



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE DOS ANTENAS FRACTALES BASADAS  
EN LA ALFOMBRA Y EL TRIÁNGULO DE SIERPINSKI”**

**AUTOR:**

**Ramos Flores, Santiago Ignacio**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de  
Magister en Telecomunicaciones**

**TUTOR:**

**MSc. María Luzmila Ruilova Aguirre**

Guayaquil, a los 30 días del mes enero del año 2017



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por Ramos Flores, Santiago Ignacio como requerimiento parcial para la obtención del Título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

---

**MSc. María Luzmila Ruilova Aguirre**

**DIRECTOR DEL PROGRAMA**

---

**MSc. Manuel Romero Paz**

Guayaquil, a los 30 días del mes enero del año 2017



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

YO, Ramos Flores Santiago Ignacio

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de Titulación “**Diseño y simulación de dos antenas fractales basadas en la alfombra y el triángulo de Sierpinski**”, previa a la obtención del Título de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 30 días del mes enero del año 2017

EL AUTOR

---

Ramos Flores Santiago Ignacio



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, Ramos Flores Santiago Ignacio

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación**, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Titulación, “**Diseño y simulación de dos antenas fractales basadas en la alfombra y el triángulo de Sierpinski**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 30 días del mes enero del año 2017

EL AUTOR

---

Ramos Flores Santiago Ignacio

# REPORTE URKUND

The screenshot displays the URKUND web interface. The browser address bar shows the URL: <https://secure.orkund.com/view/24094713-820586-556980#q1bKLvYijY0NtMxNDbXMTQx8mKTWBz>. The interface includes a document information panel on the left and a source list on the right.

**Documento:** Trabajo de titulación Santiago Ramos Oficial.docx (D24334556)  
**Presentado:** 2016-12-14 07:29 (-05:00)  
**Presentado por:** orlandophilco\_7@hotmail.com  
**Recibido:** orlando.philco.ucsg@analysis.orkund.com  
**Mensaje:** Tesis Santiago Ramos [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de esta aprox. 37 páginas de documentos largos se componen de texto presente en 1 fuentes.

**Lista de fuentes:**

- [https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_o...](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_o...)
- <http://docplayer.es/19215555-Sistema-de-posgrad...>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_...](https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_...)
- <http://documents.mx/documents/metodo-de-los-...>
- <http://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/12040...>
- <https://prezi.com/o1vk2y7kcvhd/fractales/>

**Text content from the document:**

Pocos gráficos de los comúnmente manejados en Meteorología resultan tan rectos como se observa en la figura 1.14, en la que se muestran relaciones Área-Perímetro de nubes y zonas de precipitación. Los datos provienen de observaciones con radares en zonas atlánticas tropicales con precipitaciones superiores a los 2 mm/hora, y de la banda infrarroja de satélites geoestacionarios sobre el Océano Índico con lecturas inferiores a los -10°. Las áreas oscilan entre uno y un millón de kilómetros cuadrados. La dimensión del perímetro, ajustada en un rango de seis ordenes de magnitud es 4/3

CITATION Ami06 \I 12298 (Al-Majdalawi, 2006).

Figura 1.14. Predicción meteorológica Fuente: CITATION Ami06 \I 12298 (Al-Majdalawi, 2006).

Reporte Urkund Tesis “Diseño y simulación de dos antenas fractales basadas en la alfombra y el triángulo de Sierpinski” del ingeniero Santiago Ramos Flores. Al 1% de coincidencias.

## **DEDICATORIA**

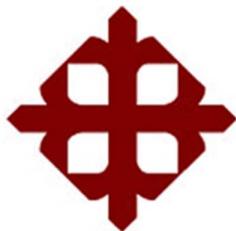
Dedico este trabajo de titulación a Dios y a mis padres Rafael Ramos y Susana Flores. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres Rafael Ramos y Susana Flores, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

***Santiago Ignacio Ramos Flores***

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia a mi PADRE Rafael Ramos, mi MADRE Susana Flores y a mis hermanos Hector Ramos y Katherine Ramos; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

***Santiago Ignacio Ramos Flores***



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**MSc. María Luzmila Ruilova Aguirre**

**TUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**MSc. Manuel Romero Paz**

**DIRECTOR DEL PROGRAMA**

f. \_\_\_\_\_

**MSc. Orlando Philco Asqui**

**REVISOR**

f. \_\_\_\_\_

**MSc. Luis Córdova Rivadeneira**

**REVISOR**

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
Resumen.....	XIIIIV
Abstract.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	16
Justificación.....	17
Problema a resolver.....	18
Objeto de estudio.....	18
Campo de acción .....	18
Objetivo general .....	18
Objetivos específicos .....	18
Hipótesis.....	19
Metodología a emplearse en la investigación .....	19
CAPÍTULO 1 TEORÍA DE LOS FRACTALES .....	20
1.1 Concepto de fractal .....	20
1.2 Características de los fractales .....	24
1.3 Dimensión fractal.....	26
1.4 Aplicaciones de los fractales.....	28
1.5 Antenas fractales.....	36
CAPÍTULO 2: ANTENAS .....	39
2.1 Definición .....	41
2.2 Patrón de radiación .....	41
2.3 Directividad.....	4;Error! Marcador no definido.
2.4 Ganancia .....	444
2.5 Impedancia de entrada .....	46
2.6 Ancho de banda.....	47
2.7 Formas de alimentación de las antenas microcintas .....	47
2.7.1 Alimentación directa.....	48
2.7.2 Excitación por microcintas.....	48

2.7.3 Alimentación por conector coaxial .....	49
2.7.4 Alimentación por proximidad .....	49
2.7.5 Alimentación por apertura .....	50
2.8 Método de análisis de las antenas .....	51
2.8.1 Método de Abraham .....	51
2.8.2 Método de Schelkunoff.....	53
2.8.3 Método de la determinación de la distribución de corrientes en los conductores de las antenas .....	53
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE DOS ANTENAS FRACTALES BASADAS EN LA ALFOMBRA Y EL TRIÁNGULO DE SIERPINSKI .....</b>	<b>68</b>
3.1 Diseño y simulación de la antena basada en el fractal alfombra de Sierpinski.....	69
3.1.1 Diseño de la antena fractal.....	70
3.1.2 Simulación de la antena fractal .....	77
3.2 Diseño y simulación de la antena basada en el fractal triángulo de Sierpinski.....	77
3.2.2 Simulación de la antena fractal .....	85
3.2.3 Comparación de la antena parche triangular con la antena fractal triángulo de Sierpinski .....	88
Conclusiones: .....	87
Recomendaciones.....	88
Glosario de Términos.....	88
Bibliografía .....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Apariciones de las formas fractales .....	24
Tabla 1.2. Aplicaciones de los fractales.....	35
Tabla 3.1 Dimensiones y materiales para la antena parche rectangular. ....	73
Tabla 3.2. Porcentaje de reducción para la antena parche. ....	76
Tabla 3.3. Porcentaje de reducción para la antena fractal.....	77
Tabla 3.4. Dimensiones y materiales para la antena fractal alfombra de Sierpinski. .....	77
Tabla 3.5 Frecuencias a las que radia la antena fractal.....	776
Tabla 3.6. Dimensiones y materiales para la antena parche triangular.....	78
Tabla 3.7. Porcentaje de reducción para la antena parche. ....	82
Tabla 3.8. Porcentaje de reducción para la antena fractal.....	82
Tabla 3.9. Dimensiones y materiales de la antena fractal triángulo de Sierpinski.	85
Tabla 3.10. Frecuencias a las que radia la antena fractal. ....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ejemplos de fractales en la naturaleza.....	21
Figura 1.2. Ejemplos de fractales en la naturaleza.....	21
Figura 1.3. Ejemplos de fractales en la naturaleza.....	22
Figura 1.4. Ejemplos de fractales en el organismo humano .....	22
Figura 1.5. Ejemplos de fractales en registros de encefalogramas y electrocardiogramas .....	23
Figura 1.6. Ejemplos de fractales lineales.....	23
Figura 1.7. Ejemplos de fractales no lineales.....	24
Figura 1.8. Ejemplos de formas fractales.....	25
Figura 1.9. Diferentes escalas de los fractales .....	25
Figura 1.10. Autosemejanza en los fractales.....	26
Figura 1.11. Recursividad en el algoritmo de los fractales .....	26
Figura 1.12. Recta formada por 3 segmentos.....	27
Figura 1.13. Sección de la curva de Koch.....	28
Figura 1.14. Predicción meteorológica .....	29
Figura 1.15. Generación de concha a través de herramientas de simulación.....	30
Figura 1.16. Obras de arte basadas en fractales .....	32
Figura 1.17. Efectos visuales basados en fractales .....	32
Figura 1.18. Efectos visuales basados en fractales .....	33
Figura 1.19. Ejemplo de antenas fractales .....	36
Figura 1.20. Comparación de un arreglo fractal y uno no fractal .....	38
Figura 1.21. Ejemplos de arreglos de antenas fractales .....	38
Figura 1.22. Ejemplo de antenas fractales .....	39
Figura 2.1 (a) Antena dipolo; (b) Antena de espira; (c) Antena Yagi;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.2 Antenas tipo bocina .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.3 Patrón de radiación de las antenas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.4 Diagrama de lóbulos principales y laterales;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.5 Tipos de lóbulos de las antenas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.6 Alimentación microcintas en el borde del elemento radiante.....	48
Figura 2.7 Alimentación microcintas con acoplamiento espaciado.....	48
Figura 2.8 Alimentación microcintas con inserciones .....	49

Figura 2.9 Alimentación por conector coaxial.....	;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.10 Alimentación por proximidad.....	;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.11 Alimentación por apertura .....	;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.12 Distribución de corriente sinusoidal .	;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.13 Dipolo simétrico con distribución de corriente sinusoidal;	<b>Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 3.1 Patrones de radiación de una antena clásica;	<b>Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 3.2 Alfombra y triángulo de Sierpinski ...	;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 3.3 Antena parche rectangular .....	;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 3.4 Frecuencia de resonancia de la antena parche;	<b>Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 3.5 Resistencia real e imaginaria de la antena parche;	<b>Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 3.6 Diagrama de radiación de la antena parche;	<b>Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 3.7 Diagrama de la ganancia de la antena parche;	<b>Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 3.8 Dimensiones de las partes necesarias a extraer para conformar el patrón fractal .....	;	<b>Error! Marcador no definido.</b>
Figura 3.9. Antena fractal alfombra de Sierpinski .....		77
Figura 3.10. Frecuencias de resonancia de la antena fractal.....		775
Figura 3.11. Resistencia real e imaginaria de la antena fractal.....		79
Figura 3.12. Diagrama de la ganancia de la antena fractal. ....		79
Figura 3.13. Diagrama de radiación de la antena fractal.....		77
Figura 3.14. Antena parche triangular.....		79
Figura 3.15. Frecuencia de resonancia de la antena parche. ....		79
Figura 3.16. Resistencia real e imaginaria de la antena parche. ....		80
Figura 3.17. Diagrama de la ganancia de la antena parche.....		80
Figura 3.18. Diagrama de radiación de la antena parche. ....		81
Figura 3.19. Dimensiones de partes necesarias a extraer para patrón fractal .....		81
Figura 3.20. Antena fractal alfombra de Sierpinski.....		81
Figura 3.21. Frecuencias de resonancia de la antena fractal.....		81
Figura 3.22. Impedancia de entrada de la antena fractal.....		81
Figura 3.23. Diagrama de la ganancia de la antena fractal .....		81
Figura 3.24. Diagrama de radiación de la antena fractal .....		81
Figura 3.25. Parámetros de la antena parche triangular.....		81
Figura 3.6 Parámetros de la antena fractal.....		81

## **Resumen**

En el presente trabajo se expone una visión general sobre la teoría de los fractales profundizando en una de sus aplicaciones: las antenas. Además se lleva a cabo una breve exposición de los parámetros más importantes de las antenas, profundizando en las antenas microcinta y en los métodos de análisis de las antenas en general. También se exponen los resultados del diseño y simulación de dos antenas basadas en los fractales, el triángulo y la alfombra de Sierpinski respectivamente, analizando los principales parámetros de dichas antenas.

**Palabras Claves:** Antenas, fractales, geometría fractal, Sierpinski, patrón de radiación, diseño, simulación.

## **Abstract**

Overviews on the fractal's theory deepen into one of his applications in the present work: the antenna. Moreover it carried out a brief summary of the most important parameters of the antennas, microstrip antennas deepening and the methods of analysis of antennas in general. Also the design's aftermaths and two based antenna simulation in the fractals, the Sierpinski's triangle and Sierpinski's carpet expose respectively, analyzing the main parameters of such antennas.

**Key words:** Antenna, fractals, fractal geometry, Sierpinski, radiation pattern, design, simulation.

## INTRODUCCIÓN

Figuras habituales como la hoja de una planta o el contorno de un cerro son formas complejas que no es posible generar adecuadamente mediante la geometría euclidiana o tradicional porque pierden su estructura al ampliarlas, así el arco de un círculo se convierte paulatinamente en una recta, igual ocurre con la superficie de una esfera que tiende a una forma cada vez más plana. En cambio, esto no ocurre con las estructuras de la naturaleza, la figura de una roca conserva aproximadamente la misma complejidad aunque se amplifique con un microscopio, es decir que el incremento de una porción del original es equivalente al mismo (Talanquer, 2011), (Al-Majdalawi, 2006).

Estas estructuras geométricas con la propiedad de contener una imagen de sí mismas en cada una de sus partes, se denominan fractales y se emplean en el ámbito científico con un conjunto de normas para tratar de conocer y describir la naturaleza, siendo usadas en áreas enormemente diferentes de las ciencias naturales y sociales convirtiendo a las matemáticas en una herramienta innovadora en las artes (Reyes, 2012).

Estos instrumentos de la geometría fractal son esenciales para los científicos en las áreas de la física, química, biología, etc., con ellos pueden replantear viejas dificultades con métodos innovadores y manejar asuntos complejos de manera muy sencilla. Anteriormente se consideraban monstruosas las figuras fractales y sin aplicación matemática, sin embargo permanecen en anomalías y sistemas tan diversos como la distribución de las estrellas, la estructura de los pulmones, el contorno indefinido de una nube, etc. Se encuentran fractales en los depósitos y agregados electroquímicos, en el recorrido del polvo en el aire y en cualquier flujo turbulento (Reyes, 2012), (Al-Majdalawi, 2006).

Los elementos fractales se consideran actualmente un principio articulador de la ciencia, aunque los estudios técnicos de tales figuras geométricas no han avanzado

excepto en el diseño gráfico informático. Hace más de una década empezaron a utilizarse en el diseño de antenas (Luque & Agea).

En este trabajo se trata brevemente el tema de los fractales, caracterizándolos y revisando sus principales aplicaciones, considerando especialmente las ventajas que brinda la geometría fractal al diseño de antenas. Asimismo se muestran los principales parámetros de las antenas y se analizan los métodos de solución de las mismas. Además se presenta el diseño y simulación de dos antenas basadas en la forma fractal de la alfombra y el triángulo de Sierpinski, respectivamente, analizando los principales parámetros de dichas antenas.

### **Justificación**

En el mundo actual la información enviada y recibida en tiempo real se torna fundamental para permitir adoptar decisiones adecuadas y oportunas, en este aspecto las antenas representan un rol determinante, puesto que a través de ellas es posible establecer comunicaciones sin requerir de cables, de esta manera los seres humanos pueden acceder a toda clase de información en todo lugar y momento.

Con esto se cumple una vieja aspiración del ser humano que necesita comunicarse, y eso lo ha impulsado a implementar redes sociales, las mismas que se interconectan con otras, de acuerdo a las posibilidades tecnológicas presentes en cada época o contexto.

En este entorno las TIC's (Tecnologías de la Información y la Comunicación) se tornan fundamentales y aunque generalmente no se aprecie su importancia, las antenas son imprescindibles para la implementación y aplicación de estas tecnologías. Este trabajo pretende mostrar su definición, funcionamiento, importancia, profundizando en las antenas microcinta y las técnicas de análisis de estos dispositivos.

El aporte de esta investigación consiste en presentar los resultados obtenidos del diseño y simulación de dos antenas fundamentadas en fractales, en el caso de este

trabajo, el triángulo y la alfombra de Sierpinski respectivamente, evaluando los principales parámetros de dichas antenas.

### **Problema a resolver**

La necesidad de obtener las características físicas y de radiación de antenas basadas en la forma fractal de la alfombra y el triángulo de Sierpinski, que permitan la implementación de aplicaciones en redes inalámbricas de área local.

### **Objeto de estudio**

Los Sistemas de Radiocomunicaciones

### **Campo de acción**

Las antenas fractales

### **Objetivo general**

Realizar un estudio de los fundamentos teóricos de las antenas fractales y efectuar el diseño y simulación de dos antenas, una basada en el fractal alfombra de Sierpinski y la otra en el fractal triángulo de Sierpinski, ambas utilizando el programa HFSS 12 (High Frequency Structure Simulator).

### **Objetivos específicos**

- Realizar un estudio de las técnicas de diseño y simulación de antenas planas y sus métodos de alimentación.
- Diseñar y simular dos antenas microcinta en la banda de ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 5.7 GHz alimentada por línea de microcinta.
- Evaluar los resultados y determinar la reducción de tamaño que sufren las antenas al elaborarse un patrón fractal.

- Simular las antenas alfombra y triángulo de Sierpinski para la banda de 5.7GHz.

### **Hipótesis**

Si se realiza un estudio de la geometría fractal, y del uso de la misma en antenas, se podrá realizar el diseño y simulación de dos antenas basadas en el fractal triángulo de Sierpinski y en el fractal alfombra de Sierpinski, que podrían utilizarse en aplicaciones de redes inalámbricas de área local.

### **Metodología a emplearse en la investigación**

Se trata de una investigación exploratoria porque comprende la exploración de la teoría de los fractales y su aplicación en las antenas fractales, realizando una revisión bibliográfica que permita construir el Estado del Arte de los mismos y es descriptiva porque con esos antecedentes se estudiará, diseñará y evaluará estas antenas mediante simulaciones con el software HFSS.

Se emplea el paradigma “Empírico-Analítico” y un enfoque “Cuantitativo” porque se realizan cálculos matemáticos y estadísticos para caracterizar estas antenas.

En este trabajo se empleará la metodología experimental, porque se elaborarán dos modelos de antenas, una con el fractal alfombra de Sierpinski y la otra con el fractal triángulo de Sierpinski y se realizarán simulaciones alterando algunos parámetros para demostrar que pueden usarse en redes inalámbricas de área local.

## **CAPÍTULO 1 TEORÍA DE LOS FRACTALES:**

Benoit Mandelbrot (1924-2010), matemático polaco considerado el primer científico que empleó este nombre, por lo que se lo considera “el padre de los fractales”. Lo hizo para denominar su nueva invención y casualmente observó en el libro de latín de su hijo la palabra fractus, que significa fracturar, romper, irregular, quebradizo (Carmona, 2003), (Altuve, 2014).

### **1.1 Concepto de fractal**

Este concepto es posible considerarlo desde diversos aspectos aunque por lo general se admite que un fractal es un objeto geométrico formado por componentes geométricos, de dimensión y disposición cambiante y con apariencia análoga, caracterizándose porque si se los amplía brotan componentes con igual forma independientemente de la escala aplicada, formándose como un mosaico de los componentes más grandes, con una distribución geométrica repetible, cualidad llamada autosimilaridad. Los componentes más grandes se forman con otros más pequeños, componiendo la distribución recursiva de los fractales. La representación gráfica de un fractal se basa en la determinación de la relación o ley de recursividad entre las formas que se repiten, esto es hallar el objeto elemental y la ley de formación y establecer el algoritmo gráfico. (Altuve, 2014), (Palavecino, 2012), (Al-Majdalawi, 2006).

Desde que Benoit Mandelbrot definió los fractales, los científicos han elaborado muchos modelos para representar y entender la manera en que la naturaleza genera sus formas y como el desarrollo en la naturaleza corresponde a modelos fractales, es como si perteneciera a la estética fractal. Es posible hallar formas fractales por ejemplo en hojas, troncos, ramas, raíces, rocas y piedras, como se puede observar en la figura 1.1 (Arcos, 2007), (Al-Majdalawi, 2006).

Por su parte los científicos han identificado fractales en la forma de las galaxias, las costas marítimas, las montañas y perfiles rocosos, los perfiles de los bosques, las fronteras, esto se puede observar en la figura 1.2.



Figura 1.1. Ejemplos de fractales en la naturaleza  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)



Figura 1.2. Ejemplos de fractales en la naturaleza  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)

En procesos físicos y químicos: la cristalización, las fracturas de materiales, los movimientos de partículas, las descargas eléctricas, la electrólisis, las nubes, como se puede observar en la figura 1.3.

En el organismo del ser humano: su sistema circulatorio, sus arterias y venas, su sistema nervioso, la organización de los pulmones, se puede observar en la figura 1.4.



Figura 1.3. Ejemplos de fractales en la naturaleza  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)

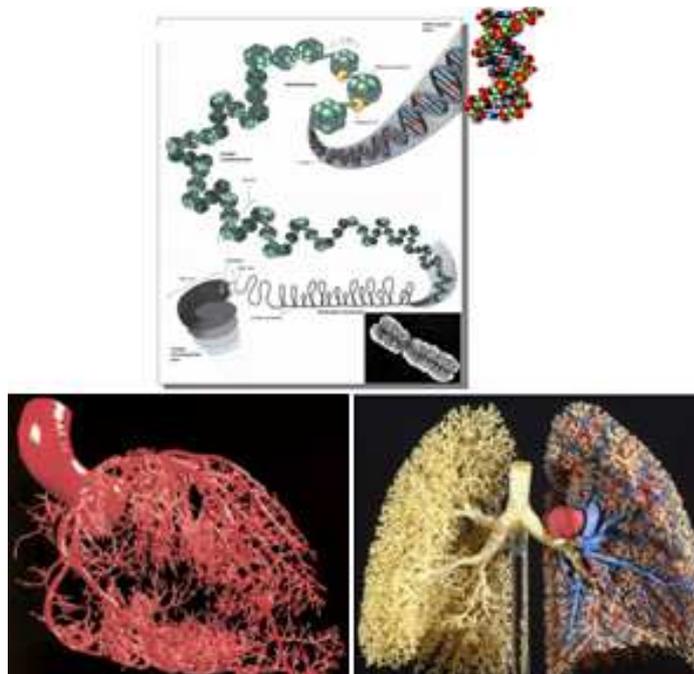


Figura 1.4. Ejemplos de fractales en el organismo humano  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)

Curiosamente, también se observan estructuras fractales en los registros de encefalogramas y electrocardiogramas, lo cual se puede observar en la figura 1.5.

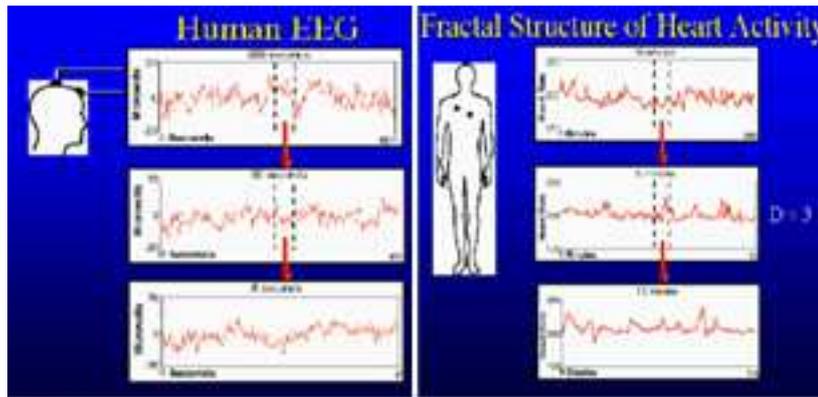


Figura 1.5. Ejemplos de fractales en registros de encefalogramas y electrocardiogramas  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)

Cabe indicar en este punto que a pesar de que los fractales no brindan explicaciones o ejemplos que detallen los aspectos de la naturaleza, por primera vez se tiene una propuesta para representar estructuras geométricas disímiles como las de los elementos indicados (Al-Majdalawi, 2006).

Existen dos tipos bien definidos de fractales:

Los fractales lineales: son aquellos que se construyen con un simple cambio en la variación de sus escalas. Esto implica algo muy importante, los fractales lineales son exactamente idénticos en todas sus escalas hasta el infinito. El triángulo y la alfombra de Sierpinski son ejemplos de fractales lineales y se pueden apreciar en la figura 1.6.

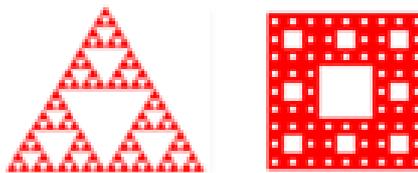


Figura 1.6. Ejemplos de fractales lineales  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)

Fractales no lineales: estos se crean de alteraciones complicadas o no lineales, a esta categoría pertenecen la mayor parte de los elementos fractales netamente matemáticos y naturales, tales como los conjuntos de Mandelbrot o el de Julia, los cuales se pueden observar en la figura 1.7 (Castro, 2015).

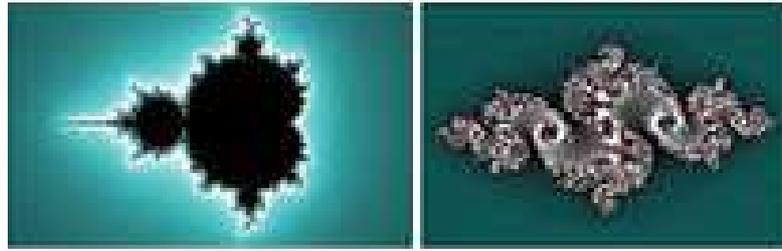


Figura 1.7. Ejemplos de fractales no lineales  
Fuente: (Arcos, 2007)

Aunque los conceptos de fractal y geometría fractal son modernos, existen antecedentes en algunas construcciones de fines del siglo XIX y principios del XX, construcciones con propiedades que repugnaban a los matemáticos de la época y que eran contrarias a toda intuición. En la tabla 1.1 se resumen las apariciones de los fractales, los cuales se pueden observar en la figura 1.8:

Tabla 1.1. Apariciones de las formas fractales

<b>Año</b>	<b>Estructura fractal</b>
1872	Conjunto de Cantor
1875	Curva de Weierstrass
1890	Curva de Peano
1891	Curva de Hilbert
1903	Curva de Takagi
1906	Isla de Von Koch
1915	Triángulo de Sierpinski
1918	Conjuntos de Julia
1938	Dragón de Lévy

Fuente: (Arcos, 2007)

## 1.2 Características de los fractales

Una estructura fractal debe satisfacer alguna o algunas de las propiedades siguientes:

- ✓ Posee detalle a todas las escalas de observación.

Un fractal no tiene ninguna escala característica, sino que cualquier escala es buena para representarlo. De esta forma, independientemente de la escala a la que nos encontremos, el nivel de detalle del fractal seguirá siendo el mismo, como se observa en la figura 1.9.

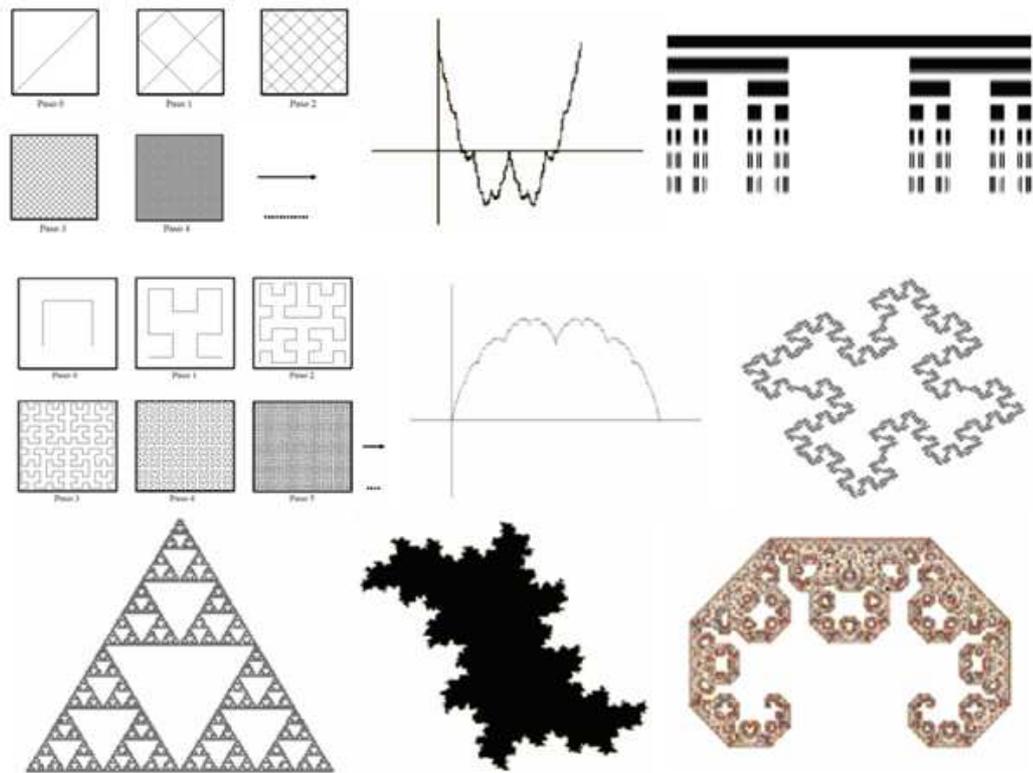


Figura 1.8. Ejemplos de formas fractales  
Fuente: (Paz, Acero, & Ferro, 2007)

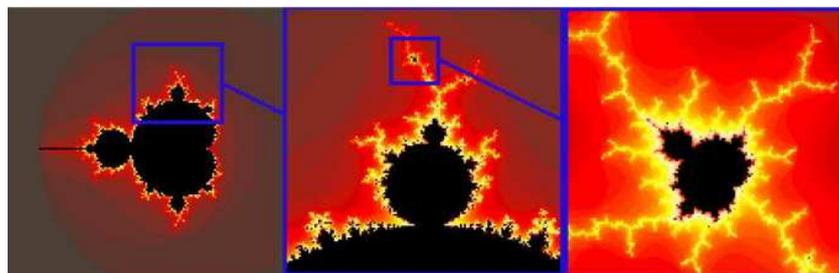


Figura 1.9. Diferentes escalas de los fractales.  
Fuente: (Arcos, 2007)

- ✓ No es posible describirlo con geometría euclidiana, tanto local como globalmente.

Al intentar representar un fractal en términos de geometría clásica, éste pierde todo el caos y autosimilitud que le caracteriza, siendo necesaria la creación de una nueva geometría, la geometría fractal.

- ✓ Posee alguna clase de autosemejanza estadística.

Una estructura se dice autosemejante si puede ser construida como una reunión de estructuras, cada una de las cuales es una copia de la original pero a tamaño reducido, como se observa en la figura 1.10.

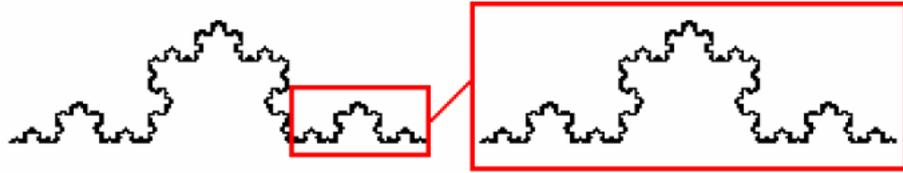


Figura 1.10. Autosemejanza en los fractales  
Fuente: (Arcos, 2007)

- ✓ El algoritmo que sirve para describirlo es muy simple, y de carácter recursivo.

Para generar un fractal basta con muy poca información, la clave se encuentra en la iteración, que consigue generar una gran cantidad de estructuras a partir de esa información inicial.

$$\begin{aligned}
 &F \\
 &F+F--F+F \\
 &F+F--F+F+F+F--F+F--F+F--F+F+F+F--F+F \\
 &F+F--F+F+F+F+F--F+F--F+F--F+F+F+F--F+F \\
 &F+F--F+F+F+F+F--F+F--F+F--F+F+F+F--F+F
 \end{aligned}$$

Figura 1.11. Recursividad en el algoritmo de los fractales  
Fuente: (Arcos, 2007)

- ✓ Su dimensión fractal es mayor que su dimensión topológica (Al-Majdalawi, 2006).

### 1.3 Dimensión fractal

Se analizó anteriormente la magnitud topológica, término creado por Henri Poincaré para comprender aspectos de esta clase, su enunciación inductiva al incluir esta definición es (Al-Majdalawi, 2006):

Conjunto vacío ----- dimensión topológica  $D = -1$

- Punto ----- dimensión topológica D = 0
- Segmento ----- dimensión topológica D = 1 (1D)
- Cuadrado ----- dimensión topológica D = 2 (2D)
- Cubo ----- dimensión topológica D = 3 (3D)

También puede decirse que la magnitud topológica de un elemento geométrico de acuerdo a K. Devlin en 1988, es que una curva solo puede moverse en una dirección, adelante o hacia atrás. En una superficie se puede ir adelante o atrás, a derecha o izquierda. En un volumen se puede mover, también hacia arriba o hacia abajo (Al-Majdalawi, 2006). En resumen, la curva tiene una dimensión, la superficie dos y el volumen tres dimensiones.

La dimensión fractal (Df) propuesta por Felix Hausdorff (1919) es una característica del elemento que muestra su amplitud para completar el área que lo encierra y puede alcanzar valores continuos en el espacio de los números reales, de 0 a 3, así (Al-Majdalawi, 2006), (Palavecino, 2012):

$$D = \log N / \log(l/p) \tag{1.1}$$

D = Dimensión fractal

N = Unidades que constituyen el elemento

L = Altura del elemento

P = Altura de las unidades que constituyen el elemento

Así, en una recta de N = 3 fragmentos, como se observa en la figura 1.12 (Palavecino, 2012).

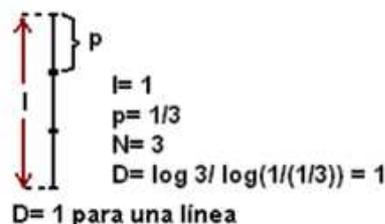


Figura 1.12. Recta formada por 3 segmentos  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006).

Para una sección de la curva de von Koch después de la primera iteración, figura 1.13.

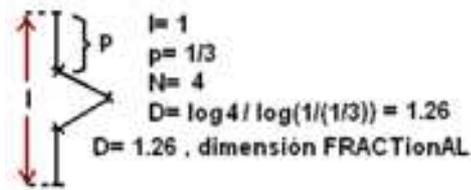


Figura 1.13. Sección de la curva de Koch  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006).

## 1.4 Aplicaciones de los fractales

A continuación se describen algunas aplicaciones de los fractales:

### Tipos de localidades

Se han configurado las transformaciones de diferentes localidades mediante expresiones matemáticas, de esta manera era posible observar que un elemento específico como la provisión de suministros o el factor de desarrollo, afectaba a la localidad. Dichas expresiones matemáticas se consideran repetibles, iniciando en un valor que se inserta en la expresión y se obtiene un resultado diferente, el cual se emplea como valor inicial en la nueva iteración, así por ejemplo la población de una localidad al final de un año es la inicial del siguiente año (Al-Majdalawi, 2006).

### Predicciones meteorológicas

En el campo de las aplicaciones puramente meteorológicas, Lovejoy publicó un par de estudios confirmando la sospecha de la posibilidad de modelar nubes mediante fractales. Pocos gráficos de los comúnmente manejados en Meteorología resultan tan rectos como se observa en la figura 1.14, en la que se muestran relaciones Área-Perímetro de nubes y zonas de precipitación.

Los datos provienen de observaciones con radares en zonas atlánticas tropicales con precipitaciones superiores a los 2 mm/hora, y de la banda infrarroja de satélites geoestacionarios sobre el Océano Indico con lecturas inferiores a los  $-10^{\circ}$ . Las áreas oscilan entre uno y un millón de kilómetros cuadrados. La dimensión del perímetro, ajustada en un rango de seis órdenes de magnitud es  $4/3$  (Al-Majdalawi, 2006).

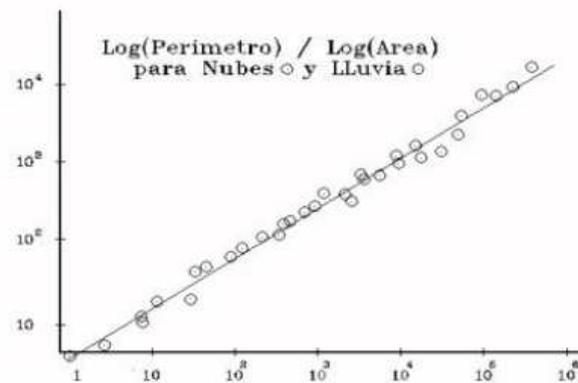


Figura 1.14. Predicción meteorológica  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006).

También existen pruebas de que la ubicación geográfica de epicentros en sismos muestran un modelo fractal, por lo que la capacidad fractal del área irregular de una grieta de un elemento se puede emplear como magnitud indirecta de su resistividad y consistencia (Altuve, 2014).

### Interpretación de fenómenos biológicos

Las Ciencias Naturales pretenden aclarar las reglas que relacionan diferentes fenómenos biológicos, así se han empleado fundamentos y técnicas informáticas para percibir mejor los elementos que rigen el establecimiento de estándares en organismos vivos. Se ha indagado mucho sobre la forma de configurar e interpretar vegetales, simulando su desarrollo mediante el formalismo de los L-systems (Linden Mayer Systems) o simular descriptivamente los patrones químicos de reacción y difusión (Altuve, 2014).

Los resultados incluyen hasta ahora una recreación realista de la formación de patrones en la pigmentación de las conchas marinas. También se han desarrollado

herramientas de simulación basadas en la geometría fractal para generar árboles, flores, arbustos, donde algunos de estos modelos son muy fidedignos a la realidad, como se observa en la figura 1.15.

Para visualizar el resultado de simulaciones se usan modelos generadores de formas (morfo genéticos) que usan técnicas computacionales gráficas, estos modelos pueden ser usados para sintetizar imágenes y como herramienta de investigación para estudiar la morfogénesis en la naturaleza.



Figura 1.15. Generación de concha a través de herramientas de simulación  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)

### **Compresión fractal de imágenes**

Es un método muy discutido con opiniones favorables y desfavorables. Se fundamenta en formular que una imagen es un IFS (Iterated Function System), donde aquella puede revelarse prontamente y un acercamiento permite gran cantidad de escalas de especificaciones fractales. Sin embargo, la dificultad estriba en la creación eficiente de la imagen IFS.

Considerando que los fractales matemáticos permiten producir imágenes con apariencia natural, se imaginó que también podrían aprovecharse su compresión, cogiendo la imagen y trasladarla a un procedimiento iterado de funciones produciendo el original, sin embargo aún no se lo ha conseguido, aunque Barnsley (1988) informó haberlo solucionado y patentó el método, pero la codificación de una imagen demoraba aproximadamente cien horas y unos treinta minutos su decodificación, así se obtenía una compresión 10.000:1. Posteriormente elaboró

un método para simbolizar imágenes, PIFS (Partitioned IFS) (Al-Majdalawi, 2006).

Un algoritmo que comprimía automáticamente la imagen en un Sistema de Funciones Iterado Particionado. El algoritmo no era sofisticado, ni rápido, pero sí automático. El costo fue que una imagen de 24-bit colores podía ser comprimido de 8:1 a 50:1, lo cual aún es bastante bueno. Todos los programas actuales de compresión de imágenes fractales (que no son muchos) se basan en este algoritmo. La empresa "Iterated Systems", vende el único compresor/decompresor comercial, llamado "Images Incorporated". También hay varios programas académicos disponibles gratuitamente en Internet (Al-Majdalawi, 2006).

Sin embargo esta técnica de compresión fractal no supera el estándar JPEG (Joint Photographic Experts Group) ni el JPEG2000.

### **Aplicación de la técnica fractal en la música**

La música de los grandes compositores como Beethoven, Bach y Mozart también presenta algunas características fractales cuando iguales temas se repiten varias veces con diferentes transiciones en una zona mayor de la melodía. Se ha analizado la expresión de configuraciones fractaliformes en piezas clásicas, la similitud entre la distribución del conjunto de Cantor y el triángulo de Sierpinski con melodías de Beethoven o Bach. De esta manera se trata de constituir el uso de la recursión, iteración y matemáticas complejas en la composición musical, enlazando los fractales con la música combinando caracteres determinísticos y estocásticas para crear de manera natural un equilibrio entre predictibilidad e improvisación (Al-Majdalawi, 2006).

Se emplean sintetizadores en la producción de música con bases fractales, con compositores que usan la geometría fractal en sus melodías. Es posible crear fractales con un computador y emplearlos en la música.

## La técnica fractal en el arte

En el Conjunto de Mandelbrot o el de Julia, se emplean colores en ciertos fractales complejos obteniéndose efectos artísticos. También es posible dar un superior finalizado a los trabajos usando softwares de dibujo o algoritmos para elaborar panoramas mediante fractales.

Además, se ha evolucionado a los fractales tridimensionales. Resultados del Trabajo con ecuaciones fractales se aprecian en la figura 1.16 con dos porciones tridimensionales del Conjunto de Mandelbrot.

## Sensaciones ópticas con fractales

Bajo esta perspectiva se han empleado fractales en el cine, por ejemplo en Star Wars y StarTrek II, como se observa en la figura 1.17.

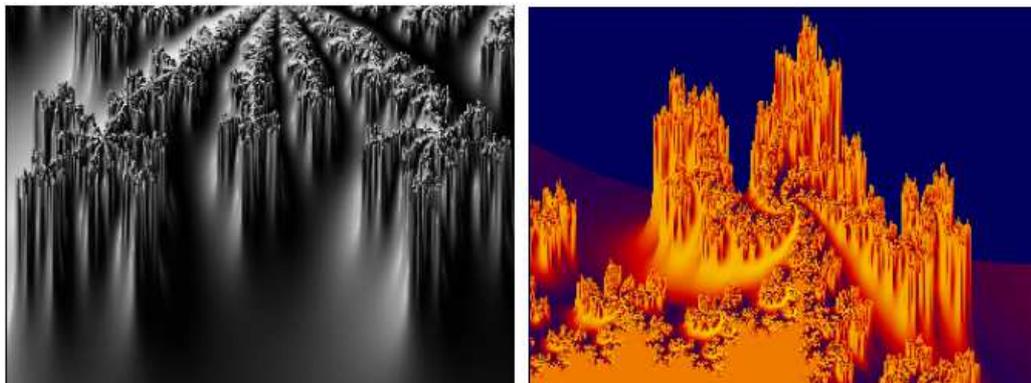


Figura 1.16. Obras de arte basadas en fractales  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006).



Figura 1.17. Efectos visuales basados en fractales  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006).

Entre los primeros entornos naturales de aplicación de los fractales están las montañas y los planetas, sus resultados se muestran en la figura 1.18.

Es interesante notar que por la irregularidad de las nubes, al aplicarse la técnica fractal los matices irradiados por la nube se fusionan gradualmente entre sí provocando un sutil efecto.

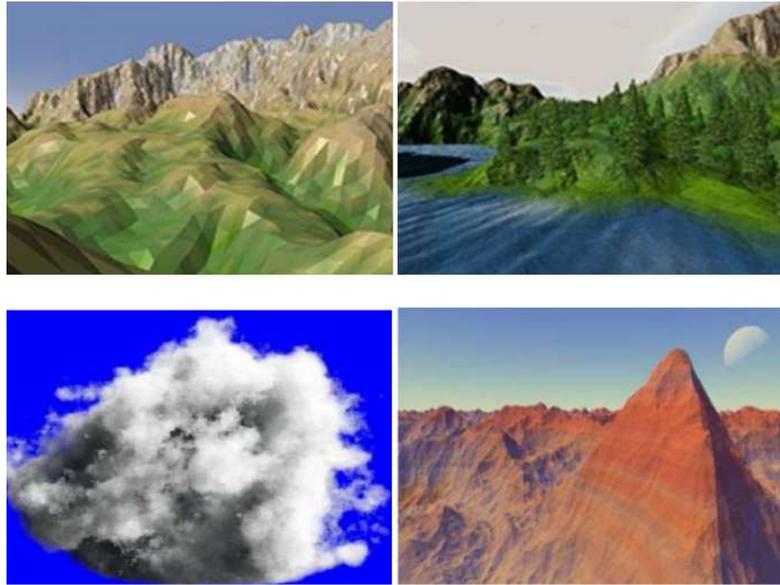


Figura 1.18. Efectos visuales basados en fractales  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006).

Otra de las aplicaciones de los fractales, y no por ser la última es la menos importante, es en la construcción de antenas fractales.

Tradicionalmente, las propuestas en el análisis y el diseño de sistemas de antenas tienen su fundamento en la geometría Euclidiana. En las últimas décadas ha habido un considerable aumento en el desarrollo de nuevos tipos de antenas que emplean fractales en detrimento de la geometría Euclidiana para el diseño de las mismas. Este nuevo campo de investigación es conocido como Ingeniería de antenas fractales, el cual posee dos ramas de investigación claramente definidas, que incluyen el estudio de las formas fractales como elementos de una antena así como el uso de fractales en matrices de antenas.

En la tabla 1.2 se expone un resumen de las aplicaciones de los fractales.

Tabla 1.2. Aplicaciones de los fractales

Biología	Crecimiento de tejidos Organización celular Evolución de poblaciones depredador-presa
Comunicaciones	Modelado del tráfico en redes
Robótica	Robots fractales
Informática	Técnicas de compresión (audio y vídeo)
Infografía	Paisajes fractales y otros objetos
Matemáticas	Convergencia de métodos numéricos
Física	Transiciones de fase en magnetismo
Música	Composición musical
Química	Agregación por difusión limitada (DLA)
Geología	Análisis de patrones sísmicos. Fenómenos de erosión Modelos de formaciones geológicas
Economía	Análisis bursátil y de mercado

Fuente: (Arcos, 2007)

La técnica fractal provocó transformaciones en varios campos del conocimiento como la física, el procesamiento digital de señales, la compresión de imágenes y las antenas, en este campo, considerando que una determinada antena presenta características como impedancia de entrada, esquema de radiación, ganancia, dichos parámetros varían significativamente con la frecuencia, y al variar éstos varían todas las propiedades eléctricas. Las dimensiones de la antena dependen de la longitud de onda de la frecuencia de operación del dispositivo, por lo cual trabajan en una sola frecuencia.

Los fractales permiten diseñar antenas multibanda, ya que con la geometría fractal se obtienen antenas que contienen en un solo objeto, copias de él mismo en diferentes tamaños, y esto permite el mismo comportamiento a diferentes frecuencias (Chahuilco, 2012). Un ejemplo de una antena fractal se muestra en la figura 1.19.



Figura 1.19. Ejemplo de antenas fractales  
Fuente: (Fralbe, 2008)

### **1.5 Antenas fractales**

Las comunicaciones inalámbricas se han desarrollado rápidamente en los últimos años con la tendencia a que los dispositivos inalámbricos se miniaturicen, pero en las futuras generaciones de estos sistemas inalámbricos, tercera (3G) y cuarta generación (4G), esta tendencia se convierte en una exigencia debido a que estas antenas tienen que integrar múltiples servicios y deben ser colocadas en sitios muy disímiles, tales como microteléfonos, computadores portátiles, etc., por tanto deben ser lo más pequeñas posibles para que los clientes puedan utilizar cómodamente los servicios inalámbricos.

En el caso de las antenas de las estaciones base y dispositivos para los puntos de acceso, también se requiere de una antena miniaturizada que reduzca al mínimo el impacto visual ambiental de la infraestructura de la red inalámbrica.

La dependencia con el tamaño de la longitud de onda es un problema en muchos sistemas donde diseños de antenas anteriores no son convenientes. En ese sentido, el diseño de antenas fractales y arreglos de ellas puede ayudar a evitar dicha dificultad, contribuyendo con un amplio y variado conjunto de figuras geométricas con propiedades sorprendentes (Herrera & Inclán, 2004).

Las antenas convencionales actuales, basadas en la clásica teoría euclidiana, no pueden resolver esta limitación, para ello se ha necesitado desarrollar una nueva tecnología capaz de satisfacer las nuevas exigencias de los sistemas inalámbricos, que permita diseñar de manera eficiente antenas más pequeñas y de múltiples bandas.

Las razones por las que debe usar un diseño fractal para hacer antenas son las siguientes:

1. Se puede esperar que una antena con autosimilitud (contiene varias copias de sí mismas a diferentes escalas), pueda operar en un modo similar en diferentes bandas de frecuencias.
2. Debido a las propiedades de relleno de espacio de algunas figuras fractales (la dimensión fractal), pueden permitir el realizar antenas más pequeñas con figuras fractales para tomar ventaja del espacio circundante.
3. La radiación electromagnética mejora notablemente cuando existen formas irregulares, bordes afilados, esquinas y discontinuidades, por lo que tienen el potencial de ser elementos radiantes eficientes.
4. Con la utilización de la geometría fractal en el diseño de antenas se puede mejorar la resistencia de entrada de las mismas, ya que son típicamente difíciles de acoplar a la alimentación de las líneas de transmisión.
5. Se pueden conseguir factores de calidad (Q) bajos teniendo en cuenta que existen límites fundamentales referidos a cuan pequeñas pueden ser las antenas, y explican que una antena es pequeña cuando puede ser encerrada en una esfera radiante, es decir, una esfera con radio  $a = \frac{\lambda}{2\pi}$ , si la estructura llena bien la esfera circunscrita se logran factores de calidad bajos y por lo tanto el ancho de banda puede ser mejorado.
6. Se consigue un mejor desempeño de arreglos de antenas, ya que combinan la robustez de la colocación aleatoria con la diferencia de una ordenación coherente. Ejemplos de arreglos de antenas fractales se pueden observar en

las figuras 1.20 y 1.21.

Nathan Cohen, un radio astrónomo de la Universidad de Boston, fue uno de los pioneros de las antenas fractales y experimentó con antenas de hilo como las curvas de Koch y con formaciones (arrays) basados en el triángulo de Sierpinski. Construyó la primera antena fractal conocida en 1988, cuando instaló una estación de radio en su apartamento y fundó Fractal Antenna Systems Inc., una de las primeras empresas que se dedicó al diseño y comercialización de antenas fractales.

Las antenas fractales, como se aprecia en la figura 1.22, tienen rendimientos en sus parámetros que se repiten con una precisión arbitraria dependiendo del orden de iteración y por tanto no son independientes de la frecuencia pero aun así consiguen cubrir diversas bandas cercanas, y las bandas correspondientes a cada frecuencia resonante son generalmente estrechas. Además todos estos diseños presentan un bajo perfil que reduce considerablemente su tamaño.

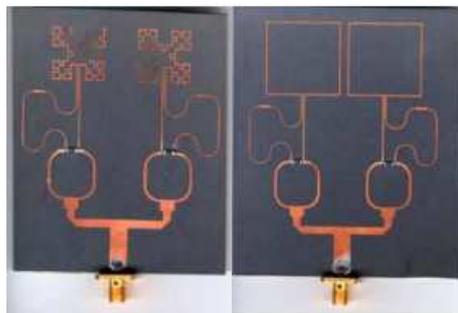


Figura 1.20. Comparación de una arreglo fractal y uno no fractal  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)

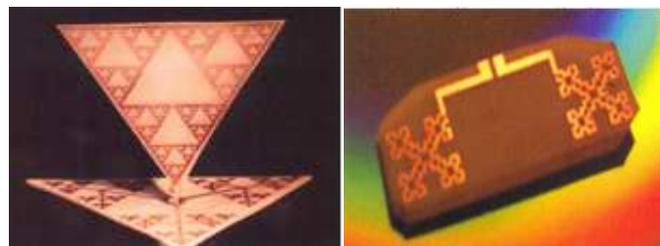


Figura 1.21. Ejemplos de arreglos de antenas fractales  
Fuente: (Al-Majdalawi, 2006)

Una de las aplicaciones principales en la actualidad de las antenas fractales es en el uso de éstas en sistemas celulares. Este tipo de antenas son una nueva

alternativa que busca la convergencia hacia las tecnologías celulares de quinta generación (5G), implementándose en equipos que se adaptan a servicios múltiples. Aunque la idea original es llegar a un solo y único servicio con cobertura global (González, Tamay, Marquez, & Lome, 2014).

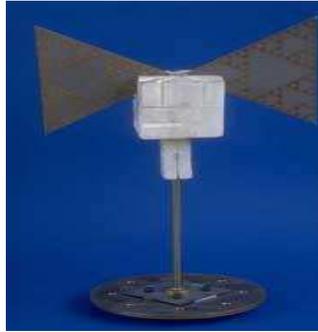


Figura 1.22. Ejemplo de antenas fractales  
Fuente: (Fralbe, 2008)

## **CAPÍTULO 2: ANTENAS**

En este capítulo se realiza una breve investigación sobre los parámetros fundamentales de las antenas, los tipos de antenas, profundizando en las antenas de microcinta, particularmente en sus formas de alimentación y los métodos de análisis de las mismas.

### **2.1 Definición**

Las antenas son estructuras de transición en que las ondas de radio pasan de la propagación guiada por una línea de transmisión a la transmisión en el espacio libre o viceversa.

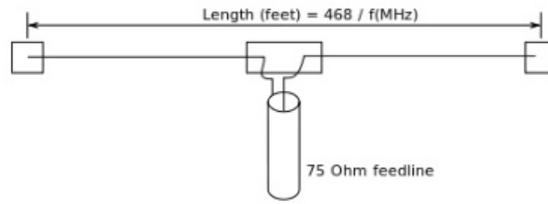
Las antenas además de recibir o transmitir energía en forma de ondas de radio también tienen la función de optimizar o acentuar la radiación de energía en algunas direcciones o suprimirlas en otras. Es decir que las antenas además de ser dispositivos emisores y receptores de energía electromagnética, también son dispositivos direccionales. Las antenas pueden adoptar formas muy diversas para cumplir con los requisitos de diseño y además estar constituidas de muy diversos materiales.

La antena ideal en teoría debe emitir la potencia total transmitida en la dirección determinada, sin embargo es muy difícil conseguir esto y se alcanzan buenas aproximaciones. Hay varios tipos de antenas útiles, con sus tipologías de radiación y se debe seleccionar la más adecuada a la necesidad en la frecuencia deseada y en general pueden clasificarse en cuatro grupos (Balanis, 1997):

#### **Antenas de hilo.**

Están constituidas por hilos conductores en los que fluye la corriente eléctrica que genera los campos emitidos. Se emplean en las siguientes frecuencias: Onda Media (MF, Medium Frequency), Onda Corta (HF, High Frequency), Muy Alta Frecuencia (VHF, Very High Frequency) y Ultra Alta Frecuencia (UHF, Ultra

High Frequency). Como ejemplos se pueden citar: antenas dipolo, de espira o la tipo Yagi (Figura 2.1).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.1 (a) Antena dipolo; (b) Antena de espira; (c) Antena Yagi  
Fuente: (Mejía, Parra, & Guzman, 2013)

### Antenas de apertura.

Son alimentadas mediante guías de ondas y a través de superficies o aberturas se orientan los campos electromagnéticos. Un ejemplo se muestra en la figura 2.2.

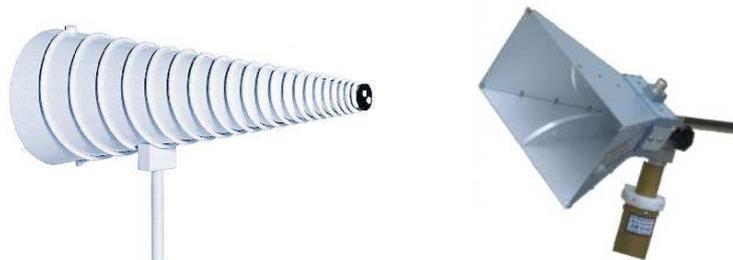


Figura 2.2 Antenas tipo bocina  
Fuente: (Patiño, González, & Ferney, 2011)

## Antenas planas.

A este grupo pertenecen las antenas diseñadas en este proyecto, antenas de parche o antenas de ranura. El rango de frecuencias en las que trabajan oscila entre los 100MHz y los 50GHz.

## Antenas de array o agrupación de antenas.

En caso de no alcanzarse las características de radiación que se necesitan mediante un solo elemento, se utiliza la composición de un grupo de antenas que brindan más flexibilidad.

### 2.2 Patrón de radiación

Un Patrón de radiación es el módulo de densidad de potencia  $P(\theta, \phi)$  o de densidad de campo eléctrico  $P(\theta, \phi)$  de las direcciones angulares  $\theta$  y  $\phi$  en la esfera de observación con radio adecuado para estar en el área de los campos de radiación (figura 2.3).

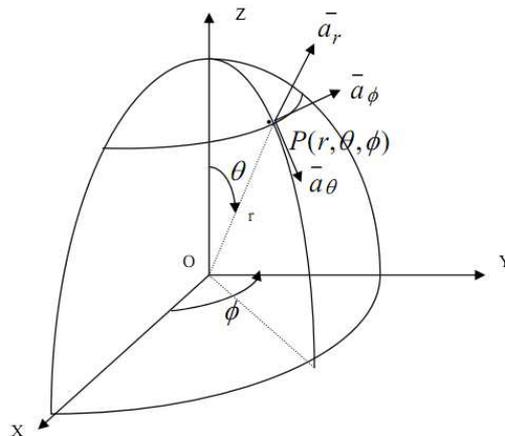


Figura 2.3 Patrón de radiación de las antenas  
Fuente: (Balanis, 1997)

Existen diversos patrones de radiación (Balanis, 1997):

- Patrón isotrópico: corresponde a la propiedad de radiación de amplitud para una antena isotrópica, la cual radia con igual amplitud de densidad de

potencia de radiofrecuencia en todas las direcciones. Este tipo de antena se considera ideal porque en teoría emite igual densidad de potencia en todas las direcciones, lo cual no es posible en la práctica, sin embargo se considera como patrón de referencia de las características direccionales de una antena real.

- Patrón direccional: es la propiedad de radiación de una antena real, es decir la que presenta características de emisión y/o recepción de señales electromagnéticas con mayor efectividad en una dirección que para otra.
- Patrón omnidireccional: se conoce así aquellos patrones direccionales que en un determinado plano no lo son y se presentan en ellos constantes.

A continuación se muestran algunos tipos de patrones de radiación:

- ✓ Toroidales: corresponden a las antenas tipo dipolo simétrico con longitudes menores de  $2l = 1.25 \lambda$ , con patrón bidireccional en el plano de la antena y omnidireccional en el plano perpendicular a ella.
- ✓ Filiforme: estos son direccionales con los dos patrones bidimensionales que pueden ser iguales o diferentes. Se emplean principalmente en comunicaciones punto a punto. Presenta lóbulos secundarios que no se pueden eliminar totalmente (figura 2.4).

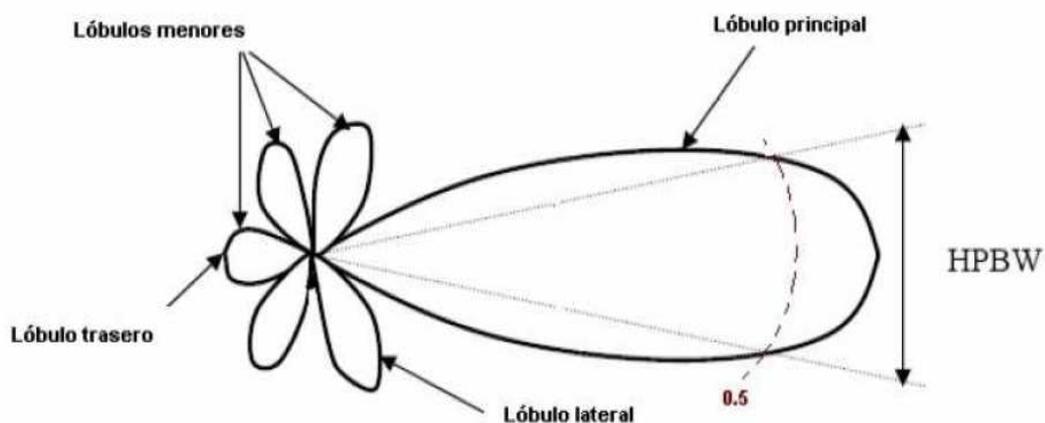


Figura 2.4 Diagrama de lóbulos principales y laterales  
Fuente: (Arcos, 2007)

- ✓ Tipo haz de abanico: en el plano tridimensional se lo ve como un abanico y se lo emplea en los equipos de radar.
- ✓ Tipo cosecante: se emplean en radares de aviones para remediar la pérdida de brillo de imágenes en áreas lejanas a tierra referente a puntos más cercanos.

### **Lóbulos en los patrones de radiación.**

Como se vio anteriormente los patrones de radiación habitualmente no son uniformes, porque aumenta su radiación en una dirección y en otras se cancela, como se observa en la figura 2.5. Se conoce como lóbulo a la radiación en cada uno de esos sectores y de acuerdo a sus dimensiones y posición se catalogan como:

- Lóbulo principal: corresponde a la zona de máxima radiación. Algunas antenas pueden tener más de un lóbulo principal.
- Lóbulos secundarios: son todos los lóbulos de radiación de la antena salvo el lóbulo principal.
- Lóbulos laterales: son los lóbulos secundarios con su radiación máxima a los lados del principal y por lo general son los más grandes de los secundarios.
- Lóbulo trasero: es el lóbulo secundario ubicado en la dirección opuesta al principal.

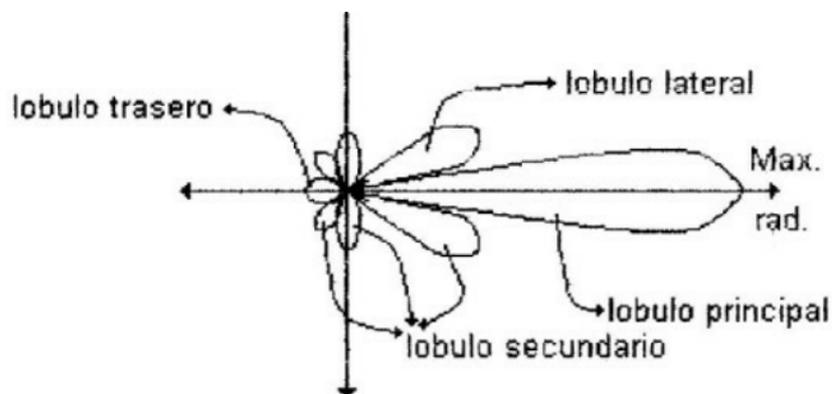


Figura 2.5 Tipos de lóbulos de las antenas  
Fuente: (Balanis, 1997)

### 2.3 Directividad

Es la característica de una antena que obedece a la forma del patrón de radiación y genera una comparación entre la densidad de radiación máxima de una antena respecto a otra considerada como referencia y con la circunstancia que la potencia total emitida sea la misma, el valor promedio de la antena isotrópica es la de referencia en varios casos y en otros se compara con una antena dipolo simétrica ideal de  $\lambda/2$ .

Este parámetro eléctrico ayuda a medir las características direccionales de una antena y se corresponde con la habilidad de la antena para concentrar la energía radiada en una determinada dirección. Se define como la relación entre la intensidad de radiación máxima del haz principal y la intensidad de radiación media alrededor de todo el espacio. Normalmente se expresa en dB como  $D$  (dB)=10 log (D).

$$D = \frac{\text{Intensidad de radiación en una dirección dada}}{\text{Intensidad de radiación promedio de una antena de referencia}}$$

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.1)$$

### 2.4 Ganancia

Al definir la directividad se consideró la antena como un dispositivo ideal, es decir que toda su potencia se emite al espacio, pero esto no es así en la realidad porque el material del que se construye la antena tiene una resistencia que genera pérdidas en ella. Con estos antecedentes, la eficiencia de una antena se define como (Arcos, 2007):

$$\eta\% = 100 * \frac{\text{Potencia radiada por la antena}}{\text{Potencia total de entrada}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{per}} * 100 \quad (2.2)$$

Así la ganancia incluye las pérdidas o la eficiencia de la antena y se define como:

$$G = \eta D \quad (2.3)$$

Es decir que la ganancia es directamente proporcional a la eficiencia de radiación y a la directividad de la antena, entonces es igual o menor a la directividad y se expresa en dB como  $G \text{ (dB)} = 10 \log (G)$ .

## 2.5 Impedancia de entrada

Al alimentar una antena con un generador de radiofrecuencia, con una caída de voltaje  $V$ , surge una corriente de excitación  $I_a$ . De esta manera la impedancia de entrada se define como la relación entre esos parámetros:

$$Z_{ent} = \frac{V}{I_a} \quad (2.4)$$

Dónde:

$V$ : Voltaje de alimentación de la antena.

$I_a$ : Corriente de alimentación de la antena.

Tal magnitud es compleja:

$$Z_{ent} = R_{ent} \pm jX_{ent} \quad (2.5)$$

Dónde:

$Z_{ent}$ : Impedancia de entrada de la antena.

$R_{ent}$ : Resistencia de entrada.

$X_{ent}$ : Reactancia de entrada

## 2.6 Ancho de banda

Es el rango de frecuencias en que una antena opera adecuadamente sin que los límites de ese rango se excedan. Se representa como BW (Band Width) y es la dependencia de las frecuencias que desempeñan las características y la frecuencia central, que se describe así (Castro, 2015):

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad (2.6)$$

Dónde  $f_0$  es la frecuencia central.

Hay que considerar al establecer el BW que según la antena empleada se modifica el ancho de banda, a causa de la geometría de construcción del dispositivo, siendo éste el elemento que interviene en las frecuencias que puede emitir y recibir la antena.

## 2.7 Formas de alimentación de las antenas microcintas

Existen diferentes métodos de alimentación para una antena microstrip de forma que radie eficientemente en las frecuencias deseadas mediante un proceso de acoplamiento de impedancias. La selección de la técnica de alimentación más adecuada viene determinada por varios factores, pero el más importante a tener en cuenta es la eficiencia en la transferencia de potencia entre la estructura radiante y la de alimentación, existiendo una correspondencia de impedancias entre las dos (Bahl & Bhartia, 1980).

Todos los métodos de alimentación existentes se pueden agrupar en 3 categorías bien diferenciadas: alimentación directa, alimentación por proximidad y alimentación por apertura.

### 2.7.1 Alimentación directa

Las dos técnicas de excitación dentro de esta categoría son la alimentación por microstrip y por conector coaxial. Tal y como se sobreentiende por el nombre de la categoría, son técnicas de contacto directo entre la alimentación y la antena radiante, aunque no es estrictamente necesario que haya ese contacto como se puede observar más adelante en la alimentación por microcinta con acoplamiento espaciado. (Azad & Ali, 2009)

### 2.7.2 Excitación por microcintas

Se pueden distinguir varios tipos de alimentación por microcintas:

- La figura 2.6 muestra la alimentación por microcintas en el borde del elemento radiante.

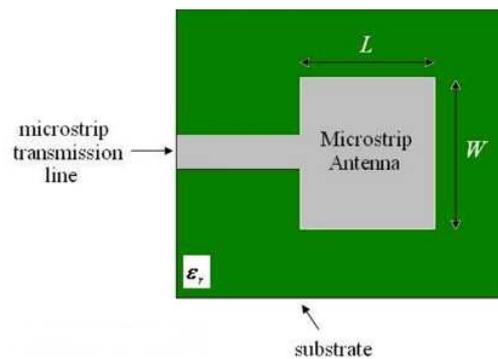


Figura 2.6 Alimentación microcintas en el borde del elemento radiante  
Fuente: (Azad & Ali, 2009)

- La figura 2.7 muestra la alimentación por microcintas con acoplamiento espaciado.

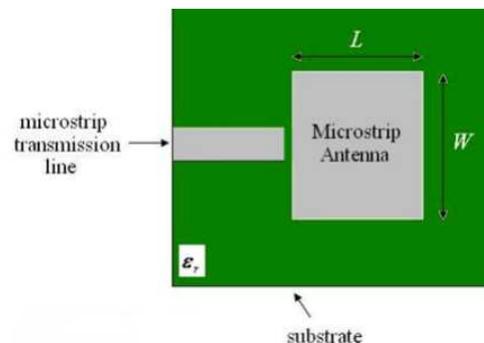


Figura 2.7 Alimentación microcintas con acoplamiento espaciado  
Fuente: (Azad & Ali, 2009)

- La figura 2.8 muestra la alimentación por microcintas con inserciones.

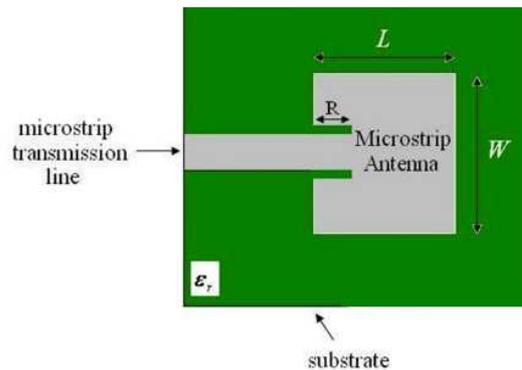


Figura 2.8 Alimentación microcintas con inserciones  
Fuente: (Azad & Ali, 2009)

Esta clase de alimentación es muy fácil de fabricar ya que tanto la línea de alimentación como el parche, se encuentran impresos sobre el mismo sustrato. Una estructura de este tipo no puede ser optimizada simultáneamente como una antena o como una línea de transmisión porque los requisitos específicos para cada uno de ellos son contradictorios. La adaptación de impedancia en esta clase de antenas es incluso más simple que en otros métodos.

Existe la posibilidad que la cinta microstrip esté centrada al elemento radiante o desplazada. Debido a este desplazamiento del punto de alimentación, se determina qué modo es el excitado por la antena y esto generará la menor o mayor adaptación de impedancias con la misma.

### 2.7.3 Alimentación por conector coaxial

El conector coaxial se sujeta por la parte trasera de la placa de circuito impreso y el conductor central del coaxial se une con el conductor de la antena o parche, como se observa en la figura 2.9. Al igual que en el caso de la alimentación por microstrip, la posición de la sonda coaxial en contacto con el parche dependerá de la adaptación de impedancias.

La ventaja de este diseño radica en la libertad que se tiene de colocar la alimentación en cualquier región dentro del parche, pudiéndose realizar fácilmente el acoplamiento de impedancia. Este método es muy fácil de realizar y

presenta pocas radiaciones espurias debido a que el mecanismo de alimentación está en contacto directo con la antena y la mayor parte de la red de alimentación está aislada del parche.

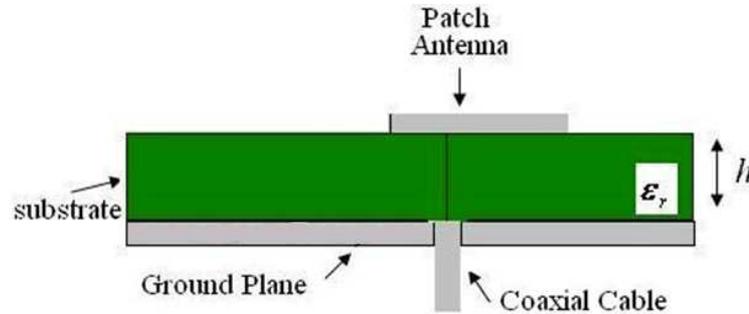


Figura 2.9 Alimentación por conector coaxial  
Fuente: (Azad & Ali, 2009)

Los alimentadores coaxiales tienen como desventajas que se debe perforar el sustrato, luego el conductor debe ser introducido a través de este y después ser soldado en el parche, estas son operaciones delicadas que requieren un manejo cuidadoso y el control mecánico de la conexión es muy difícil, especialmente para frecuencias altas.

#### 2.7.4 Alimentación por proximidad

En este tipo de alimentación no existe un contacto directo entre la alimentación y el elemento radiante de la antena, su acoplamiento es electromagnético. Teóricamente, el elemento radiante de la antena se sitúa sobre una capa de sustrato, por debajo de ella la línea de alimentación microstrip se encuentra sobre otra capa de sustrato, todo ello con un plano de tierra, como se observa en la figura 2.10.

De esta forma la optimización se realiza de forma más flexible, ya que el elemento radiante y la alimentación se encuentran separados, con sus correspondientes capas de sustrato dieléctrico, las cuales pueden tener permitividades diferentes.

La mayor ventaja de esta técnica es que elimina casi en su totalidad las radiaciones espurias provenientes de la alimentación, proporciona un ancho de

banda superior debido al incremento del espesor del sustrato de la antena, el acoplamiento se logra controlando el largo y el ancho de la línea de alimentación, la frecuencia de resonancia se controla a través del largo del parche radiador. Su mayor desventaja es su difícil fabricación debido a que las dos capas dieléctricas deben ser alineadas propiamente.

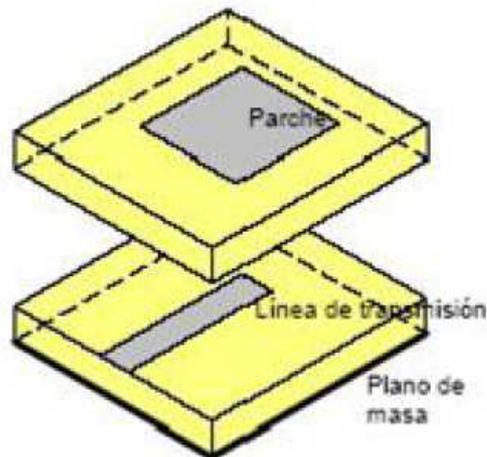


Figura 2.10 Alimentación por proximidad  
Fuente: (Azad & Ali, 2009)

### 2.7.5 Alimentación por apertura

Este es un método de excitación indirecta del parche, donde los campos electromagnéticos son acoplados desde la línea de alimentación de microcinta hacia el parche, a través de una pequeña ranura cortada en el plano de tierra. Usualmente esta apertura está centrada debajo del parche, en este caso la polarización cruzada es baja debido a la simetría de la configuración, como se observa en la figura 2.11. La forma, el tamaño y el lugar de la apertura, influyen sobre el acoplamiento de la línea de alimentación y el parche. La apertura puede ser tanto resonante como no resonante, la apertura resonante provee otra resonancia en adición a la del parche, incrementando el ancho de banda.

Una ventaja de este diseño es que el elemento radiador se encuentra protegido de la estructura de alimentación por el plano de tierra, además es importante la libertad de seleccionar dos sustratos dieléctricos diferentes, uno para la línea de alimentación y otro para el parche. Como los dos sustratos pueden ser

optimizados de forma independiente, se evita la necesidad de compromiso entre la radiación y las características de propagación. Esta flexibilidad seleccionando los substratos adecuados puede disminuir la ocurrencia de las no deseadas ondas de superficie y la aparición de acoplamientos espurios entre los elementos de la antena y por lo tanto incrementa la eficiencia y el ancho de banda de la antena. El proceso de fabricación de esta clase de antena es complejo y se puede deteriorar fácilmente su desempeño, debido a pequeños errores de alineación entre las diferentes capas.

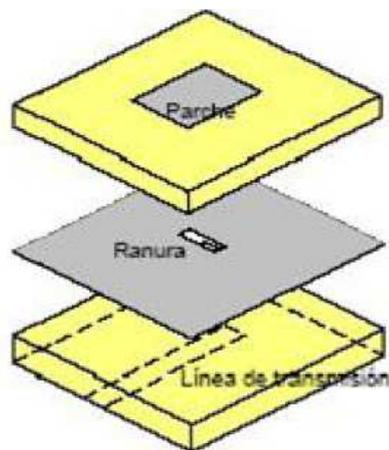


Figura 2.11 Alimentación por apertura  
Fuente: (Azad & Ali, 2009)

## 2.8 Método de análisis de las antenas

Para diseñar antenas es necesario utilizar métodos de análisis o simulación muy robustos con el fin de obtener una buena caracterización de dicha antena. Los diferentes métodos de análisis responden al problema fundamental de las antenas que propone buscar la forma de mantener durante todo el tiempo la distribución de corriente en todos los puntos. Para esto lo que se hace es adecuar las ecuaciones de Maxwell para las condiciones de frontera de todo tipo de antenas, por lo que surgieron diferentes soluciones dentro de las que se encuentran el método de Abraham, el método de Schelkunoff y el método de la determinación de la distribución de corrientes en los conductores de las antenas.

### 2.8.1 Método de Abraham

Solo era utilizable para antenas elipsoidales finas. Las soluciones se expresaron en series de infinitos términos de los modos de oscilaciones libres con coeficientes de

amortiguamiento que satisfagan las funciones de excitación. Este método tiene como desventaja principal que solo es aplicable a un número muy limitado de estructuras de antenas, entre las que no se encuentra las antenas formadas por conductores lineales cilíndricos.

Este primer método de solución tiene adicionalmente la desventaja que cuando se alejan de resonancia, la serie converge muy lentamente de forma tal que las soluciones no son apropiadas para computadoras pues exigen un considerable esfuerzo y tiempo de máquina (Gibson, 2008).

### **2.8.2 Método de Schelkunoff**

Las soluciones son obtenidas por analogía con las guías de onda abiertas o con las trompetas electromagnéticas. Se obtienen soluciones en función de ondas transmitidas a lo largo de las antenas. Esto se corresponde a las soluciones de ingeniería correspondiente a las líneas de transmisión en términos de ondas incidentes y reflejadas.

Una de las ventajas principales de este método consiste en que su procedimiento emplea las teorías de líneas de transmisión y de guías de ondas, las cuales son familiares al ingeniero. Aunque los resultados obtenidos son razonablemente precisos en un amplio rango de dimensiones y formas de antenas, tal método solo fue justificable mientras algún otro método más preciso no hubiera sido elaborado (Gibson, 2008).

### **2.8.3 Método de la determinación de la distribución de corrientes en los conductores de las antenas**

El tercer método general de solución del problema de las antenas está basado en la determinación de la distribución de corrientes en los conductores de las antenas ya que sus características de radiación e impedancia se pueden determinar con gran precisión a partir del conocimiento de las distribuciones espaciales de corrientes en amplitud y fase a lo largo de sus elementos radiadores. La determinación de la

distribución de corriente ha resultado ser un problema difícil aun para los dispositivos radiadores más simples o sea los Dipolos Simétricos, por lo que han existido dos variantes fundamentales de solución:

- La primera, históricamente, presupone a priori que las distribuciones de corriente siguen una ley sinusoidal.
- La segunda, calcula éstas por métodos aproximados. A estos métodos que calculan, aunque en forma aproximada, la corriente se les conoce también como métodos rigurosos de solución (Bickford, 1990).

### Distribuciones de corriente siguiendo una ley sinusoidal

La suposición de que las distribuciones de corrientes son sinusoidales a lo largo de los conductores estuvo basada en parte por la generalización de las mediciones realizadas en antenas de poca longitud eléctrica y de diámetros muy finos y en parte por la noción errónea de que la distribución de corriente existente en un tramo de línea de transmisión sin carga no se modificaba al formar con ella una antena lineal simétrica, tal como se muestra en la figura 2.12:

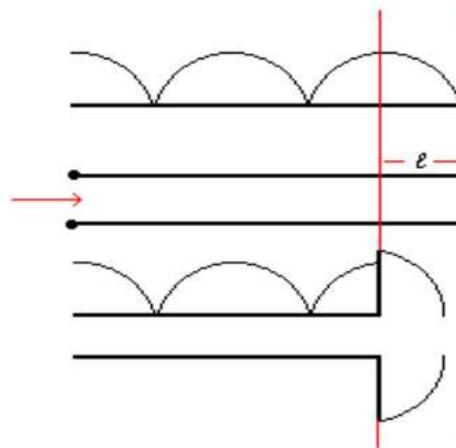


Figura 2.12 Distribución de corriente sinusoidal  
Fuente: (Bickford, 1990)

Históricamente los primeros métodos de solución usaron la distribución de corriente sinusoidal que es mucho menos exacta que los métodos rigurosos y que de hecho la suponían a priori.

La ecuación empleada para la distribución de corriente es la siguiente:

$$I_z(z) = I_0 \text{sen}k(l - |z|)e^{-j\omega t} \quad (2.7)$$

Se ha supuesto que el eje del conductor sigue la dirección del eje z, tal como se observa en la figura 2.13, donde se han representado dos combas incompletas de la amplitud de la corriente, es decir que la longitud eléctrica total  $2l$  no alcanza la magnitud de una longitud de onda.

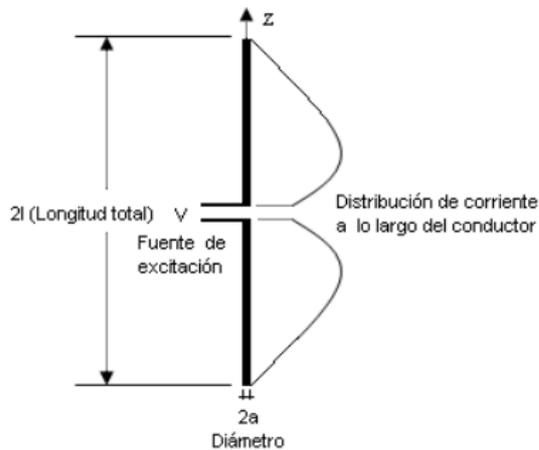


Figura 2.13 Dipolo simétrico con distribución de corriente sinusoidal  
Fuente: (Bickford, 1990)

Esa distribución de corriente a lo largo del eje de la antena es muy cómoda para realizar los cálculos de los parámetros de la antena y su aproximación es relativamente buena cuando el diámetro del conductor tiene un valor menor de cien partes de la longitud de onda o sea:

$$d = 2a \leq \frac{\lambda}{100} \quad (2.8)$$

En ese caso la aproximación entre los parámetros calculados y los reales es buena cuando su valor depende de la corriente a lo largo de toda la antena, tal como en sus características direccionales, pero puede tener errores severos cuando el parámetro calculado depende de la corriente en un punto de la antena, como en el caso de la impedancia de entrada.

El método de distribución de corriente sinusoidal es usado sobre todo para las antenas de conductores finos, mientras el conductor sea más fino más exacto es el método.

Las expresiones obtenidas en base a la aplicación de las ecuaciones fundamentales de la electrodinámica para la determinación de las características de radiación e impedancia en las antenas, se simplifican enormemente con la suposición de que las distribuciones de corriente siguen una ley sinusoidal. Hubo dos métodos basados en dicha suposición que alcanzara gran popularidad en el pasado cercano:

- ✓ El método del vector de Poynting
- ✓ El método de la fuerza electromotriz inducida.

El último tiene la ventaja de que permite calcular las impedancias propias y mutuas. Ambos métodos al emplear distribuciones de corrientes sinusoidales supuestas dan en general resultados menos precisos que los obtenidos para las distribuciones de corrientes por métodos aproximados (métodos rigurosos), especialmente en todos aquellos casos donde las distribuciones de corriente se alejan de las distribuciones de corrientes sinusoidales.

### **Métodos rigurosos**

Para calcular las distribuciones de corriente a lo largo de los elementos conductores de una antena es necesario obtener un modelo matemático de estos o sea de un sistema de ecuaciones integro-diferenciales a partir del empleo de expresiones generales para la distribución de corrientes, las ecuaciones de Maxwell, las condiciones de frontera específicos de cada antena y de sus fuentes de excitación y que puedan ser solucionadas mediante métodos numéricos.

Se han desarrollado dos caminos diferentes para enfrentar la solución; la primera mediante ecuaciones integrales puras y la segunda mediante ecuaciones integro-diferenciales. Ambos métodos están ligados a los nombres de Hallen y de Pocklington respectivamente. Entre sus ventajas se tiene que:

- El método de Hallen permite la obtención de ecuaciones integrales puras conocidas como ecuaciones integrales de Hallen.
- El método de Pocklington tienen las ventajas de no poseer constantes arbitrarias de integración y la de ser aplicable al análisis de muchos tipos de antenas de diversas geometrías.

Entre sus desventajas se tiene que:

- El método de Hallen y de Pocklington no poseen solución analítica, sin embargo, eso no significa que no puedan obtenerse buenas aproximaciones a las distribuciones de corriente reales existentes en las antenas.
- El método de Pocklington tiene derivadas fuera de las integrales potenciales que dificultan la solución numérica de los modelos. Además, las ecuaciones diferenciales son muy sensibles a los errores introducidos durante la computación haciéndolas en ocasiones inestables y críticas, así como a la aparición de ciertos casos de integrales divergentes.

Al estudiar y proyectar antenas, hay dos métodos matemáticos CEM (Computational Electromagnetics), a saber MoM (Method of Moments) y el de los elementos finitos. El primero se ha usado por años y el segundo recientemente (Davies, 1980), (Martínez, 2007).

### **Método de los momentos**

Esta técnica parte de la concepción de transformar una ecuación funcional (Ecuación integral de Hallen) a una matriz y solucionarla mediante métodos conocidos, así un ejercicio determinístico se supone determinado al reducirlo a una matriz y la solución se presenta por la inversión de la misma, incluso se tienen softwares para esta operación relativamente simple (Harrington, 1982), (Martínez, 2007).

Con esta técnica matemática se solucionan ecuaciones lineales no homogéneas de la forma (UIT, 1998):

$$Lf = g \quad (2.9)$$

Donde  $L$  es generalmente, un operador lineal integro-diferencial y  $f$  y  $g$  elementos del espacio de Hilbert. En la expresión se sabe  $g$  y se pretende invertir  $L$  para conseguir la función desconocida  $f = L^{-1}g$  (UIT, 1998).

La técnica convierte el operador de la ecuación (2.9) en un sistema de ecuaciones algebraicas lineales, para lo cual el elemento  $f$  se despliega en una serie de funciones de base  $\{f_n\}$  con coeficientes constantes desconocidos  $\{C_n\}$ . Reemplazando en la ecuación (2.9) y efectuando el producto interno de los dos elementos por un conjunto de funciones de prueba conocidas  $\{w_m\}$ , se transforma la expresión (2.9) a una matriz del tipo (UIT, 1998):

$$Ax = b \quad (2.10)$$

En la cual  $A$  y  $b$  son los productos internos  $A_{mn} = \langle w_m, Lf_n \rangle$ ,  $b_m = \langle w_m, g \rangle$ , y  $x$  el vector de coeficientes desconocidos  $\{C_n\}$ . La expresión (2.10) se resuelve sencillamente para  $x$  mediante técnicas matemáticas básicas, determinándose el valor de  $f$  (UIT, 1998).

Una de las principales tareas de un problema particular es la elección de  $f_n$  y  $w_m$ . Los  $f_n$  deben ser linealmente independientes y escogidos para que una superposición pueda aproximar suficientemente bien (Martínez, 2007), siendo necesario considerar en estas funciones que a mayor grado de complejidad más exacto es el método pero requiere mayor tiempo de operación. Estas funciones pueden ser trigonométricas, series y actualmente se están utilizando mucho las polinómicas con coeficientes complejos.

Los  $w_m$  deben ser también linealmente independientes y escogidos de forma que los productos  $\langle w_m, g \rangle$  (Martínez, 2007) dependan de propiedades relativamente

independientes de  $g$ . Para encontrar este elemento se utilizan fundamentalmente dos métodos, el de Galiorki y el de los puntos adaptados. El método de Galiorki dice  $f_n = w_m$  y tiene como ventaja que ya se va a conocer la distribución de dichas funciones. El método de los puntos adaptados plantea que  $w_m$  serán funciones Delta de Dirac y tiene como ventaja su sencillez pero no su exactitud.

Algunos factores adicionales que afectan la elección de  $f_n$  y  $w_m$  son la precisión de la solución deseada, la facilidad de la evaluación de los elementos de la matriz, el tamaño de la matriz que puede ser invertida y la realización de una matriz bien acondicionada (Harrington, 1982), (Martínez, 2007).

Se considera como el más exacto de los métodos existentes usados para estudiar la dispersión electromagnética, en el cual la enunciación de la expresión principal es precisa y se consiguen resultados muy exactos escogiendo apropiadamente las funciones de base y prueba, es importante anotar que otros elementos de la infraestructura de la antena como tirantes, alimentadores, reflectores y soportes pueden incluirse en el ejercicio (UIT, 1998).

La técnica puede pronosticar el esquema de antena, considerando los efectos del soporte de antena y de los subsistemas relacionados, lo cual hace que el estudio sea muy complicado. Lo cual presenta la desventaja de que cuando el sistema es muy complejo el análisis puede ser muy extenso y complicado (UIT, 1998).

### **Procedimiento de los elementos finitos (MEF)**

Es una técnica matemática empleada en física e ingeniería para acercarse a resultados de expresiones diferenciales parciales. Está concebido para computadoras y logra solucionar expresiones diferenciales de ejercicios físicos con geometrías complejas, es empleado en proyectos y perfeccionamiento de artículos y trabajos fabriles, en representación de procesos físicos y biológicos complicados, entre otras aplicaciones donde la restricción es que las expresiones que componen el ejercicio y las de su desarrollo temporal se sepan con anticipación (documents.mx, 2015).

Este procedimiento deja conseguir una respuesta matemática acerca de un objeto, arreglo o entorno, para el cual están precisadas expresiones diferenciales de manera débil o completa que describen el procedimiento real del ejercicio, fraccionándolo en una alta cantidad de subdominios no confluyentes entre ellos, a los que se llama elementos finitos, la agrupación de los cuales establece un fraccionamiento del entorno llamado discretización. En cada componente se identifican una sucesión de puntos característicos denominados nodos y dos de los cuales son contiguos si corresponden al mismo elemento finito. Un nodo ubicado en el límite de un elemento finito puede corresponder a varios componentes. La agrupación de nodos de acuerdo a sus vínculos de proximidad forma una malla (Davies, 1980).

Las deducciones se hacen en una malla de nodos, usados como base para la discretización del entorno en elementos finitos. La malla se crea mediante softwares denominados generadores de mallas en un pre-proceso, antes de las deducciones. Según estos vínculos de proximidad o conexión se corresponde el valor de una agrupación de variables incógnitas precisadas en cada nodo y llamadas grados de libertad (González J. , 2010).

La agrupación de vínculos entre el valor de una variable establecida entre los nodos se puede expresar como un sistema de expresiones lineales, cuya matriz se denomina de “rigidez”, siendo la cantidad de expresiones del sistema igual a la cantidad de nodos (González J. , 2010).

Por lo general, el estudio de elementos finitos se bosqueja informáticamente para determinar el campo de desplazamientos y luego mediante vínculos cinemáticos y constitutivos las imperfecciones y elasticidades individualmente, si se trata de un ejercicio de mecánica de sólidos alterables o de mecánica de medios continuos. El procedimiento MEF es popular por su universalidad y disposición para tratar entornos de deducción complicados. Es configurable sencillamente a ejercicios de transferencia de calor, mecánica de fluidos, deducciones de campos de velocidad y presiones o campos electromagnéticos (González J. , 2010).

En ingeniería estos procedimientos matemáticos son la mejor opción por el impedimento real de hallar la respuesta de manera analítica de estos ejercicios. La convergencia es una característica transcendental del MEF al suponer fraccionamientos de elementos finitos cada vez más finas, la respuesta matemática encontrada confluye a la solución exacta del sistema de expresiones (González J. , 2010).

### **Representación numérica del procedimiento**

La ejecución de un algoritmo de elementos finitos para solucionar un ejercicio expresado con expresiones diferenciales y situaciones de entorno necesita 4 etapas (González J. , 2010), si  $d$  es la extensión del entorno,  $n$  la cantidad de elementos finitos y  $N$  la cantidad total de nodos:

En primer lugar el ejercicio debe redefinirse de manera variacional, así se transforma un ejercicio de deducción diferencial expresado en función de ecuaciones diferenciales en un ejercicio algebraico lineal formulado en una zona de Banach, habitualmente de dimensión infinita que puede aproximarse a un método finito de expresiones algebraicas (Davies, 1980).

Dada una ecuación diferencial lineal de la forma:

$$L(u) = f \tag{2.11}$$

En que la respuesta es función precisada en un entorno  $d$ -dimensional  $\Omega \subset R^d$ , y se ha desarrollado una agrupación de situaciones de entorno apropiadas, puede creerse que la función examinada es un componente de un área de funciones o zona de Banach  $V$  y que la expresión (2.11) es similar a (documents.mx, 2015):

$$A(u) = f \quad \begin{cases} u \in V & f \in V' \\ A: V \rightarrow V' & A \in L(V, V') \end{cases} \tag{2.12}$$

Donde  $V'$  es el área dual de  $V$ , la forma variacional débil se consigue examinando la única respuesta  $u \in V$  tal que:

$$a(u, v) = \langle f, v \rangle, \quad \forall v \in V \quad \text{donde} \quad \begin{cases} a(u, v) = \langle Au, v \rangle \\ \langle f, v \rangle = \int_{\Omega} f(v) d\Omega \end{cases} \quad (2.13)$$

Si el operador lineal es elíptico, el ejercicio se plantea como uno de minimización en la zona de Banach (documents.mx, 2015).

En segundo lugar el entorno de variables independientes se fracciona en subdominios, denominados elementos finitos. Al mismo tiempo se genera un área vectorial de extensión finita o área de elementos finitos. Así la respuesta matemática aproximada conseguida por elementos finitos es una mezcla lineal en dicha área vectorial.

Dado un dominio  $\Omega \subset R^d$  con un límite continuo según Lipschitz un fraccionamiento en  $n$  elementos finitos, es una agrupación de  $n$  subdominios  $\{\Omega^{(e)}\}_{e=1}^n$  que satisface la expresión:

$$\Omega = \bigcup_{e=1}^n \Omega^{(e)} \quad (2.14)$$

Cada  $\Omega^{(e)}$  es una agrupación cerrada con un límite Lipschitz-continua (documents.mx, 2015).

$$\text{int}(\Omega^{(i)}) \cap \text{int}(\Omega^{(j)}) = \emptyset, \quad i \neq j \quad (2.15)$$

Comúnmente por comodidad real y simplicidad de estudio, los elementos finitos tienen la misma forma, hay un entorno de referencia (dominio isoparamétrico)  $\widehat{\Omega} \subset R^d$  y una agrupación de funciones biyectivas:

$$\{F^e | F^e: \widehat{\Omega} \rightarrow \Omega^{(e)}\} \quad (2.16)$$

En los estudios 2D ( $d = 2$ ) el entorno de referencia  $\widehat{\Omega}$  se considera un triángulo equilátero o un cuadrado y en los análisis 3D ( $d = 3$ ), como un tetraedro o un hexaedro. Adicionalmente en cada elemento se supondrán algunos nodos que envuelven los ángulos del elemento finito y se necesitará la circunstancia añadida

de que dos elementos contiguos compartan los nodos en el subconjunto  $\Omega^{(i)} \cap \Omega^{(j)}$ , así (documents.mx, 2015):

$$x \in \Omega^{(i)} \cap \Omega^{(j)} \wedge (x \in \text{nod}(\Omega^{(i)})) \Rightarrow (x \in \text{nod}(\Omega^{(j)})) \quad (2.17)$$

Después de establecido el fraccionamiento en elementos finitos, se precisa en cada uno un área práctica de extensión finita constituida por polinomios, la cual permitirá aproximar localmente la respuesta del ejercicio variacional, que en su forma frágil se proyecta en un área de extensión infinita, y consecuentemente la función examinada es función de esa área.

En estas condiciones el ejercicio informáticamente es inaccesible de esa manera estricta entonces en la realidad se supondrá una sub-zona de extensión finita  $V^h$  del área vectorial original  $V$ . Así en vez de la respuesta precisa de (2b) se deduce la influencia de la respuesta original en la sub-zona vectorial de extensión finita, y se solucionará matemáticamente el ejercicio:

$$a(u^h, v^h) = \langle f, v^h \rangle, \quad \forall v^h \in V^h \quad (2.18)$$

Dónde  $u^h = \Pi_e(u) \in V^h$ , es la respuesta aproximada.

$\Pi_e: V \rightarrow V^h$   $V^h \subset V$  es el proyector ortogonal del área original en la sub-zona vectorial unido a la discretización y si ésta es suficientemente fina y el área funcional finita en cada elemento está bien elegida, la respuesta matemática lograda acercará suficientemente a la respuesta única, lo cual significará suponer una cantidad muy alta de elementos finitos y consecuentemente una sub-zona de influencia de extensión alta. La diferencia entre la respuesta exacta y la aproximada se delimita mediante el lema de Ceá, que establece que la respuesta correcta y la aproximada satisfacen la ecuación:

$$\|u - u^h\|_V \leq c \inf_{v^h \in V^h} \|u - v^h\|_V \quad (2.19)$$

Así, la diferencia dependerá de lo bien que la sub-zona vectorial ligada a la discretización en elementos finitos  $V^h$  acerque el área vectorial original  $V$  (documents.mx, 2015).

La tercera etapa consiste en conseguir la influencia del ejercicio variacional original en el área de elementos finitos conseguido del fraccionamiento, generando un sistema con una cantidad de ecuaciones finita, pero con una cantidad alta de expresiones desconocidas, la cual será igual a la extensión del área vectorial de elementos finitos logrado y, a mayor extensión mejor será la aproximación matemática lograda (Bickford, 1990).

Hay diversas maneras de elegir una agrupación de funciones que constituyan una base vectorial para acercarse a la respuesta exacta del ejercicio. En la realidad es ventajoso establecer un área vectorial  $\hat{X}$  de extensión finita determinada en el entorno de referencia  $\hat{\Omega}$  constituido por los polinomios de grado igual o inferior a uno determinado (documents.mx, 2015):

$$P_n(\Omega) \subset \hat{X} \quad (2.20)$$

Con los estudios que usan el entorno de referencia en cada elemento finito se precisa el área vectorial  $V^h \subset V$  que permitirá acercarse a la respuesta como (documents.mx, 2015):

$$V^h = \{v^h \in V | \forall e: v^h \circ F^{(e)} \in \hat{X}\} \quad (2.21)$$

Si  $F^{(e)}$  es una función lineal y el área  $\hat{X}$  está constituida por polinomios, la limitación de  $v^h \in V^h$  es un polinomio. El área vectorial  $\hat{X}$  es una zona polinómica asentada en funciones de forma  $\hat{N}_i$ , considerando la agrupación de nodos del entorno de referencia se puntualizan como:

$$\hat{N}_i(\xi_j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (2.22)$$

Así se establece de manera única las funciones en el dominio real en que se precisa el ejercicio (documents.mx, 2015):

$$\forall \xi \in \widehat{\Omega}: \widehat{N}_i(\xi) = (N_i^{(e)} \circ F^{(e)})(\xi) \quad (2.23)$$

Estas funciones se pueden extender a todo el entorno, gracias a que el conjunto de sub-entornos o términos finitos constituye una partición de todo el entorno (documents.mx, 2015):

$$N_i: \Omega \rightarrow R^d, \quad \forall x \in \Omega^e \subset \Omega: N_i(x) = N_i^e(x) \quad (2.24)$$

Las funciones de forma permiten programar en el área de elementos finitos cualquier función especificada en el entorno original con el proyector  $\Pi^h$

$$(\Pi^h v)(\cdot) = \sum_{i=1}^n v(x_i) N_i(\cdot) \in V^h \quad (2.25)$$

La etapa final es la deducción matemática de la respuesta del conjunto de ecuaciones. Establecida una base relacionada a una prescrita discretización del entorno, como la de las funciones  $N_i(x)$  la manera débil del ejercicio (cuando la función  $a(\cdot, \cdot)$  es bilineal) se expresa en forma de una matriz sencilla:

$$a(u^h, v^h) = \langle f, v^h \rangle, \quad \forall v^h \in V^h, \quad \Rightarrow \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}(u^h) (v^h)_j = \sum_{j=1}^N (f)_j (v^h)_j \quad (2.26)$$

$N$  es la cantidad de nodos. Al concentrar los elementos y considerando a  $v^h$  arbitrario y consecuentemente la expresión (2.26) debe satisfacerse para cualquier valor de ese vector, entonces:

$$\sum_{j=1}^N \left( \sum_{i=1}^N a_{ij}(u^h) - (f)_j \right) (v^h)_j = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^N a_{ij}(u^h) - (f)_j = 0 \quad (2.27)$$

Que es la manera habitual del conjunto de expresiones de un ejercicio de términos inscrito a una expresión diferencial lineal independiente del tiempo.

Frecuentemente las dificultades informáticas a solucionarse en la respuesta matemática son:

La deducción de la matriz de coeficientes  $K = a_{ij}$ , lo cual demanda combinación matemática aproximada que implica fallas en el cómputo del MEF.

El empleo de un procedimiento eficaz para solucionar el conjunto de expresiones conseguido, así la técnica de Cramer no es útil si  $N \geq 27!$ , una computadora de 10GFlops (Giga Floating Point Operations Per Second) demoraría aproximadamente 2 años en solucionar el sistema con ese procedimiento, en cambio con la técnica de exclusión gaussiana demoraría unos diez milisegundos.

Comprender la importancia de la unificación matemática requiere saber la manera usual del perfil débil del ejercicio en función de los sub-entornos o términos finitos, incluyendo integrales así:

$$\int_{\Omega} f d\Omega = \sum_{e=1}^n \int_{\Omega^{(e)}} f d\Omega = \sum_{e=1}^n \int_{\widehat{\Omega}} (f \circ F^{(e)}) J_{F^{(e)}} d\widehat{\Omega} \approx \sum_{m=1}^{N_{PI}} w_m \hat{f}(\xi_m) J_{F^{(e)}}(\xi_m) \quad (2.28)$$

Dónde  $\Omega \subset R^d$  representa el entorno del ejercicio.

$\Omega^{(e)}$ ,  $\widehat{\Omega}$ , constituyen cada uno de los términos finitos y al entorno isoparamétrico que genera los términos finitos.

$f: R^d \rightarrow R$ ,  $f := \widehat{f} \circ F^{(e)}$ , simbolizan la función a integrarse y su enunciado en el entorno isoparamétrico.

$F^{(e)}: \widehat{\Omega} \rightarrow \Omega^{(e)}$ , representa la función que corresponde el entorno isoparamétrico con los términos finitos (documents.mx, 2015).

$w_m, \xi_m$ , son los pesos y los puntos de integración usados para integración gaussiana.

$n, n_{PI}$ , son el número total de elementos y el número de puntos de integración por elemento.

Dentro de este paso es necesario incluir la aproximación del error: de acuerdo con el lema de Ceá (2.19) el error cometido en la aproximación de una solución exacta mediante elementos finitos viene acotada por el error de aproximación, es decir, la solución obtenida mediante el MEF es, tanto más buena cuanto mejor sea la aproximación  $V^h \subset V$ . A continuación se acota este error de aproximación que limitará el error de la solución de elementos finitos (documents.mx, 2015).

Para ello se necesita definir el diámetro de cada subdominio o elemento finito:

$$h_e = \text{diam}(\Omega^{(e)}) = \max\{\|x - y\| : x, y \in \Omega^{(e)}\}, \quad h := \max_e |h_e| \quad (2.29)$$

$h$  es una medida de la finura de la discretización, es el máximo de los anteriores valores. Puede comprobarse que el error de aproximación (y por tanto el error de la solución mediante elementos finitos) viene acotada por:

$$\|u - u^h\|_V = \|u - \Pi^h u\|_V \leq C_1 h^{k+1-m} |u|_{k+1, \Omega}, \quad u \in V \subset H^{k+1}(\Omega) \quad (2.30)$$

Dónde  $u, u^h$ , son respectivamente la solución exacta y la solución obtenida mediante elementos finitos.

$C_1$ , es un número real que depende de la forma del dominio, entre otros factores.

$H^{k+1}(\Omega)$ , es el  $k+1$ -ésimo espacio de Sobolev de funciones sobre el dominio  $|u|_{k+1, \Omega}$ , es la seminorma dada por (documents.mx, 2015):

$$|u|_{k+1, \Omega} = \sum_{|\alpha|=k+1} \|D^\alpha u\|_{L^2(\Omega)}$$

Siendo  $\alpha$  un multi-índice y  $D^\alpha u$  la derivada parcial de  $u$  asociada al mismo. La norma del espacio es  $L^2(\Omega)$ .

Los pasos anteriores permiten convertir un problema de cálculo diferencial en uno de álgebra lineal. Dicho problema en general se plantea sobre un espacio vectorial de dimensión no finita, pero que puede resolverse aproximadamente encontrando una proyección sobre un subespacio de dimensión finita, y por tanto con un número finito de ecuaciones (aunque en general el número de ecuaciones será elevado, típicamente de miles o incluso centenares de miles). La discretización en elementos finitos ayuda a construir un algoritmo de proyección sencillo, logrando además que la solución por el método de elementos finitos sea generalmente exacta en un conjunto finito de puntos. Estos puntos coinciden usualmente con los vértices de los elementos finitos o puntos destacados de los mismos. Para la resolución concreta del enorme sistema de ecuaciones algebraicas en general pueden usarse los métodos convencionales del álgebra lineal en espacios de dimensión finita (Bickford, 1990).

### CAPÍTULO 3: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE DOS ANTENAS FRACTALES BASADAS EN LA ALFOMBRA Y EL TRIÁNGULO DE SIERPINSKI

Básicamente una antena es un dispositivo de banda estrecha y por consiguiente depende de las dimensiones del mismo y su longitud de onda ( $\lambda$ ) de operación, así para una dimensión determinada, sus características importantes como ganancia, resistencia de entrada, patrón del campo radiado y configuración de lóbulos secundarios, soportan perturbaciones al cambiar la frecuencia de operación. En la figura 3.1 se observa el desarrollo de los modelos de radiación de una antena clásica, un dipolo lineal, al duplicar la frecuencia surgen más lóbulos afilados, modificando la transmisión ideal de energía en el medio (Luque & Agea).

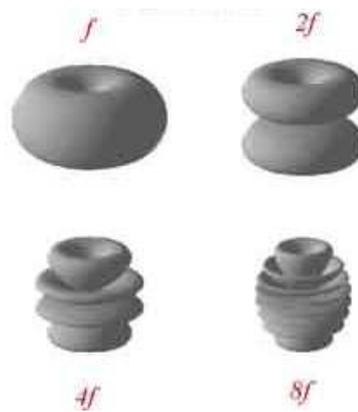


Figura 3.1 Patrones de radiación de una antena clásica  
Fuente: (Castany, 1999)

Una antena para trabajar eficazmente no debe sobrepasar una dimensión mínima respecto a  $\lambda$ , es decir que para una frecuencia específica, el dispositivo tendrá una dimensión mínima, de  $\lambda/4$ . Esta característica obstaculiza la evolución de proyectos de telecomunicaciones (Luque & Agea).

Bajo estas circunstancias surgen 2 causas para las antenas fractales sean interesantes: se supone que una antena auto semejante trabaje igual en diversas longitudes de onda, conservando sus características de emisión iguales para diferentes frecuencias y a causa de las cualidades de los fractales para saturar el medio, se podría tener antenas (multibanda) más pequeñas (Luque & Agea).

La alfombra y el triángulo de Sierpinski son un buen ejemplo de fractales que cumplen con las características comentadas anteriormente, como se observa en la figura 3.2.

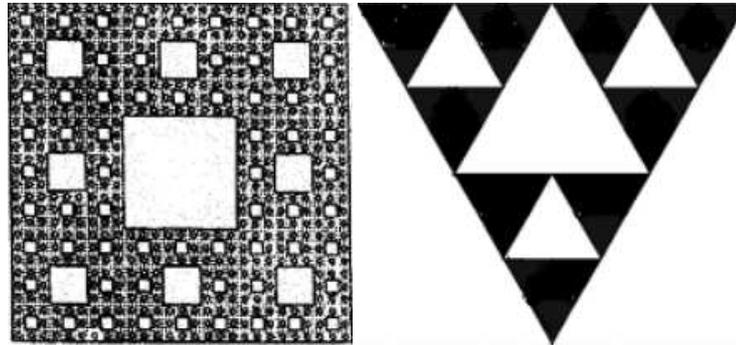


Figura 3.2 Alfombra y triángulo de Sierpinski  
Fuente: (Gianvittorio, 2000)

En este trabajo se simulan dos antenas tipo monopolo, basadas en la iteración de la alfombra y del triángulo de Sierpinski respectivamente.

Ante la dificultad que trae el diseño, análisis, ajuste y construcción de una antena, se han desarrollado potentes herramientas o softwares que facilitan en gran medida todas las etapas del proceso de dimensionado de una antena. Se trata de simuladores electromagnéticos que aprovechan la capacidad de cálculo de los computadores para determinar los flujos electromagnéticos de las estructuras que se quiera analizar.

En este diseño se utiliza el programa HFSS, el cual es un programa interactivo para calcular el comportamiento electromagnético de una estructura. El mismo incluye comandos de post-proceso para analizar este comportamiento en detalle.

### **3.1 Diseño y simulación de la antena basada en el fractal alfombra de Sierpinski.**

A continuación se describirán de manera individual los procesos de diseño y simulación de la antena basada en el fractal alfombra de Sierpinski:

### 3.1.1 Diseño de la antena fractal

El diseño propuesto de la antena fractal se pensó para que fuera utilizada, entre otras cosas, en dispositivos receptores de WIFI (Wireless Fidelity), por lo que se diseñó la antena para que radiara fundamentalmente a los 5.7GHz. Debido a las propiedades de este tipo de antenas fractales, además de radiar a la frecuencia para la que fue diseñada, radia también a 4.73GHz, 12.16GHz, 14.39GHz y 16.35GHz.

Para diseñar la antena fractal basada en la alfombra de Sierpinski se partió del diseño de una antena tipo parche rectangular, para esto se utilizan las ecuaciones siguientes:

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\xi_r + 1}} \quad (3.1)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (3.2)$$

Dónde:

$W$ : Ancho de la antena

$L$ : Longitud de la antena

$c$ : Velocidad de la luz  $c = 3 * 10^8$

$f_0$ : Frecuencia de diseño  $f_0 = 5.7GHz$

$\xi_r$ : Permitividad relativa  $\xi_r = 4.4$

$L_{eff}$ : Longitud efectiva

Donde  $L_{eff}$  y  $\Delta L$  están dadas por:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\xi_{reff}}} \quad (3.3)$$

$$\xi_{reff} = \frac{\xi_r + 1}{2} + \frac{\xi_r - 1}{2} \left[ 1 + \frac{12h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

$$\xi_{reff} = \frac{\xi_r+1}{2} + \frac{\xi_r-1}{2} \left[ 1 + \frac{12h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\xi_{reff}+0.3)[W/h+0.264]}{(\xi_{reff}+0.258)[W/h+0.8]} \quad (3.6)$$

Dónde:

$h$ : Grosor del sustrato dieléctrico  $h = 1.6mm$

Realizando los cálculos anteriores, se obtienen los siguientes resultados:

$$W = 16.01$$

$$L = 12.15$$

Para el siguiente diseño de antena parche se emplearon las dimensiones y materiales, mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Dimensiones y materiales para la antena parche rectangular.

COMPONENTE	MATERIAL	DIMENSIONES
Antena	Cobre	11.7 x 16.01 x 0.008
Plano de tierra	Cobre	20.6 x 28 x 0.008
Sustrato dieléctrico	FR4	20.6 x 28 x 1.6

Elaborado por el Autor

Todas las dimensiones expuestas son del estilo L x W x H donde L es la altura, W es el ancho y H es el grosor en mm.

La tira de alimentación se encuentra centrada en la antena, desde el borde del sustrato, con una longitud de 5 mm y un ancho de 1 mm hasta el borde de la antena. La antena se puede observar en la figura 3.3.

Luego de realizada la simulación se obtuvieron los resultados que se muestran en las figuras 3.4, 3.5, 3.6, y 3.7:

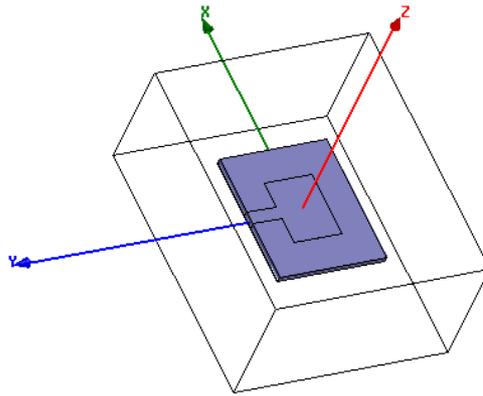


Figura 3.3 Antena parche rectangular  
Elaborado por el Autor

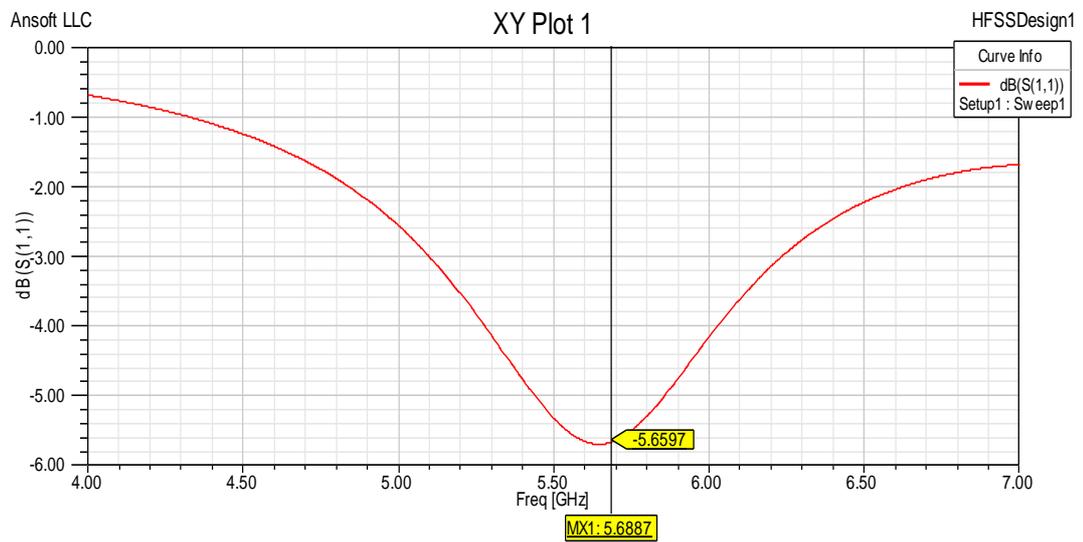


Figura 3.4 Frecuencia de resonancia de la antena parche  
Elaborado por el Autor

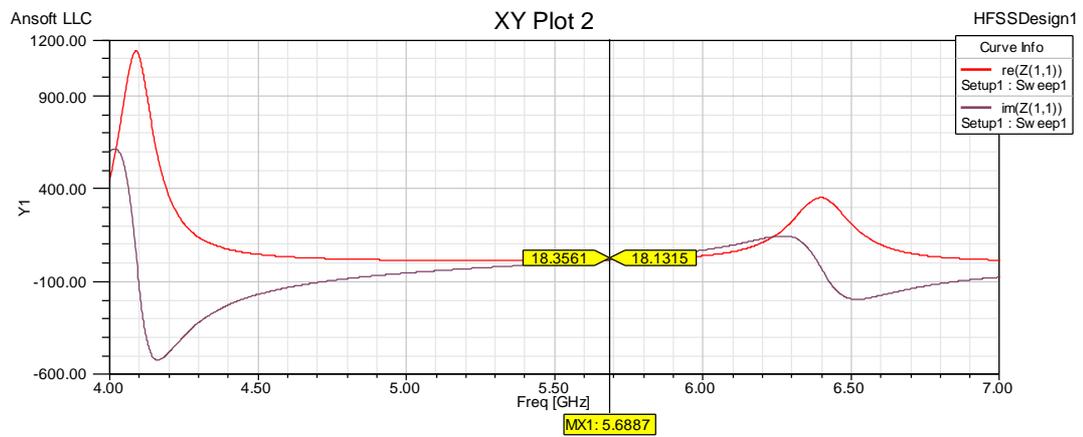


Figura 3.5 Resistencia real e imaginaria de la antena parche  
Elaborado por el Autor

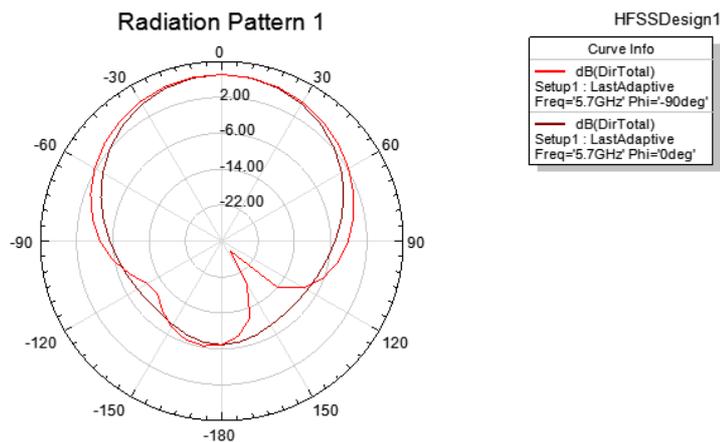


Figura 3.6 Diagrama de radiación de la antena parche  
Elaborado por el Autor

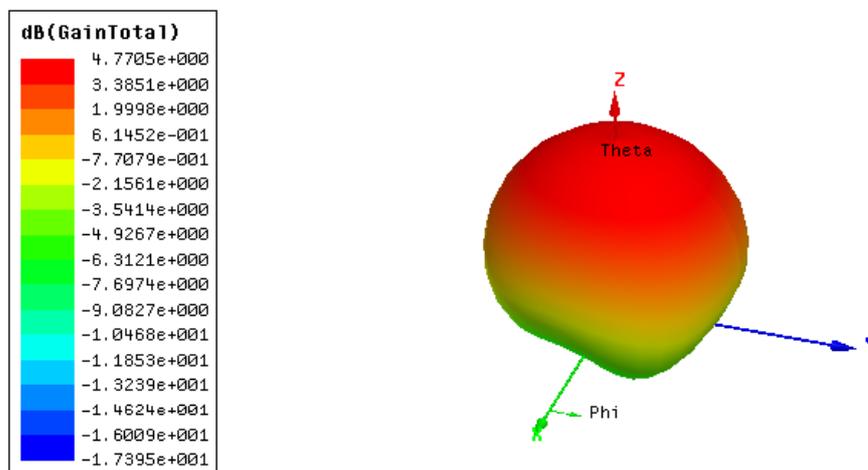


Figura 3.7 Diagrama de la ganancia de la antena parche  
Elaborado por el Autor

Luego de obtenidos los resultados anteriores se realiza la extracción en esta antena, de las partes necesarias para la conformación del patrón fractal, para esto hay que seguir la proporción de que las dimensiones de los lados del cuadrado menor son un tercio del lado inmediatamente mayor a él, como se muestra en la figura 3.8.

Al realizar esta acción se observa que la frecuencia de resonancia se desplaza y la antena radia a otra frecuencia, en este caso a 5.2GHz, por lo que para que la antena vuelva a radiar a 5.7GHz, que es lo que se quiere, hay que disminuir el tamaño de la misma, aquí se demuestra una de las ventajas de las antenas

fractales, que para que radie a igual frecuencia que una antena normal ésta debe tener dimensiones más pequeñas.

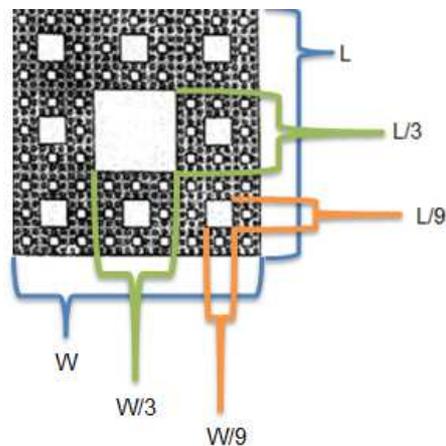


Figura 3.8 Dimensiones de las partes necesarias a extraer para conformar el patrón fractal  
Elaborado por el Autor

Para obtener las dimensiones de la antena fractal se diseñó una antena parche que radiara a 5.2GHz, con el objetivo de obtener sus dimensiones y sacar un porcentaje de reducción, como muestra la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Porcentaje de reducción para la antena parche.

<b>ANTENA PARCHA</b>		
<b>FRECUENCIA</b>	<b>LARGO</b>	<b>ANCHO</b>
5.7GHz	11.7	16
5.2GHz	12.8	17.5
<b>PORCENTAJE DE REDUCCIÓN</b>	8.6%	8.6%

Elaborado por el Autor

Luego de obtenido el porcentaje de reducción en la antena parche, se puede utilizar este mismo para conseguir las dimensiones de la antena fractal, como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Porcentaje de reducción para la antena fractal.

<b>ANTENA FRACTAL</b>		
<b>FRECUENCIA</b>	<b>LARGO</b>	<b>ANCHO</b>
5.2GHz	11.7	16
5.7GHz	10.7	14.6
<b>PORCENTAJE DE REDUCCIÓN</b>	8.6%	8.6%

Elaborado por el Autor

### 3.1.2 Simulación de la antena fractal

Obtenidas las dimensiones para la antena fractal, fue simulada dicha antena y con el objetivo de un mejor acoplamiento en impedancia y de una mejor respuesta en frecuencia se desplazó la línea de transmisión hacia una esquina de la antena, logrando así un coeficiente de reflexión de  $-24.37\text{dB}$  y una impedancia de casi  $50\Omega$ , como se observa en la figura 3.9. Para el diseño de la antena anteriormente mencionada se utilizaron los materiales que se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Dimensiones y materiales para la antena fractal alfombra de Sierpinski

COMPONENTE	MATERIAL	DIMENSIONES
Antena	Cobre	10.6 x 14 x 0.008
Plano de tierra	Cobre	20.6 x 28 x 0.008
Sustrato dieléctrico	FR4	20.6 x 28 x 1.6

Elaborado por el Autor

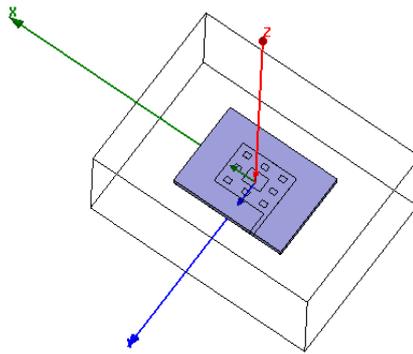


Figura 3.9. Antena fractal alfombra de Sierpinski  
Elaborado por el Autor

Los resultados obtenidos luego de la simulación se muestran en la figura 3.10.

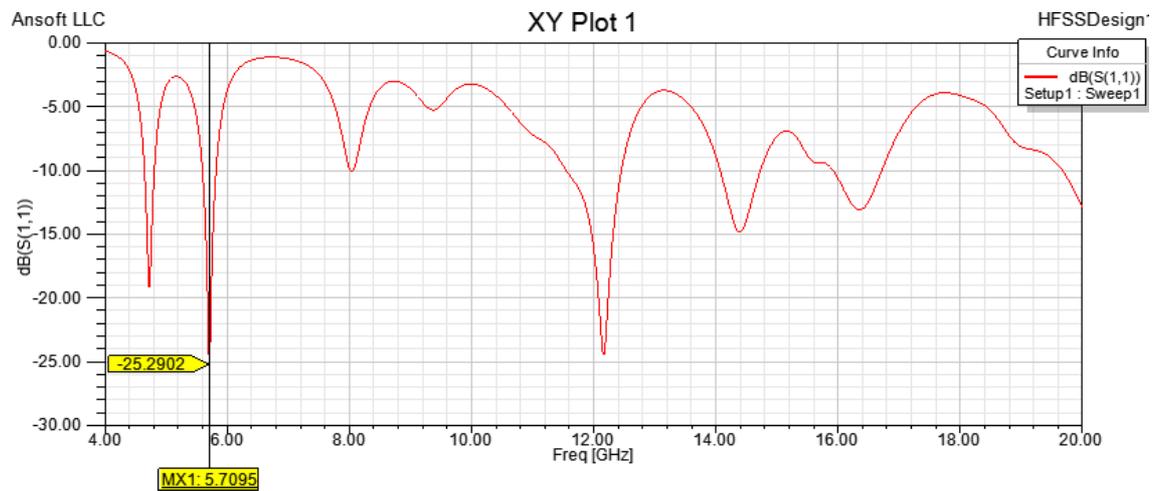


Figura 3.10. Frecuencias de resonancia de la antena fractal.  
Elaborado por el Autor

Se simuló para un rango de frecuencias que abarca desde los 4 GHz hasta los 20 GHz. Se puede observar que a la frecuencia para la que se diseñó, 5.7GHz, se obtiene un coeficiente de reflexión de -24.38dB aproximadamente. En la figura 3.11 se muestra una de las propiedades de los fractales, además de radiar a la frecuencia para la que se diseñó, radia también a 4 frecuencias más. En la tabla 3.5 se muestra las frecuencias a las que radia la antenna fractal.

Tabla 3.5 Frecuencias a las que radia la antenna fractal

FRECUENCIAS	COEFICIENTE DE REFLEXIÓN
4.72 GHz	-19.15 dB
5.709 GHz	-25.29 dB
12.17 GHz	-24.37 dB
14.39 GHz	-14.84 dB
16.35 GHz	-13.1 dB

Elaborado por el Autor

En la figura 3.11 se pueden observar tanto la parte real, como la imaginaria de la impedancia, la cual es casi de 50Ω.

En la figura 3.12 se observa el diagrama de ganancia de la antenna fractal.

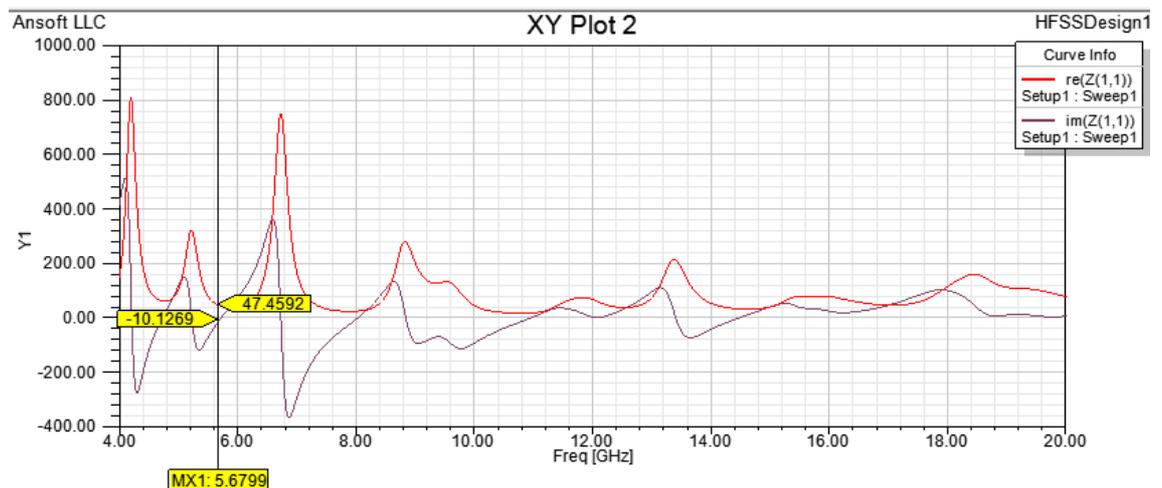


Figura 3.11. Resistencia real e imaginaria de la antenna fractal

Elaborado por el Autor

En la figura 3.12 se muestra el diagrama de radiación de la antenna en tercera dimensión, como se puede observar la antenna tiene un lóbulo principal en el cual

se logra la mayor ganancia que puede lograr la antena, aproximadamente unos 4.78 dB.

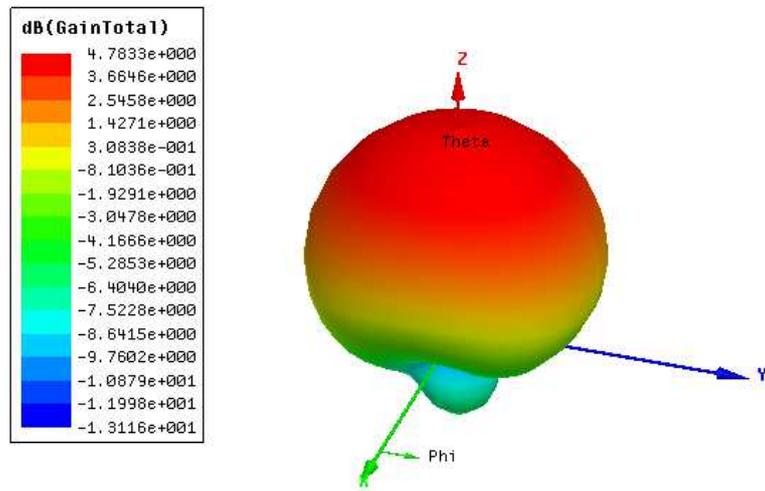


Figura 3.12. Diagrama de la ganancia de la antena fractal.  
Elaborado por el Autor

En la figura 3.13 se muestra el diagrama de radiación de la antena fractal, se observa el diagrama de directividad notándose que la antena diseñada tiene un comportamiento direccional, o sea, tiene la mayor concentración de radiación para un solo plano.

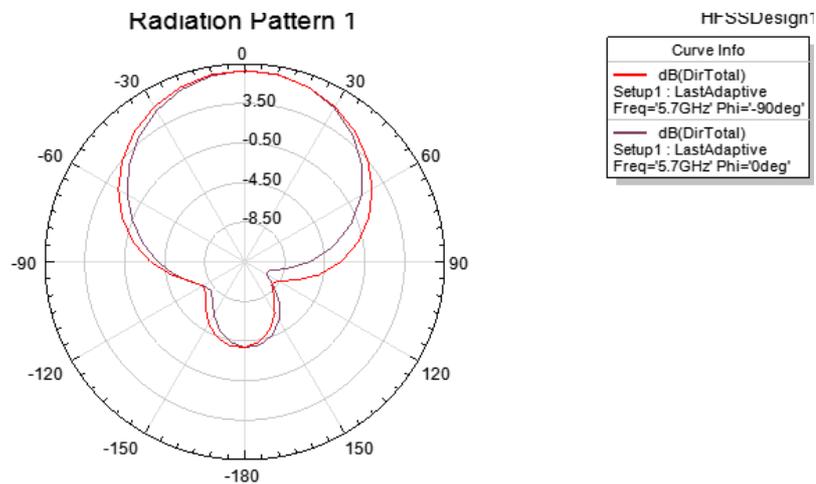


Figura 3.13. Diagrama de radiación de la antena fractal  
Elaborado por el Autor

### 3.2 Diseño y simulación de la antena basada en el fractal triángulo de Sierpinski.

Esta antena fue diseñada para que trabajara a una frecuencia de 5.7GHz, con el

objetivo de que sirviera para dispositivos receptores de señales WI-FI. Además de radiar a la frecuencia para la que fue diseñada radia también a otras frecuencias cumpliendo con la propiedad de los fractales.

Para el diseño de esta antena se partió, al igual que en la anterior, del esquema de una antena parche triangular, para lo que se utilizó la siguiente fórmula:

$$a = \frac{2c}{3f_r\sqrt{\xi_r}}$$

Dónde:

$a$ : Dimensión de los lados del triángulo equilátero

$c$ : Velocidad de la luz  $c = 3 * 10^8$

$f_r$ : Frecuencia de diseño  $f_r = 5.7GHz$

$\xi_r$ : Permitividad relativa  $\xi_r = 4.4$

Luego de realizar los cálculos se obtiene por resultado:

$$a = 16.7$$

Para la antena parche que se diseñó se utilizarán los siguientes materiales y dimensiones, mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Dimensiones y materiales para la antena parche triangular.

<b>COMPONENTE</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>
Antena	Cobre	16.7 x 0.008
Plano de tierra	Cobre	23.4 x 31.6 x 0.008
Sustrato dieléctrico	FR4	20.6 x 28 x 1.6

Elaborado por el Autor

Las dimensiones de la antena siguen el estilo  $a \times H$ , mientras que el resto de las dimensiones siguen el estilo  $L \times W \times H$ .

La tira de alimentación de esta antena va desde el borde del sustrato dieléctrico hasta el borde de la antena, justo en el medio de la misma, con una longitud de 5mm y un grosor de 1mm, como se muestra en la figura 3.14.

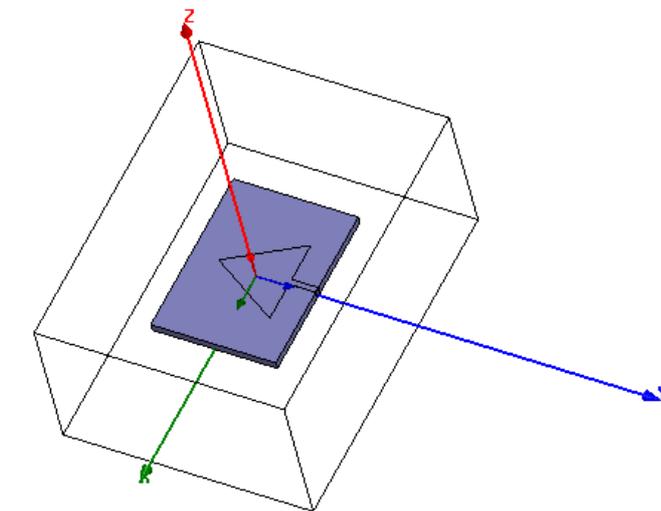


Figura 3.14. Antena parche triangular  
Elaborado por el Autor

Luego de realizada la simulación se obtuvieron los resultados que se muestran en las figuras 3.15, 3.16, 3.17, y 3.18.

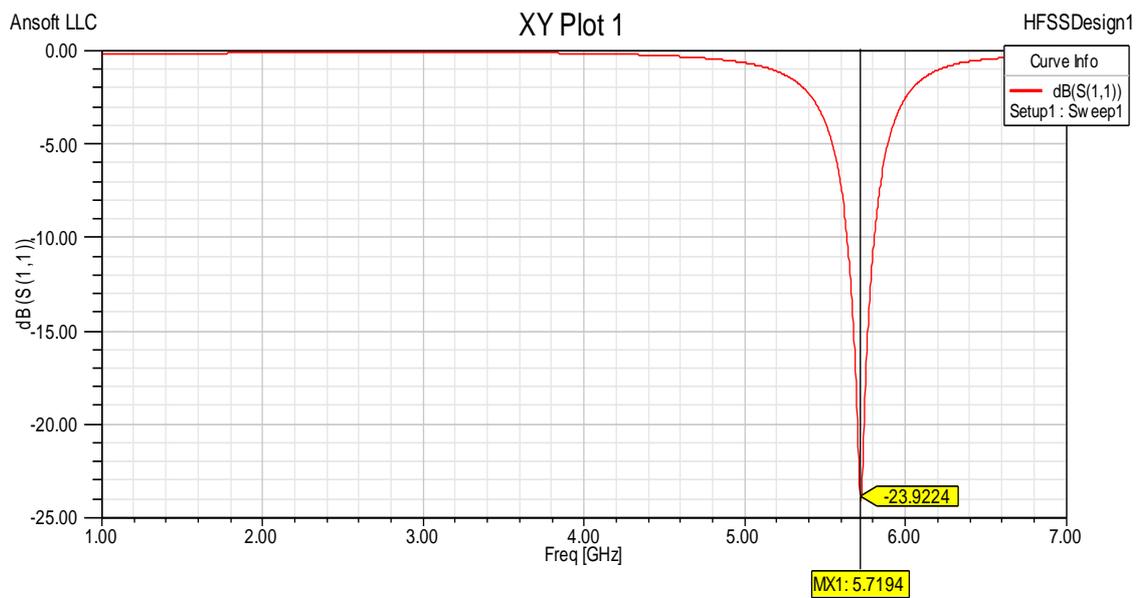


Figura 3.15. Frecuencia de resonancia de la antena parche.  
Elaborado por el Autor

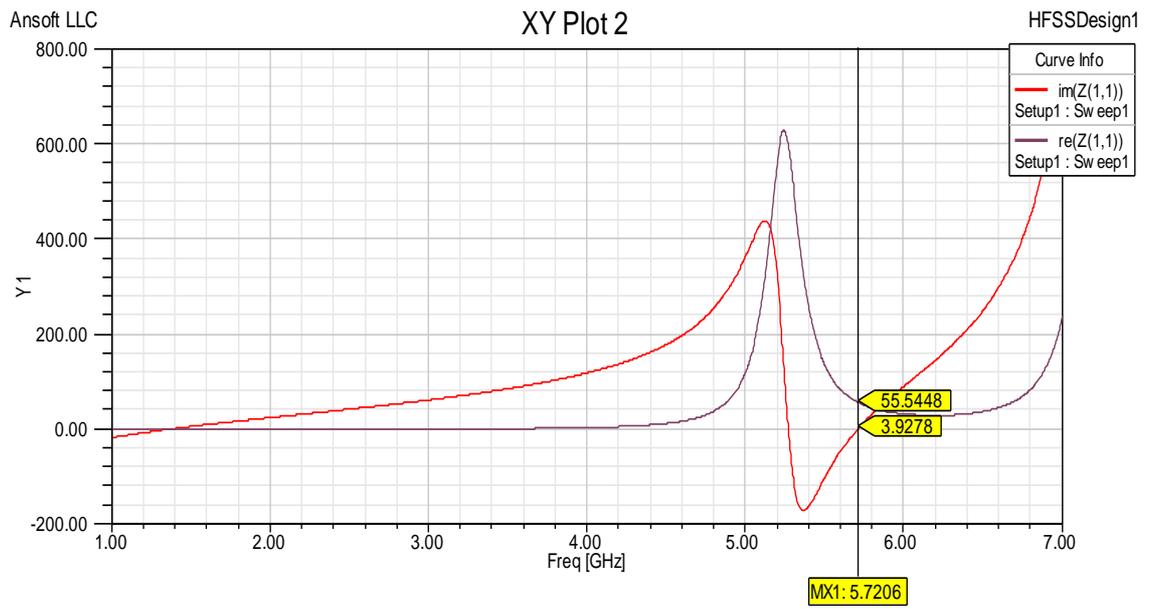


Figura 3.16. Resistencia real e imaginaria de la antena parche.  
Elaborado por el Autor

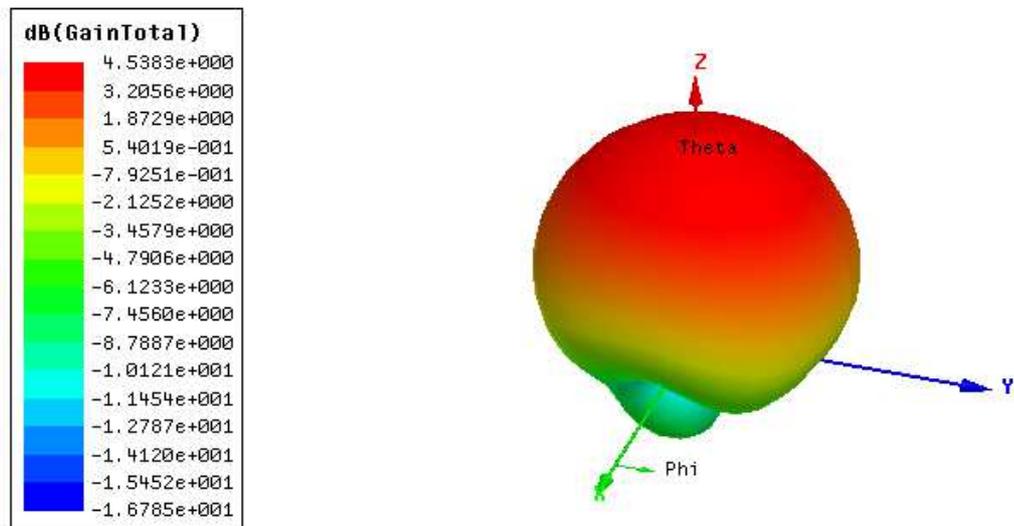


Figura 3.17. Diagrama de la ganancia de la antena parche.  
Elaborado por el Autor

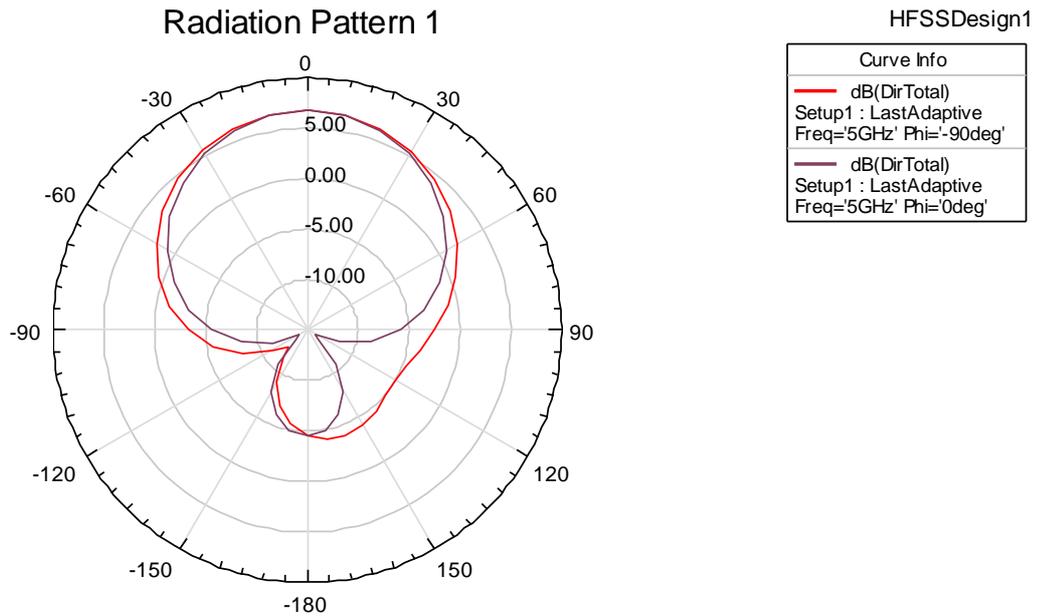


Figura 3.18. Diagrama de radiación de la antena parche.  
Elaborado por el Autor

Luego de simulada la antena parche se pasó a realizar la extracción de las partes necesarias para la conformación del patrón fractal, como se observa en la figura 3.19, para esto hay que tener en cuenta que las dimensiones de los triángulos menores deben de tener una proporción de la mitad de las dimensiones del triángulo inmediatamente mayor.

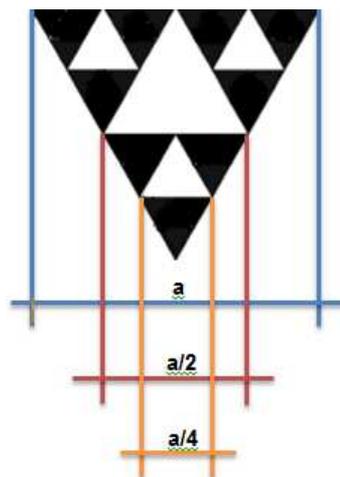


Figura 3.19. Dimensiones de partes necesarias a extraer para patrón fractal  
Elaborado por el Autor

Luego de la extracción de las partes necesarias para la conformación del patrón fractal la frecuencia de resonancia de la antena se desplaza, en este caso hasta 4.9GHz, por lo que para volverla a centrar a 5.7GHz, que es la frecuencia para la que se diseñó, hay que disminuir el tamaño a la antena, para esto se simuló la antena parche para que radiara a 4.9GHz y sacar el porcentaje de reducción de dicha antena, para a partir de éste sacar las nuevas dimensiones de la antena fractal, mostradas en las tablas 3.7 y 3.8.

Tabla 3.7. Porcentaje de reducción para la antena parche.

<b>ANTENA PARCHÉ</b>	
<b>FRECUENCIA</b>	<b>DIMENSION DEL LADO</b>
5.7GHz	15.8
4.9GHz	18.5
<b>PORCENTAJE DE REDUCCIÓN</b>	14.6%

Elaborado por el Autor

Tabla 3.8. Porcentaje de reducción para la antena fractal.

<b>ANTENA FRACTAL</b>	
<b>FRECUENCIA</b>	<b>DIMENSION DEL LADO</b>
4.9GHz	15.8
5.7GHz	13.5
<b>PORCENTAJE DE REDUCCIÓN</b>	14.6%

Elaborado por el Autor

### 3.2.2 Simulación de la antena fractal

Luego de obtener las dimensiones para la antena fractal se simuló dicha antena y para lograr un mejor acoplamiento de impedancia se le agregó un acoplador al final de la línea de transmisión.

Para el diseño de la antena fractal se utilizaron los materiales que se mencionan en la tabla 11 con sus respectivas dimensiones, y en la figura 3.20 se puede observar la antena simulada:

Tabla 3.9. Dimensiones y materiales para la antena fractal triángulo de Sierpinski.

<b>COMPONENTE</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>
Antena	Cobre	13.3 x 0.008
Plano de tierra	Cobre	20.6 x 28 x 0.008
Sustrato dieléctrico	FR4	20.6 x 28 x 1.6

Elaborado por el Autor

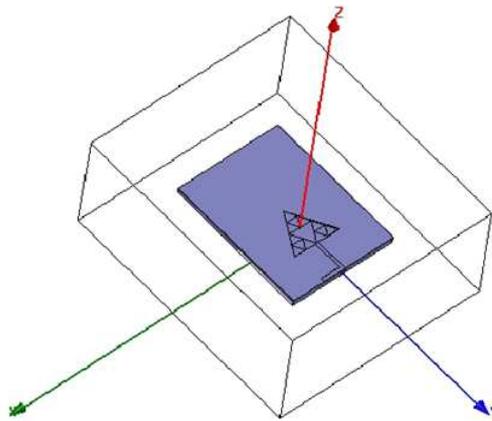


Figura. 3.20. Antena fractal alfombra de Sierpinski  
Elaborado por el Autor

La antena para la simulación fue alimentada con una potencia de 1W. En las figuras 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24 se muestran los resultados obtenidos tras la simulación:

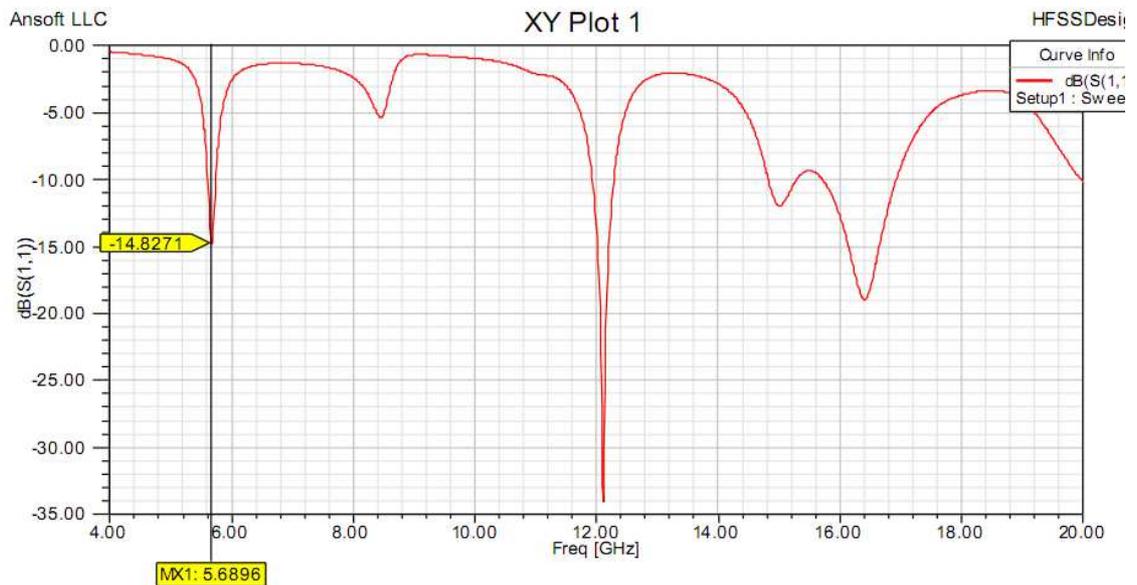


Figura. 3.21. Frecuencias de resonancia de la antena fractal.  
Elaborado por el Autor

Se simuló para un rango de frecuencias que abarca desde los 4 GHz hasta los 20 GHz. Se puede observar que a la frecuencia para la que se diseñó, 5.7GHz, se obtiene una pérdida de retorno de - 14.83dB aproximadamente. En la figura 3.21 se demostró una de las propiedades de los fractales, además de radiar a la

frecuencia para la que se diseñó, radia también a 3 frecuencias más, lo cual se puede observar en la tabla 3.10:

Tabla 3.10. Frecuencias a las que radia la antenna fractal

FRECUENCIA	COEFICIENTE DE REFLEXIÓN
5.69 GHz	-14.83 dB
12.11 GHz	-34.07 dB
15 GHz	-12.03 dB
16.4 GHz	-18.99 dB

Elaborado por el Autor

En la figura 3.22 se pueden observar tanto la parte real, como la imaginaria de la impedancia de entrada de la antenna, la cual cómo se puede ver es casi de  $50\Omega$ .

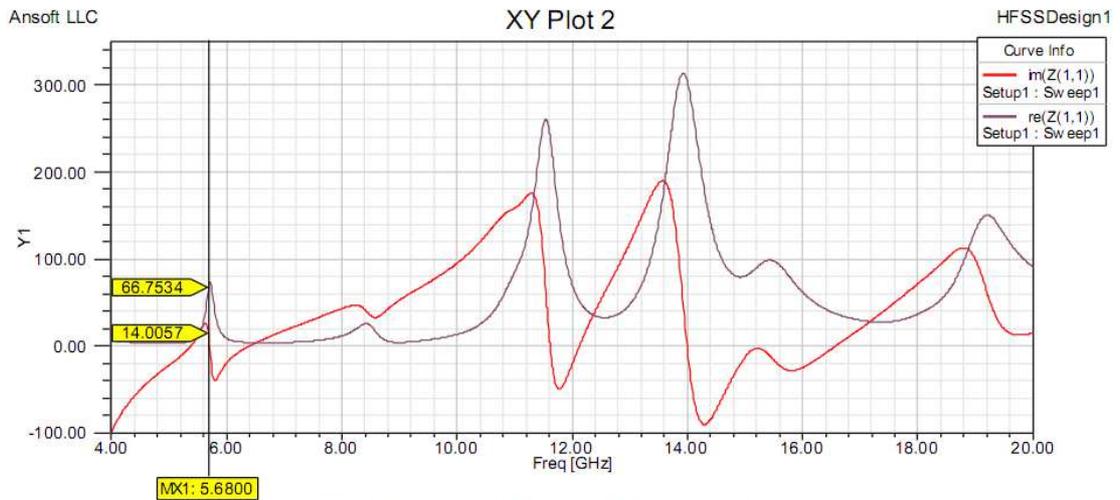


Figura. 3.22. Impedancia de entrada de la antenna fractal  
Elaborado por el Autor

En la figura 3.23 se muestra el diagrama de radiación de la antenna en tercera dimensión, como se puede observar la antenna tiene un lóbulo principal en el cual se logra la mayor ganancia que puede lograr la antenna, aproximadamente unos 1.91 dB.

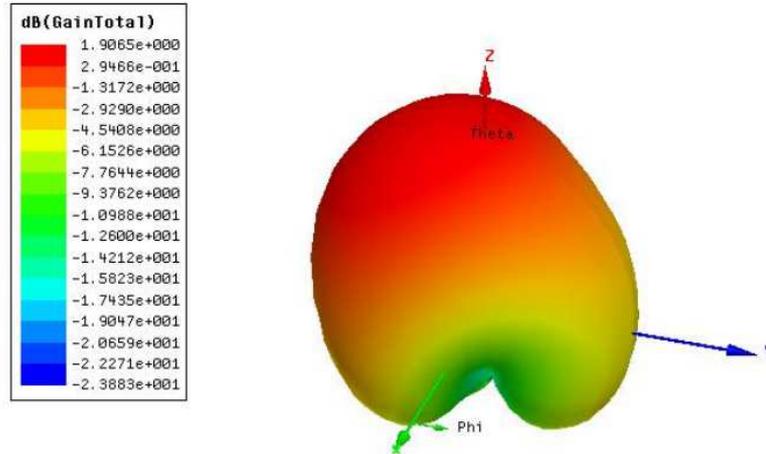


Figura. 3.23 Diagrama de la ganancia de la antena fractal.  
Elaborado por el Autor

En la figura 3.24 se muestra el diagrama de directividad donde se puede observar que la antena diseñada tiene un comportamiento direccional, o sea, tiene la mayor concentración de radiación para un solo plano.

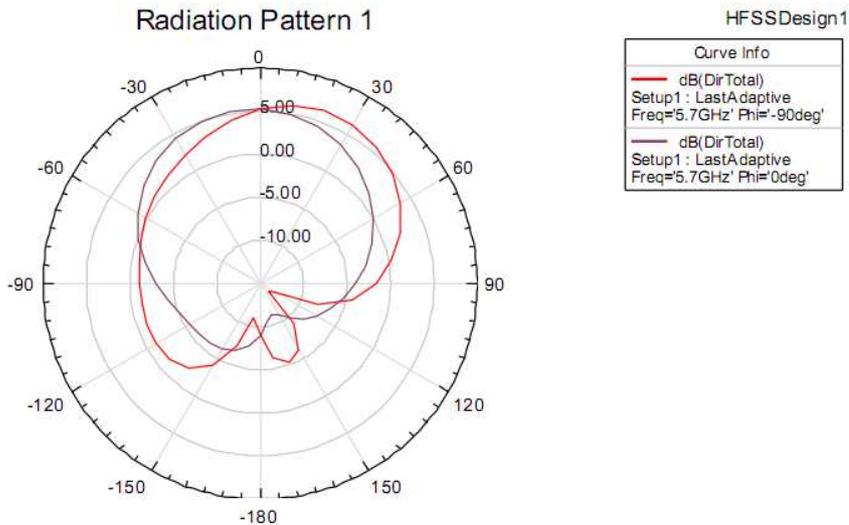


Figura. 3.24. Diagrama de radiación de la antena fractal  
Elaborado por el Autor

### 3.2.3 Comparación de la antena parche triangular con la antena fractal triángulo de Sierpinski

Cuando se observa la simulación de las antenas parche y fractal se puede constatar una serie de diferencias entre una y otra en parámetros de gran importancia en el funcionamiento de las antenas, como por ejemplo en la

eficiencia y en la ganancia. En las figuras 3.25 y 3.26 se puede observar lo anteriormente planteado.

**Antena parche:**

Antenna Parameters:			
	Quantity	Value	Units
	Max U	0.033223	W/sr
	Peak Directivity	4.723	
	Peak Gain	2.8108	
	Peak Realized Gain	0.4175	
	Radiated Power	0.088397	W
	Accepted Power	0.14853	W
	Incident Power	1	W
	Radiation Efficiency	0.59514	
	Front to Back Ratio	13.586	
	Decay Factor	0	

Figura. 3.25. Parámetros de la antena parche triangular  
Elaborado por el Autor

**Antena fractal:**

Antenna Parameters:			
	Quantity	Value	Units
	Max U	0.11914	W/sr
	Peak Directivity	4.3586	
	Peak Gain	1.5511	
	Peak Realized Gain	1.4972	
	Radiated Power	0.34351	W
	Accepted Power	0.96523	W
	Incident Power	1	W
	Radiation Efficiency	0.35588	
	Front to Back Ratio	26.496	
	Decay Factor	0	

Figura. 3.26. Parámetros de la antena fractal  
Elaborado por el Autor

Como se puede observar la antena parche tiene una mejor eficiencia, directividad y ganancia que la antena fractal, aunque esta brinda la posibilidad de tener más de una frecuencia de resonancia, y por tanto poder trabajar en más de un sistema a la vez. Esto es debido a que cuando se extraen los pedazos de la antena necesarios para la conformación del patrón fractal, estos parámetros se afectan, por lo que en dependencia de la aplicación que vaya a tener la antena hay que tener muy en cuenta que parámetros serían los más importantes.

## Conclusiones:

- Se hizo una investigación acerca de los objetos fractales sus características, importancia y aplicaciones. De la misma manera, se realizó un estudio de las técnicas de diseño y simulación de antenas planas y sus métodos de alimentación.
- Se diseñó y simuló dos antenas microcinta en la banda de ISM de 5.7GHz alimentada por línea de microcinta.
- Se diseñó y simuló una antena basada en el fractal triángulo de Sierpinski y una antena basada en el fractal alfombra de Sierpinski ambas para que trabajaran a una frecuencia de 5,7 GHz.
- Se comparó los resultados y se determinó la reducción de tamaño que sufren las antenas al elaborarse un patrón fractal. Se adaptó en impedancia la antena fractal triángulo de Sierpinski, para esto se le agregó un acoplador al final de la línea de transmisión. Se adaptó en impedancia la antena fractal alfombra de Sierpinski, para esto hubo que desplazar la línea de transmisión hacia el extremo izquierdo de la antena.
- Se simuló las antenas alfombra y triángulo de Sierpinski para la banda de 5.7GHz.
- De las conclusiones anteriores, se determina que se cumplió con los objetivos específicos planteados para este trabajo y esto permitió cumplir el objetivo general, puesto que se hizo un estudio de los fundamentos teóricos de las antenas fractales y se realizó el diseño y simulación de dos antenas, una basada en el fractal alfombra de Sierpinski y la otra en el fractal triángulo de Sierpinski, ambas utilizando el programa HFSS 12.

## Recomendaciones

- Se recomienda continuar el estudio de los fractales y de las propiedades de estos como elementos radiadores.
- También profundizar el estudio de las técnicas de diseño y simulación de antenas planas y sus métodos de excitación.
- Diseñar y simular antenas microcinta en otras bandas de frecuencia y diferentes métodos de excitación
- Diseñar y simular antenas basada en otras geometrías fractales para que operen en diferentes frecuencias
- Profundizar en la determinación de la importancia de la reducción de tamaño que sufren las antenas al elaborarse un patrón fractal.
- Estudiar la importancia de adaptar la impedancia de una antena fractal agregando acopladores a la línea de transmisión.
- También se recomienda la elaboración de un estudio de las propiedades de estas antenas implementadas en arreglos.

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

**BW:** Band Width, Ancho de Banda

**CEM:** Computational Electromagnetics, Electromagnetismo computacional

**Df:** Dimension fractal, Dimensión fractal

**DLA:** Diffusion Limited Aggregation, Agregación de Difusión Limitada

**HF:** High Frequency, Alta Frecuencia

**HFSS:** High Frequency Structure Simulator, Simulador de Estructuras de Alta Frecuencia

**IFS:** Iterated Function System, Sistema Iterado de la Función

**ISM:** Industrial, Scientific and Medical, Industrial, Científico y Médico

**JPEG:** Joint Photographic Experts Group, Grupo de Expertos Fotográficos Articulados

**LPF:** Low-Pass Filter, Filtro Pasa-Bajas

**MEF:** Método de los Elementos Finitos

**MF:** Medium Frequency, Frecuencia Media

**MoM:** Method of Moments, Método de los Momentos

**PIFS:** Partitioned Iterated Function System, Sistema de Función Iterada Particionada

**TIC:** Tecnologías de la Información y la Comunicación

**UHF:** Ultra High Frequency, Ultra Alta Frecuencia

**VHF:** Very High Frequency, Muy Alta Frecuencia

**WIFI:** Wireless Fidelity, Fidelidad Inalámbrica

## Bibliografía

- Al-Majdalawi, A. (2006). *Fractales*. Obtenido de [https://www.lpi.tel.uva.es:https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_05\\_06/io2/public\\_html/images/curiosidades/Trabajo%20Fractales%20\(Amir%202006\).pdf](https://www.lpi.tel.uva.es:https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/images/curiosidades/Trabajo%20Fractales%20(Amir%202006).pdf)
- Altuve, J. (26 de Junio de 2014). *Copy of FRACTALES. Trabajo de fisica mecanica UNICIENCIA*. Obtenido de <https://prezi.com:https://prezi.com/6xq0buzr2fgi/copy-of-fractales/>
- AnsoftCorporation. (2005). *User's guide - High Frequency Structure Simulator(HFSS)*. Pittsburgh, PA: Ansoft Corporation .
- Arcos, D. (2007). *Diseño e implementación de una antena yagi fractal en las bandas de 200, 400 y 800 mhz*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Azad, M. Z., & Ali, M. (2009). A Miniature Implanted Inverted-F Antenna for GPS Application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 57*, 1854-1858. Obtenido de IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 57, 2009: [http://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1049&context=elct\\_facpub](http://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1049&context=elct_facpub)
- Bahl, I. J., & Bhartia, P. (1980). *Microstrip antennas*. Dedham, Mass: Artech House.
- Balanis, C. (1997). *Antenna Theory: Analysis and Design, 2nd. Edition* (Second Edition ed.). New York U.S.A.: John Wiley and Sons.
- Bhutani, P., Kumar, A., & Yadav, R. (2015). Study and Design of Sierpinski Carpet Fractal Antenna. *IJSART - Volume 1 Issue 8*, 36-39.
- Bickford, W. B. (1990). *A First Course in the Finite Element Method Second Edition*. Homewood, IL: Irwin.
- Carmona, D. (2003). *Fractal Attraction*. Cholula, Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
- Castany, S. (1999). *Antenas multibanda para sistemas de comunicaciones inalánbricas*. Obtenido de [http://www.iies.es:http://www.iies.es/teleco/servicio/servpre2/j\\_sole/rymsa.doc](http://www.iies.es:http://www.iies.es/teleco/servicio/servpre2/j_sole/rymsa.doc).

- Castro, A. (2015). *Diseño de antenas fractales para Televisión Digital en Cuba*. Santa Clara: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Chahuilco, V. (2012). *Diseño de antenas fractales para televisión DIGITAL para interiores y exteriores*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Corral, J. (s.f.). *Antenas*. Obtenido de <http://personales.upv.es: http://personales.upv.es/~jlcrral/antenes/>
- Davies, A. J. (1980). *The Finite Element Method: A First Approach*. Oxford: Clarendon Press.
- documents.mx. (2015). *Método de los elementos finitos*. Obtenido de <http://documents.mx: http://documents.mx/documents/metodo-de-los-elementos-finitos.html>
- Fralbe. (18 de Mayo de 2008). *Antenas fractales*. Obtenido de [www.fralbe.com: www.fralbe.com/2008/05/18/antenas-fractales/](http://www.fralbe.com: www.fralbe.com/2008/05/18/antenas-fractales/)
- Gianvittorio, J. (2000). *Fractal antennas: Design, Characterization, and Applications*. University of California.
- Gibson, W. C. (2008). *The Method of Moments in Electromagnetics*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group.
- González, J. (2010). *Paralelización del software de desenredo y suavizado de mallas de tetraedros "S.U.S CODE"*. Obtenido de [www.siani.es: http://repositorio.ulpgc.es/bitstream/10553/6468/5/Paralelizacion\\_mallas.pdf](http://repositorio.ulpgc.es/bitstream/10553/6468/5/Paralelizacion_mallas.pdf)
- González, L., Tamay, E., Marquez, M., & Lome, R. (24 de Noviembre de 2014). *La Importancia de la Geometría Fractal en la implementación de las nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica en el siglo XXI*. Obtenido de <http://es.slideshare.net: http://es.slideshare.net/XimRic/universidad-autonoma-de-ciudad-juarez-fractales-20-1>
- González, V., & Guerrero, C. (2001). *Fractales: Fundamentos y Aplicaciones*. Parte I: Concepción geométrica en la ciencia y la ingeniería. *Ingenierías*. Vol.IV No. 10, 53 - 59.
- Guilbert, C. (1976). *La práctica de antenas recepción-emisión, TV-FM*. Barcelona: Marcombo.

- Harrington, R. F. (1982). *Field Computation by Moment Methods*. New York: Macmillan.
- Herrera, M., & Inclán, J. (2004). *Estudio y metodología de diseño de antenas utilizando geometría fractal (Antenas fractales)*. Quito: Escuela POLITÉCNICA NACIONAL.
- Jin, J.-M. (2014). *The Finite Element Method in Electromagnetics. Third Edition*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. .
- Logan, D. L. (2007). *A First Course in the Finite Element Method. Fourth Edition*. United States: Thomson.
- Luque, B., & Agea, A. (s.f.). *Fractales en la red*. Obtenido de [www.dmae.upm.es/cursofractales:](http://www.dmae.upm.es/cursofractales/)  
<http://www.dmae.upm.es/cursofractales/>
- Martínez, D. (2007). *Simulación, implementación y puesta a punto de una antena Yagi de 4 elementos a 1,2 GHz: El Método de los Momentos (MoM)*. Obtenido de [http://datateca.unad.edu.co:](http://datateca.unad.edu.co/http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208018/208018-AVA/UNIDAD_3/nec%20ejemplo.doc)  
[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208018-  
AVA/UNIDAD\\_3/nec%20ejemplo.doc](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208018/208018-AVA/UNIDAD_3/nec%20ejemplo.doc)
- Mejía, S., Parra, J., & Guzman, S. (13 de Mayo de 2013). *Antenas de hilo*. Obtenido de [http://es.slideshare.net:](http://es.slideshare.net/http://es.slideshare.net/SantiMe1/antenas-de-hilo)  
<http://es.slideshare.net/SantiMe1/antenas-de-hilo>
- Miranda, F. (2012). Diseño de una antena fractal de 2400 MHz. *Tecnología en Marcha. Vol. 25, N° 4*, 71-75.
- Montoya, A. (s.f.). *Antenas Fractales un paso en la evolución de las Telecomunicaciones*. Obtenido de [http://www.radiocomunicaciones.net:](http://www.radiocomunicaciones.net/http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas_fractales.pdf)  
[http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas\\_fractales.pdf](http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas_fractales.pdf)
- Palavecino, E. (26 de Noviembre de 2012). *Fractales*. Obtenido de [https://prezi.com:](https://prezi.com/https://prezi.com/o1vk2y7kcvhd/fractales/) <https://prezi.com/o1vk2y7kcvhd/fractales/>
- Patiño, J., González, L., & Ferney, E. (1 de Julio de 2011). *Antenas tipo bocina*. Obtenido de [http://es.slideshare.net:](http://es.slideshare.net/http://es.slideshare.net/jkyong/antenas-tipo-bocina-8486376)  
<http://es.slideshare.net/jkyong/antenas-tipo-bocina-8486376>
- Pawar, A., Jadhav, A., Bhosale, J., Khobragade, S., & Anitha, V. (2011). *Study of Sierpinski Carpet Fractal Antenna*. Obtenido de [http://ursigass2011.org:](http://ursigass2011.org/http://ursigass2011.org/abstracts/ursi/a02-2.pdf)  
<http://ursigass2011.org/abstracts/ursi/a02-2.pdf>

- Paz, H., Acero, X., & Ferro, R. (2007). Diseño de una antena fractal siguiendo el modelo de Mandelbrot. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería Vol. 17, No. 66*, 35-44.
- Polanco, J. (2002). Antenas fractales en sistemas celulares. *VENTANA INFORMÁTICA No. 10*, 111-120.
- Popržen, N., & Gaćanović, M. (2000). Fractal Antenna: design, characteristics and application.
- Rao, S. M., Wilton, D. R., & Glisson, A. W. (1982). Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 30, No. 3*, 409-418.
- Reyes, M. (2012). *Modelo reológico de aceites de yacimientos naturalmente fracturados*. México: Universidad Autónoma de México.
- Steele, C. W. (1987). *Numerical computation of electric and magnetic fields*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Talanquer, V. (2011). *Fractus, fracta, fractal: fractales, de laberintos y espejos. Segunda reimpresión*. México: Fondo de cultura económica.
- UIT. (1998). *Métodos para predecir los diagramas de radiación de antenas de gran tamaño utilizadas en los servicios de investigación espacial y de radioastronomía*. Obtenido de [www.itu.int](http://www.itu.int):  
[https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sa/R-REC-SA.1345-0-199802-S!!MSW-S.doc](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sa/R-REC-SA.1345-0-199802-S!!MSW-S.doc)
- Vey, G. (s.f.). *New & Improved HAARP?* Obtenido de <http://www.viewzone.com>:  
<http://www.viewzone.com/cgrid/cgrid.html>

## **DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN**

Yo, **Ramos Flores, Santiago Ignacio**, con C.C: # 2000075933 autor del trabajo de titulación: **Diseño y simulación de dos antenas fractales basadas en la alfombra y el triángulo de Sierpinski**, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 30 de enero de 2017

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Ramos Flores, Santiago Ignacio**

C.C: **2000075933**



<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Diseño y simulación de dos antenas fractales basadas en la alfombra y el triángulo de Sierpinski		
<b>AUTOR(ES)</b>	Santiago Ignacio Ramos Flores		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Luis Córdova Rivadeneira, MsC.; Ing. Orlando Philco Asqui, MsC. / MSc. María Luzmila Ruilova Aguirre		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado		
<b>CARRERA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	<b>30 de enero de 2017</b>	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	<b>96</b>
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Antenas fractales, Patrón de radiación, Métodos de análisis de las antenas, Fractales de Sierpinski		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Antenas, fractales, geometría fractal, Sierpinski, patrón de radiación, diseño, simulación.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	En el presente trabajo se expone una visión general sobre la teoría de los fractales profundizando en una de sus aplicaciones: las antenas. Además se lleva a cabo una breve exposición de los parámetros más importantes de las antenas, profundizando en las antenas microcinta y en los métodos de análisis de las antenas en general. También se exponen los resultados del diseño y simulación de dos antenas basadas en los fractales, el triángulo y la alfombra de Sierpinski respectivamente, analizando los principales parámetros de dichas antenas.		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-980486258	<b>E-mail:</b> santtyrf_89@hotmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre:</b> Romero Paz Manuel de Jesús		
	<b>Teléfono:</b> +593-994606932		
	<b>E-mail:</b> manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			