



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,  
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

DISEÑO ANTENA MICROSTRIP DE RANURA Y  
ANTENA DE PARCHE CON GEOMETRÍA FRACTAL.

Víctor Javier Villar Etxeondo

Mario Sorolla Ayza y Miguel Beruete Díaz

Pamplona, 02 Marzo 2012



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA  
E.T.S.I.I. y de Telecomunicación  
Campus de Arrosadía s/n  
31006-Pamplona Navarra-Spain  
Tfno: 34-48-169000 Fax: 34-48-169169

**upna**  
Universidad  
Pública de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

## *Acta de Proyecto Final de Carrera*

*Título:*

“DISEÑO ANTENA MICROSTRIP DE RANURA Y  
ANTENA DE PARCHE CON GEOMETRÍA FRACTAL”

*Alumno: Víctor Javier Villar Etxeondo*

*Tutor del Proyecto: Dr. Miguel Beruete Díaz y Dr. Mario Sorolla Ayza*

*Reunido el tribunal, compuesto por los siguientes miembros,*

*Presidente,*

*Secretario,*

*Vocal 1º,*

*Fdo:.....*

*Fdo:.....*

*Fdo:.....*

*acuerda otorgar la calificación de*

*Pamplona,.....de.....de 20.....*

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	4
<b>1.1. Objetivo del proyecto</b> .....	4
<b>1.2 Metodología del proyecto</b> .....	4
<b>1.2.1. Software empleado</b> .....	4
<b>2. Antenas</b> .....	6
<b>2.1. Definición</b> .....	6
<b>2.2. Parámetros de un sistema de antenas</b> .....	9
<b>2.2.1 Campos</b> .....	9
<b>2.2.2 Distancia campo lejano</b> .....	10
<b>2.2.3 Intensidad de radiación</b> .....	11
<b>2.2.4 Diagrama de radiación o patrón de radiación</b> .....	11
<b>2.2.5 Directividad</b> .....	12
<b>2.2.6 Eficiencia de radiación</b> .....	12
<b>2.2.7 Ganancia</b> .....	12
<b>2.2.8 Eficiencia de abertura</b> .....	13
<b>2.2.9 Área efectiva</b> .....	13
<b>2.2.10 Polarización</b> .....	14
<b>2.3. Antenas microstrip</b> .....	15
<b>2.3.1. Introducción</b> .....	15
<b>2.3.2. Ventajas y desventajas de las antenas microstrip</b> .....	15
<b>2.3.3. Campos de radiación</b> .....	16
<b>2.3.4. Métodos de alimentación</b> .....	17
<b>2.3.5. Antenas microstrip de ranura</b> .....	22
<b>2.3.6. Antenas de parche</b> .....	26
<b>2.3.7. Comparación antenas de parche y antenas de ranura</b> .....	29
<b>3. Antenas Fractales</b> .....	30
<b>3.1 Introducción</b> .....	30
<b>3.2 Propiedades de los fractales</b> .....	32
<b>3.2.1 Autosimilitud</b> .....	32
<b>3.2.2 Recursividad</b> .....	33
<b>3.2.3 Dimensión fractal</b> .....	33
<b>3.2.4 Space-filling</b> .....	35
<b>3.2.5 Detalle infinito</b> .....	35
<b>3.3 Los fractales y las antenas</b> .....	35
<b>3.3.1 Lazo de Sierpinski</b> .....	36
<b>4. Resultados</b> .....	39
<b>4.1 Antena microstrip de ranura</b> .....	39
<b>4.1.1 Antena microstrip de ranura</b> .....	39
<b>4.1.2. Antena de ranura microstrip con disminución gradual</b> .....	43
<b>4.1.3. Comparación de los resultados de los diseños</b> .....	47
<b>4.2 Antena de parche fractal alimentación coaxial (Lazo de Sierpinski)</b> .....	50
<b>4.2.1 Parche en forma de lazo</b> .....	51
<b>4.2.2 Parche lazo de Sierpinski iteración 2</b> .....	55
<b>4.2.3 Parche lazo de Sierpinski iteración 3</b> .....	60
<b>4.2.4 Comparación de los resultados de los diseños</b> .....	63
<b>5. Conclusiones</b> .....	67
<b>6. Referencias</b> .....	69

# **1. Introducción**

## ***1.1. Objetivo del proyecto***

El Proyecto a realizar consiste en diseñar una antena de ranura con alimentación microstrip, así como una antena parche con geometría fractal, mediante software para posteriormente analizar y evaluar los resultados obtenidos de sus parámetros por medio de simulaciones.

## ***1.2 Metodología del proyecto***

La realización del proyecto se ha estructurado en tres fases bien diferenciadas:

- I. Adquisición de conocimientos: fase dedicada al aprendizaje conceptual de antenas, así como una posterior especialización en los tipos de antenas objetos del proyecto. En esta fase también se realiza una formación acerca de la funcionalidad del software empleado en el diseño y simulación de las antenas.
- II. Diseño y optimización: en la cual se llevan a cabo los distintos diseños de las antenas mediante el software CST Microwave Studio (para el diseño de las antenas) y Autocad (para el diseño de la geometría fractal) atendiendo a los conceptos teóricos de la fase anterior, así como las correspondientes simulaciones de las antenas diseñadas, mediante CST Microwave Studio. Conforme se observan los resultados de las simulaciones, se realiza un estudio de los mismos y dependiendo del grado de cumplimiento del objetivo marcado para cada antena se producen cambios en los diseños originales, realizando un proceso de optimización hasta alcanzar unos resultados deseados.
- III. Valoración de resultados: por último, se procede a valorar los resultados obtenidos, mediante la realización de una memoria aclarativa y especificativa relativa a todo el proyecto en cuestión, en definitiva, a las dos fases anteriores.

### ***1.2.1. Software empleado***

#### **CST Design Enviroment**

Software comercial de la compañía Computer Simulation Technology (CST), siendo el punto de acceso a la edición CST Studio Suite, la cual posee diferentes herramientas especializadas para realizar simulaciones electromagnéticas, como son:

CST Design Studio, CST EM Studio, CST Particle Studio, CST Mphysics Studio, CST PCB Studio, CST Cable Studio, CST Microstripes y CST Microwave Studio la empleada en este proyecto.

CST Microwave Studio [1] es la herramienta concreta para simulaciones electromagnéticas 3D de componentes de alta frecuencia. Ofrece al usuario una amplia variedad de soluciones, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, y una serie de módulos específicos de soluciones para aplicaciones concretas. Posee a su vez la posibilidad de importar diferentes formatos CAD, con unos tiempos de ejecución óptimos.

### **AutoCAD**

Para el diseño de la geometría fractal, utilizada en el parche de una de las antenas de este proyecto, se ha realizado mediante la versión 2007 de AutoCAD.

Autocad es un software de diseño asistido por ordenador, sus principales funciones se basan en la creación de dibujo técnico en 2 dimensiones o modelados en 3 dimensiones. La utilización de este software para realizar la geometría fractal ha sido de gran de ayuda debido a la sencillez de manejo de la herramienta para dibujar dicha geometría, en este caso el Triángulo de Sierpinski.

Como se ha comentado con anterioridad CST Microwave Studio permite la importación de modelos CAD, entre ellos la importación de archivos con extensión .dxf, precisamente los generados por Autocad. La compatibilidad entre los dos software hace que las posibilidades en la creación de diferentes modelos de antenas en cuanto a diseño, sean ilimitadas.

## 2. Antenas

### *2.1. Definición*

La propagación de la energía electromagnética es el fenómeno físico clave que hace posible la comunicación sin cables. En este sistema de comunicación inalámbrico existe un dispositivo llamado *antena*, cuyo objetivo es actuar de interfaz entre una onda electromagnética guiada (a través de una línea de transmisión, guía de onda etc.) y una onda electromagnética no guiada, radiada en un medio ( en general el aire). En la siguiente Figura 1 se puede apreciar el funcionamiento básico entre antenas emisoras y receptoras. El transmisor puede ser descrito como una fuente Thevenin compuesto por un generador de tensión y un conjunto de impedancias en serie, proporcionando una potencia de transmisión a la antena transmisora. Dicha antena radia una onda esférica, la cual, a partir de largas distancias se aproxima a una onda plana. La antena receptora intercepta una porción de la onda en propagación y proporciona la potencia recibida a la impedancia de carga del receptor.

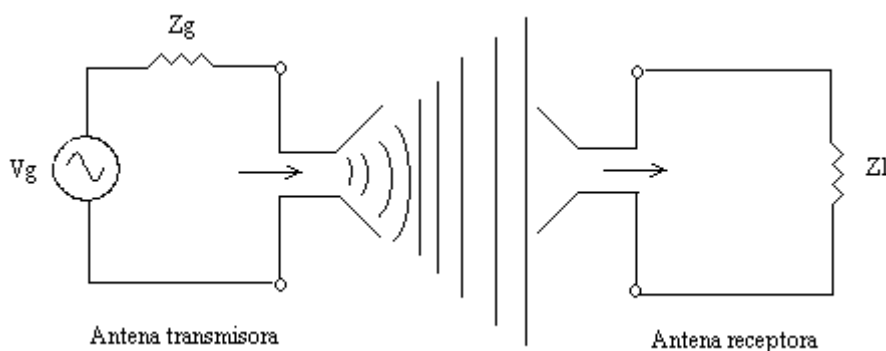


Figura 1. Esquema de funcionamiento entre antenas transmisoras y receptoras.

Las ondas electromagnéticas se diferencian según su longitud de onda y frecuencia, y el conjunto de todas ellas se denomina espectro electromagnético (Figura 2). Según la frecuencia que posean se emplearán para diferentes propósitos.

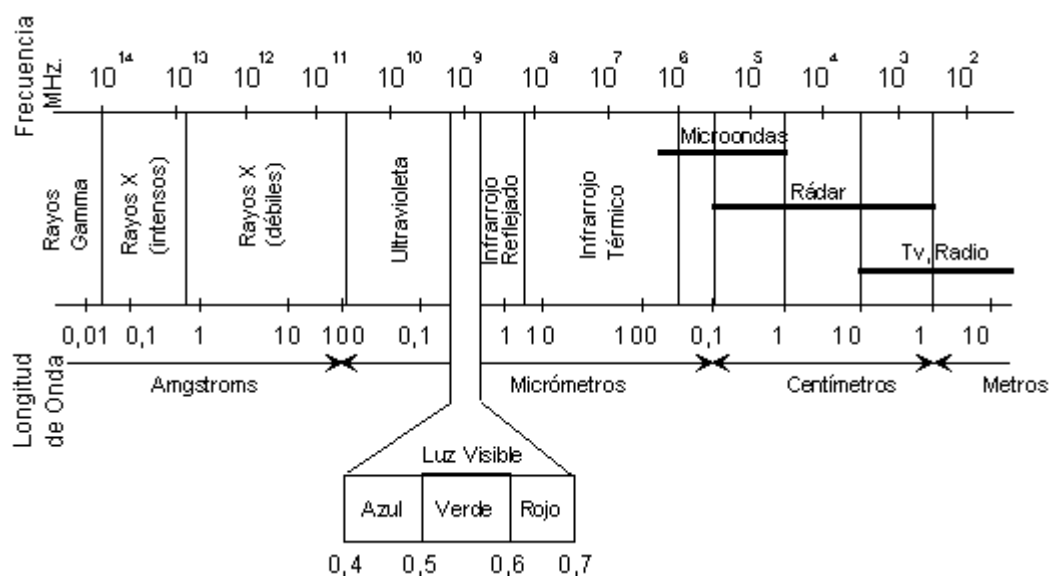


Figura 2. Espectro electromagnético Ref. : [2]

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Rayos gamma	< 10 pm	> 30,0 EHz	> $20 \cdot 10^{-15}$ J
Rayos X	< 10 nm	> 30,0 PHz	> $20 \cdot 10^{-18}$ J
Ultravioleta extremo	< 200 nm	> 1,5 PHz	> $993 \cdot 10^{-21}$ J
Ultravioleta cercano	< 380 nm	> 789 THz	> $523 \cdot 10^{-21}$ J
Luz Visible	< 780 nm	> 384 THz	> $255 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo cercano	< 2,5 $\mu$ m	> 120 THz	> $79 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo medio	< 50 $\mu$ m	> 6,00 THz	> $4 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo lejano/submilimétrico	< 1 mm	> 300 GHz	> $200 \cdot 10^{-24}$ J
Microondas	< 30 cm	> 1 GHz	> $2 \cdot 10^{-24}$ J
Ultra Alta Frecuencia - Radio	< 1 m	> 300 MHz	> $19.8 \cdot 10^{-26}$ J
Muy Alta Frecuencia - Radio	< 10 m	> 30 MHz	> $19.8 \cdot 10^{-28}$ J
Onda Corta - Radio	< 180 m	> 1,7 MHz	> $11.22 \cdot 10^{-28}$ J
Onda Media - Radio	< 650 m	> 650 kHz	> $42.9 \cdot 10^{-29}$ J
Onda Larga - Radio	< 10 km	> 30 kHz	> $19.8 \cdot 10^{-30}$ J
Muy Baja Frecuencia - Radio	> 10 km	< 30 kHz	< $19.8 \cdot 10^{-30}$ J

Tabla 1. Bandas del espectro electromagnético Ref.: [3]

En la Tabla 1 se muestra en detalle todas las bandas existentes en el espectro electromagnético, atendiendo a su longitud de onda, su frecuencia y energía.

Según el objetivo deseado existen multitud de antenas, las cuales se pueden catalogar en tres grupos generales:

1. Antenas de hilo:

Son las construidas con hilos conductores por donde circulan las corrientes que dan origen a los campos radiados. Se utilizan para las bandas de Onda Media (MF), Onda Corta (HF), Muy Alta Frecuencia (VHF) y Ultra Alta Frecuencia (UHF). Como ejemplos se pueden citar: antena dipolo, antena espiral o la antena Yagi. (Figura 3).



Figura 3. a)



Figura 3. b)



Figura 3. c)

Figura 3. a) Antena dipolo [4]. b) Antena espiral [5]. c) Antena Yagi [6].

## 2. Antenas de apertura (Figura 4):

Son excitadas por guías de ondas y utilizan superficies o aberturas para direccionar los campos electromagnéticos. Un ejemplo de este tipo de antenas es la antena de bocina (Figura 4).

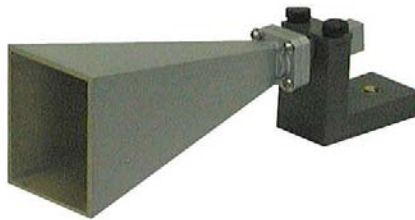


Figura 4. Antena de bocina [7].

## 3. Antenas planas (Figura 5):

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



Figura 5. Antena plana [8]



#### 4. Antenas de array o agrupación de antenas (Figura 6):

Cuando con un solo elemento no se consiguen las características de radiación requeridas de alguna aplicación, se emplea la combinación de un conjunto de antenas, obteniendo así una gran flexibilidad.



Figura 6. Agrupación de antenas [9].

## 2.2. Parámetros de un sistema de antenas

### 2.2.1 Campos

Considerando que la antena es situada en el origen de un sistema de coordenadas esférico, podemos definir el *campo eléctrico* de radiación como:

$$\bar{E}(r, \theta, \phi) = [\hat{\theta}E_{\theta}(\theta, \phi) + \hat{\phi}E_{\phi}(\theta, \phi)] \frac{e^{-jk_0r}}{r} \text{ V/m}, \quad (1.1)$$

dónde:

- $\bar{E}$  es el vector de campo eléctrico
- $E_{\phi}$  amplitud del campo eléctrico en el plano xy (Figura 7).
- $E_{\theta}$  amplitud del campo eléctrico en el plano zx (Figura 7).
- $\hat{\theta}$  (ángulo de elevación) y  $\hat{\phi}$  (ángulo de azimut): son dos vectores unitarios en el sistema de coordenadas esférico.
- $r$  es la distancia desde el origen
- $k_0 = 2\pi / \lambda$ , la constante de propagación en el espacio libre, dónde la longitud de onda  $\lambda = c / f = 3 \times 10^8 / f$  (para la frecuencia en Hz y la longitud de onda en metros)

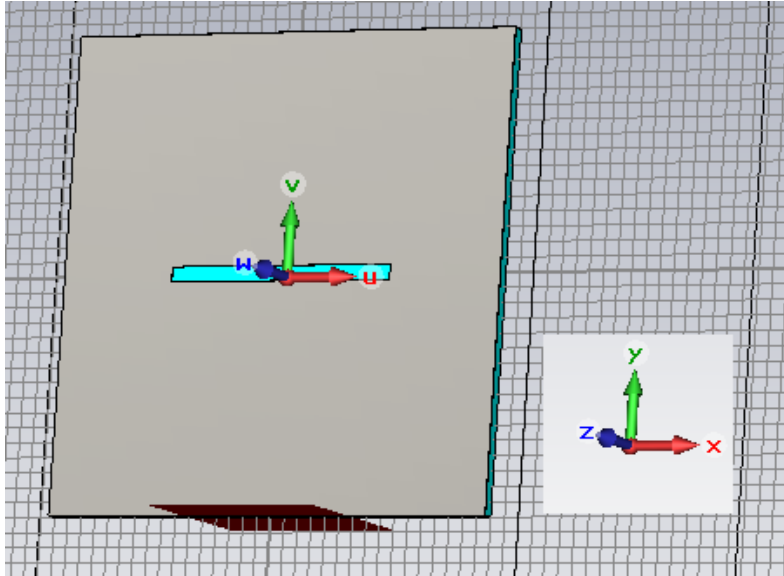


Figura 7. Antena microstrip de ranura con visualización de coordenadas

Todo campo eléctrico en propagación tiene asociado un *campo magnético*. En el caso de ondas electromagnéticas transversales (TEM) se relaciona con el campo eléctrico a través de las siguientes expresiones:

$$H_{\phi} = \frac{E_{\theta}}{\eta_0} \quad (1.2)$$

$$H_{\theta} = \frac{-E_{\phi}}{\eta_0} \quad (1.3)$$

dónde  $\eta_0 = 377 \Omega$ , es la impedancia de onda en el espacio libre.

### 2.2.2 Distancia campo lejano

Para largas distancias donde los campos cercanos son insignificantes, se puede definir el campo eléctrico radiado como en (1.1). La distancia de *campo lejano* es aquella donde el frente de la onda esférica radiada por la antena pasa a ser una aproximación de un frente de onda plano, es decir, cuando los vectores de campo eléctrico y campo magnético son transversales a la dirección de propagación. La distancia mínima para considerar que se trabaja en el campo lejano se define como:

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda} \text{ m.} \quad (1.4)$$

dónde D es la máxima dimensión de la antena y  $\lambda$  es la longitud de onda.

### 2.2.3 Intensidad de radiación

La intensidad de radiación es la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido. Se puede definir como:

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2} \operatorname{Re} \left\{ E_\theta \hat{\theta} \times H_\phi^* \hat{\phi} + E_\phi \hat{\phi} \times H_\theta^* \hat{\theta} \right\} \quad (1.5)$$

Las unidades de la intensidad de radiación se expresan en Vatios por estereorradián (W/sr).

### 2.2.4 Diagrama de radiación o patrón de radiación

El diagrama de radiación de una antena es una cantidad tridimensional que da la variación espacial del campo o la potencia (proporcional al campo al cuadrado) en coordenadas esféricas  $\theta$  y  $\phi$ .

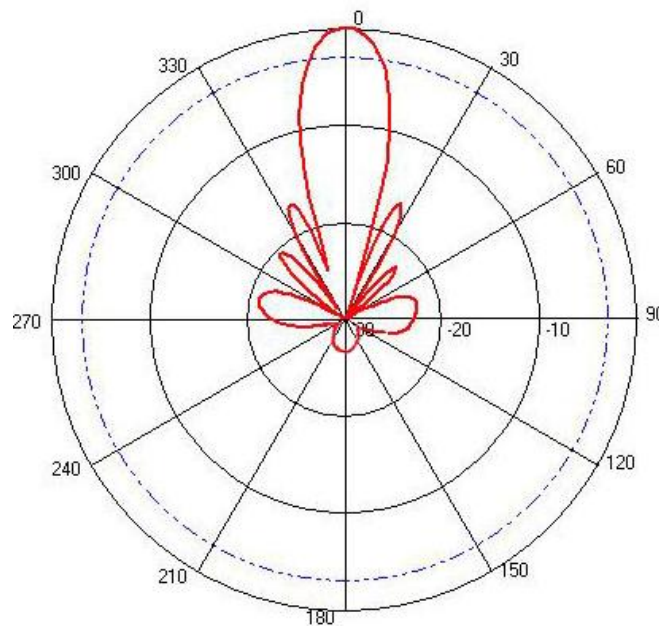


Figura 8. Ejemplo de patrón de radiación

La Figura 8 representa el patrón de radiación en forma polar, según el ángulo de azimut. El gráfico muestra que la máxima radiación de esta antena es en el  $\hat{\phi} = 0$  y teóricamente una radiación nula en  $\hat{\phi} = \pm 30^\circ$  y  $\hat{\phi} = \pm 60^\circ$ .

El lóbulo que posee el máximo valor se llama haz principal y los lóbulos de menor nivel, lóbulos laterales.

Las antenas que poseen un patrón constante según el ángulo de azimut se definen como antenas omnidireccionales, donde se desea una transmisión o recepción igual en todas direcciones. Los diagramas de radiación con un lóbulo principal estrecho en los dos planos son propios de antenas directivas usadas en transmisiones punto a punto, como enlaces de satélites.

### 2.2.5 Directividad

Relación entre la *Intensidad de radiación* máxima del haz principal y la *Intensidad de radiación* media alrededor de todo el espacio.

$$D = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \quad (1.6)$$

Normalmente se expresa en dB como  $D(\text{dB})=10 \log (D)$ .

Las antenas que radian igual en todas direcciones se conocen como antenas isotrópicas,  $D = 1$  ó 0dB.

### 2.2.6 Eficiencia de radiación

Es la relación existente entre la potencia de salida de la antena y la suministrada en la entrada, ya que debido a las pérdidas resistivas existentes, la potencia proporcionada en la entrada de la antena y la potencia radiada por ella, no es la misma.

$$e_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} \quad (1.7)$$

donde  $P_{rad}$  es la potencia radiada por la antena,  $P_{in}$  es la potencia proporcionada a la entrada de la antena y  $P_{loss}$  es la potencia perdida en la antena.

### 2.2.7 Ganancia

La ganancia de una antena es directamente proporcional a la *eficiencia de radiación* y a la *directividad* de la antena. Así pues, la ganancia siempre será igual o menor a la *directividad* de la antena.

$$G = e_{rad} D \quad (1.8)$$

La ganancia normalmente se expresa en dB como  $G(\text{dB}) = 10 \log(G)$

### 2.2.8 Eficiencia de abertura

Existen varios tipos de antenas clasificadas según su abertura, es decir, una antena puede definirse según el área de abertura por la cual radia. Algunos ejemplos pueden ser antenas reflector, antenas bocina, antenas de lente o las antenas matriz.

Para este tipo de antenas, se puede definir la *Directividad* máxima según el área de abertura  $A$ , como:

$$D_{\max} = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (1.9)$$

Debido a múltiples factores que pueden reducir la directividad máxima, tales como amplitudes no-ideales, características de fase de la abertura o bloqueos de abertura; es necesario definir la *eficiencia de abertura* como la relación de la directividad actual de la abertura de una antena y la directividad máxima proporcionada en (1.9). De esta manera, la directividad de la abertura de una antena se expresa:

$$D = e_{ap} \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (1.10)$$

La eficiencia de abertura siempre es menor o igual a la unidad.

### 2.2.9 Área efectiva

Para una antena receptora es interesante determinar la potencia recibida proporcionada por la incidencia de un campo plano de onda. Se espera que la potencia recibida sea proporcional a la densidad de potencia de una onda incidente.

La potencia recibida de una antena receptora se expresa como:

$$P_r = A_e S_{avg} \quad (1.11)$$

Donde  $S_{avg}$  es el vector dirección (producto cruzado de los vectores del campo eléctrico y campo magnético) con dimensiones de  $W/m^2$  y  $A_e$  (abertura efectiva) con dimensiones de  $m^2$  es el área de captura de una antena receptora, interceptando parte de la densidad de potencia de la onda incidente.

El área máxima de abertura efectiva de una antena se define:

$$A_e = \frac{D\lambda^2}{4\pi} \quad (1.12)$$

En esta ecuación (1.12) no se tiene en cuenta el efecto de las pérdidas en la antena, pero se pueden incluir sustituyendo  $D$  por la  $G$  de *ganancia*.

### **2.2.10 Polarización**

La polarización de una onda electromagnética está definida como la orientación del vector de campo eléctrico radiado en el sentido de la propagación de la misma.

Se pueden distinguir tres tipos de polarizaciones:

- Lineal: si el vector del campo electromagnético está orientado en una sola dirección se dice que el campo está linealmente polarizado.
- Circular: si el campo sigue una trayectoria circular en el sentido contrario a las agujas del reloj, se define como una polarización LHCP (left-hand circular polarization) y si por el contrario sigue una trayectoria en el sentido de las agujas del reloj se conoce como una polarización RHCP (right-hand circular polarization)
- Elíptica: se produce cuando el campo posee una trayectoria elíptica, y se produce en la mayoría de casos.

## 2.3. Antenas microstrip

### 2.3.1. Introducción

Las antenas microstrip, son antenas impresas, pertenecientes al grupo de las antenas planas. Los primeros diseños de estas antenas se remontan a los años 50, pero hasta veinte años más tarde no se encuentran las primeras antenas fabricadas aplicadas en sistemas. Desde entonces, se han realizado extensas investigaciones y desarrollos de las antenas microstrip y de sus agrupaciones, atendiendo a sus numerosas ventajas como la ligereza en peso de las mismas, pequeño volumen, bajo coste, compatibilidad con los circuitos integrados, etc.

La estructura de una antena microstrip consiste en un parche metálico con dimensiones comparables a la longitud de onda, sobre un sustrato dieléctrico por un lado, el cual posee un plano de masa en el otro (Figura 9).

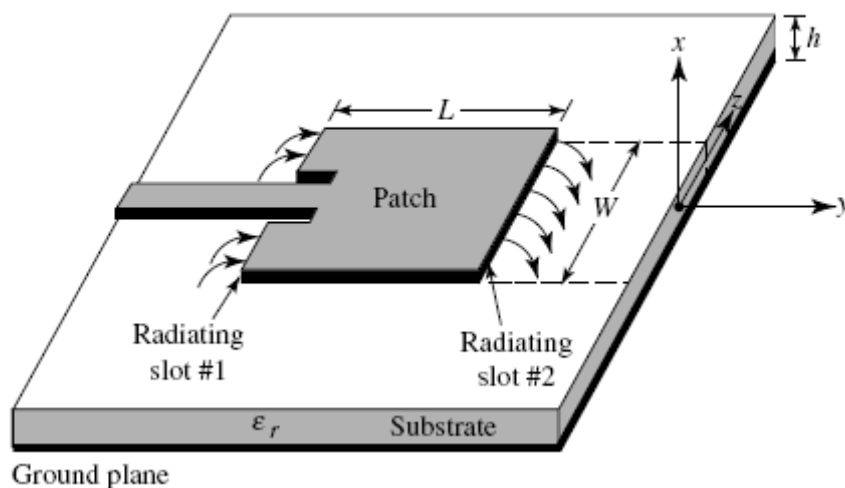


Figura 9. Antena microstrip. Ref. : [10]

### 2.3.2. Ventajas y desventajas de las antenas microstrip

Las ventajas más importantes de las antenas microstrip son las siguientes:

- Peso ligero, pequeño volumen, bajo perfil plano que permite una fácil adaptación a la estructura de acoplo.
- Bajo coste de fabricación, por lo que se predispone para una producción en masa.
- La doble frecuencia y la doble polarización son fáciles de conseguir en la construcción de estas antenas.

- Pueden ser integradas de forma sencilla en circuitos de microondas impresos.

Por otro lado, las antenas microstrip tienen una serie de inconvenientes en comparación con otras antenas microondas:

- Baja eficiencia
- Banda estrecha
- Pérdidas, son más ‘pobres’ en nivel de ganancia
- La mayoría de estas antenas radian en mitad del plano.
- Poco aislamiento entre la alimentación y los elementos de radiación.
- Difícil de conseguir una buena pureza de polarización.

Conviene destacar que existen métodos para paliar de en gran medida la mayoría de los inconvenientes arriba mencionados.

### ***2.3.3. Campos de radiación***

La radiación desde las antenas microstrip sucede por los campos limítrofes generados en los bordes del conductor de la antena microstrip y el plano de masa y se puede entender de forma sencilla considerando el caso de una antena microstrip de parche rectangular [13]. Dicho parche es una pequeña fracción de la longitud de onda por encima del plano de masa, como se puede apreciar en la siguiente Figura 10 a).

Asumiendo que no hay variaciones del campo eléctrico a lo largo del ancho y grosor de la estructura del microstrip, la representación de la configuración del campo eléctrico del elemento radiante puede ser representada como se muestra en la Figura 10 b). Los campos varían a lo largo de la longitud del parche, la cual es aproximadamente la mitad de la longitud de onda ( $\lambda/2$ ). Por lo que la radiación puede ser descrita en gran parte por los campos límites en el circuito abierto de los bordes del parche.

Como se aprecia en la Figura 10 c) el parche puede ser representado aparte por dos ranuras de  $\lambda/2$ , excitadas en fase y radiando en la mitad del espacio por encima del plano de masa.



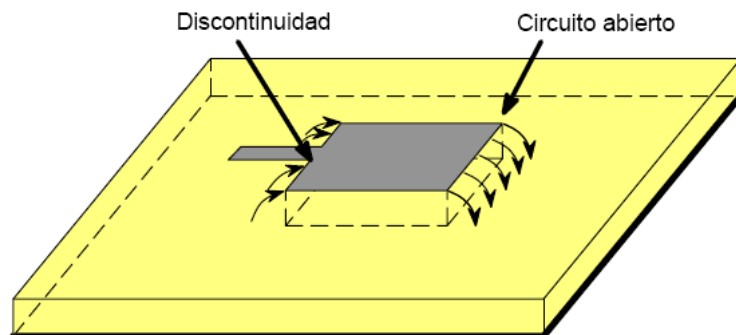


Figura 10. a)



Figura 10. b)

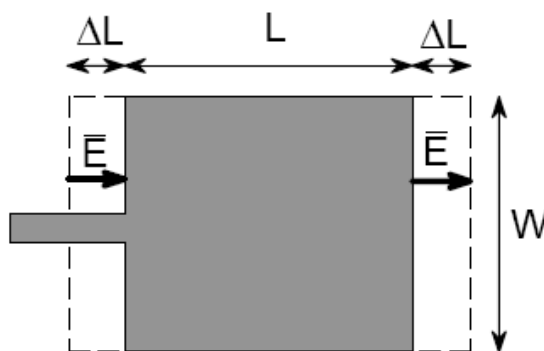


Figura 10. c)

Figura 10. a) Antena microstrip de parche rectangular. b) Vista lateral. c) Vista en planta.  $\Delta L \cong h$ ,  $L = \lambda/2$

### 2.3.4. Métodos de alimentación

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

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

- Alimentación directa:

Las dos técnicas de excitación dentro de esta categoría son la alimentación por microstrip y la alimentación por conector coaxial. Tal y como se sobreentiende por el nombre de la categoría, son técnicas de contacto directo entre la alimentación y la antena radiante, aunque no es estrictamente necesario que haya un contacto directo como se puede observar más adelante en la alimentación por microstrip con acoplamiento espaciado (Figura 11. (b)).

- Alimentación por microstrip:

Se pueden distinguir varios tipos de alimentación microstrip (Figura 11. [11]):

- Existe el tipo de excitación que consiste en alimentar el elemento radiante mediante una cinta metálica o microstrip en contacto con el borde del mismo. (Figura 11. (a)).
- Cuando existe espacio entre en la unión de la estructura radiante y el microstrip. (Figura 11. (b)).
- Es una excitación en la que la profundidad de las inserciones marca la adaptación de impedancias. (Figura 11. (c)).
- Alimentación por medio de una cinta metálica en contacto con el borde de la zona no radiante. (Figura 11. (d))

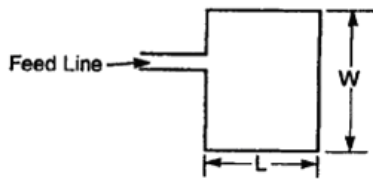


Figura 11. (a)

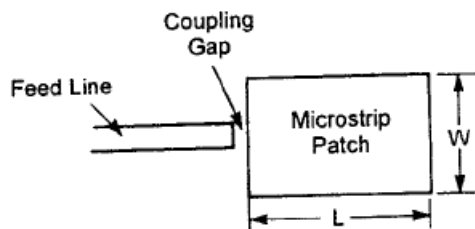


Figura 11. (b)

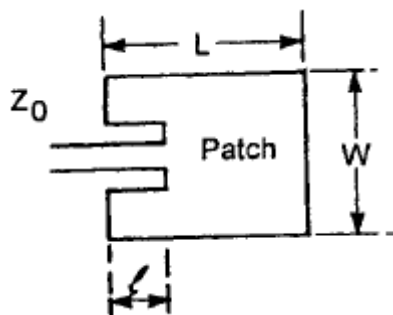


Figura 11. (c)

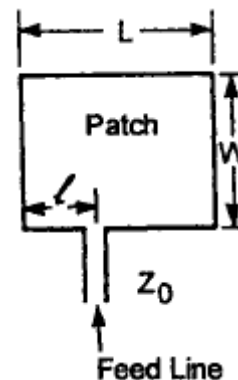


Figura 11. (d)

Figura 11 [5]. Tipos de alimentación microstrip. (a) Alimentación microstrip en el borde del elemento radiante.  
(b) Alimentación microstrip con acoplamiento espaciado. (c) Alimentación microstrip con inserciones.  
(d) Alimentación microstrip en el borde no radiante.

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

- Alimentación por conector coaxial:

Es el tipo de alimentación empleada en este proyecto para la antena parche de geometría fractal. Como se aprecia en la Figura 12 [12] el conector coaxial se sujeta por la parte trasera de la placa de circuito impreso y el conductor central del coaxial se une con el conductor de la antena o parche. Al igual que en el caso de la alimentación por microstrip, la posición de la sonda coaxial en contacto con el parche dependerá de la adaptación de impedancias.

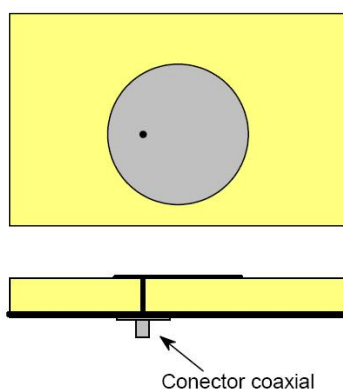


Figura 12. Antena parche con alimentación por conector coaxial

▪ Alimentación por proximidad:

En este tipo de alimentación no existe un contacto directo entre la alimentación y el elemento radiante de la antena, su acoplamiento es electromagnético. Teóricamente, el elemento radiante de la antena se sitúa sobre una capa de sustrato, por debajo de ella la línea de alimentación microstrip se encuentra sobre otra capa de sustrato, todo ello con un plano de tierra (Figura 13 [12]). De esta forma la optimización se realiza de forma más flexible, ya que el elemento radiante y la alimentación se encuentran separados, con

sus correspondientes capas de sustrato dieléctrico, las cuales pueden tener permitividades diferentes.

Este es el tipo de alimentación utilizada para el diseño de la antena microstrip de ranura, con la salvedad que en este proyecto no se emplea una segunda capa de sustrato dieléctrico, más adelante se explicará en detalle el diseño y funcionamiento de la antena microstrip de ranura.

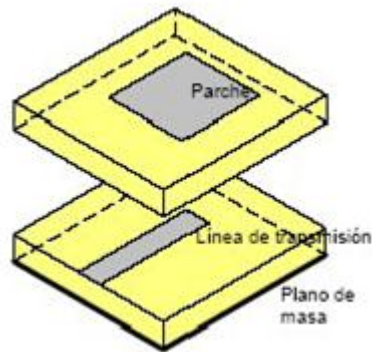


Figura 13. Antena parche con alimentación por proximidad.

- Alimentación por apertura:

Como se puede apreciar en la Figura 14 [12] la antena con alimentación por apertura se compone de dos sustratos separados por un plano de masa común con una abertura. La línea de alimentación microstrip se sitúa en la parte inferior del sustrato, en la cara opuesta al elemento radiante, y se produce el acoplamiento electromagnético hacia el parche a través de la abertura del plano de masa común.

La abertura puede tener cualquier forma y tamaño, y dependiendo de ello se mejorará el ancho de banda de la radiación de la antena.

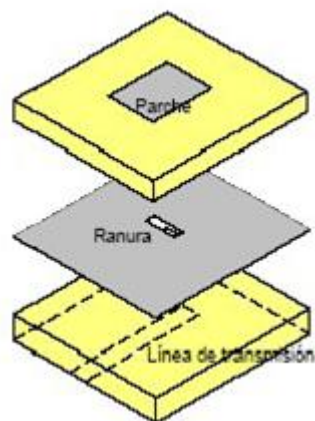


Figura 14. Antena parche con alimentación por apertura.

Existen varios tipos de configuraciones de antenas microstrip, como son: antenas de parche microstrip, antenas microstrip traveling-wave y antenas microstrip de ranura.

A continuación se realizará una pequeña explicación acerca de las antenas microstrip de ranura y antenas de parche con alimentación microstrip.

### 2.3.5. Antenas microstrip de ranura

Las antenas microstrip de ranura, están formadas por un sustrato, en donde existe una línea de alimentación microstrip en una de sus caras y un plano de masa con una ranura en la otra. Es uno de los dos tipos de antena diseñadas en este proyecto, concretamente se trata de una antena rectangular microstrip de ranura (Figura 15). Este tipo de antena se explicará más adelante en el apartado 2.3.5.1.

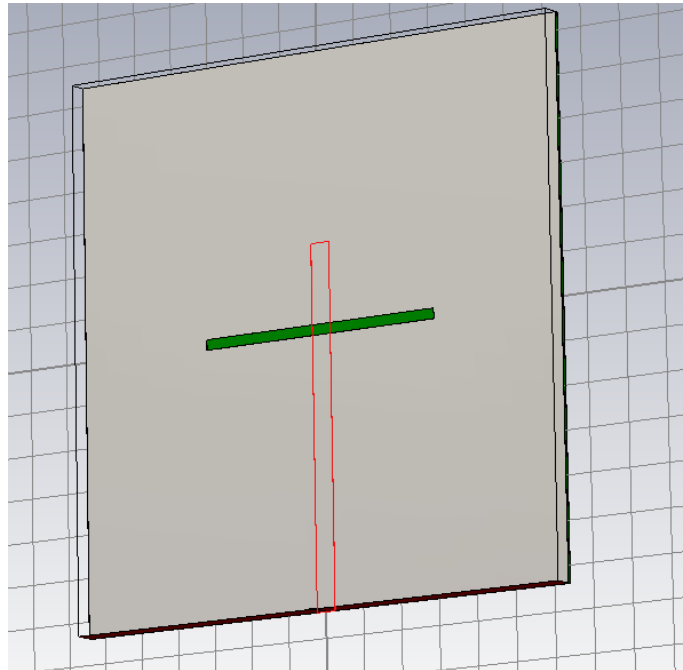


Figura 15. Imagen del diseño de una antena rectangular microstrip de ranura.

Las antenas microstrip de ranura tienen la ventaja de ser capaces de obtener unos diagramas de radiación direccionales o bidireccionales (radiar a ambos lados de la ranura). El diagrama de radiación direccional se consigue utilizando una placa de metal reflectora en uno de los lados de la ranura (Figura 19). Este tipo de antenas pueden producir polarización circular mediante la combinación de conductores de tira y ranuras situadas a lo largo de los lados de la alimentación microstrip [13].

En la Figura 16 se representan las formas básicas de ranura de las antenas con diferente estructura de alimentación [14].

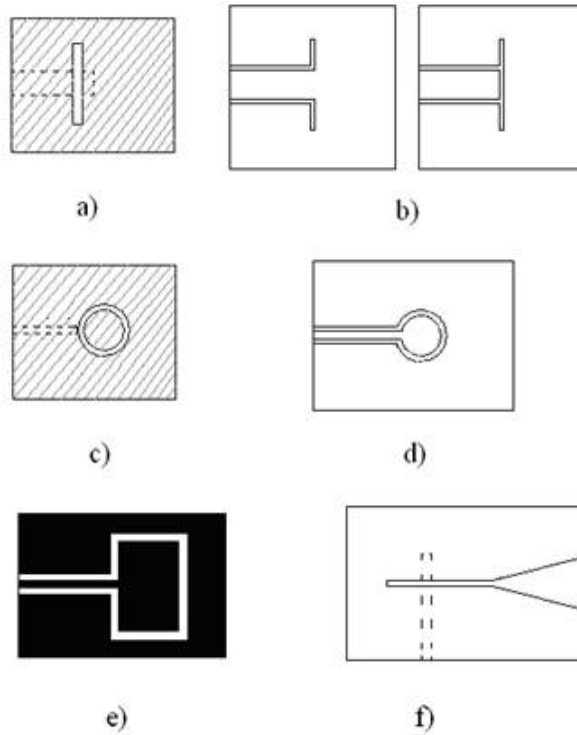


Figura 16. Formas básicas de ranura de antenas de circuito impreso. a) ranura rectangular con alimentación microstrip. b) ranura rectangular de alimentación coplanar. c) ranura circular en anillo con alimentación microstrip. d) ranura circular en anillo con alimentación coplanar. e) ranura rectangular en anillo. f) ranura afilada.

### 2.3.5.1. Antenas microstrip de ranura rectangular

El tipo de antena rectangular posee en el plano de masa un corte en forma de ranura perpendicular a la tira conductora de la línea microstrip. (Figura 14). Para una excitación eficiente de la ranura, la cinta del conductor es cortocircuitada a través del substrato dieléctrico hasta el borde de la ranura como se puede observar en la Figura 17.

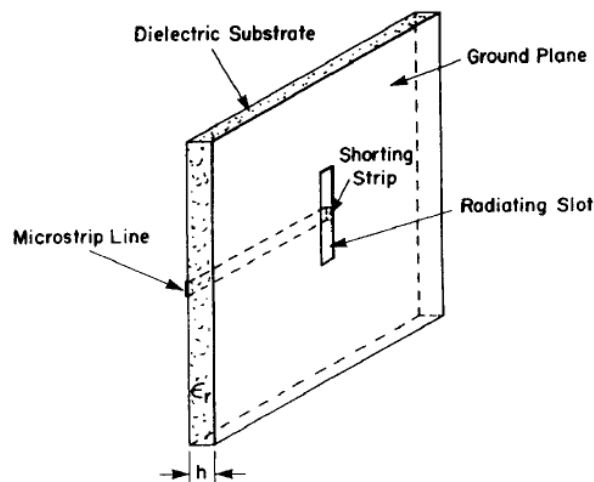


Figura 17. Microstrip terminado en cortocircuito Ref. : [11]

También es posible tener una excitación eficiente de la ranura por medio de circuito abierto con la cinta del conductor terminando más allá del borde de la ranura como se muestra en la siguiente imagen, Figura 18.

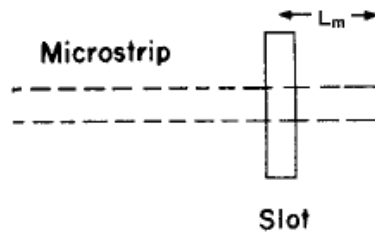


Figura 18. Microstrip terminando en circuito abierto Ref. : [11]

La longitud  $L_m$  de la cinta conductora de alimentación del circuito abierto es aproximadamente un cuarto de la longitud de onda.

Una colocación centrada de la cinta microstrip respecto a la ranura de la antena tiene una resistencia de radiación muy alta y una adaptación con la red del sistema donde se desea trabajar requiera seguramente de la correspondencia entre la impedancia característica de la antena y la cinta conductora de la alimentación.

Por otro lado, la configuración del microstrip de alimentación desplazado (Figura 19 [11]) respecto al centro de la ranura de la antena proporciona la adaptación de la impedancia característica de línea, reduciendo la necesidad de la adaptación de red e incrementando normalmente el ancho de banda [13].

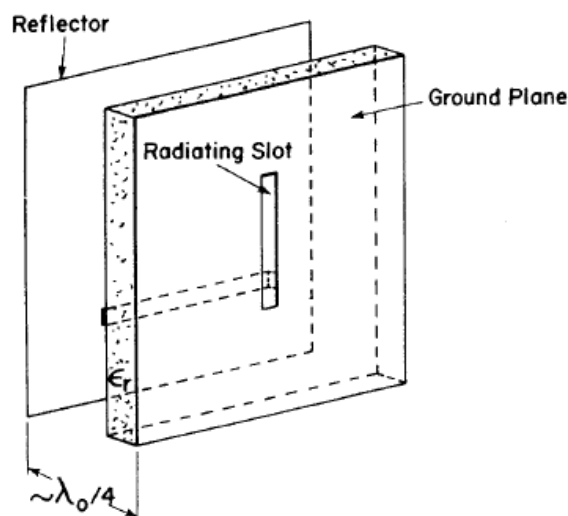


Figura 19. Antena microstrip de ranura de alimentación desplazada.



Las antenas microstrip de ranura rectangular se pueden diferenciar en dos categorías: antenas de ranura estrecha y de ranura ancha. Las ranuras estrechas son aquellas con su dimensión de anchura mucho más pequeña que su longitud a lo largo, por el contrario las antenas de ranura ancha poseen una anchura comparable a su longitud [13].

### ***2.3.5.2 Antenas microstrip de ranura rectangular estrecha***

La configuración de la antena de ranura estrecha se puede ver representada en la Figura 17, con excitación centrada a la ranura o representada en la Figura 19 con la alimentación del microstrip desplazada del centro de la ranura.

La impedancia de entrada consta de una combinación en serie de resistencias a la radiación y de un componente reactivo. La radiación de la ranura se presupone que radia a la frecuencia de trabajo y de diseño de la antena, por lo que la parte reactiva de la impedancia de entrada es cero.

La longitud resonante de una alimentación centrada en la ranura es mayor que la longitud resonante de una alimentación desplazada del centro de la ranura. Para constantes del dieléctrico bajas, la longitud resonante en una antena con alimentación desplazada respecto a la ranura varía entre  $0.4\lambda_0$  y  $0.5\lambda_0$  y depende del material del dieléctrico, de la anchura de la ranura y de la localización del punto de alimentación [13].

### ***2.3.5.3 Antenas microstrip de ranura rectangular ancha***

Una ranura se define como “ancha” cuando su anchura es comparable con la longitud de la misma. Hablando de ventajas, una ranura con estas características posee un ancho de banda mayor, próximo al 10%, aunque cualitativamente hablando, el comportamiento es similar a una antena con ranura estrecha.

### ***2.3.5.4 Procedimiento de diseño***

Existen diferentes aspectos a tener en cuenta para diseñar una antena de este tipo. Normalmente el objetivo del diseño es lograr una actuación específica de las características definidas en la antena para la frecuencia de trabajo requerida.

La elección de materiales, las dimensiones y posicionamiento del microstrip, dimensiones del sustrato dieléctrico, dimensiones de la ranura son aspectos que influyen directamente en la frecuencia de trabajo de la antena que se desea conseguir.

- Para conseguir una determinada impedancia de línea para antenas de tira de alimentación delgada, hay que tener en cuenta la altura del sustrato dieléctrico, el valor de permitividad del material del mismo, y la anchura del microstrip.
- La dimensión de la anchura de la ranura afecta directamente al ancho de banda.
- La longitud de la ranura determina la frecuencia de radiación.
- Para una longitud de ranura fija aumentar la dimensión longitudinal del microstrip conlleva una disminución de la frecuencia de resonancia, por el contrario reducir la longitud de la tira de alimentación dará como resultado que la frecuencia de trabajo resonante suba.

### 2.3.6. Antenas de parche

Las antenas microstrip de parche se componen de un parche conductor de cualquier geometría plana situado en una de las caras del sustrato dieléctrico y por la otra cara del dieléctrico existe un plano de masa como se puede observar la Figura 9, expuesta anteriormente. En la práctica existen diferentes tipos de configuraciones de antenas parche como se puede ver en la siguiente Figura 20 [11].

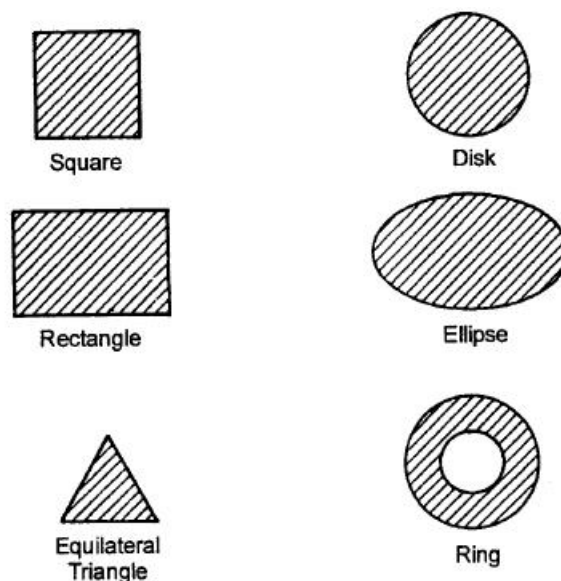


Figura 20. Configuraciones típicas de antenas microstrip parche

Pero indudablemente la configuración de la antena de parche más simple es la rectangular (Figura 21 [11]).

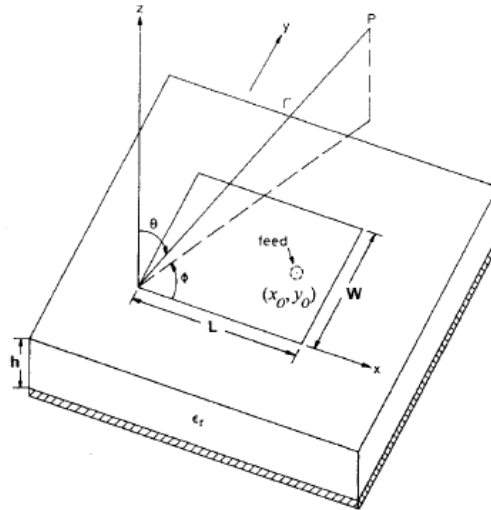


Figura 21. Geometría antena de parche rectangular.

El modelo rectangular puede ser completamente caracterizado según diferentes parámetros como son el diagrama de radiación, la impedancia de entrada, ganancia, ancho de banda, anchura de los lóbulos, eficiencia, pérdidas y factor Q. A lo largo de la historia se han realizado numerosos intentos de predecir y evaluar analíticamente las características de radiación de una antena microstrip de parche rectangular, pero como la mayoría de antenas ha sido imposible encontrar una solución [11,13].

A continuación se nombran diferentes métodos empleados en el análisis de este tipo de antenas:

- Aproximación al potencial vector: solución rigurosa para la radiación producida por el parche rectangular como elemento radiante. En esta aproximación el modo de propagación de las ondas se usa para determinar el campo de radiación producido por un dipolo eléctrico horizontal, y las características de la antena son evaluadas por técnicas numéricas.[13]
- Las funciones de Green diádicas: técnica alternativa que emplea el método de las funciones de Green diádicas. [13]
- Modelo de rejilla de alambre: es un modelo de microstrip con una estructura radiante de rejilla con segmentos de alambre y propone una solución a las corrientes de los segmentos de alambre mediante el teorema de la reacción de Richmond, y cuando las corrientes son valores conocidos, se pueden obtener las características interesantes de toda la antena. [13]

- Modelo de abertura de radiación: método que define que, el cálculo realizado para la aproximación a la abertura puede ser usado para aproximar el diagrama de radiación de un cortocircuito de línea microstrip. [13]
- Modelo de cavidad: este modelo está basado en observaciones, como:
  - sólo la componente Z del campo eléctrico y las componentes X e Y del campo magnético H existen en la región límite entre el microstrip y el plano de masa.
  - En la región límite entre el microstrip y el plano de masa el campo es independiente de la coordenada Z para todas las frecuencias de interés.
  - La corriente eléctrica en el microstrip no posee de componentes perpendiculares al borde en ningún punto del mismo, lo que implica que los componentes tangenciales del campo magnético H a lo largo del borde son insignificantes. [13]
- Modelo de expansión modal: es un modelo similar al descrito anteriormente pero se diferencia en que las condiciones de impedancia límites son impuestas en cuatro paredes radiantes para obtener la solución. [13]
- Modelo de línea de transmisión: el microstrip como elemento radiante de energía puede ser tratado como un resonador de línea sin variaciones en los campos transversales. [13]

### ***2.3.6.1. Procedimiento de diseño antenas parche rectangular***

El primer paso en el diseño es elegir un sustrato dieléctrico apropiado con un grosor adecuado. Una vez elegido habría que calcular el ancho del parche W a partir del grosor del dieléctrico h y de la frecuencia de trabajo  $f_r$ , empleando la siguiente fórmula:

$$W = \frac{c}{2f_r} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (1.13)$$

Dónde: - c es la velocidad de la luz

-  $f_r$  es la frecuencia de trabajo

-  $\epsilon_r$  es la permitividad del material del sustrato dieléctrico.

Lógicamente se pueden escoger otras dimensiones para la anchura del parche, pero si se escogen anchuras menores que la marcada por la fórmula anterior 1.13, la eficiencia de radiación sería menor mientras que si se elige una dimensión superior a la recomendada

por 1.13, la eficiencia sería mayor, pero podrían aparecer distorsiones de campo para modos altos.

El siguiente paso sería escoger la longitud del parche  $L$  (1.16), una vez conocidos la constante de permitividad del dieléctrico  $\epsilon_r$ , la anchura de la antena  $W$  y la línea de extensión  $\Delta l$ , calculada mediante las siguientes expresiones 1.14 y 1.15:

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \quad (1.14)$$

$$\frac{\Delta l}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_e + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (1.15)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad (1.16)$$

Otro parámetro importante a la hora de diseñar la antena es la impedancia de entrada, la cual debería de ser lo más precisa posible para poseer una unión perfecta entre el elemento de radiación o parche y la alimentación de la antena ( ver [14] y [15]).

Para un mayor detalle al respecto de la elección de los aspectos del diseño anteriormente citados así como para la resistencia de radiación, Factor Q, pérdidas, ancho de banda, directividad, ganancia,etc, ver [13] pp. 56-66.

### ***2.3.7. Comparación antenas de parche y antenas de ranura***

En la siguiente Tabla 2, aparecen reflejadas las ventajas e inconvenientes de los dos tipos de antenas de forma cualitativa. Las antenas microstrip de parche son fáciles de diseñar y fabricar, al igual que las antenas de ranura, y pueden tener diferentes formas geométricas como parche: rectangular, circular, triangular, etc. También, cambiando la posición de la tira de alimentación se puede lograr una polarización lineal o circular. Quizá, la gran ventaja de las antenas de parche sea la posibilidad de trabajar con doble frecuencia.

Por otro lado, las antenas de ranura pueden producir radiación unidireccional o bidireccional.. A su vez, las antenas de ranura son menos sensibles a la tolerancias de fabricación comparadas con las antenas de tipo parche.

Construir una matriz de antenas combinando antenas parche y de ranura, consigue las ventajas de los dos tipos. [11, 13]

Características	Parche	Ranura
Análisis y Diseño	Fácil	Fácil
Fabricación	Muy fácil	Fácil
Tolerancia en la fabricación	Crítica	No muy crítica
Perfil	Fino	No muy fino
Flexibilidad en la forma	Cualquier forma	Limitada
Campos de radiación	Unidireccional	Unidireccional y bidireccional
Polarización	Lineal y circular	Lineal
Ancho de banda	Estrecho	Ancho
Trabajar con Frecuencia doble	Posible	No es posible
Aislamiento entre elementos radiantes	Aceptable	Bueno
Exploración de la frecuencia	Fácilmente posible	Posible

Tabla 2. Comparación cualitativa entre antenas de ranura y antenas de parche.

### **3. Antenas Fractales**

#### ***3.1 Introducción***

Un fractal es un objeto semigeométrico cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas (Figura 22). El término fue propuesto por el matemático Benoît Mandelbrot en 1975 y deriva del Latín fractus, que significa quebrado o fracturado. Muchas estructuras naturales son de tipo fractal.



Figura 22. Ejemplo de fractal, Triángulo de Sierpinski

A un objeto geométrico fractal se le atribuyen las siguientes características [16], que en el apartado 3.2 serán descritas con detenimiento:

- Es demasiado irregular para ser descrito en términos geométricos tradicionales.
- Es autosimilar.- Su forma es hecha de copias más pequeñas de la misma figura.
- Las copias son similares al todo: misma forma pero diferente tamaño. Ejemplos de autosimilaridad:
  - Fractales naturalistas
  - Conjunto de Mandelbrot: es una transformación no lineal

- Fractales de paisajes: este tipo de fractales pueden producir paisajes realísticos convincentes.
  - Fractales naturales: son fractales encontrados en la naturaleza y se diferencian de los fractales matemáticos porque los naturales son aproximados o estadísticos y su autosimilaridad se extiende sólo a un rango de escalas (Figura 23).
  - Fractales de pinturas: se utilizan para realizar el proceso de decalcomanía.
- Se define mediante un simple algoritmo recursivo.



Figura 23. Ejemplo de geometría fractal en la naturaleza: Brócoli [16].

El auge y crecimiento de las telecomunicaciones abren cada vez más las puertas de la exploración de nuevas alternativas en diseño que cubran las exigencias en ancho de banda, eficiencia, rapidez, economía... En la última década, la teoría de los fractales, se ha abierto paso, proponiendo modelos para el diseño de antenas permitiendo la implementación de nuevos y mejores servicios en los sistemas móviles, circuitos RFID, dispositivos de micro onda y otros [17].

## 3.2 Propiedades de los fractales

A continuación se describen algunas de las propiedades de los fractales, ya comentadas en el apartado 3.1 Introducción. Es necesario tener en cuenta que no toda geometría fractal cumple todas las propiedades siguientes, existen casos en los que cumplen todas ellas y casos en los que el fractal satisface un pequeño número.

### 3.2.1 Autosimilitud

Posiblemente la propiedad más importante de la geometría fractal. Como se comenta en la Introducción, cada una de las partes o secciones de dichas geometrías, son como mínimo una copia reducida o escalada de la forma total del fractal.

Así pues, una vez definida esta propiedad se pueden clasificar los fractales en tres tipos:

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

La figura fractal más famosa y estudiada que refleja esta propiedad es el conjunto de Mandelbrot (pionero en el estudio de estas geometrías, Figura 24).

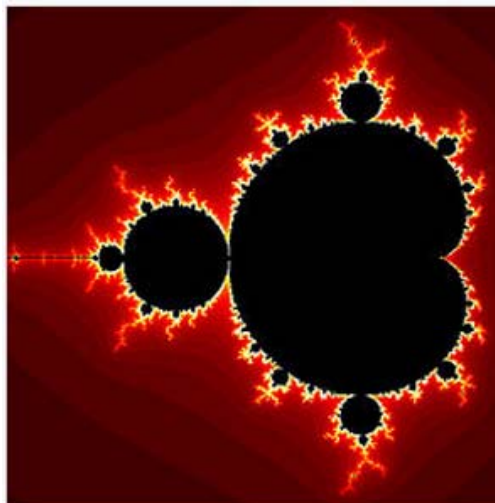


Figura 24. Conjunto de Mandelbrot



### 3.2.2 Recursividad

Esta propiedad hace referencia a la capacidad de crecimiento, es decir, los fractales se originan y aumentan en tamaño mediante la sucesiva aplicación de algoritmos recursivos. Al número de veces con que cada vez se ejecuta el algoritmo recursivo, se conoce como iteración, así pues se habla de orden de iteración  $n$ , refiriéndose  $n$  a la cantidad de veces que se aplica el algoritmo.

### 3.2.3 Dimensión fractal

El término dimensión tiene diferentes significados en matemáticas, el más utilizado es el que hace referencia a la dimensión topológica definida en la geometría euclidiana, donde un punto tiene dimensión 0, una línea dimensión 1, una superficie dimensión 2 y un volumen dimensión 3. Bajo este concepto se puede definir un objeto mediante coordenadas [16].

Pero intentar describir una forma fractal mediante la geometría euclidiana puede ocasionar serios problemas dado que, por ejemplo, existen curvas con longitudes infinitas que son capaces de generar una superficie de área finita. Para el caso de las curvas fractales, Mandelbrot utilizó un procedimiento intuitivo, pero muy sugerente, para proponer una respuesta a la pregunta de cómo describir la dimensión fractal [16]:

Si definimos una unidad arbitraria de longitud  $x$ , se debe averiguar cuantas veces usamos esa longitud  $x$  para medir la longitud total de la curva fractal. Definiendo como  $N$  ese número de veces, entonces la citada longitud es [17]:

$$L = N \cdot x$$

En este caso la dimensión fractal puede expresarse según Mandelbrot como

$$D = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\log(N)}{\log(x)}$$

La dimensión fractal  $D$  se denomina también *nivel de fracturación* de un fractal y puede describirse de una forma más general con la siguiente expresión:

$$D = \frac{\log(N)}{\log(1/\gamma)}$$

Donde  $N$  es el número de copias no superpuestas del total dentro del conjunto de la forma y  $\gamma$  el factor de escalado de esas copias para cada iteración.

Para comprender este concepto con claridad se ejemplifica el cálculo de la dimensión fractal para la curva de Koch que se presenta en la Figura 25.

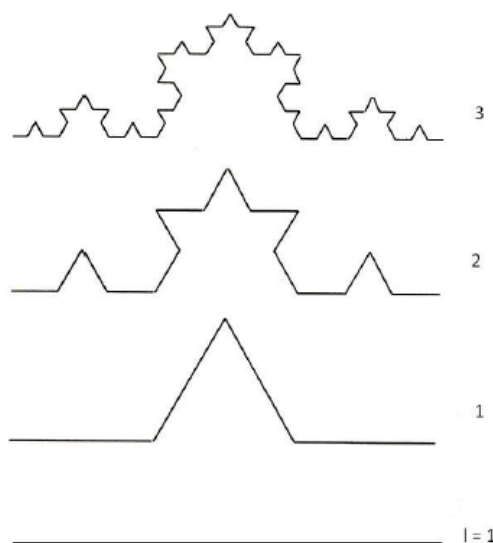


Figura 25. Curva de Koch en sus tres primeras iteraciones

Si empezamos desde una línea recta de longitud 1, entonces la primera curva, etiquetada como 1 en la figura, tendrá una longitud total de  $4 \times \frac{1}{3}$  con un factor de escalado de  $\frac{1}{3}$ , y para la segunda curva, denominada como 2, la longitud total será de  $4 \times (4 \times \frac{1}{9})$  y un factor de escalado de  $\frac{1}{9}$ .

Calculando la dimensión fractal para la curva de Koch 1 de la Figura 25 se obtiene:

$$D = \frac{\log(4)}{\log\left(\frac{1}{\frac{1}{3}}\right)} = 1.262$$

Tras este resultado cabe destacar que la dimensión fractal es siempre mayor que la dimensión topológica y que nunca llega a ser 2 (excepto en infinito para determinadas curvas), con lo que habitualmente se dice que los fractales son geometrías de dimensión no entera [17].

Puesto que la noción de longitud carece de sentido debido a que la curva aumenta indefinidamente, la dimensión fractal proporciona una idea de dimensión indicando en qué medida el fractal llena una porción del plano.

### 3.2.4 Space-filling

Literalmente se puede traducir por “llenar el espacio” aunque también se denomina “*Self-avoiding*” (evitarse a uno mismo) [17]. Es una propiedad presente en determinados fractales y se define como la capacidad que tiene el fractal para aproximarse a dimensiones topológicas de orden 2 (incluso de orden 3), a partir de su dimensión topológica de orden 1, mediante sucesivas iteraciones. En estas curvas, donde nunca se producen intersecciones, el valor de  $D$  para  $n = \infty$  es 2.

### 3.2.5 Detalle infinito

Los fractales poseen detalle a cualquier escala de visualización, esto es, a medida que aumentamos el orden de iteración tanto más detalle revela este, sin que se tenga un límite en el que se pierda su estructura básica. Teóricamente, la estructura se repite hasta el infinito tanto en lo macroscópico como en lo microscópico.

## 3.3 Los fractales y las antenas

Desde los trabajos pioneros de Mandelbrot y de otros investigadores, se han desarrollado una amplia variedad de aplicaciones con los fractales en ramas como la ciencia y la ingeniería. Una de estas ramas es la llamada *fractal-electrodynamics* en la cual la geometría fractal es combinada con la teoría del electromagnetismo con el propósito de investigar nuevas clases de radiación, propagación y problemas de scattering o dispersión [18].

Tradicionalmente, las propuestas en el análisis y el diseño de sistemas de antenas tienen su fundamento en la geometría Euclidiana. En las últimas décadas ha habido un considerable aumento en el desarrollo de nuevos tipos de antenas que emplean fractales en detrimento de la geometría Euclidiana para el diseño de las mismas [18]. Este nuevo campo de investigación es conocido como Ingeniería de antenas fractales, el cual posee dos ramas de investigación claramente definidas, que incluyen el estudio formas fractales como elementos de una antena así como el uso de fractales en matrices de antenas.

Nathan Cohen, un radio astrónomo de la universidad de Boston, fue uno de los pioneros de las antenas fractales y experimentó con antenas de hilo como las curvas de Koch y con arrays basadas en el triángulo de Sierpinski. Construyó la primera antena fractal conocida en 1988, cuando instaló una estación de radio en su apartamento y fundó

Fractal Antenna Systems Inc., una de las primeras empresas que se dedicó al diseño y comercialización de antenas fractales [19].

V. H. Rumsey, estableció lo que se ha convertido en la noción actual de las antenas de banda ancha. El principio de Rumsey dice que los parámetros de una antena serán independientes de la frecuencia si la geometría puede ser descrita únicamente en función de ángulos, puesto que esta no variaría al realizar un escalado [20].

En la búsqueda de la súper-antena de banda ancha se contemplaban dos objetivos: lograr que una antena para una banda de frecuencias determinada sea lo más pequeña posible y conseguir que una antena pueda cubrir muchas bandas de frecuencia. La geometría de las antenas fractales hacía sospechar una buena solución para esos dos objetivos. En primer lugar y basándonos en la propiedad de autosimilitud, se podía esperar un comportamiento similar a distintas longitudes de onda. En segundo lugar porque la capacidad de space-filling quizás permitiría a las antenas dotadas de esa forma, obtener ventaja sobre otros diseños aprovechándose de la cada vez más exigente limitación de espacio [17].

Las antenas fractales tienen rendimientos en sus parámetros que se repiten con una precisión arbitraria dependiendo del orden de iteración y por tanto no son independientes de la frecuencia pero aún así consiguen cubrir diversas bandas cercanas, y las bandas correspondientes a cada frecuencia resonante son generalmente estrechas. Además todos estos diseños presentan un bajo perfil que reduce considerablemente su tamaño [21].

### ***3.3.1 Lazo de Sierpinski***

Como se ha comentado en el apartado anterior el empleo de la geometría fractal en dar forma a las antenas se sustenta principalmente en las propiedades de los fractales presentando un comportamiento radioeléctrico muy interesante gracias a la autosimilitud y a la capacidad de space-filling. Estas propiedades son muy adecuadas para el diseño de antenas multifrecuencia, como por ejemplo el monopolo de Sierpinski (Figura 26), antenas miniatura como la antena monopolo de Koch (Figura 27) y antenas de alta directividad como la antena parche de Koch (Figura 28) [22].

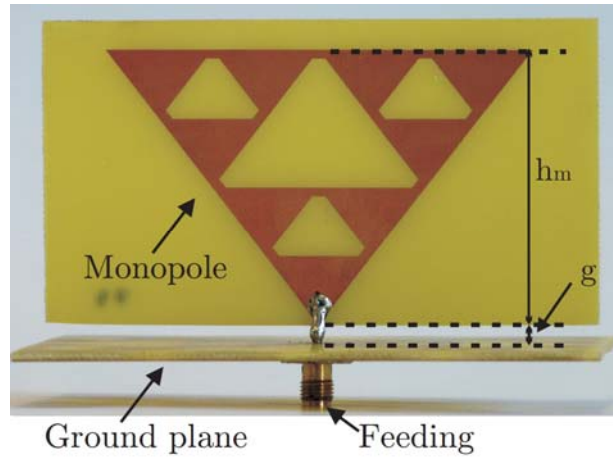


Figura 26. Monopolo de Sierpinski. [23]



Figura 27. Monopolo de Koch. [24]



Figura 28. Antena parche Koch [25]

En este proyecto se ha diseñado una antena de parche con alimentación coaxial con geometría fractal en forma de lazo, concretamente se ha utilizado el triángulo de Sierpinski para completar el lazo del parche. Se han comparado los diseños de las antenas, cuando el parche es el lazo metálico (Figura 29 a)), cuando el parche es un lazo formado con dos triángulos de Sierpinski con una iteración de 2 (Figura 29 b)) y cuando el parche es un lazo formado con dos triángulos de Sierpinski con iteración igual a 3

(Figura 29 c)). Como resultado de aplicar este tipo de geometría se obtienen antenas miniaturizadas y de alta directividad.

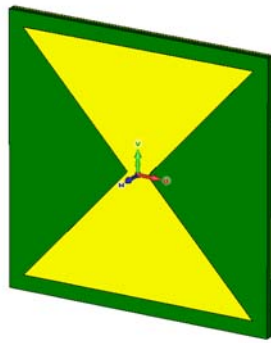


Figura 29. a)

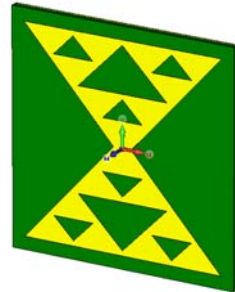


Figura 29. b)

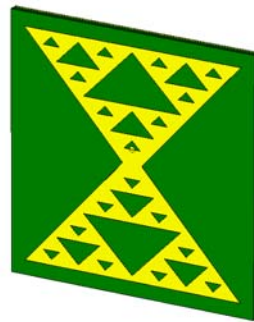


Figura 29. c)

Figura 29. Diseños de antenas parche de este proyecto. a) Parche con forma de lazo b) Parche con forma de lazo Sierpinski  $i=2$ . c) Parche con forma de lazo Sierpinski  $i=3$ .

Los parches diseñados se forman mediante la aplicación de múltiples ranuras en la superficie del parche partiendo del parche con forma de lazo, para así conseguir una analogía con las iteraciones del triángulo de Sierpinski, tal y como se puede observar en la Figura 29.

Estrictamente hablando, el resultado de la estructura del triángulo no es realmente un fractal debido a que los fractales son abstracciones matemáticas que no pueden ser implementadas físicamente; por lo que la descripción más apropiada para este tipo de geometrías sería hablar en términos de parches multitriangular o de antenas multinivel [22]. Pero debido a su similitud con el triángulo fractal de Sierpinski, se habla de antena de parche con forma de lazo de Sierpinski.

## **4. Resultados**

### ***4.1 Antena microstrip de ranura***

#### ***4.1.1 Antena microstrip de ranura***

El siguiente diseño de antena de ranura con alimentación microstrip (Figura 30) ha sido diseñado completamente mediante el software de antenas CST, empleando las dimensiones y materiales descritos a continuación:

<b>Componente</b>	<b>Material</b>	<b>Dimensiones</b>
Plano de masa	Conductor eléctrico perfecto	200 x 128 x 0.035
Sustrato dieléctrico	FR-4 libre de pérdidas $\epsilon = 4.9$	200 x 128 x 0.79
Ranura	-	4.8 x 35 x 0.035
Microstrip	Conductor eléctrico perfecto	32.5 x 1.4 x 0.035

Tabla 3. Resumen del material de los componentes y sus dimensiones del primer diseño de antena de ranura

Todas las dimensiones expuestas en la Tabla 3 son del estilo L x W x H donde L = altura, W= anchura y H = grosor en mm.

La ranura está totalmente centrada en relación al plano de masa y al sustrato dieléctrico, es decir, centrada en la antena.

La tira de alimentación microstrip también se encuentra centrada en la antena, desde el borde del sustrato, con una longitud que se extiende en 32.5 mm hacia el interior de la antena consiguiendo de esa manera una impedancia de línea de 50  $\Omega$  en la misma.

La ranura está totalmente centrada en relación al plano de masa y al sustrato dieléctrico, es decir, centrada en la antena.

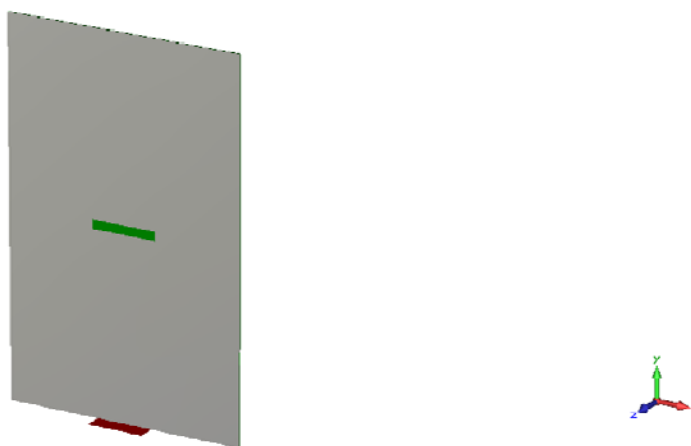


Figura 30. a)

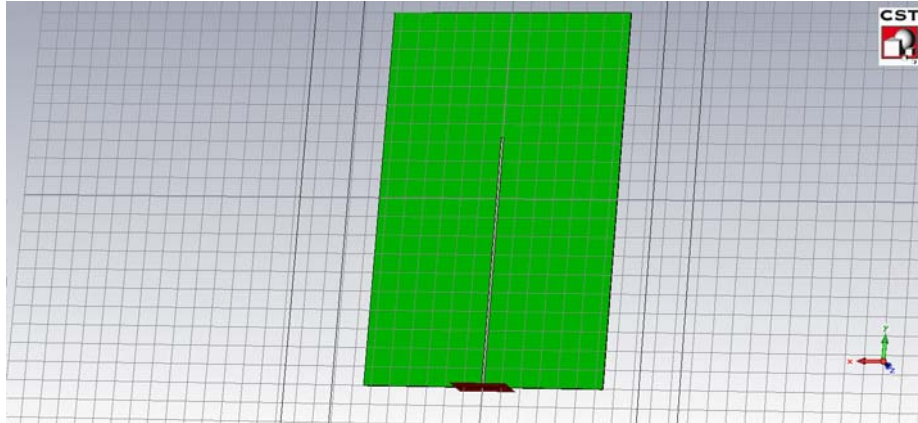


Figura 30. b)

Figura 30. Antena microstrip de ranura a) Vista frontal, ranura b) Vista trasera, alimentación microstrip

Tras la simulación, los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación en las siguientes figuras. La Figura 31 da a conocer cual es la frecuencia de resonancia de la antena, observando el coeficiente de reflexión de -30 dB para la frecuencia de 2.63 GHz.

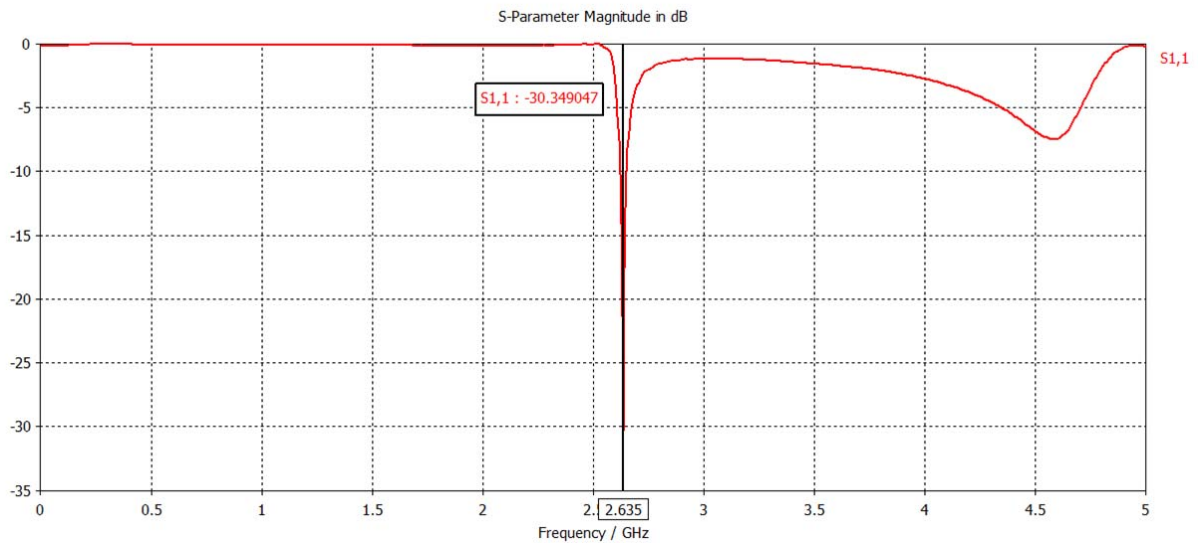


Figura 31. Frecuencia de resonancia de la antena de ranura microstrip

El rango de frecuencias de la señal de excitación empleada en la simulación, abarca desde los 0 GHz hasta los 5 GHz.

Observando linealmente el gráfico se puede concluir que este diseño de antena está pensado para un ancho de banda estrecho dado el pico tan definido en la frecuencia a 2.63 GHz, pero también, es a partir de dicha frecuencia donde se observan valores diferentes de 0 dB de los parámetros de reflexión, observando una replica despreciable a 4.6 GHz aproximadamente. El ancho de banda estrecho va en contra de lo esperado



para una antena de ranura, tal y lo comentado en apartados anteriores (2.3.5 en adelante), debido a la dimensión de anchura de la ranura la cual afecta directamente en el ancho de banda.

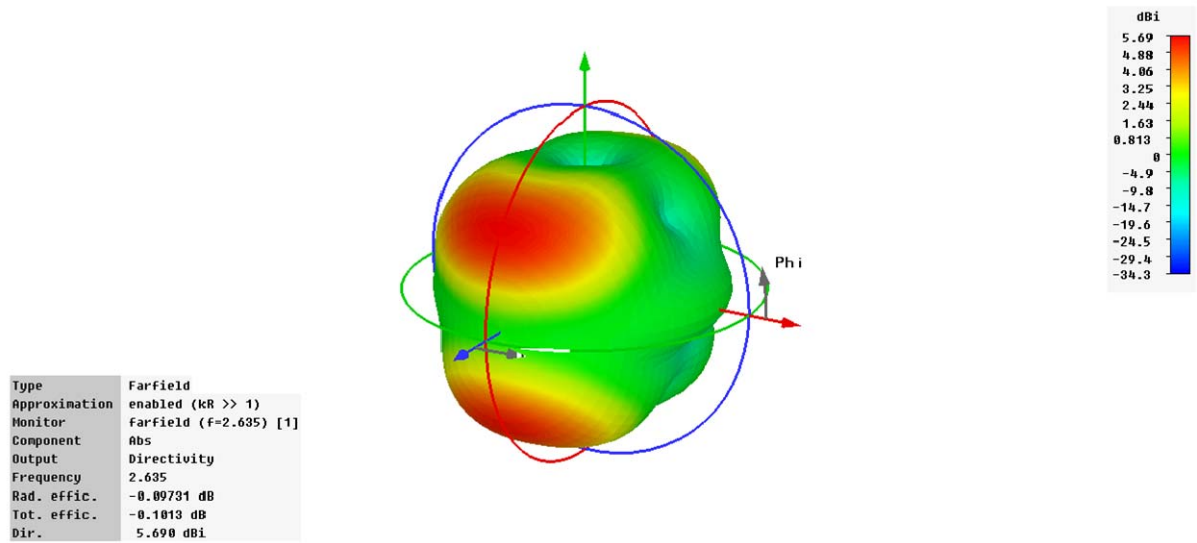


Figura 32. Diagrama de radiación en 3 dimensiones.

En la Figura 32 se muestra en 3 dimensiones el diagrama de radiación, el cual representa claramente la bidireccionalidad de esta antena con dos lóbulos principales a unos 30 grados de inclinación por encima y por debajo de la ranura de la antena. Los valores máximos de los lóbulos son de 5.7 dBi de Directividad.

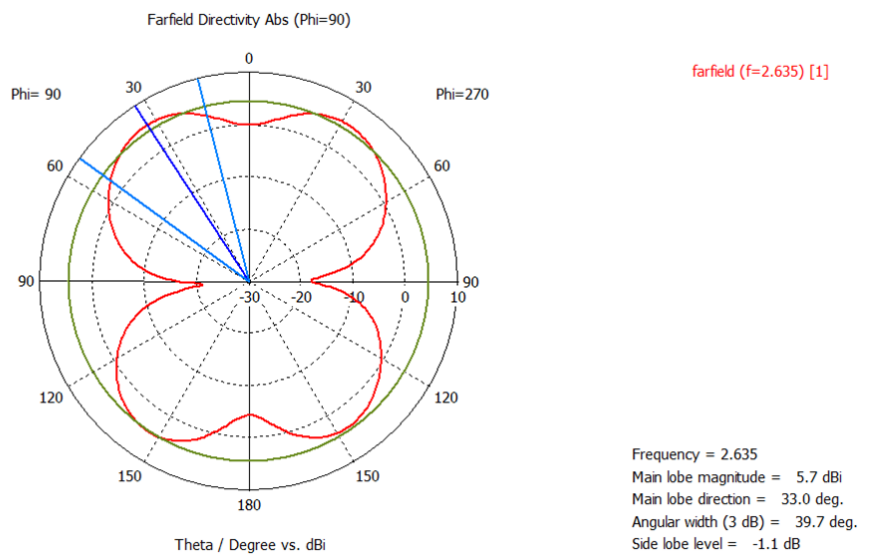


Figura 33. a)

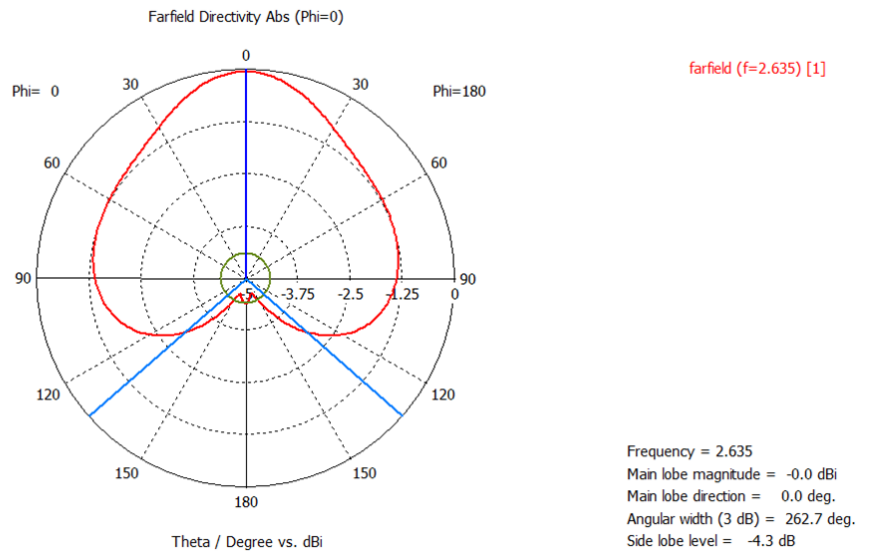


Figura 33. b)

Figura 33. Diagrama de radiación en dos dimensiones. a) Plano eléctrico b) Plano magnético

En la Figura 33 a) se observa el diagrama de radiación del plano eléctrico con un ancho de haz principal (la caída de 3 dB respecto a la magnitud máxima, la dirección en donde la potencia radiada se reduce a la mitad), de 39.7°, demostrando su alta directividad ya que el punto de máxima directividad se encuentra en los 33° por lo que se considera que la antena posee un estrecho rango angular de transmisión / recepción para uno de sus haces principales, compensado con su doble direccionalidad.

Sin embargo, en la Figura 33 b) el diagrama de radiación del corte X-Z (no es el corte del plano magnético porque debería de ser el corte de representación a 33°), es diferente, presentando una forma aproximada de cardioide ( $1+\cos\theta$ ), propio de una antena unidireccional, sin tener prácticamente presencia dado que su Directividad en su lóbulo principal es de 0dBi.

#### 4.1.2. Antena de ranura microstrip con disminución gradual

El siguiente diseño de antena de ranura con alimentación microstrip con disminución gradual (Figura 34) ha sido diseñado completamente mediante el software de antenas CST, empleando las dimensiones y materiales descritos a continuación:

Componente	Material	Dimensiones
Plano de masa	Conductor eléctrico perfecto	32 x 32 x 0.035
Sustrato dieléctrico	FR-4 libre de pérdidas $\epsilon = 4.9$	32 x 32 x 0.79
Ranura	-	1 x 16 x 0.035
Microstrip	Conductor eléctrico perfecto	17.25 x (1, 0.25)x 0.035

Tabla 4. Resumen del material de los componentes y sus dimensiones del primer diseño de antena de ranura

Todas las dimensiones expuestas en la Tabla 4 son del estilo L x W x H donde L = altura, W= anchura y H = grosor en mm. Se observa que para el caso de la tira de alimentación (Figura 34 b)), el valor entre paréntesis representa en primer lugar la anchura máxima de la tira, y en segundo lugar la anchura mínima de la misma; concretamente 1 mm sería la zona más ancha del microstrip y 0.25 mm la parte de la tira más estrecha. La disminución gradual de la anchura de 1 mm a los 0.25mm se produce a lo largo de 3.5 mm. La tira de alimentación microstrip también se encuentra centrada en la antena, desde el borde del sustrato, con una longitud que se extiende en 17.25 mm hacia el interior de la antena consiguiendo de esa manera una impedancia de línea de 50  $\Omega$  en la misma.

La ranura está totalmente centrada en relación al plano de masa y al sustrato dieléctrico, es decir, centrada en la antena.

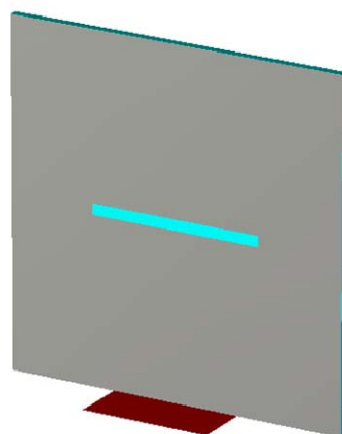


Figura 34. a)

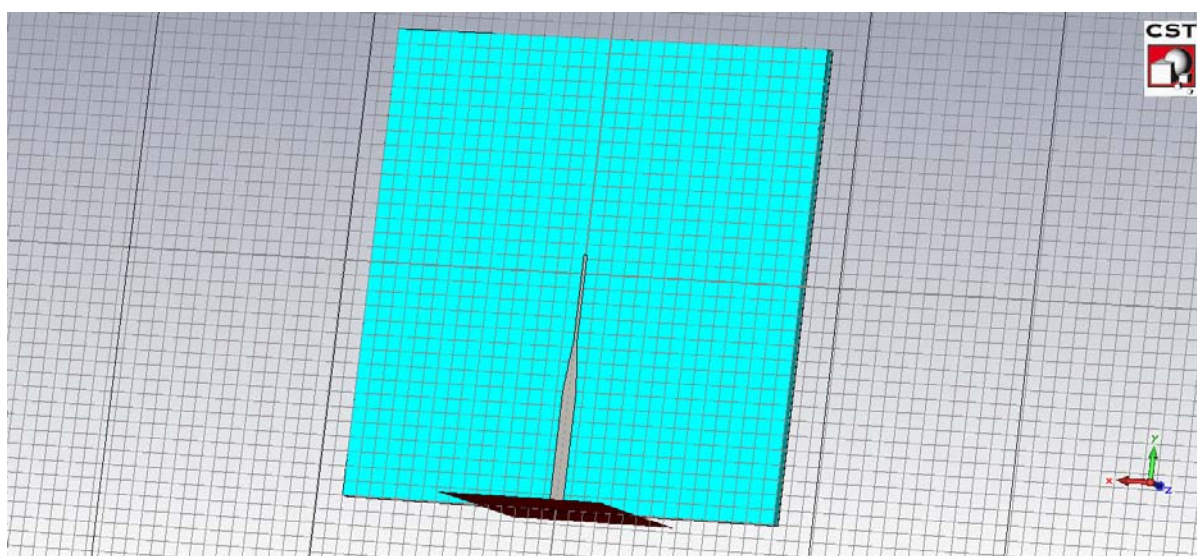


Figura 34. b)

Figura 34. Antena de ranura microstrip a) Vista frontal, ranura de la antena. b) Vista trasera, alimentación microstrip de disminución gradual

Tras la simulación, los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación en las siguientes figuras. La Figura 35 da a conocer cual es la frecuencia de resonancia de la antena, observando el coeficiente de reflexión de -16 dB para la frecuencia de 6.76 GHz.

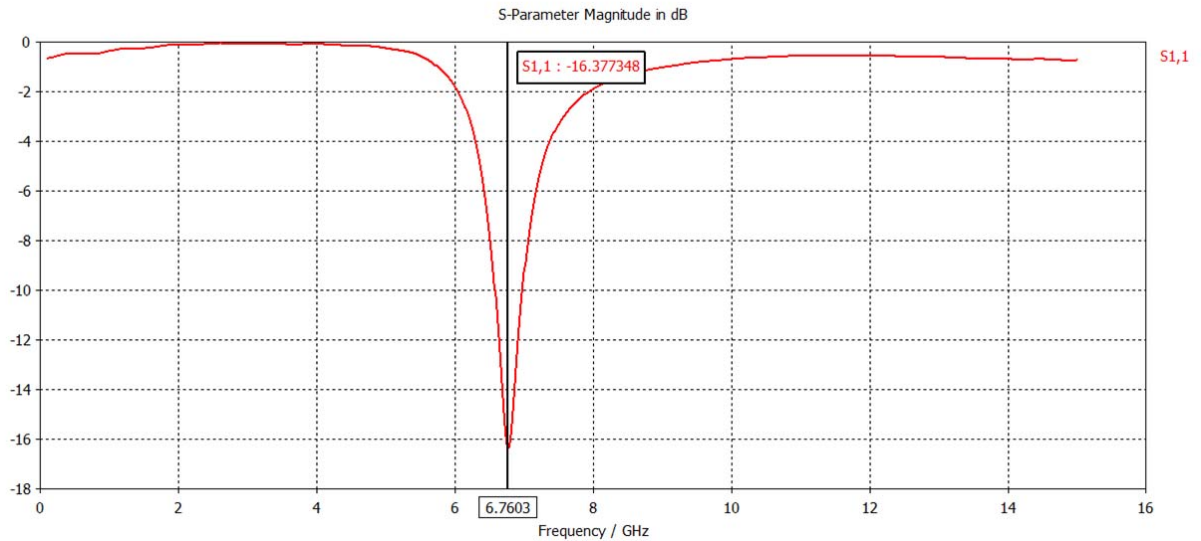


Figura 35. Frecuencia de resonancia

El rango de frecuencias de la señal de excitación empleada en la simulación, abarca desde los 0 GHz hasta los 15 GHz.

Observando linealmente el gráfico se puede concluir que este diseño tiene un ancho de banda no muy estrecho ya que el pico que se observa no posee una caída abrupta, al igual que la subida, en los 6.76 GHz, teniendo un cierto rango de frecuencias para las cuales la antena es operativa algo esperado según la predicción analítica descrita para este tipo de antenas (apartado 2.5.3 en adelante), con su ancho de banda amplio. La frecuencia de resonancia obtenida es un valor esperado, ya que previamente se espera que una antena de estas características, debería de resonar con una anchura de ranura entorno a  $\lambda/2$ , y en este caso nos encontramos con una relación próxima a  $\lambda/3$ , concretamente a  $\lambda/2.77$ .

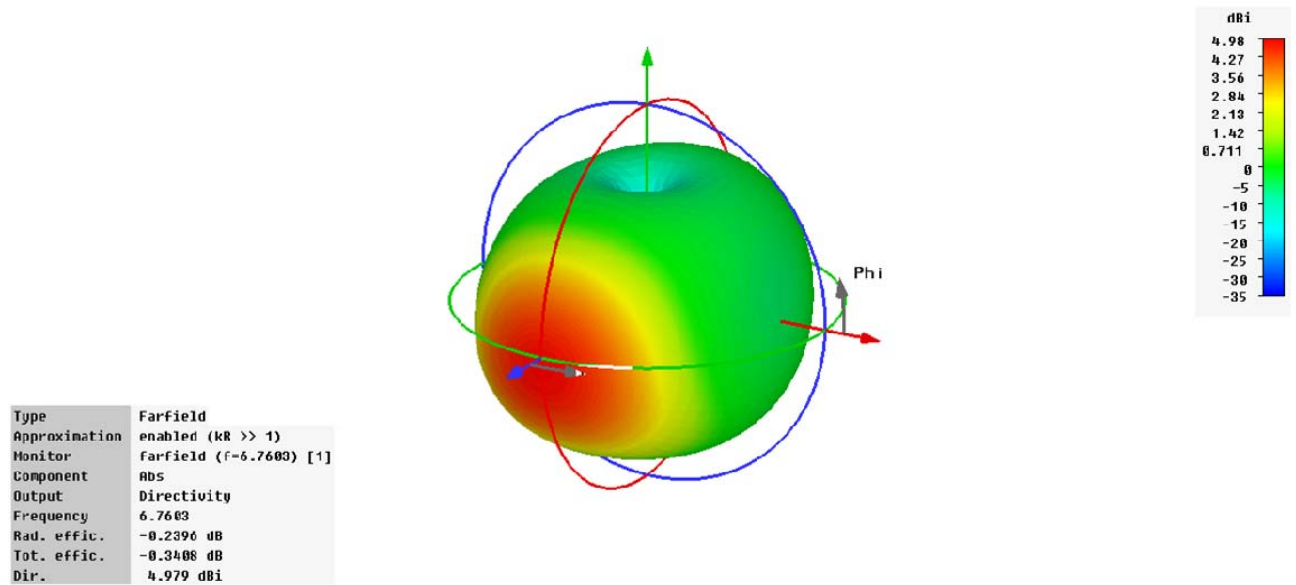


Figura 36. Diagrama de radiación en 3 dimensiones.

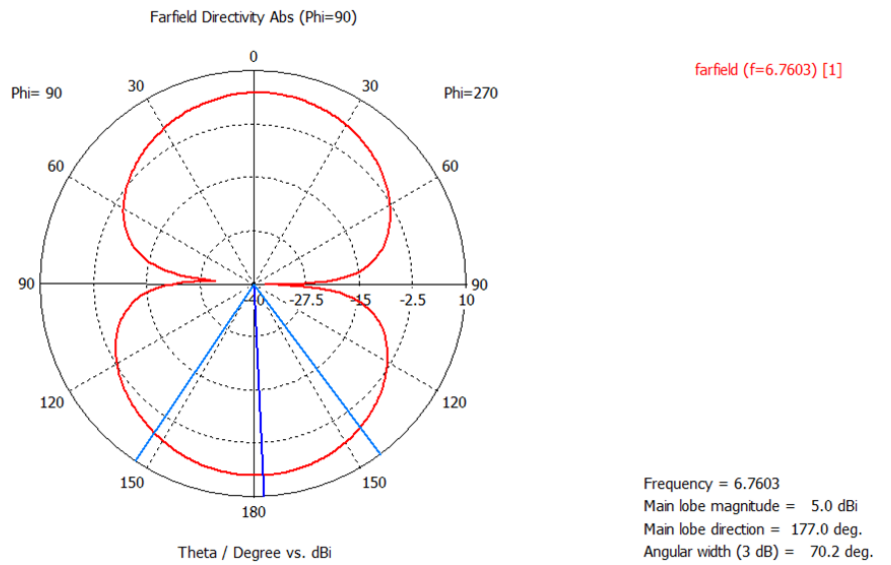


Figura 37. a)

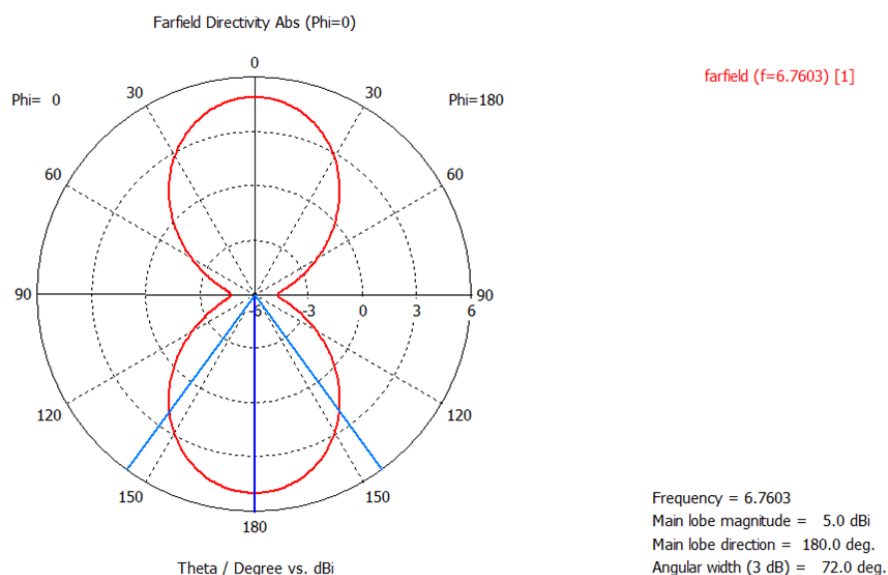


Figura 37. b)

Figura 37. Diagrama de radiación en dos dimensiones. a) Plano eléctrico. b) Plano magnético

En la Figura 37 a) y en la Figura 37 b) se observan los diagramas de radiación de los planos eléctricos y magnéticos respectivamente, y son muy parejos. El diagrama de radiación del plano eléctrico posee un ancho de haz principal de 70.2°, y el del plano magnético de 72°. Son diagramas de radiación bidireccionales, concentrándose su radiación en 0° y 180°, no teniendo respuesta alguna en los laterales de la antena.

El mayor valor de directividad del lóbulo principal se produce en los 177° para el plano eléctrico y en 180° en el plano magnético, que aunque existe simetría en el diseño, se debe a que la radiación no se reparte por igual en los dos planos.

#### 4.1.3. Comparación de los resultados de los diseños

Los diseños anteriores, son diferentes en muchos aspectos, dejando aparte el hecho de que se tratan de antenas de ranura con alimentación microstrip y de sus materiales.

Hablando de dimensiones, son totalmente diferentes, excepto en los grosores de los elementos que las forman, en la siguiente Tabla 5, se muestra una comparación entre ellas.

Componente	Diseño 1	Diseño 2
Plano de masa	200 x 128 x 0.035	32 x 32 x 0.035
Sustrato dieléctrico	200 x 128 x 0.79	32 x 32 x 0.79

Ranura	4.8 x 35 x 0.035	1 x 16 x 0.035
Microstrip	32.5 x 1.4 x 0.035	17.25 x (1, 0.25 )x 0.035

Tabla 5. Dimensiones de los diseños de las dos antenas de ranura

Debido a la gran diferencia de sus dimensiones, las frecuencias de operación de cada antena son totalmente diferentes, al igual que sus diagramas de radiación. En la siguiente Figura 38, podemos ver la diferencia entre los dos diagramas de radiación en tres dimensiones.

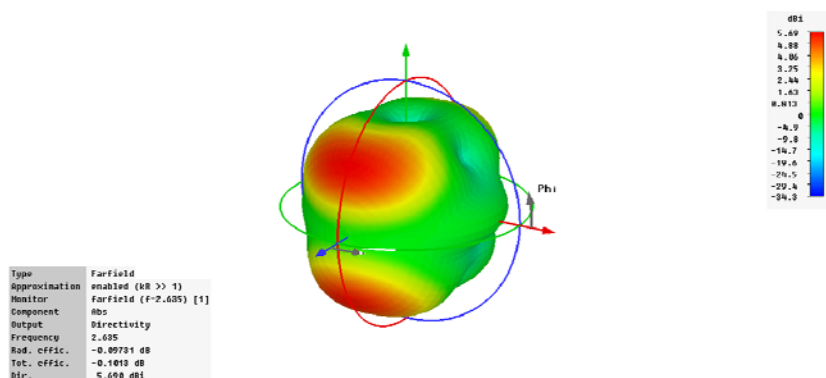


Figura 38. a)

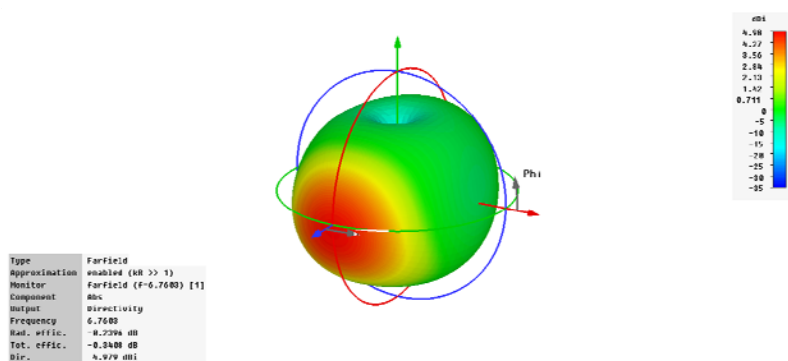


Figura 38. b)

Figura 38. Diagramas de radiación en tres dimensiones de las dos antenas de ranura. a) Primer diseño. b) Segundo diseño  
Como se ha comentado, anteriormente, sus dimensiones hacen que la frecuencia de trabajo sea también diferente, siendo para el primer diseño de 2.6 y en el segundo de 6.7. (Figura 39)



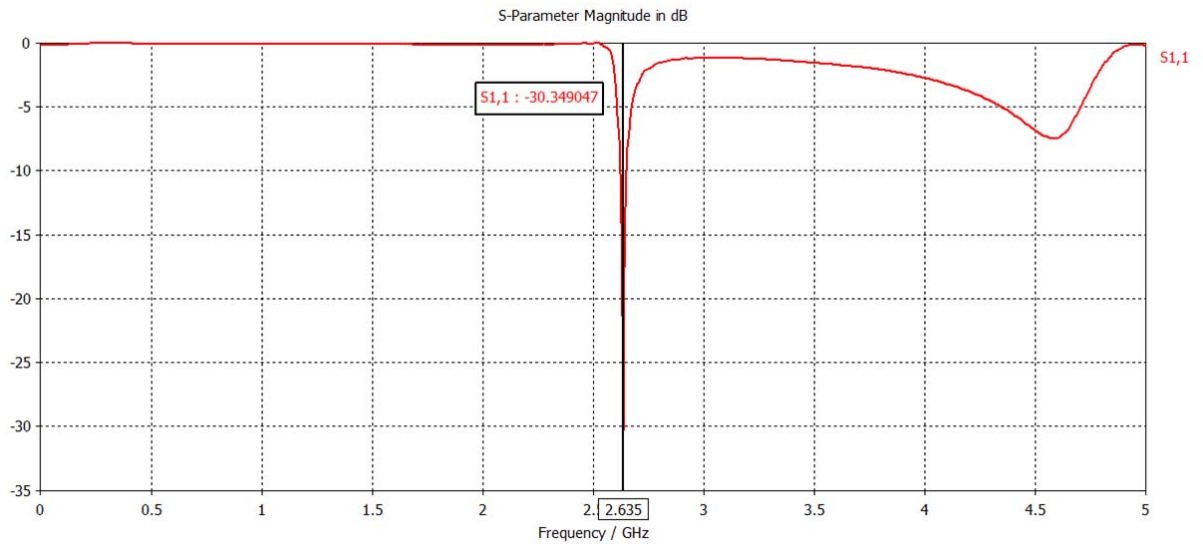


Figura 39. a)

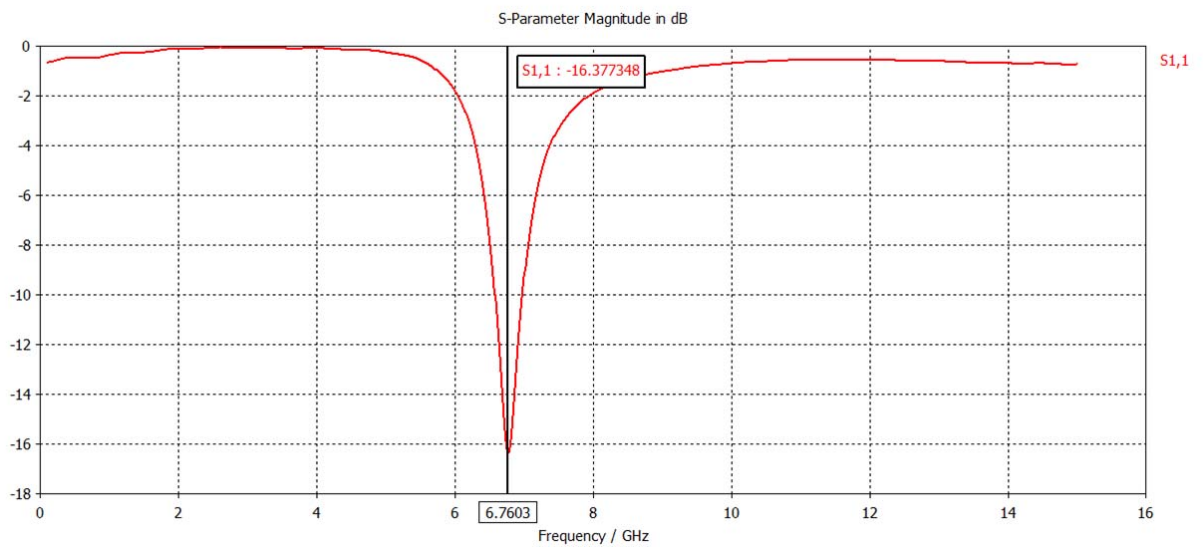


Figura 39. b)

Figura 39. Representación del coeficiente de reflexión para diferentes frecuencias a) Primer diseño. b) Segundo diseño

También, como ya se comenta en los apartados propios de los dos diseños 4.1.1 y 4.1.2, el segundo diseño posee un cierto ancho de banda, superior al primer diseño, tal y como muestra el pico de caída / subida tan abrupta en la Figura 39 a).

#### ***4.2 Antena de parche fractal alimentación coaxial (Lazo de Sierpinski)***

Como se ha comentado en el apartado 3.3.1, en este proyecto se han analizado tres diseños diferentes del tipo de antena parche con alimentación coaxial, empleando la forma de lazo para el parche en el primer diseño (Figura 29 a)), forma de lazo empleando dos triángulos de Sierpinski de iteración 2 para el parche (Figura 29 b)) y por último parche en forma de triángulo formado por dos triángulos de Sierpinski de iteración 3 (Figura 29 c)).

En todos los casos se han empleado los mismos materiales para su análisis y posterior comparación; son los siguientes:

- Parche: conductor eléctrico perfecto
- Plano de masa: conductor eléctrico perfecto
- Sustrato dieléctrico: material con una constante dieléctrica de 3.8 ( $\epsilon = 3.8$ )
- Núcleo alimentación coaxial: conductor eléctrico perfecto
- Aislante alimentación coaxial: Teflón sin pérdidas con una constante dieléctrica de 2.08 ( $\epsilon = 2.08$ )
- Masa del cable coaxial: conductor eléctrico perfecto

Todos los diseños han sido realizados mediante el software CST, excepto la creación de los parches que han sido creados mediante Autocad para luego ser importados directamente a CST.

A continuación, se realiza el análisis correspondiente a cada diseño.

### 4.2.1 Parche en forma de lazo

El primer diseño de la antena parche posee las siguientes dimensiones (Figura 31):

- $W \times H = 45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ , donde  $W$  = anchura y  $H$  = altura de la antena, por lo que estas dimensiones son las que poseen el sustrato dieléctrico y el plano de masa.
- El grosor del plano de masa es de  $35 \mu\text{m}$ , al igual que el grosor del parche.
- El grosor del sustrato dieléctrico es de  $1.52 \text{ mm}$ .
- El parche posee unas dimensiones de  $40 \text{ mm}$  de altura y una anchura de  $40 \text{ mm}$ , con una distancia de  $3.6 \text{ mm}$  en el centro en la unión de los dos triángulos. (Figura 30).

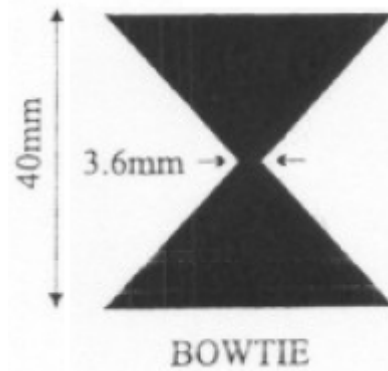


Figura 30. Dimensiones del parche [22]

- El punto de alimentación de la antena (el centro del núcleo del coaxial) está situado a  $1.5 \text{ mm}$  por encima del centro de la antena. El punto exacto de la alimentación se produce directamente en el parche por la parte de atrás, por lo que el ‘vivo’ del cable coaxial atraviesa el plano de masa así como el sustrato dieléctrico.
- Para una correcta simulación con CST es necesario dar cierta longitud al cable coaxial para que la señal de entrada que emplea en los algoritmos de simulación sea estable a la entrada de la antena, considerando entonces una longitud de  $10 \text{ mm}$  a partir de la superficie del plano de masa de la antena.

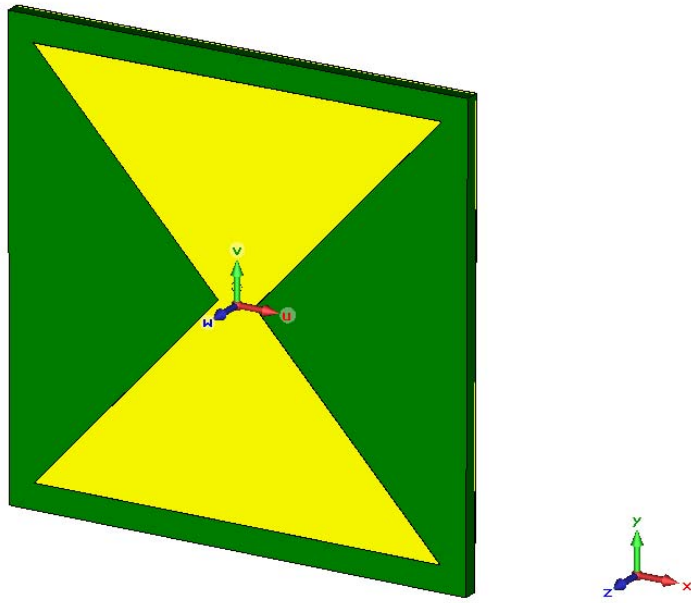


Figura 31. Antena de parche con forma de lazo.

Para la simulación se emplea un rango de frecuencias de excitación de la antena de 0 a 3 GHz, por lo que son señales de longitudes de onda comprendidas entre 0 y 100 mm. Tras la simulación, como se puede observar en la siguiente Figura 32, se obtiene una frecuencia de resonancia en 1.28 GHz, frecuencia a la cual la antena radía.

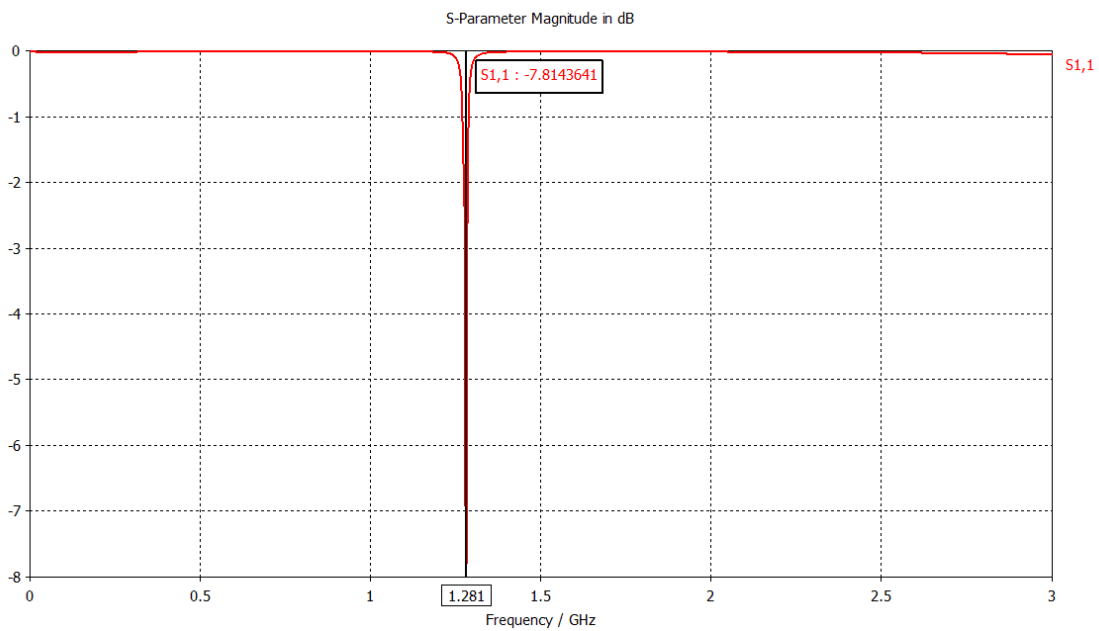


Figura 32. Coeficiente de reflexión en dB de la antena.

La gráfica anterior muestra el coeficiente de reflexión medido en dB de la antena según la frecuencia de la señal con la que se excita la misma.

La siguiente Figura 33 muestra el diagrama de radiación en 3 dimensiones de la antena parche en forma de lazo.

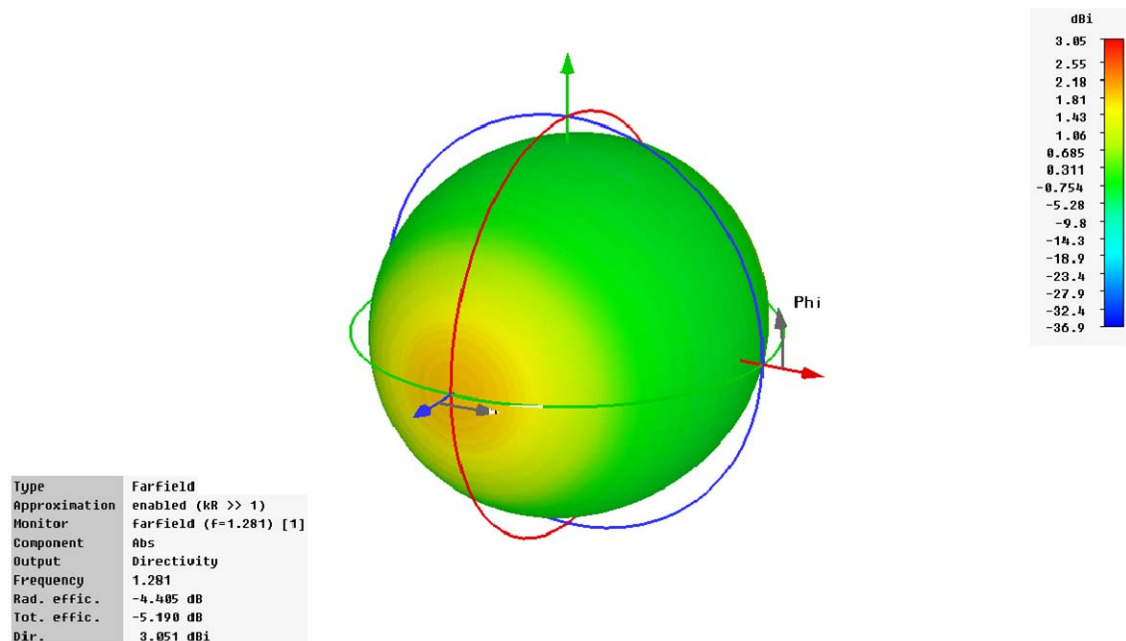
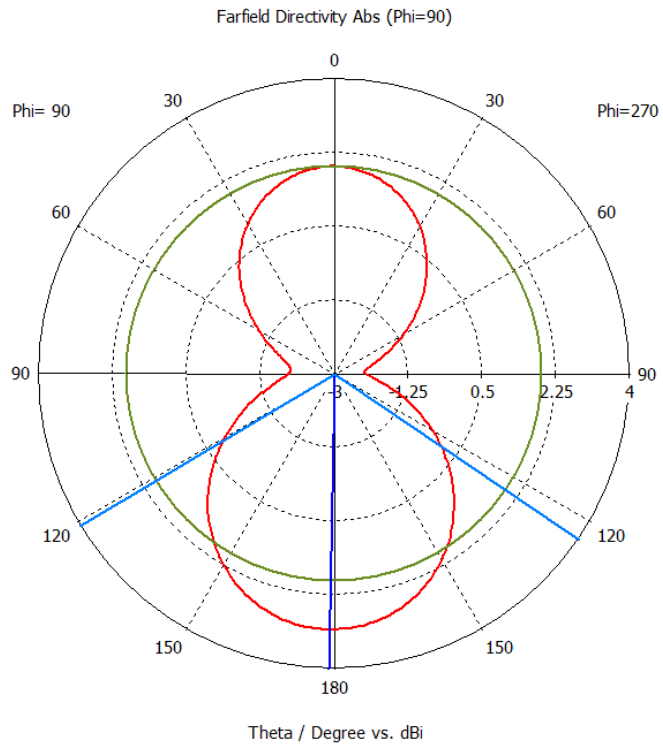


Figura 33. Diagrama de radiación en 3 dimensiones.

En la Figura 33 se puede ver la direccionalidad de la antena con un valor máximo de directividad de 3.051 dBi, un valor típico para este tipo de antenas.

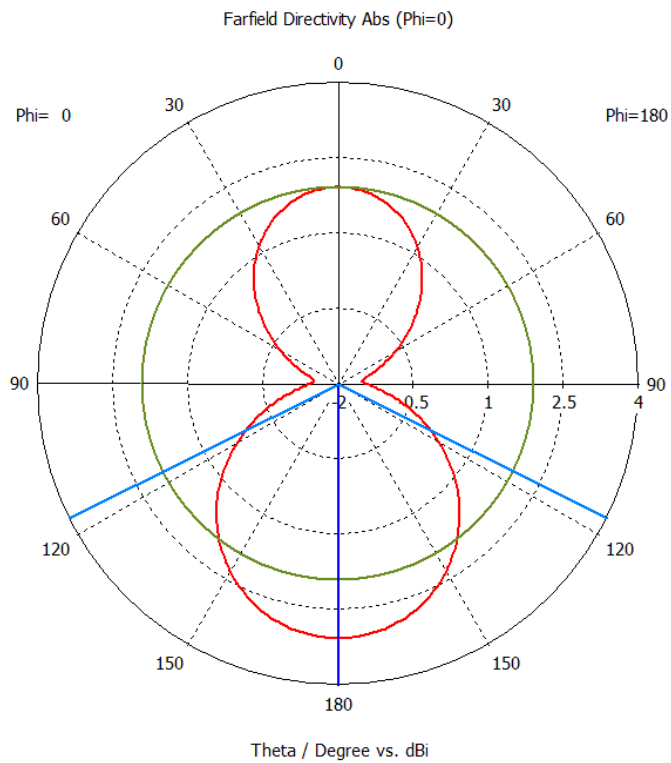
En la última Figura 34 de la simulación, se exponen los diagramas de radiación en dos dimensiones de los planos eléctricos y magnéticos de la antena.



farfield (f=1.281) [1]

Frequency = 1.281  
 Main lobe magnitude = 3.1 dBi  
 Main lobe direction = 179.0 deg.  
 Angular width (3 dB) = 114.9 deg.  
 Side lobe level = -1.1 dB

Figura 34. a)



farfield (f=1.281) [1]

Frequency = 1.281  
 Main lobe magnitude = 3.1 dBi  
 Main lobe direction = 180.0 deg.  
 Angular width (3 dB) = 126.9 deg.  
 Side lobe level = -1.1 dB

Figura 34. b)

Figura 34. Diagramas de radiación en dos dimensiones. a) Plano Eléctrico b) Plano magnético

En estos diagramas se aprecia claramente, observando el lóbulo principal, la alta directividad de la antena, no existiendo lóbulos laterales. El ancho del haz principal (la caída de 3 dB respecto a la magnitud máxima, la dirección en donde la potencia radiada se reduce a la mitad), es de 126.9 grados por lo que se considera que la antena posee un amplio rango angular de transmisión / recepción. Por último cabe destacar el lóbulo de radiación existente en la parte trasera de la antena.

#### 4.2.2 Parche lazo de Sierpinski iteración 2

El segundo diseño de la antena parche posee las siguientes dimensiones (Figura 46):

- $W \times H = 45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ , donde  $W$  = anchura y  $H$  = altura de la antena, por lo que estas dimensiones son las que poseen el sustrato dieléctrico y el plano de masa.
- El grosor del plano de masa es de  $35 \mu\text{m}$ , al igual que el grosor del parche.
- El grosor del sustrato dieléctrico es de 1.52 mm.
- El parche posee unas dimensiones de 40 mm de altura y una anchura de 40 mm, con una distancia de 3.6 mm en el centro, en la unión de los dos triángulos. Al ser la segunda iteración del triángulo de Sierpinski, al parche original en forma de lazo se le aplican aberturas según las iteraciones de Sierpinski, por lo que existen dos tipos de triángulos como aberturas, los más pequeños de base 8 mm y altura 4 mm y los mayores de base 18 mm y de altura 9 mm (Figura 45).

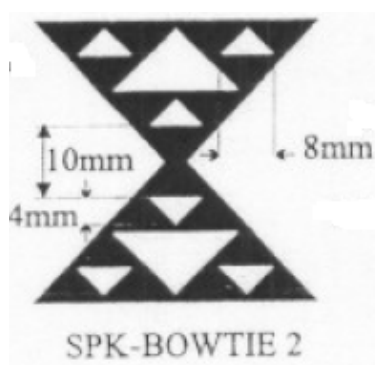


Figura 45. Dimensiones del parche [22]

- El punto de alimentación de la antena (el centro del núcleo del coaxial) está situado a 2.5 mm por encima del punto central de la antena. El punto exacto de la alimentación se produce directamente en el parche por la parte de atrás, por lo

que el ‘vivo’ del cable coaxial atraviesa el plano de masa así como el sustrato dieléctrico.

- La longitud del cable coaxial definida en este diseño es de 20 mm a partir de la superficie del plano de masa de la antena.

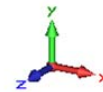
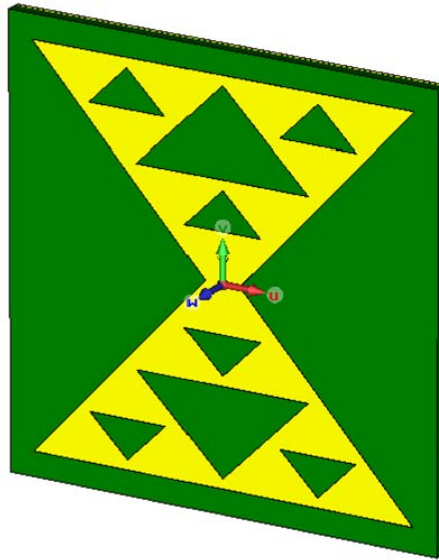


Figura 46. Antena de parche con forma de lazo Sierpinski iteración 2.

Para la simulación se emplea un rango de frecuencias de excitación de la antena de 0 a 5 GHz, por lo que son señales de longitudes de onda comprendidas entre 0 y 60 mm.

Tras la simulación, como se puede observar en la siguiente Figura 42, se obtiene una frecuencia de resonancia en 1.20 GHz, frecuencia a la cual la antena radía.



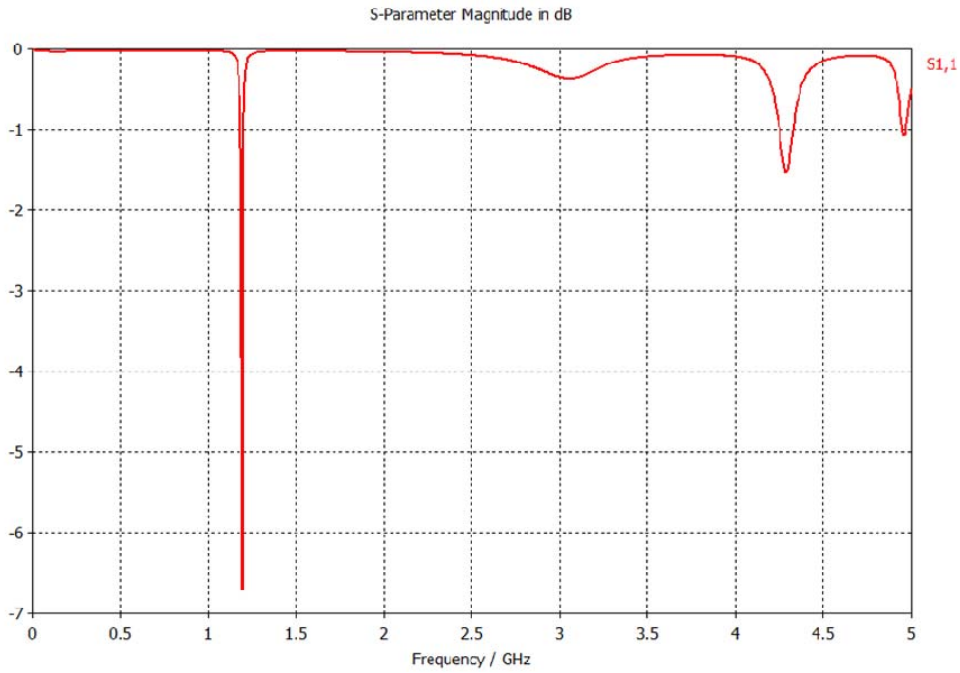


Figura 47. Coeficiente de reflexión en dB de la antena para diferentes frecuencias

La gráfica anterior muestra el coeficiente de reflexión medido en dB de la antena según la frecuencia de la señal con la que se excita la misma.

La siguiente Figura 48 muestra el diagrama de ganancia en 3 dimensiones de la antena parche en forma de lazo Sierpinski de segunda iteración.

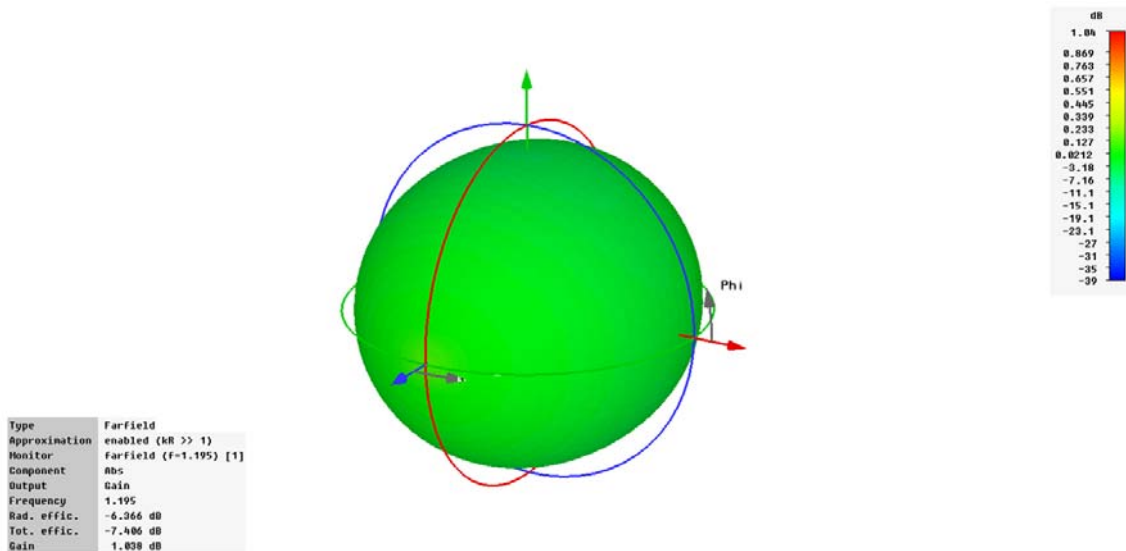


Figura 48. a)

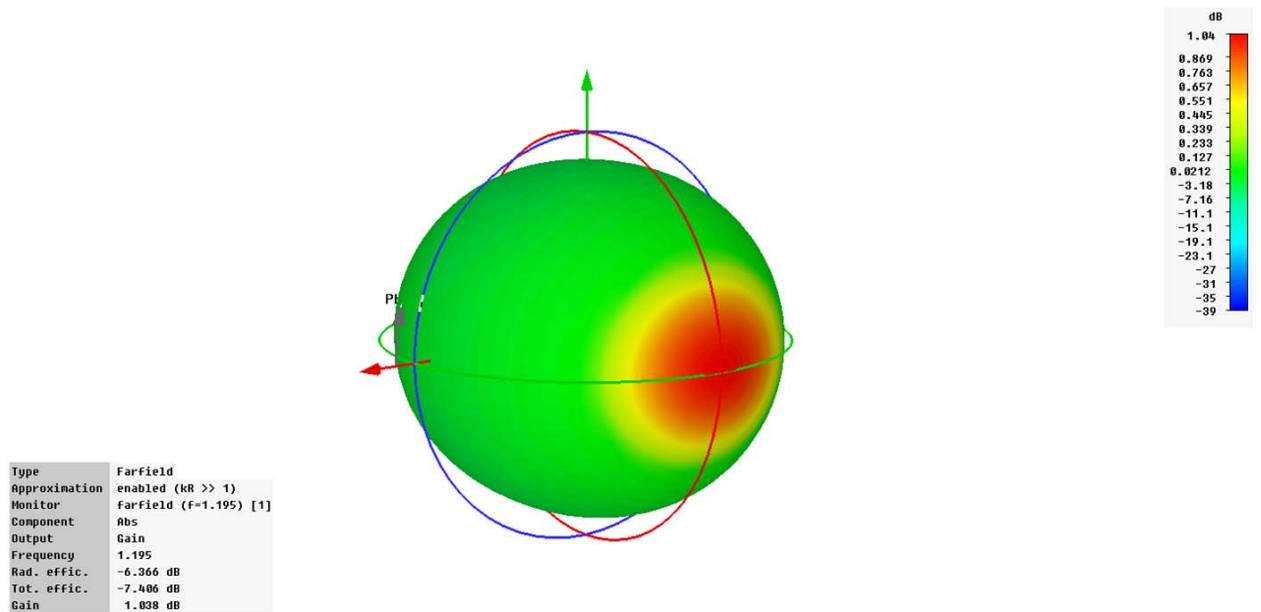


Figura 48. b)

Figura 48. Diagrama de ganancia en 3 dimensiones. a) Dirección 0 + Z , vista frontal b) Dirección 0 – Z, vista trasera.

En la Figura 48 se puede ver la ganancia de la antena con un valor máximo de 1.03 dBi, pero la máxima ganancia se produce por la parte trasera de la antena (Figura 48 b)), por lo que en principio se trata de un efecto no deseado, el cual se tratará de evitar de algún modo como puede ser el empleo de reflectores. A su vez, el valor máximo es un valor ligeramente inferior a valores típicos del mundo real

El motivo por el cual en esta antena se representa la ganancia y no la directividad es debido a que los valores obtenidos de directividad en la simulación no son correctos, entonces como la ganancia se relaciona con la directividad a través de la eficiencia de la antena (apartado 2.2.7), y es igualmente representativo, se ha decidido incluir este parámetro.

En la última Figura 49 de la simulación, se exponen los diagramas de radiación en dos dimensiones de los planos eléctricos y magnéticos de la antena.

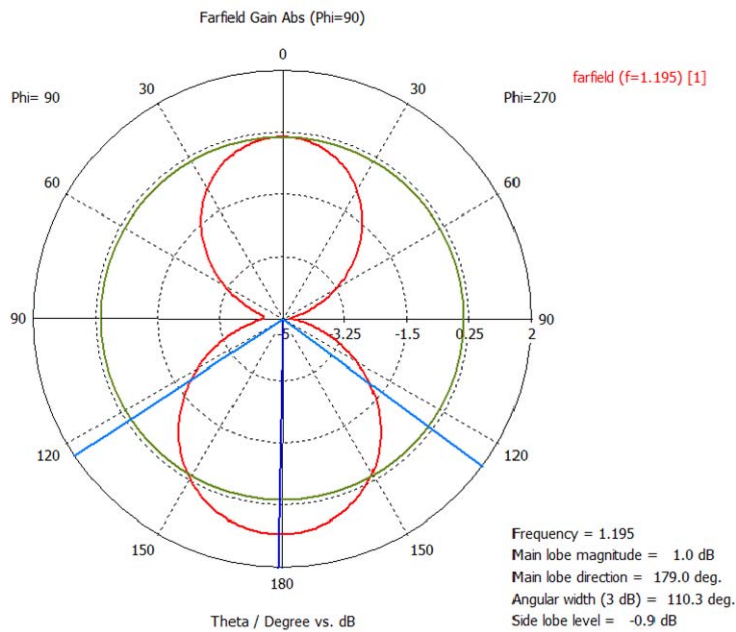


Figura 49. a)

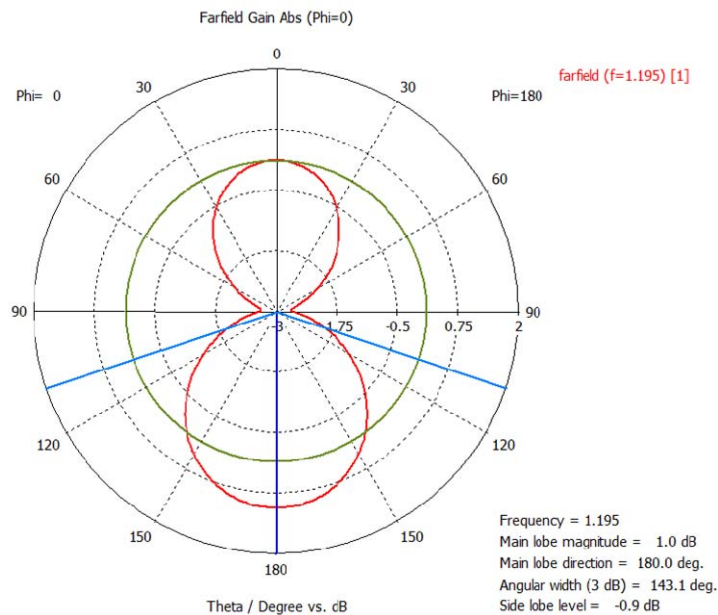


Figura 49. b)

Figura 49. Diagramas de radiación en dos dimensiones. a) Plano Eléctrico b) Plano magnético

En estos diagramas se aprecia claramente, se observa que no existen lóbulos laterales, mostrando un diagrama bidireccional. El ancho del haz principal es de  $110^\circ$  para el plano eléctrico y de  $143^\circ$  para el plano magnético, por lo que se considera que la antena posee un amplio rango angular de transmisión / recepción. También se observa que la mayor radiación de esta antena se produce en la parte de atrás de la misma como se ha comentado anteriormente.

### 4.2.3 Parche lazo de Sierpinski iteración 3

El tercer diseño de la antena parche posee las siguientes dimensiones (Figura 51):

- $W \times H = 45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ , donde  $W$  = anchura y  $H$  = altura de la antena, por lo que estas dimensiones son las que poseen el sustrato dieléctrico y el plano de masa.
- El grosor del plano de masa es de  $35 \mu\text{m}$ , al igual que el grosor del parche.
- El grosor del sustrato dieléctrico es de  $1.52 \text{ mm}$ .
- El parche posee unas dimensiones de  $40 \text{ mm}$  de altura y una anchura de  $40 \text{ mm}$ , con una distancia de  $3.6 \text{ mm}$  en el centro, en la unión de los dos triángulos. Al ser la tercera iteración del triángulo de Sierpinski, al parche original en forma de lazo se le aplican aberturas según las iteraciones de Sierpinski, por lo que existen tres tipos de triángulos como aberturas, los más pequeños de base  $3 \text{ mm}$  y altura  $1.5 \text{ mm}$ , los triángulos de la segunda iteración de base  $8 \text{ mm}$  y altura  $4 \text{ mm}$  y los mayores de base  $18 \text{ mm}$  y de altura  $9 \text{ mm}$  (Figura 50).

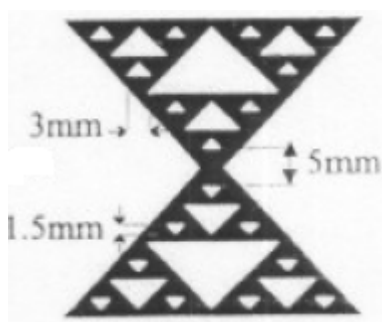


Figura 50. Dimensiones del parche [22]

- El punto de alimentación de la antena (el centro del núcleo del coaxial) está situado a  $2.5 \text{ mm}$  por encima del punto central de la antena. El punto exacto de la alimentación se produce directamente en el parche por la parte de atrás, por lo que el ‘vivo’ del cable coaxial atraviesa el plano de masa así como el sustrato dieléctrico.
- La longitud del cable coaxial definida en este diseño es de  $20 \text{ mm}$  a partir de la superficie del plano de masa de la antena.

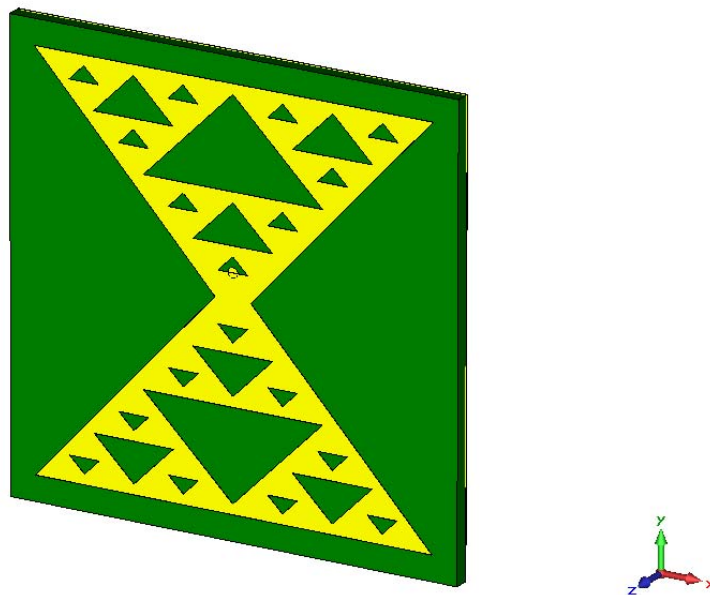


Figura 51. Antena de parche con forma de lazo Sierpinski iteración 2.

Para la simulación se emplea un rango de frecuencias de excitación de la antena de 0 a 3 GHz, por lo que son señales de longitudes de onda comprendidas entre 0 y 100 mm.

Tras la simulación, como se puede observar en la siguiente Figura 52, se obtiene una frecuencia de resonancia en 1.19 GHz, frecuencia a la cual la antena radía.

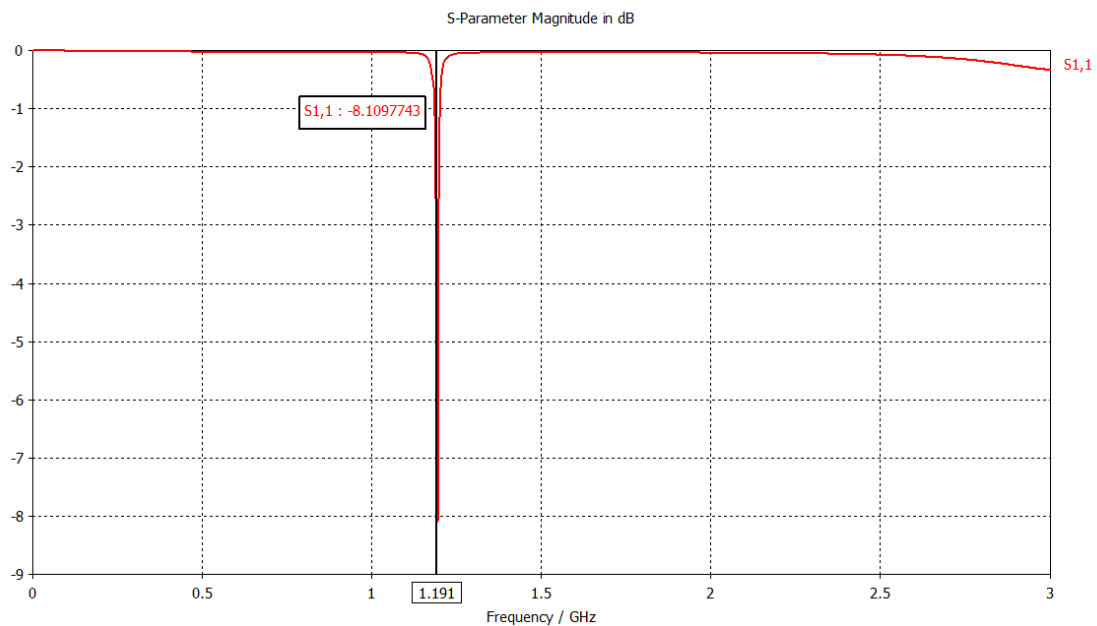


Figura 52. Coeficiente de reflexión en dB de la antena para diferentes frecuencias

La gráfica anterior muestra el coeficiente de reflexión medido en dB de la antena según la frecuencia de la señal con la que se excita la misma.

La siguiente Figura 53 muestra el diagrama de radiación en 3 dimensiones de la antena parche en forma de lazo Sierpinski de tercera iteración.

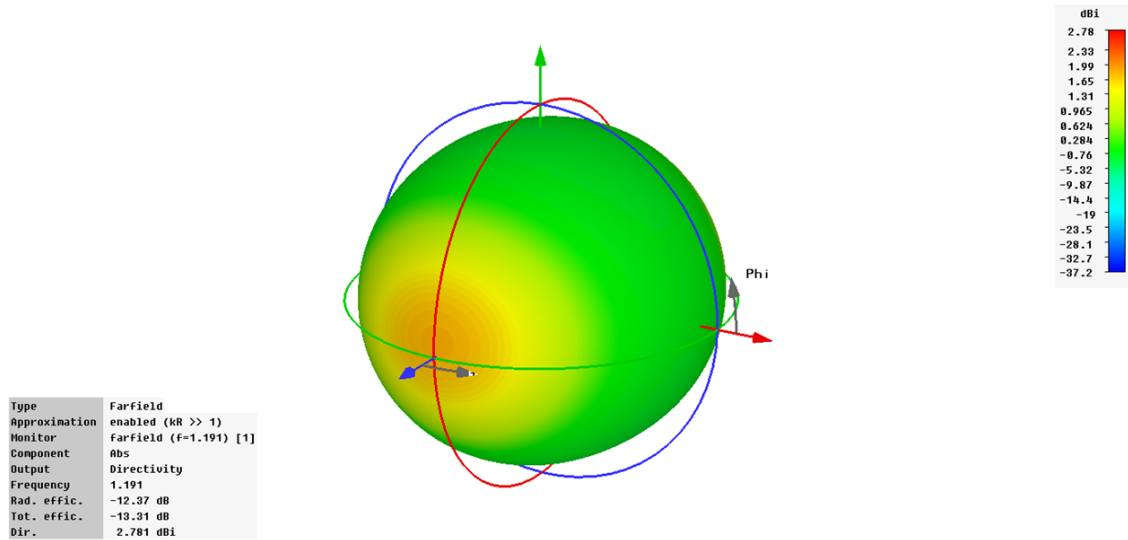


Figura 53. Diagrama de radiación en 3 dimensiones.

En la Figura 53 se puede ver la alta direccionalidad de la antena con un valor máximo de directividad de 2.78 dBi.

En la última Figura 54 de la simulación, se exponen los diagramas de radiación en dos dimensiones de los planos eléctrico y magnético de la antena.

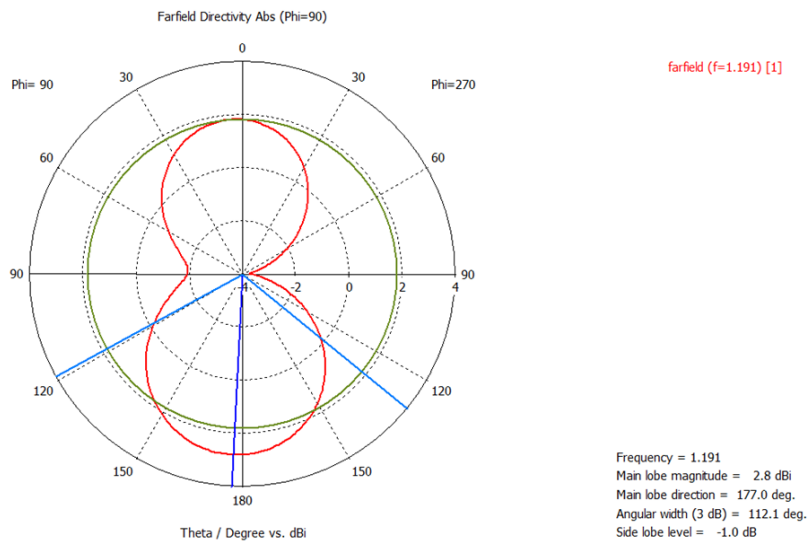


Figura 54. a)

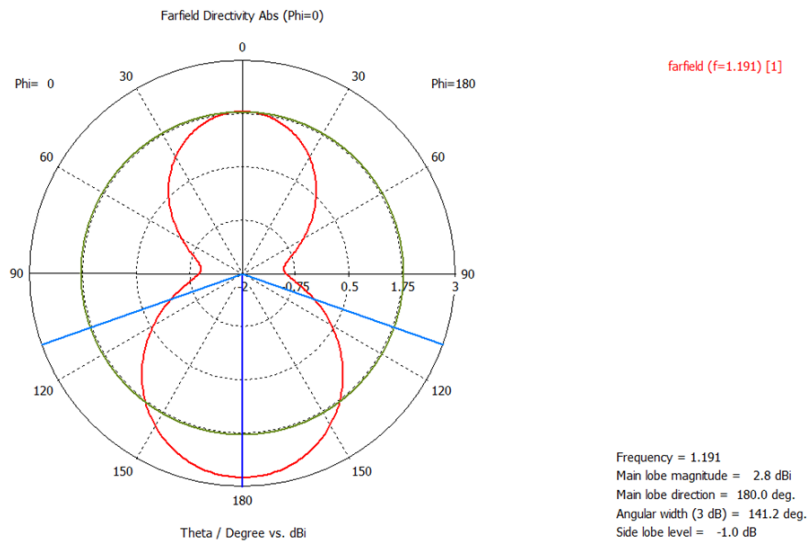


Figura 54. b)

Figura 54. Diagramas de radiación en dos dimensiones. a) Plano Eléctrico b) Plano magnético

En estos diagramas se aprecia claramente, observando el lóbulo principal, una directividad típica de este tipo de antenas, no existiendo lóbulos laterales. El ancho del haz principal es de  $112^\circ$  para el plano eléctrico y de  $141^\circ$  para el plano magnético, por lo que se considera que la antena posee un amplio rango angular de transmisión / recepción.

Cabe destacar, como se observa en la Figura 54 b), la existencia de radiación en los laterales de la antena, sin poseer unos valores altos de potencia en torno a 0.75 dBi. En la Figura 54 a) si se puede observar que no existe radiación eléctrica en uno de los laterales de la antena, pero si en el otro con un valor de -2 dBi, prácticamente despreciable.

#### 4.2.4 Comparación de los resultados de los diseños

Atendiendo a las dimensiones de los diseños expuestos en los apartados 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, poseen exactamente las mismas, exceptuando el hecho de que los parches son diferentes en cada uno de ellos (Figura 55)

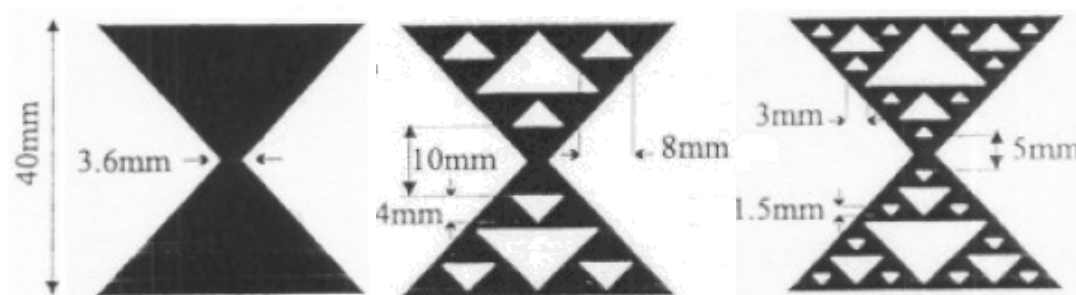


Figura 55. a)

Figura 55. b)

Figura 55. c)

Figura 55. Dimensiones de los parches en forma de lazo a) Parche en forma de lazo b) Parche lazo Sierpinski  $i=2$   
c) Parche lazo Sierpinski  $i=3$

La frecuencia de resonancia de cada antena disminuye respecto al parche diseñado inicialmente, concretamente se produce una disminución de un 8% respecto el parche en forma de lazo y el parche en forma de lazo Sierpinski de iteración 3 (Figura 56). La reducción de la frecuencia de resonancia es muy interesante para aplicaciones donde es necesario la utilización de pequeñas antenas, como por ejemplo móviles y células de conexión sin cables.

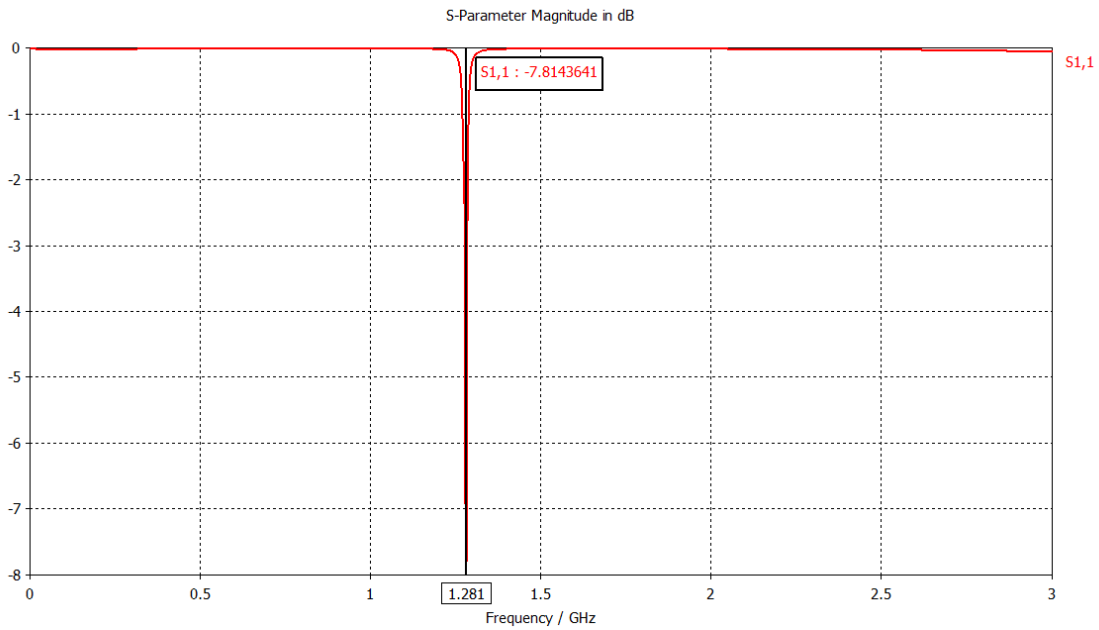


Figura 56. a)

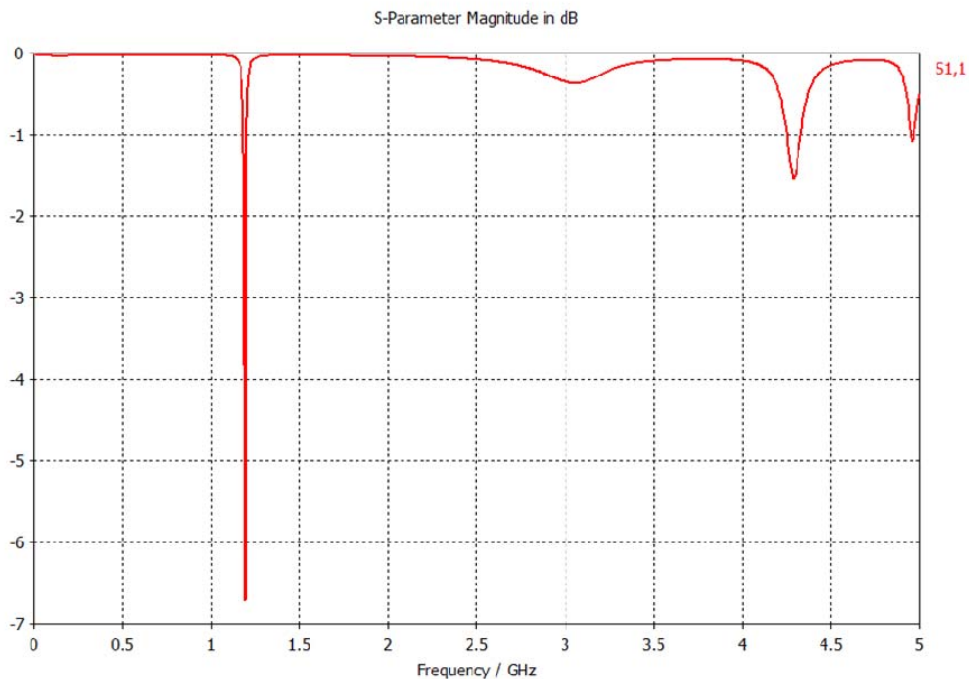


Figura 56. b)



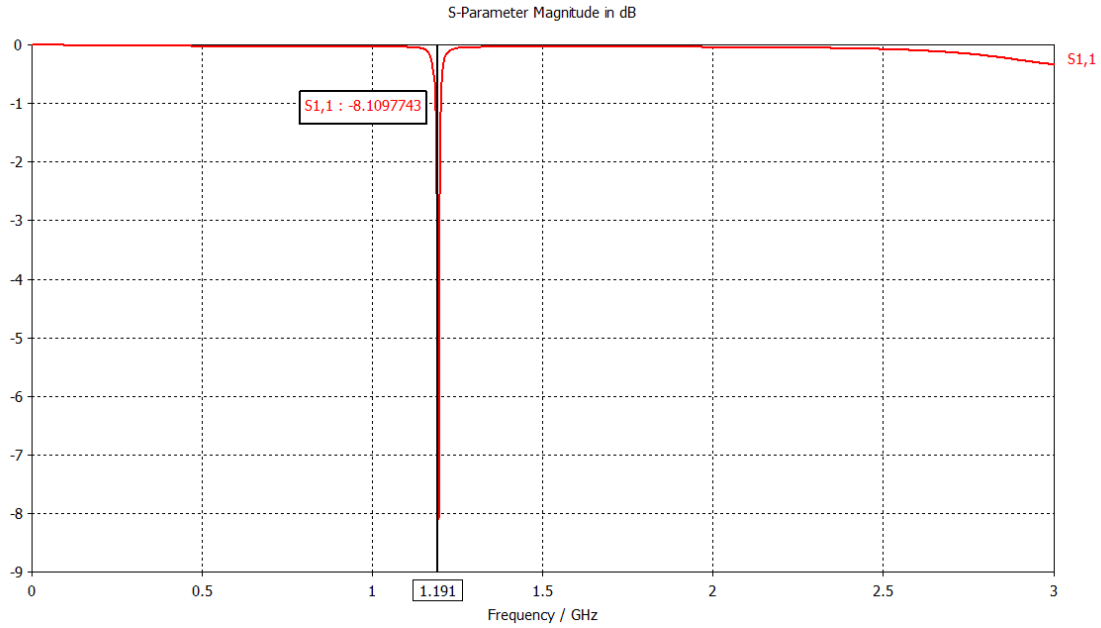


Figura 56. c)

Figura 56. Frecuencias de resonancia a) Parche en forma de lazo b) Parche lazo Sierpinski i=2  
c) Parche lazo Sierpinski i=3

Atendiendo a los diagramas de radiación en tres dimensiones (Figura 57), se puede observar la diferencia en niveles de Directividad en las tres antenas. Tanto el diagrama de la antena de parche en forma de lazo (Figura 57 a)) como la antena de parche en forma de lazo Sierpinski de tercera iteración (Figura 57 c)) poseen un diagrama de radiación muy similar, tanto en el punto de máxima directividad (3.05 dBi para el primer diseño, 2.78 dBi para el tercer diseño) como los valores de directividad en el resto del espacio, 360° alrededor de la antena.

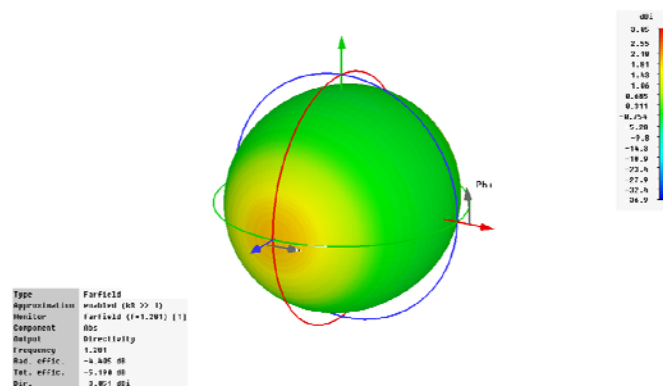


Figura 57. a)

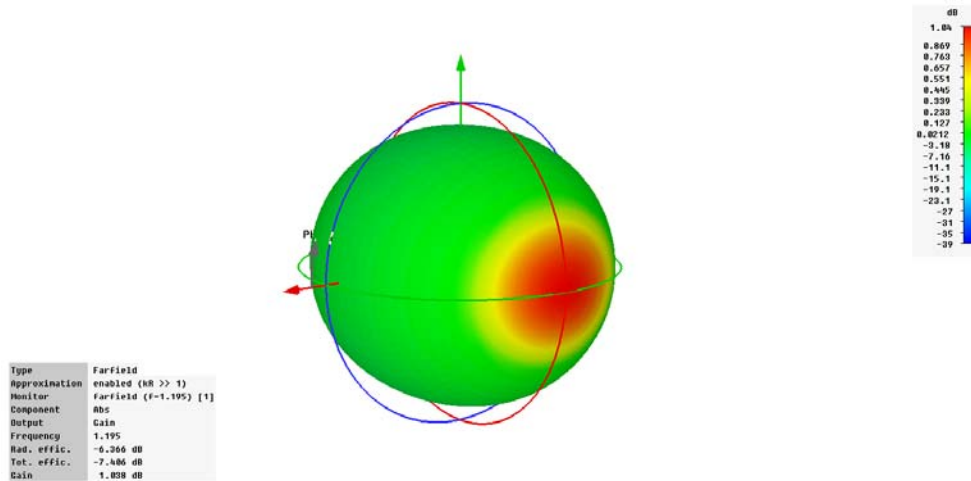


Figura 57. b)

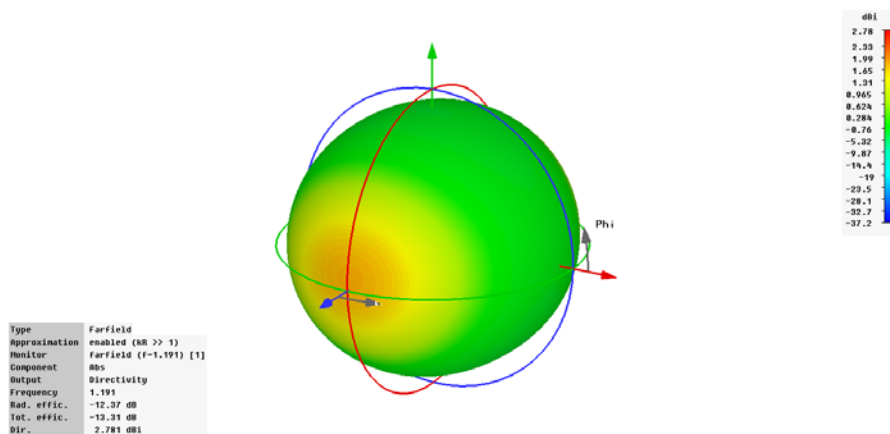


Figura 57. c)

Figura 57. Diagrama de radiación en tres dimensiones a) Antena parche forma de lazo b) Antena parche lazo Sierpinski  $i = 2$  (ganancia) c) Antena parche lazo Sierpinski  $i = 3$

Sin embargo, el segundo diseño (Figura 57 b)) muestra la ganancia de la antena de parche en forma de lazo Sierpinski de segunda iteración, y como se observa existe una mayor ganancia en la parte trasera de la antena, siendo un efecto indeseado, además de ser un valor ligeramente inferior a lo esperado en la realidad. Como se ha comentado anteriormente (apartado 4.1.4), se ha decidido representar este parámetro debido a que la simulación del software CST, presentaba un valor de directividad erróneo.

## **5. Conclusiones**

El diseño de antenas se puede considerar una de las ramas más complejas de la ingeniería. Por eso en este proyecto se ha tratado de explicar los conceptos de una forma clara y concisa y sobre todo sencilla.

El diseño de las antenas de ranura es un tipo de diseño más estudiado en las últimas décadas, y más aún el diseño de las antenas parche. Debido a ello, en este proyecto se ha tratado de dar un pequeño paso más, aplicando nuevas geometrías para la tira de alimentación y sobre todo con la inclusión de los fractales como geometría de los parches.

Para el diseño de antenas de ranura con alimentación microstrip se pueden definir unos puntos clave para el diseño de las mismas, como por ejemplo:

- Para conseguir una determinada impedancia de línea para antenas de tira de alimentación delgada, hay que tener en cuenta la altura del sustrato dieléctrico, el valor de permitividad del material del mismo, y la anchura del microstrip.
- La dimensión de la anchura de la ranura afecta directamente al ancho de banda.
- La longitud de la ranura determina la frecuencia de radiación.
- Para una longitud de ranura fija aumentar la dimensión longitudinal del microstrip conlleva una disminución de la frecuencia de resonancia, por el contrario reducir la longitud de la tira de alimentación dará como resultado que la frecuencia de trabajo resonante suba.

Para el diseño de las antenas de parche se ha buscado la sencillez de diseño en la elección de la geometría fractal a aplicar, por lo que gracias a la aportación en conocimientos de la empresa Fractus, se optó por el triángulo de Sierpinski, fácil de diseñar mediante AUTOCAD y su posterior importación a CST. Se barajaron varias posibilidades para realizar el diseño de la geometría fractal, como la creación de un algoritmo en MATLAB o la creación de un macro de CST en lenguaje Visual Basic para aplicaciones (VBA), pero la primera opción se desechó por su difícil importación en CST y las segunda por su excesiva complejidad ante la sencillez de AUTOCAD.

Para las antenas parche de geometría fractal, la conclusión principal atendiendo a los resultados obtenidos en las simulaciones, sería la posibilidad de obtener frecuencias de resonancia más bajas al aumentar el número de iteraciones de la geometría fractal, aspecto muy interesante para aplicaciones donde es necesario la utilización de pequeñas

antenas, tales como móviles y dispositivos electrónicos que hoy en día cada vez reducen más su tamaño.

## **6. Referencias**

- [1] Web 2012 de CST Computer Simulation Technology  
<http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>
- [2] Web Innova CAD Vision S.R.L. 2009, Buenos Aires - Argentina  
<http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/teledete.htm>
- [3] Enciclopedia libre Wikipedia, última modificación del artículo Feb - 2012  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagn%C3%A9tico#Bandas\\_del\\_espectro\\_electromagn.C3.A9tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico#Bandas_del_espectro_electromagn.C3.A9tico)
- [4] Web Direct Industry (salón virtual de la industria), empresa del grupo Virtual Expo  
<http://www.directindustry.es/prod/ah-systems/antenas-dipolo-35071-213051.html>
- [5] Web con referencias a artículos: Propagación y Antenas, Autor: Salmeron; Sistemas de comunicaciones electrónicas Autor: Wayne Tomasi.  
<http://proton.ucting.udg.mx/~tonycova/antenas.html>
- [6] Web Orbita Digital, venta de material de telecomunicaciones y multimedia  
<http://www.orbitadigital.com/99-yagi-15el-uhf-triax.html>
- [7] Blog de Abril de 2010, Autor: Aleks  
<http://aleks-mimundotumundo.blogspot.com/2010/04/la-bocina.html>
- [8] Web Informática Condado S.L. España  
<http://informaticacondado.com/pages/11/pr/8-antena-plana-115-db-+-3-mt-cable-sma-rp.html>
- [9] Web Intelligent Automation, Inc. 2008  
<http://www.i-a-i.com/view.asp?aid=372>
- [10]. Constantine Balanis - Antenna Theory - Analysis and Design (Third Edition).
- [11]. Microstrip Antenna Design Handbook - Garg, Bhartia, Bahl, Ittipiboon.
- [12]. Antenas Microstrip. Miguel Ferrando, Alejandro Valero. Dep. Comunicaciones Universidad Politécnica de Valencia.
- [13]. Microstrip Antennas – I.J. Bahl, P.Bhartia.
- [14]. Richards, W.F., Y.T. Lo and D.D. Harrison, “Improved Theory for Microstrip Antennas” Electron Lett., Vol. 15, 1979, pp. 42-44
- [15] Newman, E.H. and P. Tulyathan, “Microstrip Analysis Technique” Proc. Workshop on Printed Circuit Antennas, New Mexico State University, Oct. 1979, pp. 9.1-9.8

- [16] PFC. Diseño y Construcción de una Antena Fractal Multibanda para Telefonía Móvil Celular, Autor: Antonio Oltra González Universidad Politécnica de Catalunya
- [17] K. Falconer, “Fractal Geometry: Mathematical Foundations & Applications”, 2a ed., New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [18] Fractal Antenna Engineering: The Theory and Design of Fractal Antenna Arrays. Douglas H. Werner, Randy L. Haupt and Pingjuan L. Werner.
- [19] P. Phelber, “Fractal Antennas”, Illinois Institute of Technology, enero 2001.
- [20] V. H. Rumsey, “Frequency Independent Antennas”, New York, Academic Press, 1966.
- [21] Douglas H. Warner, Randy L. Haupt, Pingjuan L. Werner, “Fractal Engineering: The Theory and the Design of Fractal Antenna Arrays” IEEE Antennas & Propagation Magazine, Vol. 41, N°5, octubre 1999.
- [22] Small and high-directivity bow-tie patch antenna based on the Sierpinski Fractal. Jaume Anguera, Caries Puente, Carmen Boria, Raquel Montero and Jordi Soler. Technology Oeartment, Fractus, SA.
- [23] Web FEKO Comprehensive Electromagnetic Solutions 2009 - 2012  
<http://www.feko.info/about-us/News/feko-student-competition-results-for-2011-1/j-gemio-valero-manufactured-sierpinski-monopole/>
- [24] Web Space Daily, portal especial, Febrero 2012  
<http://www.spacedaily.com/news/antenna-02d.html>
- [25] Web Hindawi Publishing Corporation  
<http://www.hindawi.com/journals/ijap/2008/387686/fig7/>