

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ANTENA FRACTAL DE VICSEK TIPO PARCHE PARA LA BANDA DE 3.5 GHZ**

#### **RADIO FRECUENCIA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
TELECOMUNICACIONES**

**KEVIN ANDERSON GÓNGORA JAMA**

**DIRECTOR: ING. PABLO ANÍBAL LUPERA MORILLO, PHD**

**DMQ, abril 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, KEVIN ANDERSON GÓNGORA JAMA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

**KEVIN ANDERSON GÓNGORA JAMA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por KEVIN ANDERSON GÓNGORA JAMA, bajo mi supervisión.

**ING. PABLO ANÍBAL LUPERA MORILLO  
DIRECTOR**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

**NOMBRE\_REVISOR1  
REVISOR1 DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**NOMBRE\_REVISOR2  
REVISOR2 DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

KEVIN ANDERSON GÓNGORA JAMA

PABLO ANÍBAL LUPERA MORILLO

## DEDICATORIA

Dedico el siguiente trabajo a mis padres, Elizabeth y Nelson quienes con su apoyo incondicional siempre me motivaron a seguir adelante, siempre estuvieron pendientes de que no me faltara nada y siempre supieron guiarme por el buen camino desde que era un niño, padres ejemplares quienes nunca dejaron de creer en mí. Este logro es por ustedes y para ustedes.

A mis hermanos Ronny, Michael y Nelson porque siempre nos mantuvimos juntos y apoyándonos, siempre quise ser el mejor ejemplo para ustedes y espero haberlo logrado.

A mi niñita Andrea, porque siempre estuvo conmigo desde el principio, siempre dándome ánimos para seguir adelante. Hoy caminamos juntos y hemos logrado culminar la carrera después de tanto.

A mis amigos de la West quienes me acompañaron durante toda esta vida universitaria, por todo su apoyo, porque siempre tratamos salir adelante juntos y hasta ahora lo estamos logrando.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por sus infinitas bendiciones sobre mí durante todo este proceso.

A mis padres Elizabeth y Nelson, siempre me apoyaron desde el primer día y jamás dejaron de estar pendientes de mi proceso, ustedes han sido el mejor ejemplo que pude tener en la vida y siempre fueron mi fuente de motivación para lograr cumplir todas las metas que me he propuesto. No encuentro las palabras indicadas para poder agradecerles por todo lo que han hecho por mí durante toda mi vida, pero quiero que sepan que todos mis logros son gracias a ustedes y por eso les debo toda mi vida. ¡Gracias!

A la Escuela Politécnica Nacional ya que fue la institución que me acogió y la que me brindó todas las herramientas necesarias para lograr convertirme en un excelente profesional.

Al Dr. Pablo Lupera por su guía durante todo el desarrollo de este trabajo, por ser un excelente profesor. Siempre fue un ejemplo para mí y gracias a sus clases pude amar mucho más a esta preciosa carrera.

A mi niñita Andrea por su apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo y durante la mayor parte de mi vida universitaria, por siempre motivarme cuando ya no quería saber nada y botar todo al tacho.

A mis amigos de la West porque siempre estuvieron ahí para mí, por tantos momentos, buenos y malos, pero siempre supimos salir delante de una u otra manera.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
RESUMEN .....	II
ABSTRACT .....	III
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general .....	1
1.2 Objetivos específicos .....	1
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	2
<b>Antenas corrugadas.....</b>	<b>10</b>
Antenas fractales.....	10
Definición de antena .....	2
Fractal de Vicsek.....	8
Parámetros característicos de una antena .....	4
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Diseño de la antena fractal de vicsek tipo parche .....	11
2.1.1 Diseño del parche rectangular básico .....	11
2.2 Generación del fractal de vicsek .....	14
2.3 Simulación de la antena .....	16
2.3.1 Antena tipo parche (iteración 0) .....	16
2.3.2 Antena fractal de Vicsek en iteración 1 y 2 a partir del parche cuadrado	20
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32
3.1 Resultados .....	32
3.2 Conclusiones.....	42
3.3 Recomendaciones.....	43
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## RESUMEN

Este trabajo surge debido a que en el Ecuador se tiene previsto utilizar la banda de 3.5 GHz para el despliegue de las redes 5G, por lo cual se requieren de elementos radiantes que operen en dicha banda y además a la necesidad de que dichos elementos tengan la capacidad de trabajar simultáneamente en diferentes bandas de frecuencia con la finalidad de que puedan ser utilizados simultáneamente para su conexión a diferentes tipos de redes de comunicaciones con la posibilidad de ofrecer una mayor cantidad de servicios.

En Latinoamérica se tiene previsto el despliegue del 5G en la banda de 3.5 GHz, abarcando el rango de frecuencias de 3.3 – 3.8 GHz, siendo así que en Ecuador se tiene previsto el uso de la banda de 3.5GHz con canalización de 10 y 20 MHz. Por esto, creemos que para la construcción de los elementos radiantes a utilizarse en las redes 5G se pueden aprovechar las ventajas que brinda el uso de las antenas fractales, siendo las más importantes la autosimilaridad de sus estructuras por ende su capacidad multiresonante y la propiedad de acoplarse al espacio físico debido a las formas geométricas que se pueden adoptar.

En este trabajo de titulación se propone el diseño y simulación de un prototipo de antena fractal de Vicsek tipo parche orientada a trabajar en múltiples rangos de frecuencias, teniendo como principal objetivo la banda de 3.5 GHz.

**PALABRAS CLAVE:** antena fractal, autosimilaridad, multiresonante, Vicsek.

## ABSTRACT

This work arises because in Ecuador it is planned to use the 3.5 GHz band for the deployment of 5G networks, for which radiating elements that operate in said band are required and also the need for said elements to have the ability to work simultaneously in different frequency bands so that they can be used simultaneously for connection to different types of communication networks with the possibility of offering a greater number of services.

In Latin America, the deployment of 5G in the 3.5 GHz band is planned, covering the frequency range of 3.3 - 3.8 GHz, while in Ecuador the use of the 3.5GHz band with channeling of 10 and 20 MHz is planned. For this reason, we believe that for the construction of the radiating elements to be used in 5G networks, the advantages offered by the use of fractal antennas can be taken advantage of, the most important being the self-similarity of their structures, therefore their multi-resonance capacity and the property to fit into the physical space due to the geometric shapes that can be adopted.

In this titling work, the design and simulation of a Vicsek fractal antenna prototype patch type is proposed, aimed at working in multiple frequency ranges, with the 3.5 GHz band as its main objective.

**KEYWORDS:** fractal antenna, self-similarity, multi-resonance, Vicsek.



# **1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO**

Ecuador en los últimos años ha presentado un crecimiento exponencial en cuanto a cantidad de usuarios de redes de comunicaciones móviles, llegando a registrar un total de 2.7 millones de conexiones 4G [1]; de igual manera, los usuarios presentan mayores exigencias con respecto a la calidad y a la cantidad de servicios.

Una solución a esta problemática es la implementación de la tecnología 5G, pues promete nuevos beneficios en lo que respecta a velocidad, cobertura y consumo de energía [2]. Por otra parte, se presenta la tendencia de una convergencia de las redes en un único terminal con la finalidad de poder acceder a los servicios que ofrecen los diferentes tipos de redes. En este sentido es preciso disponer de elementos radiantes que funcionen en las bandas de frecuencia destinadas para las redes 5G y que simultáneamente puedan operar en otras bandas de frecuencia para que se puedan aprovechar las prestaciones de otros tipos de redes a través de una misma antena, lo cual implica un beneficio, ya que un solo elemento de antena ocuparía un espacio reducido en comparación a requerir una antena para cada tipo de red.

## **1.1 Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo de integración curricular es:

Diseñar y simular un prototipo de antena fractal de Vicsek tipo parche para su operación principal en la banda de 3,5 GHz.

## **1.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos del trabajo de integración curricular son:

1. Establecer los requerimientos funcionales para el diseño del prototipo de antena basada en la forma fractal de Viseck.
2. Diseñar el prototipo de antena de acuerdo con los requerimientos funcionales establecidos.
3. Simular la antena diseñada.
4. Evaluar el funcionamiento del prototipo con la ayuda del software ADS y realizar las modificaciones necesarias.

### 1.3 Alcance

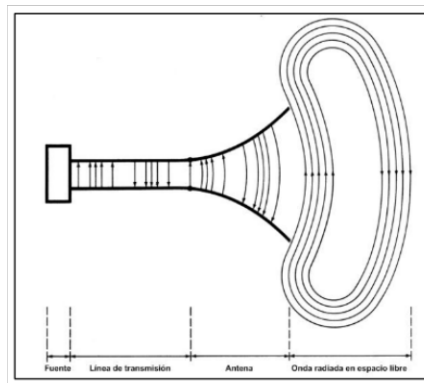
En este trabajo se plantea diseñar y simular un prototipo de antena fractal que opere en la banda de 3,5 GHz y que presente una impedancia de 50 Ohmios, donde su aplicación principal será en las redes de comunicaciones móviles y su posible aplicación para servicios de comunicaciones satelitales. La antena a diseñar se basará en la forma fractal de Vicsek generada hasta la segunda iteración. Para la simulación se usará el software ADS (Advanced Design Software) de Keysight, el cual permitirá obtener parámetros físicos, eléctricos y de radiación. Como parte del trabajo se propone realizar modificaciones al prototipo de antena simulado en búsqueda de mejorar los resultados que se obtengan.

Por lo expuesto anteriormente, en este trabajo de titulación no se tiene un producto final demostrable.

### 1.4 Marco teórico

#### 1.4.1 Definición de antena

El IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) define una antena como “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [3]. Se puede considerar a una antena como la transición entre una línea de transmisión y el espacio libre, como se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1.** Esquema de una antena [4].

La principal función de una antena es la radiación o recepción de una potencia suministrada. Acorde al sistema para la que esté diseñada, la antena radiará en diversas maneras, siendo posible: omnidireccional (radia en todas las direcciones) como las usadas en los sistemas de radiodifusión, o directiva (radia en una dirección) como en radiocomunicaciones [4].

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia de transmisión (f) y longitud de onda ( $\lambda$ ) de propagación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

donde c es la velocidad de propagación de la luz en el medio ( $3 \times 10^8$  m/s en el espacio libre) [3].

El conjunto de todas las frecuencias (espectro de frecuencias) se divide en bandas mencionadas en la Tabla 1, cada una de las bandas presenta características específicas las cuales permiten dar origen a diversas tipologías de antenas [3].

**Tabla 1** Bandas de frecuencias.

<b>Banda</b>	<b>f</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Denominación</b>
ELF	< 3 kHz	> 100 km	Extremely Low Frequency
VLF	3 -30 kHz	100 –10 km	Very Low Frequency
LF	30 –300 kHz	10–1 km	Low Frequency
MF	0,3 –3 MHz	1000 –100 m	Medium Frequency
HF	3 –30 MHz	100 –10 m	High Frequency
VHF	30 –300 MHz	10 –1 m	Very High Frequency
UHF	0,3 –3 GHz	100 –10 cm	Ultra High Frequency
SHF	3 –30 GHz	10 –1 cm	Super High Frequency
EHF	30 –300 GHz	1 –0,1 cm	Extremely High Frequency

### 1.4.2 Parámetros característicos de una antena

- **Impedancia**

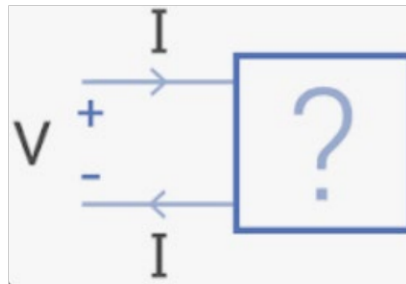
La impedancia de entrada de una antena se define como a relación entre la tensión y la corriente presente en el puerto de entrada de la misma. En general esta consta de una parte real ( $R_A$ ) y una parte imaginaria ( $X_A$ ), dependientes de la frecuencia [3].

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (1.2)$$

Para que la antena receptora radíe a la máxima potencia es necesario que tanto el transmisor, el receptor y la línea de transmisión que los une tengan la misma impedancia de entrada, ya que es cuando las pérdidas por desacoplamiento son mínimas.[4].

- **Parámetros de dispersión**

Las antenas, como los circuitos de microondas pueden caracterizarse también como una red de un puerto (Figura 1.2), que constituye el puerto físico de entrada de la antena [5].



**Figura 1.2.** Esquema de una red de un puerto con ondas incidentes y reflejadas asociadas.

En la figura 1.2 se muestra una red con ondas incidentes y reflejadas en el puerto. Por convención,  $a_i$  representa la onda incidente y  $b_i$  la onda reflejada en el puerto  $i$ . Las ondas incidentes se dirigen en dirección entrante al circuito y las reflejadas, por el contrario, en dirección saliente [5].

En el caso de un circuito de dos puertos existen cuatro parámetros S y las relaciones entre sus ondas incidentes y reflejadas están definidas de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

$$b_1 = s_{11}a_1 + s_{12}a_2$$

$$b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2$$

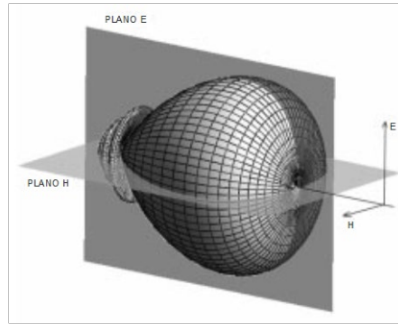
A continuación, se presenta la Tabla 1.2 con el significado de cada parámetro S de una red de dos puertos.

**Tabla 1.2.** Descripción de los parámetros S para una red de 2 puertos [5].

Parámetro	Coficiente	Descripción	Fórmula
S <sub>11</sub>	Reflexión a la entrada	Cantidad de potencia reflejada en el puerto 1 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto.	$s_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right _{a_2=0}$
S <sub>12</sub>	Transmisión o ganancia inversa	Cantidad de potencia que llega al puerto 1 alimentando la red por el puerto 2.	$s_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right _{a_1=0}$
S <sub>21</sub>	Transmisión o ganancia directa	Cantidad de potencia que llega al puerto 2 cuando se alimenta la red por dicho puerto.	$s_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right _{a_2=0}$
S <sub>22</sub>	Reflexión a la salida	Cantidad de potencia que se refleja en el puerto 2 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto.	$s_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right _{a_1=0}$

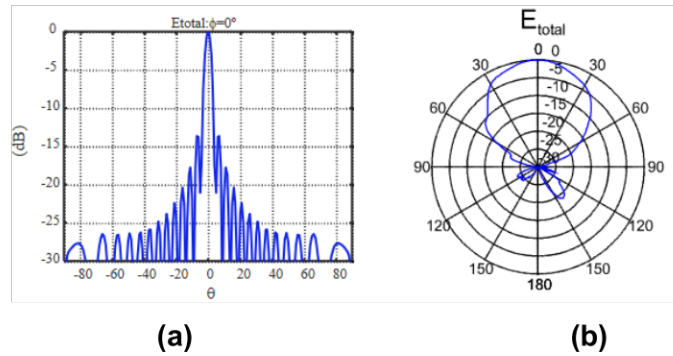
- **Diagrama de radiación**

Es una representación gráfica en coordenadas esféricas de las características de radiación de la antena en todas las direcciones en el espacio, a una distancia fija [6]. La Figura 1.3 muestra el diagrama de radiación tridimensional de una antena y los planos eléctrico (E) y magnético (H). Los niveles de radiación se expresan en decibelios respecto al máximo de radiación.



**Figura 1.3.** Diagrama de radiación tridimensional [6].

El diagrama de radiación de una antena suele representarse mediante cortes extraídos del diagrama tridimensional para una  $\varphi$  constante y/o una  $\theta$  constante (planos principales). Estos cortes se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas como se muestra en la Figura 1.4 [3].



**Figura 1.4 (a)** Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas  
**(b)** Diagrama de radiación en coordenadas polares

- **Ganancia**

La ganancia se define como el grado de directividad del patrón de radiación de una antena. Una antena con alta ganancia irradia en una dirección en particular, se define como “la relación de la intensidad irradiada por una antena en la dirección de su salida máxima, a una distancia arbitraria, dividida por la intensidad irradiada a la misma distancia por una hipotética antena isotópica” [7], esa relación entre la energía que es propagada por una antena direccional y por una que no lo fuese, es conocida como ganancia y es constante. La relación entre la ganancia y la directividad<sup>1</sup> se denomina eficiencia, la cual es un número comprendido entre 0 y 1. Si una antena no presenta pérdidas óhmicas, la directividad y la ganancia serán iguales [7].

<sup>1</sup> Directividad: Es una medida de la concentración de la potencia radiada en una dirección particular.

- **Ancho de banda**

Todas las antenas, debido a su geometría finita están destinadas a operar satisfactoriamente en una banda o margen de frecuencias. Este intervalo de frecuencias, en el que un parámetro de antena determinada no sobrepasa unos límites prefijados, se conoce como el ancho de banda de la antena. El ancho de banda (BW) se puede especificar como la relación entre el margen de frecuencias en que se cumplen las especificaciones y la frecuencia central. Dicha relación de frecuencias se expresa en forma de porcentaje [6].

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

Donde  $f_{max}$  y  $f_{min}$  son las frecuencias máxima y mínima que delimitan el ancho de banda y  $f_c$  es la frecuencia central.

- **VSWR-ROE (Relación de onda estacionaria)**

La relación de onda estacionaria SWR (Standing Wave Ratio) es la proporción entre el máximo y el mínimo de la onda estacionaria de tensión o de corriente que se crea a la salida del generador, como muestra la ecuación 1.5. Para el caso concreto de la relación en tensión, las siglas utilizadas son VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) [3].

Este parámetro está directamente relacionado con la adaptación de la antena, y se puede expresar como:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (1.5)$$

La SWR es un número real comprendido entre  $1 \leq SWR \leq \infty$ . Un valor de  $SWR = 1$  indica que la antena está perfectamente adaptada ( $s_{11} = 0$ ) [5]. En este trabajo (tal y como se planteará posteriormente) se intentará conseguir valores de  $SWR \leq 2$ , es decir, con un parámetro  $|s_{11}| \leq -10\text{dB}$ .

- **Geometría fractal**

La geometría fractal es un conjunto de estructuras complejas e irregulares descritas por algoritmos matemáticos y computacionales; los cuales reemplazan a los puntos, rectas, circunferencias y otras formas de las matemáticas tradicionales .

Estos objetos tienen como características fundamentales las propiedades de autosimilitud y la de convivir con extraños paisajes formados por dimensiones fraccionarias<sup>2</sup> [8].

- **Autosimilitud**

El término autosimilitud (que también puede entenderse como autosemejanza) se refiere a la propiedad de un objeto de mostrar en partes la misma forma o estructura como un todo, aunque se puede encontrar en diferentes escalas y está ligeramente distorsionado en algunos casos.[8].

- **Dimensión fractal**

La dimensión fractal es una medida capaz de capturar la esencia de un patrón que se repite, similar a cómo aparece realmente la naturaleza, tanto en forma (ríos, montañas, árboles, plantas, vasos sanguíneos, nubes, etc), como de patrones de todo tipo que podemos extrapolar a las matemáticas [9].

El concepto de dimensión fractal se utiliza para resolver problemas de determinación de la longitud de un cuerpo fractal y para estudiar el tamaño de los fractales.

### **1.4.3 Fractal de Vicsek**

El fractal de Vicsek o caja fractal, fue propuesto por Tamás Vicsek<sup>3</sup> y es conocido por su uso en el diseño de antenas compactas, particularmente para teléfonos celulares [10].

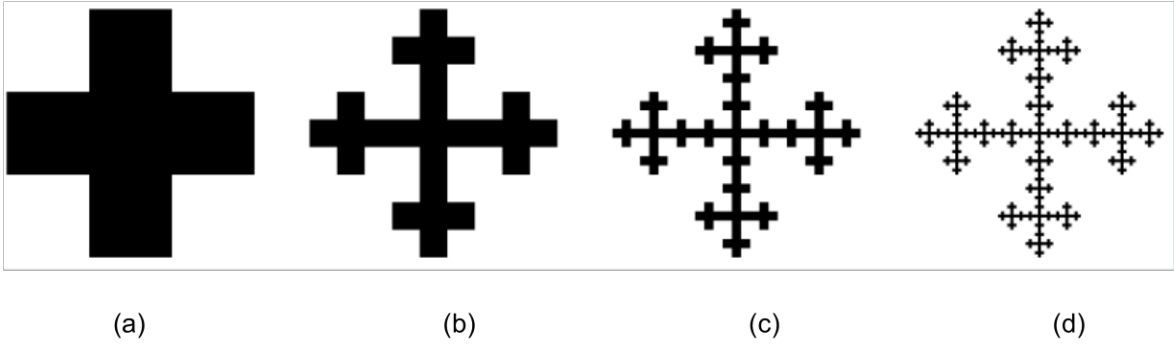
La construcción del fractal de Vicsek consiste en que, a partir de un cuadrado, quitando las cuatro líneas verticales y reteniendo el cuadrado del medio y sus cuadrados superior, inferior, izquierdo y derecho, creando una intersección [10]. El paso anterior se repite en cada cuadrado de la intersección para la iteración subsiguiente, como se muestra en la Fig. 1.5.

---

<sup>2</sup> Dimensión fraccionaria: Concepto que expresa el tamaño de un fractal independientemente de la escala con la que se lo esté midiendo [10].

<sup>3</sup> Tamás Vicsek: científico húngaro con intereses de investigación en estudios numéricos de los líquidos densos, crecimiento fractal, la formación de patrones. Su nombre es homónimo del fractal de Vicsek y el modelo de Vicsek de la conducta de enjambre.





**Figura 1.5.** (a) Primera iteración del fractal de Vicsek. (b) Segunda iteración. (c) Tercera iteración (d) Cuarta iteración.

Dimensión fractal del fractal de Vicsek: Sean  $N_n$  el número de cuadrados negros y  $L_n$  el lado de los cuadrados en la iteración  $n$ . Entonces, la dimensión fractal de dicha forma corresponde al siguiente límite [9]:

$$D_H = - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln N_n}{\ln L_n} \quad (1.6)$$

Observando la figura 1.5:

$N_0 = 1,$	$L_0 = 1$
$N_1 = 5,$	$L_1 = \frac{1}{3}$
$N_2 = 5^2,$	$L_2 = \frac{1}{3^2}$
$N_3 = 5^3,$	$L_3 = \frac{1}{3^3}$

Por tanto, deducimos:

$$N_n = 5^n, \quad L_n = 3^{-n}$$

Entonces, la dimensión fractal del fractal de Vicsek será:

$$D_H = - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln 5^n}{\ln 3^{-n}}$$

$$D_H = \frac{\ln 5^n}{\ln 3^{-n}}$$

$$D_H = 1.464973521$$

#### 1.4.4 Antenas fractales

La geometría fractal se ha convertido en fuente de inspiración para una serie de aplicaciones prácticas industriales y tecnológicas, en todas las aplicaciones posibles basadas en la teoría fractal, el estudio y diseño de antenas y sistemas de radiación, se ha propuesto y diseño de nuevas antenas y sistemas radiantes [11].

El crecimiento de las antenas con geometría fractal se atribuye a la tendencia hacia la miniaturización de los dispositivos electrónicos. El fractal, que tiene la propiedad de contener copias de diferentes escalas, permite que la antena opere en distintas bandas de frecuencia o también se le conoce como comportamiento multibanda, que es otra de las ventajas de este tipo de antena [12].

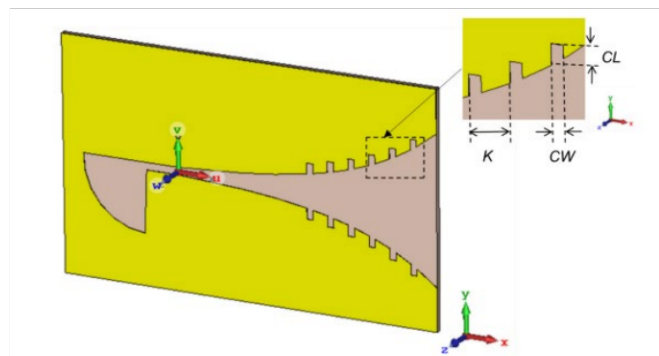
El diseño de antenas fractales está dirigido especialmente a aplicar la característica primordial de la geometría fractal, que es la autosimilaridad de sus estructuras (escalabilidad) [12].

#### 1.4.5 Antenas corrugadas

Dentro de las diversas técnicas que existen para los parámetros de radiación de las antenas se encuentra el uso de las corrugaciones. Estas son discontinuidades rectangulares que se ubican en las superficies de la antena [13], en el caso de este trabajo de integración curricular será en los lados del fractal de Vicsek.

El objetivo del uso de las corrugaciones en una antena es mejorar sus características radiantes, al mismo tiempo, se procura mantener al elemento radiante categorizado como antena de banda ancha [13].

En la figura 1.6 se muestra un ejemplo de aplicación de corrugaciones en una antena Vivaldi.



**Fig. 1.6** Corrugaciones en una antena Vivaldi.

Donde  $CL$  es la altura de la corrugación,  $CW$  es el ancho de la corrugación y  $K$  es la separación entre corrugaciones.

$CW$  y  $K$  deben ser menores a  $\lambda_{0\max}/2$  calculada a la frecuencia más alta de operación [13].

$CL$  debe ser un valor que se encuentre entre  $\lambda_{0\max}/4$  calculada a la frecuencia más baja de operación y  $\lambda_{0\_out}/2$  de la frecuencia fuera del ancho de banda superior [13].

## **2 METODOLOGÍA**

En este trabajo de titulación se diseñará una antena fractal tipo parche basada en el fractal de Vicsek para lo cual se considerará hasta la segunda iteración. Se empezará desde el diseño de una antena tipo parche rectangular y seguido se generará el fractal de Vicsek. Después se realizará la simulación de la antena como tecnología impresa (microstrip) con el software *Advanced Design System* (ADS). Se realizarán pruebas ubicando el puerto de alimentación en diferentes partes de la antena hasta conseguir resonar en la frecuencia de 3.5 GHz y en la mayor cantidad de frecuencias posibles (multiresonancia), luego se procederá a describir los resultados de las simulaciones. Finalmente, se experimentará con pequeñas modificaciones en la antena para lograr mejores resultados.

### **2.1 Diseño de la antena fractal de Vicsek tipo parche**

Para iniciar con el proceso de diseño de la antena fractal y el resto de sus iteraciones se debe partir del diseño del elemento radiante en sí, el parche rectangular. A continuación, se proceden a realizar las modificaciones necesarias, de acuerdo al procedimiento que se describirá más adelante para generar las antenas de las iteraciones de nivel superior.

#### **2.1.1 Diseño del parche rectangular básico**

Para comenzar, se parte calculando las dimensiones del parche, ver Figura 2.1.



**Figura 2.1** Dimensiones del parche rectangular a ser calculadas [14].

- Cálculo del ancho (W)

Para el cálculo del ancho del parche (W), es necesario conocer la frecuencia en la cual operará la antena y la constante dieléctrica del material ( $\epsilon_r$ ) [14]:

$$W = \frac{c}{2f * \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.1)$$

Donde:

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ; velocidad de la luz.

$f = 3.5 \text{ GHz}$ ; frecuencia de diseño.

$\epsilon_r = 4.4$ ; Permitividad relativa.

Se considera la permitividad relativa o constante dieléctrica del sustrato Epoxy de fibra de vidrio FR4, la cual tiene un valor típico de 4.4, por tanto [21]:

$$W = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2(3.5 \times 10^9 \text{ GHz}) * \sqrt{\frac{4.4 + 1}{2}}} = 26.1 \text{ mm} = 2.61 \text{ cm}$$

Luego se procede a calcular la permitividad efectiva de la antena [16]:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} \right) \quad (2.2)$$

Donde h es el espesor del sustrato, que es igual a 1.5mm y W el ancho del parche.

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{0.0015}{0.0261} \right)}} \right) = 3.4$$

Luego de esto, se procede a calcular la distancia  $\Delta L$  o efectos de borde, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta L = 0.412h * \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) * \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) * \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.3)$$

$$\Delta L = 0.412(1.5mm) * \frac{(3.4 + 0.3) * \left( \frac{2.61cm}{0.15cm} + 0.264 \right)}{(3.44 - 0.258) * \left( \frac{2.61cm}{0.15cm} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.71mm$$

La longitud del parche se calcula de la siguiente manera:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.4)$$

Donde  $L_{eff}$  es la longitud efectiva y se calcula de la siguiente manera:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.5)$$

$$L_{eff} = \frac{3 \times 10^8}{2 * 3.5 \times 10^9 \sqrt{4}}$$

$$L_{eff} = 21.42mm = 2.142cm$$

Por lo tanto, la longitud del parche será de:

$$L = 21.42 - 2 * 0.71$$

$$L = 20mm = 2cm$$

A continuación, se presentan como resumen los valores que fueron calculados para el parche, estos corresponden a la iteración cero del fractal de Vicsek:

**Tabla 2.1** Valores calculados para el parche rectangular a la frecuencia de 3.5 GHz

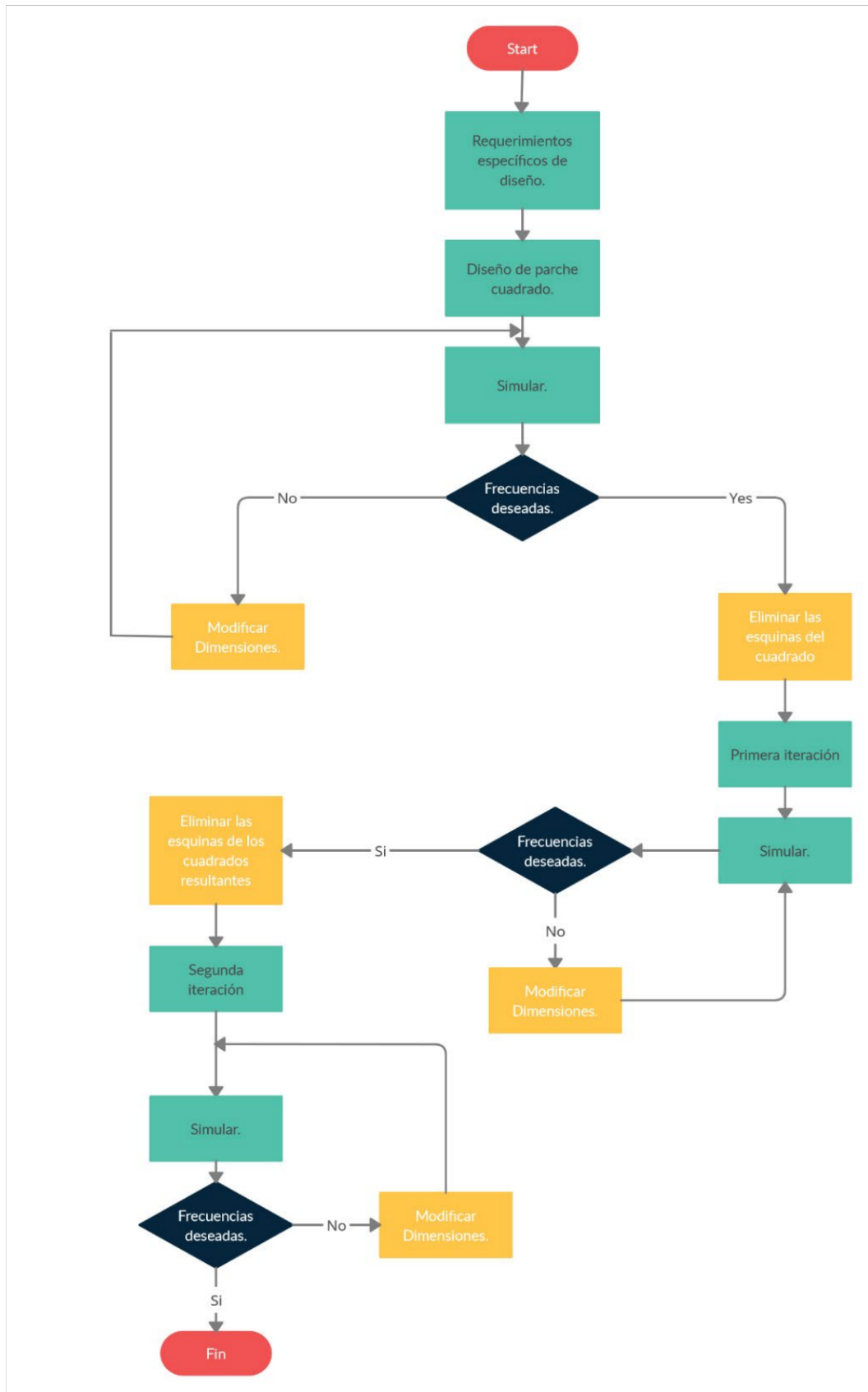
<b><i>W(mm)</i></b>	<b><i>L(mm)</i></b>	<b><i>ΔL (mm)</i></b>	<b><i>ε<sub>eff</sub></i></b>	<b><i>L<sub>eff</sub></i></b>
26.1	20	0.71	3.4	2.142

## **2.2 Generación del fractal de Vicsek**

La generación del fractal de Vicsek consiste en, a partir de un cuadrado base (iteración 0), quitar los cuatro cuadrados de las esquinas y dejar el cuadrado del medio y los cuadrados superior, inferior, lateral izquierdo y derecho del mismo, resultando en una cruz [9]. Se repite el paso anterior en cada cuadrado de la cruz para las siguientes iteraciones.

Para este caso, se va a partir de las dimensiones del parche rectangular calculado, se elegirá una de las dos dimensiones obtenidas y con ella se construirá el cuadrado que corresponderá a la iteración 0 del fractal de Vicsek.

A continuación, en la figura 2.2 se muestra el proceso de generación del fractal de Vicsek.



**Figura 2.2** Proceso propuesto para la generación y pruebas del fractal de Vicsek.

## 2.3 Simulaciones de la antena

A continuación, se presentan las simulaciones de la antena fractal de Vicsek para la iteración cero (parche cuadrado), primera y segunda iteración.

Cabe mencionar que en la simulación se trabajará en la tecnología de circuito impreso (*microstrip*), para lo cual se toma un ambiente que consta de aire-sustrato FR4-aire como se presenta en la figura 2.2.

El sustrato de fibra de vidrio FR4 cuenta con las siguientes características: altura de 1,5 mm y altura del material conductor de 0,017 mm.

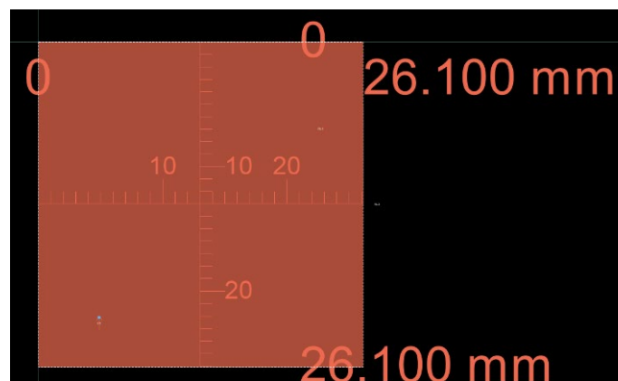


**Figura 2.3** Ambiente simulado de la antena fractal de Vicsek: aire-sustrato FR4-aire.

### 2.3.1 Simulación de la antena tipo parche (iteración 0)

A partir de las medidas presentadas en la tabla 2.1, se procede a elegir una de las dimensiones obtenidas para construir el cuadrado a simular. Para este caso se procederá a escoger la dimensión de 26.1 mm.

A continuación, se presenta la simulación de la iteración 0 del fractal de Vicsek utilizando el lado del cuadrado de la dimensión de  $W$  que se mostró en la tabla 2.1:

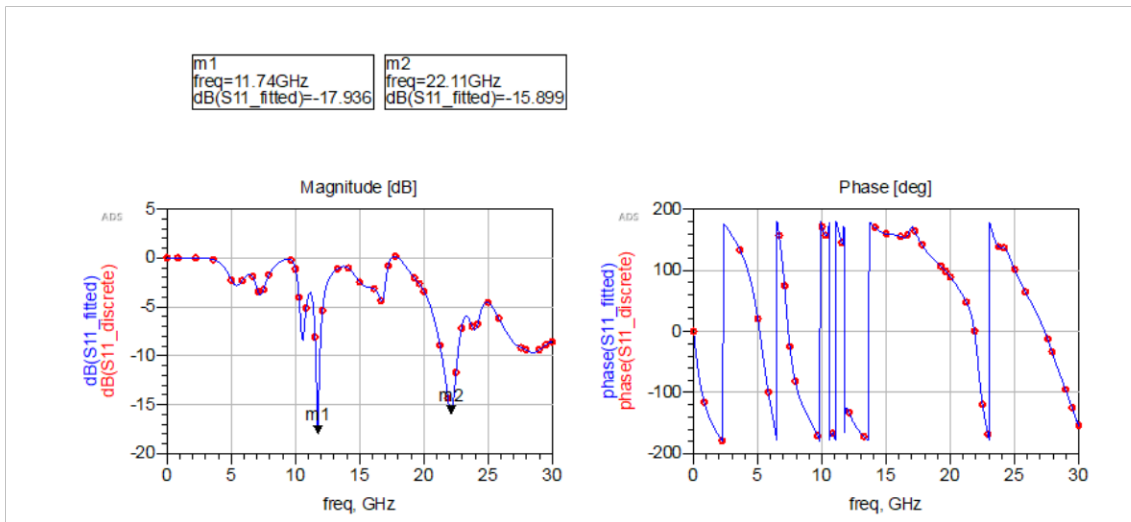


**Figura. 2.4** Figura de la iteración 0 del fractal de Vicsek de dimensión  $W$ .



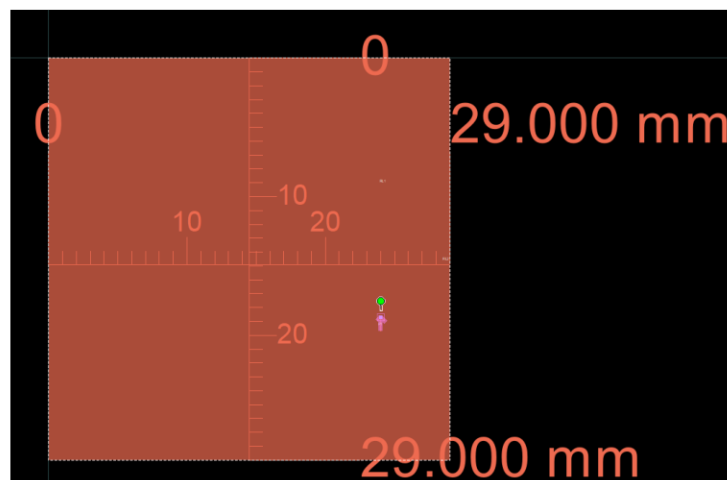
Según los cálculos presentados en la tabla 2.1, se procede a construir el cuadrado (iteración 0) del fractal de Vicsek, este consta de 26.1 mm de lado. Una vez que se construyó el parche, se procede a realizar la simulación en el software ADS.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:



**Figura 2.5** Frecuencias de resonancia y parámetro S11 obtenidos en la iteración 0 de dimensión W.

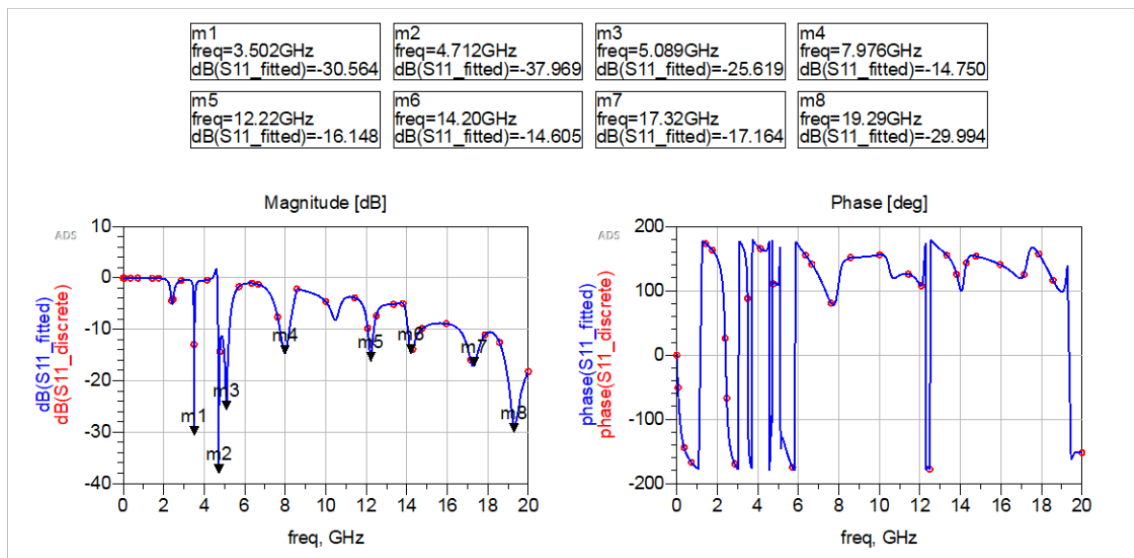
Se puede observar que solo se obtienen 2 frecuencias de resonancia que cumplen la condición de que el parámetro S11 sea menor o igual a -10dB y se observa que estas frecuencias no se encuentran en las bandas deseadas. Por lo tanto, se procede, tal y como se indica en la figura 2.2, a modificar las dimensiones del parche hasta lograr alcanzar las frecuencias deseadas que se consiguen con el parche de la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Iteración 0 del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas.

Como se puede observar en la figura 2.6, se procedió a aumentar el lado del cuadrado a 29 mm, esto en busca de que las frecuencias de resonancia disminuyan en valor. Adicionalmente, se procedió a mover el puerto de alimentación a la parte interna del parche para obtener mejores resultados.

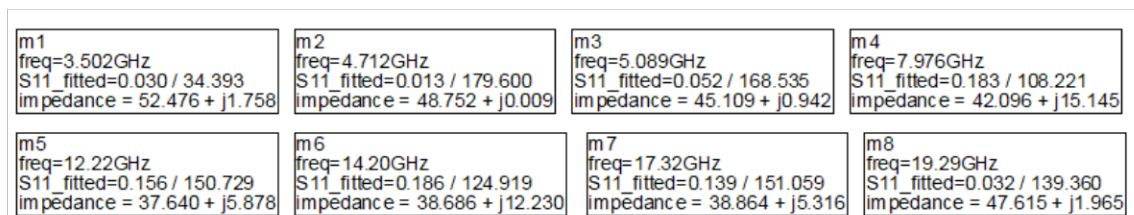
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación para la iteración 0 con la dimensión modificada.



**Figura 2.7** Frecuencias de resonancia y parámetro S11 obtenidos en la iteración 0 con la dimensión modificada.

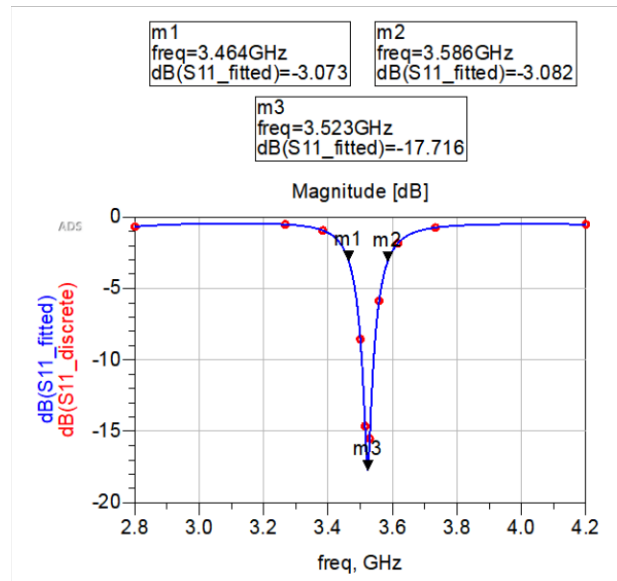
Como se observa en la Figura 2.7, no solo se logró resonar en la frecuencia planteada en el objetivo de este trabajo de titulación, 3.5 GHz; adicionalmente, se logró resonar en 7 frecuencias más, entre ellas se destacan frecuencias que pertenecen a la banda C y la banda X, todas las frecuencias de resonancia obtenidas cumplen con la condición de que el parámetro S11 debe ser menor o igual que -10dB.

A continuación, se presentan los valores de las impedancias a las frecuencias de resonancia obtenidas.



**Figura 2.8** Valores de impedancias obtenidos a las frecuencias de resonancia para la iteración 0 del fractal de Vicsek.

A continuación, se presenta el ancho de banda de la frecuencia de 3.5 GHz obtenido gráficamente.



**Figura 2.9** Análisis de las frecuencias necesarias para calcular el ancho de banda de la iteración cero del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas para la frecuencia de 3.5 GHz.

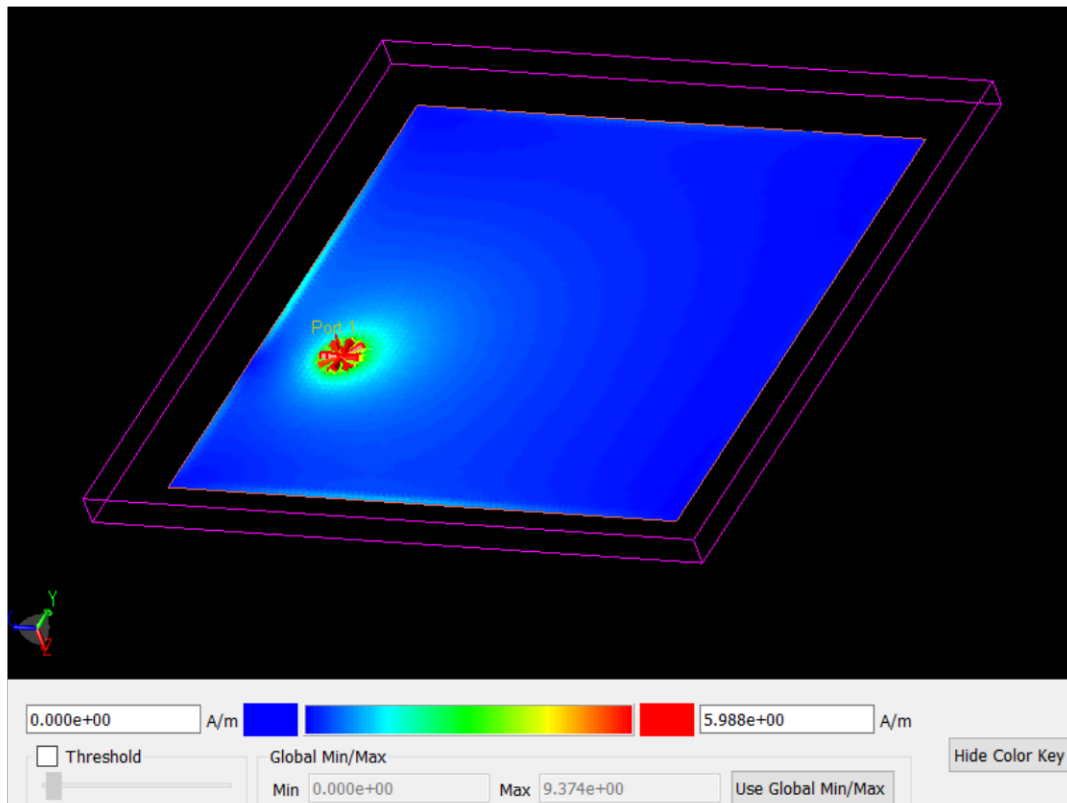
En este caso, se procede a colocar un marcador en la frecuencia central, la cual corresponde a 3.5 GHz y dos marcadores a -3 dB, uno corresponde a la frecuencia máxima y el otro a la frecuencia mínima. Seguido, se procede de la siguiente forma:

$$AB = f_{max} - f_{min} \quad (2.6)$$

$$AB = 3.586 \times 10^9 - 3.464 \times 10^9$$

$$AB = 122 \text{ MHz}$$

A continuación, la figura 2.10 muestra la distribución de la corriente en la antena:



**Figura 2.10** Distribución de corriente en la iteración 0 del fractal de Vicsek.

Según la escala mostrada debajo de la figura 2.10, se logra observar que existe una mayor concentración de corriente alrededor del puerto de alimentación y a medida que se aleja, la concentración de corriente es menor.

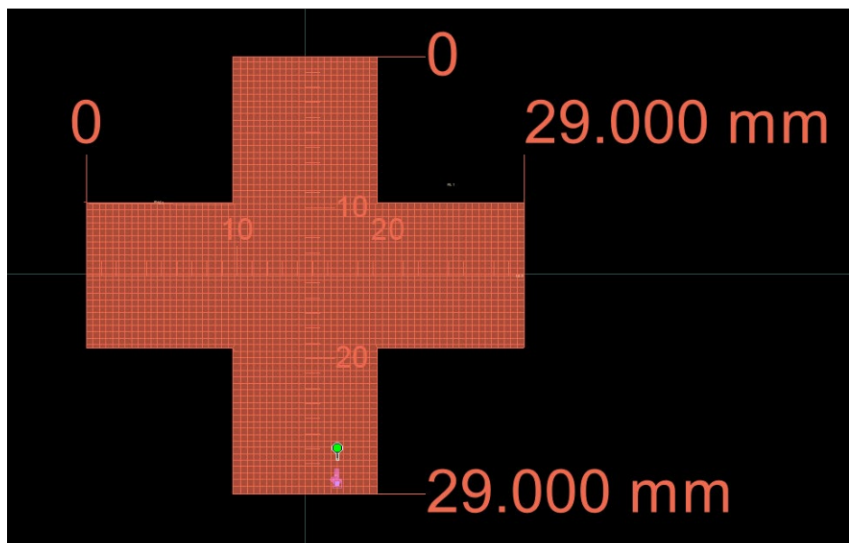
### 2.3.2 Antena fractal de Vicsek en su iteración 1 y 2 a partir del parche cuadrado

En esta sección se mostrarán las simulaciones de la primera y segunda iteración de la antena fractal de Vicsek diseñada a partir de la iteración 0 a 3.5 GHz.

- **Primera Iteración**

A partir de la iteración 0 se procede con la generación de la antena fractal de Vicsek, comenzando con la primera iteración. Se procede tal y como se mostró en la figura 2.2, se divide el cuadrado en cuadrados internos de la misma dimensión y se eliminan las cuatro esquinas, resultando una cruz. Esta es la primera iteración del fractal de Vicsek.

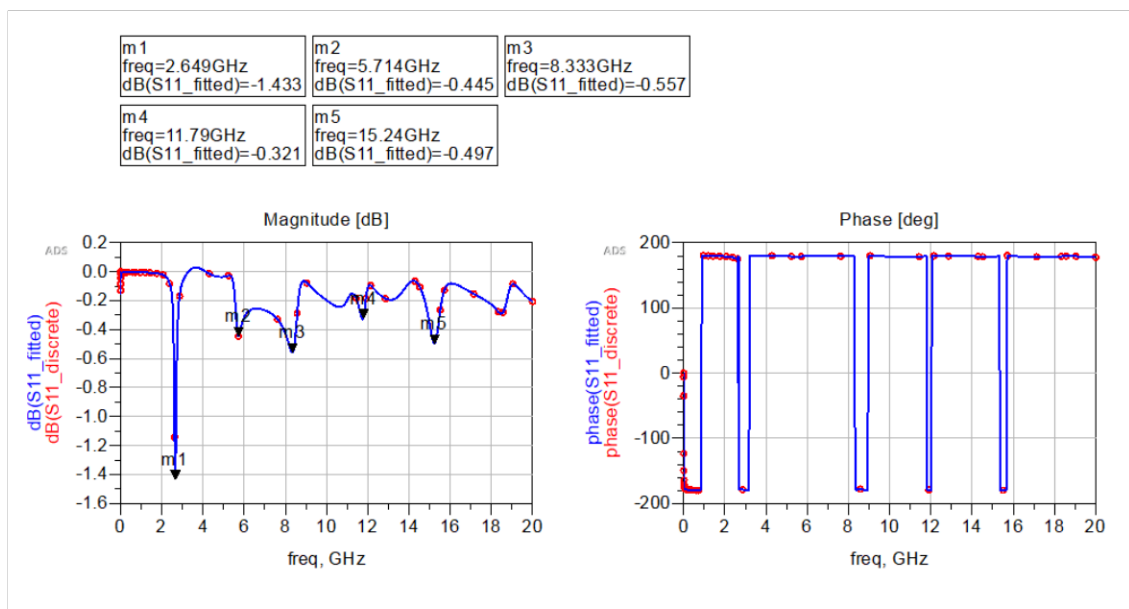
A continuación, se presenta la antena obtenida en la iteración 1:



**Figura. 2.11** Iteración 1 del fractal de Vicsek obtenida a partir de la iteración 0.

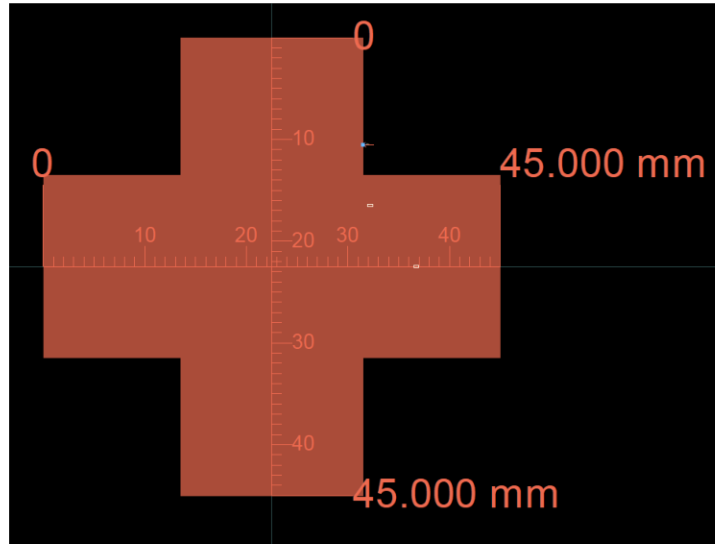
Una vez generada la primera iteración de la antena fractal de Vicsek, se procede a simular en el software ADS.

A continuación, los resultados obtenidos:

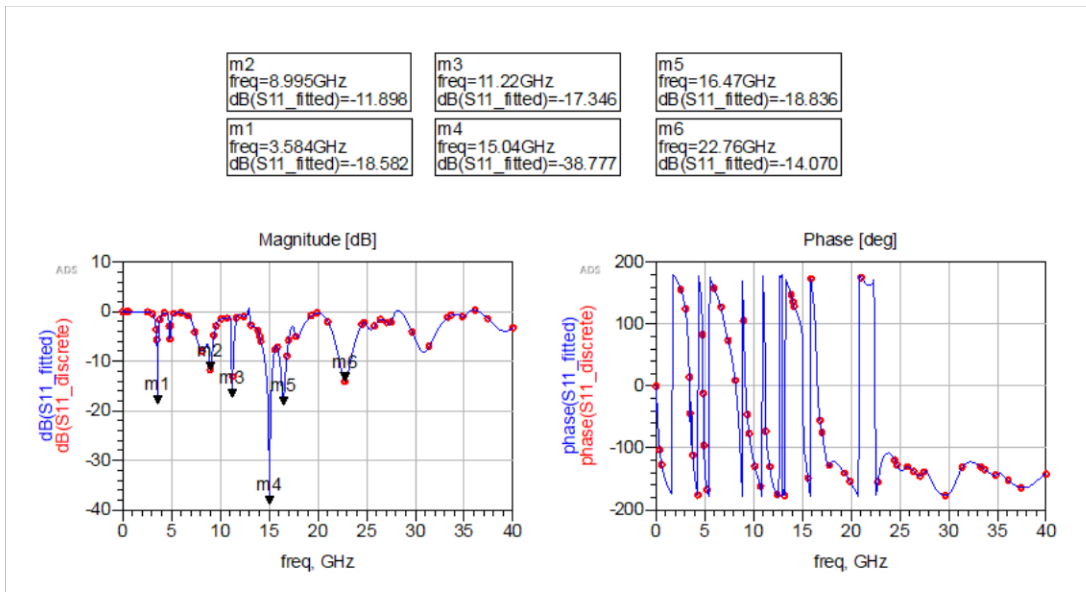


**Figura 2.12** Frecuencias de resonancia y parámetro S11 obtenidos en la iteración 1.

Se puede observar que se obtienen 5 frecuencias de resonancia, pero no se obtiene la frecuencia requerida de 3.5 GHz; adicionalmente, ninguna de las frecuencias de resonancia que se obtuvieron cumplen con la condición de que el parámetro S11 sea menor o igual a -10 dB. Por lo tanto, se procede nuevamente a modificar las dimensiones de la antena.



**Figura 2.13** Primera iteración del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas.



**Figura 2.14** Frecuencias de resonancia y parámetro S11 obtenidos en la iteración 1 del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas.

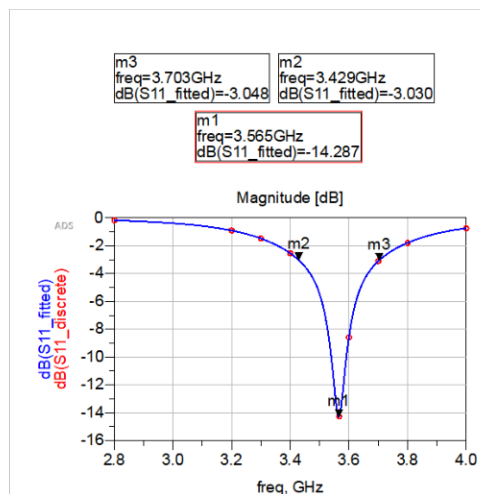
Como se puede observar en la Figura 2.14, se logró resonar en 6 frecuencias de resonancia luego de modificar las dimensiones de la antena; entre ellas la frecuencia objetivo de 3.5 GHz. Todas las frecuencias de resonancia obtenidas cumplen con la condición del parámetro S11 menor o igual que -10 dB.

A continuación, se presentan las impedancias de la antena a las frecuencias de resonancia obtenidas.

<b>m1</b> freq=3.584GHz S11_fitted=0.118 / -76.291 impedance = 51.465 - j11.939	<b>m2</b> freq=8.995GHz S11_fitted=0.254 / 89.276 impedance = 44.200 + j24.016	<b>m3</b> freq=11.22GHz S11_fitted=0.136 / -7.706 impedance = 65.490 - j2.429
<b>m4</b> freq=15.04GHz S11_fitted=0.012 / 69.380 impedance = 50.395 + j1.086	<b>m5</b> freq=16.47GHz S11_fitted=0.114 / 36.863 impedance = 59.446 + j8.263	<b>m6</b> freq=22.76GHz S11_fitted=0.198 / -154.511 impedance = 34.401 - j6.099

**Figura 2.15** Valores de impedancia obtenidos para las frecuencias de resonancia para la primera iteración del fractal de Vicsek.

A continuación, se presenta el ancho de banda de la frecuencia de 3.5 GHz obtenido gráficamente.



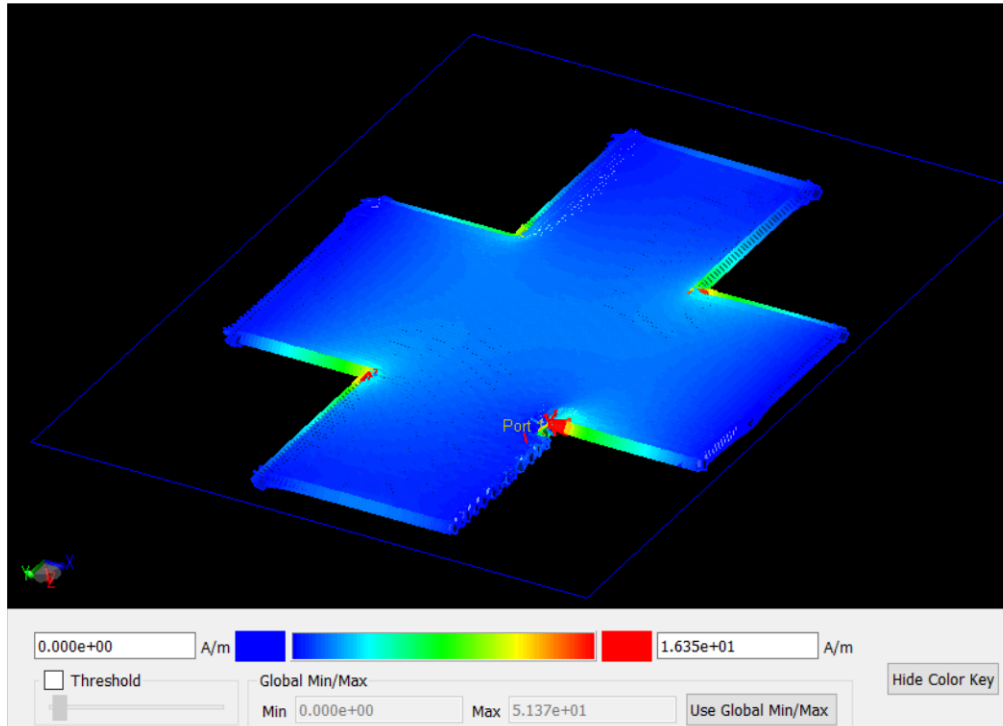
**Figura 2.16** Análisis de las frecuencias necesarias para calcular el ancho de banda de la primera iteración del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas para la frecuencia de 3.5 GHz.

Se procede de la misma forma que con la iteración cero:

$$AB = 3.703 \times 10^9 - 3.429 \times 10^9$$

$$AB = 274 \text{ MHz}$$

A continuación, la figura 2.17 muestra la distribución de la corriente en la antena:



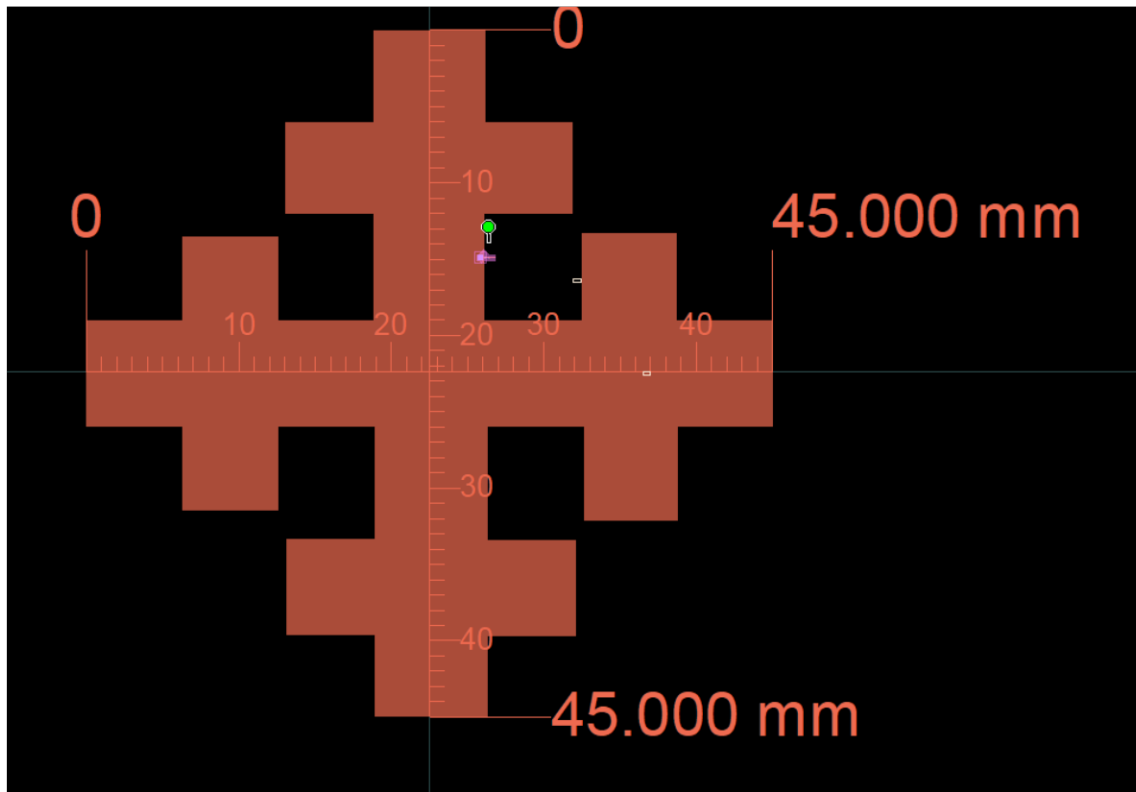
**Figura 2.17** Distribución de corriente en la iteración 1 del fractal de Vicsek.

Para este caso, se logra observar que la mayor concentración de corriente se encuentra alrededor del puerto de alimentación y en los bordes internos de la cruz. En esta iteración se tiene una distribución de corriente completamente diferente en comparación con la iteración 0.

- **Segunda Iteración**

A partir de la primera iteración, y siguiendo el proceso mostrado en la figura 2.2, se obtiene la antena de la segunda iteración del fractal de Vicsek. Para este caso, se vuelven a eliminar los 4 cuadros de las esquinas de cada bloque de la cruz, obteniendo la siguiente antena:

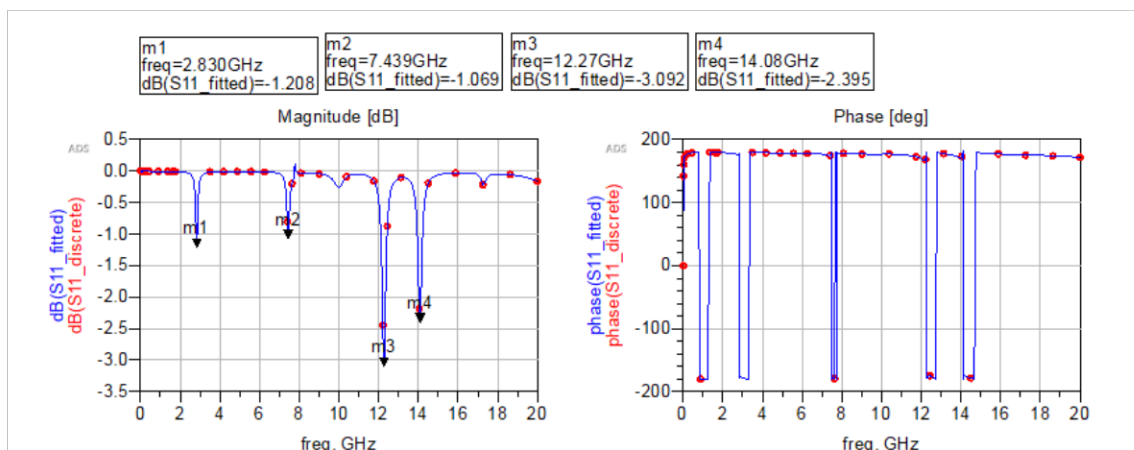




**Figura 2.18** Segunda iteración del fractal de Vicsek construida a partir de la primera iteración.

Una vez obtenida la segunda iteración de la antena fractal de Vicsek, se procede a simular en el software ADS.

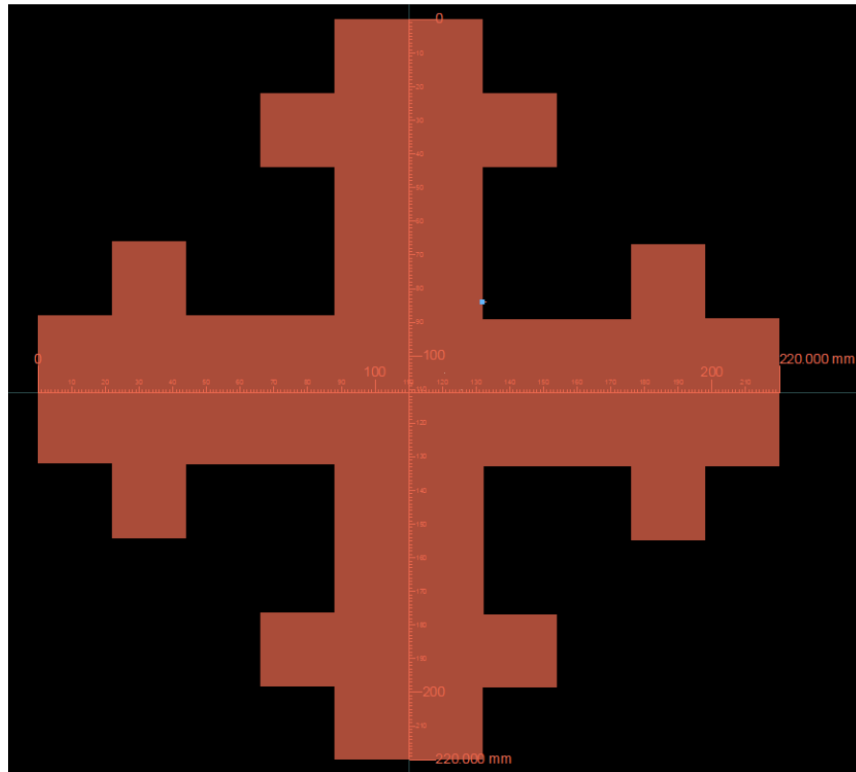
A continuación, los resultados obtenidos:



**Figura 2.19** Frecuencias de resonancia y parámetro S11 obtenidos en la segunda iteración.

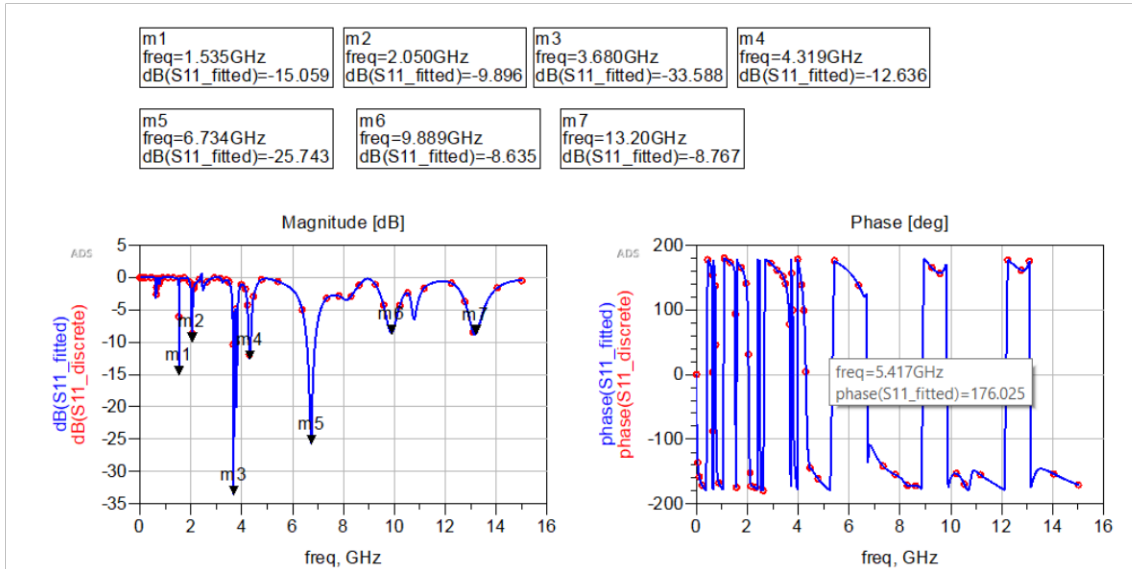
Se puede observar que solo se obtienen 4 frecuencias de resonancia, de estas ninguna cumple con la condición de que el parámetro S11 sea menor o igual a -10dB, ni se obtiene resonancia en la frecuencia objetivo de 3.5 GHz.

Por tanto, se procede a realizar modificaciones en las dimensiones de la antena hasta lograr los resultados deseados. En la figura 2.20 se muestra la antena a simular con las dimensiones modificadas:



**Figura 2.20** Segunda iteración con las dimensiones modificadas.

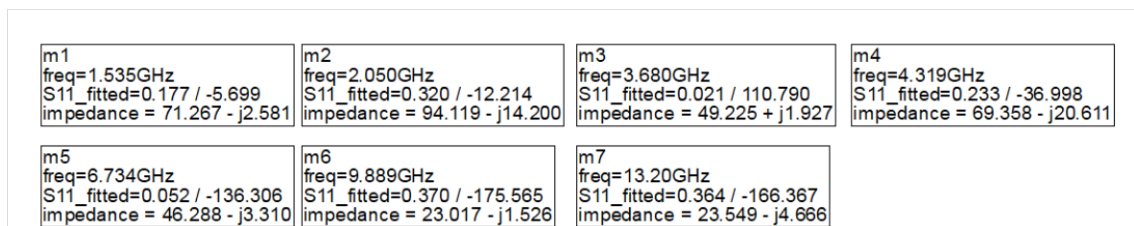
A continuación, en la figura 2.21 se muestran los resultados obtenidos para esta antena modificada.



**Figura 2.21** Frecuencias de resonancia y parámetro S11 obtenidos en la segunda iteración con dimensiones modificadas.

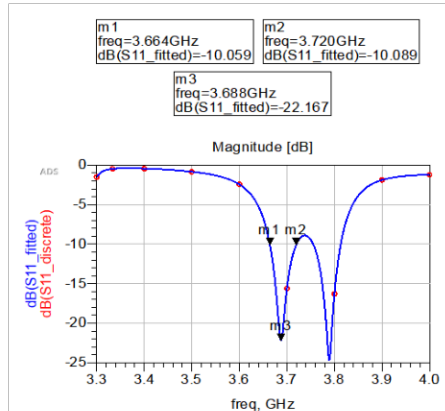
Se observa que con las modificaciones realizadas a las dimensiones de la antena se obtienen resultados que se ajustan a los requeridos. Se logra resonar en 7 frecuencias de las cuales 5 cumplen con la condición de que el parámetro S11 sea menor o igual que -10dB y adicionalmente se logra resonar en la frecuencia de 3.6 GHz.

A continuación, la figura 2.22 muestra las impedancias a las frecuencias de resonancia obtenidas:



**Figura 2.22** Valores de impedancia obtenidos a las frecuencias de resonancia para la segunda iteración del fractal de Vicsek.

A continuación, se presenta el ancho de banda de la frecuencia de 3.5 GHz obtenido gráficamente.



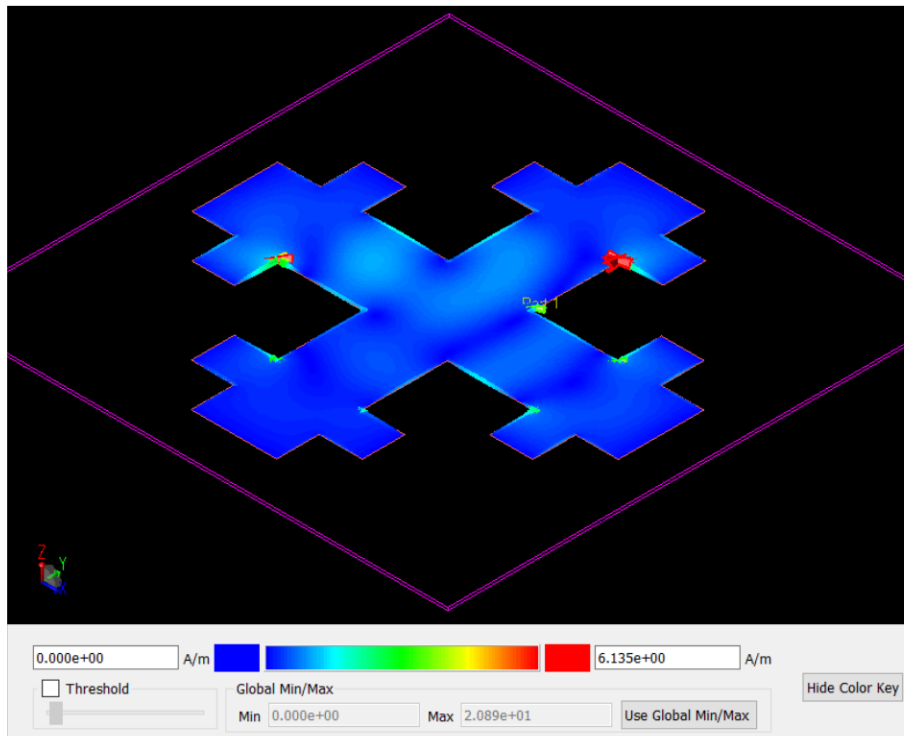
**Figura 2.23** Análisis de las frecuencias necesarias para calcular el ancho de banda de la segunda iteración del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas para la frecuencia de 3.5 GHz.

Se procede de la misma forma que con las iteraciones anteriores:

$$AB = 3.720 \times 10^9 - 3.664 \times 10^9$$

$$AB = 56 \text{ MHz}$$

En la figura 2.24 se muestra la distribución de corriente en la segunda iteración del fractal de Vicsek:



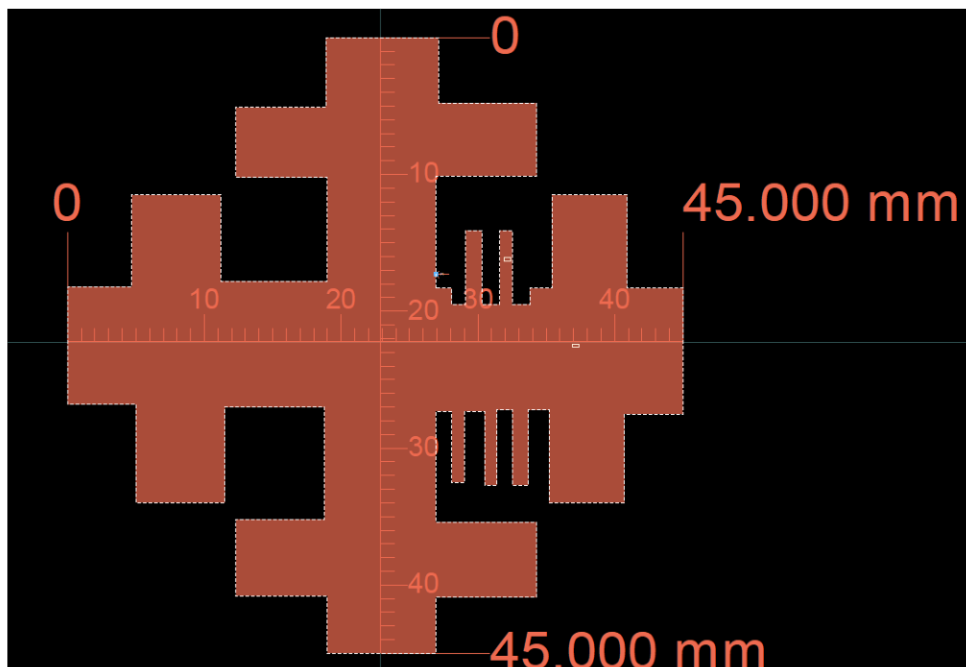
**Figura 2.24** Distribución de corriente en la iteración 2 del fractal de Vicsek.

Para este caso, se logra observar que la mayor concentración de corriente se encuentra sobre el puerto de alimentación, ya no alrededor del mismo, como se tenía en las anteriores iteraciones; adicionalmente, se tiene más concentración de corriente en los bordes internos de cada cruz. En esta iteración se tiene una distribución de corriente completamente diferente en comparación con las anteriores iteraciones.

Si bien es cierto, se lograron obtener los resultados deseados; sin embargo, la antena quedó con dimensiones muy grandes en comparación con el resto de las iteraciones, aproximadamente 22 cm de largo. Esto no sería óptimo para las aplicaciones a las cuales se tiene destinada la antena.

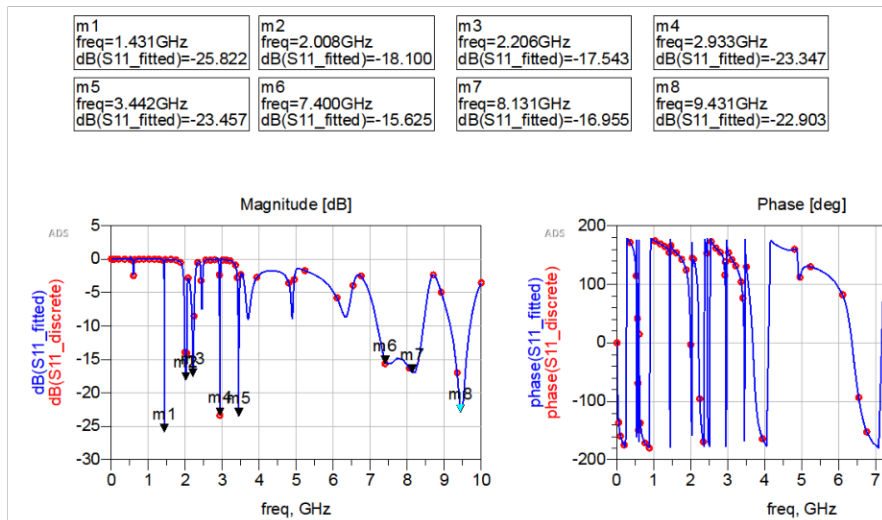
Por lo tanto, se procede a construir una nueva antena, pero esta vez introduciendo el concepto de corrugaciones en la antena, tal y como se describió en la sección 1.4.5 de este trabajo.

En la figura 2.25 se muestra la segunda iteración del fractal de Vicsek con las corrugaciones añadidas y manteniendo las dimensiones iniciales:



**Figura 2.25** Segunda iteración del fractal de Vicsek con corrugaciones añadidas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para esta antena:

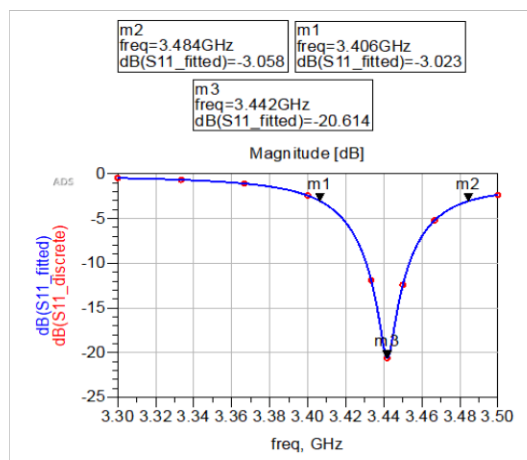


**Figura 2.26** Frecuencias de resonancia y parámetros S11 obtenidos en la segunda iteración con corrugaciones.

Se obtienen 8 frecuencias de resonancia, de las cuales todas cumplen con la condición de que el parámetro S11 sea menor o igual a -10dB. Adicionalmente, se logra resonar en la frecuencia de 3.4 GHz, la cual está dentro del rango objetivo.

Con estos resultados se demuestra la utilidad de las corrugaciones ya que, a partir de la antena diseñada anteriormente, en la segunda iteración, se lograron obtener los resultados deseados sin aumentar las dimensiones de la antena.

A continuación, se presenta el ancho de banda de la frecuencia de 3.4 GHz obtenido gráficamente.

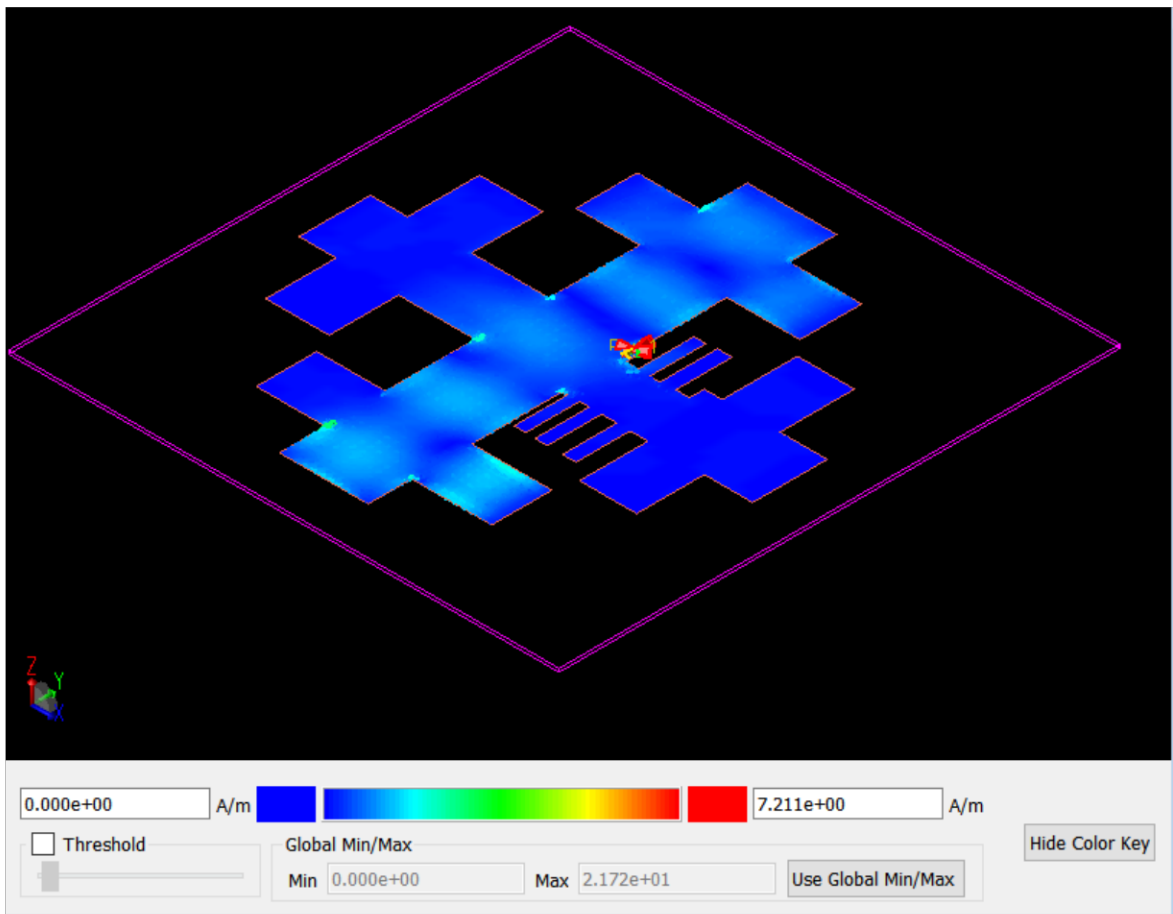


**Figura 2.27** Análisis de las frecuencias necesarias para calcular el ancho de banda de la segunda iteración del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas para la frecuencia de 3.4 GHz.

Se procede de la misma forma que con las iteraciones anteriores:

$$AB = 3.484 \times 10^9 - 3.406 \times 10^9$$
$$AB = 78 \text{ MHz}$$

A continuación, se muestra la distribución de corriente en esta antena.



**Figura 2.28** Distribución de corriente en la iteración 2 del fractal de Vicsek con corrugaciones.

Se logra observar que la mayor concentración de corriente se obtiene alrededor del puerto de alimentación y también en las partes cercanas a este. Adicionalmente, se observa que en todos los bordes de la antena hay concentración de corriente. En esta iteración se tiene una distribución de corriente completamente diferente en comparación con las anteriores iteraciones.

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

A continuación, se muestran y analizan los resultados obtenidos.

##### • Iteración 0

Como se mostró en el capítulo 2 se inició con la simulación del parche rectangular diseñado, este correspondía a la iteración 0 del fractal de Vicsek, se observó que con las dimensiones calculadas no se logró cumplir el objetivo de diseño por lo que se procedió a modificar las dimensiones del parche, tal y como se indicó en la sección 2.1.2. Una vez realizadas estas modificaciones se logró cumplir los objetivos planteados en el diseño.

La Figura 3.1 muestra una comparativa entre los resultados del parche diseñado y el parche modificado.

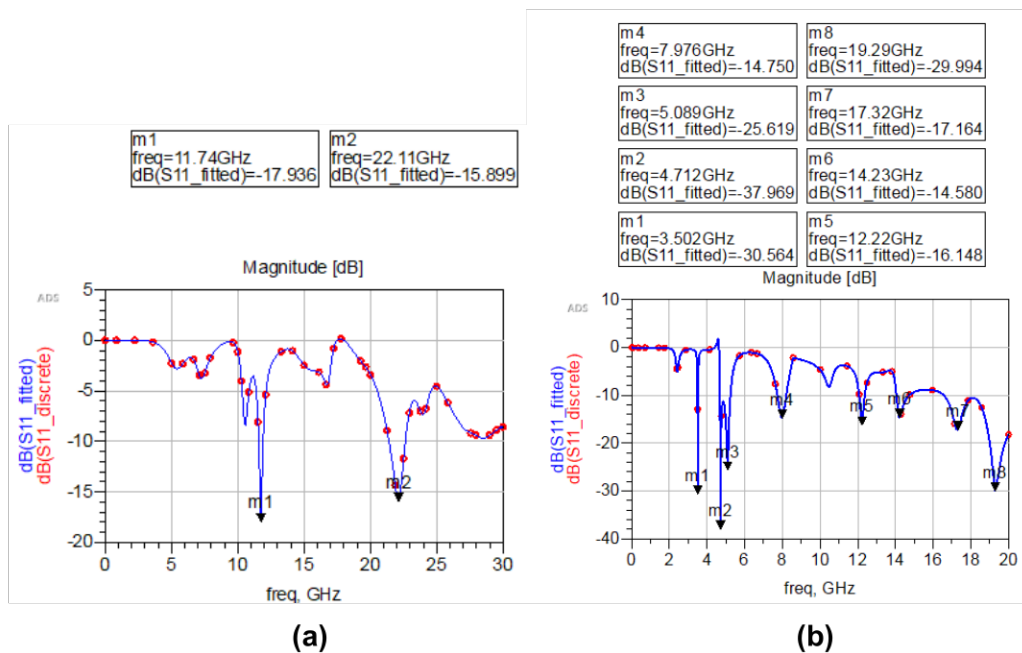


Figura 3.1 (a) Resultados para el parche rectangular diseñado.

(b) Resultados para el parche rectangular modificado.

Las modificaciones permiten obtener los resultados deseados, modificando las dimensiones del parche, en este caso se aumentaron las dimensiones del parche logrando así, resonar en las frecuencias deseadas y obteniendo un parámetro S11 menor o igual a -10 dB.

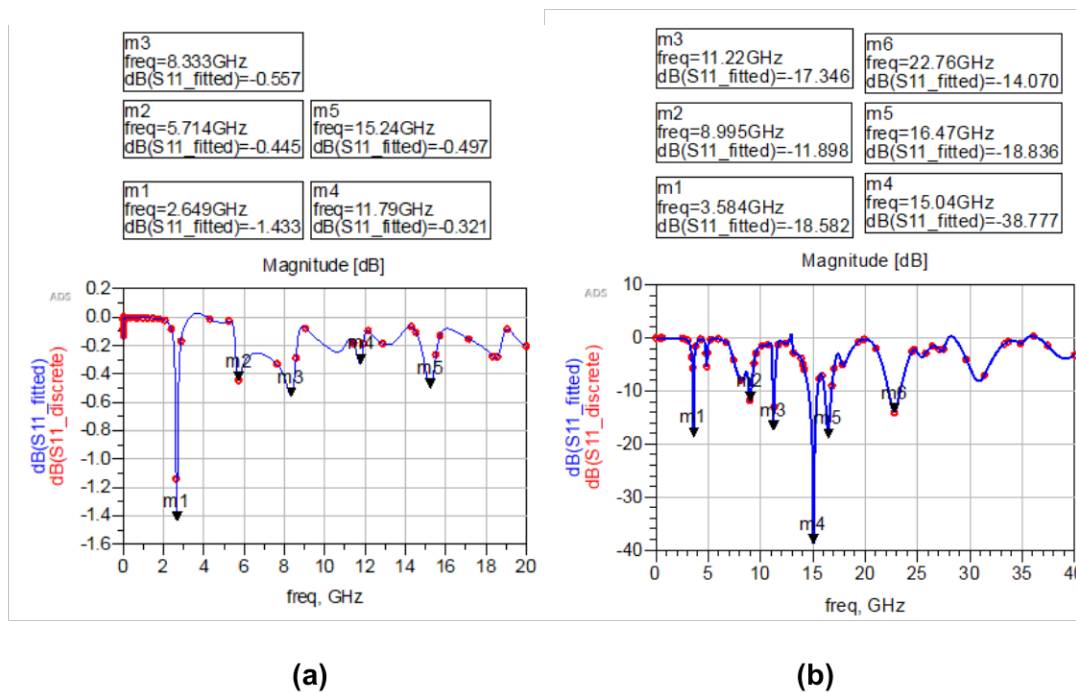


En cuanto al ancho de banda, según lo mostrado en la figura 2.9, se obtiene un valor de 122 MHz para la frecuencia de 3.5 GHz.

### • Primera iteración

Al igual que en caso de la iteración 0, en la primera iteración fue necesario modificar las dimensiones de la antena, ya que inicialmente no se lograron obtener los resultados deseados. Las dimensiones de la antena final se mantienen dentro de un rango aceptable (dimensiones reducidas) para las aplicaciones deseadas.

La figura 3.2 muestra una comparativa entre los resultados de la primera iteración original y la primera iteración con las dimensiones modificadas.



**Figura 3.2 (a)** Resultados para la primera iteración del fractal de Vicsek diseñado.

**(b)** Resultados para la primera iteración del fractal de Vicsek modificado.

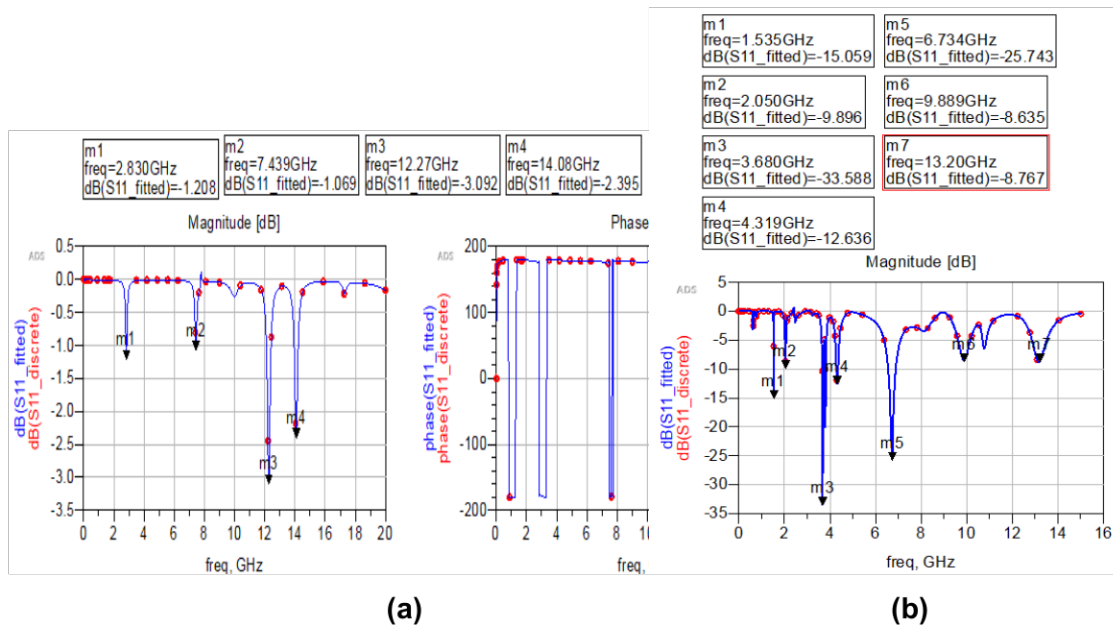
Como se puede observar, con las dimensiones diseñadas no se obtuvieron los resultados deseados, por lo que fue necesario modificar las dimensiones de la antena. En este caso se aumentaron las dimensiones y se logró resonar en las frecuencias deseadas y con el parámetro  $S_{11}$  por debajo de los -10 dB.

En cuanto al ancho de banda, según lo mostrado en la figura 2.16, se obtiene un valor de 274 MHz para la frecuencia de 3.5 GHz.

## • Segunda Iteración

Para la segunda iteración, se procedió de la misma manera que en los casos anteriores. Al no lograr obtener los resultados deseados, se procedió a modificar las dimensiones de la antena hasta lograr resonar en las frecuencias objetivo y con el parámetro S11 menor o igual a -10 dB.

La figura 3.3 muestra una comparativa entre los resultados obtenidos con la segunda iteración diseñada y la segunda iteración modificada.



**Figura 3.3 (a)** Resultados para la segunda iteración del fractal de Vicsek diseñado.

**(b)** Resultados para la segunda iteración del fractal de Vicsek modificado.

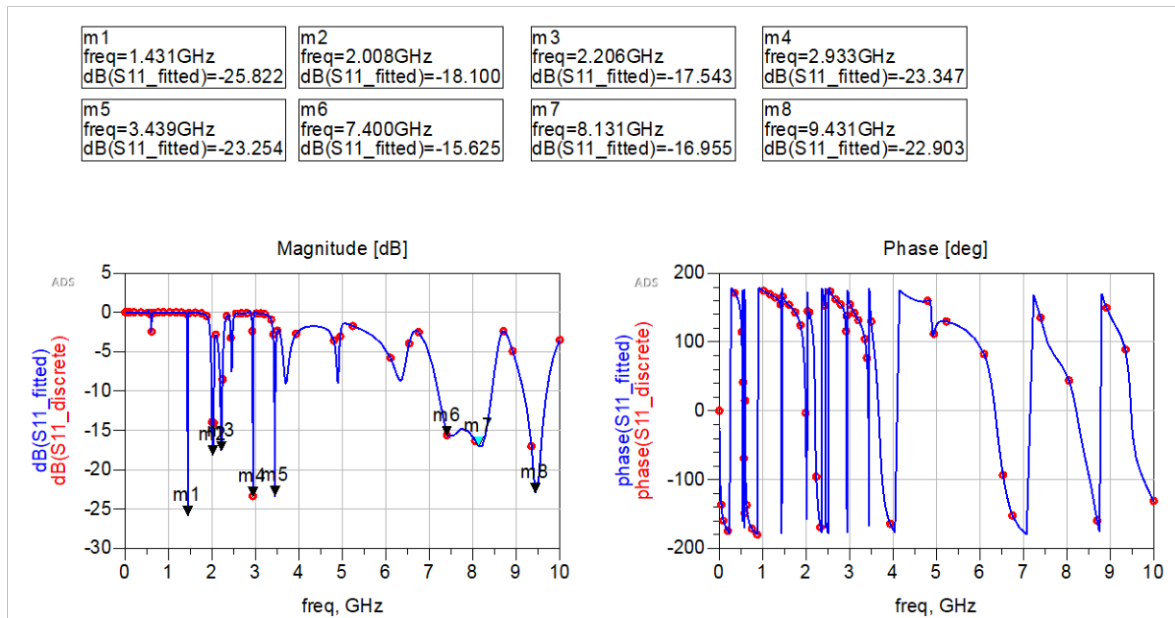
Como se observa en la figura 3.3, se logran obtener los resultados deseados, aumentando, una vez más, las dimensiones de la antena fractal; pero en esta ocasión en la primera aproximación, la antena resultante quedó con dimensiones muy significativas en comparación con el resto de las iteraciones, esto volvía a la antena inadecuada para las aplicaciones planteadas en este trabajo. Por este motivo se procedió a introducir el concepto de corrugaciones en la antena fractal, realizando una nueva modificación a la segunda iteración diseñada inicialmente. Con estos cambios, se logran obtener los resultados deseados y adicionalmente mantener las dimensiones de la antena fractal bajo los rangos necesarios.

En cuanto al ancho de banda, según lo mostrado en la figura 2.23, se obtiene un valor de 56 MHz para la frecuencia de 3.6 GHz.

- **Segunda iteración con corrugaciones**

Como se mostró en el anterior capítulo, luego de realizar las modificaciones necesarias en la segunda iteración del fractal de Vicsek, la antena resultante tenía dimensiones muy significativas (220mm de lado). Esto la hacía impráctica para las aplicaciones deseadas, por lo cual fue necesario introducir el concepto de corrugaciones en la antena, tal y como se mostró en la sección 1.4.5.

Una vez realizado esto, se obtuvieron los resultados deseados manteniendo las dimensiones de la antena resultante dentro de un rango aceptable. La figura 3.4 muestra los resultados que se obtuvieron con dichos cambios.



**Figura 3.4** Resultados obtenidos en la segunda iteración del fractal de Vicsek con corrugaciones.

En cuanto al ancho de banda, según lo mostrado en la figura 2.27, se obtiene un valor de 78 MHz para la frecuencia de 3.4 GHz.

A continuación, se presenta la tabla 3.1, la cual contiene una comparativa entre los resultados de todas las iteraciones diseñadas junto a sus modificaciones.

**Tabla 3.1** Comparativa entre los resultados de las antenas diseñadas y modificadas

Antena	Parámetro	Iteración cero	Primera Iteración	Segunda iteración	Segunda iteración con corrugaciones
Diseñada	Frecuencias que cumplen con el parámetro S11 <= -10dB.	11.74 GHz 22.11 GHz	0	0	1.431 GHz 2.008 GHz 2.206 GHz 3.439 GHz 2.933 GHz 7.400 GHz 8.213 GHz 9.431 GHz
	Resonancia en 3.5 GHz.	No	No	No	Si
	Ancho de banda en 3.5GHZ	NA	NA	NA	78 MHz
Modificada	Frecuencias que cumplen con el parámetro S11 <= -10db.	3.502 GHz 4.712 GHz 5.089 GHz 7.976 GHz 12.22 GHz 14.23 GHz 17.32 GHz 19.29 GHz	3.584 GHz 8.995 GHz 12.22 GHz 15.04 GHz 16.47 GHz 22.76 GHz	1.535 GHz 3.680 GHz 4.139 GHz 6.734 GHz	NA
	Resonancia en 3.5 GHz.	Si	Si	Si	NA
	Ancho de banda en 3.5GHZ	122 MHz	274 MHz	56 MHz	NA

En base a los resultados obtenidos, se puede analizar el comportamiento del fractal de Vicsek, donde se puede indicar que a medida que el número de iteración aumenta, las frecuencias de resonancia disminuyen, en este caso se observa que las frecuencias de resonancia que cumplen con el parámetro S11 menor o igual -10 dB disminuyen de dos en dos al aumentar de iteración; adicionalmente, el valor de la frecuencia aumenta considerablemente por lo cual es necesario modificar las dimensiones de la antena para lograr obtener los resultados que se desean. En este caso fue necesario aumentar las

dimensiones de las antenas para lograr que las frecuencias de resonancia se movieran hacia abajo hasta conseguir resonar en 3.5 GHz.

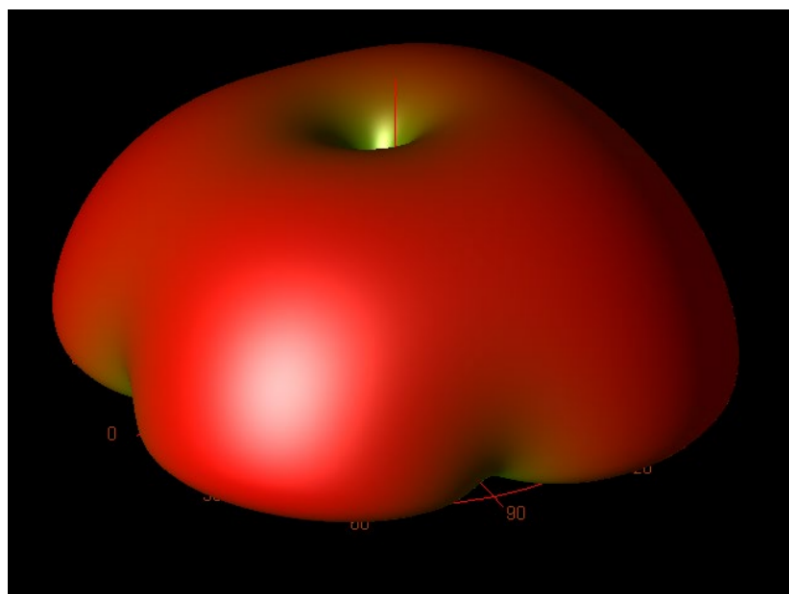
Otra observación interesante de los resultados de este trabajo fue la utilidad de las corrugaciones en la antena fractal, ya que, gracias a estas, fue posible obtener los resultados deseados en la segunda iteración, sin aumentar drásticamente las dimensiones de la antena, tal y como se vio en la figura 2.16, en la cual la antena resultante tenía dimensiones de 220mm de lado (22cm), lo cual la hacía una antena muy grande para la aplicación deseada (comunicaciones celulares).

En el caso de los anchos de banda para las frecuencias objetivo en la banda de 3.5 GHz, se pudo observar que la iteración en la cual se logró obtener un mayor valor de ancho de banda fue la primera iteración con dimensiones modificadas, alcanzando un valor de 274 MHz de ancho de banda.

Otra parte importante para analizar en la sección de resultados son ciertos parámetros característicos del fractal de Vicsek propuesto. En este caso se presentarán los parámetros de radiación de cada iteración y parámetros como la ganancia y el ancho de banda.

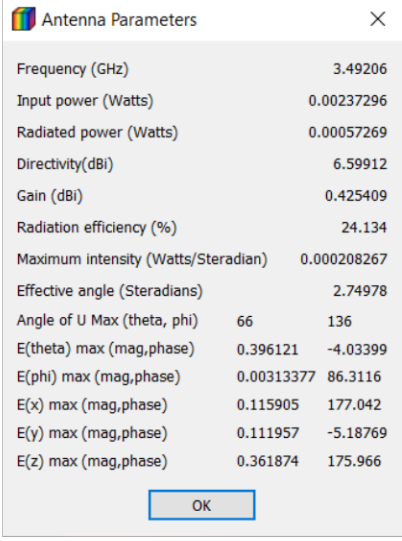
- **Iteración 0**

La figura 3.5 muestra el patrón de radiación resultante para la iteración 0 del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas a la frecuencia de interés de 3.5 GHz.



**Figura 3.5** Patrón de radiación de la iteración 0 del fractal de Vicsek a la frecuencia de interés.

A continuación, la figura 3.6 muestra los parámetros de radiación obtenidos para la iteración 0 a la frecuencia de interés.



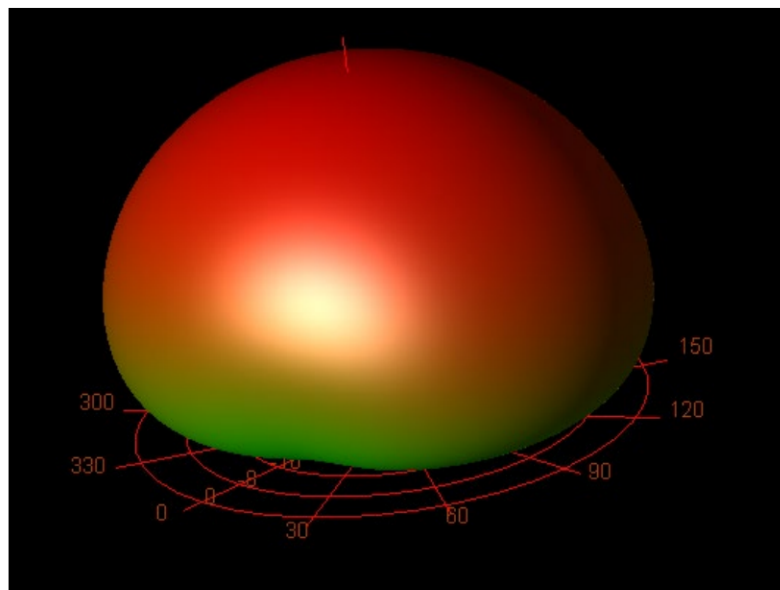
Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	3.49206
Input power (Watts)	0.00237296
Radiated power (Watts)	0.00057269
Directivity(dBi)	6.59912
Gain (dBi)	0.425409
Radiation efficiency (%)	24.134
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000208267
Effective angle (Steradians)	2.74978
Angle of U Max (theta, phi)	66 136
E(theta) max (mag,phase)	0.396121 -4.03399
E(phi) max (mag,phase)	0.00313377 86.3116
E(x) max (mag,phase)	0.115905 177.042
E(y) max (mag,phase)	0.111957 -5.18769
E(z) max (mag,phase)	0.361874 175.966

**Figura 3.6** Parámetros de radiación de la iteración 0 del fractal de Vicsek a la frecuencia de interés.

De estos parámetros se puede resaltar la ganancia de la antena, la cual corresponde a un valor de 0.425409 dBi y una eficiencia de radiación de 24.134%.

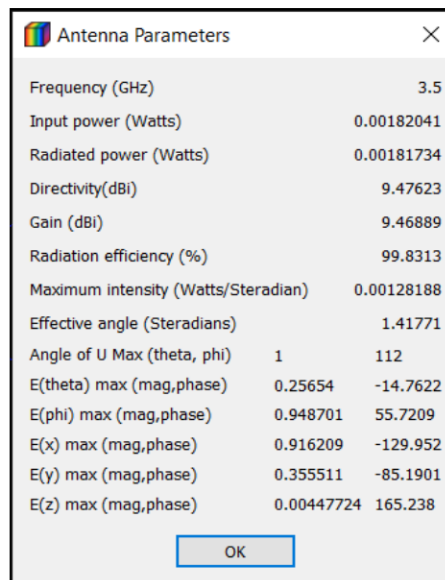
- **Primera iteración**

La figura 3.7 muestra el patrón de radiación resultante para la primera iteración del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas a la frecuencia de interés de 3.5 GHz.



**Figura 3.7** Patrón de radiación de la primera iteración del fractal de Vicsek a la frecuencia de interés.

A continuación, la figura 3.8 muestra los parámetros de radiación obtenidos para la primera iteración a la frecuencia de interés.



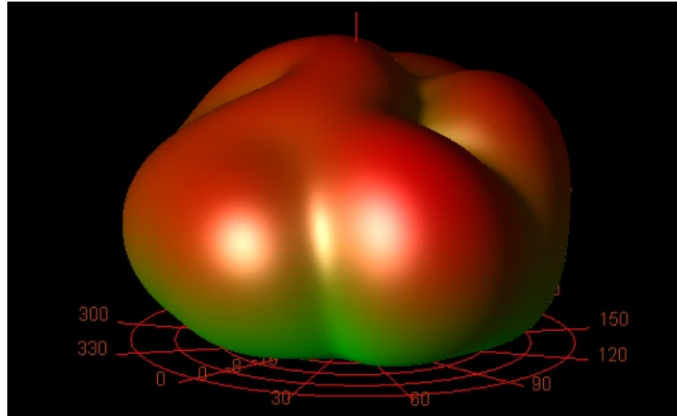
Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	3.5
Input power (Watts)	0.00182041
Radiated power (Watts)	0.00181734
Directivity(dBi)	9.47623
Gain (dBi)	9.46889
Radiation efficiency (%)	99.8313
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00128188
Effective angle (Steradians)	1.41771
Angle of U Max (theta, phi)	1 112
E(theta) max (mag,phase)	0.25654 -14.7622
E(phi) max (mag,phase)	0.948701 55.7209
E(x) max (mag,phase)	0.916209 -129.952
E(y) max (mag,phase)	0.355511 -85.1901
E(z) max (mag,phase)	0.00447724 165.238

**Figura 3.8** Parámetros de radiación de la primera iteración del fractal de Vicsek a la frecuencia de interés.

De estos parámetros se pueden resaltar la ganancia de la antena, la cual corresponde a un valor de 9.46889 dBi y una eficiencia de radiación de 99.8313%, los cuales son valores mucho mejores a los que se obtuvieron en la iteración 0.

- **Segunda iteración**

La figura 3.9 muestra el patrón de radiación resultante para la segunda iteración del fractal de Vicsek con las dimensiones modificadas a la frecuencia de interés de 3.5 GHz.



**Figura 3.9** Patrón de radiación de la segunda iteración del fractal de Vicsek a la frecuencia de interés.

A continuación, la figura 3.10 muestra los parámetros de radiación obtenidos para la segunda iteración a la frecuencia de interés.

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	3.65972
Input power (Watts)	0.00226889
Radiated power (Watts)	0.00219608
Directivity(dBi)	10.6986
Gain (dBi)	10.557
Radiation efficiency (%)	96.7909
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00205258
Effective angle (Steradians)	1.06991
Angle of U Max (theta, phi)	45 202
E(theta) max (mag,phase)	1.16576 60.4864
E(phi) max (mag,phase)	0.433045 37.6281
E(x) max (mag,phase)	0.618035 -113.661
E(y) max (mag,phase)	0.696465 -132.454
E(z) max (mag,phase)	0.82432 -119.514

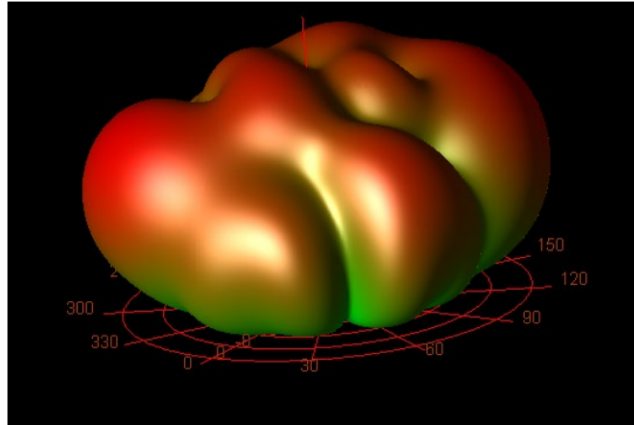
**Figura 3.10** Parámetros de radiación de la segunda iteración del fractal de Vicsek a la frecuencia de interés.

De estos parámetros se puede resaltar la ganancia de la antena, la cual corresponde a un valor de 10.557 dBi y una eficiencia de radiación de 99.7909%, los cuales representan, en el caso de la ganancia, una mejora en comparación con la primera iteración y la iteración 0 del fractal de Vicsek.

- **Segunda iteración con corrugaciones**

La figura 3.11 muestra el patrón de radiación resultante para la segunda iteración del fractal de Vicsek con corrugaciones a la frecuencia de interés de 3.5 GHz.





**Figura 3.11** Patrón de radiación de la segunda iteración del fractal de Vicsek con corrugaciones a la frecuencia de interés. Finalmente, la figura 3.12 muestra los parámetros de radiación obtenidos para la segunda iteración con corrugaciones a la frecuencia de interés.

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	3.5
Input power (Watts)	0.00103347
Radiated power (Watts)	0.00100221
Directivity(dBi)	11.5112
Gain (dBi)	11.3779
Radiation efficiency (%)	96.9752
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00112947
Effective angle (Steradians)	0.88733
Angle of U Max (theta, phi)	43 139
E(theta) max (mag,phase)	0.914747 -113.359
E(phi) max (mag,phase)	0.119364 96.6258
E(x) max (mag,phase)	0.438823 61.5246
E(y) max (mag,phase)	0.518891 -108.381
E(z) max (mag,phase)	0.623856 66.6413

**Figura 3.12** Parámetros de radiación de la segunda iteración del fractal de Vicsek con corrugaciones a la frecuencia de interés.

De estos parámetros se puede resaltar la ganancia de la antena, la cual corresponde a un valor de 11.3779 dBi y una eficiencia de radiación de 96.9752%, los cuales representan, en el caso de la ganancia, una mejora en comparación con todas las iteraciones anteriores.

Una vez presentados y analizados todos los resultados de las iteraciones de la antena fractal de Vicsek, se puede concluir que los mejores resultados se lograron en dos de las iteraciones presentadas, la primera y la segunda iteración con corrugaciones ya que se consiguen los mejores valores de ganancia, parámetro S11, una excelente eficiencia de radiación y un mayor valor de ancho de banda en el caso de la primera iteración.

## 3.2 Conclusiones

- De acuerdo con lo presentado en este trabajo de integración curricular, se logró diseñar y simular una antena fractal de Vicsek tipo parche, la cual tiene la característica de ser multiresonante y opera principalmente en la banda de 3.5 GHz.
- Se logró cumplir que la antena fractal de Vicsek tipo parche presentada cumpliera con la característica de que su parámetro S11 fuera menor o igual a -10 dB para todas las frecuencias de resonancias que se obtuvieron, esto fue posible gracias a la metodología propuesta en la que se realiza la modificación de las dimensiones de la antena hasta conseguir los resultados deseados.
- Se logró que todas las iteraciones presentadas de la antena fractal de Vicsek tipo parche sean multiresonantes para que operen principalmente en la banda de 3.5 GHz y que todas las frecuencias de resonancia cumplan que el parámetro S11 sea menor o igual a -10 dB, esto fue posible gracias a la metodología propuesta en la que se realiza modificaciones a las dimensiones de la antena hasta conseguir los resultados deseados.
- Se logró comprobar que al aumentar las dimensiones de la antena fractal de Vicsek, las frecuencias de resonancia disminuían su valor.
- De los resultados obtenidos se observa que al aumentar el número de iteración del fractal de Vicsek, los parámetros de radiación de la antena fractal mejoran considerablemente con un diagrama de radiación resultante que se aproxima al de una antena omnidireccional.
- Se logró comprobar la utilidad de las corrugaciones en antenas, ya que al utilizarlas en la antena fractal de Vicsek se pudo obtener resonancia en ocho frecuencias distintas las cuales cumplían con la condición de tener un parámetro S11 menor o igual a -10 dB y entre dichas frecuencias se obtuvo resonancia en la banda objetivo de 3.5 GHz, todo esto sin la necesidad de aumentar drásticamente las dimensiones de la antena.
- Se logró observar que en la primera iteración del fractal de Vicsek se obtiene un patrón de radiación omnidireccional y un ancho de banda de 274 MHz, esto la hace la antena perfecta para su aplicación en comunicaciones celulares.
- Se logró observar que de las tres iteraciones de la antena fractal de Vicsek presentadas en este trabajo de integración curricular, la primera iteración y la segunda iteración con corrugaciones son las antenas con los mejores resultados. Estas antenas se podrían utilizar para aplicaciones de comunicaciones celulares específicamente para

el 5G y para comunicaciones satelitales de acuerdo con las frecuencias que se obtuvieron.

### **3.3 Recomendaciones**

- Se recomienda realizar más iteraciones de la antena fractal de Vicsek para lograr observar si el comportamiento de estas se mantiene o varía de alguna forma.
- Se recomienda realizar la construcción física de la antena fractal de Vicsek presentada en este trabajo de integración curricular y realizar las pruebas pertinentes para lograr observar su comportamiento real y obtener sus parámetros de radiación en condiciones reales.
- Se recomienda aplicar las corrugaciones en el resto de las iteraciones de la antena fractal de Vicsek presentada en este trabajo de integración curricular para comprobar si los resultados que se obtienen son mejores que los que se obtuvieron sin las corrugaciones.
- Se recomienda adicionar un plano de tierra en el parche para observar cuál es el comportamiento de la antena fractal de Vicsek y cómo cambian los resultados en comparación con los que se presentaron en este trabajo de integración curricular.
- Se recomienda realizar un diseño de una antena fractal de Vicsek para otro tipo de aplicaciones, en las cuales no importe el tamaño de la misma, para observar su comportamiento y los resultados que se obtengan.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Anchundia, J. Anchundia and B. Chere, "La tecnología 5G en el Ecuador. Un análisis desde los requerimientos 5G", Polo del Conocimiento, no. 42, p. 811, febrero 2020. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7435304.pdf>.
- [2] GSMA, "Espectro 5G - 26 GHz y 28 GHz. El impulso creciente detrás de las bandas milimétricas", octubre 2019. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2018/02/Espectro-5G-26-GHz-y-28-GHz.pdf>.
- [3] J. Anguera y A. Perez, Teoría de Antenas, Barcelona: La Salle, 2008, p. 20.
- [4] M. E. Bouchti, "Diseño y Medición de una Antena Wearable", Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016, p.14, [Online], Available: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106668/mohamed.el.bouchti\\_119205.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106668/mohamed.el.bouchti_119205.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [5] D. B. Hernández, «"DISEÑO DE NUEVAS ANTENAS",» Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2012, p. 8-9, [Online], Available: <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20121219DanielBrandehernandez.pdf>.
- [6] Á. Cardama Aznar, L. Jofre Roca, J. M. Ruis Casals, J. Romeu Robert, S. Blanch Boris y M. Ferrando Bataller, "Antenas", Primera ed., Barcelona: Edicions UPC, 1998, p. 20.
- [7] M. Reckeweg Dr. C. Rohner. Antenna basics. Rohde Schwarz, page 14, 2015.
- [8] P. A. Valdés Vásquez, "Introducción a la Geometría Fractal", Universidad de Bio-Bio, \*Chillán, 2016, p. 9-10, [Online], Available: [http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1998/3/Valdes\\_Vasquez\\_Patricio.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1998/3/Valdes_Vasquez_Patricio.pdf)
- [9] G. Ivorra Rodriguez, "Cálculo de la dimensión fractal de objetos 3D", Universidad de Alicante, 2017, p.12, [Online], Available: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/67830/1/Calculo\\_de\\_la\\_dimension\\_fractal\\_sobre\\_objetos\\_3D\\_IVORRA\\_RODRIGUEZ\\_GACEL.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/67830/1/Calculo_de_la_dimension_fractal_sobre_objetos_3D_IVORRA_RODRIGUEZ_GACEL.pdf).
- [10] E. Weisstein, "Box Fractal", Wolfram MathWorld, 2021, [Online], Available: <https://mathworld.wolfram.com/BoxFractal.html>.
- [11] M. P. Herrera Holguín y J. C. Inclán Luna, «Estudio y Metodología de Diseño de Antenas Utilizando Geometría Fractal (Antenas Fractales)», Escuela Politécnica

Nacional, Quito, 2004.

[12] J. A. Guillén Mass, "Estudio y Comportamiento de Antenas Planas de Abertura con Geometrías Fractales en la Banda de Operaciones UHF", Universidad Católica

Andrés Bello, 2015.

[13] F. J. Vizúete Bassante, "Estudio, por medio de simulaciones electromagnéticas, de antenas de apertura de banda ancha en ondas milimétricas para aplicaciones 5G a 30 GHz", EPN, Quito, 2021, p. 60-61.