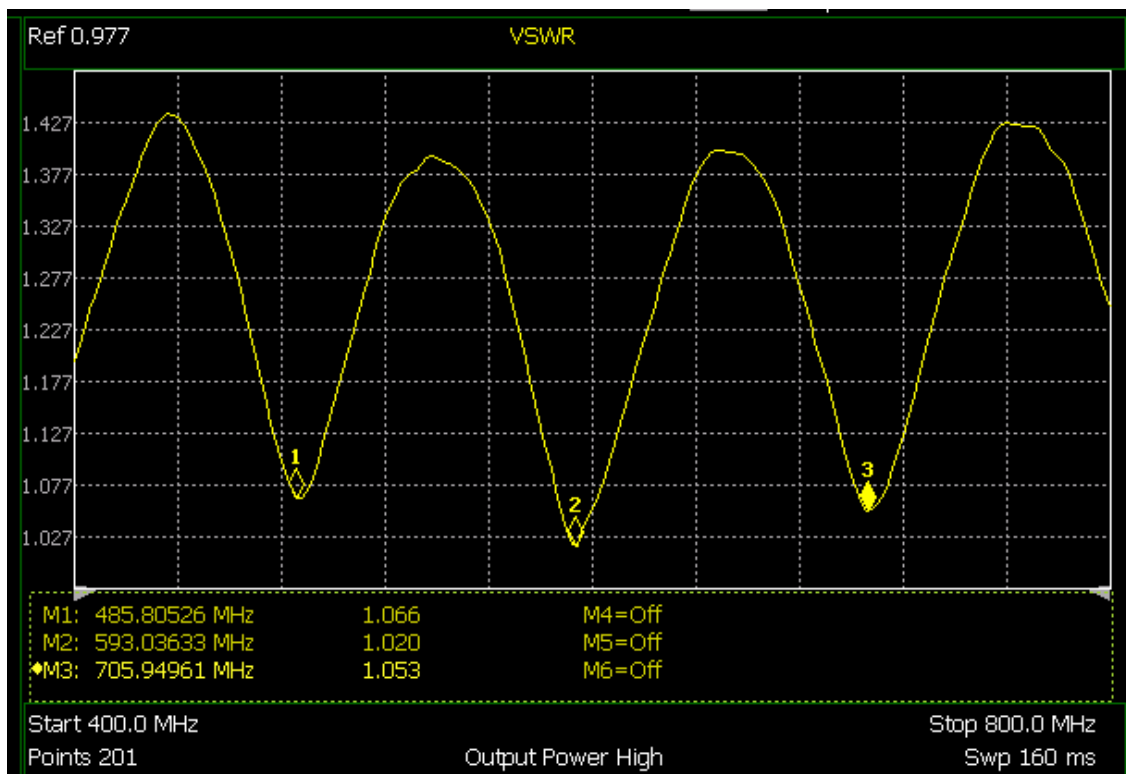


Figura 60. Relación de onda estacionaria o Voltaje SWR

El ROE es la relación que existe entre los picos y los valles de tensión por lo tanto es el máximo y mínimo. Si la adaptación no es la adecuada esta relación crece, si este número resultante es mayor a 2 peor será la adaptación. Si el ROE estaría adecuado su valor sería 1.1.

Con las ecuaciones anteriormente calculadas podemos obtener la impedancia de entrada de la antena para las siguientes frecuencias, cabe recalcar que la impedancia que una antena obtiene en sus terminales los cuales son conectados a una línea de transmisión puede ser representada por un puerto la cual se denomina Z_A , mediante la ecuación 43 se obtiene la impedancia de entrada de la antena en ohmios.

$$\Gamma = \frac{\text{onda reflejada}}{\text{onda unitaria incidente}} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (\text{Ecuación 43})$$

Donde:

Z_A : Impedancia de entrada de la antena

Z_0 : Impedancia característica de la línea de transmisión

Para la frecuencia 486 MHz

$$0,03054 = \frac{Z_A - 75}{Z_A + 75} \quad (\text{Ecuación 44})$$

$$0,03054Z_A + 2,2905 = Z_A - 75$$

$$Z_A = 79.72$$

Para la frecuencia 593 MHz

$$0,008964 = \frac{Z_A - 75}{Z_A + 75} \quad (\text{Ecuación 45})$$

$$0,008964Z_A + 0,6723 = Z_A - 75$$

$$Z_A = 74,99$$

Para la frecuencia 706 MHz

$$0,02611 = \frac{Z_A - 75}{Z_A + 75} \quad (\text{Ecuación 46})$$

$$0,02611Z_A + 1,95825 = Z_A - 75$$

$$Z_A = 79.021$$

Se puede observar que está en el rango de 75 ohmios a 80 ohmios ya que la impedancia de una antena es variable.

3.3 Comparación de los resultados entre la simulación y construcción

Como se evidencia en la Tabla 8 y Tabla 9 respectivamente, la antena de Sierpinski simulada es ligeramente inferior en cuanto a los parámetros analizados en el laboratorio, presenta diferencias en el ancho de banda, pérdidas de retorno, la razón de onda estacionaria y ganancia, estos resultados fueron los esperados, se obtuvo mejores resultados debido a la calibración del analizador de espectro.

Se puede comprobar en la Tabla 8 que las frecuencias simuladas en CST Studio y el analizador de espectro son diferentes, logrando que resuenen en las frecuencias especificadas para la elaboración del diseño.

Podemos listar las posibles causas del resultado:

- La calibración de los equipos
- La manipulación incorrecta de los conectores
- Deformación en el cable
- La impedancia no puede coincidir con la unión del cable y los conectores

Tabla 8.

Comparación de pérdidas de retorno

Antena de Sierpinski	Bandas de frecuencias	Perdidas de Retorno
Antena Simulada	500.56 MHz	10.00 dB
	633 MHz	13.25 dB
	771.52 MHz	10.00 dB
Antena Construida	486.36 MHz	30.30 dB
	593.81 MHz	40.97 dB
	706.51 MHz	31.66 dB

Se concluye que al momento de diseñar la antena de Sierpinski y simularla, resuena de acuerdo a los cálculos de las frecuencias teóricas indicadas con anterioridad, pero al construirla sería diferente, en lo real siempre existe más parámetros que afecta el comportamiento de la antena, como se muestra en la

tabla 8. Al construir la antena se obtiene perdidas de retorno altas, esto es algo positivo, en un sistema con una pérdida de retorno de 20dB es muy eficiente esto quiere decir que solo se refleja el 1% de la potencia, transmitiéndose el 99% restante.

Tabla 9.

Comparación Relación onda estacionaria

Antena de Sierpinski	Bandas de frecuencias	SWR
Antena Simulada	500.56 MHz	1.92
	633 MHz	1.92
	771.52 MHz	1.92
Antena Construida	486.36 MHz	1.06
	593.81 MHz	1.02
	706.51 MHz	1.05

Se concluye que en la antena construida tiene un acoplamiento bueno entre todos los elementos del sistema de la antena, para un SWR sea perfecto debe ser igual a 1, a mayor SWR es peor su adaptación. La antena construida tiene un rango de 1.02 hasta 1.05 lo cual indica que el acoplamiento entre todos los elementos de la antena es el adecuado.

En la antena simulada se puede observar que la línea de transmisión no está perfectamente adaptada.

Finalmente se desarrolla una comparación entre la antena fractal Sierpinski real optimizada y construida como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10.

Comparación de la antena fractal Sierpinski real optimizada y construida

Antena de Sierpinski	Dimensiones	Bandas de frecuencias
-----------------------------	--------------------	------------------------------

Antena Calculada	32.58 cm x 15.79 cm	475.85 MHz
		595.63 MHz
		732.13 MHz
Antena Optimizada	30.94 cm x 17.28 cm	500.56 MHz
		633 MHz
		771.52 MHz
Antena Construida	30.94 cm x 17.28 cm	486.36 MHz
		593.81 MHz
		706.51 MHz

En el capítulo 2 se analizó a la antena Sierpinski mediante su modelo matemático en donde no se obtuvieron las frecuencias deseadas, ya que sus valores en los cuales resonaban eran menores, por lo tanto mediante el software CST Microwave Studio se realizó la optimización de la antena de Sierpinski, se obtuvo las frecuencias resonantes en la banda VHF con dimensiones menores y mejorando sus parámetros en la longitud, ancho de banda y pérdidas de retorno, mientras que en la antena construida siempre influyen ciertos factores teniendo como bandas de frecuencias desde 486 MHz hasta 706 MHz.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Las antenas fractales son ampliamente recomendadas como antenas multibandas, gracias al número de iteraciones que combinan diversas longitudes eléctricas permitiendo que resuene en diferentes frecuencias de trabajo, son independientes de la frecuencia, el triángulo de Sierpinski es el más recomendado para aplicaciones de este tipo por su similitud a la antena Bow-Tie para UHF, la cual posee una impedancia de 300 Ohm y se puede acoplar a través de un balun.

Los resultados en frecuencia de las antenas fractales son completamente diferentes a las antenas tradicionales ya que poseen mejor ganancia en diferentes frecuencias debido a su estructura ya que reduce sus dimensiones, sus características multibanda, autosimilitud entre otras.

Con las fórmulas de Sierpinski se obtuvo los parámetros de diseño para la antena fractal, estas permitieron desarrollar la construcción en el software. Los resultados de estas ecuaciones implementadas aportaron aproximaciones iniciales para la simulación en el CST Studio, estos resultados pueden sufrir algunas variaciones al momento de optimizarse, logrando una mayor precisión en la resonancia con las frecuencias propuestas.

El número de iteraciones escogidas, son características principales de las dimensiones de las antenas. En los resultados se observa que, al aumentar las iteraciones, la frecuencia de operación de la antena disminuye. Por lo tanto, si el número de iteraciones tiende al infinito, la antena trabajaría en toda la banda de frecuencias teniendo en cuenta que lograr esto es abstracto e irrealizable, por falta de elementos pasivos no se pudo medir en el laboratorio la impedancia de la antena, solo se pudo calcular, mediante las fórmulas para verificar la impedancia de entrada de la misma.

4.2 Recomendaciones

Modificar las dimensiones de la antena para poder obtener la frecuencia de resonancia deseada, los conectores y cables que se utilizan en las pruebas deben tener las menores pérdidas posibles ya que esto afecta considerablemente el desenvolvimiento de la antena fractal.

Realizar las pruebas en un lugar adecuado, ya que no debe existir interferencia dentro de rango de frecuencias que se va a analizar. Si se realizan las pruebas dentro del laboratorio, este puede convertirse en una jaula de Faraday, afectando las mediciones al realizar.

Realizar más investigaciones de la tecnología fractal y sus aplicaciones en antenas, esto permitirá estudiar más modelos que podrían tener mayor reducción en sus dimensiones y un mejor comportamiento en el rango de frecuencias o tener un patrón de radiación mucho más directivo.

Conocer y revisar los diferentes tipos de geometrías fractales para poder crear modelos híbridos optimizados, y poder elegir la que más convenga desarrollar, dependiendo de las necesidades y el espectro electromagnético en operación.

Para que el ancho de banda y el rango de frecuencias de operación sea mejor en las antenas fractales ya construidas, se propone implementar un acoplamiento de impedancias entre el conector y la antena, así logrando un mejor análisis de la antena, se debe tomar en cuenta el tiempo de entrega de los materiales para la construcción, así como los equipos de laboratorio que se necesita para sus respectivas pruebas.

REFERENCIAS

- Agrawal, S. (2013). *Design and Analysis of Hexagonal Shaped Fractal Antennas*, India: Department of Electronics and Communication Engineering National Institute of Technology.
- Balanis, C. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*. New Jersey, Estados Unidos: Wiley Interscience.
- Borja, Miñana. (2011). Diseño y caracterización de una antena plana conformada para la recepción de TDT: Universidad Politécnica de Valencia.
- Castro, A. (2015). Diseño de antenas fractales para televisión digital terrestre en Cuba, Santa Clara: Universidad Central Marta Abreu de las Villas de Santa Clara.
- Chahuilco, V. (2012). Diseño de antenas fractales para televisión digital para interiores y exteriores, Lima: Pontificia Universidad Católica de Perú.
- Computer Simulation Technology*. (s.f.). Solver, Recuperado el 15 de abril de 2018 de <https://www.cst.com/products/cstmws/Solvers/TransientSolver>
- Copara, H. J. & León, L. F. (2015). Propuesta de un modelo de negocio basado en el desarrollo de aplicaciones interactivas para televisión digital terrestre, usando Software libre GINGA, Cuenca: Universidad politécnica salesiana unidad de posgrados maestría en gestión de telecomunicaciones.
- Fischer, W. (2007). *Tecnologías para la Radiodifusión Digital de Video y Audio*, Alemania.
- Gómez, M. & Marcano, E. (2008). Diseño de antenas fractales planas para la recepción de TV: Universidad Católica Andrés Bello, Caracas.

- Herrera, M., & Inclán, J. (2004). Estudio y Metodología de antenas utilizando geometría fractal (Antenas Fractales), Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- José, O. (2015). Diseño y Construcción de una antena fractal para banda ancha en la frecuencia 2.4-2.5 Ghz, pruebas de operación y análisis de resultados: *Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba*
- Lara, R., & Marrero, I. (2012). Diseño y construcción de antenas para telefonía móvil con fractales del tipo Hilbert, Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.
- Mandelbrot, B. (1983). La geometría Fractal de la naturaleza, New York.
- Montoya, A. (2017). Antenas fractales. Un paso en la evolución de las Telecomunicaciones, Medellín. Recuperado el 6 de noviembre de 2017 de http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas_fractales.pdf.
- Naranjo, M., & Zapata, J. (2012). Diseño de una campaña comunicativa para sensibilizar a la población quiteña sobre los usos e impactos de la televisión digital, Quito.
- Pisciotta, N. O. (2010). Sistema ISDB-Tb (Primera parte): Universidad Blas Pascal, Publicaciones de la UBP, Serie Materiales de Investigación.
- Rinka, T., & Kumar, A. (2015). *Study of Fractal Antennas and Characterization*: Department of Physics M.M.P.G. College, Fatehabad (Haryana).
- Saca, Á. (2013). *Análisis de cobertura del sistema de televisión digital terrestre para el canal 47 en la ciudad de Quito*: Universidad Politécnica Salesiana, Quito.
- Sandoval, F. & Vire, S. (2008). *Diseño e implementación de antenas fractales para UHF*: Universidad técnica particular de Loja.
- Sayidmarie, H. & Fadhel, Y. (2013). *A Planar Self-Complementary Bow-Tie Antenna for UWB Applications*, Iraq: Universidad de Mosul.

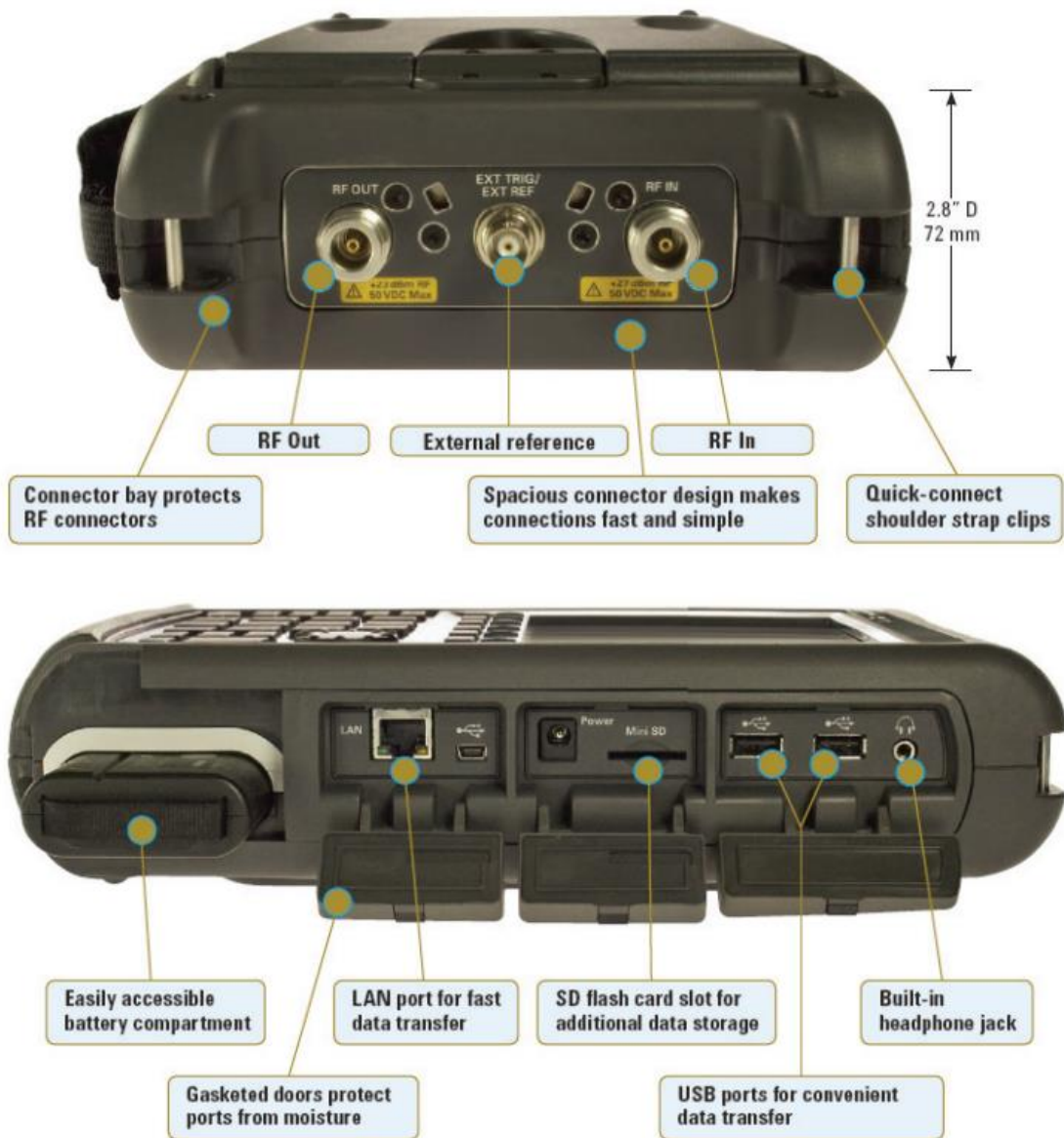
- Schlesinger, P., Valdez, A., Miranda, C., Chiozza, J., & Bava, J. *Printed Fractal Multiband Antenna*: Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
- Villar, V., Sorolla, M., & Beruete, M. (2012). Diseño antena Microstrip de ranura y antena de parche con geometría fractal, Pamplona: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones.
- Yang, X., Chiochetti, J., Papadopoulos, D., & Susman, L. *Fractal Antenna Elements and Arrays*. Recuperado el 5 de enero de 2018 de http://mirror.thelifeofkenneth.com/lib/electronics_archive/may1999-p34.pdf
- Zaidán, M. (2010). Análisis del dividendo digital resultante de la migración de la televisión analógica a digital en el Ecuador: Universidad Politécnica Nacional.

ANEXOS

ANEXO 1: Datos técnicos del analizador de espectros



FieldFox



Especificaciones (spec):

Rendimiento garantizado. Las especificaciones incluyen un margen de seguridad que se debe tomar en cuenta para el rendimiento de distribución estadístico esperado, mediciones dudosas, y cambios en el rendimiento debido a las condiciones ambientales. Las siguientes condiciones deben cumplirse:

- FieldFox se ha encendido en al menos 90 minutos.
- FieldFox esta dentro de su ciclo de calibración.
- Almacenamiento u operación en el rango de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Típica (typ):

Rendimiento esperado de una unidad promedio sobre un rango de temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, a menos que se indique otra cosa; no incluye margen de seguridad. No está cubierto por la garantía del producto. FieldFox debe estar dentro de su ciclo de calibración

Nominal (nom.):

Término descriptivo general. No es probado, y no es cubierto por la garantía del producto.

Frequency

Frequency range		
Option 104	2 MHz ¹ to 4 GHz	
Option 106	2 MHz ² to 6 GHz	
Frequency reference		
Accuracy	± 2 ppm	
Aging rate	± 1 ppm/yr	
Temperature stability	± 1 ppm over -10 to $55\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Frequency resolution		
2 MHz to 1.6 GHz	2.5 kHz	
> 1.6 GHz to 3.2 GHz	5 kHz	
> 3.2 GHz to 6 GHz	10 kHz	
Measurement speed		
Return loss	1.5 ms/point (nominal)	1.75 GHz to 3.85 GHz, 1001 points, Cal ON
Distance to fault	2.4 ms/point (nominal)	0 to 500 ft, 601 points, Cal ON
Data points		
	101, 201, 401, 601, 801, 1001	
Directivity		
Corrected	> 42 dB	
QuickCal (Option 111)	> 42 dB (typical)	
Source match		
Corrected	> 36 dB	
QuickCal (Option 111)	≥ 35 dB (typical)	
Reflection tracking		
Corrected	± 0.06 dB	
QuickCal (Option 111)	± 0.15 dB (typical)	

1. Spectrum analyzer (Option 230) start frequency is 100 kHz, usable to 5 kHz.
 2. Spectrum analyzer (Option 231) start frequency is 100 kHz, usable to 5 kHz.

Dynamic range

Reflection (RF Out port)

2 MHz to 4 GHz	60 dB (typical)
> 4 GHz to 6 GHz	55 dB (typical)

Transmission measurement (Option 110)

2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)
> 2 GHz to 3 GHz	67 dB (typical)
> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)
> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)

Output power range

High power

2 MHz to 4 GHz	< +8 dBm, +6 dBm (nominal)
> 4 GHz to 6 GHz	< +7 dBm, +2 dBm (nominal)

Low power

2 MHz to 4 GHz	< -23 dBm, -25 dBm (nominal)
> 4 GHz to 6 GHz	< -24 dBm, -25 dBm (nominal)

Immunity to interference

+16 dBm (nominal)

Maximum input level (RF Out port)

+23 dBm

Maximum input DC voltage (RF Out port)

±50 VDC

Cable and antenna measurements

Return loss

Display range	0 to 100 dB
Resolution	0.01 dB

VSWR

Display range	0 to 100
Resolution	0.01

Distance to fault (DTF)

- **Range** = (number of points - 1)/(span²) x Vf (velocity factor in cable) x c (light speed)
- **Resolution** = range/(number of points - 1)
- **Number of points:** 101, 201, 401, 601, 801, 1001
- **Distance to fault display:** Return loss, VSWR

Cable loss (1-port)

Terminated cable under test with short

Insertion loss (2-ports)

Requires Option 110

Transmission measurement (Option 110)

Frequency range

Option 104	2 MHz to 4 GHz
Option 106	2 MHz to 6 GHz

Dynamic range

2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)
2 GHz to 3 GHz	67 dB (typical)
> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)
> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)

Network analysis (Option 303)

S11	Vector measurement, S11 magnitude and S11 phase. Specification is listed under Cable and antenna analyzer section (S11/Return loss).
S21	Scalar measurement, S21 magnitude. Specification is listed under transmission measurement. S21 requires Option 110 transmission measurement.
A	Reflected power
R	Source power
Display	Log, linear, phase, VSWR, Smith chart
Calibration types	<ul style="list-style-type: none"> Mechanical cal QuickCal Normalization Automatic cal update with frequency change or number of points change
IF bandwidth selections	300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz and 30 kHz

Spectrum analyzer (Option 230 or 231)

Frequency

Frequency range	
Option 104	100 kHz to 4 GHz, usable to 5 kHz
Option 106	100 kHz to 6 GHz, usable to 5 kHz, tunable to 6.1 GHz
Frequency reference	
Accuracy	±2 ppm
Frequency aging	± 1 ppm/yr
Frequency reference temperature stability	± 1 ppm over -10 to 55 °C
Frequency readout accuracy	
	± (readout frequency x frequency reference accuracy + RBW centering + 0.5 x horizontal resolution)
Frequency span	
Range	0 Hz (zero span), 10 Hz to maximum frequency
Span accuracy	±(2 x RBW centering + horizontal resolution)
Span resolution	1 Hz

Power meter measurement (Option 302)

Frequency range	9 kHz to 24 GHz (sensor dependent)
USB power sensor	9 kHz to 24 GHz, see Agilent U2000 Series USB power sensor specifications for details

General specifications

Connector type	Type-N (female)						
Input impedance	50 ohm						
External reference	<table border="1"> <tr> <td>Input type</td> <td>BNC female</td> </tr> <tr> <td>Reference frequency</td> <td>10 MHz</td> </tr> <tr> <td>Required level</td> <td>-5 dBm to 10 dBm</td> </tr> </table>	Input type	BNC female	Reference frequency	10 MHz	Required level	-5 dBm to 10 dBm
Input type	BNC female						
Reference frequency	10 MHz						
Required level	-5 dBm to 10 dBm						
Display	6.5" transfective, color VGA LED backlit 640 x 480 with anti-glare coating						
Speaker	Built-in speaker						
Headphone jack	Built-in headphone jack						
Connectivity	2 x USB 2.0; 1 x mini USB; 1 x LAN						
Internal storage	Minimum 16 MB, up to 1000 traces						
External storage	1 x mini SD slot and 2 x USB 2.0						
EMC	Complies with European EMC Directive 2004/108/EC • IEC/EN 61326-2-1) • CISPR Pub 11 Group 1, Class A • AS/NZS CISPR 11 • ICES/NMB-001						

ESD	
	• IEC/EN 61000-4-2, functional up to 20 kV test
Safety	
	Complies with European Low Voltage Directive 2006/95/EC
	• IEC/EN 61010-1 2nd Edition
	• Canada: CSA C22.2 No. 61010-1-04
	• USA: UL 61010-1 2nd Edition
Environmental	
	Meets MIL-PRF-28800F Class 2 specification
Humidity	95% at 40 °C
Temperature	
Operating	-10 °C to +55 °C
Non-operating	-51 °C to 71°C
Weight	
	6.2 lbs / 2.8 kg including battery
Dimensions (H x W x D)	
	11.5" x 7.4" x 2.8" (292 x 188 x 72 mm)
Power	
Power supply	External DC input: 15 to 19 VDC
External AC power adapter	
Input	100 to 250 VAC, 50 to 60 Hz; 1.25 to 0.56 A
Output	15 VDC, 4 A
Power consumption	12 W
Battery	6 cell Lithium Ion, 10.8V, 4.6 A-h
Battery operating time	4 hours
Languages	
	English, Chinese, French, Spanish, Japanese, Russian, German, and Italian

ANEXO 2: Especificaciones técnicas del Balun

TECHNICAL DATA SHEET

PE7071

50 Ohm N Male To 75 Ohm F Female Matching Pad Operating From DC to 3 GHz RoHS Compliant

Configuration

Design	Fixed Matching Pad
Body Style	Straight
Connector 1	N Male
Impedance 1	50 Ohms
Connector Specification 1	MIL-STD-348
Connector 2	F Female
Impedance 2	75 Ohms

Electrical Specifications

Frequency Range, GHz	DC to 3
Maximum VSWR	1.25:1
Maximum Attenuation, dB	5.7
Attenuation Accuracy	± 0.5
Maximum Input Power, Watts	2
Peak Power, Watts	250
Peak Power Duty Cycle, μ s	5
Directionality	Bidirectional

Mechanical Specifications

Size

Length, in [mm]	1.66 [42.16]
Width/Dia., in [mm]	0.8 [20.32]
Body Material and Plating	Passivated Stainless Steel

Connector 1

Type	N Male
Inner Conductor Material and Plating	Beryllium Copper, Gold
Coupling Nut Material and Plating	Brass, Nickel
Body Material and Plating	Brass, Nickel

Connector 2

Type	F Female
Inner Conductor Material and Plating	Brass, Nickel
Body Material and Plating	Brass, Nickel

Compliance Certifications (visit www.Pasternack.com for current document)

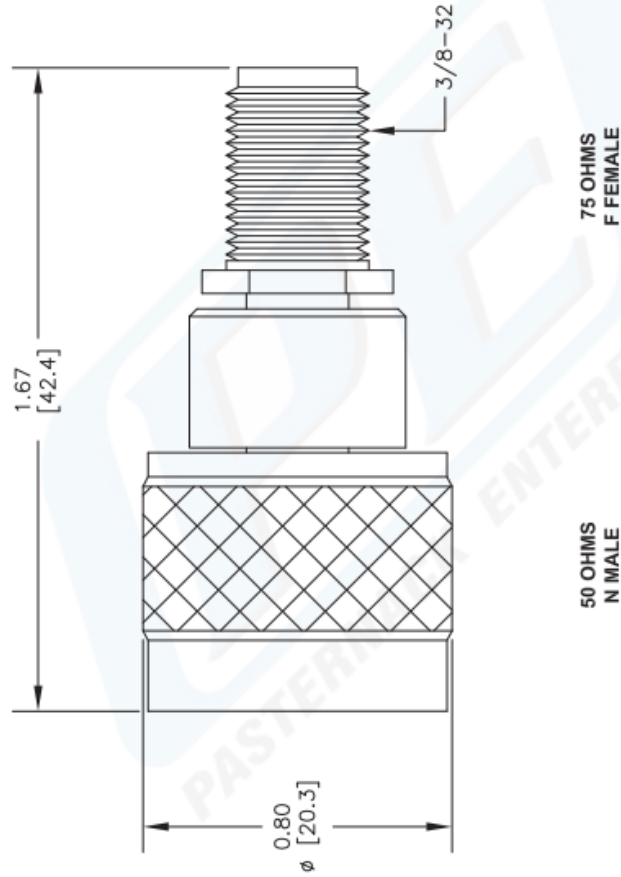
RoHS Compliant	Yes
----------------	-----

Click the following link (or enter part number in "SEARCH" on website) to obtain additional part information including price, inventory and certifications: [50 Ohm N Male To 75 Ohm F Female Matching Pad Operating From DC to 3 GHz RoHS Compliant PE7071](#)

The information contained in this document is accurate to the best of our knowledge and representative of the part described herein. It may be necessary to make modifications to the part and/or the documentation of the part, in order to implement improvements. Pasternack reserves the right to make such changes as required. Unless otherwise stated, all specifications are nominal.

PE7071 CAD Drawing

50 Ohm N Male To 75 Ohm F Female Matching Pad
Operating From DC to 3 GHz RoHS Compliant



 Pasternack Enterprises, Inc. P.O. Box 16759 Irvine CA 92623 Phone: (949) 261-1920 Fax: (949) 261-7451 Website: www.pasternack.com E-Mail: sales@pasternack.com		DWG TITLE <h3 style="margin: 0;">PE7071</h3>	NOTES: 1. UNLESS OTHERWISE SPECIFIED ALL DIMENSIONS ARE NOMINAL. 2. ALL SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE AT ANY TIME. 3. DIMENSIONS ARE IN INCHES (mm).		
REV. B	FSCM NO. 53919	CAD FILE 020612	SCALE N/A	SIZE A	2233

