

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Análisis de parámetros característicos de una antena patch con un arreglo de múltiple ranura separadas en secuencia de cantor

Andrés Felipe Hernández Acevedo

Ingeniera en Telecomunicaciones

Director del trabajo de grado

Francisco Eugenio López Giraldo

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

20 de junio de 2016

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Este proyecto consistió en el estudio y análisis de un sistema de antena patch, el cual fue diseñado con base a un conjunto de ranuras apoyada en la secuencia de cantor, de modo que al analizar sus parámetros característicos (S_{11} , tamaño, y frecuencias de operación) se optimizara el sistema. Lo anterior se realizó en su primera etapa mediante una revisión bibliográfica con el objetivo de establecer los antecedentes previos y actuales en las investigaciones en este tipo de sistemas de baja dimensión; en la etapa siguiente se usó las herramientas de simulación HFSS para realizar el modelado del sistema en base a diferentes iteraciones de la secuencia de cantor; luego se tomaron los resultados de las simulaciones y se confrontaron entre sí y con un sistema de múltiple ranura previo. Finalmente se analizaron los datos recolectados y se elaboró el presente trabajo; las principales conclusiones a las que se llegó permitieron determinar que las diferentes iteraciones en la secuencia de cantor permiten que el sistema funcione en dos bandas de frecuencia diferentes (Dual band), con ciertas similitudes respecto a las diferentes iteraciones, y leves incrementos en frecuencia a medida que se aumenta la iteración. El nuevo sistema de antena patch presentado en este trabajo permitió una reducción de tamaño aproximadamente del 22% respecto a un sistema de antena patch previo.

Palabras clave: Antena, frecuencia, iteración, patch, comunicación inalámbrica, optimización, secuencia, cantor.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

La realización de esta investigación se hizo bajo la supervisión de Francisco Eugenio López Giraldo a quien le expreso mis más profundos agradecimientos por su colaboración, enseñanza y acompañamiento en todos los aspectos del proyecto. A mis padres por siempre creer en mí y ayudarme en todo mi proceso de formación académica y personal. Y al ITM por brindarme las herramientas de formación académica y las pautas necesarias para la realización de esta tesis.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

S₁₁ Parámetro de medición de frecuencias de operación

HFSS High Frequency Structural Simulator (Simulador estructural de alta frecuencia)

GSM Global System for Mobile communications (sistema global para las comunicaciones móviles)

3G Tercera generación de tecnología en comunicación móvil

4G Cuarta generación de tecnologías en telefonía móvil

HSPA High-Speed Packet Access (acceso de paquetes de alta velocidad)

WIFI Tecnología de comunicación inalámbrica

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access (interoperabilidad mundial para acceso por microondas)

WLAN Wireless local area network (red de área local inalámbrica)

WAN Wide Area Network (Red de Área Amplia).

WPAN Wireless Personal Area Network (Red Inalámbrica de Área Personal)

WMAN Wireless metropolitan area network (redes inalámbricas de área metropolitana)

GPS Global position system (Sistema de posicionamiento global)

SRR Split ring resonator (Resonadores en anillo divididos)

CSRR Complementary split ring resonator (Resonadores en anillo divididos complementarios)

DCS Digital Cellular Service (Servicio Digital de Celulares)

MIMO Multiple Input Multiple Output (Sistema de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas)

VSWR o *ROE* Relación de onda estacionaria

SHF Super High Frequency (frecuencia súper alta)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
2.	MARCO TEÓRICO.....	10
2.1.	Comunicaciones inalámbricas	10
2.2.	Antenas Patch.....	11
2.3.	Secuencia de cantor.....	12
2.4.	Antecedentes en investigaciones de antenas patch	14
2.5.	Antenas Fractales.....	17
2.6.	Secuencia de cantor en comunicaciones inalámbricas	20
3.	METODOLOGÍA	23
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1.	Características del diseño del sistema de antena patch en general.....	25
4.2.	Secuencia de cantor orden 1- primera iteración.....	27
4.3.	Secuencia de cantor orden 2- segunda iteración.....	29
4.4.	Secuencia de cantor orden 3- tercera iteración.....	32
4.5.	Secuencia de cantor orden 4- cuarta iteración.....	34
4.6.	Sistema de múltiples ranuras.....	37
4.7.	Reducción de tamaño.....	39
4.8.	Análisis general de resultados.....	40
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	43
	REFERENCIAS	46
	APÉNDICE.....	49

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Sistema de antena patch general.....	26
Ilustración 2. Antena patch con secuencia de cantor orden 1.....	27
Ilustración 3. Parámetro S11 para la secuencia de cantor orden 1	28
Ilustración 4. Patrón de radiación 2D y 3D secuencia de cantor orden 1	29
Ilustración 5. Antena patch con secuencia de cantor orden 2.....	30
Ilustración 6.Parámetro S11 para la secuencia de cantor orden 2	30
Ilustración 7. Patrón de radiación 2D y 3D secuencia de cantor orden 2	31
Ilustración 8.Antena patch con secuencia de cantor orden 3.....	32
Ilustración 9.Parámetro S11 para la secuencia de cantor orden 3	33
Ilustración 10.Patrón de radiación 2D y 3D secuencia de cantor orden 3	34
Ilustración 11.Antena patch con secuencia de cantor orden 4.....	35
Ilustración 12.Parámetro S11 para la secuencia de cantor orden 4	35
Ilustración 13.Patrón de radiación 2D y 3D secuencia de cantor orden 4.....	36
Ilustración 14.Antena patch con múltiples ranuras	37
Ilustración 15. Parámetro S11 para el sistema de múltiples ranuras	38
Ilustración 16. Patrón de radiación 2D y 3D sistema de múltiples ranuras	39
Ilustración 17. Relación entre parámetros S11	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma de actividades.....	24
Tabla 2. Medidas antena patch general.....	26
Tabla 3.Tabla de frecuencias y anchos de banda.....	41

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas hacen parte de casi todos los sistemas de comunicación existentes hoy en día, ya sea como parte fundamental de la red, o tomando parte en un tramo de esta; dicho esto se encuentra la necesidad de optimizar estos sistemas de comunicación inalámbrica, buscando mejoras en aspectos como desempeño, optimización, reducción de tamaño, nuevas aplicaciones, entre otras, buscando así un impacto positivo en el público en general, investigadores, desarrolladores, fabricantes, estudiantes y demás. Por lo que el adelantar estudios y análisis de estos sistemas incluyendo nuevos aspectos en diseño que lleven a una mejora de los sistemas es de alta importancia en el desarrollo de este tipo de tecnologías.

El desarrollo de este proyecto se adelanto en base a la búsqueda de nuevas técnicas y/o sistemas de comunicación inalámbrica que se adapten al constante cambio tecnológico y social, así mismo como el apoyo al marco de investigación de las comunicaciones inalámbricas por medio de antenas patch que se realiza en el ITM, y por ultimo como objetivo personal el lograr la ejecución del proyecto como requisito de grado y la aplicación de los conocimientos de ingeniería en telecomunicaciones. Dicho esto, la investigación de la presente tesis se enfoco en realizar estudios y análisis de un sistema de antena patch, diseñado en base a la secuencia de cantor, mediante herramientas de simulación, y resultados de estudios previos, con el objetivo de obtener información relevante que aporte a la optimización de este tipo de sistemas con antenas patch, ya que en el constante desarrollo tecnológico, se busca la reducción de tamaño de los dispositivos implicados, así como su mejora en el desempeño, lo anterior en el marco del desarrollo de antenas fractales, y su aplicación en las comunicaciones inalámbricas. En base a lo anterior se plantearon los siguientes objetivos:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Objetivo General

- Analizar algunos parámetros característicos de una antena patch con un arreglo de múltiples ranuras rectangulares separadas según una secuencia de cantor con el fin de obtener mejoras en su desempeño.

Objetivos Específicos

- Realizar mediante herramientas de simulación el modelado del sistema, de manera que se evidencie la inclusión de la secuencia de cantor, así como los cambios que este aporte al sistema.
- Obtener parámetros que puedan evidenciar la mejora del sistema patch, como lo es el parámetro S_{11} .
- Confrontar los resultados del estudio con un sistema de antena patch convencional.
- Comparar con resultados previos en sistemas similares de múltiple ranura.

La presente tesis inicia con el resumen e introducción al problema abordado el cual consiste en el estudio y análisis de un sistema de antena patch en base a la secuencia de cantor, dentro del marco de las comunicaciones inalámbricas y las necesidades del medio actual.

En el siguiente capítulo se abordaran las ideas bases que soportan el estudio de la presente tesis, mediante un rastreo bibliográfico que permita entender el marco en el que se realiza el estudio de esta, así como las investigaciones previas en sistemas de antena patch, sistemas con geometría fractal y los estudios que se han adelantado sobre la secuencia de cantor aplicada a sistemas de comunicaciones inalámbricas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego se detallara la metodología empleada para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, iniciando con la revisión bibliográfica, el estudio y modelado del sistema con la herramienta de simulación HFSS, y finalizando con el análisis de resultados respectivo.

A partir de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología se realizara la discusión pertinente que permita llevar a conclusiones que apunten directamente al cumplimiento de cada uno de los objetivos del trabajo, optimización, reducción de tamaño, frecuencias de operación, entre otros.

Finalmente en base a todo lo anterior se describirán las conclusiones encontradas, algunas recomendaciones sobre el trabajo presente, y se describirán las bases para trabajos futuros en este tipo de sistema de antenas patch diseñadas en base a la secuencia de cantor ya sea para comunicación inalámbrica, sensores o filtros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Comunicaciones inalámbricas

Un sistema de comunicación inalámbrica es un sistema de comunicación radioeléctrico que no utiliza alambres conductores, lo que indica que la comunicación se realiza sin la necesidad de cables que interconecten físicamente los equipos entre ambos nodos; es claro que tanto el equipo transmisor como el receptor requieren el uso de cables para su alimentación, o comunicación con los distintos módulos que posea el sistema.

Una red inalámbrica, por lo tanto, es aquella que permite conectar diversos nodos sin utilizar una conexión física, sino estableciendo la comunicación mediante ondas electromagnéticas. Los vínculos que permiten Las redes inalámbricas suponen una mayor comodidad y un ahorro de dinero en infraestructura, teniendo en cuenta también una serie de ventajas como: facilidad de instalación, ahorro de cables, y permitir múltiples conexiones de diferentes tipos de dispositivos. Hoy en día los dispositivos que se usan para el abastecimiento de una red inalámbrica en específico las antenas, no son solo usadas para la comunicación interna o entre dispositivos, si no que dado el avance en este campo hoy en día las antenas se usan para recolección de datos, sensores, filtros, radio ubicación, radionavegación, GPS, entre un sinnúmero de aplicaciones de las que se hace uso a diario en las empresas, instituciones, campos militares, entre otros.

Sin lugar a dudas, las comunicaciones inalámbricas constituyen hoy en día el segmento más dinámico y de mayor crecimiento en el sector de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC), el cual es vital para el impulso y desarrollo de las sociedades de hoy. A causa de esto se ha generado un gran impacto económico y social proveniente de tecnologías como la telefonía móvil (GSM, 3G, LTE, HSPA, 4G, etc.); las redes inalámbricas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de acceso a Internet (WiFi, WiMAX, WPAN, WMAN, WAN); los sistemas de conexión sin hilos de periféricos (Bluetooth, Ultrawideband, infrarrojo, zigbee); o las redes inalámbricas de sensores. Todas las anteriores hacen uso de antenas para su funcionamiento.

2.2. Antenas Patch

Las comunicaciones inalámbricas se vienen desarrollando desde hace muchos años, cada avance ha aportado una característica particular a los sistemas, y a las necesidades en específicas; las antenas patch también conocidas como microstrip son estructuras planas, de bajo peso, y bajo costo, de manera que son fáciles de fabricar, aportan simplicidad a los sistemas de comunicaciones, y poseen la ventaja de que cada vez los sistemas en base a este tipo de antenas son más pequeños. Al ser una estructura relativamente pequeña en comparación con otras antenas, cada aspecto de diseño y elemento que intervenga en el sistema puede ser utilizado para mejorar el desempeño de todo el sistema de comunicación, tal es el caso del plano de tierra y el parche de la antena, estos juegan un papel muy importante en su diseño ya que mediante ciertas modificaciones en estos planos, se pueden presentar frecuencias de resonancia que permitan optimizar el sistema y reducir su tamaño, así como aumentar su ancho de banda, frecuencia de operación, ganancia, entre otros parámetros.

Durante las últimas décadas las antenas patch han sido de alto interés para el campo de las telecomunicaciones siendo aplicadas en áreas como inteligencia militar, sistemas GPS, sensores, radares y las comunicaciones móviles en general, ya que este tipo de sistemas modernos se requieren sistemas compactos y de bajo costo. Las sistemas en base a antenas patch poseen una alta demanda ya que estos pueden ser dispositivos multi banda, es decir funcionan en dos o más bandas de frecuencia por lo que puede satisfacer una amplia gama de servicios con un solo sistema de antena patch, haciéndolos adaptables a los sistemas de comunicaciones inalámbricas de corto alcance.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los métodos más comunes para optimizar este tipo de sistemas en base a antenas patch son las modificaciones de algunos de sus parámetros, lo que tal vez llevaría a renunciar a ciertas mejoras del sistema, así como la inclusión de dieléctricos de alta permitividad con el fin de disminuir la longitud de onda, lo que implicaría la reducción del tamaño de la antena, pero estos poseen la desventaja de aportar un ancho de banda estrecho, menor eficiencia de radiación y un costo elevado.

Con el objetivo de hacer frente a este tipo de inconvenientes, y de mejorar los sistemas de comunicación se han propuesto diferentes técnicas de diseño en las cuales se rediseña el sistema a partir de ciertos cambios, tal es el caso del SRR (Split Ring Resonator o Resonadores en anillo divididos) (Pendry, Holden, Robbins, & Stewart, 1999) el cual es una estructura similar a los metamateriales, compuesta por dos anillos concéntricos con una ranura en sus lados opuestos; Pendry demostró que este sistema se puede comportar como un resonador que puede ser excitado por un campo magnético externo, que responde a la radiación microondas como si el material tuviera una permeabilidad magnética efectiva, de manera que este tipo de estructuras pueden ser manipuladas para que las frecuencias de resonancia en el sistema puedan ser llevadas a los valores deseados.

2.3. Secuencia de cantor

Georg Ferdinand Ludwig Philipp Cantor fue un matemático nacido en Rusia, aunque de ascendencia alemana y judía. Fue inventor con Dedekind y Frege de la teoría de conjuntos, que es la base de las matemáticas modernas. Gracias a sus investigaciones sobre los conjuntos infinitos fue el primero capaz de formalizar la noción de infinito bajo la forma de los números transfinitos (cardinales y ordinales).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El conjunto o secuencia de cantor es un subconjunto del intervalo real $[0, 1]$, precursor de los fractales, que posee dos definiciones, la primera es la definición numérica la cual es el conjunto de todos los puntos del intervalo real $[0,1]$ que admiten una expresión en base 3 que no utilice el dígito 1, esta definición en realidad no es relevante para el proyecto; y la segunda la definición geométrica que elimina en cada paso el segmento abierto correspondiente al tercio central de cada intervalo, es decir se trata de un segmento de longitud fija al que se divide en tres partes, en el cual se suprime el tercio de segmento central. Este procedimiento se repite en los segmentos que resultan de cada división. Como se ve es un procedimiento recursivo, es siempre el mismo independientemente del nivel de construcción en el que se encuentre. Se trata por tanto de lo que se ha definido como fractal.

La secuencia de cantor ha sido utilizada en el campo de la topografía, y en la base de los fractales, por lo que en cualquier dimensión se define el producto cartesiano del conjunto de Cantor por sí mismo, que recibe el nombre de polvo de Cantor. Además, en dimensión 2 se define la alfombra de Sierpinski, y en dimensión 3 la esponja de Menger.

Lo anterior hace referencia a los fractales que son objetos geométricos cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas. El término fue propuesto por el matemático Benoit Mandelbrot en 1975 y deriva del latín fractus, que significa quebrado o fracturado. Muchas estructuras naturales son de tipo fractal. La propiedad matemática clave de un objeto genuinamente fractal es que su dimensión métrica fractal es un número no entero, por lo cual la secuencia de cantor es útil para este tipo de estructuras.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4. Antecedentes en investigaciones de antenas patch

A partir de estos estudios mencionados anteriormente se han generado nuevos métodos similares al SRR, como el CSRR (Complementary Split ring resonator o Resonadores en anillo divididos complementarios), tal como el estudio de Yoonjae Lee, Simon Tse, Yang Hao, y Clive G. Parini en el cual se utiliza el CSRR, que difiere del SRR convencional en que este puede ser ahora excitado por un campo eléctrico; básicamente lo desarrollado por estos autores consiste en un arreglo de CSRR en el plano de tierra de la antena separados periódicamente, utilizando a su vez un dieléctrico de alta permitividad, y realizando el modelado del sistema con HFSS. De esta manera el plano de tierra convencional se utilizó para rediseñar el sistema y obtener parámetros de optimización tales como un 67% de mejora en el ancho de banda comparado con el sistema convencional, reducción del tamaño, cambios en las frecuencias de resonancia y operación, de modo que se abren las puertas para realizar otros estudios en base a este tipo de sistemas, ya sea modificando la posición de los CSRR, utilizando distintos dieléctricos, o modificando la geometría de los anillos (Lee, Tse, Hao, & Parini, 2007).

En el 2012 H. A. Jang, D. O. Kim, and C. Y. Kim plantearon un arreglo para un sistema de antena patch que consta de dos antenas montadas sobre un plano de tierra diseñado en base a los CSRR separados periódicamente, con la variante de que los anillos de este sistema poseen geometría cuadrada en vez de la circular propuesta inicialmente por Pendry; la simulación de este sistema y de los parámetros característicos como pérdida de retorno y el parámetro S_{11} fueron realizados con HFSS, y se evidencia que los nuevos cambios realizados sobre este sistema lograron alcanzar un 47% de reducción del tamaño comparado con el sistema convencional, es decir sin la inclusión de los anillos, nuevas frecuencias de operación, y viéndose solo afectada por un decaimiento de 0.8db en la directividad de la antena, por lo que el rendimiento del sistema no se ve afectado (Jang et al, 2007).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las aplicaciones inalámbricas son las que más beneficiadas se ven al hacer uso de sistemas con antenas compactas, tal es el caso de los sistemas MIMO (Múltiple Input Múltiple Output) o sistemas de múltiple entrada múltiple salida, en esta interviene más de una antena aprovechando la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral del sistema y las tasas de transmisión. En este campo para las aplicaciones MIMO se realizó un estudio adelantado en la India, en el cual se propone un sistema de antena patch con una sola ranura rectangular la cual opera en la banda de 0.8 GHz a 2.6GHz, con frecuencia de operación a 1.7GHz, y un ancho de banda amplio en comparación con sistemas MIMO previos en los cuales la ranura era representada en la antena por una especie de zigzag, por lo que la modificación de esta nueva antena es una sola ranura ubicada de forma diagonal en el centro de la patch, la simulación del sistema fue realizada por medio de HFSS, y el material utilizado posee una constante dieléctrica de 4.4; se variaron aspectos de longitud del sistema y de cada uno de ellos se tomo el que mejor relación tuvo respecto a valores de pérdida de retorno y ancho de banda. Del mismo modo se modifico la longitud de la ranura hasta llegar a un valor adecuado de frecuencias y ancho de banda, posterior a esto se realiza la construcción física de la antena y se realizan pruebas, analizando aspectos como el S_{11} mediante VNA (Voltage Network Analyzer), el cual indica que la perdida de retorno es mucho mejor que -10db para frecuencias en el rango de 0.9-2.5GHz. Este sistema presento valores cercanos a los simulados y posee cierta simplicidad en el diseño respecto a sistemas previos donde la ranura era más compleja de diseñar y fabricar (Bhad, Kasabegoudar, & Rodge, 2013).

Kin-Lu Wong y Jian-Yi Wu realizaron el estudio y diseño de una antena microstrip circularmente polarizada, cuyo objetivo principal consiste en realizar unos cortes ortogonales a la antena patch, y mediante el ajuste de estos cortes poder llegar a aumentar el ancho de banda, obtener un mejor patrón de radiación, la generación de nuevos modos de operación y una reducción en el tamaño del sistema; las investigaciones

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

anteriores en esta clase de sistemas proponían ranuras diagonales en la antena microstrip, pero la fabricación de estas posee un margen de tolerancias estricto, y un ancho de banda angosto, por lo que el sistema que presentan los autores aporta un gran avance en este tipo de investigaciones al reducir el tamaño del sistema y aumentar su ancho de banda. Mediante los cortes en la antena patch se observó que la frecuencia fundamental de la antena se dividió en dos frecuencias de resonancia las cuales disminuyen con el aumento de la longitud de los cortes, posterior a esto se llegó a una reducción cerca del 36% en el tamaño comparado con el sistema de cortes diagonales y un aumento en 1,30% del ancho de banda, lo cual es relativamente mayor que el 1% que generalmente se tenía con el sistema de cortes diagonales, por lo que esta diseño abre las puertas a nuevas investigaciones del sistema, ya que al variar el grosor o longitud de las hendiduras se puede llegar a nuevas aplicaciones o mejoras(Wu & Jian-Yi, 1997).

Un nuevo sistema en lo que respecta a la geometría circular de las antenas patch fue propuesto por S. Lee, J. Woo, M. Ryu y H. Shin, en el cual se plantea una estructura corrugada para la antena patch, el objetivo de este estudio apunta directamente a la reducción del tamaño, de modo que la inclusión de la estructura corrugada en comparación con la estructura plana de la antena patch circular lleva a alcanzar una reducción del 8.08% en el diámetro, y 21.12% en el área, manteniendo el desempeño que se tiene con el sistema original, aportando a su vez una optimización en el ancho de banda cerca del 1%, la ganancia el sistema no se ve afectada por lo que mantiene un valor similar de 6,8db para ambos sistemas (Lee, Woo, Ryu, & Shin, 2002).

Debido a la gran demanda de sistemas de comunicaciones multifuncionales y compactos, las antenas juegan un papel de alta importancia en el desempeño de estos sistemas, muchas técnicas han sido propuestas por varios autores, entre las cuales se encuentra la adición de ranuras de distintas formas y longitudes sobre el plano de tierra de la antena patch o sobre la antena en si, como se ha expresado anteriormente la inclusión de ciertos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

parámetros que lleven a una reducción de tamaño, pueden implicar disminuir la ganancia, la efectividad o la reducción del ancho de banda, por lo que siempre existirá el reto de hacer equivalentes estos parámetros sin desechar algunos de estos, o perder desempeño en el sistema.

S. Imran Hussain Shah y Shahid Bashir de la universidad de ingeniería y tecnología de Pakistán en base a varios estudios previos entre los cuales se encuentran el CSRR, uso de metamateriales o estructuras fractales, exponen un sistema de antena patch en el cual se agregan cuatro ranuras horizontales de diferentes longitud en la antena, con el objetivo de reducir el tamaño de la antena, obtener características multibanda y buen ancho de banda; la simulación del sistema fue realizada por medio de CST Microwave studio, las longitudes de las ranuras varían entre 12 y 24 milímetros, estas ranuras aumentan la distribución de corriente gracias a que la longitud eléctrica disminuye, estos autores concluyen a su vez que las longitudes de las ranuras pueden ser variadas para ajustar diferentes bandas y obtener o disminuir nuevas frecuencias de resonancia. Por medio del software de simulación se analizaron varios aspectos de la antena como ganancia, pérdida de retorno, patrones de radiación, entre otros, la aplicación de las ranuras lleva a operar en multibanda, una reducción de tamaño hasta del 86%, aumento del ancho de banda, una ganancia que varía desde 3.5dbi hasta 6.6dbi y la hace optima para múltiples aplicaciones como celulares, computadores portátiles y redes WLAN. (Shah, Bashir, & Altaf, 2014).

2.5. Antenas Fractales

Una antena fractal es una antena que utiliza un fractal como base de su estructura, diseñado para maximizar la distancia o el perímetro que puede recibir o transmitir, en un volumen o superficie dada. La clave de su aspecto es la repetición de un patrón sobre uno o más espacios. Por esta razón, las antenas fractales son muy compactas, son multibanda o de espectro expandido y tienen varias utilidades en telefonía móvil y comunicación por microondas. Las antenas fractales poseen características especiales como la auto-similitud

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

que puede ser descrita como la misma geometría vista desde varios puntos de vista del observador, esta permite flexibilidad en el diseño, y lleva a posibles reducciones de tamaño.

Una antena fractal tiene una respuesta en frecuencia completamente diferente a las antenas tradicionales ya que es capaz de ofrecer excelentes ganancias en diferentes frecuencias de manera simultánea. En la mayoría de las antenas tradicionales existe una frecuencia para la cual ofrecen su máxima ganancia y en el resto de frecuencias la ganancia se ve rápidamente reducida. Por esto las antenas fractales son idóneas para aplicaciones de amplio espectro frecuencial o multibanda.

En el 2014 Manas Ranjan Jena, B.B. Mangaraj, y Rajiv Pathak presentan un novedoso sistema de antena fractal basados en la geometría de la curva de koch, el diseño de este sistema fue basado en las tres primeras iteraciones de esta geometría con el objetivo de aprovechar los beneficios de las estructuras fractales entre las cuales está el diseño de antenas multibanda y la miniaturización de los sistemas; el diseño y la simulación de parámetros como el S_{11} , VSWR, y los patrones de radiación del sistema fueron realizados con CST Microwave Studio EM ; los resultados encontrados muestran dos frecuencias de resonancia a 32.84GHz y 34.28GHz las cuales afirman las características de ser una antena multibanda, una pérdida de retorno mayor a los -15db, parámetros de directividad y ganancia mayores a los 6dbi y 6db respectivamente, con la ventaja de ser un sistema compacto que puede ser usado en aplicaciones espaciales y de radioastronomía (Jena, Mangaraj, & Pathak, 2014).

Son muchas las estructuras fractales que se pueden encontrar y cada una puede aportar características en los sistemas de telecomunicaciones, una de las aplicaciones más importantes de ellas es la electrodinámica fractal, básicamente es la combinación de geometría fractal con la teoría electromagnética con el objetivo de estudiar y explorar

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

nuevos tipos de propagación, radiación y demás efectos asociados a la propagación de ondas electromagnéticas y su aplicación en sistemas de telecomunicaciones.

Un nuevo diseño basados en los fractales fue propuesto, tomando como base la alfombra de Sierpinski la cual fue utilizada para el diseño de un sistema de antena patch, la cual se llevo hasta su tercera iteración, tomando 2.45GHz como frecuencia de diseño ya que en esta banda se encuentran numerosas aplicaciones industriales, medicas, científicas, WLAN, sensores, aplicaciones de área personal, entre otros. Las iteraciones fractales del diseño consisten en dividir el tamaño rectangular de la antena patch en nueve rectángulos más pequeños, donde el rectángulo central es removido, luego los ocho rectángulos a su vez se dividen en nueve mas donde el rectángulo central es removido, y se sigue la misma secuencia para la tercera iteración, la alimentación de la antena se realizo por medio de una línea microstrip con una impedancia de 50Ω al igual que la antena para proveer una mejor transferencia de energía; la simulación del sistema se realizo por medio de HFSS obteniendo parámetros característicos como perdida de retorno, patrones de radiación, carta de Smith, VSWR y ganancia. Se concluye finalmente que el tamaño de la antena disminuye cuando la iteración de Sierpinski aumenta, reducciones de 13% y 18% se observan asociadas a la iteración 1 y 2 respectivamente, se observa a su vez que para todas las iteraciones la perdida de retorno se encuentra por debajo de los -20db. Se analiza también que las iteraciones 2 y 3 poseen resultados similares en lo que respecta a reducción de tamaño y manteniendo las características de desempeño, por lo que se amplía el campo para el estudio de las iteraciones en la alfombra de Sierpinski, esta antena puede ser ampliamente utilizada en numerosas aplicaciones que utilizan la banda de 2.4GHz (Shrestha, Park, Noh, & Choi, 2012).

En la práctica existen muchos tipos de estructuras fractales, la alfombra de Sierpinski, la curva de koch, el árbol de Mandelbrot, entre otros, pero la característica única entre todas es la repetición de una misma estructura a diferentes escalas; Mukh Ram, Sushrut Das, y

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ram Lal Yadava plantearon un nuevos sistema de antena fractal basados en una estructura hexagonal, cuyo material posee una constante dieléctrica de 4.4, con el objetivo de generar la estructura fractal, se inicio con una patch hexagonal funcionando a 2.45 GHz, esta fue denominada la iteración cero, posterior a esto se realiza un corte hexagonal en el centro de la antena, luego se realizan los mismos cortes de un tamaño menor alrededor de la antena, y se sigue con la secuencia una vez más hasta llegar a la tercera iteración, el sistema fue simulado mediante HFSS y posteriormente fue fabricado, el sistema fue diseñado para frecuencias de operación de 3.94, 6.46, 13.04, 14.16 GHz respectivamente, los resultados arrojaron datos de coeficiente de reflexión menor que -10 db para todas las frecuencias, con ancho de banda de 3.86-3.98 GHz, 6.36-6.55GHz, 12.84-13.27 GHz y 13.94-14.39 GHz, respectivamente, esto hace adecuado el sistema para aplicaciones de radio ubicación y radionavegación, investigación espacial y comunicaciones espacio-tierra y viceversa (Ram, Das, & Yadava, 2015).

2.6. Secuencia de cantor en comunicaciones inalámbricas

A partir de estos estudios se han adelantado nuevas investigaciones partiendo de la estructura fractal desarrollada por cantor, tal es el caso de una novedosa antena monopolo que satisface las necesidades de ciertas aplicaciones inalámbricas y brinda cobertura para sistemas como GSM, DCS, y UMTS. Este nuevo diseño fue basado en la segunda iteración de la secuencia de cantor, y a partir de esta se generaron segmentos de diferente tamaño (ancho y alto) acorde a una transformación a las dimensiones de la geometría fractal, la investigación se realizó mediante el software ADS momentum; se obtuvo reducción en el tamaño de la antena aportando flexibilidad respecto a las frecuencias de resonancia y anchos de banda, frecuencias de operación multibanda a 0.9GHz, 2.75GHz, 3.5GHz, 4.6GHz, y en bandas WLAN de 2.4 y 5.8GHz. (Manimegalai, Raju, & Abhaikumar, 2008).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Estudios interesantes pueden surgir de la aplicación de los fractales en las comunicaciones, ya que en algunos casos estos pueden presentar bondades como las de un filtro; en base a esta necesidad se planteó un filtro pasa bandas, el cual consiste en aplicar la distribución de cantor a distintas capas para una línea de transmisión considerando distribuciones periódicas de distintos substratos, el objetivo de esta estructura es detener la propagación de ondas electromagnéticas en ciertas bandas de frecuencia, se usó el método de matriz de transferencia para calcular la admitancia y reflectancia de la línea de transmisión, y se compara con otras distribuciones periódicas de substratos, llevando a la conclusión de que con la adición de capas en secuencia de cantor a la línea de transmisión, se causa una rápida disminución en la transmisión, es decir se obtiene un filtro pasa bandas con frecuencia central a 10.69GHz. (Xiao, Wang, Hu, & Gao, 2008).

Debido a la demanda de antenas más pequeñas para aplicaciones en sistemas inalámbricos, surge un original diseño para una antena patch mediante la combinación de las geometrías fractales de la curva de koch, y la secuencia de cantor con el objetivo de satisfacer diferentes aplicaciones en sistemas de banda ancha; el diseño consiste en aplicar las geometrías fractales en la parte superior e inferior de la patch la cual es alimentada mediante una línea de transmisión de 50Ω , el material para el substrato es FR4 con constante dieléctrica de 4.4, la simulación del sistema se realizó con CST Microwave studio, la pérdida de retorno fue medida mediante el network analyzer model No.E5071C; se logra obtener un ancho de banda que va desde 1.6GHz hasta 3.5GHz, el cual es adecuada para muchas aplicaciones inalámbricas, con ganancias que van desde 2.5 a 6dbi. (Choukiker & Behera, 2011).

La aplicación de la secuencia de cantor también fue utilizada para satisfacer aplicaciones inalámbricas de ultra banda ancha (UWB), con el objetivo de hacer frente a la propagación multicamino en ambientes interiores; como se había estudiado con anterioridad este tipo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de sistemas hacían uso de sistemas MIMO por lo que el estudio consistió en el diseño de un sistema de antenas MIMO, basados en antenas patch sobre una secuencia de cantor, para esto se utilizó un sustrato con permitividad relativa de 2.65 y un espesor de 1.6mm, con un tamaño total de la antena de 25x48mm² lo que apunta a un tamaño compacto, posterior a esto se estudiaron las diferentes distribuciones de corriente en la antena a diferentes frecuencias (5, 8, y 10 GHz), y también se analizaron las gráficas de pérdidas de retorno y patrones de radiación con la inclusión y sin la inclusión de la geometría en secuencia de cantor; el estudio de estos parámetros fue realizado mediante HFSS y permitió llegar a resultados como mejoras considerables en los patrones de radiación, pérdida de retorno, ganancia y tamaño del sistema, que permite el funcionamiento de este desde 4.5GHz a 10.6GHz. (Li, Li, Liu, & Jiang, 2012).

En resumen muchas de las aplicaciones hoy en día en cuanto a comunicación inalámbrica en aeronaves, satélites, radares, sensores, filtros, redes de área local y personal, entre otros, requieren la mejora en el rendimiento del sistema, menores pérdidas, mayor ancho de banda, múltiples frecuencias de operación, y tamaños cada vez más pequeños, con menor peso, por consiguiente las antenas microstrip o de microcinta son adecuadas para este tipo de sistemas, por lo que el adelantar estudios e investigaciones en este tipo de antenas es importante para el campo de las radiocomunicaciones. Debido a los estudios previos el campo de investigación en este tipo de sistemas, este parece ampliarse cada día, el estudio de sus parámetros, dimensiones, factores de diseño, aplicaciones en específico, y demás, hace que se pueda realizar bastante investigación para la mejora de muchos sistemas, lo que conlleva a la mejora tecnológica a nivel mundial. Las geometrías fractales permiten en el diseño de estas antenas, la aparición de nuevas frecuencias de operación, mejora en el desempeño y la reducción del tamaño del sistema. La combinación de estos dos ejes (geometrías fractales y antenas compactas), las hace de especial atención en el adelanto y generación de nuevas tecnologías que sean aplicables a las comunicaciones inalámbricas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

La metodología en la que se realizó la ejecución de la presente tesis fue basada en una serie de actividades o fases que se describirán a continuación.

Inicialmente en la primer fase del proyecto se realizó una revisión bibliográfica o rastreo investigativo, mediante las bases de datos respectivas a las cuales tiene acceso el ITM, siendo la IEEE la más utilizada, con el objetivo de establecer las bases, antecedentes y actualidad referente a este tipo de investigaciones y avances en sistemas de baja dimensión como son las antenas patch, antenas fractales y la secuencia de cantor. Seguido de esto se entro en contacto con el software Ansoft HFSS 14.0, al cual se tuvo acceso en la sala de los docentes de investigación del ITM, con el propósito de poder modelar y modificar los parámetros necesarios de la antena patch y extraer la información necesaria.

En la segunda fase se trabajo en base al software HFSS teniendo en cuenta los antecedentes investigados y estudios previos, se genero un diseño de antena patch y fue llevado al software; luego sobre este diseño se realizaron algunas variaciones a lo largo del proyecto, las cuales básicamente apuntaban a diferentes simulaciones en base a las mismas dimensiones de la antena patch pero con diferentes iteraciones de la secuencia de cantor, donde la máxima iteración analizada fue la cuarta. Paralelo a estas simulaciones se genero un nuevo sistema el cual se baso en un diseño de antena patch con múltiple ranura separadas a una misma distancia, es decir, varias ranuras sobre la antena original pero sin ningún tipo de secuencia de cantor en su distribución, con el objetivo de evidenciar en la fase de análisis que cambios aporta la inclusión de la secuencia de cantor, frente a un sistema que no fue diseñado sobre esta secuencia. Para finalizar esta fase se obtuvieron los datos del parámetro S_{11} de todos los modelos (Cantor orden 1, 2, 3, 4, y el

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

sistema de múltiple ranura) que básicamente permite conocer los picos de radiación en los que la antena puede operar.

En la tercera fase del trabajo se tomo la información obtenida en la fase anterior y se realizo el análisis respectivo de los datos del S_{11} , frecuencias de operación y el tamaño del sistema, confrontando estos resultados con el sistema de múltiple ranura, y con un sistema de antena patch previo, en el cual se obtuvieron resultados que claramente evidencian que la secuencia de cantor genera un comportamiento diferente al ser aplicado sobre la antena patch, respecto a un sistema de antena patch con una sola ranura (sistema convencional), y uno con múltiples ranuras separadas a una misma distancia. Finalmente se realizo la discusión apropiada sobre los resultados, y se plantearon posibles trabajos futuros en base a la secuencia de cantor en antenas patch y se redacto la presente tesis.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES						
Metas	1	2	3	4	5	6
1. Revisión bibliográfica						
2. Familiarización con el software HFSS						
3. Diseño de la antena tipo patch						
4. Modelado de la antena tipo patch en HFSS						
5. Modelado de la antena con diferentes arreglos de ranura (Cantor y múltiples ranuras)						
6. Obtención de parámetro S_{11}						
7. Análisis y comparación de resultados de parámetros característicos						
8. Resultados y conclusiones (Informe Final)						

Tabla 1. Cronograma de actividades

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características del diseño del sistema de antena patch en general

Para el diseño del sistema de antena patch sobre el que se trabajaron los diferentes modelos en base a la secuencia de cantor y las múltiples ranuras, se tomo un área lo suficientemente grande (17.84mm por 17.37mm) por tres razones, la primera para permitir realizar cuatro iteraciones diferentes de la secuencia de cantor, la segunda teniendo en cuenta que el tamaño de las ranuras en la cuarta iteración (las de menor tamaño) no fueran menores que 120 μ m, ya que pensando en el trabajo futuro este es el tamaño mínimo que el dispositivo que fabrica la antena puede realizar, y finalmente con el objetivo de que las frecuencias resultantes en los diferentes parámetros S_{11} estuvieran dentro del rango de 1GHz a 8GHz, esto debido a que el equipo analizador que posee el ITM (Rohde schwarz fsh8) para este tipo de sistemas posee esa limitante para el análisis en frecuencia de las antenas. En base a estas dimensiones se pudo determinar la reducción del tamaño en la antena.

El diseño que se muestra a continuación es el mismo que se uso para todas las iteraciones de la secuencia de cantor y de las simulaciones en general, las únicas variantes entre cada simulación es la forma en la que se distribuyen las ranuras que corresponden al diferente orden de la secuencia de cantor.

Sobre el plano de tierra se tiene el substrato sobre el que se construyó el sistema, cuyo material es FR4 epoxy (Fibra de vidrio reforzado) con permitividad relativa de 4.4, el cual es comúnmente utilizado como base de muchos dispositivos electrónicos y circuitos integrados, y sobre este substrato se tiene la antena patch y la línea de transmisión cuya impedancia es de 50 Ω y el material es cobre. En la imagen se pueden apreciar el diseño y las dimensiones del sistema.

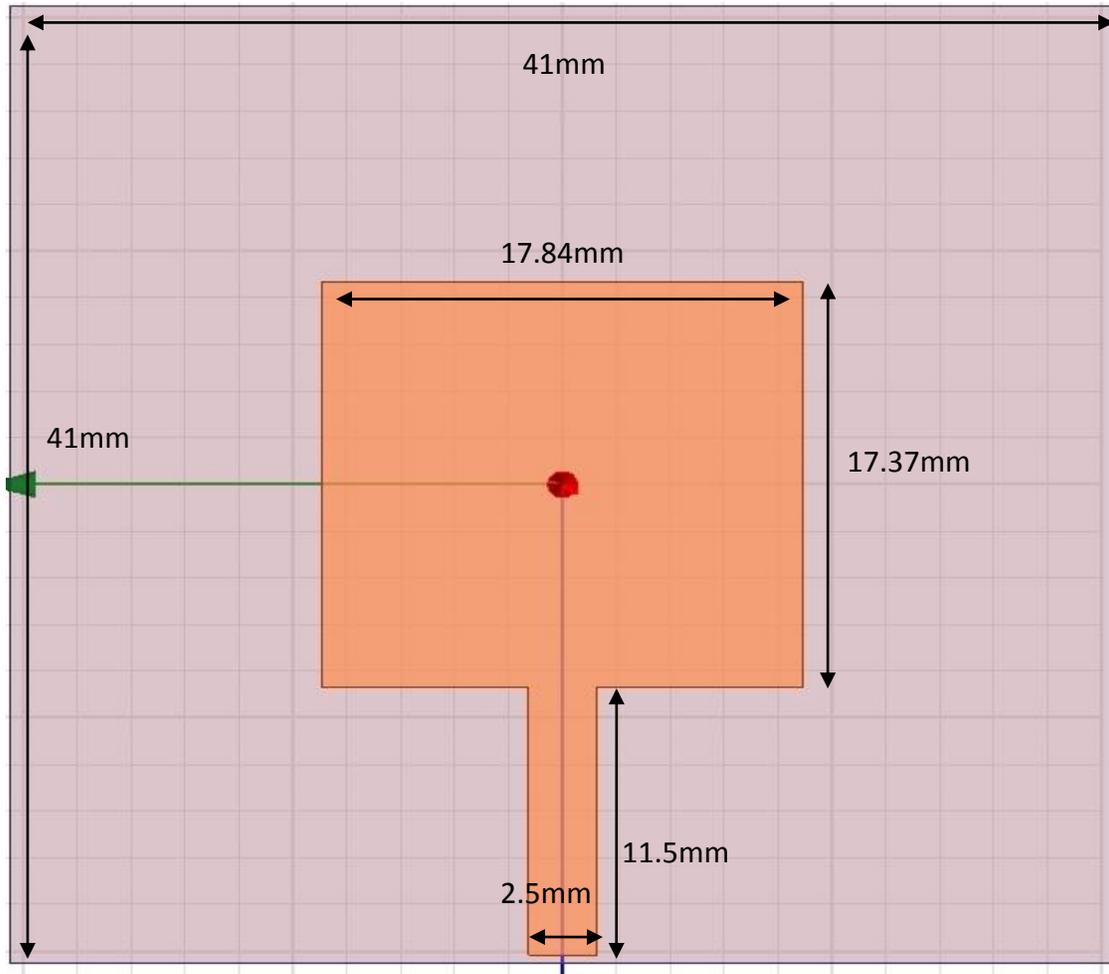


Ilustración 1. Sistema de antena patch general

Nombre	Tamaño
PatchX	17.84mm
PatchY	17.37mm
Línea Tx-X	2.5mm
Línea Tx-Y	11.5mm
Tierra X	41mm
Tierra Y	41mm
Substrato X	41mm
Substrato Y	41mm
Espesor Substrato	1.27mm

Tabla 2. Medidas antena patch general

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En base al anterior diseño se plantearon los diferentes modelos en base a la secuencia de cantor.

4.2. Secuencia de cantor orden 1- primera iteración.

Para la primera iteración de la secuencia de cantor se tomo un área de 17.12mm (Ancho) por 12.96mm (Largo), la cual está contenida dentro de la longitud de la patch original, en la cual la distancia en X de esta, es decir el ancho (17.12mm) se conservo igual para todos los modelos, y el largo de esta se dividió en tres segmentos iguales siguiendo la secuencia de cantor donde el tercio central se conservo en cobre, y los tercios externos fueron considerados como dos ranuras; el largo de las ranuras para esta secuencia es de 4.32mm. La distancia entre las ranuras y los bordes de la patch es de 0.36mm, las cuales se conservaron así para todos los modelos.

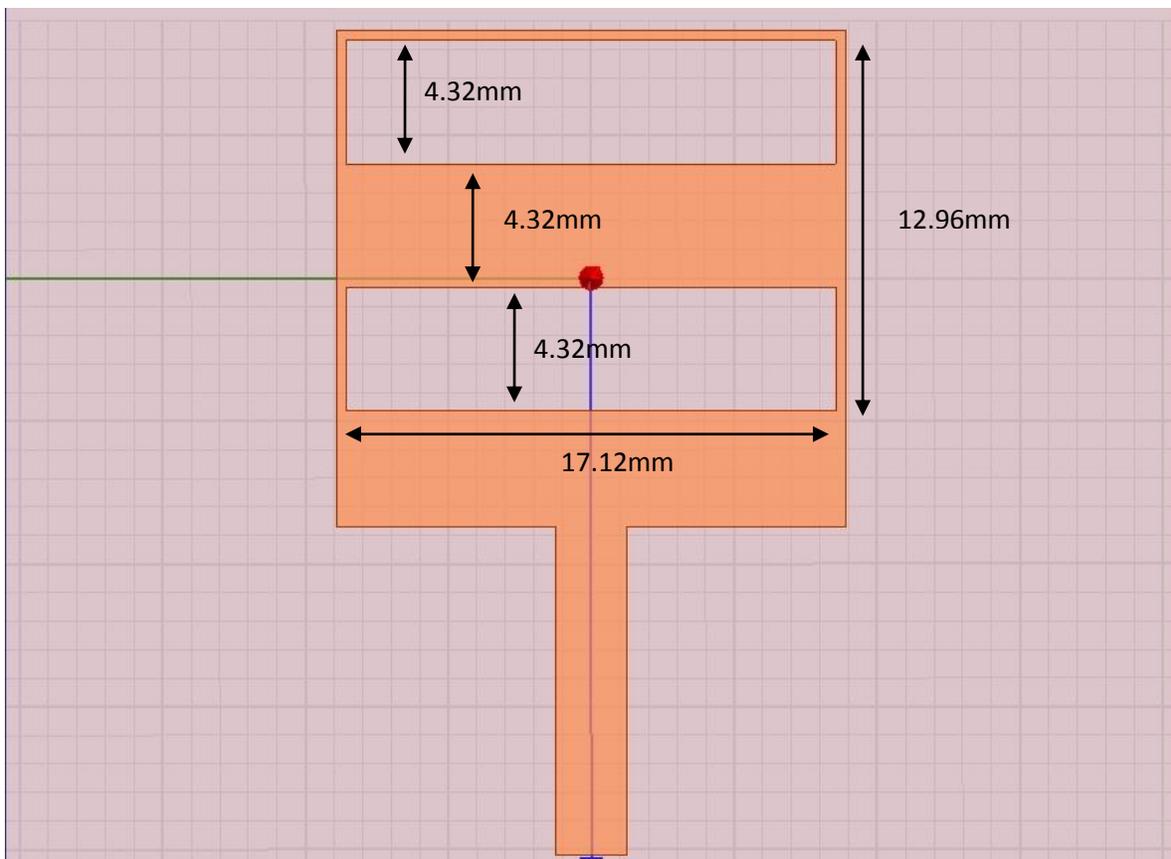


Ilustración 2. Antena patch con secuencia de cantor orden 1

Posterior al diseño observado en la imagen se realizó la simulación del sistema, con un barrido en frecuencia de 1GHz a 8GHz. En base esta simulación, se obtuvieron los resultados para el parámetro S_{11} .

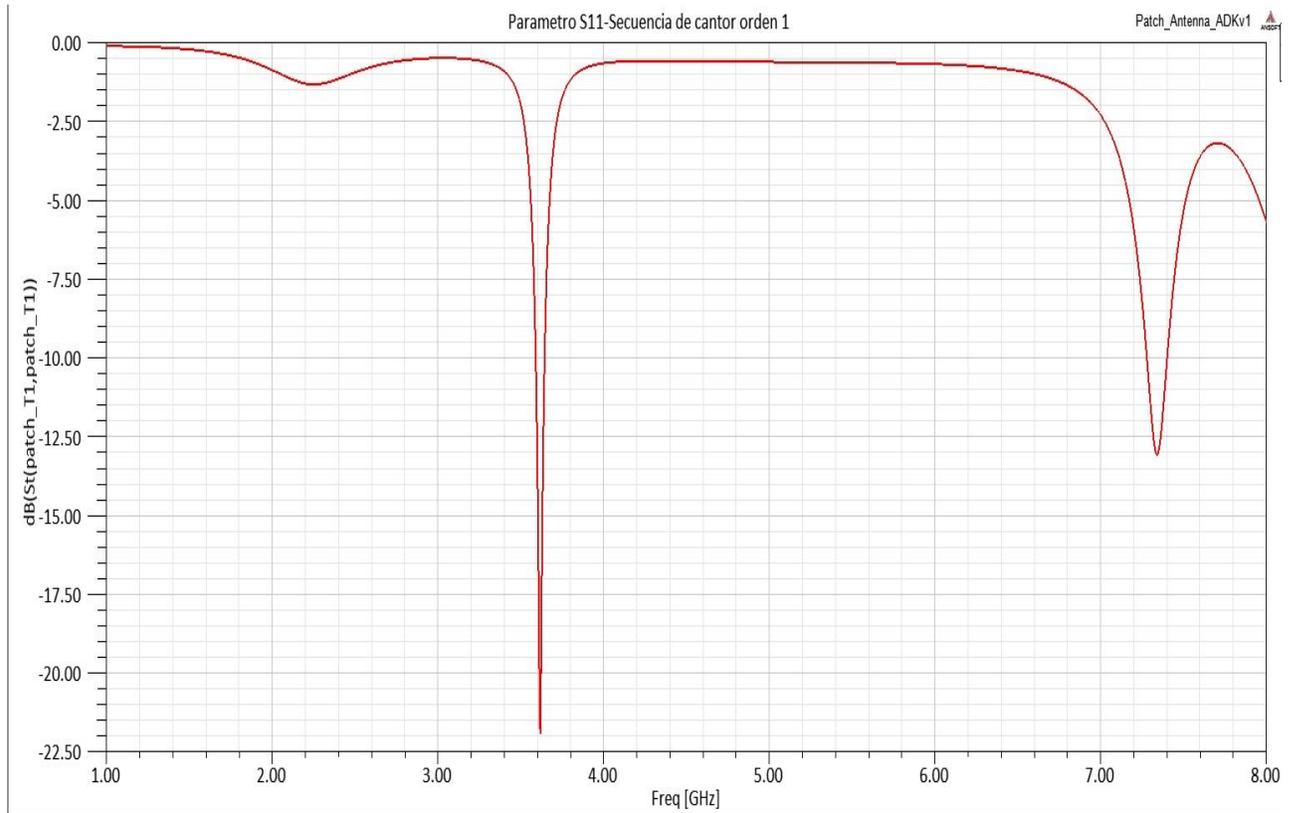


Ilustración 3. Parámetro S_{11} para la secuencia de cantor orden 1

Como se observa en la figura del parámetro S_{11} , el sistema de antena patch diseñado en base a la secuencia de cantor en su primera iteración, muestra un comportamiento dual-band con una primera banda de operación a 3.6GHz, y una segunda banda a 7.3GHz. Ambas bandas de operación correspondiente a la banda SHF del espectro. Este sistema puede ser utilizado en aplicaciones de onda corta, sistemas por línea de vista y aplicaciones satelitales específicas.

El patrón de radiación obtenido concuerda con el patrón característico en este tipo de sistemas con un lóbulo principal, y lóbulos posteriores de baja radiación.

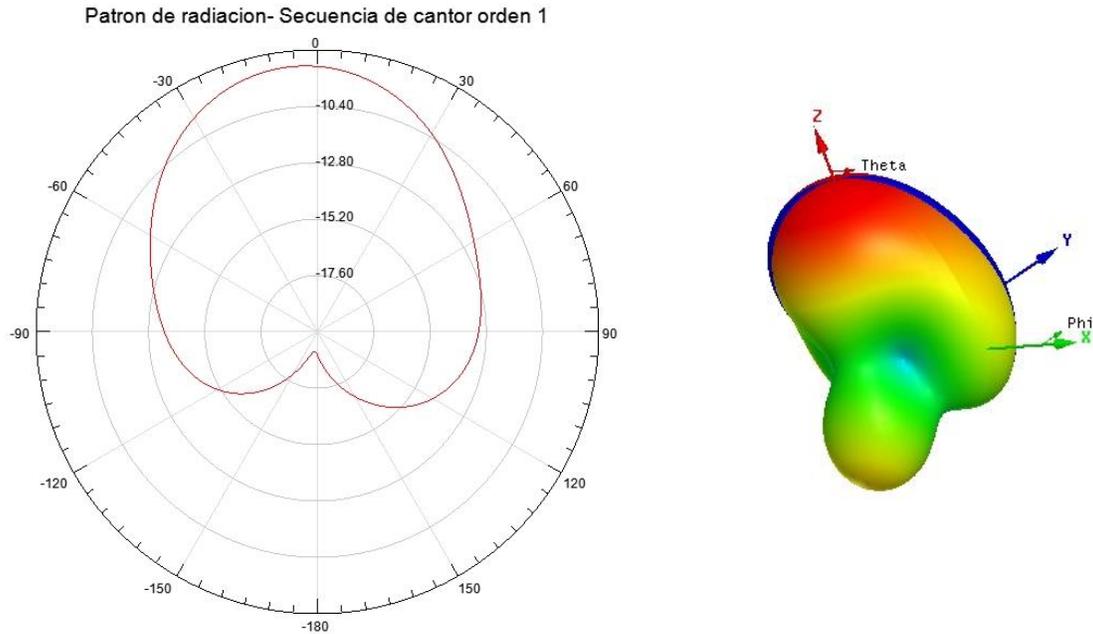


Ilustración 4. Patrón de radiación 2D y 3D secuencia de cantor orden 1

4.3. Secuencia de cantor orden 2- segunda iteración.

Para realizar la segunda combinación de la secuencia de cantor, se tomo el diseño de la primer iteración, de manera que cada una de las ranuras del sistema se dividió de nuevo entre tres y el tercio central de estas se lleno con cobre. Las nuevas ranuras del sistema tienen una longitud de 1.44mm, de manera que mediante esa iteración el número de ranuras en la antena aumento a cuatro.

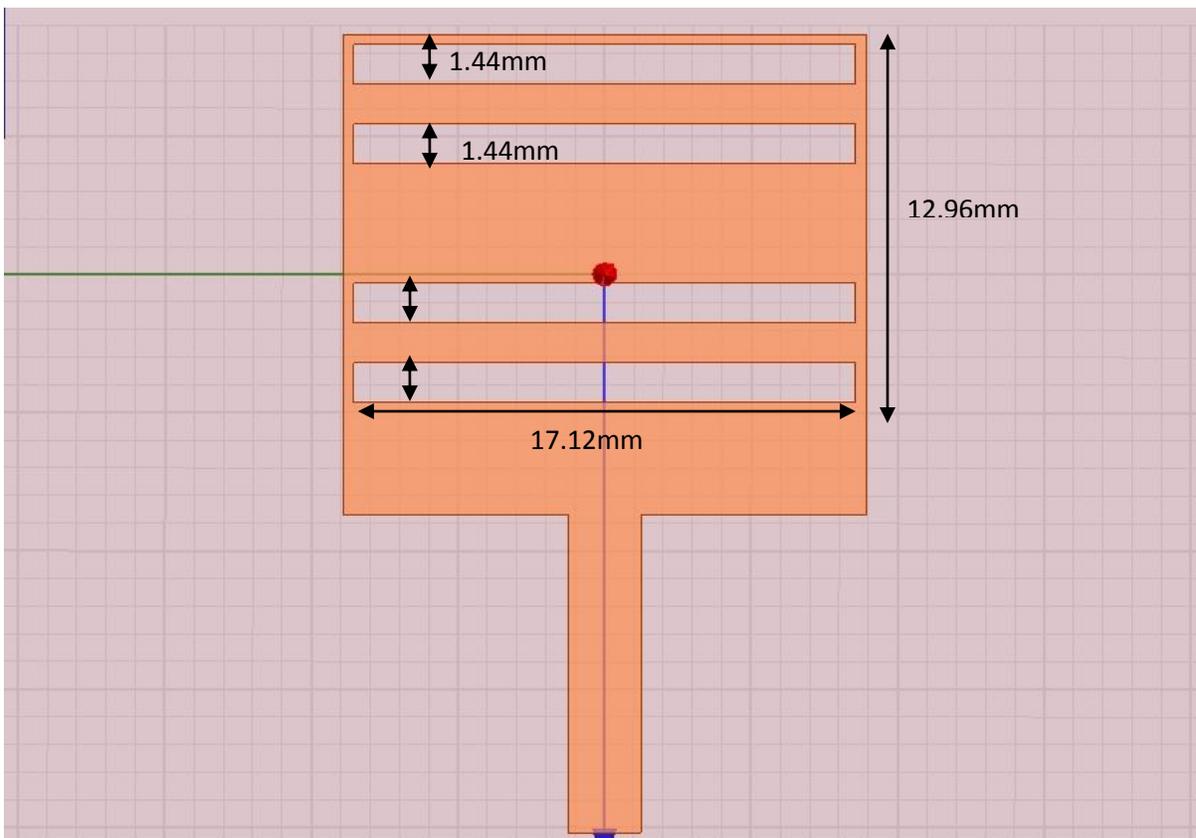


Ilustración 5. Antena patch con secuencia de cantor orden 2

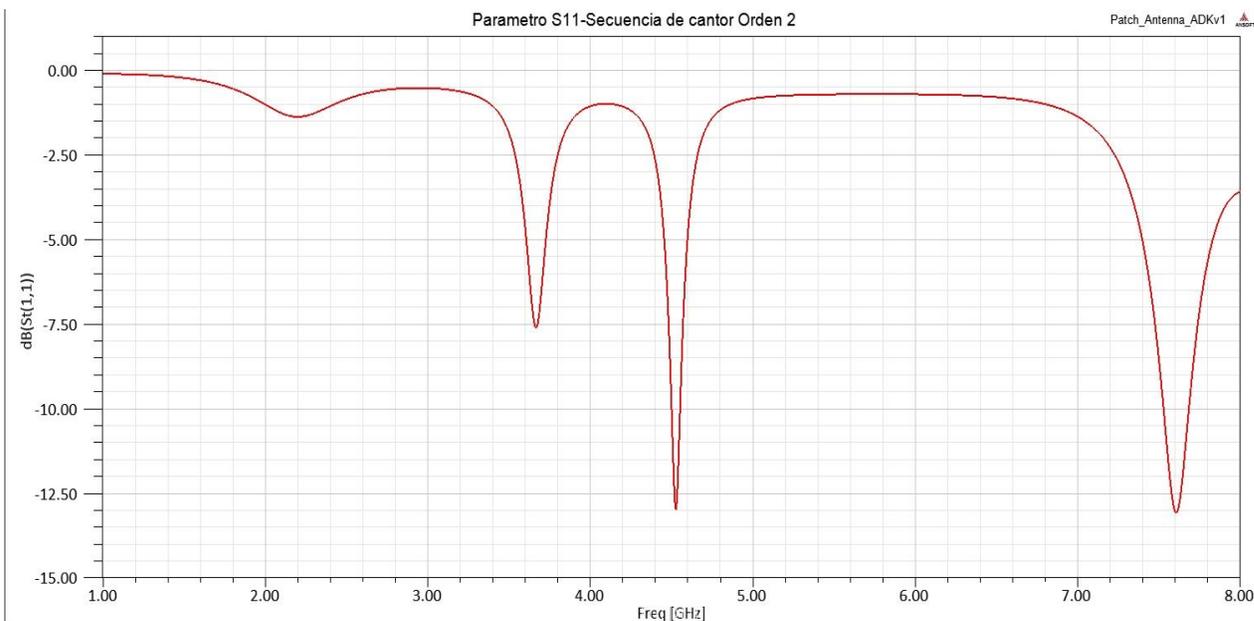


Ilustración 6. Parámetro S11 para la secuencia de cantor orden 2

Este nuevo diseño en base a la segunda iteración de la secuencia de cantor también presenta un comportamiento dual-band, la inclusión de una segunda iteración ocasiona un leve desplazamiento en esas frecuencias de operación respecto a la primera secuencia de cantor alrededor de 900MHz y 200MHz respectivamente. Para este nuevo sistema se tiene una primera banda a 4.5GHz y una segunda banda a 7.5GHz.

El patrón de radiación concuerda con el característico y posee alta similitud con el primer diseño en base a cantor, con leves incrementos en el desempeño respecto a su forma y a la radiación del lóbulo principal.

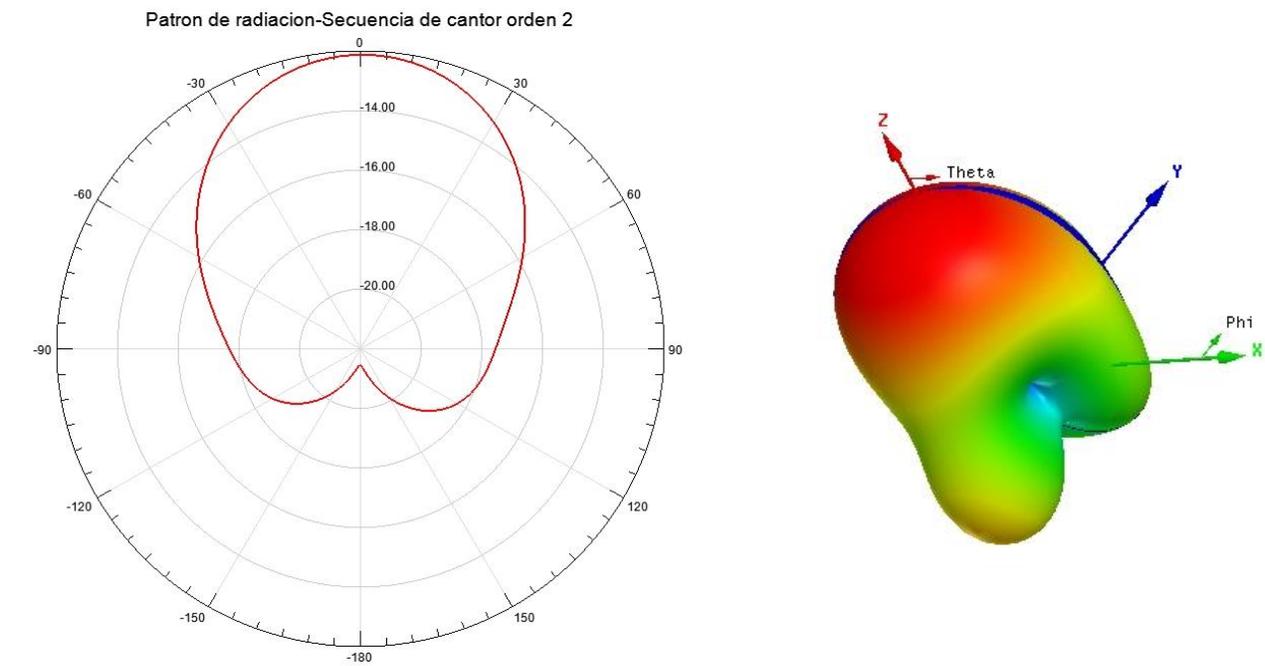


Ilustración 7. Patrón de radiación 2D y 3D secuencia de cantor orden 2

4.4. Secuencia de cantor orden 3- tercera iteración.

Continuando con las combinaciones de la secuencia de cantor, para este diseño se tomaron longitudes de las ranuras del sistema previo y se dividieron entre tres, cuyo tercio central se lleno con cobre, esto permitió que el número de ranuras del sistema aumentara a ocho; la longitud de estas nuevas ranuras es de 0.48mm.

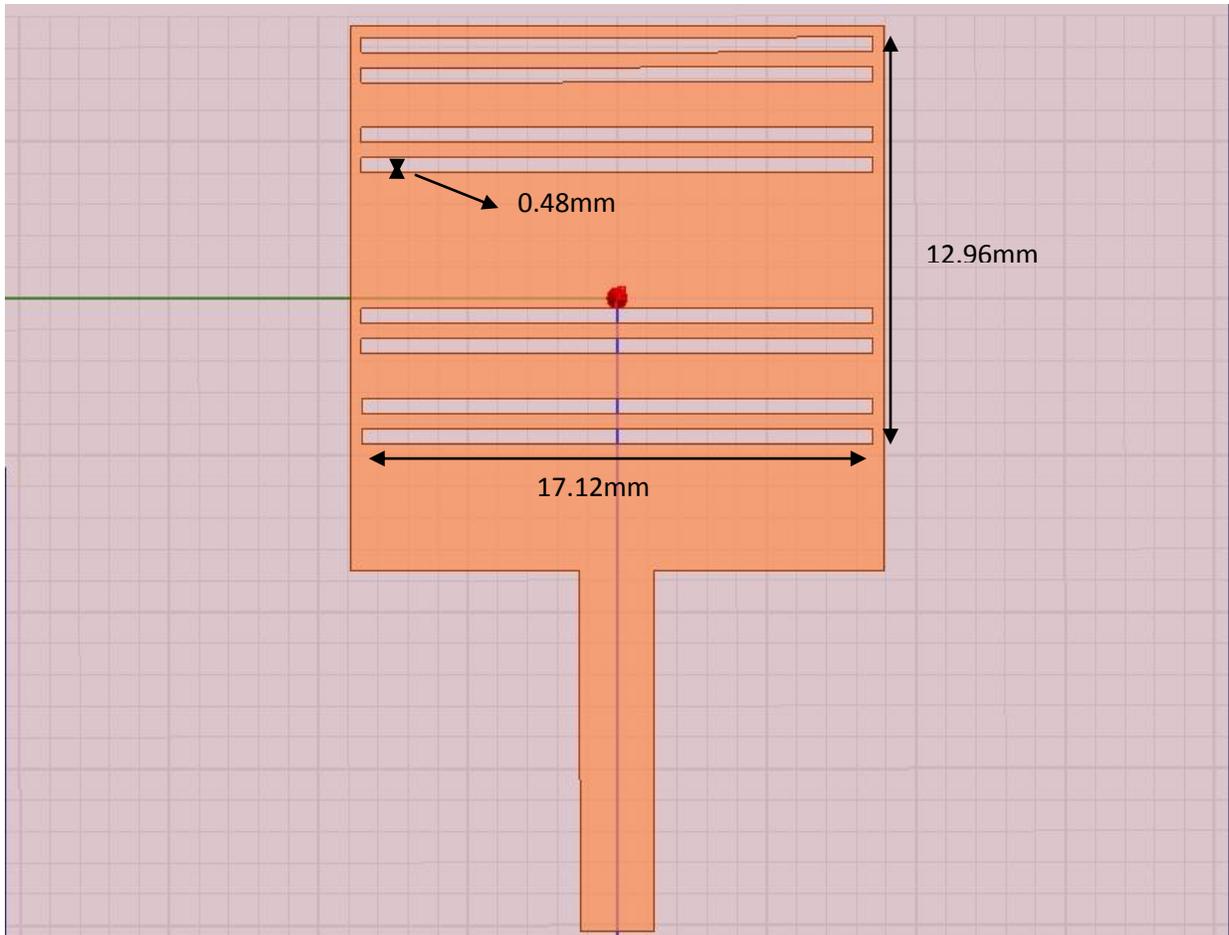


Ilustración 8. Antena patch con secuencia de cantor orden 3

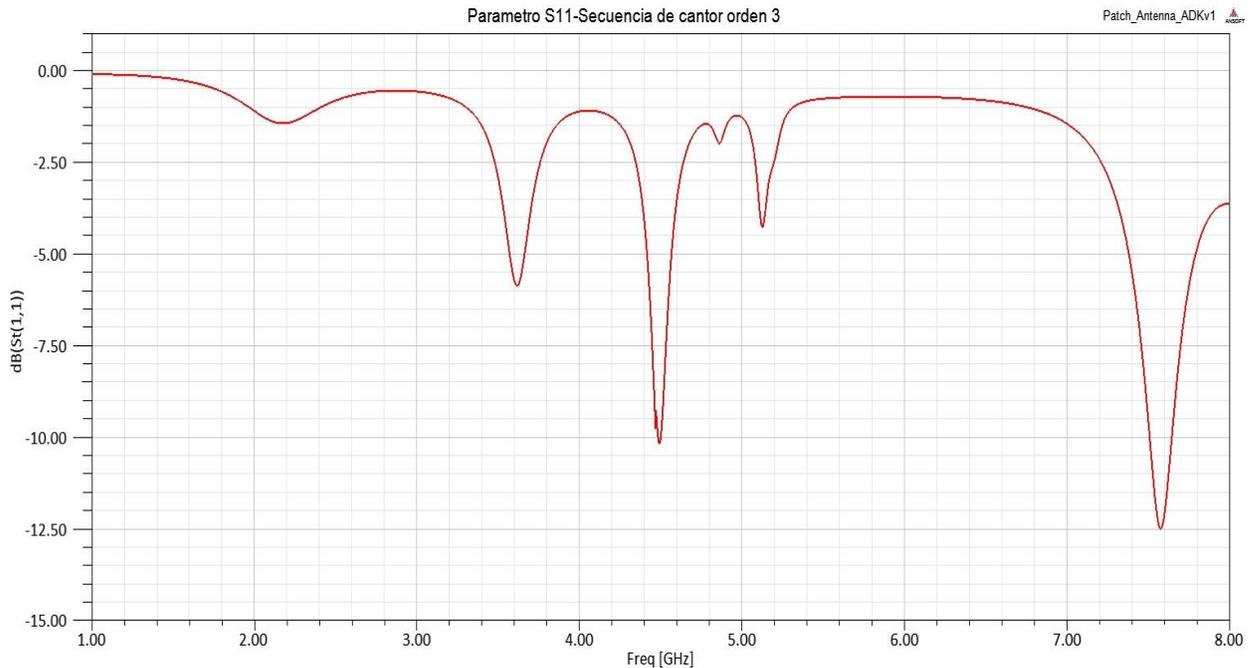


Ilustración 9. Parámetro S11 para la secuencia de cantor orden 3

Como se puede apreciar en la imagen del parámetro S_{11} para este nuevo sistema en base a cantor, el sistema posee gran similitud con la de orden dos, con dos bandas de operación a 4.5GHz y 7.56GHz, se pueden notar que se generan algunos picos de radiación menores que no son aptos para ser considerados como frecuencias de operación.

Del mismo modo que en los anteriores modelos el patrón de radiación de esta antena coincide con el de las simulaciones previas, con una muy leve disminución en el lóbulo principal respecto al sistema de orden dos.

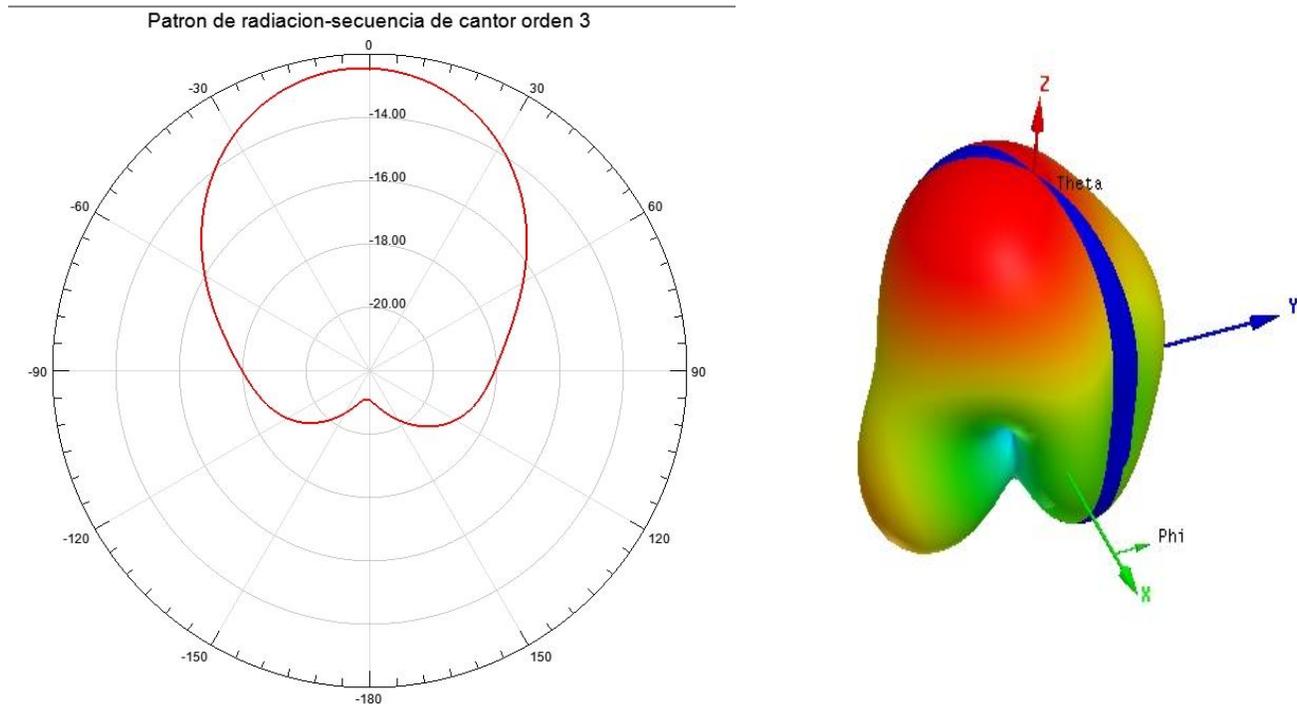


Ilustración 10. Patrón de radiación 2D y 3D secuencia de cantor orden 3

4.5. Secuencia de cantor orden 4- cuarta iteración.

Para este último diseño en base a la secuencia de cantor se realizó el mismo procedimiento que para los otros modelos, esto llevó a tener un sistema con 16 ranuras, cuya longitud es de 0.16mm, a partir de esta secuencia no se realizaron más modelos para analizar debido a que las ranuras excedían el valor que el fabricante puede llegar a realizar. Como se puede observar en la imagen de la antena, al realizar cada iteración el tercio central al cual se llena de cobre permanece intacto a medida que aumenta el orden, respetando lo planteado en la secuencia de cantor.

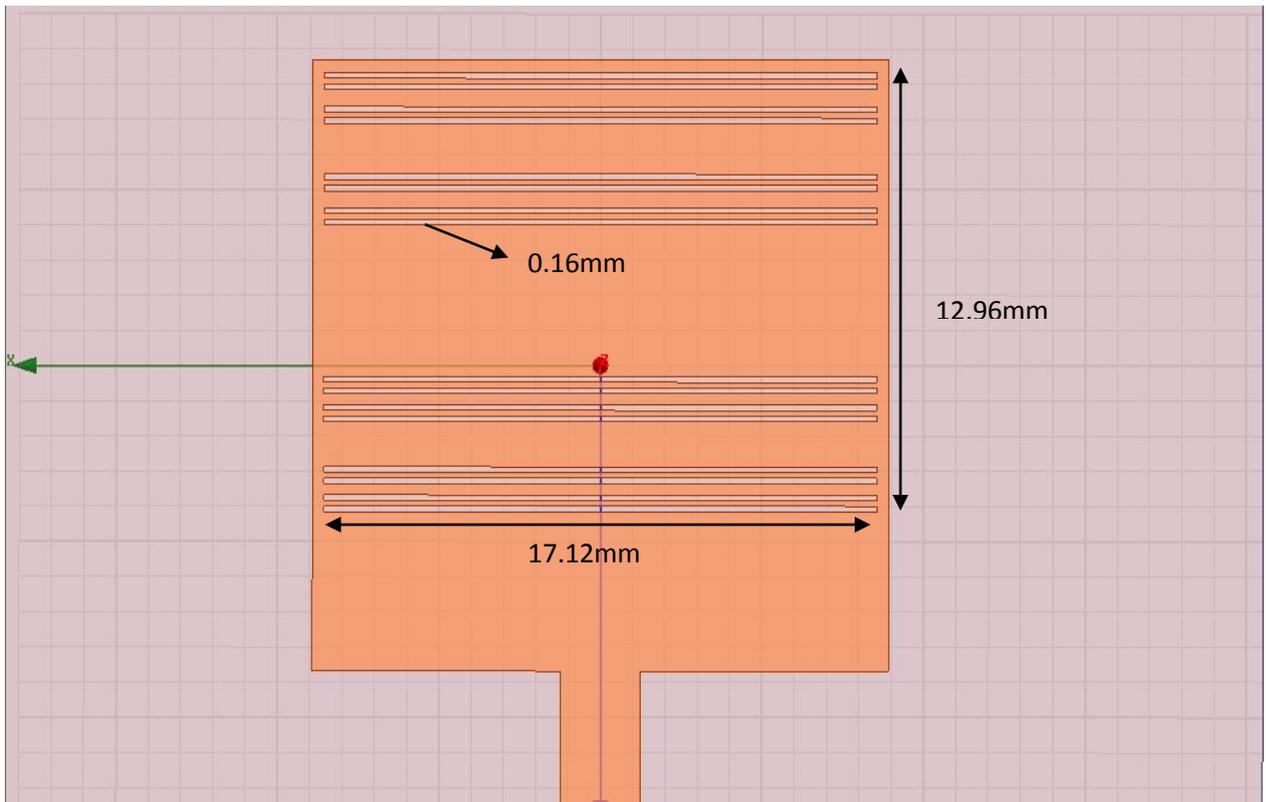


Ilustración 11. Antena patch con secuencia de cantor orden 4

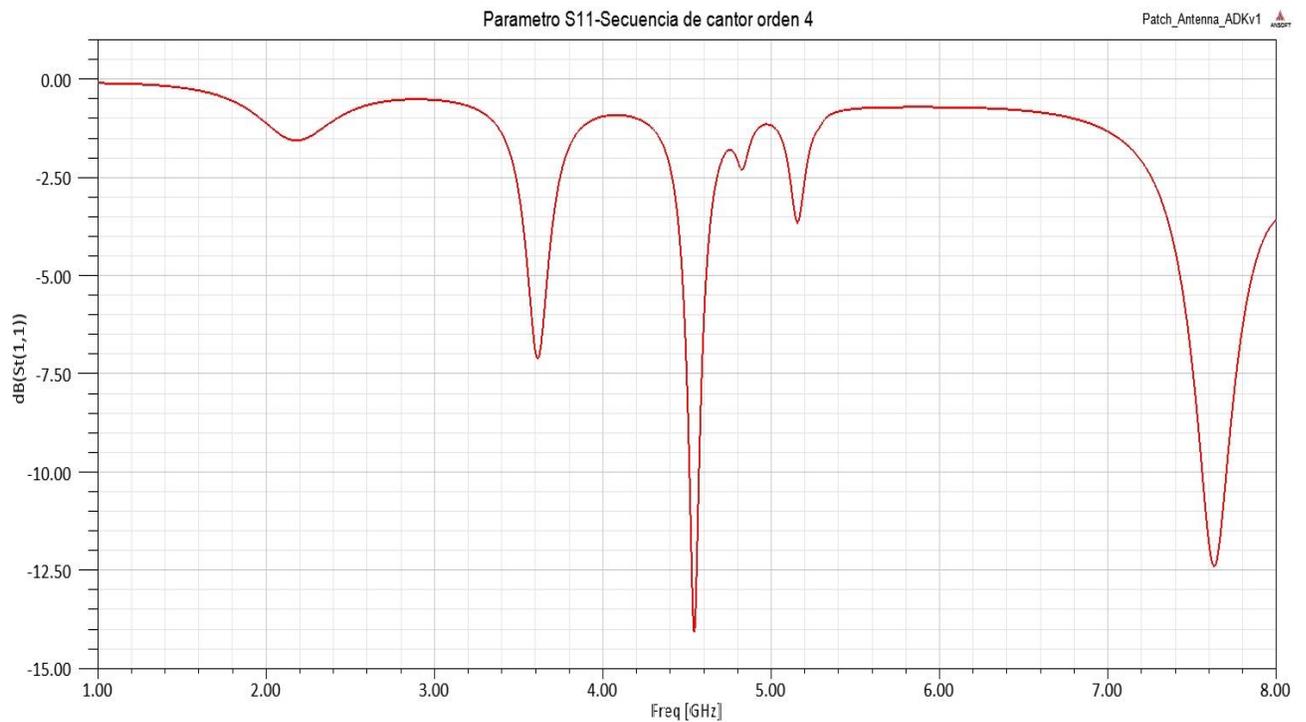


Ilustración 12. Parámetro S11 para la secuencia de cantor orden 4

Esta última iteración de la secuencia de cantor mantiene lo planteado por las anteriores, posee dos frecuencias de operación en 4.5GHz y 7.6GHz, el sistema puede ser utilizado en general para aplicaciones inalámbricas específicas de la banda SHF; el patrón de radiación de este sistema tiende a disminuir levemente y aumenta un poco los lóbulos posteriores, por lo que mantiene el desempeño de los anteriores diseños.

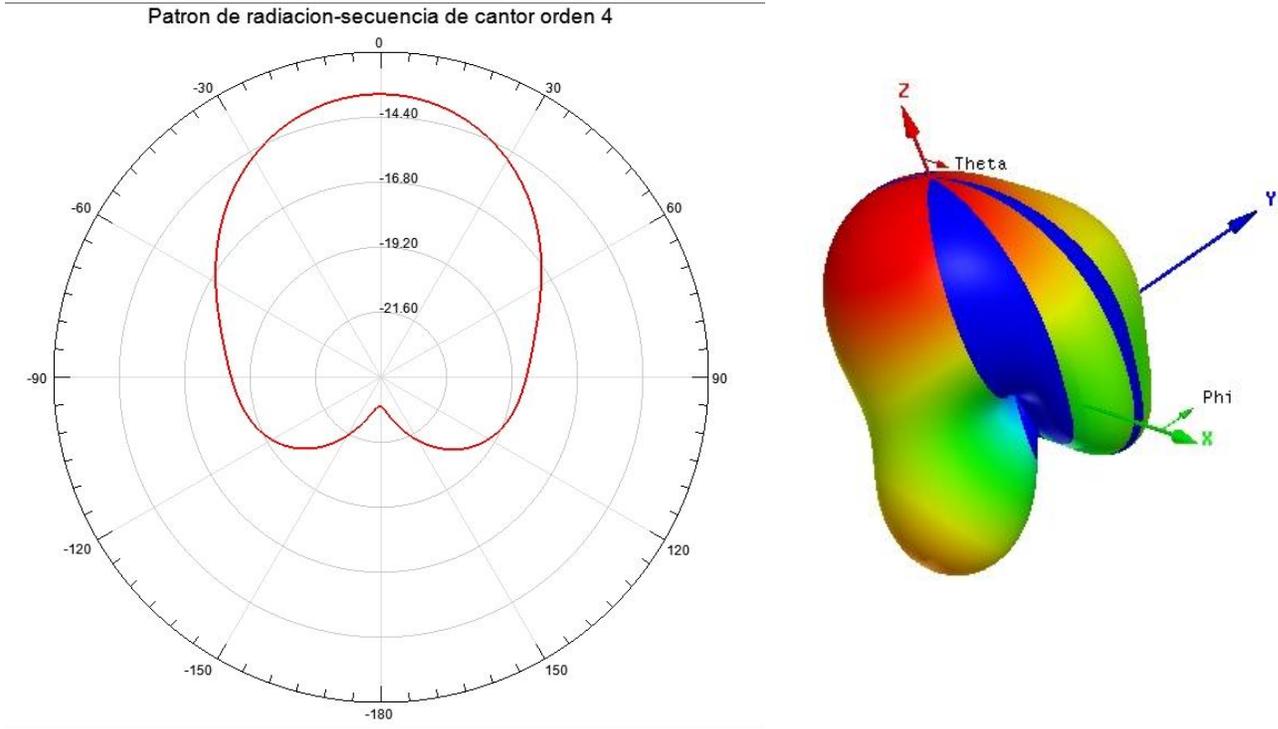


Ilustración 13. Patrón de radiación 2D y 3D secuencia de cantor orden 4

4.6. Sistema de múltiples ranuras.

Con el objetivo de realizar un comparativo entre los sistemas con la inclusión de la secuencia de cantor y un sistema en cuya distribución de ranuras no obedezca a esta naturaleza, y poder determinar qué puede aportar la secuencia de cantor, se planteo un diseño con múltiples ranuras espaciadas a una misma distancia sobre el mismo tamaño que se trabajo para todos los modelos. Este sistema permitió ubicar 14 ranuras con una longitud de 0.48mm.

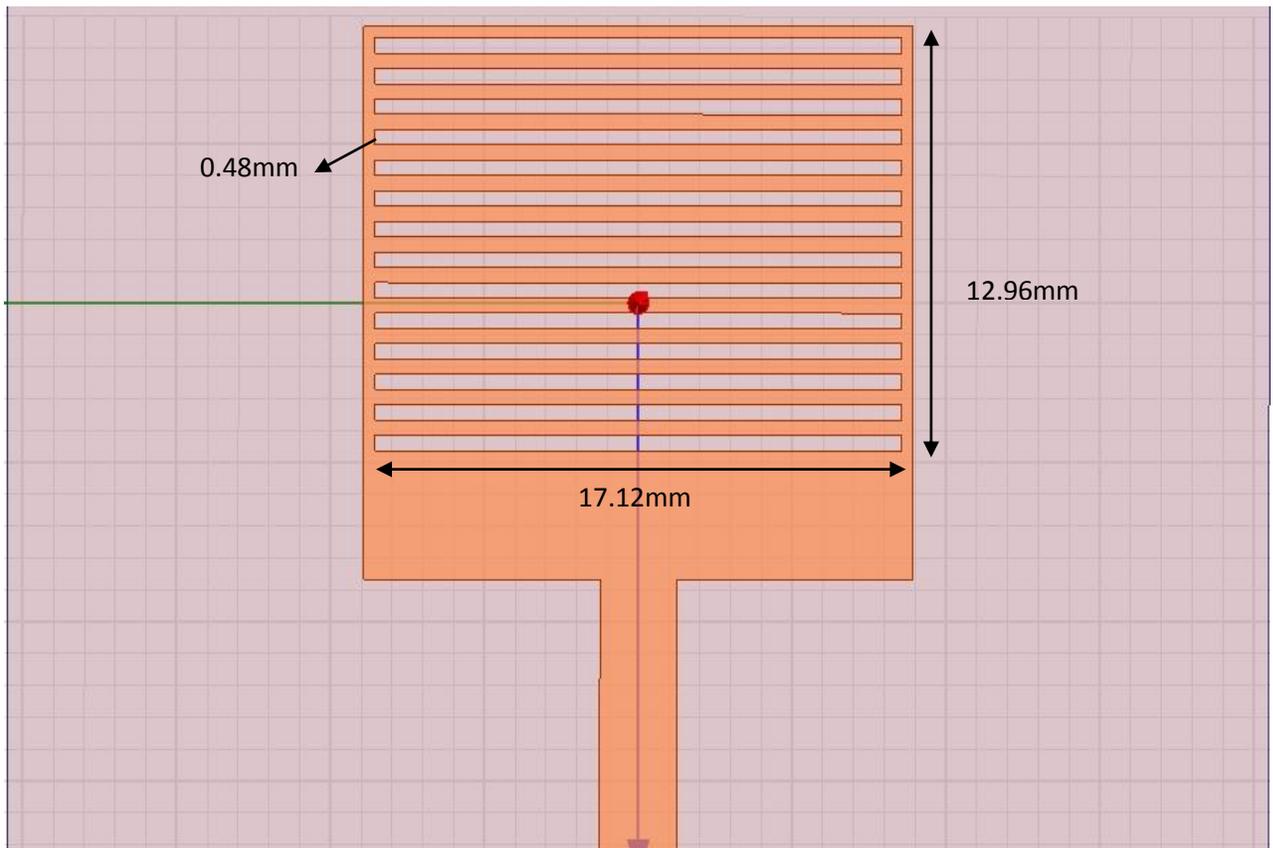


Ilustración 14. Antena patch con múltiples ranuras

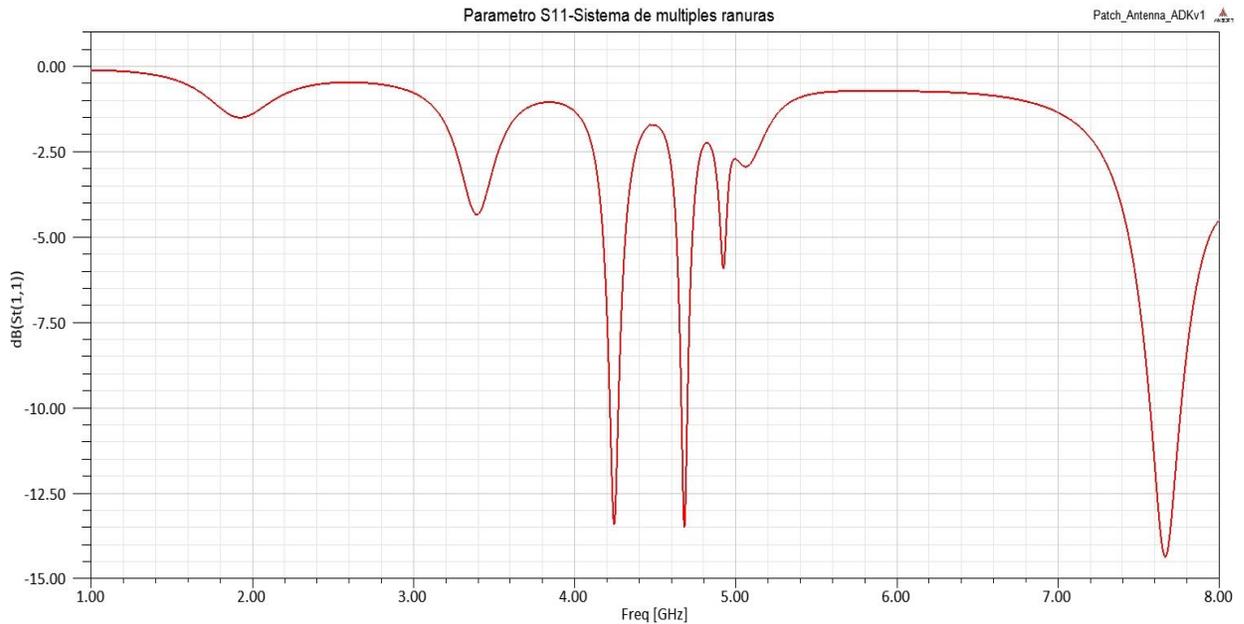


Ilustración 15. Parámetro S11 para el sistema de múltiples ranuras

Este sistema de múltiples ranuras posee una diferencia notable respecto a los sistemas planteados en base a la secuencia de cantor, la cual radica en que este sistema posee tres bandas de operación en 4.2GHz, 4.68GHz y 7.6GHz. Como se puede notar sus primeras dos bandas no se encuentran tan definidas, es decir lo suficientemente espaciadas, ocasionando anchos de banda demasiado estrechos, posibles interferencias y un bajo desempeño al tratar de usar ambas bandas.

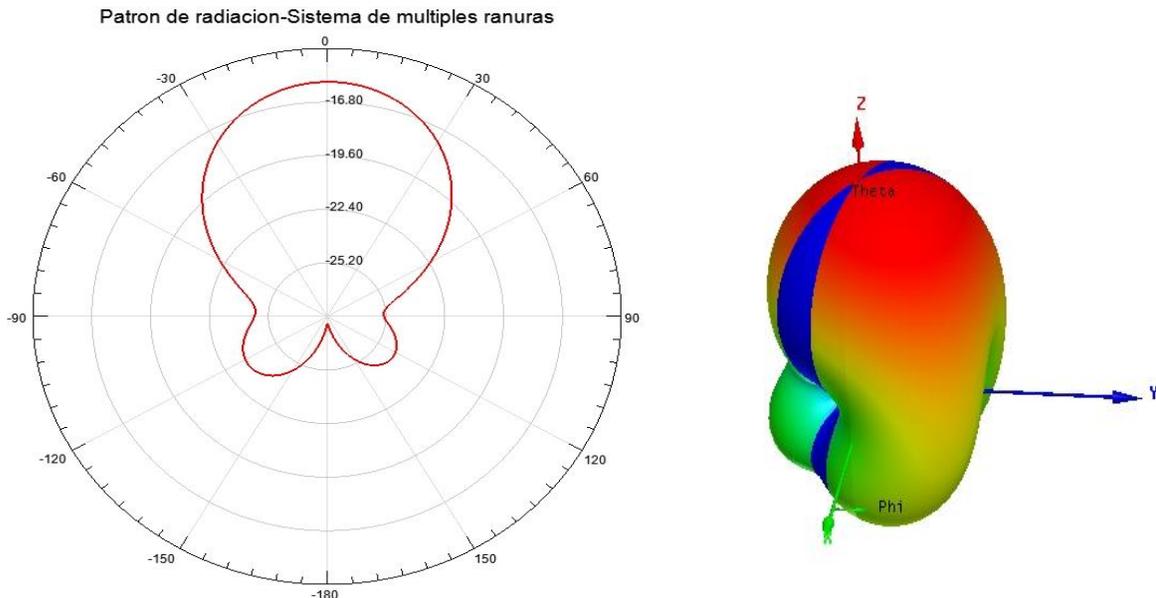


Ilustración 16. Patrón de radiación 2D y 3D sistema de múltiples ranuras

El patrón de radiación de nuevo muestra ser muy similar al de los anteriores diseños, con la variante de que el lóbulo posterior tiende a mostrarse más definido, pero de igual forma con poca radiación.

4.7. Reducción de tamaño

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la reducción del tamaño en este tipo de sistemas es de alta importancia para el desarrollo de las tecnologías en comunicación inalámbrica hoy en día; el sistema de antena patch planteado en este trabajo en cualquiera de las iteraciones de la secuencia de cantor permitió una reducción del tamaño en la antena patch de aproximadamente un 22%, respecto al sistema inicial (véase figura 1). Esto es debido a que el sistema con el que se inicio el trabajo posee una longitud de 17.37mm, y el sistema en base a cualquier orden de la secuencia de cantor ocupa una longitud de 13.68mm, permitiendo así reducir el tamaño total de la antena.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.8. Análisis general de resultados.

Como se ha podido evidenciar la inclusión de la secuencia de cantor sobre el sistema de antena patch planteado en este trabajo, principalmente permite que el sistema opere en dos bandas de frecuencia (Dual-Band), las cuales pertenecen a la banda SHF del espectro radioeléctrico y a su vez permite reducir el tamaño total del sistema en un 22%; a partir de estos resultados se puede hablar de optimización en el sistema en general debido a que la reducción del tamaño juega un papel muy importante en este tipo de sistemas que cada vez tienden a disminuir, y su operación dual-band aumenta la eficiencia y el número de aplicaciones donde podría funcionar. En base a los patrones de radiación se puede concluir que a medida que se adopta una nueva iteración en base a cantor, el desempeño del sistema no se ve disminuido de manera que afecte el rendimiento en general, estos patrones coinciden con los característicos para sistemas de antena patch rectangulares, en muchos casos los lóbulos laterales suelen representar radiación en direcciones no deseadas, por lo que respecto a los lóbulos posteriores de estos sistemas analizados se puede decir que pueden ser aplicables a sistemas de radar, ya que la disminución de estos lóbulos en este tipo de sistemas es de alta importancia debido a que reducen al mínimo las indicaciones de falsos destinos a través de estos lóbulos.

Respecto a las distintas combinaciones realizadas en base a esta secuencia, a partir de la segunda iteración, el comportamiento de los parámetros S_{11} muestra mucha similitud en las frecuencias de operación, la primera banda obtenida para la iteración de orden 1 correspondiente a 3.6GHz, también aparece en las iteraciones siguientes pero su potencia se ve disminuida considerablemente de manera que no es posible operar en esa frecuencia a partir de la iteración dos en adelante. Respecto a la segunda frecuencia de cantor orden 1 correspondiente a 7.3GHz, la cual a partir de la segunda iteración se ve levemente desplazada a 7.5GHz y se mantiene hasta la última iteración de orden cuatro, en el sistema de múltiples ranuras causa de nuevo un desplazamiento leve a 7.65GHz.

Respecto al sistema de múltiples ranuras este posee frecuencias de operación diferentes a las obtenidas en los modelos de cantor de orden 2,3, y 4. En la siguiente tabla se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

encuentra un consolidado de las frecuencias de operación de cada sistema, y el ancho de banda de cada uno de ellos.

	Cantor Orden 1	Cantor Orden 2	Cantor Orden 3	Cantor Orden 4	Múltiples Ranuras
Frecuencia Banda 1	3.6 GHz	4.5 GHz	4.5 GHz	4.5 GHz	4.2 GHz
Frecuencia Banda 2	7.3 GHz	7.5 GHz	7.56 GHz	7.6 GHz	4.68 GHz
Frecuencia Banda 3	NA	NA	NA	NA	7.6 GHz
Ancho De Banda primera banda	50 MHz	50 MHz	20 MHz	50 MHz	50 MHz
Ancho De Banda segunda banda	130 MHz	140 MHz	140 MHz	150 MHz	40 MHz
Ancho De Banda tercera banda	NA	NA	NA	NA	180 MHz

Tabla 3.Tabla de frecuencias y anchos de banda

En general se puede notar alta similitud entre las diferentes iteraciones respecto a los anchos de banda, los cuales para la primera banda de todos los sistemas tienden a permanecer constantes aproximadamente en 50 MHz, exceptuando el sistema de orden 3 que esta alrededor de los 20MHz; estos anchos de banda tienden a triplicarse para la segunda banda de cada sistema y se encuentran alrededor de los 150MHz, con la excepción del sistema de múltiples ranuras el cual sus dos primera bandas cuentan con casi el mismo ancho de banda.

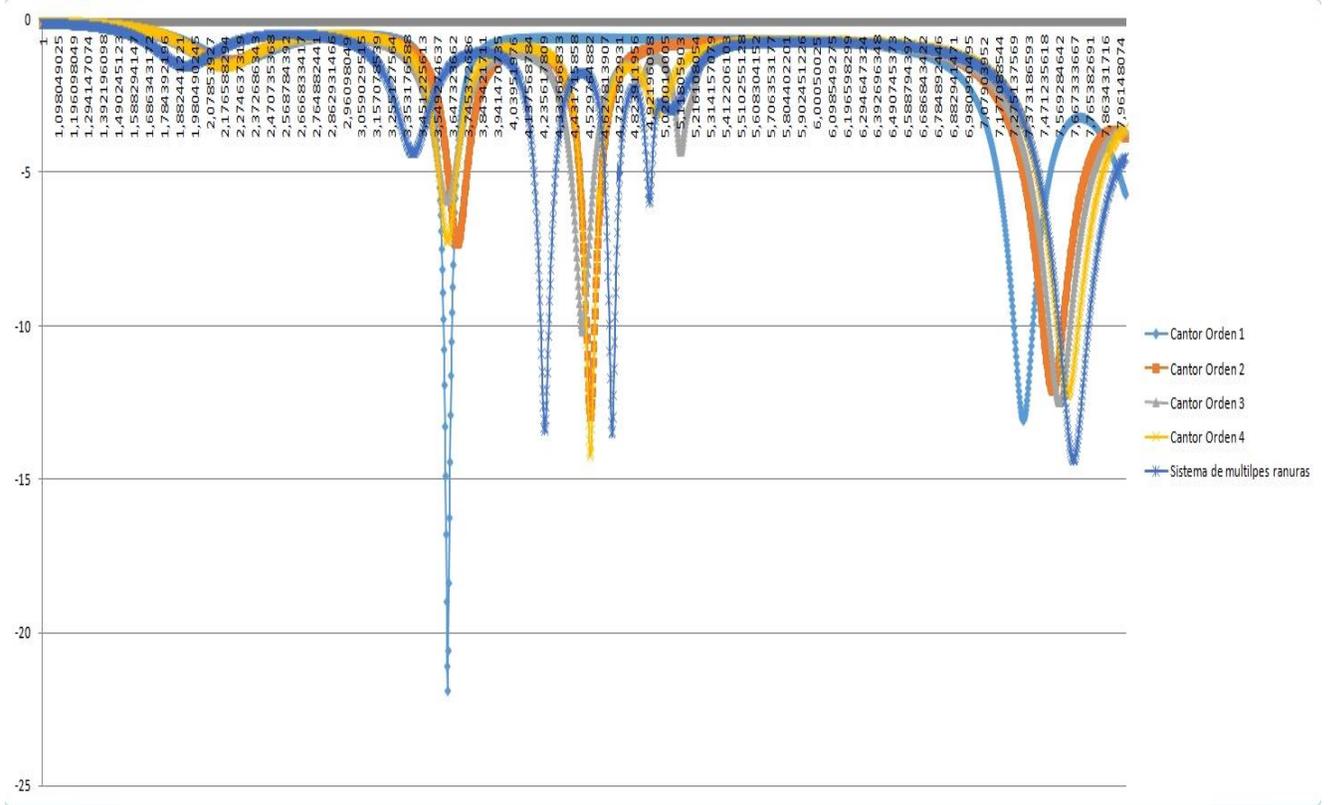


Ilustración 17. Relación entre parámetros S11

En la anterior imagen se puede apreciar las similitudes entre sistemas anteriormente mencionadas. En general estos sistemas en base a la secuencia de cantor pueden ser aplicables para aplicaciones de radiocomunicación por trayectoria directa o línea de vista, radares, sistemas satelitales en banda S y C, sistemas de microondas, sistemas WiMAX, y redes WLAN.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Varios modelos de antena patch con arreglos de múltiples ranuras separadas según la secuencia de cantor fueron planteados en este trabajo, en el cual se analizaron algunos parámetros característicos de estos sistemas como el S_{11} , frecuencias de operación, anchos de banda y tamaño, permitiendo así obtener mejoras en el desempeño del sistema, como la operación dual-band de cada uno de los sistemas planteados, y la reducción de la antena involucrada en un 22% respecto al sistema inicial, las diferentes iteraciones de la secuencia de cantor realizadas en este trabajo poseen mucha similitud entre si, por lo que los sistemas de orden 2,3 y 4 pueden servir a aplicaciones inalámbricas en común.

Se realiza el modelado del sistema de antena patch con la inclusión de la secuencia de cantor mediante el software Ansoft HFSS 14.0, por lo que fueron planteadas varias simulaciones en base a cada iteración de esta secuencia, y se analizo hasta la cuarta combinación debido a la limitante en la posible fabricación de alguno de los modelos. Mediante estas simulaciones fue posible determinar que la distribución de múltiples ranuras sobre la patch en base a la secuencia de cantor ocasiona que el sistema sea dual-band, en cualquiera de sus combinaciones.

Mediante el parámetro S_{11} obtenido de las diferentes simulaciones fue posible establecer en que bandas de frecuencia puede operar cada modelo de la secuencia de cantor en una antena patch, teniendo como factor común que todas operan en la banda SHF (Frecuencia súper alta) del espectro radioeléctrico que va de 3GHz a 30GHz, de manera que se abre el campo de investigación respecto a estos sistemas y su aplicación en sistemas de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

comunicación inalámbrica por microondas, radares, y sistemas satelitales. Por otro lado al establecer la secuencia de cantor de orden 1, se pudo determinar que tanto se puede reducir el espacio en la antena debido a que estas ranuras ubicadas en la antena son las de mayor tamaño (4.32mm), a partir de orden uno en adelante el tamaño de las ranuras disminuye por lo que se mantiene el tamaño del sistema en general.

Los sistemas en base a la secuencia de cantor planteados en este trabajo permiten la operación de la antena en múltiples bandas de frecuencia, a diferencia de los sistemas de antena patch convencionales que no incluyen sistemas de múltiple ranura espaciadas según la secuencia de cantor, y que operan en una sola banda.

Respecto al sistema de múltiples ranuras, este posee una banda de operación más que los sistemas en base a la secuencia de cantor, con la variante de que sus primeras bandas se encuentran demasiado cerca lo que ocasiona anchos de banda demasiado angostos, y posible disminución de desempeño en esas bandas.

En muchos casos se ha demostrado que el cambio en las permitividades y coeficientes de reflexión de los materiales pueden modificar o permiten moldear los patrones de radiación de este tipo de antenas, por lo que es recomendable tener en consideración el cambio de materiales utilizados y la exploración de nuevos materiales con distintas permitividades con el objetivo de determinar hasta qué punto se puede mejorar el desempeño del sistema, o en caso contrario la pérdida de desempeño al variar estos parámetros.

Es posible que los sistemas en base a la secuencia de cantor presenten picos de radiación a frecuencias superiores a 8GHz o menores a 1GHz, por lo que en investigaciones futuras se puede realizar un barrido para el análisis de frecuencia más amplio.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Inicialmente el trabajo futuro puede apuntar a la construcción de estos sistemas en base a la secuencia de cantor así como determinar con pruebas de campo la aplicación de cada sistema y la diferencia real entre cada antena. Por otro lado se abre el campo de investigación en sistemas con arreglos de antenas patch en base a la secuencia de cantor, debido a que los arreglos de antenas generalmente pueden optimizar o mejorar aspectos de desempeño.

Actualmente el campo de investigación en este tipo de sistemas es amplio debido a la necesidad de miniaturización de los sistemas de comunicación inalámbrica y el incremento en su desempeño, por lo que las bases de este trabajo abren el campo en investigaciones para el uso de antenas patch diseñadas en base a la secuencia de cantor como filtros, y sensores, así como el cambio en su desempeño según el uso de distintos sustratos, y otros materiales en general.

Una nueva alternativa para el diseño de estos sistemas es realizar el modelo negativo del planteado en este proyecto, es decir al realizar las iteraciones de la secuencia de cantor, considerar como ranuras los tercios centrales y llenar de cobre los tercios externos y así analizar los cambios del sistema.

Finalmente otro modelo en base a la secuencia de cantor se puede realizar variando el ancho de una ranura inicial, y a partir de estas iterar hasta cierto punto y poder determinar la eficiencia de este arreglo y las bondades que puede aportar en frecuencias de operación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov 1999.

Yoonjae Lee, S. Tse, Yang Hao and C. G. Parini, "A compact microstrip antenna with improved bandwidth using Complementary Split-Ring Resonator (CSRR) loading," *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Honolulu, HI, 2007, pp. 5431-5434.

H. A. Jang; D. O. Kim; C. Y. Kim; "Size reduction of patch antenna array using CSRRs loaded ground plane," in *Proc. Progress Electromagn. Res. Symp.*, KL, Malaysia, pp. 1487–1489, 2012.

Bhad, M. C., Kasabegoudar, V. G., & Rodge, M. P. (2013). Electrically Small Rectangular Patch Antenna with Slot for MIMO Applications. *Wireless and Mobile Technologies*, 1(1), 25-28.

Kin-Lu Wong and Jian-Yi Wu, "Single-feed small circularly polarised square microstrip antenna," in *Electronics Letters*, vol. 33, no. 22, pp. 1833-1834, 23 Oct 1997.

S. Lee, J. Woo, M. Ryu and H. Shin, "Corrugated circular microstrip patch antennas for miniaturisation," in *Electronics Letters*, vol. 38, no. 6, pp. 262-263, 14 Mar 2002.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

S. I. Hussain Shah, S. Bashir and A. Altaf, "Miniaturization of microstrip patch antenna by using various shaped slots for wireless communication systems," *2014 XIXth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*, Tbilisi, 2014, pp. 92-95.

Jena, M. R., Mangaraj, B. , & Pathak, R. (2014). "An Improved Compact & Multiband Fractal Antenna Using the Koch Curve Geometry. " *Wireless and Mobile Technologies*,2(1), 1-6.

S. Shrestha, Jung-Jin Park, Sun-Kuk Noh and Dong-You Choi, "Design of 2.45 GHz Sierpinski fractal based miniaturized microstrip patch antenna," *2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Jeju Island, 2012, pp. 36-41.

M. Ram, S. Das and R. L. Yadava, "A hexagonal multiband fractal patch antenna," *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver, BC, 2015, pp. 840-841.

B. Manimegalai, S. Raju and V. Abhaikumar, "A Multifractal Cantor Antenna for Multiband Wireless Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, no. , pp. 359-362, 2009.

Z. Y. Xiao, Z. H. Wang, H. H. Hu and S. Gao, "Novel microstrip band pass filter with substrates of fractal Cantor distribution," *Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008. ICMWT 2008. International Conference on*, Nanjing, 2008, pp. 1554-1556.

Y. K. Choukiker and S. K. Behera, "Design of wideband fractal antenna with combination of fractal geometries," *Information, Communications and Signal Processing (ICICS) 2011 8th International Conference on*, Singapore, 2011, pp. 1-3.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Y. Li, W. Li, C. Liu and T. Jiang, "A printed diversity Cantor set fractal antenna for ultra wideband communication applications," *Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), 2012 10th International Symposium on*, Xian, 2012, pp. 34-38.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE

Los apéndices deben ser nombrados con letras para diferenciarse unos de otros (p. ej: Apéndice A, Apéndice B, etc.). Estos hacen extensiva la información del contenido del trabajo realizado tales como cálculos matemáticos extensos, códigos de programación, etc. El contenido de los apéndices debe permitir a alguien externo al desarrollo del trabajo, llegar a los mismos resultados siguiendo la misma metodología complementada con la información que en este aparte reposa.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES	<u>Andrés Hernández</u>

FIRMA ASESOR	
	FECHA ENTREGA: <u>24/06/2016</u>

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____
RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____