



Antena UHF multifuncional del tipo fractal microstrip basada en la alfombra de Sierpinski

UHF multifunctional fractal microstrip antenna based on the Sierpinski carpet

Pablo Lupera Morillo

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
pablo.lupera@epn.edu.ec
ORCID: 0000-0002-0416-4980

Gary Flores

Observatorio Astronómico de Quito, Quito, Ecuador
gary.flores@epn.edu.ec
ORCID: 0000-0003-3815-7866

Amanda Montaluisa

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
amanda.montaluisa@epn.edu.ec
ORCID: 0000-0001-8264-574X

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.09.17.002>

Recibido: Octubre 19, 2020

Aceptado: Enero 12, 2021

Resumen: El uso de dispositivos multifuncionales aumenta día a día. Los dispositivos mencionados, como la televisión inteligente, necesitan antenas apropiadas y unificadas que puedan satisfacer las frecuencias requeridas. Por lo tanto, en este documento, se diseña y fabrica una antena fractal del tipo microstrip en base a la alfombra de Sierpinski en la segunda iteración para la recepción simultánea de señales de redes inalámbricas de banda ancha y de TV digital en la banda UHF. Se verificó que el diseño de una antena fractal basada en la alfombra de Sierpinski es posible a partir de un parche rectangular en la iteración 0; sin embargo, debe tenerse en cuenta que el diseño del parche debe realizarse a una frecuencia de resonancia específica. La simulación se llevó a cabo utilizando el simulador ADS, y para las mediciones se utilizó un analizador vectorial de red. La antena fractal obtenida opera en el rango de TV digital UHF de 470 MHz a 683 MHz y en el rango de 2,45 GHz a 2,4835 GHz para la red de área local inalámbrica de banda ancha.

Palabras clave: Antena Fractal, Alfombra de Sierpinski, Antena UHF.

Abstract: The use of multifunctional devices increases day by day. Mentioned devices, as smart tv, need appropriate and unified antennas which can meet required frequencies. Therefore, in this paper, a Sierpinski carpet microstrip fractal antenna in the second iteration is designed and fabricated for Digital Tv in UHF band and wireless wideband networks. It was verified that that the design of a fractal antenna based on the Sierpinski carpet is possible from a rectangular patch on iteration 0; however, it must be taken into account that the patch

design must be carried out at a specific resonance frequency. Simulation is carried out using ADS simulator, and it was verified using a vector network analyzer. The proposed fractal antenna operates in the UHF digital TV range from 470 MHz to 683 MHz and in the 2.45 GHz to 2.4835 GHz range of broadband wireless local area network.

Keywords: *Fractal Antenna, Sierpinski Carpet, UHF Antenna.*

1. Introducción

El continuo avance tecnológico y el apareamiento de nuevos dispositivos de comunicaciones requieren de innovadores modelos de antenas que se puedan utilizar simultáneamente para la recepción de señales de diferentes tecnologías, ya que cada una de ellas funciona en su correspondiente banda de frecuencia. A este tipo de dispositivos se los conoce como los multifuncionales, como por ejemplo, los televisores inteligentes modernos que permiten simultáneamente la recepción de señales de TV (televisión) digital en la banda UHF (*ultra high frequency*) y la conexión a redes inalámbricas Wifi (*wireless fidelity*). Por esto, surge la necesidad de disponer de sistemas de antenas que puedan ser utilizados en los dispositivos multifuncionales. Se han propuesto formas de antenas con respuesta similar en diferentes bandas de frecuencia, entre estos tipos de antenas se destacan las antenas fractales que presentan diferentes formas.

En el presente documento se describe el diseño de una antena fractal basada en la alfombra de Sierpinski para la banda de frecuencia de TV digital UHF y para las bandas de las redes inalámbricas en 2,4GHz. A partir de lo anterior, se construirá la antena fractal en microstrip y se realizarán las mediciones para verificar sus características eléctricas y de radiación, como: la ganancia, el patrón de radiación y el VSWR (*voltage standing wave ratio*).

El artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera, en la Sección 2 se presentan las principales características de una antena fractal del tipo microstrip, en la Sección 3 se diseña la antena hasta la segunda iteración, en la Sección 4 se presenta la simulación, en la Sección 5 se encuentran las mediciones de los parámetros eléctricos y de radiación de la antena, y finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones del artículo.

2. Estado del arte

S. Suvarna y V. Saneesh simularon en [1] una antena fractal *microstrip* alfombra de Sierpinski hasta la tercera iteración con línea de alimentación y plano de tierra que fue diseñada a la frecuencia central de 2,4 GHz y comprobaron su característica multibanda. Obtuvieron que hasta la tercera iteración la ganancia de la antena está en el orden de los 3,1 dBi y su lóbulo de radiación es directivo con un ángulo del lóbulo de radiación principal de aproximadamente 70°.

H. Sudhina *et al.* [2] propusieron el desarrollo de una antena prototipo *microstrip* con la forma de la alfombra de Sierpinski hasta la tercera iteración para mejorar el ancho de banda usando la técnica de apilamiento con alimentación Stripline. De acuerdo a la simulación y las mediciones se observa que, la antena tiene frecuencias de resonancia en la banda de 2 a 14 GHz, y que al aumentar el número de iteración existe una desviación de las frecuencias de resonancia con respecto a la iteración anterior, además, el ancho de banda aumenta al incrementar el número de la iteración.

M.Ranjan *et al.* presentaron en [3] el desarrollo de una antena multibanda basada en la alfombra de Sierpinski hasta la tercera iteración para mejorar el ancho de banda y la ganancia de aplicaciones microondas. Las simulaciones presentadas indican que los niveles de acoplamiento son adecuados con una pérdida de retorno mejor que 15 dB, VSWR menor a 1,3, con ganancia en el orden de los 6 dBi y los lóbulos de radiación tienden a ser más uniformes a las frecuencias de resonancia más altas.

Mohan Lal en [4] describe el diseño de una antena fractal basada en la alfombra de Sierpinski hasta la tercera iteración con alimentación de línea microstrip insertada para la frecuencia de 2,55 GHz. Los resultados de la simulación muestran que se tiene un mejor acoplamiento y ganancias altas en las frecuencias superiores de resonancia, es decir entre los 5 y 8 GHz.

Un objeto o antena fractal se construye con la aplicación de un algoritmo iterativo [5]. En el proceso iterativo la forma inicial se llama generador, la cual en cada una de las etapas del proceso se replica en diferentes

escalas, posiciones y/o direcciones para la obtención de la estructura fractal final [6]. De acuerdo al B. Mandelbrot en [7], un objeto fractal es aquel de forma irregular que se compone del mismo objeto a diferentes escalas. Este concepto, al aplicarse en el ámbito de las antenas, permite que estos elementos sean del tipo multibanda, es decir que pueden operar simultáneamente en diferentes bandas de frecuencia con propiedades muy similares.

En [5] se presentan las diferentes formas fractales clásicas que se han utilizado en la construcción de antenas, como son: el conjunto de Cantor [8], el triángulo de Sierpinski [6], la alfombra de Sierpinski [9], el triángulo de Pascal [10], la curva de Koch [11], entre otras. Todos estos tipos de antenas poseen un comportamiento multibanda, sin embargo, por sus geometrías particulares tienen sus métodos específicos de diseño, como también presentan sus propias características eléctricas y de radiación.

Uno de los parámetros que describe a esta clase de formas es su dimensión fraccionaria o nivel de fracturación [11], que se puede determinar con la Ecuación (1).

$$D_H = \frac{\text{Log } N}{\text{Log} \left(\frac{1}{\gamma} \right)} \quad (1)$$

En donde N representa el número de copias presentes y γ es el factor de escala o relación de similitud. En el caso de la alfombra de Sierpinski en su segunda iteración el resultado es de aproximadamente 1,897. Por esto, a pesar de que el valor es cercano a 2, la alfombra de Sierpinski no se considera como una estructura plana o bidimensional.

Las antenas microstrip, por su parte, tienen las siguientes ventajas: peso ligero, volumen reducido y bajo costo [12]. La estructura de una antena microstrip consiste básicamente en una antena plana o radiador grabado sobre la superficie de un sustrato dieléctrico con un plano de tierra [12].

El funcionamiento de una antena microstrip depende de las dimensiones del elemento radiante, de las características físicas y eléctricas del sustrato, entre las cuales se encuentran el grosor h y la permitividad relativa ϵ_r y del tipo de plano de tierra empleado [12], [13].

Se ha propuesto una variedad de antenas microstrip, una de las más comunes es la antena tipo parche, en la cual tanto su línea de transmisión como su elemento radiante son impresas sobre el sustrato dieléctrico. El parche puede tener diferentes formas, entre las más conocidas están la rectangular, cuadrada, triangular y circular [12].

3. Materiales y métodos

El matemático polaco Waclaw Sierpinski introdujo por primera vez la alfombra de Sierpinski en 1916 [5]. En nuestro trabajo para el diseño de la antena se parte del parche rectangular, que constituye la iteración 0 de la antena fractal. A partir de dicho elemento se aplica el proceso iterativo hasta la segunda iteración para obtener la antena final.

3.1. Antena fractal en la iteración 0

Como se indicó anteriormente, se requiere el diseño de una antena que opere a la frecuencia UHF de las señales de TV digital y en la banda de 2,4 GHz de las redes inalámbricas. Ya que, de acuerdo a los estudios previos y a nuestros experimentos, se observa que existe un corrimiento de la frecuencia de resonancia f_r al aumentar el número de la iteración de la antena. Por esto, en el presente trabajo se propone el diseño del parche rectangular o iteración 0 de la antena fractal a la frecuencia de 470 MHz en el sustrato FR-4 con grosor de 1,5 mm y un espesor del material conductor cobre de 17 μm . El diseño consiste en dimensionar el ancho W y el largo L del parche de la siguiente manera [12], cabe mencionar, que en la antena propuesta no se tiene plano de tierra en la cara opuesta a la del elemento radiante.

Se calcula el ancho del parche (W) utilizando la ecuación (2).

$$W = \frac{1}{2f_r * \sqrt{u_0 * \epsilon_0}} * \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f * \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2)$$

Donde c , es la velocidad de propagación de la luz en el vacío; ϵ_0 , es la permitividad del aire o constante dieléctrica, y u_0 , es la permeabilidad del vacío o constante magnética.

Se obtiene la permitividad eléctrica efectiva mediante (3):

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right) \quad (3)$$

Previo al cálculo de la longitud real del parche, se obtiene la longitud ΔL , que se calcula con (4):

$$\Delta L = 0,412 h \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (4)$$

A continuación, se determina la longitud efectiva del parche L_{eff} con la aplicación de la ecuación (5) y finalmente, se determina la longitud del parche con (6):

$$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5)$$

$$L = L_{eff} - 2 \Delta L \quad (6)$$

3.2 Antena fractal en las iteraciones 1 y 2

El proceso para la generación de la alfombra de Sierpinski en la iteración 1 consiste en dividir el rectángulo inicial o de iteración 0 en nueve cuadrados exactamente iguales y procede a descartar el central. A continuación, en la iteración 2, los ocho rectángulos restantes se dividen nuevamente en nueve rectángulos idénticos y se vuelven a eliminar los del centro. El proceso mencionado se muestra en la Fig.1.

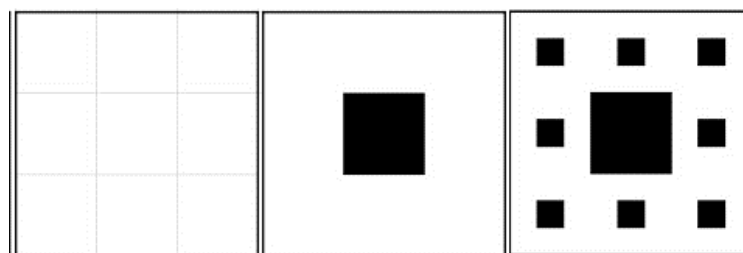


Figura 1. Generación de la alfombra de Sierpinski, de izquierda a derecha, iteración 0, 1 y 2 respectivamente.

La representación de las dimensiones de la antena fractal final se muestran en la Fig. 2 y sus valores en la Tabla 1. En la misma figura se observa que el procedimiento se puede extender indefinidamente.

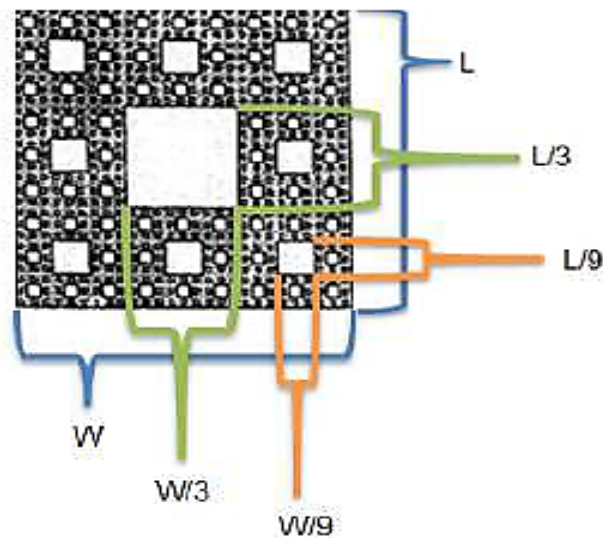


Figura 2. Representación de las dimensiones de la antena fractal hasta la iteración 2.

Tabla 1. Dimensiones de la antena fractal hasta la iteración 2. Fuente: Elaboración propia.

Iteración	0		1		2	
Medidas	W [mm]	L [mm]	W/3 [mm]	L/3 [mm]	W/9 [mm]	L/9 [mm]
	194,22	152,04	64,74	50,68	21,58	16,89

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la simulación y las mediciones para evaluar el desempeño de la antena.

4.1. Simulación de la antena

La simulación de la antena fractal se realiza con el software *Advanced Design System*, ADS, en un ambiente que consta de aire-sustratoFR4-aire. El rango de simulación considerado es de 0 a 3 GHz y los valores de referencia para el parámetro S11 es de -10dB. La simulación se aprovecha para verificar el comportamiento de la antena, ubicando el puerto de alimentación en distintas posiciones del ancho, W, como se muestra en la Fig. 3. El objetivo es verificar la influencia de esta variación en los parámetros eléctricos y de radiación de la antena fractal.

De la simulación se observa que los puertos de alimentación 2 y 4 se ajustan de mejor manera a las frecuencias de resonancia y anchos de banda requeridos. A continuación, se muestran los resultados de la simulación para el puerto de alimentación 2.

En la Fig. 4 se presenta el parámetro S11 con puerto 2 de alimentación, donde se pueden visualizar las frecuencias de resonancia y los anchos de banda.

De la Fig. 4 se observa que la antena fractal simulada con puerto de alimentación 2, en su primera frecuencia de resonancia tiene un ancho de banda de 432 MHz, que va desde 450 MHz hasta 882 MHz con un valor máximo de VSWR de 1,924. Dicho ancho de banda abarca totalmente el rango UHF utilizado para la transmisión de señales de televisión digital de 470 MHz a 698 MHz [14]. La misma antena, tiene una segunda frecuencia de resonancia en 1,788 GHz con un ancho de banda que va desde 1,499 GHz a 1,788 GHz. En cambio, su tercera frecuencia de resonancia se encuentra en el rango de 2,417 GHz a 2,858 GHz que abarca una parte significativa del espectro asignado a las redes radioeléctricas de área local de banda ancha [15].

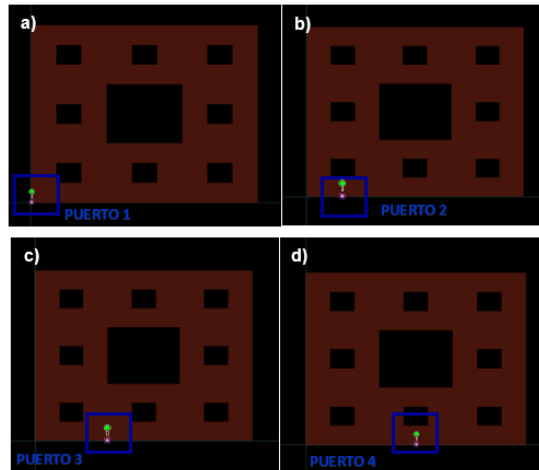


Figura 3. Variación del puerto de alimentación de la antena fractal diseñada: a) Puerto 1 (extremo izquierdo de la antena), b) Puerto 2 (lado izquierdo 1 de la antena), c) Puerto 3 (lado izquierdo 2 de la antena) y d) Puerto 4 (centro del ancho de la antena).

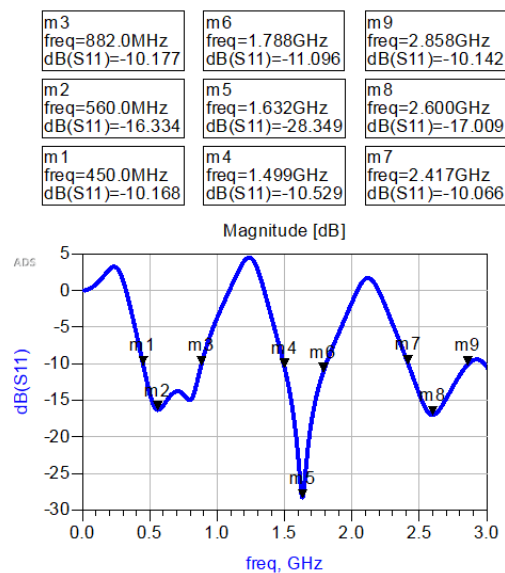


Figura 4. Parámetro S11 de la antena fractal alfombra de Sierpinski con alimentación en el puerto 2.

En la Fig. 5 se presenta la ganancia de la antena con puerto de alimentación 2 en el rango de la primera frecuencia de resonancia, se observa que en dicho rango la ganancia va desde 2,565 a la frecuencia inferior, alcanza un valor de 3,064 a la frecuencia de resonancia y llega al valor de 4,435 a la frecuencia superior.

En la Fig. 6 se muestra que el diagrama de radiación de la antena con puerto 2 de alimentación se aproxima a ser omnidireccional. En la Fig. 7 se puede visualizar la distribución de la corriente en la misma antena; se puede decir que se tiene una distribución uniforme de la corriente.

De las simulaciones de una misma antena se observa que las características eléctricas y de radiación son muy similares para las demás frecuencias de resonancia.

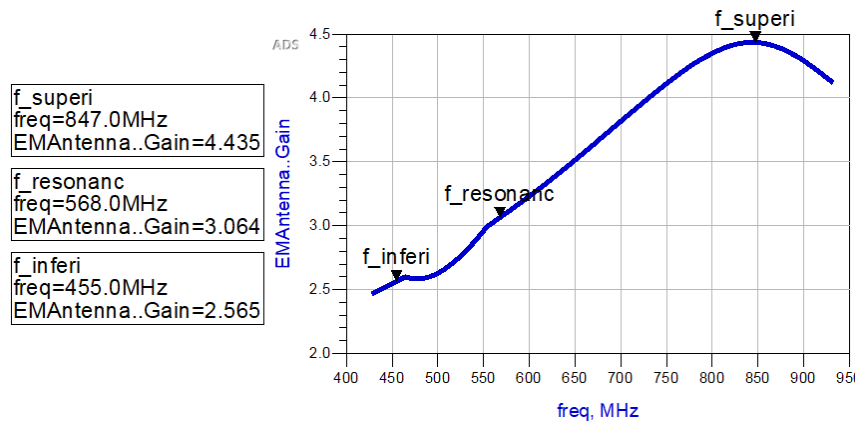


Figura 5. Ganancia de la antena con puerto de alimentación 2 en función de la frecuencia en el rango de la primera frecuencia de resonancia.

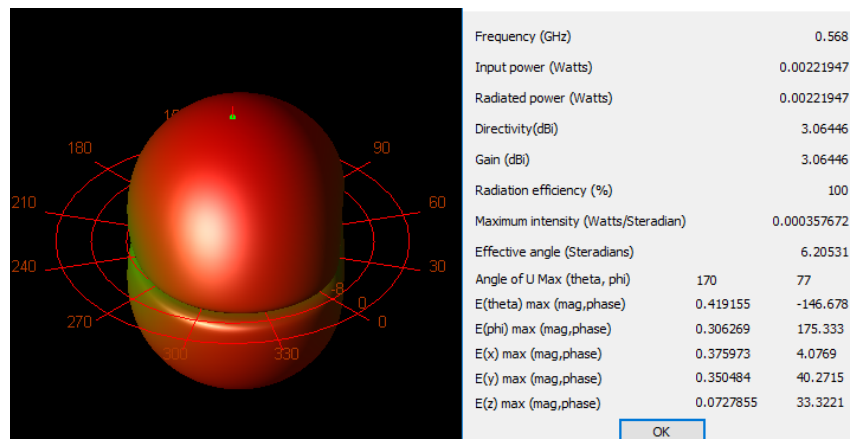


Figura 6. Diagrama de radiación en 3D de la antena fractal alfombra de Sierpinski en la segunda iteración con puerto de alimentación 2 a la primera frecuencia de resonancia.

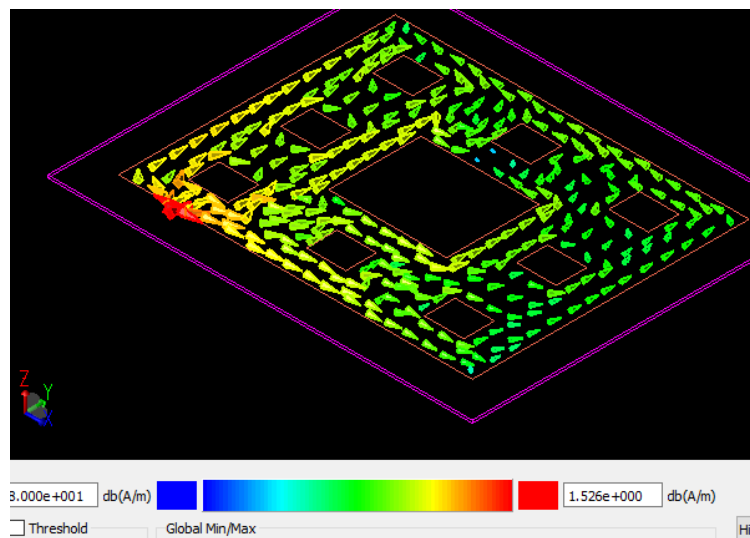


Figura 7. Distribución de la corriente en la antena fractal alfombra de Sierpinski con puerto de alimentación 2 para la primera frecuencia de resonancia.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados de la simulación considerando los diferentes puertos de alimentación. Se incluyen los valores de las frecuencias de resonancia con sus respectivos valores de S11, ancho de banda, impedancia y ganancia.

Tabla 2. Valores de los parámetros S11, ancho de banda, impedancia y ganancia a las frecuencias de resonancia para los puertos de alimentación 4, 3, 2, 1. Fuente: Elaboración propia.

Alimentación	Frecuencia de resonancia	S11 [dB]	Ancho de banda [MHz]	Impedancia [Ohms]	Ganancia [dBi]	
Puerto 4	f1	655 MHz	-20,322	259	62,054+j2,627	3,587
	f2	1,218 GHz	-13,472	275	95,909+j30,288	4,656
	f3	2,159 GHz	-14,622	702	55,602+j14,829	4,592
Puerto 3	f1	618 MHz	-33,783	422	71,994+j0,076	3,315
	f2	1,316 GHz	-11,633	97	43,859-j0,550	4,933
	f3	1,918 GHz	-12,246	320	117,565+j20,599	5,251
Puerto 2	f1	560 MHz	-16,334	432	101,953+j1,238	3,064
	f2	1,632 GHz	-28,349	289	80,98-j0,261	6
	f3	2,6 GHz	-17,009	441	94,355-j14,37	6,769
Puerto 1	f1	732 MHz	-20,18	348	90,975-j30,25	4,223
	f2	1,649 GHz	-12,735	570	102-j31,455	5,3635
	f3	2,327 GHz	-29,008	812	75,389-j5,320	6,533

De los resultados de la simulación en el rango de 0 a 3 GHz y presentados en la Tabla 2 se puede destacar lo siguiente:

- Independientemente del puerto de alimentación, todas las antenas fractales basadas en la alfombra de Sierpinski en su segunda iteración tienen 3 frecuencias de resonancia, es decir, las antenas cumplen con la característica multibanda de la teoría fractal.
- El puerto de alimentación influye en las frecuencias de resonancia, en el acoplamiento y en el ancho de banda de la antena.
- En cada puerto de alimentación, la ganancia aumenta a las frecuencias de resonancia superiores,
- El nivel de acoplamiento depende de la frecuencia de resonancia.

En resumen, se puede concluir que la antena fractal con el puerto 2 de alimentación se ajusta de mejor manera al rango de operación UHF de la televisión digital terrestre y a la banda de 2,4 GHz de las redes radioeléctricas de área local de banda ancha en lo que respecta a ancho de banda, acoplamiento y niveles de ganancia.

4.2. Mediciones de la Antena Construida

Para complementar lo obtenido en la simulación se construyeron dos antenas con los puertos de alimentación 2 y 4 y se las identifica de acuerdo a lo indicado en la Tabla 3. Las antenas se construyeron del tipo *microstrip* en el sustrato FR-4 y los elementos obtenidos se muestran en la Fig. 8. Las mediciones se obtuvieron con el analizador vectorial de redes marca Keysight modelo FieldFox RF Analyzer N9914A.

Tabla 3. Nomenclatura de las antenas fractales construidas. Fuente: Elaboración propia.

Nombre de la Antena	Abreviación	Ubicación del Puerto de alimentación
Antena fractal puerto de alimentación 4	AFPA4	Mitad de la antena fractal
Antena fractal puerto de alimentación 2	AFPA2	Lado izquierdo de la antena fractal

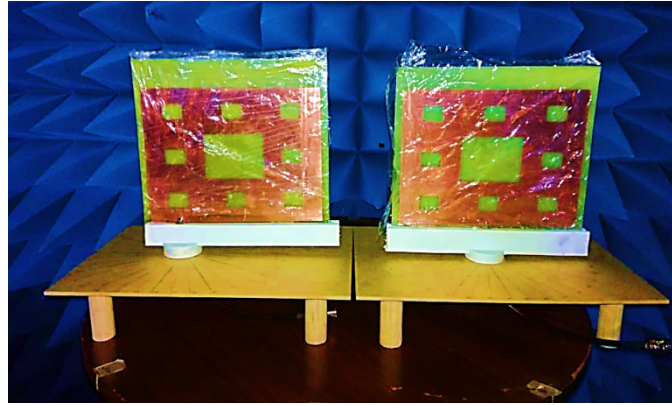


Figura 8. Antenas fractales alfombra de Sierpinski construidas con el puerto 2 de alimentación en el lado izquierdo (AFPA2) y con el puerto 4 en el centro de la antena (AFPA4).

4.3. Mediciones del parámetro S11, VSWR e impedancia de entrada.

En las Fig. 9, Fig. 10 y Fig. 11 se presentan los resultados de las mediciones de los parámetros S11, VSWR e impedancia de entrada de la antena con el puerto de alimentación 2 (AFPA2).

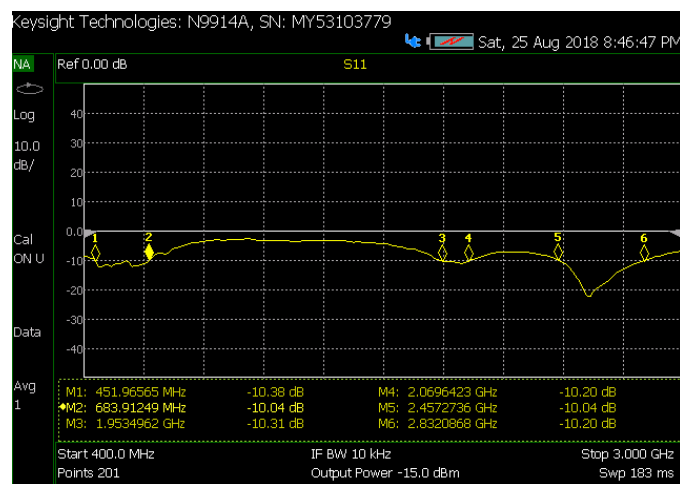


Figura 9. Parámetro S11 medido de la antena fractal alfombra de Sierpinski con puerto de alimentación 2.

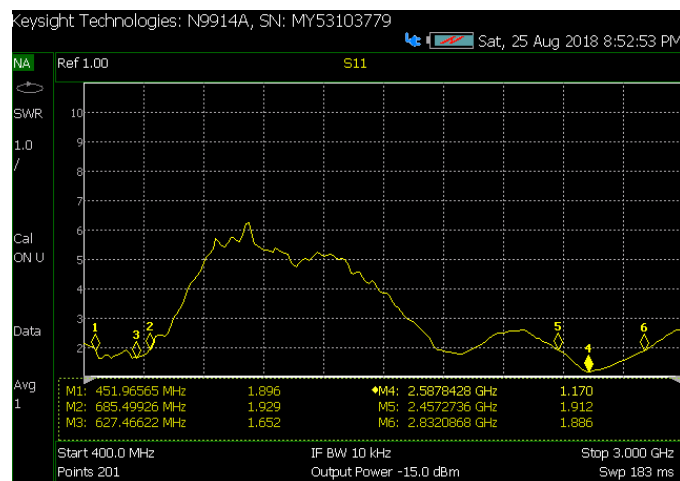


Figura 10. Mediciones del VSWR de la antena fractal alfombra de Sierpinski con puerto de alimentación 2.

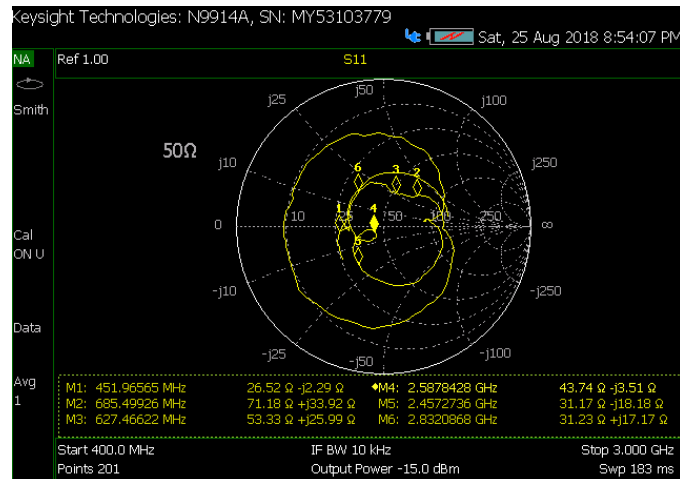


Figura 11. Mediciones de la impedancia de entrada de la antena fractal alfombra de Sierpinski con puerto de alimentación 2.

De la Fig. 9 se observa que el primer rango de operación se encuentra entre las frecuencias de 451 MHz a 683 MHz, el segundo de 1,95 GHz a 2,06 GHz y el tercer rango de operación inicia en la frecuencia de 2,45 GHz y llega hasta 2,83 GHz. Se observa que existe una variación entre los resultados de la simulación y la medición, sin embargo, en los dos rangos de interés la variación no es significativa. Se debe subrayar que la antena fractal propuesta opera en el rango UHF de TV digital de 470 MHz a 683 MHz y en el rango de 2,45 GHz a 2,4835 GHz de las redes inalámbricas de área local de banda ancha.

De la Fig. 10 se observa que, en el rango de operación de TV digital, el menor valor de VSWR es de 1,65 y para las frecuencias de la red inalámbrica el menor valor de VSWR es de 1,17.

La impedancia de entrada de la antena varía de acuerdo a la frecuencia. Dentro de los rangos de interés se obtuvo un valor de 53,33+j25,99 Ω a la frecuencia de 627,46 MHz y 43,74-j3,51 Ω a la frecuencia de 2,587 GHz de acuerdo a la Fig. 11.

Un resumen de las mediciones de S11, VSWR e impedancia de entrada de las antenas con puerto de alimentación 4 (AFPA4) y con puerto de alimentación 2 (AFPA2) se presenta en la Tabla 4, de ella se puede deducir que la antena construida que mejor se ajusta al rango de frecuencias requerido es la antena fractal basada en la alfombra de Sierpinski con puerto de alimentación 2 (AFPA2).

Tabla 4. Mediciones de los parámetros s11, banda de operación, ancho de banda, VSWR e impedancia de las antenas AFPA4 y AFPA2. Fuente: Elaboración propia.

Antena Fractal alfombra de Sierpinski	Frecuencia de resonancia	f [MHz]	S11 [dB]	Banda de operación [MHz]	Ancho de Banda [MHz]	VSWR [Veces]	Z in [Ω]
AFP A4	1	700,49	-38,55	608,70-758,03	149,33	1,035	49,25+j0,31
	2	1201	-21,22	1120-1266	146	1,191	58,51-j0,61
	3	1699	-24,4	1619-1880	261	1,128	44,34-j0,17
	4	2314	-23,31	2210-2370	160	1,148	50,34+j5,98
	5	2766	-30,55	2760-2980	220	1,061	47,68-j1,49
AFP A2	1	627,4	-12,18	451-683	232	1,652	53,33+j25,99
	2	2000	-10,2	1950-2060	110	1,6	92,72+j11,10
	3	2587	-22,12	2457-2830	373	1,17	43,74-j3,51

4.4. Medición de la ganancia de las antenas AFPA2 y AFPA4

Para determinar la ganancia de la antena fractal, se utiliza el método descrito en [16], el cual consiste en formar un enlace punto a punto entre la antena bajo prueba y una antena patrón o conocida y se procede a realizar el cálculo de la ganancia de la antena a partir del presupuesto del enlace con todos los demás parámetros conocidos. Para aplicar el método se mide el parámetro S21 mediante el uso del analizador vectorial de redes, que consecuentemente permite determinar la potencia de la señal recibida en una antena.

En la Fig. 12 se muestran las conexiones realizadas para la medición de la ganancia de la antena. En la Fig. 13 se muestra el escenario establecido durante las mediciones de la ganancia de la antena fractal.



Figura 12. Conexiones para determinar la ganancia de la antena fractal.



Figura 13. Escenario durante las mediciones de la ganancia de la antena fractal.

Se realizaron mediciones de la ganancia de la antena fractal, tanto en el plano horizontal como en el plano vertical de la antena, realizando giros cada 5° a cada una de las frecuencias de resonancia y se obtuvo que la ganancia es similar en las diferentes bandas de frecuencia. El valor de la ganancia de la antena AFPA2 está en el rango entre 8,732 dBi y -10,283 dBi; en cambio, para la antena AFPA4, el valor de la ganancia está entre 5,274 dBi y -6,98 dBi.

4.5. Lóbulo de radiación de las antenas AFPA2 y AFPA4

Se realizaron las mediciones cada 5 grados para obtener los diagramas de radiación horizontal y vertical de cada una de las antenas. De igual manera que en las mediciones anteriores, se comprobó que los diagramas de radiación son similares en las diferentes frecuencias de resonancia de las antenas. A continuación, se presentan los diagramas normalizados de radiación de las antenas construidas.

De los diagramas obtenidos no se visualiza la presencia de lóbulos de radiación secundarios, se podría decir que existe un lóbulo principal de 3 dimensiones que no es uniforme totalmente.

Lóbulo de radiación en función de la ganancia

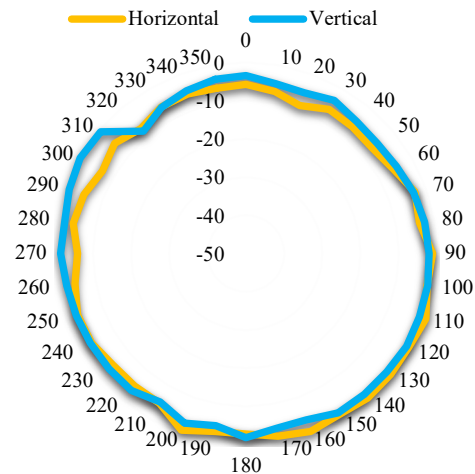


Figura 12. Diagrama normalizado de radiación en el plano horizontal y vertical para la antena AFPA4.

Lóbulo de radiación en función de la ganancia

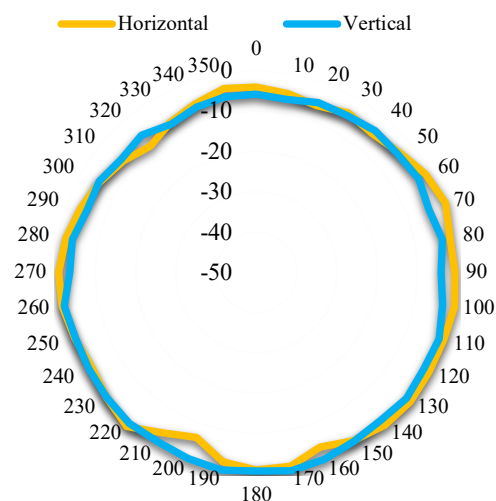


Figura 13. Diagrama normalizado de radiación en el plano horizontal y vertical para la antena AFPA2.

5. Conclusiones

En este artículo se presenta el diseño, simulación y mediciones de una antena fractal microstrip basada en la alfombra de Sierpinski en la segunda iteración para la recepción simultánea de señales de Televisión Digital Terrestre TDT en la banda UHF y para las redes inalámbricas de área local de banda ancha.

Se comprobó que es posible el diseño de una antena fractal basada en la alfombra de Sierpinski a partir de un parche rectangular o iteración 0; sin embargo, se debe tomar en cuenta que el diseño del parche debe ser realizado a una frecuencia de resonancia específica, ya que el incremento en el número de la iteración, produce un corrimiento de las frecuencias de resonancia con respecto a las anteriores iteraciones.

La alimentación de la antena se probó directamente en uno de los contornos del elemento radiante. Se comprobó mediante simulación y experimentación que el puerto de alimentación influye en las características eléctricas de acoplamiento y de ancho de banda de la antena. En nuestro caso, la antena que tuvo mejores resultados para la aplicación fue la antena fractal con puerto de alimentación 2, que presenta un diagrama de radiación omnidireccional no uniforme.

En un trabajo futuro se probarán diferentes técnicas de alimentación para mejorar el desempeño de la antena. Además, se realizarán variaciones en la estructura física para que la antena se ajuste de mejor manera al rango de operación requerido para las aplicaciones seleccionadas.

6. Agradecimientos

Esta obra se realizó como parte del proyecto de investigación semilla PIS18-06 para la selección de un tipo de antena aplicable en el prototipo a desarrollar. El proyecto tiene el apoyo de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador.

7. Referencias

- [1] Suvarna, S., Saneesh, V. (2017). Design and Development of Sierpinski Carpet Microstrip Fractal Antenna for Multiband Applications. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 6 (4), 50-57.
- [2] Sudhina, H. K., Jagadeesha, S., Shetti, N. M. (2015). Sierpinski carpet fractal microstrip antenna for improved bandwidth using stacking technique with stripline feeding. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, 5 (1), 171-177.
- [3] Ranjan Jena, M., Mangaraj, B. B., Mishra, D. (2013). Bandwidth and gain enhancement of multiband fractal antenna based on the Sierpinski carpet geometry. *ICTACT Journal on Communication Technology*, 4 (1), 669-674.
- [4] Lal, M. (2016). Design of Sierpinski Carpet Fractal Antenna with Inset Microstrip Line Feeding. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 5 (7), 6119-6125.
- [5] Peitgen, H., Jürgens, H., Saupe, D. (2004). *Chaos and Fractals* (2nd Ed.). New York: Springer Science.
- [6] Puente-Baliarda, C., Romeu, J., Pous, R., Cardama, A. (1998). On the behavior of the Sierpinski multiband fractal antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 46 (4), 517-524.
- [7] Mandelbrot, B. (1983). *The fractal geometry of nature*. New York: WH freeman.
- [8] Srivatsun, G., Subha, S., Saisundara, G. (2011). A Self-Similar Fractal Cantor Antenna for MICS Band Wireless Applications. *Wireless Engineering and Technology*, 2, 107-111.
- [9] Maharana, M. S., Mishra, G. P., Mangaraj, B. B. (2017). Design and simulation of a Sierpinski carpet fractal antenna for 5G commercial applications. Trabajo presentando en *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai.
- [10] Romeu, J., Soler, J. (2001). Generalized Sierpinski fractal multiband antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 49 (8), 1237-1239.
- [11] Lupera Morillo, P., Flores Cadena, G., Merizalde Merizalde, R. (2019). Design and Testing of Fractal Antenna Parameters based on the Koch Curve for Reception of Digital Terrestrial Television Signals in the UHF Band. *Law, State and Telecommunications Review*, 11 (1), 159-172.
- [12] Huang, Y., Boyle, K. (2008). *Antennas: from theory to practice* (1st Ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- [13] Balanis, C. A. (2008). *Modern antenna handbook* (1st Ed.). New Yersey: John Wiley & Sons.
- [14] Arcotel. (2015). *Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Televisión Analógica, Ecuador*. Recuperado de: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2016/03/norma-tecnica-television-analogica.pdf>
- [15] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT-R. (2014). *M.1450-5, Características de las redes radioeléctricas de área local de banda ancha*. Recuperado de: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1450/es>
- [16] Medina Monroy, J. L., Díaz Tapia, E., Olvera Cervantes, J. L., Chávez-Pérez, R. A., Velázquez-Ventura, A. (2008). Análisis y Comparación de Metodologías para Determinar Experimentalmente la Ganancia de Antenas de RF y Microondas. Trabajo presentado en *Simposio de Metrología*, Santiago de Querétaro, México. Recuperado de: https://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/memorias/M1/SM2008-M127-1150.pdf