



**INAOE**

# **Diseño de una antena para aplicaciones IoT en hogares inteligentes**

**Pedro Gonzalo Pérez Méndez**

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestría en ciencias en la especialidad de electrónica**

Por el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica**

Agosto del 2024

Santa María Tonantzintla, Puebla, México

Dirigida por:

**Dr. Roberto Stack Murphy Arteaga**

©INAOE 2024

Derechos reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.



## Abstract

The Internet of Things (IoT) is a concept that has had a strong impact in recent times. It is defined as the ability of devices to process information and then send it over the Internet. For IoT applications in smart homes, devices need to communicate with each other and transmit a large amount of information efficiently. The need for interconnected devices wirelessly involves the implementation of antennas. Microstrip antennas have been significant in research fields due to their advantages over other technologies, particularly their ease of integration into IoT devices.

The main communication challenges in a smart home environment include connectivity and reliable information transfer. Therefore, designing an antenna with good directivity with low data traffic is essential, such as the 5.80 GHz frequency within the ISM (Industrial, Scientific, and Medical) band. This frequency experiences less interference compared to 2.40 GHz, is license-free, has a bandwidth of 125 MHz (5725 MHz to 5850 MHz), and allows for smaller antenna sizes due to its larger wavelength.

This work presents the design of a microstrip antenna using fractal geometry and Defected Ground Structures (DGS) aimed at enhancing the antenna's bandwidth and gain. The proposed design is based on the Koch fractal and a DGS design featuring a cross-shaped slot. The antenna analysis and response were conducted using Ansys HFSS software and verified through fabrication on a PCB substrate. The results showed a bandwidth of 127.30 MHz, return loss of -39.12 dB, gain of 12.85 dBi, efficiency of 0.78, and directivity of 16.44.

## Resumen

El Internet de las cosas (IoT) es un concepto que ha tenido un fuerte impacto en la actualidad. Se define como la capacidad de los dispositivos para procesar información y luego enviarla a través de Internet. Para las aplicaciones del IoT en hogares inteligentes, los dispositivos tienen que comunicarse entre sí, así como transmitir una gran cantidad de información y hacerlo con la mayor calidad posible. La necesidad de tener dispositivos conectados entre sí inalámbricamente involucra la implementación de antenas. Las antenas tipo microstrip han tenido relevancia en los campos de investigación, dadas sus ventajas frente a otras tecnologías, entre estas destaca la fácil integración en dispositivos IoT.

En un hogar inteligente, los principales retos de comunicación que se presentan son la conectividad y la fiabilidad de la transferencia de información. Para ello, es indispensable diseñar una antena con buena directividad que transmita en una frecuencia de operación que presente bajo tráfico de datos, tal es el caso de la frecuencia de 5.80 GHz, dentro de la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical). En esta frecuencia hay menos interferencia que en 2.40 GHz, es de licencia libre, presenta un ancho de banda de 125 MHz (5725 MHz a 5850 MHz) y al ser una frecuencia más grande permite reducir el tamaño de la antena.

En este trabajo se presenta el diseño de una antena microstrip con la implementación de geometría fractal y estructuras de tierra defectuosa (DGS), cuyo objetivo es mejorar el ancho de banda y ganancia de la antena.

El diseño propuesto se basa en el fractal de Koch y el diseño de la DGS en una ranura en forma de cruz. El análisis y respuesta de la antena, se realizó en el software Ansys HFSS y se comprobó haciendo la fabricación en sustrato PCB. Teniendo como resultado un ancho de banda de 127.30 MHz, pérdidas por retorno de -39.12 dB, ganancia de 12.85 dBi, 0.78 de eficiencia y 16.44 en directividad.

## Dedicatorias

Quiero dedicar este trabajo a mi familia: a mis padres Aydé y Gonzalo, a mi hermano Erasmo; quienes han sido mi motor y ejemplo de vida.

Agradecimientos

Agradezco a Dios.

A mi familia, por su apoyo incondicional.

Agradezco profundamente al CONAHCYT por la beca otorgada.

Al INAOE por la infraestructura proporcionada.

Al Dr. Roberto Murphy por su orientación y dirección de este proyecto.

A los técnicos de laboratorio, por su apoyo.

A todos los investigadores que fueron mis maestros.

A mis amigos y compañeros de generación.

# Índice de contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	9
1.1	Planteamiento del problema	9
1.2	Trabajo propuesto	10
1.3	Objetivos	10
1.3.1	Objetivo general	10
1.3.2	Objetivos específicos	10
1.4	Organización del documento	11
1.5	El IoT en Hogares Inteligentes: Smart Home	11
1.5.1	Concepto de Hogar Inteligente	12
1.5.2	Elementos que constituyen un Hogar Inteligente	12
1.5.3	Arquitectura de un Hogar Inteligente	14
1.5.4	Principales tendencias del IoT en Hogares Inteligentes	15
1.5.5	Ventajas y desventajas de un Hogar Inteligente	16
1.6	La banda 5.80 GHz	18
1.7	Protocolo IEEE 802.11	20
1.7.1	Características y especificaciones del estándar 802.11a	20
1.7.2	Ventajas y desventajas del estándar 802.11a	21
<b>2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>22</b>
2.1	Figuras de mérito	24
2.1.1	Potencia radiada	24
2.1.2	Patrón de radiación	25
2.1.3	Intensidad de radiación	27
2.1.4	Directividad	28
2.1.5	Eficiencia	28
2.1.6	Ganancia	29
2.1.7	Impedancia	29
2.1.8	Pérdidas por retorno	30
2.1.9	VSWR	30
2.1.10	Ancho de banda	31
2.1.11	Polarización	31
2.1.12	Razón axial	33
2.2	Antenas tipo microstrip	34
2.2.1	Sustratos dieléctricos utilizados en antenas microstrip	35
2.2.3	Métodos de alimentación	36

2.3 Criterios de diseño .....	38
2.3.1 Modelo de línea de transmisión .....	38
2.4 Geometría fractal en antenas .....	43
2.4.1 Características de un fractal .....	43
2.4.2 Electrodinámica fractal .....	44
2.5 Estructuras de tierra defectuosa DGS .....	45
2.6 Estado del arte.....	47
3. Desarrollo.....	51
3.1 Diseño del parche rectangular .....	51
3.2 El fractal de Koch inverso en antenas .....	53
3.3 Diseño de antena fractal .....	55
3.4 Simulación .....	56
3.4.1 Puertos de excitación .....	56
3.4.2 Simulación de la antena .....	57
3.4.3 Implementación de geometría DGS.....	61
3.5 Fabricación .....	65
3.5.2 Conclusiones de fabricación.....	67
4. Resultados.....	68
4.1 Mediciones .....	68
4.2 Caracterización de la antena.....	69
4.2.1 Medición del Patrón de radiación.....	69
4.3 Comparación de resultados en simulación y fabricación .....	71
5. Conclusiones .....	72
5.1 Trabajo futuro.....	73
Referencias.....	74

# Índice de tablas

Tabla 1 Comparación de tecnologías inalámbricas empleadas en Hogares Inteligentes. .	13
Tabla 2 Comparación de la banda 5.8 GHz frente a otras tecnologías inalámbricas. ....	19
Tabla 3 Sustratos más utilizados en antenas microstrip. ....	36
Tabla 4 Antena base. ....	47
Tabla 5 Primera iteración. ....	48
Tabla 6 Segunda iteración. ....	49
Tabla 7 Tercera iteración. ....	50
Tabla 8 Parámetros obtenidos de cada iteración. ....	58
Tabla 9 Parámetros obtenidos de la implementación de fractales modificados. ....	60
Tabla 10 Comparación de parámetros de antena fractal con antena fractal + DGS. ....	62
Tabla 11 Resultados de la medición. ....	69
Tabla 12 Comparación de resultados. ....	71



# 1 Introducción

El Internet de las cosas (IoT) es un concepto que ha tenido un fuerte impacto en la actualidad. Se define como la interconexión de los dispositivos, redes, sistemas y servicios para procesar información y luego enviarla a través de Internet [1]. Estas redes integran dispositivos con la capacidad de auto organizarse, compartir datos, información y recursos para su posterior aplicación. Cada elemento se comunica mediante protocolos y, dependiendo la aplicación, son compatibles con tecnologías inalámbricas, tales como WIFI, Bluetooth, Zigbee, RFID, etc.

El IoT tiene un impacto significativo en aplicaciones industriales y comerciales, por ejemplo, cuidado de la salud, ciudades inteligentes, transportes, sistemas de agricultura, hogares inteligentes, gadgets, sector automotriz, entre otras. Siendo hogares inteligentes (Smart Home, SH) una de las tendencias actuales, dado su impacto e innovación para mejorar la calidad de vida mediante la automatización de funciones domésticas: iluminación, ambiente, seguridad, control de electrodomésticos, etc.

## 1.1 Planteamiento del problema

Para las aplicaciones del IoT en hogares inteligentes, los dispositivos tienen que comunicarse entre sí, transmitir una gran cantidad de información y hacerlo con la mayor calidad posible. La necesidad de tener dispositivos inalámbricamente conectados entre sí involucra la implementación de antenas; por este motivo se deben construir antenas física y eléctricamente robustas, para que la comunicación pueda ser eficiente en todos los dispositivos de red. Para ello es necesaria la implementación de antenas versátiles, con amplio ancho de banda que permita manejar más canales de comunicación.

Las antenas tipo microstrip han tenido relevancia en la aplicación de sistemas de comunicación, dado su diseño práctico, fabricación accesible y variedad de estructuras que permiten implementarlas de acuerdo con su aplicación. La ventaja de las antenas tipo microstrip es la fácil integración en dispositivos IoT. Sin embargo, presentan limitaciones de ancho de banda y ganancia reducidos [2].

Por otra parte, existen diversas técnicas para aumentar el rendimiento de una antena y mejorar sus características de radiación de acuerdo con los requerimientos, tal es el caso de la implementación de geometría fractal y las estructuras de tierra defectuosa (Defected Ground Structure, DGS).

Es preferible utilizar una banda más amplia y despejada para mantener la calidad de la señal como la banda de 5.80 GHz, debido a que a esta frecuencia la longitud de onda es más corta y presenta menos interferencia que otras utilizadas [3].

## **1.2 Trabajo propuesto**

El proyecto propuesto consiste en diseñar una antena tipo parche en tecnología microstrip, con geometría fractal para aumentar el ancho de banda, y una estructura DGS que mejore su ganancia. Con el objetivo de lograr una transmisión de información más eficiente y que sea compatible con dispositivos empleados en IoT de Smart Homes.

La frecuencia central de operación propuesta es 5.80 GHz, con ancho de banda de 125 MHz, perteneciente a la banda ISM. Los principales beneficios son presentar menos tráfico que 2.40 GHz, estar en banda libre y permitir la reducción del tamaño de la antena al ser una frecuencia más alta.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

- Diseñar y fabricar una antena que cumpla eficientemente los requerimientos de operación en la banda 5.80 GHz para aplicaciones del IoT con enfoque en Hogares Inteligentes.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Diseñar una antena de parche en tecnología microstrip para operar en la frecuencia de 5.80 GHz.
- Mejorar el rendimiento de la antena empleando las técnicas de geometría fractal y DGS.
- Fabricar la antena y caracterizarla mediante la medición de los parámetros S y el análisis de las figuras de mérito.
- Comparar los resultados obtenidos en la fabricación y simulación.

## **1.4 Organización del documento**

El presente documento se encuentra organizado en capítulos, siendo el presente capítulo donde se describe la importancia de este trabajo, así como el planteamiento del problema, propuesta de trabajo y los objetivos a cumplir. Además, se proporciona teoría correspondiente al enfoque del IoT en hogares inteligentes y las tendencias dentro de esta aplicación, así como la descripción de la banda 5.80 GHz y los protocolos de comunicación utilizados.

El capítulo dos corresponde a la teoría de antenas y consideraciones de uso de antenas microstrip tipo parche. También se presentan las estructuras de tierra defectuosa (DGS) y la implementación de tecnología fractal en antenas. Finalmente, en el estado del arte, se muestran los resultados simulados y medidos de las figuras de mérito de antenas que han implementado geometría fractal.

En el capítulo tres se presenta el desarrollo teórico y experimental del prototipo, comenzando por el análisis matemático, estructura física, simulaciones con el software HFSS, finalizando con el proceso de fabricación.

La parte correspondiente a las mediciones, análisis y comparación de resultados se presenta en el capítulo 4.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones que se obtienen al llevar a cabo este trabajo.

## **1.5 El IoT en Hogares Inteligentes: Smart Home**

Hoy en día, la implementación de hogares inteligentes basados en el IoT ha sublevado considerablemente la innovación y desarrollo de tecnologías inalámbricas empleadas para control, automatización y monitoreo remoto de funciones domésticas, que se realizan mediante ordenadores o smartphones conectados a internet con servidores de red de área local (LAN).

El IoT constituye el fundamento de los hogares inteligentes: proporciona la conexión, comunicación y viabilidad de operar el sistema Smart home desde cualquier parte del mundo, reduciendo considerablemente la intervención humana [4].

### **1.5.1 Concepto de Hogar Inteligente**

Es un hogar equipado con un sistema de dispositivos y tecnologías conectados entre sí a una red, cuya función es automatizar y mejorar la gestión de diversas funciones de sistemas domésticos para permitir a los usuarios su monitoreo y control a través de Internet.

### **1.5.2 Elementos que constituyen un Hogar Inteligente**

Un Hogar Inteligente depende de una gama de tecnologías y dispositivos que permitan formar un sistema interconectado para llevar a cabo las funciones establecidas. Los principales elementos se describen a continuación [5]:

- IoT: es la piedra angular de todo el sistema; permite que los dispositivos puedan intercambiar y procesar información. Contribuye a la eficiencia energética al ser compatible con dispositivos de bajo consumo como la gama de microcontroladores Esp32.
- Unidad de procesamiento: es una interfaz centralizada que permite administrar la información proveniente de los dispositivos para su monitoreo y control a través de una plataforma. Se basa en tarjetas de desarrollo como Raspberry Pi o Meadow, que incluyen módulos, procesadores y microcontroladores como la gama Esp32. Estos microcontroladores son compatibles con los protocolos de comunicación IEEE 802.11 y Bluetooth, además de incluir en la misma tarjeta módulos para estas tecnologías inalámbricas, sensores.
- Plataforma: interfaz de aplicación (para dispositivos móviles) o sitio web (para PC) que proporciona e interpreta los “triggers” (desencadenante: un sensor detecta movimiento y envía la señal para desencadenar una acción como abrir una puerta o encender una lámpara) que envían los dispositivos. Algunos ejemplos son SmartThings (Samsung), HomeKit (IfThisThenThat), Google Home, AccuWeather, entre otras [6].

- **Sensores y dispositivos:** los sensores recopilan información del entorno en tiempo real, se encargan de monitorear variables como luminosidad, temperatura, humedad, movimiento, etc. [7]. Se denominan dispositivos a aquellos sistemas más complejos que pueden procesar la información y enviarla a través de un sistema de comunicación (por ejemplo, videocámaras, alarmas, etc.). Los datos recabados por los sensores y dispositivos pueden ser enviados a la plataforma mediante antenas. El tamaño y forma de la antena viene dado por la frecuencia de operación (tecnología inalámbrica) y la aplicación que se requiera.
- **Tecnología inalámbrica:** enlazan los dispositivos a Internet, permitiendo la transmisión de los datos recabados. Algunos ejemplos son Wi-Fi, Bluetooth, Thread, Zigbee, LoRa, etc. En la tabla 1 se muestra una comparación entre las tecnologías inalámbricas más comunes [8].

Tabla 1 Comparación de tecnologías inalámbricas empleadas en Hogares Inteligentes.

<b>Tecnología</b>	<b>Frecuencia de operación</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Rango</b>	<b>Consumo de energía</b>
Bluetooth	2.40 GHz	720 Kbps – 1 Mbps	1 – 10 m	Bajo
LoRa	433 MHz, 868 MHz	250 bps – 50 Kbps	>10 Km	Bajo
Wi-Fi	2.40 GHz, 5 GHz 5.80 GHz	1.2 Mbps – 54 Mbps 100 Mbps	Hasta 100 m	Alto
Zigbee	870 MHz, 902-928 MHz, 2.40 GHZ	20 Kbps – 250 Kbps	10 m – 1.6 Km	Bajo

- Protocolos de comunicación: conjunto de normas, pautas o instrucciones que sirven para dirigir las acciones durante el intercambio de información. El más utilizado es el IEEE 802.11.



Figura 1.1 Hogar Inteligente y sus aplicaciones [9].

### 1.5.3 Arquitectura de un Hogar Inteligente

Los elementos previamente descritos se pueden agrupar por capas, formando una arquitectura. La arquitectura del IoT es todo un sistema constituido por estructura de red, tecnologías de nube y otros elementos que operan de acuerdo con protocolos y estándares establecidos. La arquitectura IoT para Hogares Inteligentes se compone de 3 capas [7]:

- Capa física: es donde se localizan los dispositivos (luces, cámaras, termostatos, etc.), sensores, tarjetas de desarrollo, sistemas integrados, microcontroladores, dispositivos de comunicación (antenas). También llamada capa perceptiva o de dispositivos.
- Capa de red: conexión de dispositivos mediante redes; procesamiento y toma de decisiones; gestión y actualizaciones de software; enlace con los servicios de la nube; plataformas de servicios web; estándares y protocolos de comunicación (802.11, 802.3, etc.); tecnologías inalámbricas (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa, etc); ancho de banda.

- Capa de aplicación: servicios de aplicaciones; integración con servicios de terceros (asistentes, plataformas, integración con sistemas de Hogares Inteligentes).

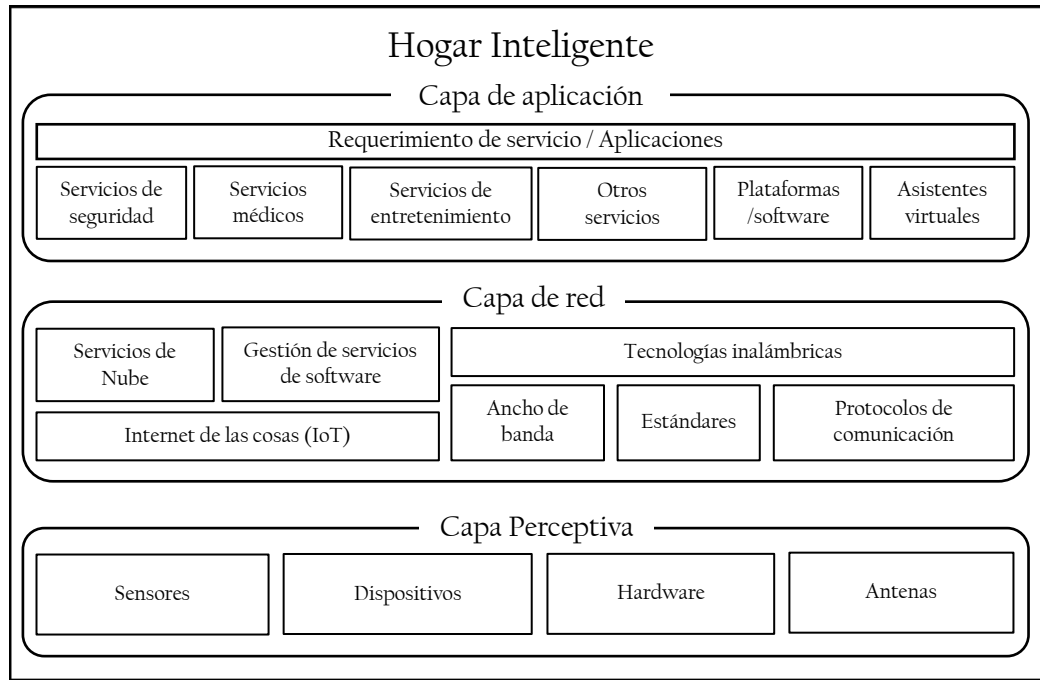


Figura 1.2 Arquitectura IoT de un Hogar Inteligente.

#### 1.5.4 Principales tendencias del IoT en Hogares Inteligentes

- Control de calefacción: aire acondicionado, termostatos o calderas que se puedan regular de acuerdo con el usuario.
- Automatización de dispositivos: encender y apagar aparatos electrodomésticos.
- Iluminación: control de iluminación, regulación de intensidad lumínica, encendido y apagado automático.
- Seguridad: sistemas de videovigilancia, cerraduras y puertas inteligentes que controlen acceso. Un sistema de alarma inteligente es más efectivo que uno tradicional al tener mejores herramientas para gestionar adecuadamente

las señales de alerta al estar enlazada directamente a los servicios de emergencias.

- Equipos de audio: parlantes y altavoces controlados por voz.
- Instrumentos: aparatos eléctricos con funciones automáticas integradas; por ejemplo, estufas, contactos, sillones, regaderas, jardín, etc.
- Geolocalización: optimiza las funciones del hogar a partir de la localización del usuario. Por ejemplo, si no está en casa se pueden prescindir funciones y activar otras que sean indispensables.
- Monitoreo y sensado de variables: humedad y temperatura (principalmente) para determinado fin. Por ejemplo, irrigación automática, cuidado de jardín, conservación de alimentos, protección de aparatos electrodomésticos, entre otras.
- Servicios de salud: conectividad con los servicios de salud, cuidado de pacientes pediátricos y geriátricos. Por ejemplo, para el monitoreo remoto de signos vitales.
- Cuidado de mascotas: alimentación, higiene, creación de condiciones ambientales adecuadas (temperatura), monitoreo, localización, etc.
- Tendencias futuras: integración de sistemas con inteligencia artificial (IA). Es muy probable que la IA sea implementada para hacer efectiva la toma de decisiones. Por ejemplo, un hogar inteligente que puede identificar preferencias de ambiente para cada integrante de la familia [10].

### **1.5.5 Ventajas y desventajas de un Hogar Inteligente**

Al momento se han descrito las principales tendencias y aplicaciones que el IoT proporciona en los hogares para convertirlos en “inteligentes” proporcionando ventajas que facilitan los quehaceres cotidianos. Sin embargo, también existen



inconvenientes cuando se llevan a cabo la implementación de estas tecnologías [6] [11]. Entre las principales ventajas se tienen:

- Ahorro de energía: implementando adecuadamente un control sobre el consumo energético en el hogar, se puede tener un decremento en el gasto de la factura mensual.
- Comodidad: un Hogar Inteligente permite ajustar el entorno a preferencia del usuario, haciendo más fáciles las tareas cotidianas. Por ejemplo, comandos de voz, calefacción, entretenimiento, etc.
- Asistencia: proporcionar apoyo a los integrantes del hogar mediante el enlace de asistentes con servicios de salud y seguridad.
- Seguridad: los sistemas de alarma enlazados a un Hogar Inteligente aumentan la protección del hogar.

Por otra parte, los inconvenientes más importantes son [11]:

- Costo: la implementación de tecnología para el hogar suele tener un costo elevado. Los módulos, dispositivos y plataformas presentan un incremento en el costo cuando se hacen más complejos. También la instalación y desarrollo de un sistema Smart Home demanda recursos humanos y económicos. En México, el costo e implementación de un Hogar Inteligente puede tomar alrededor de \$40,000 [12].
- Compatibilidad: no todos los dispositivos son compatibles entre sí, lo cual demanda intervención de terceros para lograr la correcta operación del sistema en conjunto [9].
- Dependencia: tanto de la tecnología como del Internet. Si este último presenta problemas de conexión, el sistema dejará de funcionar, la información que transmiten los dispositivos se verá afectada y algunas funciones dejarán de operar correctamente.

- **Obsolencia:** debida al desarrollo de la tecnología. Los dispositivos y software que son actuales hoy quedarán obsoletos en un futuro. Por ello se deben implementar sistemas que sean compatibles con las actualizaciones de software.
- **Complejidad:** los componentes que integran los sistemas de Hogares Inteligentes requieren de una instalación y configuración de varios dispositivos y garantizar que sean compatibles entre diferentes sistemas, para esto se requieren conocimientos técnicos profesionales y habilidades que solucionen los problemas que se presenten.

## **1.6 La banda 5.80 GHz**

Cuanto mayor sea el tráfico en la banda, el receptor requerirá mayor capacidad de rechazar el ruido e interferencias para mantener la calidad de la señal. Esto se traduce en un aumento en la complejidad y precio. Por lo tanto, es preferible utilizar una banda más amplia y despejada como la banda de 5.80 GHz. Debido a que a esta frecuencia la longitud de onda es más corta, puede atravesar espacios más estrechos que las bandas de 433 MHz y 2.4 GHz. Cuando las ondas de estas frecuencias son bloqueadas o difractadas por los objetos, debido a su longitud de onda ( $<70$  cm), la señal 5.80 GHz puede atravesar fácilmente estos obstáculos debido a su longitud de onda de sólo 5.17 cm. Esta banda proporciona velocidades desde 2 Mb/s a 100 Mb/s, por esta razón puede transmitir grandes cantidades de datos. Además de ser compatible con la tecnología CMOS [3].

La banda 5.80 GHz pertenece a la banda ISM, cumple con el protocolo de comunicación 802.11a y junto a la banda 2.40 GHz pertenecen a la banda Wi-Fi. El ancho de banda es de 125 MHz (5725 MHz a 5850 MHz). La división de canales y el ancho de banda de la portadora de los dispositivos de 5.80 GHz de varios fabricantes son diferentes, y van desde 4 a 10 canales y un ancho de banda de canal de 6 MHz a 35 MHz [13].

La tabla 2 representa las principales características de la banda 5.80 GHz y sus principales ventajas sobre otras bandas utilizadas. [3].

Tabla 2 Comparación de la banda 5.80 GHz frente a otras tecnologías inalámbricas.

Frecuencias	Ventajas	Desventajas	¿Mucho tráfico?
303.80 MHz 418 MHz 433 MHz 868 MHz 915 MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buen rango de comunicación</li> <li>• Amplia variedad de aplicaciones</li> <li>• Bajo consumo de energía</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja velocidad de transmisión de datos</li> <li>• Grandes dispositivos y antenas</li> <li>• Baja integración de componentes</li> </ul>	Sí
2.45 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivos y antenas compactos</li> <li>• Buen rango de comunicación</li> <li>• Alta tasa de transmisión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible al ruido</li> <li>• Requiere receptores sensibles</li> <li>• Alto consumo de energía                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta interferencia</li> <li>• Alto costo</li> </ul> </li> <li>• Poca penetración agua/cuerpo</li> </ul>	Sí
5.80 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivos y antenas muy compactos</li> <li>• Alta eficiencia energética y espectral</li> <li>• Muy buen rango de comunicación</li> <li>• Alta velocidad de transmisión</li> <li>• Baja interferencia</li> <li>• No requiere licencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere receptores sensibles</li> <li>• Poca penetración agua/cuerpo</li> </ul>	No

## **1.7 Protocolo IEEE 802.11**

La tecnología Wi-Fi se basa en la gama de estándares de conectividad inalámbrica IEEE 802.11, que ha desempeñado un papel fundamental en la evolución de las redes WLAN (Wireless Local Area Network). Asimismo, es uno de los estándares más antiguos y destacados en el ámbito de las redes que proporciona una mayor velocidad y capacidad de transferencia de datos [14]. Actualmente, se utilizan en versiones 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n y 802.11ac dependiendo las aplicaciones comerciales. La banda 5.80 GHz cumple con el estándar 802.11a [13].

### **1.7.1 Características y especificaciones del estándar 802.11a**

- Frecuencias de operación: opera las bandas de frecuencia de 5.80 GHz, esto permite una mayor cantidad de canales disponibles.
- Ancho de banda: el estándar emplea canales con un ancho de banda de 20 MHz, proporcionando mayor transmisión de datos.
- Velocidad de transferencia de datos: ofrece velocidades de hasta 54 Mbps, superando a velocidades de otros estándares, proporcionando una transmisión más rápida y rendimiento mejorado en aplicaciones que requieren una alta demanda de ancho de banda.
- Compatibilidad con otros estándares: algunos dispositivos son compatibles con varios estándares debido a su capacidad de operar en múltiples bandas de frecuencia, esto proporciona una conectividad flexible y operar con varios estándares.
- Modulación: este estándar utiliza la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), es decir, se divide la señal de transmisión en frecuencias subportadoras para lograr una mayor calidad de la señal en entornos con fuentes de interferencia.
- Consumo energético: a medida que aumenta la velocidad de transferencia, se requiere más energía para mantener una conexión inalámbrica estable en comparación con los estándares de menor velocidad.

### **1.7.2 Ventajas y desventajas del estándar 802.11a**

A continuación, se describen las principales ventajas y desventajas de este estándar de comunicación [14]:

Ventajas:

- Mayor velocidad de transferencia de datos.
- Mayor capacidad de canales.
- Menor interferencia.

Desventajas:

- Mayor consumo de energía (a mayor velocidad de transferencia de datos).
- Compatibilidad con otros protocolos limitada.

## 2 Marco teórico

Una antena es un dispositivo pasivo que recibe o irradia ondas electromagnéticas al espacio. El principio de radiación de una antena es el siguiente: cuando una carga eléctrica es acelerada se produce un campo eléctrico cambiante en el tiempo y éste, de acuerdo con las Leyes de Faraday y Ampere-Maxwell, da lugar a campos magnéticos que se propagan en forma de onda, es decir, se produce una onda electromagnética (OEM) [15]. En otras palabras, la antena es la estructura de transición entre el espacio libre y un dispositivo guía, como se muestra en la Figura 2.1. El dispositivo guía o línea de transmisión se utiliza para conducir energía electromagnética desde la fuente transmisora a la antena, o desde la antena al receptor. En el primer caso tenemos una antena transmisora y en el segundo una antena receptora [2].

La antena es el elemento más eficiente para la comunicación inalámbrica. Dada su capacidad para radiar masivamente ondas al espacio, se convierte en la principal aplicación para comunicaciones de corta y larga distancia. Por ejemplo, en comunicaciones satelitales, telefonía móvil, GPS, circuitos integrados, etc.

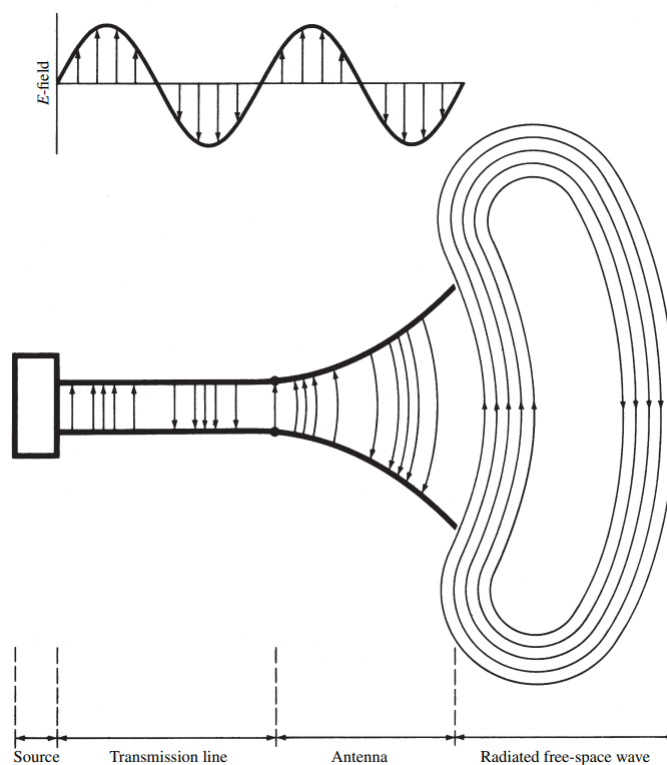


Figura 2.1 Antena como dispositivo de transición [2].

En la Figura 2.2 se muestra el equivalente de Thevenin de una línea de transmisión de una antena en modo de transmisión (Figura 2.1), donde la fuente está representada por un generador ideal, la línea de transmisión está representada por una línea con impedancia característica  $Z_c$  y la antena está representada por una carga  $Z_A$  [ $Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$ ] conectada a la línea de transmisión. La resistencia de carga  $R_L$  representa las pérdidas dieléctricas y de conducción asociadas con la estructura de la antena, mientras que  $R_r$ , denominada resistencia de radiación representa la radiación de la antena. La reactancia  $X_A$  representa la parte imaginaria de la impedancia asociada a la radiación de la antena. Idealmente, la energía generada por la fuente debería transferirse totalmente a la resistencia de radiación,  $R_r$ . Sin embargo, en un sistema práctico existen pérdidas dieléctricas por conducción debido a la naturaleza con pérdidas de la línea de transmisión y la antena, así como aquellas debidas a pérdidas por reflexiones (desajuste) en la interfaz entre la línea y la antena. Teniendo en cuenta la impedancia interna de la fuente y despreciando las pérdidas de línea y reflexión, la potencia máxima se entrega a la antena bajo adaptación conjugada [2].

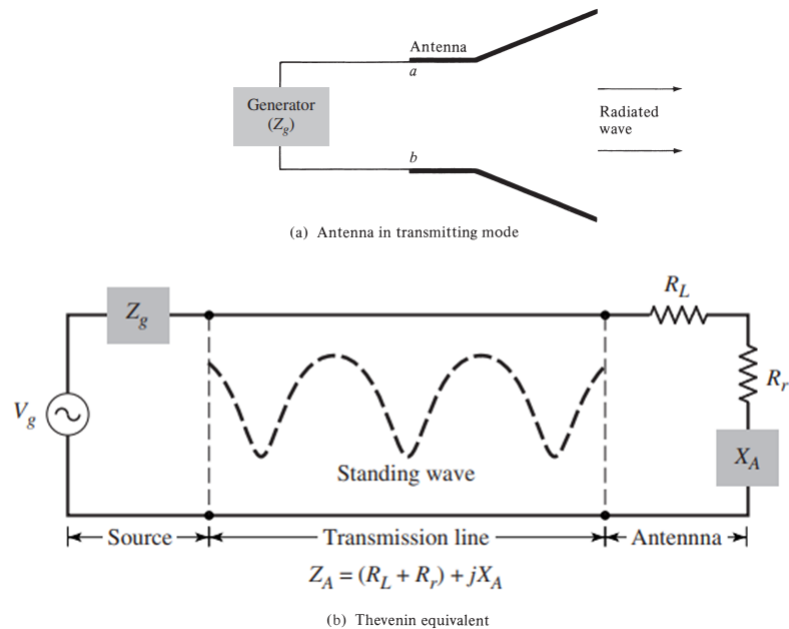


Figura 2.2 Equivalente de Thevenin de una línea de transmisión de una antena en modo de transmisión [2].

El tamaño de una antena ( $l$ ) es inversamente proporcional a la frecuencia de radiación ( $f_r$ ), como se muestra en la ecuación 1.

$$l = \frac{1}{f_r} \quad (2.1)$$

La antena más simple que existe es un alambre doblado en forma de “T”, conocida como antena dipolar. Existen distintos tipos de antenas, entre los más destacados se encuentran: dipolar, de lazo, de trompeta, helicoidal, de ranura y microstrip. Siendo estas últimas las que han recibido mayor importancia, desarrollo e investigación dada su amplia gama de aplicaciones en los últimos años [2]. Su estructura robusta y diseño práctico proporcionan ventajas respecto a otros tipos de antenas [16].

## 2.1 Figuras de mérito

Son los parámetros medibles que permiten evaluar la idoneidad de una antena para una aplicación determinada. Por ejemplo: la potencia radiada, patrón de radiación, ganancia, eficiencia, ancho de banda, impedancia de entrada, intensidad de radiación, polarización, pérdidas por retorno, SWR y directividad [17].

### 2.1.1 Potencia radiada

La potencia se define como energía por unidad de tiempo. Cuando la energía electromagnética atraviesa una superficie cerrada cualquiera, esta será igual a la potencia transportada por la OEM menos la potencia absorbida por el medio. Es decir, esta densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección. Se puede calcular mediante el Vector de Poynting:

$$S = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.2)$$

Con unidades potencia por unidad de área:  $W/m^2$ . Dado que el vector de Poynting es una densidad de potencia, la potencia total que atraviesa una superficie cerrada se puede obtener integrando la componente normal del vector de Poynting sobre toda la superficie, es decir [2]:

$$P = \oint \vec{E} \times \vec{H} \cdot ds \quad (2.3)$$

La potencia radiada por una antena consiste en una parte real (radiativa: aquella que se transfiere al medio) y una parte imaginaria (reactiva: no se puede transferir al medio).



$$P_{rad} = P_R + jP_I \quad (2.4)$$

El medio que rodea una antena suele subdividirse en tres regiones como se muestra en la Figura 2.3 [2]:

- Campo cercano: aquella parte del espacio que rodea inmediatamente a la antena en la que predomina la potencia reactiva.
- Campo medio: región donde predominan ambas componentes de potencia y la distribución angular del campo depende de la distancia desde la antena.
- Campo lejano: aquella región del espacio donde predomina la potencia radiativa.

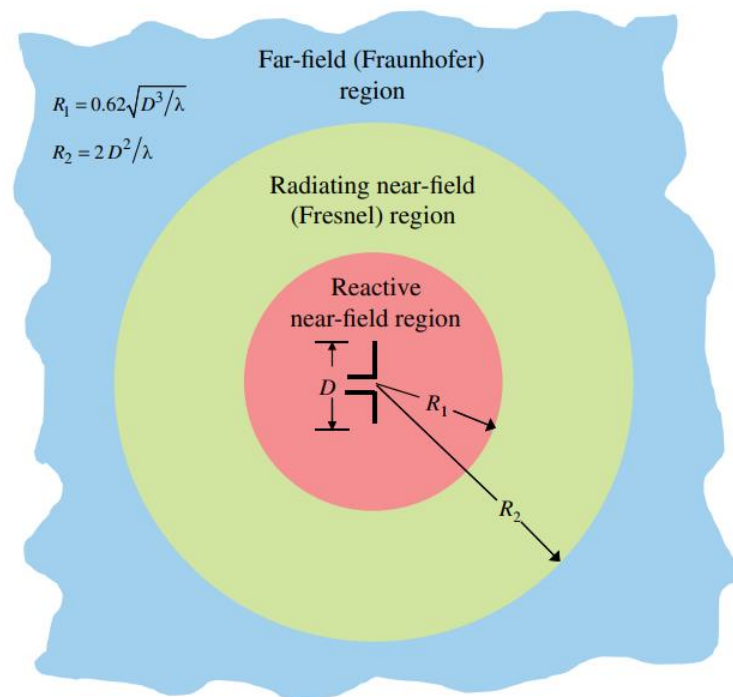


Figura 2.3 Regiones de campo de una antena [2].

### 2.1.2 Patrón de radiación

Es una representación gráfica tridimensional de las propiedades de variación de potencia radiada en función de las coordenadas espaciales, esto es el valor promedio del vector de Poynting. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación es determinado en la región de campo lejano y es representado como una función de

las coordenadas angulares ( $\theta$ ,  $\phi$ ). Las propiedades de la radiación incluyen la densidad de flujo de potencia, la intensidad de la radiación, la intensidad del campo, la directividad, la fase o la polarización. El patrón suele representarse en una escala de decibeles (dB). Esto con el fin de acentuar con más detalle aquellas partes del patrón que tienen valores muy bajos. En resumen, el patrón de radiación es un gráfico que nos permite visualizar dónde transmite o recibe energía la antena [2] [15].

El patrón de radiación se compone de regiones de radiación continua y cerrada llamados lóbulos. Los lóbulos están separados por puntos donde no hay radiación, conocidos como nulos. El lóbulo que contiene la mayor cantidad de radiación se denomina principal. El resto de los lóbulos, si existen, se denominan secundarios.

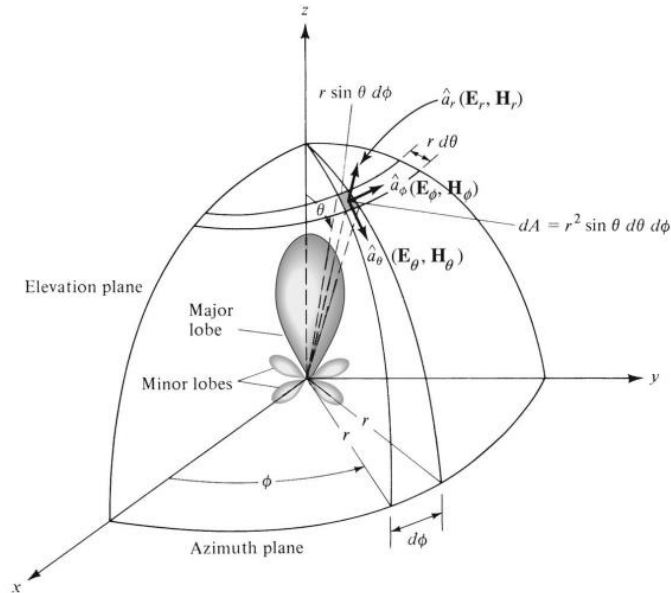


Figura 2.4 Representación de un patrón de radiación con el sistema coordenado para su análisis [2].

Otras características del patrón de radiación son el Ancho de haz entre los primeros nulos (FNBW, por sus siglas en inglés), que representa el tamaño angular del lóbulo principal. El Ancho de haz de media potencia (HPBW) es el ángulo en el cual se irradia el 50% de la potencia (Figura 2.4).

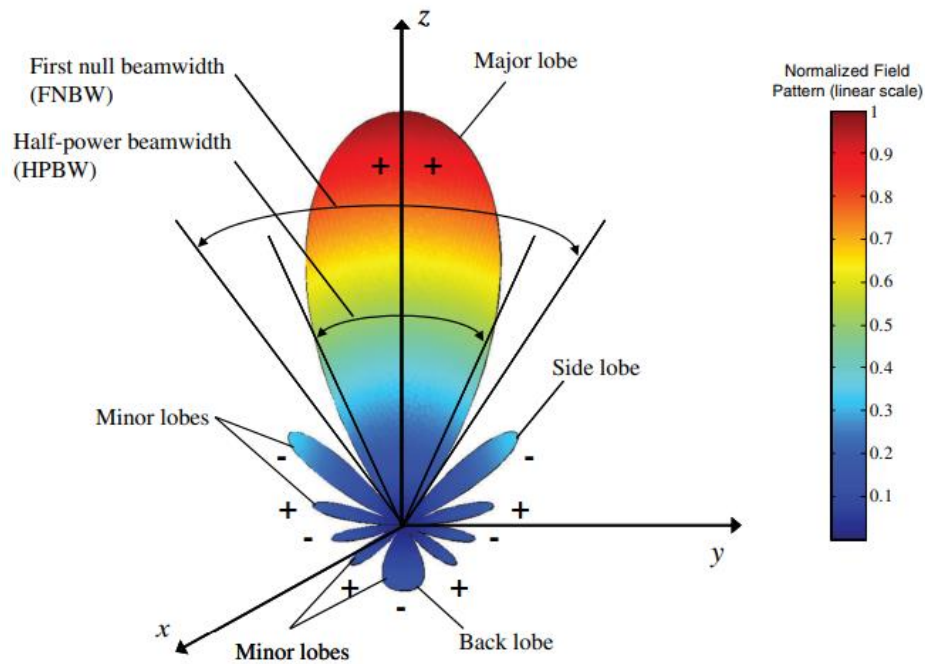


Figura 2.4 Otras características del patrón de radiación [2].

### 2.1.3 Intensidad de radiación

Potencia radiada por una antena en cierta dirección dada por unidad de ángulo sólido (estereorradián o steradian). La intensidad de la radiación es un parámetro de campo lejano y se puede obtener simplemente multiplicando la densidad de la radiación por el cuadrado de la distancia. En forma matemática se expresa como [2]:

$$U = r^2 P_{rad} \quad (2.5)$$

Donde  $r$  es el radio de la esfera. El estereorradián se obtiene a partir de un segmento de área en la superficie de una esfera, igual a  $r^2$ , como se muestra en la figura 2.5.

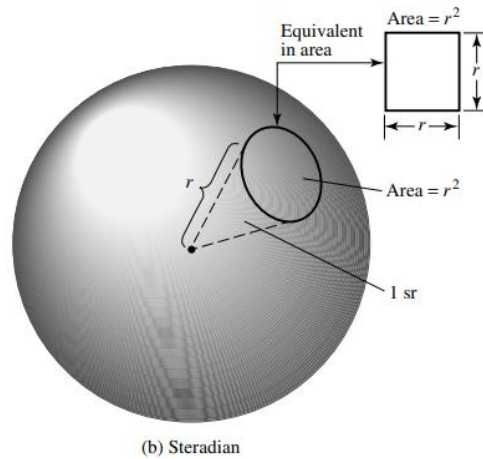


Figura 2.5 Ángulo sólido o estereorradián [2].

### 2.1.4 Directividad

Se define como: la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada a la intensidad de radiación promediada en todas direcciones ( $U_0$ ). Es la figura de mérito más importante para evaluar el patrón de radiación. Matemáticamente se expresa como [2]:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

Acotada en  $0 \leq D < \infty$ . Es decir, entre más grande sea la directividad, más puntual será el haz de radiación. Si se conoce la intensidad de radiación máxima, se obtiene un parámetro conocido como: directividad máxima [2]:

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.7)$$

### 2.1.5 Eficiencia

Se utiliza para tener en cuenta las pérdidas en las terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena. Debido a las propiedades físicas del material conductor, con el que se fabrican las antenas, se tienen distintos tipos de pérdidas: de energía, pérdidas por reflexiones entre la línea de transmisión y la antena, pérdidas entre conductor y dieléctrico, etc. En general, la eficiencia total se puede calcular como:

$$e_0 = e_r e_c e_d e_p e_a \quad (2.8)$$

Donde,

$e_r$ = eficiencia de reflexión ( $e_r = 1 - |\Gamma|^2$ ), debidas a las reflexiones de la señal dentro de la antena por desacoplamiento de impedancia.

$e_c$ = eficiencia de conducción, debida a las pérdidas por efecto Joule del conductor.

$e_d$ = eficiencia del dieléctrico, debida a las pérdidas por conducción dentro del dieléctrico.

$e_p$ = eficiencia de polarización, en una antena receptora, indica cuánto se alinea con el campo eléctrico recibido.

$e_a$ = eficiencia de apertura, indica el área efectiva de una antena.

### 2.1.6 Ganancia

En una antena, la ganancia viene dada por la combinación de eficiencia y directividad. Ésta se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica bajo las mismas condiciones de distancia y potencia entregada. Se define por [2]:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.9)$$

### 2.1.7 Impedancia

Es una cantidad compleja que relaciona el voltaje y corriente en la entrada de la antena. La relación entre el voltaje y la corriente en este punto se define como [2] [15]:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.10)$$

Donde

$Z_A$ = impedancia de la antena.

$R_A$ = resistencia de la antena.

$X_A$ = reactancia de la antena.

La parte real de la ecuación 7, resistencia, se compone de otros dos factores:

$$R_A = R_R + R_L \quad (2.11)$$

Donde

$R_r$  = resistencia de radiación.

$R_L$  = resistencia de pérdidas

### 2.1.8 Pérdidas por retorno

Para lograr que la antena sea eficiente, es importante acoplar correctamente la impedancia de entrada a la impedancia de la línea de alimentación que se conecta a la antena [18]. Se define como la cantidad de potencia reflejada debida al desacoplamiento de impedancia. Se obtiene del coeficiente de reflexión:

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L} \quad (2.12)$$

Donde

$\Gamma$  = coeficiente de reflexión.

$Z_A$  = impedancia de la antena.

$Z_L$  = impedancia de carga (en este caso, la impedancia de la línea).

El acoplamiento de impedancias se puede determinar de la magnitud de las pérdidas por retorno, magnitud del parámetro  $S_{11}$ . Matemáticamente, se define como:

$$|S_{11}| = -10 \cdot \log(\Gamma) \quad (2.13)$$

Es decir, entre mayor sea la magnitud del  $S_{11}$ , la antena estará correctamente acoplada, es decir, está transmitiendo la potencia; en cambio, cuando la magnitud sea cero o casi igual a cero no hay transmisión de potencia y toda es reflejada.

### 2.1.9 VSWR

Razón de voltaje de onda estacionaria. También es un indicador de un buen acoplamiento: cuando su valor tiende a infinito significa que la antena está desacoplada de la línea; en cambio, cuando tiende a uno representa el mejor valor de acoplamiento.

$$VSWR = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (2.14)$$

### **2.1.10 Ancho de banda**

Se define como "el rango de frecuencias dentro del cual el rendimiento de la antena, con respecto a alguna característica, se ajusta a un estándar específico". El ancho de banda describe el rango de frecuencias sobre las cuales la antena puede irradiar o recibir energía adecuadamente, es decir, donde las características de la antena (impedancia de entrada, el patrón, el ancho del haz, la polarización, ganancia, dirección del haz, eficiencia de radiación) están dentro de un valor aceptable [2].

El ancho de banda se mide alrededor de la frecuencia de resonancia de la antena, o frecuencia central, considerando las pérdidas por retorno ( $S_{11}$ ) a  $-10$  dB.

### **2.1.11 Polarización**

Se define como la dirección de perturbación de una onda. En una onda electromagnética, la polarización puede darse de dos formas: TE (transversal eléctrica) cuando la polarización viene dada por la variación del campo eléctrico y TM (transversal magnética) cuando la variación del campo magnético indica la polarización.

Los tipos de polarización son: lineal, circular y elíptica. Estas dos últimas pueden tener una orientación hacia la derecha o la izquierda, mientras que la lineal puede ser vertical, horizontal o diagonal. El tipo de polarización viene dado por la forma de la antena [2].

- Polarización lineal: si el vector del campo eléctrico (o campo magnético) en ese punto siempre está orientado a lo largo de la misma línea recta en cada instante de tiempo. Esto se logra si el vector de campo (eléctrico o magnético) posee una o dos componentes lineales ortogonales que están en fase temporal o  $180^\circ$  (o múltiplos) desfasados.
- Polarización circular: si el vector de campo en ese punto traza un círculo en función del tiempo. Las condiciones necesarias y suficientes para lograr esto son que el vector de campo posea: dos componentes lineales ortogonales, y las dos componentes tengan la misma magnitud y una diferencia de fase temporal de múltiplos impares de  $90^\circ$ .

El sentido de rotación siempre se determina girando el componente adelantado de fase hacia el componente retrasado de fase y observando la rotación del campo a medida que la onda se aleja del observador. Si la rotación va en sentido de las agujas del reloj, la onda está polarizada circularmente hacia la derecha; si la rotación es en sentido contrario a las agujas del reloj, la onda está polarizada circularmente hacia la izquierda.

- Polarización elíptica: una onda armónica de tiempo está polarizada elípticamente si la punta del vector de campo traza un lugar elíptico en el espacio. Está polarizado elípticamente a la derecha si el vector de campo gira en el sentido de las agujas del reloj, y está polarizado elípticamente a la izquierda si el vector de campo de la elipse gira en el sentido contrario a las agujas del reloj. El sentido de rotación se determina utilizando las mismas reglas que para la polarización circular. Además, las ondas con polarización elíptica también se especifican por su relación axial, cuya magnitud es la relación entre el eje mayor y el menor.

Las condiciones necesarias y suficientes para lograr esto son que el vector de campo posea lo siguiente: el campo debe tener dos componentes lineales ortogonales, y los dos componentes pueden ser de igual o diferente magnitud.

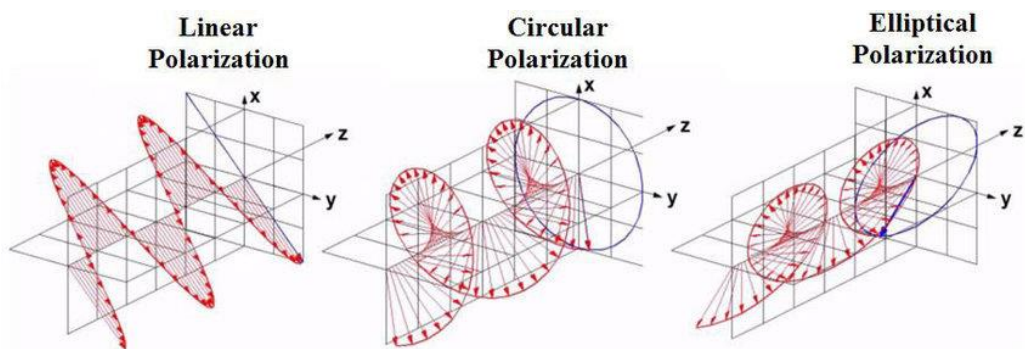


Figura 2.6 tipos de polarización de una OEM [19].



### 2.1.12 Razón axial

Es la relación de componentes ortogonales del campo eléctrico ( $E$ ). Un campo polarizado circularmente se compone de dos componentes de campo  $E$  ortogonales de igual amplitud (y desfasadas 90 grados). Debido a que los componentes son de igual magnitud, la relación axial es 1 (o 0 dB) [15].

La relación axial de una elipse es mayor que 1 ( $>0$  dB). La relación axial para la polarización lineal pura está indefinida, porque la componente ortogonal del campo es cero. Si una antena tiene polarización circular perfecta, esta relación sería 1 (0 dB) [20].

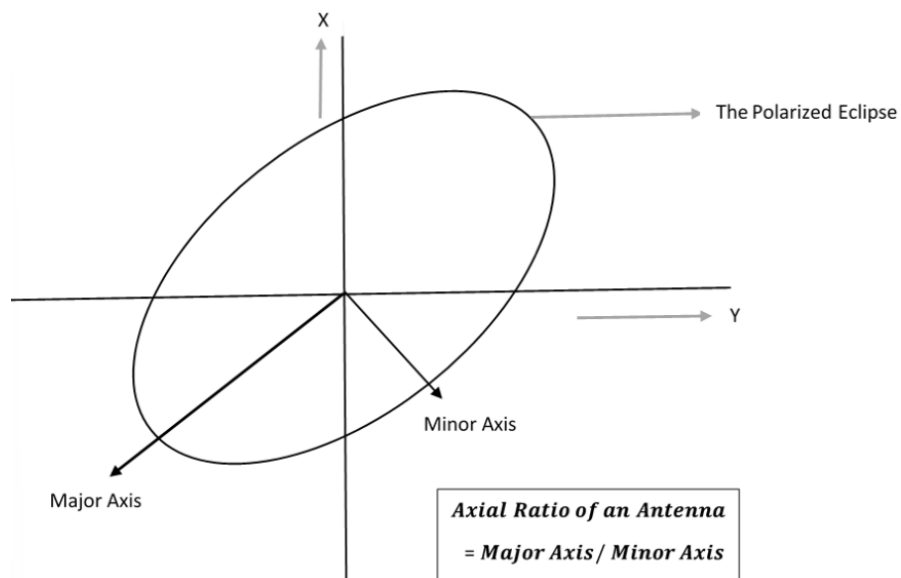


Figura 2.7 Razón axial de una onda con polarización elíptica [20].

## 2.2 Antenas tipo microstrip

Las antenas microcinta, como se muestra en la Figura 2.8, consisten en una tira (parche) metálica muy delgada ( $t \ll \lambda_0$ , donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda del espacio libre) colocada en una fracción de la longitud de onda ( $h \ll \lambda_0$ , generalmente  $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ ) sobre un plano de tierra. El parche de microcinta está diseñado de modo que su patrón máximo sea normal al parche. Para un parche rectangular, la longitud  $L$  del elemento suele ser  $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ . El parche y el plano de tierra están separados por una lámina dieléctrica denominada sustrato. El parche metálico puede adoptar muchas configuraciones diferentes (Figura 2.9) [16]. Sin embargo, los parches rectangulares, son los más populares debido a su facilidad de análisis y fabricación, y a sus atractivas características de radiación, especialmente radiación de baja polarización cruzada [21].

Las antenas microstrip son de bajo perfil, adaptables a distintas superficies, sencillas y económicas de fabricar utilizando tecnología moderna de circuito impreso, mecánicamente robustas cuando se montan en superficies rígidas y muy versátiles en términos de frecuencia de resonancia, polarización, patrón e impedancia.

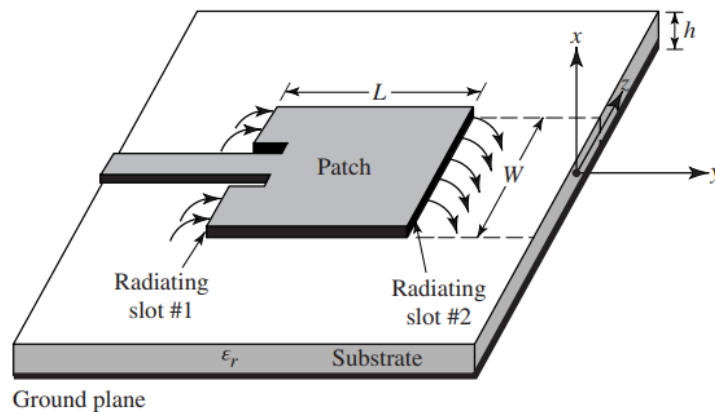


Figura 2.8 Antena microstrip de parche rectangular [2].

Las principales desventajas de las antenas microstrip son baja eficiencia, baja potencia, radiación espuria y ancho de banda muy estrecho [2].

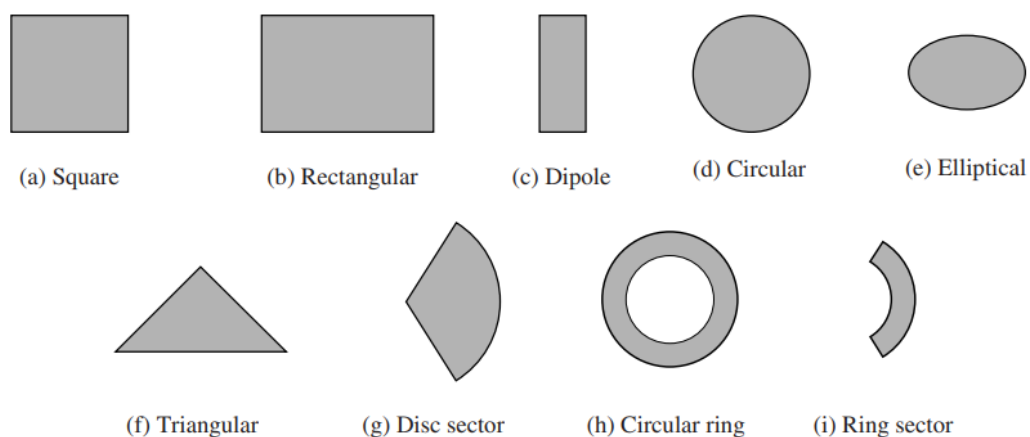


Figura 2.9 Formas representativas de elementos de parche de microstrip [2].

El parche radiante puede ser cuadrado, rectangular, de tira delgada (dipolo), circular, elíptico, triangular, etc. (Figura 2.9). Los más comunes son los cuadrados, rectangulares y circulares debido a su facilidad de análisis y fabricación.

### 2.2.1 Sustratos dieléctricos utilizados en antenas microstrip

Los sustratos dieléctricos son materiales que no presentan conducción de energía eléctrica. Un parámetro físico que permite conocer las propiedades del dieléctrico cuando se polariza ante la aplicación de un campo eléctrico es la constante dieléctrica  $\epsilon_r$ , también llamada permitividad [22].

Existen numerosos sustratos que se pueden utilizar para el diseño de antenas microstrip, sus constantes dieléctricas suelen estar en el rango de  $2.20 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Los más deseables para un buen rendimiento de la antena son aquellos con espesor mayor a 1 mm, cuya constante dieléctrica esté en el rango inferior porque proporcionan mejor eficiencia y mayor ancho de banda, pero a expensas de un mayor tamaño de antena [23].

Tabla 3 Sustratos más utilizados en antenas microstrip.

Compañía	Sustrato	Espesor (mm)	Frecuencia (GHz)	$\epsilon_r$	$\tan\delta$
Rogers	Duroid 5880	0.127	0 – 40	2.20	0.0009
	RO 3003	1.575	0 – 40	3.0	0.0010
	RO 3010	3.175	0 – 10	10.20	0.0022
	RO 4350	0.168	0 – 10	3.48	0.0037
---	FR4	0.05-100	0.001	4.70	---
DuPont	HK 04J	0.025	0.001	3.50	0.005
Isola	IS 410	0.05 - 3.20	0.1	5.40	0.035
Arlon	DiClad 870	0.091	0 – 10	2.33	0.0013
Polyflon	Polyguide	0.102	0 – 10	2.32	0.0005
Neltec	NH 9320	3.175	0 – 10	3.20	0.0024
Taconic	RF-60 <sup>a</sup>	0.102	0 – 10	6.15	0.0038

Los sustratos presentan diferentes propiedades en su estructura, por ejemplo, un material cuyas propiedades sean idénticas en todas las direcciones de su estructura se denomina isotrópico, en cambio cuando no es así se denomina anisotrópico. En términos eléctricos, la anisotropía es definida como la dependencia que la constante dieléctrica tiene en la orientación en la que un campo eléctrico es aplicado a un dieléctrico.

#### Sustrato FR4

El material más utilizado en placas de circuito impreso (PCB) de bajo costo es el FR4. Está compuesto por una tela de vidrio tejida incrustada en epoxi [24]. Típicamente, el valor de la constante dieléctrica es de 4.70, aunque dependiendo el fabricante y la calidad del sustrato (el estilo de tejido del vidrio, el grosor y la cantidad de resina), este valor puede variar entre 3.20 y 4.85 [25].

#### 2.2.3 Métodos de alimentación

Los métodos más utilizados son la línea microstrip, la sonda coaxial, el acoplamiento de apertura y el acoplamiento de proximidad [26] [27] [28] [29] [30]. Éstos se muestran en la Figura 2.11.

- La alimentación de línea microstrip (Figura 2.11 a) es una tira conductora, fácil de fabricar, sencilla de combinar controlando la posición de inserción y de práctico modelado. Sin embargo, a medida que aumenta el espesor del sustrato, aumentan las ondas superficiales y la radiación espuria, lo que limita el ancho de banda (normalmente entre un 2 y un 5%) [2].

- También se utiliza la alimentación de línea coaxial (Figura 2.11 b), donde el conductor interno del cable coaxial está conectado al parche de radiación mientras que el conductor externo está conectado al plano de tierra. La alimentación de la sonda coaxial también es fácil de fabricar y combinar, y tiene baja radiación espuria. Sin embargo, también tiene un ancho de banda estrecho.
- El acoplamiento de apertura es el más difícil de fabricar y también tiene un ancho de banda estrecho. Sin embargo, es algo más fácil de modelar y tiene una radiación espuria moderada. El acoplamiento de apertura consta de dos sustratos separados por un plano de tierra. En la parte inferior del sustrato inferior hay una línea de alimentación de microcinta cuya energía se acopla al parche a través de una ranura en el plano de tierra que separa los dos sustratos (Figura 2.11 c).
- En el método de alimentación por proximidad la alimentación no tiene contacto directo con el parche si no que el acoplamiento es electromagnético (Figura 2.11 d). En este método se tiene al parche sobre un sustrato y en la parte inferior de esta estructura se coloca una línea de alimentación sobre de otro sustrato con un plano tierra.

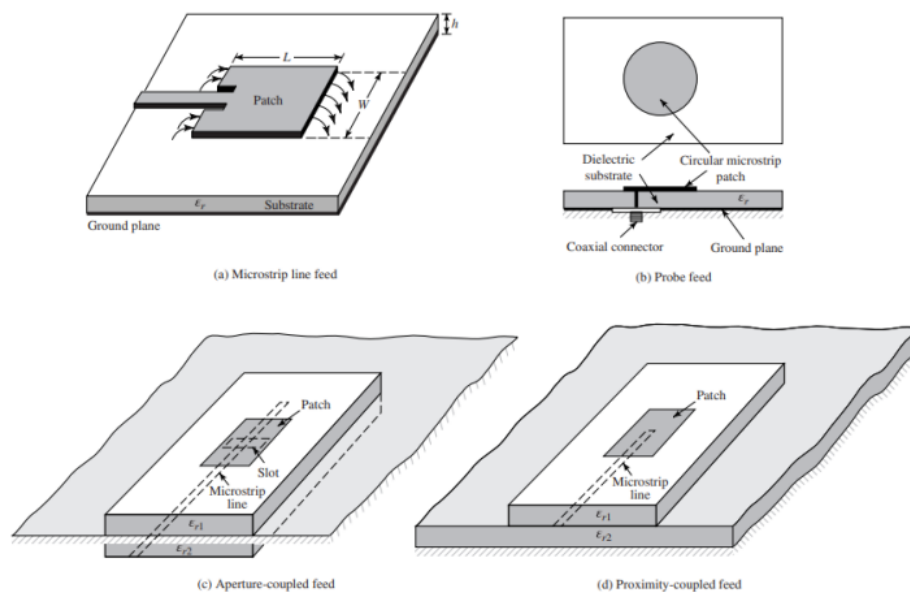


Figura 2.11 Tipos de alimentación en antenas microstrip [2].

## 2.3 Criterios de diseño

El parche rectangular es, con diferencia, la configuración más utilizada. Es muy fácil de analizar utilizando el modelo de línea de transmisión [2] [31].

### 2.3.1 Modelo de línea de transmisión

El modelo de línea de transmisión representa la antena microstrip mediante dos ranuras, separadas por una línea de transmisión de impedancia  $Z_c$  y de longitud  $L$  [31].

#### A. Permitividad relativa efectiva

Debido a que las dimensiones del parche son finitas a lo largo y ancho, los campos en las orillas del parche sufren efectos de borde (figura 2.13 a y b). Dado que algunas de las ondas viajan en el sustrato y otras en el aire, se introduce una permitividad relativa efectiva  $\epsilon_{reff}$  para tener en cuenta los efectos y la propagación de las ondas en la línea.

Para una línea con aire sobre el sustrato, la constante dieléctrica efectiva tiene valores en el rango de  $1 < \epsilon_{reff} < \epsilon_r$ . La constante dieléctrica efectiva se determina por [31]:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + \frac{12h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.15)$$

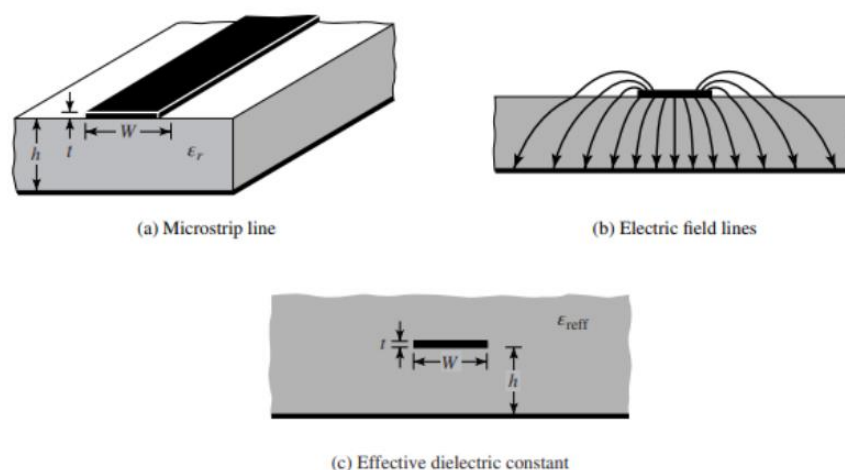


Figura 2.13 Línea Microstrip y sus líneas de campo eléctrico, y geometría constante dieléctrica efectiva [2].

## B. Longitud efectiva

Debido a los efectos de borde, eléctricamente, el parche de la antena microstrip parece mayor que sus dimensiones físicas (figura 2.14), donde las dimensiones del parche a lo largo de su longitud se han extendido en cada extremo por una distancia  $\Delta L$ , que es función de la constante dieléctrica efectiva  $\epsilon_{reff}$  y la relación ancho-alto ( $W/h$ ). Una relación para la extensión de la longitud es [32]:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (2.16)$$

Dado que la longitud del parche se ha ampliado en  $\Delta L$  en cada lado, la longitud efectiva del parche ahora es (con  $L = \lambda / 2$ ):

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (2.17)$$

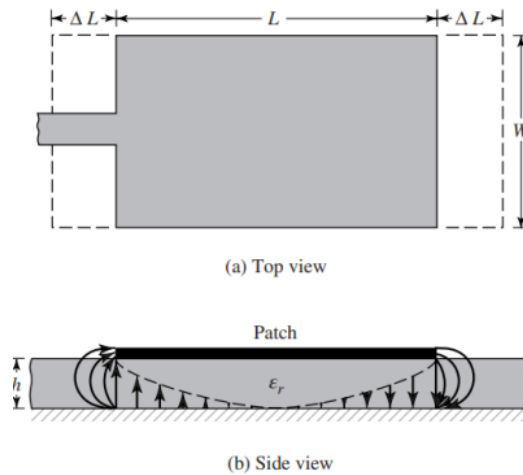


Figura 2.14 Longitudes físicas y efectivas d un parche rectangular [2].

## C. Diseño

El procedimiento supone que la información especificada incluye la constante dieléctrica del sustrato, la frecuencia de resonancia ( $f_r$ ) y espesor del sustrato  $h$  [2]:

I) Especificar  $\epsilon_r$ ,  $f_r$  (en Hertz) y  $h$  (en milímetros).

II) Determinar  $W$  y  $L$ :

a) El ancho  $W$  está dado por:

$$W = \frac{V_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.18)$$

Donde  $V_0$  es la velocidad de la luz en el espacio libre.

- Determinar la constante dieléctrica efectiva utilizando la ecuación 12.
- Calcular la longitud efectiva del parche.

#### D. Conductancia

Un parche de microstrip se puede representar como una combinación de admitancias en paralelo, compuestas de una susceptancia  $B$  y una conductancia  $G$  (figura 2.14). Ambas admitancias son idénticas, entonces cada elemento es idéntico también ( $B_1=B_2$  y  $G_1=G_2$ ) [31]. Es decir:

$$Y_1 = Y_2 = G_1 + j\omega B_1 = G_2 + j\omega B_2 \quad (2.19)$$

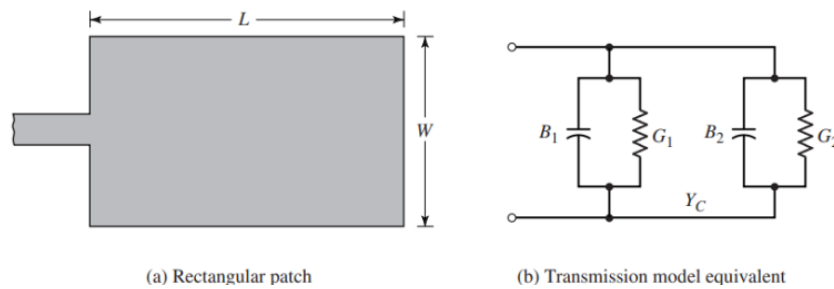


Figura 2.14 Parche de microcinta rectangular y su modelo de línea de transmisión de circuito equivalente [2].

En general, la conductancia se define como [2]:

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (2.20)$$

donde,

$$I_1 = \int_0^\pi \left[ \frac{\text{sen}\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \text{sen}^2 \theta \, d\theta = -2 + \cos(X) + X S_i(X) + \frac{\text{sen}(X)}{X} \quad (2.21)$$

Y donde  $X = k_0 W$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$

#### F. Resistencia de entrada resonante

La resistencia de entrada resonante es real y está dada por:



$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \quad (2.22)$$

donde,

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\text{sen}\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right] J_0(k_0 L \text{sen}\theta) \text{sen}^3\theta \, d\theta \quad (2.23)$$

donde  $J_0$  es la función de Bessel de primer tipo de orden cero.

### G. Alimentación y acoplamiento

Como ya se mencionó en la sección 2.2.3 Métodos de alimentación, la alimentación a través de línea de transmisión es la más viable en términos de fabricación y diseño.

La impedancia característica de una línea de transmisión viene dada por [31]:

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right], \quad \frac{W_0}{h} \leq 1 \quad (2.24)$$

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}, \quad \frac{W_0}{h} > 1 \quad (2.25)$$

donde  $W_0$  es el ancho de la línea. Dado que esta cantidad es desconocida, se debe recurrir a un método iterativo para determinar su valor. Generalmente el valor de la  $Z_c=50\Omega$  para lograr el acoplamiento [33].

El largo de la línea se obtiene a partir de la ecuación 21 [34]:

$$\Phi_m = \sqrt{\epsilon_{reff}} \frac{2\pi}{\lambda} \ell \quad (2.26)$$

donde  $\Phi_m$  es el desfase debido a la longitud. Resolviendo para  $\ell$ ,

$$\ell = \Phi_m \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.27)$$

El acoplamiento entre la línea de alimentación y la antena de parche se puede lograr insertando la línea de transmisión, una longitud  $y_0$ , en la antena (figura 2.15 a). Sin embargo, este método presenta el inconveniente de introducir variaciones en la resistencia de entrada [2]. Alternativamente se puede utilizar un transformador  $\lambda/4$

(figura 2.15 b). Éste es una línea de transmisión cuya longitud es igual a un cuarto de la longitud de onda (Ecuación 2.29) y su impedancia está dada por:

$$Z_{\lambda/4} = \sqrt{Z_c R_{in}} \quad (2.28)$$

$$\ell_{\lambda/4} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.29)$$

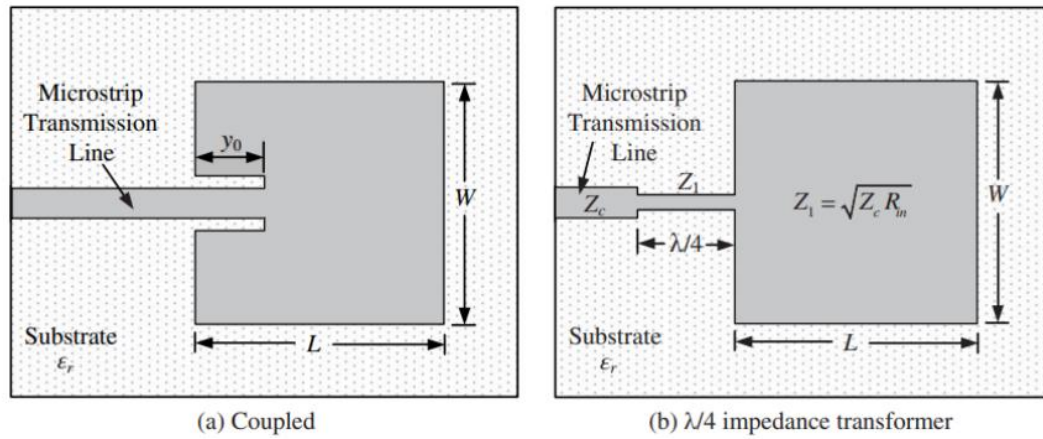


Figura 2.15 Técnicas de acoplamiento de impedancia para antenas de parche [2].

## 2.4 Geometría fractal en antenas

Un fractal es una estructura geométrica que presenta autosimilitud a cualquier escala. Significa fragmentos rotos o irregulares. El concepto fue introducido originalmente por Mandelbrot para describir una familia de formas complejas que poseen similitud inherente en su estructura geométrica [35]. Algunos ejemplos son los mostrados en la figura 3.

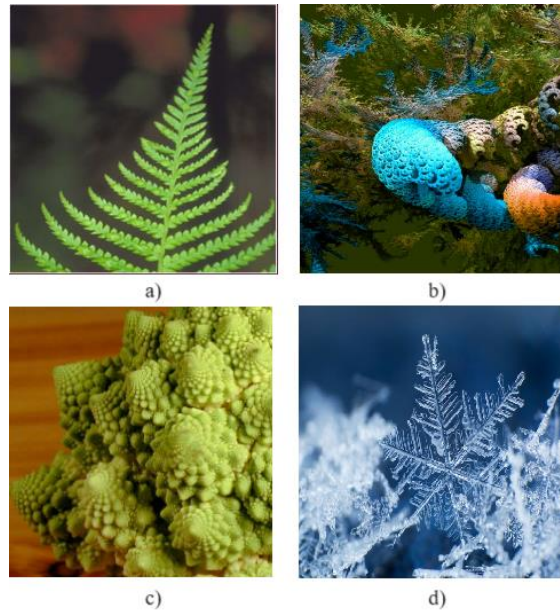


Figura 3 fractales encontrados en la naturaleza. Hoja de helecho (a), corales (b), col romana (c) y copo de nieve (d) [36].

### 2.4.1 Características de un fractal

- Autosimilitud: es decir, presenta el mismo patrón geométrico a diferente escala y orientación [37].
- Dimensión fractal: tiene que ver con el recuento de las figuras geométricas necesarias para recubrir el conjunto de la superficie [38].
- Algoritmo recursivo: también conocido como iteración. Se refiere al procedimiento para repetir la estructura geométrica en cada región del espacio, siguiendo un patrón determinado (Figura 3.1) [39].

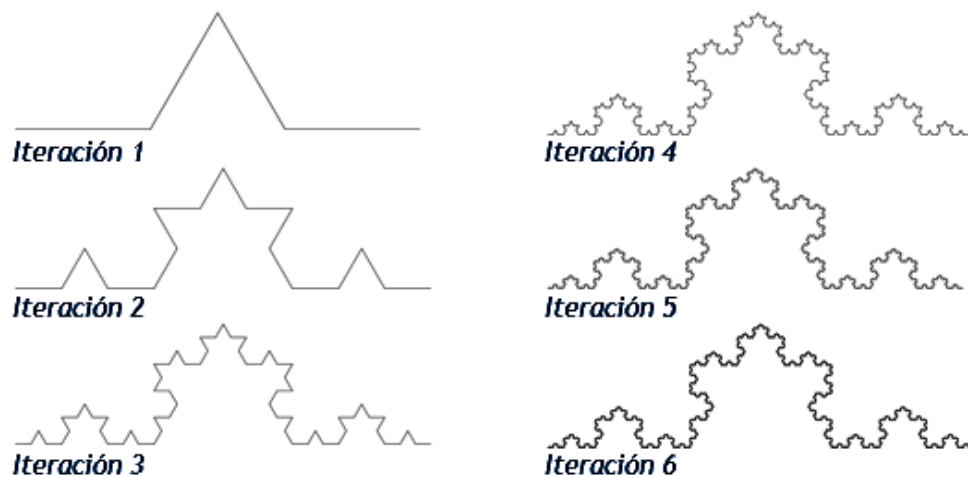


Figura 3.1 Recursividad de fractal (Fractal de Koch) [40].

## 2.4.2 Electrodinámica fractal

En la electrodinámica fractal, la geometría fractal se combina con la teoría electromagnética con el fin de investigar los problemas de radiación, propagación y dispersión de las OEM en estas estructuras geométricas. Uno de los campos más importantes de la investigación en electrodinámica fractal es su aplicación a la teoría y el diseño de antenas [37].

Una antena fractal podría considerarse como una distribución no uniforme de elementos radiantes. Cada uno de los elementos contribuye a la densidad de potencia radiada total [41]. En el diseño de antenas, los fractales pueden mejorar el rendimiento de la antena: reduciendo su tamaño [42], aumentando el ancho de banda [43], modificando la polarización [44], cambiando la forma de radiación [45] e implementando funcionamiento multibanda [46]. Esto dependerá del tipo de fractal y las aplicaciones de la antena.

Algunos fractales utilizados en antenas de parche microstrip son: alfombra de Sierpinski, fractal de Koch, fractal de Minkowski, helecho, circular, triangulo de Sierpinski, etc.

## 2.5 Estructuras de tierra defectuosa DGS

Las antenas microstrip convencionales tienen algunas limitaciones: frecuencia operativa única, ancho de banda limitado y baja ganancia. Se han reportado varias técnicas para mejorar los parámetros de las antenas de microcinta convencionales, entre estas se encuentran las estructuras de tierra defectuosa (Defected Ground Structures) [47]. Algunas configuraciones comunes se muestran en la Figura 3.3.

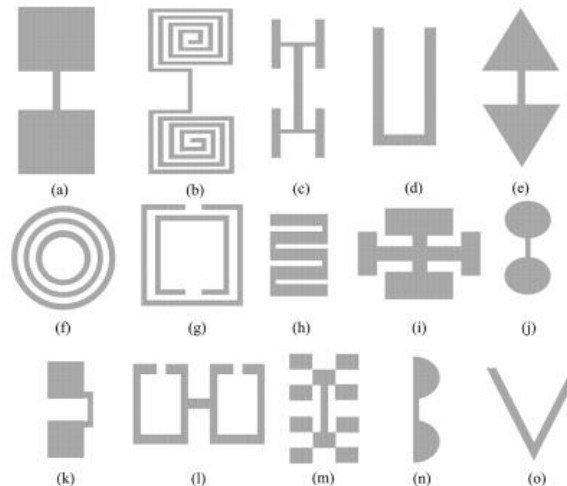


Figura 3.2 Ejemplos de estructuras DGS: (a) mancuerna, (b) espiral, (c) H, (d) U, (e) mancuerna con punta de flecha, (f) anillo concéntrico, (g) resonadores de anillo partido, (h) línea de meandro, (i) cruz, (j) mancuerna con cabeza circular, (k) cabezas cuadradas conectadas con ranuras en U, (l) mancuerna de bucle abierto, (m) fractal, (n) semicírculo, (o) V [48].

Las estructuras de tierra defectuosa son ranuras geométricas compactas incrustadas en el plano de tierra de los circuitos [49]. En DGS pueden estar comprendidos un solo defecto (celda unitaria) o varias configuraciones de defectos periódicos y aperiódicos [47].

Al modificar el plano de tierra cambia la distribución de corriente superficial, esto deriva en una excitación y propagación controlada por las ondas electromagnéticas a través de la placa de sustrato [50].

Cuando se implementa DGS en antenas, se mejora considerablemente el acoplamiento mutuo entre los elementos de líneas de alimentación con la propia antena [49], mejora el ancho de banda reduciendo los lóbulos laterales del patrón

de radiación, incluso reduciendo respuestas no deseadas en las bandas de frecuencia (filtrado) [47], entre otras.

Sin embargo, los diseños reportados en la literatura han sido desarrollados de forma empírica, por lo que no se tiene una metodología directa que permita desarrollar una geometría DGS concreta. Esto conlleva a que cada diseño puede variar su estructura de acuerdo con la aplicación requerida y, además se presenta la posibilidad de crear diseños propios en la misma forma.

Un esquema general que ilustra cómo proponer una geometría DGS es el diagrama de flujo de la figura 3.3.

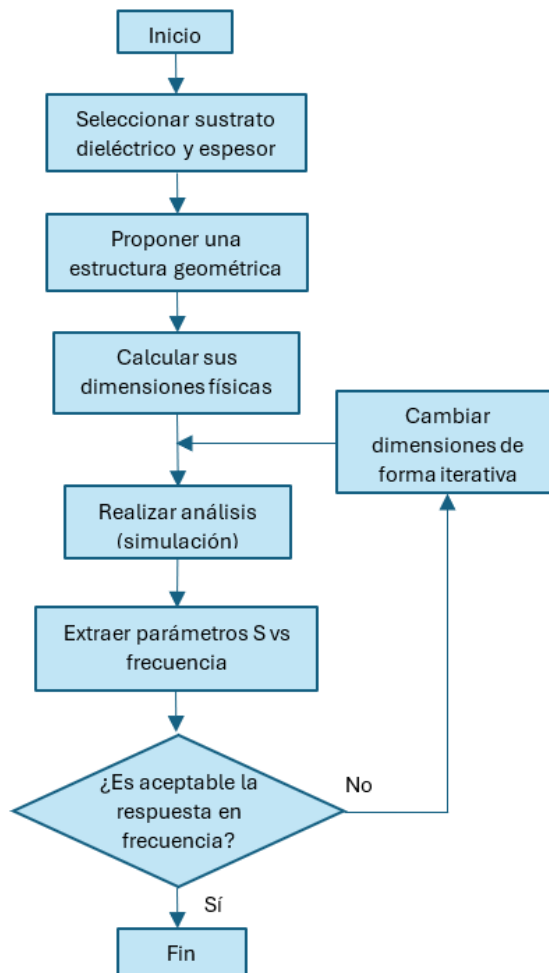


Figura 3.3 Procedimiento para diseñar geometrías DGS.

## 2.6 Estado del arte

En las tablas 4 -7 se muestran las características y figuras de mérito de antenas de parche tipo microstrip con tecnología fractal reportadas a una frecuencia de 5.8 GHz. Para las figuras de mérito, se presentan resultados simulados y medidos de la fabricación, simbolizados por las letras S y M respectivamente. En la tabla 4 se presentan las características de la antena base, es decir, la estructura geométrica previa a la primer iteración fractal. En las tablas 5, 6 y 7 se muestran cómo estas características cambian de acuerdo con el orden de iteración correspondiente.

Tabla 4 Antena base.

	[44]	[51]	[52]	[53]	[54]	[55]	[56]
Sustrato	Duroid 5880, $h=3.2$ mm, $\epsilon_r=2.2$ y $\tan\delta=0.0004$	Duroid 5880, $h=0.38$ mm, $\epsilon_r=2.2$ y $\tan\delta=0.0004$	Neltec NX9320, $\epsilon_r=3.2$	RT Duroid RO5880, $h=0.0175$ mm, $\epsilon_r=2.2$	RT Duroid 5880, $h=5.1$ mm, $\epsilon_r=2.2$ y $\tan\delta=0.0004$	DiClad 880, $h=1.5$ mm, $\epsilon_r=2.2$	Duroid 6002, $h=0.508$ mm, $\epsilon_r=2.94$
Tamaño (mm)	36 x 36	17.47 x 20.45	22.90 x 22.90	20.577 x 22.756	50 x 40	33 x 27	24 x 30
$ S_{11} $	----	-17.65 dB (S)	-30 dB (S)	----	-20 dB (S)	----	-10 dB (S)
Ancho de banda	----	53.60 MHz (S)	170 MHz (S)	----	200 MHz (S)	----	----
Ganancia	----	----	8.10 dB (S)	----	4.70 dB (S)	----	----
Eficiencia	----	----	----	----	0.976	----	----
Directividad	----	----	----	----	4.83 dB (S)	----	----
VSWR	----	----	----	----	1.22 (S)	----	----
Frecuencia	5.80 GHz (S)	5.80 GHz (S)	5.88 GHz (S)	5.80 GHz (S)	5.80 GHz (S)	5.80 GHz (S)	5.80 GHz (S)

Tabla 5 Primera iteración.

	[44]	[51]	[52]	[53]	[54]	[55]	[56]
Sustrato	Duroid 5880, h= 3.20 mm, $\epsilon_r= 2.20$ y $\tan\delta= 0.0004$	Duroid 5880, h= 0.38 mm, $\epsilon_r= 2.20$ y $\tan\delta= 0.0004$	Neltec NX9320, $\epsilon_r= 3.20$	RT Duroid RO5880, h= 0.0175 mm, $\epsilon_r= 2.20$	RT Duroid 5880, h= 5.10 mm, $\epsilon_r= 2.20$ y $\tan\delta= 0.0004$	DiClad 880, h=1.50 mm, $\epsilon_r=2.20$	Duroid 6002, h=0.508 mm, $\epsilon_r=2.94$
Tamaño (mm)	36 x 36	15.19 x 22.41	10.55 x 10.55	----	----	33 x 27	24 x 30
$ S_{11} $	-17.70 dB (S)	----	-28 dB (S)	----	----	----	-10 dB (S)
Ancho de banda	344 MHz (S)	----	45 MHz (S)	----	----	----	----
Ganancia	----	----	3.50 dB (S)	----	----	5.60 dBi (S)	----
Eficiencia	----	----	----	----	----	----	----
Directividad	----	----	----	----	----	----	----
VSWR	1.30 (S)	----	----	----	----	----	----
Frecuencia	5.70 GHz (S)	----	5.88 GHz (S)	----	----	----	----
Fractal	Koch	Sierpinski	Helecho	Sierpinski Gasket	Sierpinski modificado	Sierpinski	Cruz modificado



Tabla 6 Segunda iteración.

	[44]	[51]	[52]	[53]	[54]	[55]	[56]
Sustrato	Duroid 5880, h= 3.20 mm, $\epsilon_r= 2.20$ y $\tan\delta= 0.0004$	Duroid 5880, h= 0.38 mm, $\epsilon_r= 2.20$ y $\tan\delta= 0.0004$	Neltec NX9320, $\epsilon_r= 3.20$	RT Duroid RO5880, h= 0.0175 mm, $\epsilon_r= 2.20$	RT Duroid 5880, h= 5.10 mm, $\epsilon_r= 2.20$ y $\tan\delta= 0.0004$	DiClad 880, h=1.50 mm, $\epsilon_r=2.20$	Duroid 6002, h=0.508 mm, $\epsilon_r=2.94$
Tamaño (mm)	36 x 36	15.19 x 22.41	----	----	50 x 40	33 x 27	24 x 30
$ S_{11} $	-15.10 dB (S)	----	----	----	-14.80 dB (S)	----	----
Ancho de banda	369 MHz (S)	----	----	----	400 MHz (S)	----	----
Ganancia	----	----	----	----	3.13 dB (S)	4.86 dBi	4.09 dB (S)
Eficiencia	----	----	----	----	0.95	----	----
Directividad	----	----	----	----	3.26 dB (S)	----	----
VSWR	----	----	----	----	1.44 (S)	----	----
Frecuencia	5.70 GHz (S)	----	----	----	5.70 GHz (M)	----	----
Fractal	Koch	Sierpinski	Helecho	Sierpinski Gasket	Sierpinski modificado	Sierpinski	Cruz modificado

Tabla 7 Tercera iteración.

	[44]	[51]	[52]	[53]	[54]	[55]	[56]
Sustrato	Duroid 5880, $h=3.20$ mm, $\epsilon_r=2.20$ y $\tan\delta=0.0004$	Duroid 5880, $h=0.38$ mm, $\epsilon_r=2.20$ y $\tan\delta=0.0004$	Neltec NX9320 $\epsilon_r=3.20$	Duroid RO5880, $h=0.0175$ mm, $\epsilon_r=2.20$	Duroid 5880, $h=5.10$ mm, $\epsilon_r=2.20$ y $\tan\delta=0.0004$	DiClad 880, $h=1.50$ mm, $\epsilon_r=2.20$	Duroid 6002, $h=0.508$ mm, $\epsilon_r=2.94$
Tamaño (mm)	36 x 36	15.19 x 22.41	----	22.90 x 21	50 x 40	33 x 27	24 x 30
$ S_{11} $	-21.90 dB (S)	-44.27 dB (S) -19.22 dB (M)	----	23.30 dB (S) 22.96 dB (M)	-15.36 dB (S)	-16 dB (S)	-17.50 dB (S)
Ancho de banda	406 MHz (S)	80.60 MHz (S) 130 MHz (M)	----	99.99 MHz (S) 113.20 MHz (M)	400 MHz (S)	1.20 GHz	900 MHz (S)
Ganancia	----	5.69 dB (S)	----	3.52 dB (S)	3.31 dB (S)	4.50 dBi (S)	3.10 dBi (S)
Eficiencia	----	----	----	----	0.962	----	----
Directividad	----	6.51 dB (S)	----	6.83 dB (S)	3.40 dB (S)	----	----
VSWR	1.17 (S)	1.01 (S)	----	1.15 (S)	1.40 (S)	----	----
Frecuencia	5.70 GHz (S)	5.80 GHz (S) 5.83 GHz (M)	----	5.80 GHz (S) 5.88 (M)	5.70 GHz (M)	5.80 GHz (S)	5.82 GHz (S)
Fractal	Minkowski	Sierpinski	Helecho	Sierpinski Gasket	Sierpinski modificado	Sierpinski	Cruz modif.

## 3. Desarrollo

### 3.1 Diseño del parche rectangular

Como ya se ha mencionado en el capítulo 2, el parche rectangular es la configuración más utilizada, por su fácil diseño y manufactura. Su estructura geométrica lo vuelve práctico para implementar un diseño fractal.

#### Cálculo de la permitividad efectiva ( $\epsilon_{reff}$ )

El sustrato utilizado para este trabajo es un sustrato de resina, con espesor de cobre de ½ onza (35.00  $\mu\text{m}$ ), permitividad de 5.40 y espesor del sustrato de 1.54 mm. Con la ecuación 2.15, la permitividad efectiva es:

$$\epsilon_{reff} = 4.66$$

#### Dimensiones W y Leff

Siguiendo las ecuaciones 2.16, 2.17 y 2.18, se tiene que las dimensiones del parche rectangular son:

$$W = 14.92 \text{ mm}$$

$$L_{eff} = 11.40 \text{ mm}$$

#### Cálculo de conductancia y resistencia de entrada resonante

Utilizando las ecuaciones 2.20 y 2.21, se tiene:

$$G_1 = 0.82 \text{ mS}$$

Con las ecuaciones 2.22 y 2.23:

$$R_{in} = 358.13 \Omega$$

#### Dimensiones de las líneas de transmisión para alimentación y acoplamiento

Como no se conoce a priori la razón  $W_0/h$ , se deben resolver las ecuaciones 2.24 y 2.25 simultáneamente, resolviendo para  $W_0$  y luego evaluar cuál caso corresponde.

El ancho de la línea de alimentación microstrip es:

$$W_0 = 2.56 \text{ mm}$$

Para el transformador  $\lambda/4$  se procede de la misma manera, pero tomando el valor de impedancia de la ecuación 2.22.

$$Z_{\lambda/4} = 133.81 \Omega$$

$$W_{\lambda/4} = 0.19 \text{ mm}$$

La longitud se determina a partir de la longitud de onda guiada con la ecuación 2.29:

$$\ell_{\lambda/4} = 5.99 \text{ mm}$$

### Dimensiones del plano de tierra

Las dimensiones del plano de tierra se hallan mediante iteraciones en simulación, determinando qué tamaño presenta la mejor respuesta en frecuencia, este paso se explica con más detalle en la sección 3.4 Simulación. Este proceso se realiza mediante el software HFSS de ANSYS, obteniendo:

$$W_d = 22 \text{ mm}$$

$$L_d = 25 \text{ mm}$$

Finalmente, las dimensiones de la antena de parche se muestran en la figura 3.4.

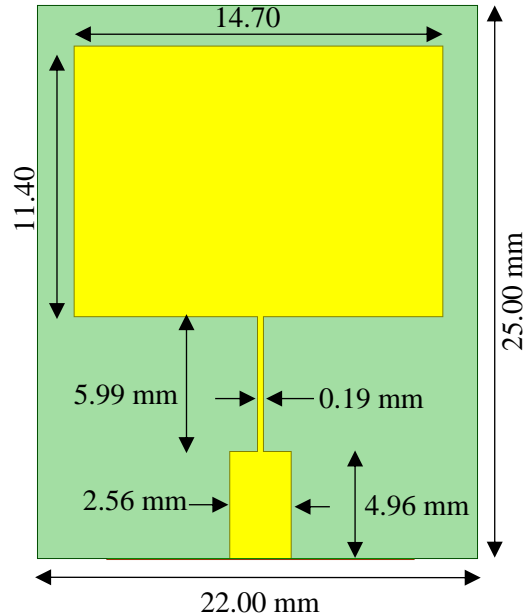


Figura 3.4 Dimensiones de la antena base

### 3.2 El fractal de Koch inverso en antenas

Si bien existen muchos tipos de fractales que se pueden implementar en una antena, el fractal de Koch resulta interesante dadas sus características de fácil diseño e implementación, debido a que su estructura presenta un nivel bajo de complejidad. De acuerdo con [44] la implementación del fractal de Koch en antenas microstrip, mejora la polarización circular demandada en comunicaciones inalámbricas. También se menciona que, al lograr una polarización circular, se consigue un ancho de banda más amplio. Además, en [57], se menciona que este fractal es utilizado para mejorar significativamente el ancho de banda de una antena.

El fractal de Koch inverso, también llamado “copo de nieve” consiste en aplicar la recursividad hacia el interior de la figura y no hacia el exterior como en el fractal tradicional. Este fractal es aplicable a casi cualquier figura geométrica, exceptuando las figuras redondas. Por esta razón, resulta conveniente implementarlo en la estructura de antena de parche rectangular microstrip. La construcción del fractal de Koch se realiza de la siguiente manera:

- I. Partiendo del parche rectangular, se realiza una división de cada lado en tres segmentos iguales.

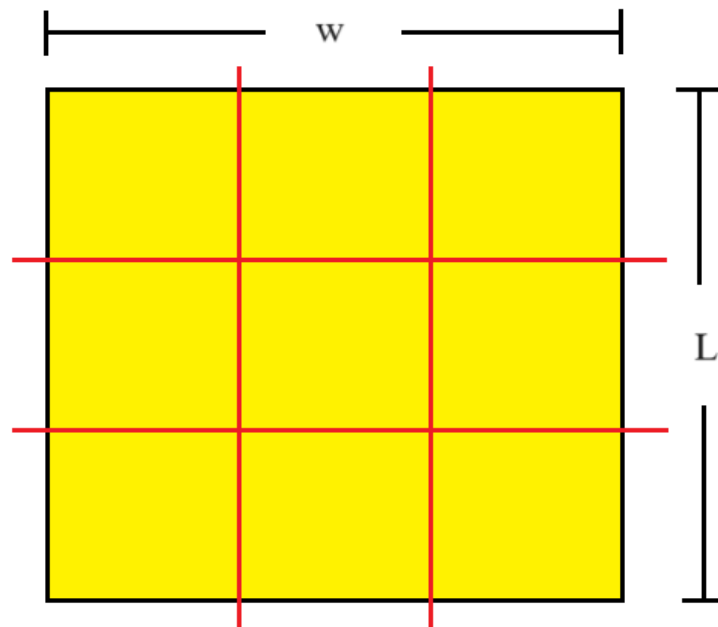


Figura 3.5 División del parche rectangular en proporciones simétricas.

- II. Una vez realizada la segmentación, se realiza la primera iteración de acuerdo con el patrón rectangular establecido. Entonces, cada segmento tendrá dimensiones  $W/3$  por  $L/3$ .

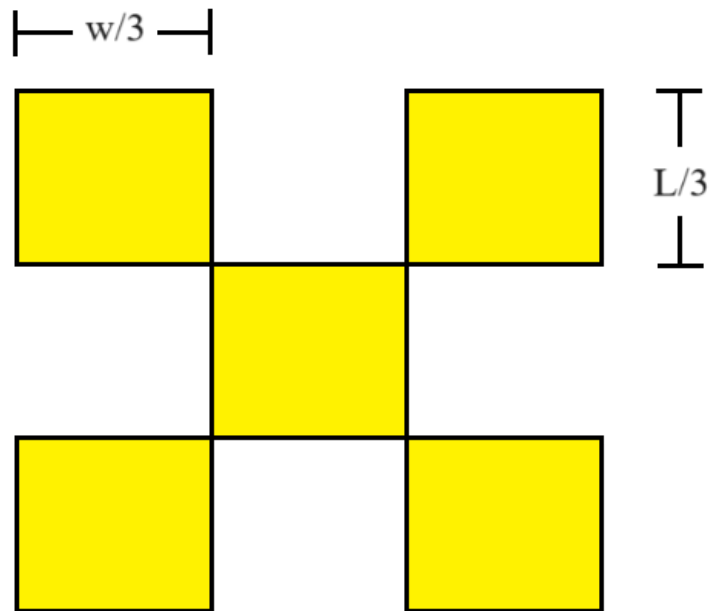


Figura 3.6 Primera iteración.

- III. La segunda iteración se realiza segmentando cada rectángulo como en I y repitiendo el paso II. Ahora, cada rectángulo se ha dividido en tres partes iguales y sus dimensiones son  $W/9$  por  $L/9$ .

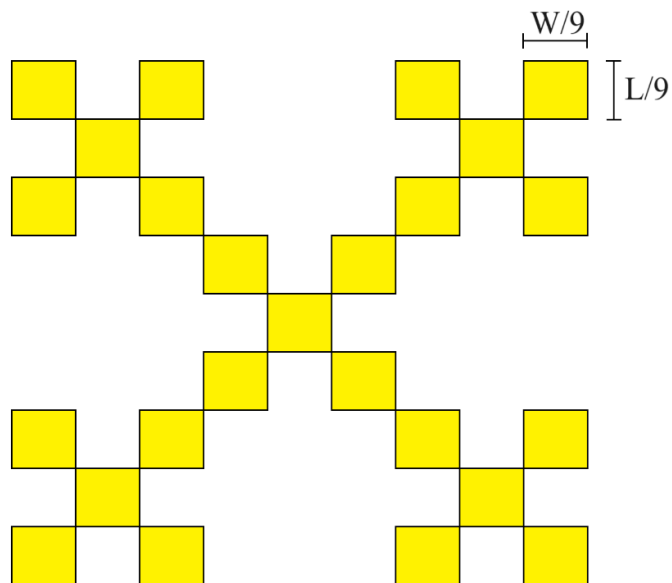


Figura 3.7 Segunda iteración.

#### IV. Tercera iteración

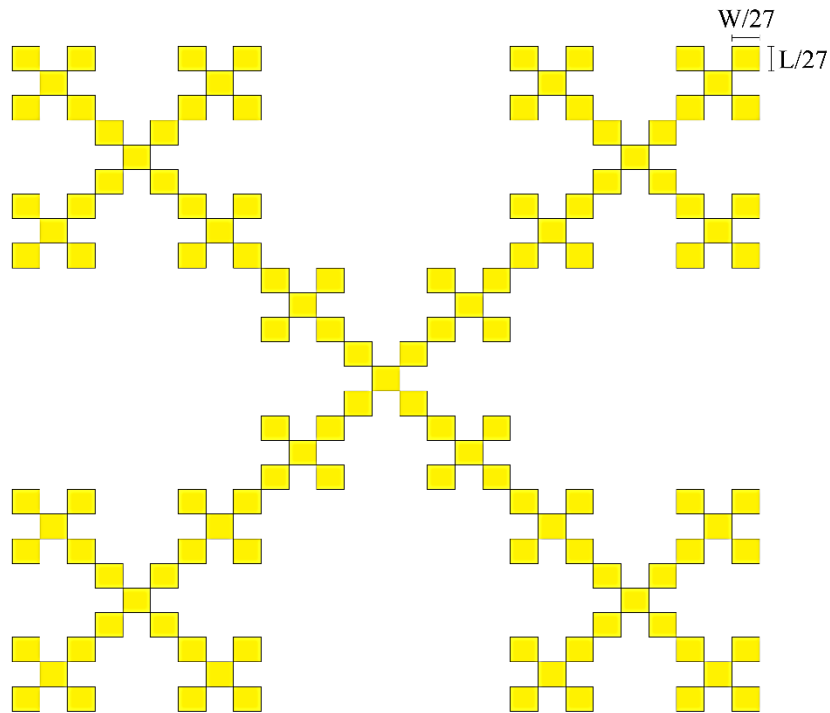


Figura 3.8 Tercera iteración

### 3.3 Diseño de antena fractal

Dado que la complejidad geométrica de la estructura fractal aumenta en función del número de iteraciones, se buscará encontrar un balance entre el grado de complejidad y la respuesta de la antena. Por este motivo, se buscaron unas dimensiones que proporcionen un valor más concreto a medida que se realiza cada iteración, redondeando las dimensiones del parche rectangular.

Partiendo del diseño base de la figura 3.5, se tiene que las dimensiones para cada iteración son:

- Antena base:  $W = 15 \text{ mm}$  por  $L = 12 \text{ mm}$
- Primera iteración:  $W/3 = 5 \text{ mm}$  por  $L/3 = 4 \text{ mm}$
- Segunda iteración:  $W/9 = 1.66 \text{ mm}$  por  $L/9 = 1.30 \text{ mm}$
- Tercera iteración:  $W/27 = 0.55 \text{ mm}$  por  $L/27 = 0.43 \text{ mm}$

Debido a que las dimensiones de la antena son relativamente pequeñas, se propone un mínimo de tres iteraciones, siendo el tamaño mínimo más factible para fabricar.

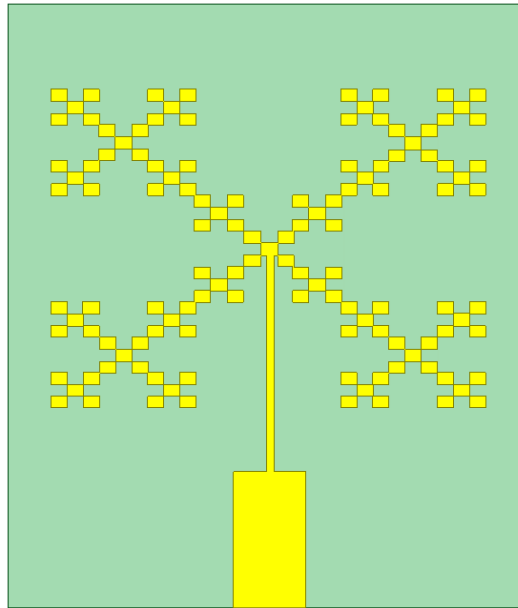


Figura 3.9 Antena con fractal de Koch inverso.

## 3.4 Simulación

### 3.4.1 Puertos de excitación

En HFSS, las excitaciones son fuentes de campo electromagnético que proporcionan información de los parámetros S y de campo. Siendo Wave Port la que proporciona información más completa en la simulación [58].

#### Dimensiones de Wave Port

Para colocar un Wave Port se requiere que éste sea lo suficientemente grande como para capturar la estructura de campo en la línea de alimentación. Si no se hace el dimensionamiento correcto, el Wave Port puede provocar impedancia característica incorrecta y alterar la reflexión en los resultados.

En la simulación, se coloca enfrente de la línea de alimentación mediante una superficie 2D de dimensiones que dependen del ancho de la línea ( $W_0$ ) y la altura del sustrato ( $h$ ) (figura 3.11).



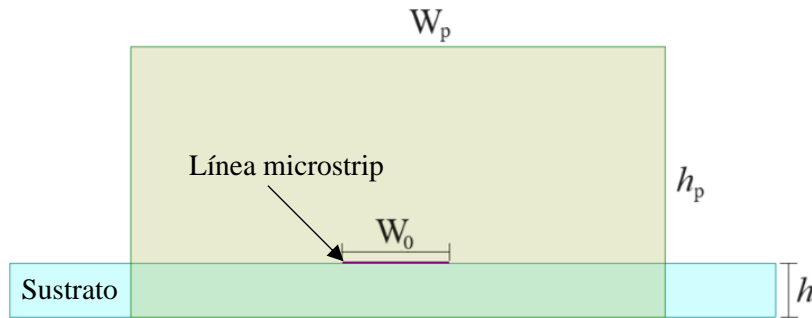


Figura 3.10 Puerto de excitación Wave Port.

El valor de  $W_p$  está entre 5 y 10 veces el valor de  $W_0$ . Y el valor de  $h_p$  entre 5 y 10 veces el valor de  $h$ . En la mayoría de las ocasiones  $5W_0$  por  $5h_p$  es el tamaño adecuado [58].

Comprobando la respuesta de la antena con varios tamaños, se tiene que las dimensiones que proporcionan una respuesta más favorable son:

$$W_p = 5.5W_0 = 14.08 \text{ mm}$$

$$h_p = 5.2h = 8.08 \text{ mm}$$

### 3.4.2 Simulación de la antena

#### Antena base

La simulación en HFSS del modelo de antena obtenido en la sección 3.1 (figura 3.5), arroja los siguientes resultados:  $S_{11} = -23.98 \text{ dB}$ , ancho de banda  $BW = 62.50 \text{ MHz}$ ,  $VSWR=1.17$ , eficiencia=0.87, impedancia de  $(51.17 - j1.03)\Omega$  y ganancia= 8.75 dBi.

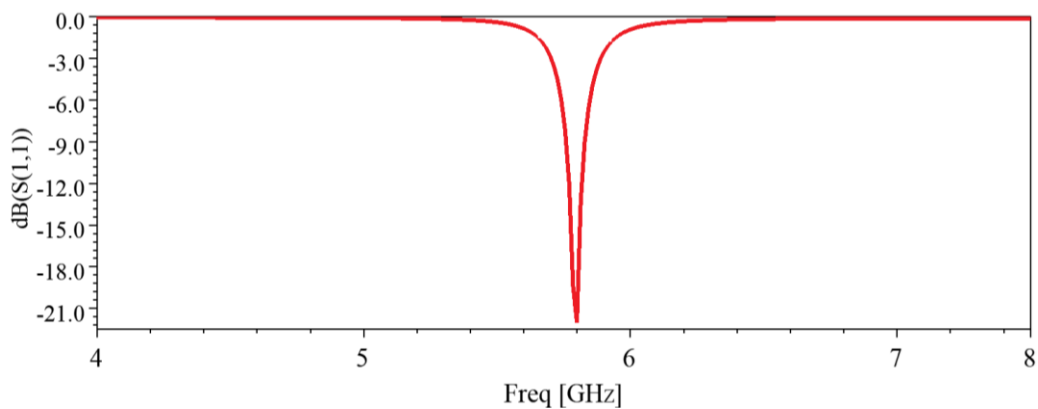


Figura 3.11 Pérdidas por retorno de la antena base.

### Antena fractal

Dado que la complejidad geométrica en la estructura fractal aumenta en función del número de iteraciones, se busca encontrar un balance entre el grado de complejidad y la respuesta de la antenna. La tabla 8 muestra los resultados obtenidos de la simulación de tres iteraciones fractales y la comparación con la antenna base.

Tabla 8 Parámetros obtenidos de cada iteración

Figura de mérito	Antena base	Primera iteración	Segunda iteración	Tercera iteración
$ S_{11} $	-23.83 dB	-21.12 dB	-15.30 dB	-17.25 dB
Ancho de banda	62.50 MHz	174.00 MHz	124.00 MHz	107.00 MHz
Ganancia	8.75 dBi	7.22 dBi	6.55 dBi	8.89 dBi
VSWR	1.17	1.28	1.41	1.15
Eficiencia	0.87	0.90	0.81	0.89
Directividad	8.97 dBi	8.01 dBi	8.08 dBi	9.94 dBi
Impedancia ( $\Omega$ )	$51.17 - j1.03$	$50.12 - j1.4$	$50.23 - j1.81$	$51.31 - j1.01$
Frecuencia	5.80 GHz	8.10 GHz	6.17 GHz	5.80 GHz

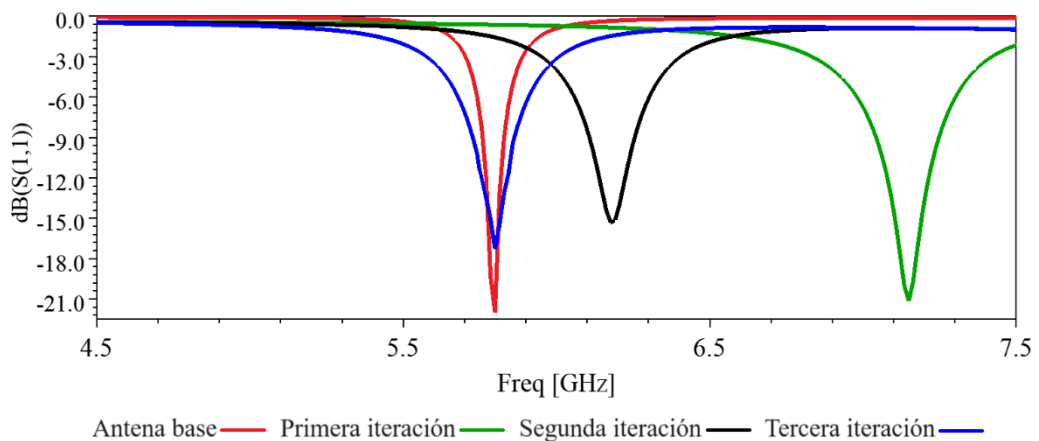


Figura 3.12 Pérdidas por retorno de las tres iteraciones fractales comparadas con la antenna base.

Al realizar la simulación de la tercera iteración de la antenna, se obtiene una mejora considerable del ancho de banda, aumentándolo 44.50 MHz. Sin embargo, todavía

no es un valor satisfactorio, porque el ancho de banda de la frecuencia 5.80 GHz es igual a 125 MHz, por ello, tras realizar modificaciones en la geometría fractal, se determina que, eliminando la iteración del rectángulo central, la respuesta de la antena mejora considerablemente. Una vez realizado este cambio, se repite el patrón geométrico para todo el fractal, procurando mantener la propiedad de recursividad. Los cambios propuestos se muestran en la figura 3.13.

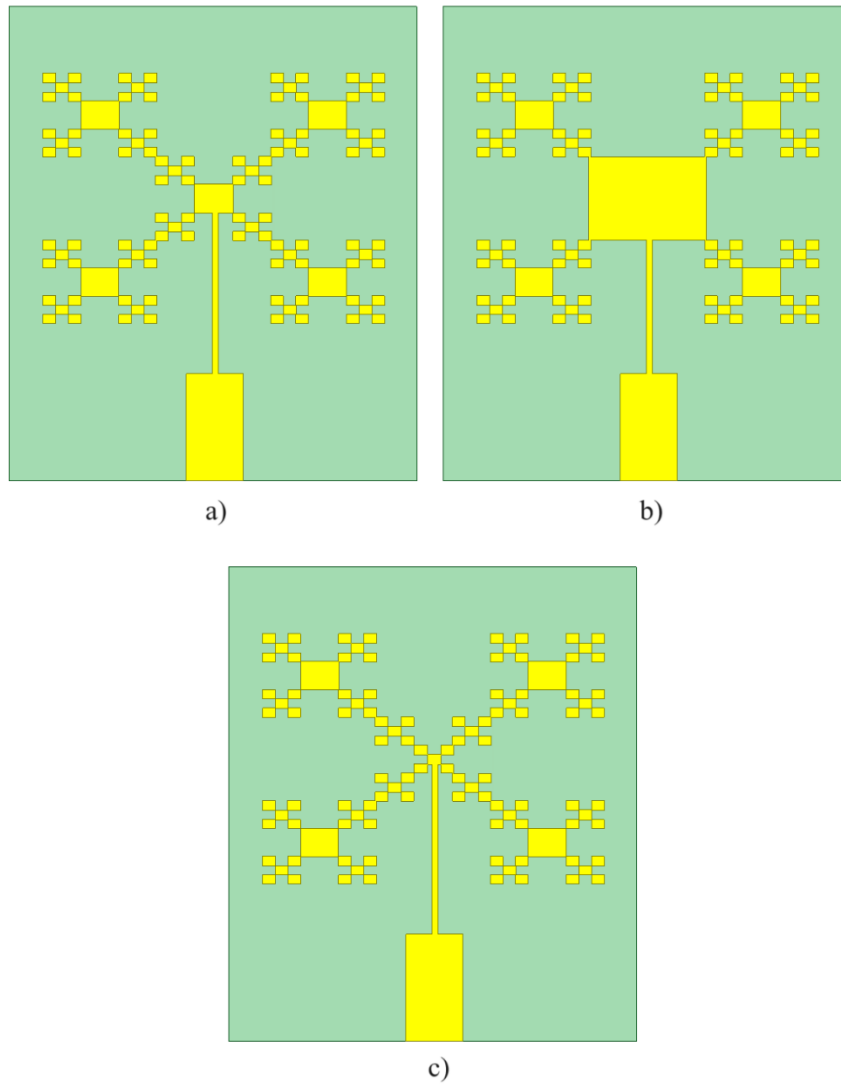


Figura 3.13 Variantes del fractal de Koch inverso.

Cuando se modifica la geometría de un fractal, éste se denomina fractal modificado. Estas modificaciones son implementadas para mejorar la respuesta de antenas fractales [59].

Tabla 9 Parámetros obtenidos de la implementación de fractales modificados.

Figura de mérito	a)	b)	c)
$ S_{11} $	-22.33 dB	-24.43 dB	-25.04 dB
Ancho de banda	125.00 MHz	127.00 MHz	122.00 MHz
Ganancia	8.63 dBi	9.14 dBi	8.75 dBi
VSWR	1.10	1.05	1.14
Eficiencia	0.86	0.87	0.92
Directividad	9.67 dBi	10.40 dBi	8.97 dBi
Impedancia ( $\Omega$ )	$50.61 - j1.13$	$51.30 - j1.24$	$50.83 - j1.91$
Frecuencia	6.80 GHz	5.87 GHz	6.42 GHz

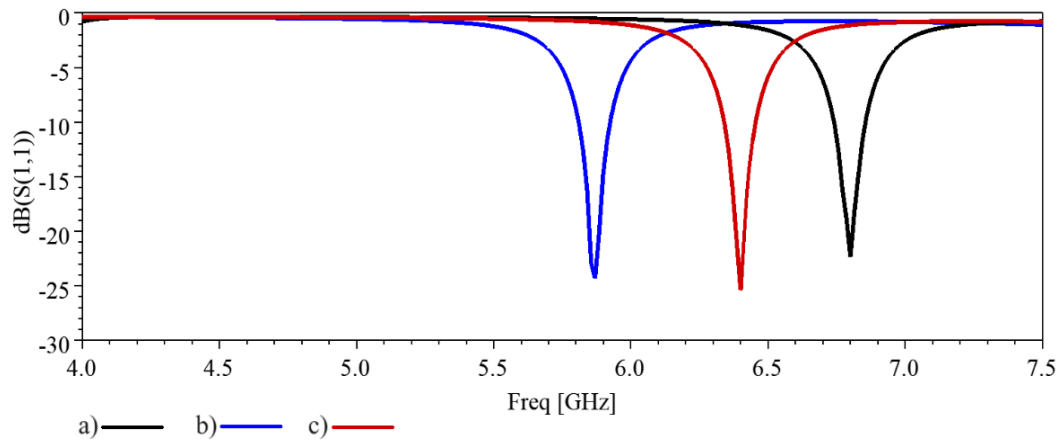


Figura 3.14 Pérdidas por retorno de las antenas con fractal modificado.

### Corrección de la frecuencia de resonancia

A partir de las variaciones de la antena fractal, se obtuvo que la mejor respuesta es la versión b), teniendo una mejora en el ancho de banda y pérdidas por retorno, sin embargo, este cambio trae consigo que la frecuencia de resonancia no sea la deseada. De acuerdo con [45], la inclusión de una ranura en el centro de la antena permite ajustar la frecuencia al valor deseado. No se especifica cómo obtener las dimensiones de la ranura, pero tras realizar varias iteraciones y comprobar la respuesta de cada una de éstas, se tiene como resultado que las dimensiones adecuadas son 1.00 x 1.50 mm (Figura 3.15).

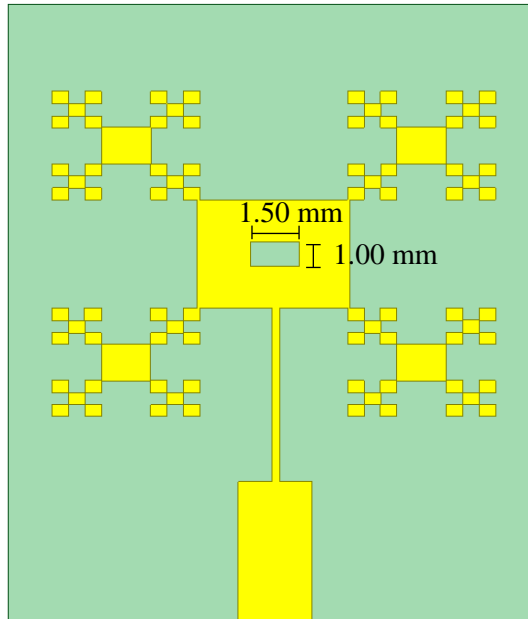


Figura 3.15 Antena con ranura central.

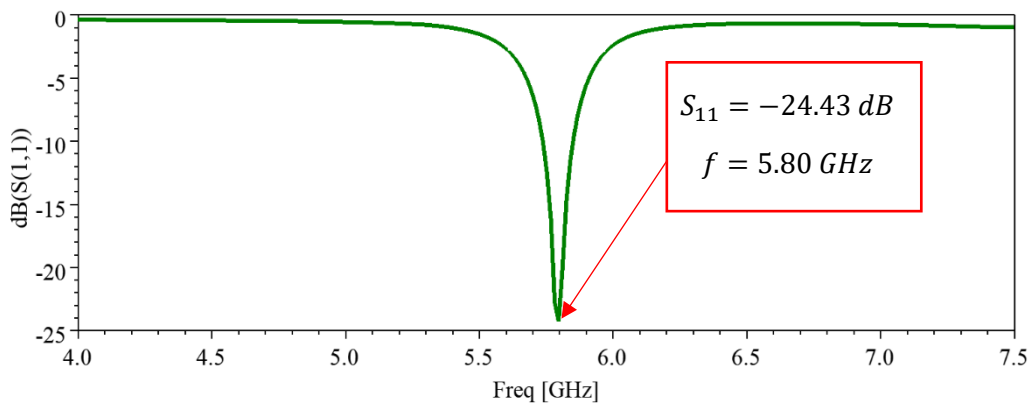


Figura 3.16 Corrección de la frecuencia de resonancia.

### 3.4.3 Implementación de geometría DGS

Como ya se mencionó en la sección 2.5, las estructuras de tierra defectuosa mejoran el acoplamiento mutuo entre los elementos del sistema de antena, esto se traduce en un aumento de las pérdidas por retorno. En [60] y [61] se reporta la implementación de estructuras de tierra defectuosa en forma de fractal de cruz y Cruz de Jerusalén, respectivamente, en antenas fractales con el fin de obtener un aumento de las pérdidas por retorno de la antena. En [62] se reporta una antena fractal con ranuras en forma de cruz que contribuyen significativamente al acoplamiento, ganancia y ancho de banda.

### Ranura de Cruz

Se propone un diseño de ranura en forma de cruz modificada (Figura 3.17), con el fin de mejorar la respuesta de la antena. Siguiendo el procedimiento indicado en la Figura 3.3, se consigue implementar dicha geometría, con dimensiones que se muestran en la Figura 3.17.

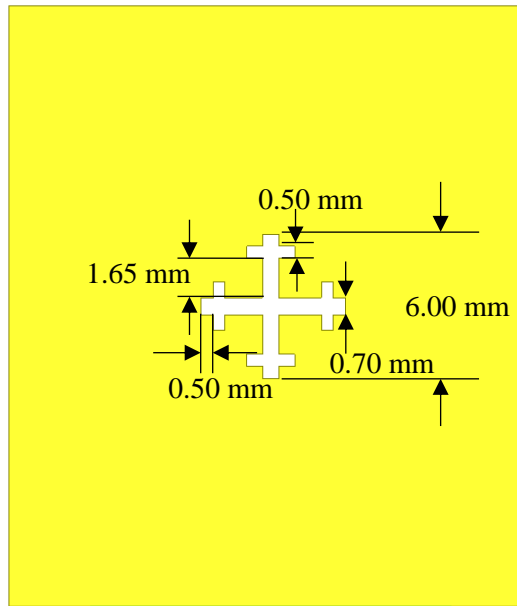


Figura 3.17 Estructura DGS propuesta y sus dimensiones

Las pérdidas por retorno obtenidas a partir de esta modificación en el plano de tierra se muestran en la Figura 3.18 y en la tabla 10 se muestra la comparación de resultados con la antena previa esta modificación.

Tabla 10 Comparación de parámetros de antena fractal con antena fractal + DGS

Figura de mérito	Antena fractal	Antena fractal + DGS
$ S_{11} $	-24.43 dB	-38.25 dB
Ancho de banda	127.00 MHz	132.00 MHz
Ganancia	9.14 dBi	13.21 dBi
VSWR	1.05	1.02
Eficiencia	0.87	0.85
Directividad	10.40 dBi	15.50 dBi
Impedancia ( $\Omega$ )	$51.30 - j1.24$	$50.85 - j1.07$
Frecuencia	5.80 GHz	5.80 GHz

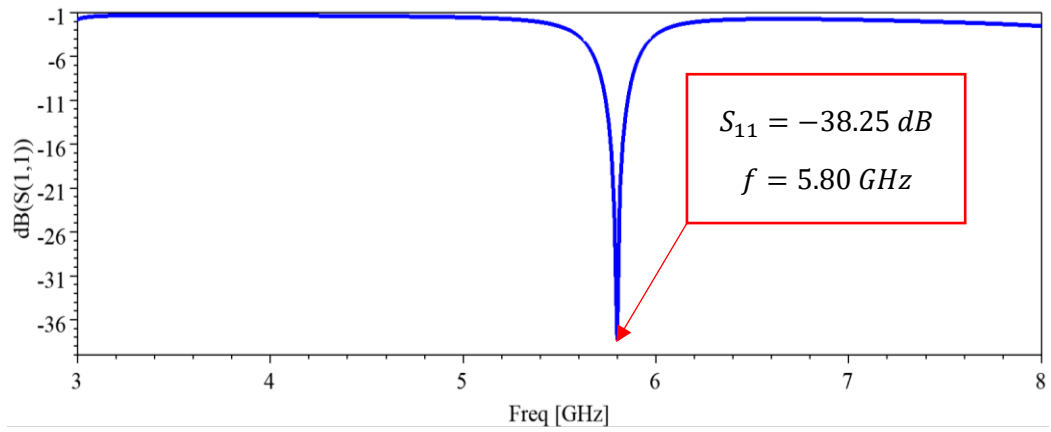


Figura 3.18 Pérdidas por retorno de la antena fractal con DGS

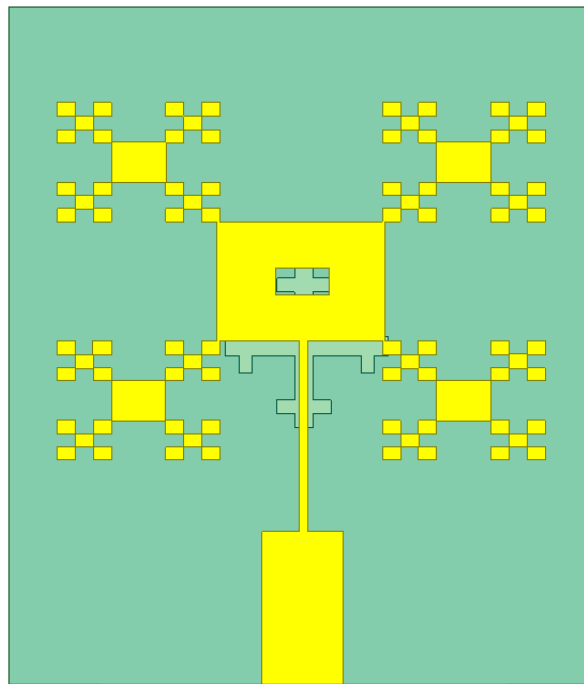


Figura 3. 19 Antena Fractal con DGS.

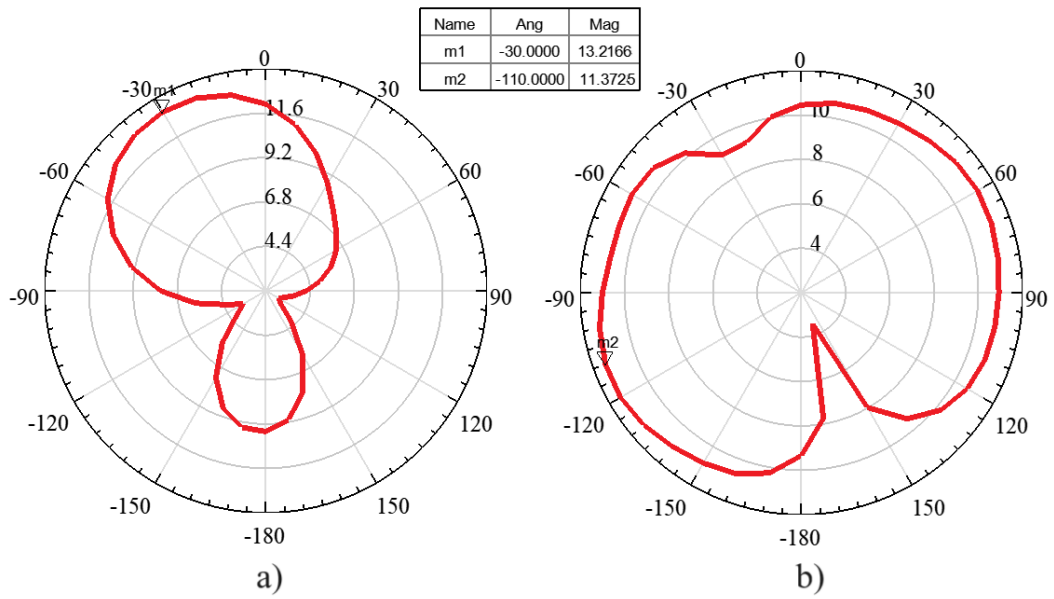


Figura 3.20 Patrón de radiación simulado de la antena 3.19 en (a) dirección polar  $\theta$ , (b) dirección azimutal  $\phi$ .

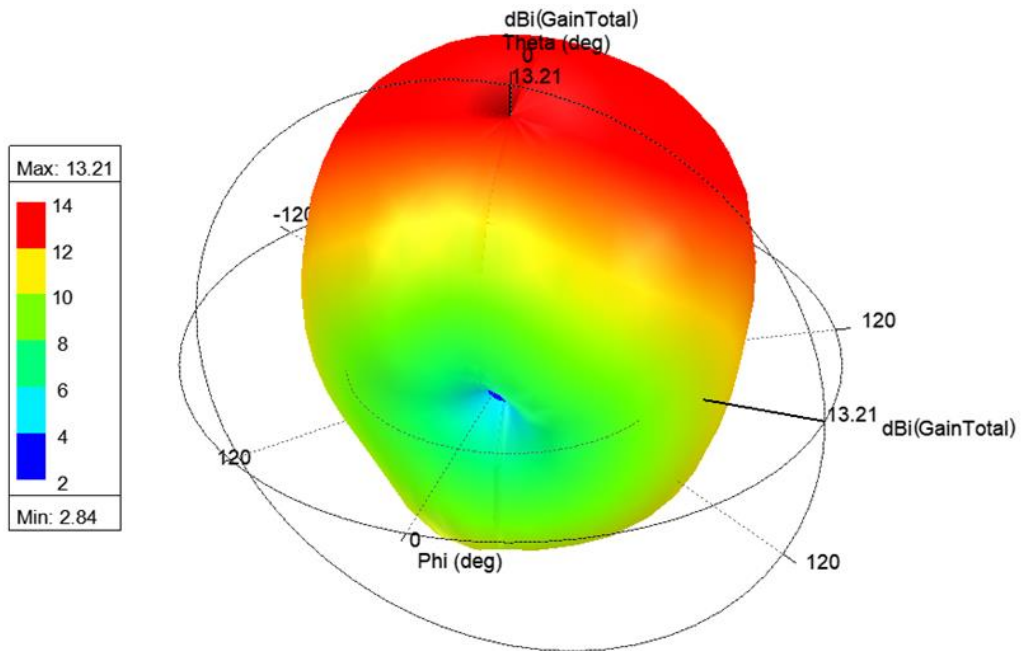


Figura 3.21 Ganancia total de la antena.



### 3.5 Fabricación

Debido a las dimensiones de la antena, es necesario utilizar un método de fabricación que sea preciso y accesible. El método convencional de grabado mediante circuito impreso presenta el inconveniente de perder calidad del fractal debido a su área: el grabado en cloruro férrico remueve la tinta antes de completar el patrón geométrico, provocando que se pierda el diseño propuesto en la figura 3.19. Un método que permite realizar grabados en PCB con precisión es utilizar una máquina de control numérico computarizado (CNC). En el Laboratorio de Caracterización de la Coordinación de Electrónica del INAOE, se encuentra disponible una CNC marca LPKF, modelo ProtoMat S100, con una precisión de 100  $\mu\text{m}$ .

A través del software DipTrace, se obtienen los archivos con extensión “grb” del modelo de la antena, que permiten llevar a cabo el grabado del circuito en la CNC.

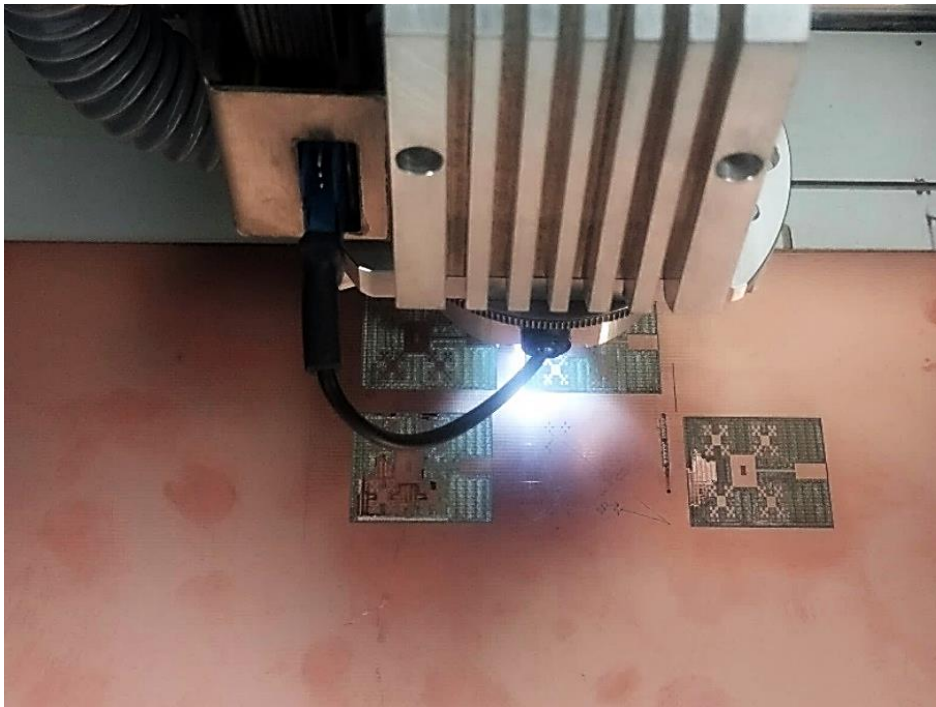


Figura 3.22 Fabricación en la CNC ProtoMat S100.

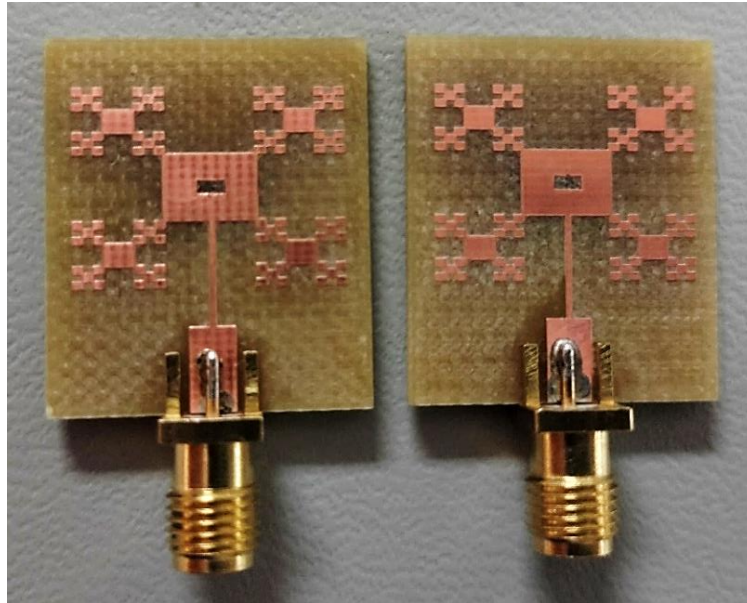


Figura 3.23 Antenas fabricadas.

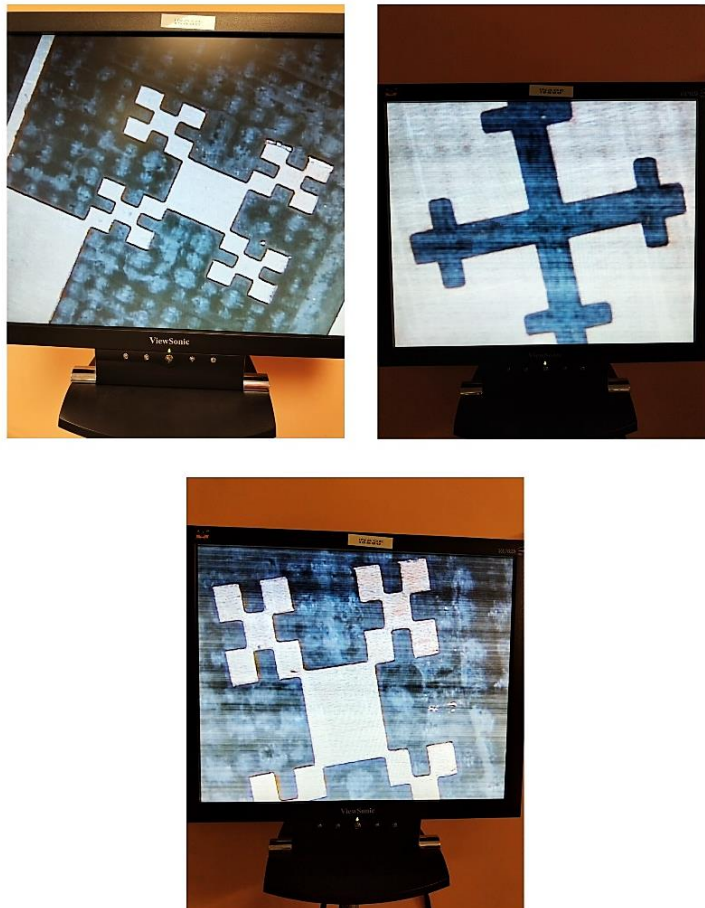


Figura 3.24 Resultados de la fabricación vistos a través del microscopio del Laboratorio de Altas Frecuencias del INAOE.

### **3.5.2 Conclusiones de fabricación**

Dada la complejidad del diseño, se requirieron cuatro lotes de fabricación, en cada uno se obtuvieron mejores resultados, sirviendo de ejemplo cada lote para acrecentar la calidad de la fabricación hasta llegar al resultado deseado. Si bien este proceso permite tener una mayor precisión en el fractal, es indispensable controlar la profundidad de la broca y elegir una adecuada para el contorno y desbastado. El nivel de la CNC juega un papel importante para lograr uniformidad en la fabricación, de lo contrario no será posible grabar la figura correctamente.

## 4. Resultados

### 4.1 Mediciones

Para corroborar los resultados de la simulación, se realizó la medición de las pérdidas por retorno en un analizador de redes vectoriales (VNA) del Laboratorio de Alta Frecuencia del INAOE. Este analizador es de la marca Anritsu, modelo MS4647A.

Haciendo uso de los dos canales del VNA, uno por antena, se realiza primero la calibración de cada puerto con un kit de calibración TOSLKF50A-40. Después se configura el canal para la medición, introduciendo los valores para el barrido de frecuencia (en este caso de 3.00 GHz a 8.00 GHz), IF Band de 100.00 Hz y número de pasos = 5000. Los resultados de esta medición se muestran en la Figura 4.2.

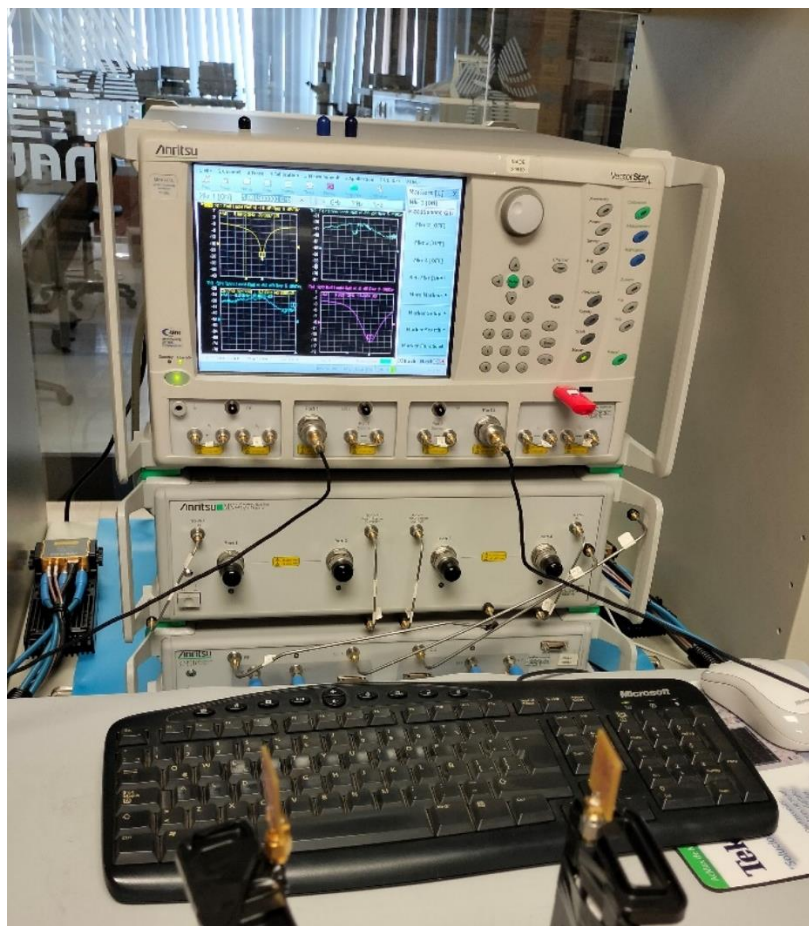


Figura 4.1 Medición de parámetros S con VNA MS4647A.

Tabla 11 Resultados de la medición.

Figura de mérito	Antena 1	Antena 2
$S_{11}$	-33.86 dB	-39.12 dB
Ancho de banda	130.40 MHz	127.30 MHz
Frecuencia	5.81 GHz	5.84 GHz

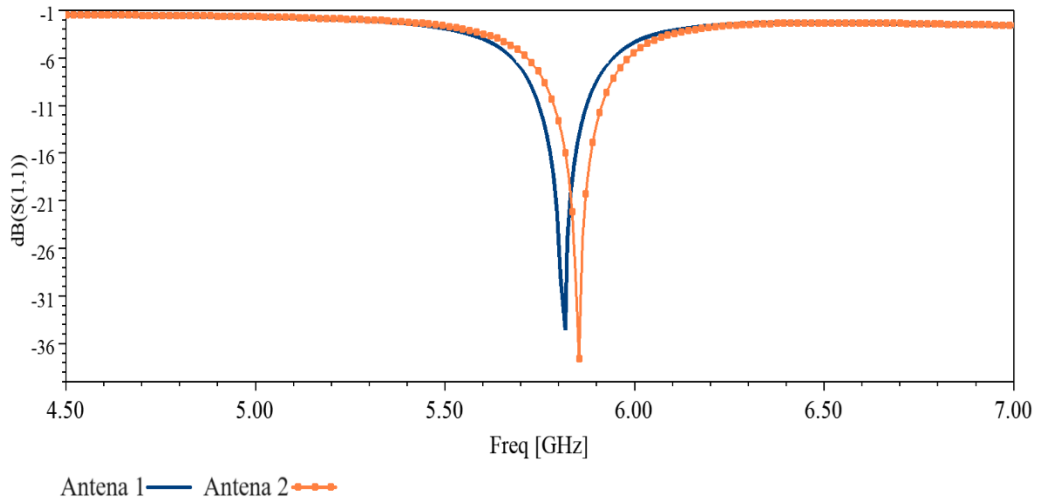


Figura 4.2 Pérdidas por retorno de las antenas fabricadas.

## 4.2 Caracterización de la antena

Una vez fabricadas las antenas, es necesario conocer su ganancia para así compararla con la respuesta simulada. Este parámetro se puede obtener a partir de los parámetros S, específicamente del parámetro  $S_{21}$ .

### 4.2.1 Medición del Patrón de radiación

Esta medición requiere de dos antenas eléctricamente parecidas, es decir, que sus parámetros S sean similares en la frecuencia requerida. Sin embargo, dada la complejidad de la estructura fractal, es complicado obtener dos antenas en estas condiciones, por este motivo se evaluaron dos antenas con respuesta diferida pero que mantuvieran las pérdidas por retorno y ancho de banda requeridos. Una antena operará como receptora (Antena Under Test, AUT) y la otra como transmisora. Deberán estar colocadas a una distancia  $d > R_2$ , donde

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

$R_2$  es la distancia de campo cercano.

$D$  es el tamaño de la antena.

$\lambda$  es la longitud de onda.

$d$  es la distancia donde comienza el campo lejano.

Para efectuar esta medición es necesario colocar la antena sobre un soporte que permita rotarla en la dirección polar ( $\theta$ ) y en la dirección azimutal ( $\phi$ ), como se muestra en la Figura 4.3. Estos soportes proporcionan 36 movimientos de 10 grados cada uno, por eje de rotación.

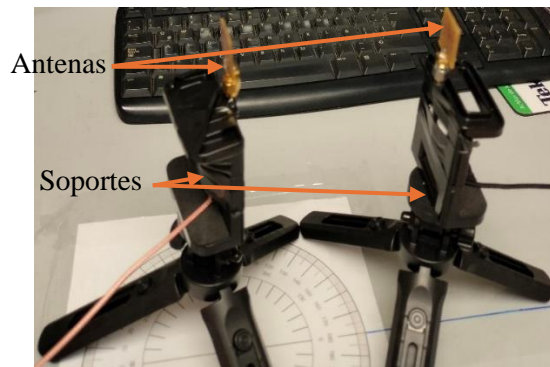


Figura 4.3 Antenas fabricadas colocadas en soporte.

Para realizar la medición de la coordenada azimutal, la antena AUT se rota sobre el eje vertical, de derecha a izquierda. Mientras que, para la coordenada polar, se rota sobre el eje horizontal en el mismo sentido, como lo muestra la Figura 4.4.

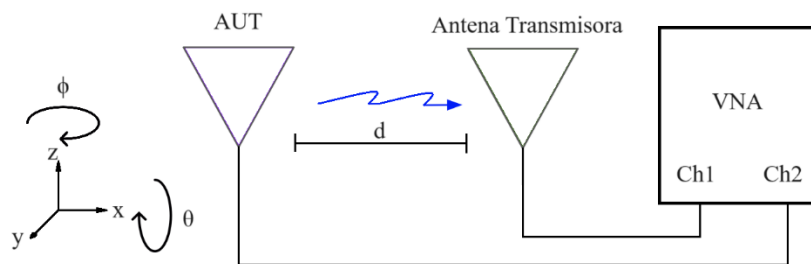


Figura 4.4 Diagrama para la medición del patrón de radiación.

Las mediciones se realizan en el VNA, guardando los parámetros S en cada movimiento hasta completar la rotación. Los resultados se muestran en la Figura 4.5.

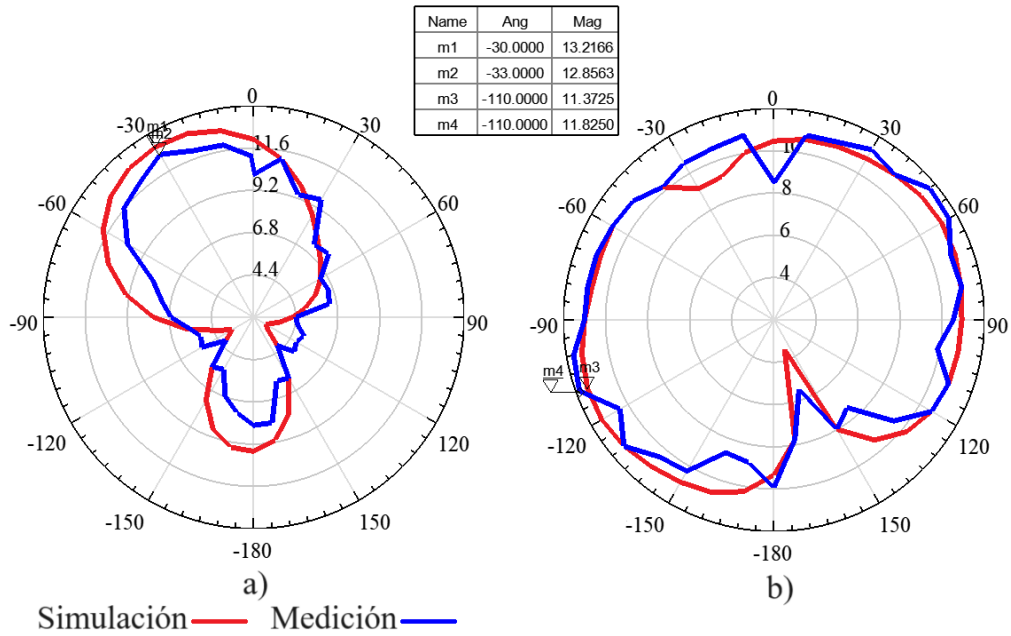


Figura 4.5 Comparación del patrón de radiación simulado y medido de la antena en (a) dirección polar  $\theta$ , (b) dirección azimutal  $\phi$ .

### 4.3 Comparación de resultados en simulación y fabricación

La tabla 12 muestra la comparación final de los resultados obtenidos de la fabricación y la simulación.

Tabla 12 Comparación de resultados.

Figura de mérito	Simulación	Fabricación	Diferencia
$ S_{11} $	-38.25 dB	-39.12 dB	-0.87 dB
Ancho de banda	132.00 MHz	127.30 MHz	4.70 MHz
Ganancia	13.21 dBi	12.85 dBi	0.36 dBi
Eficiencia	0.85	0.78	0.07
Directividad	15.50 dBi	16.44 dBi	0.06 dBi
Frecuencia	5.80 GHz	5.84 GHz	43.00 MHz

## 5. Conclusiones

La antena diseñada presenta una mejora significativa en sus parámetros de pérdidas por retorno, ancho de banda, ganancia y directividad, en comparación con la antena base. Si bien el fractal aumentó el ancho de banda, fue necesario realizar modificaciones en la estructura, obteniendo un fractal modificado que mejoró el ancho de banda a costa de modificar la frecuencia de resonancia. Para ello, la inclusión de una ranura fue la solución para ajustar el valor de frecuencia requerido en este trabajo. La estructura de tierra defectuosa mejoró la respuesta de la antena, a cambio de perder eficiencia. Esto se debe a que la ranura también produce radiación, aumentando el tamaño del lóbulo inferior del patrón de radiación.

La etapa de fabricación contempló la complejidad de la geometría de la antena, llevándose a cabo en una máquina CNC por la precisión requerida. Esta etapa permitió mejorar constructivamente la calidad de la antena a medida que se realizaba cada lote de fabricación, teniendo un resultado aceptable que se pudo comprobar en la etapa de simulación.

En la medición, fue donde se comprobaron los datos arrojados en la simulación, permitiendo hacer una comparación entre estos, concluyendo que eran muy parecidos y su diferencia es aceptable. Un parámetro que difirió en cada antena fabricada fue la frecuencia de resonancia, esto puede deberse al proceso de fabricación: las brocas de grabado, el sustrato, la nivelación de la máquina y el tamaño del fractal son factores que contribuyen a la calidad de fabricación. Por ello es indispensable explorar otras técnicas de presentación que permitan obtener un mejor grabado del diseño, como es el caso del grabado por fotolitografía. Sin embargo, la frecuencia de 5.80 GHz se encuentra dentro del ancho de banda en cada antena fabricada.

Finalmente, se concluye que este trabajo aporta al campo de las antenas una estructura de fractal modificado y ranura DGS en forma de cruz que mejora significativamente los parámetros de una antena de parche microstrip.



## **5.1 Trabajo futuro**

- Realizar un modelo eléctrico de la antena.
- Comprobar las dimensiones de la geometría fractal utilizando perfilometría.
- Explorar otros procesos de fabricación que proporcionen más precisión.

# Referencias

- [1] M. Somayya y R. R., «Internet of Things (IoT): A Literature review,» *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, pp. 164-173, 2015.
- [2] C. Balanis, *Antenna Theory*, Wiley, 2016.
- [3] Purelink, «Purelink Canada,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.purelink.ca/en/technologies/real-time-location-system.php>. [Último acceso: septiembre 2023].
- [4] K. Agarwal, «Review and Performance Analysis on Wireless Smart Home and Home Automation using IoT,» *IEEE*, pp. 629-633, 2019.
- [5] meShare, «Linkedin,» 14 junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/how-internet-things-enables-smart-homes-embracing-future-connected/>. [Último acceso: 28 abril 2024].
- [6] P. Sandonni, «Innovación Digital 360,» 01 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.innovaciondigital360.com/iot/smart-home-que-es-como-funciona-ejemplos-de-hogares-inteligentes-y-productos/>. [Último acceso: 3 mayo 2024].
- [7] G. Mobile, «Guinea,» 14 febrero 2022. [En línea]. Available: <https://guinea.pe/blog/arquitectura-iot/>. [Último acceso: 7 mayo 2024].
- [8] A. Barrios-Ulloa, «Modeling Radio Wave Propagation for Wireless Sensor Networks in Vegetated Environments: A Systematic Literature Review,» *Sensors*, vol. 52, n° 85, p. 28, 2022.
- [9] G. Kunal, «Softobotics,» 18 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.softobotics.com/blogs/seamless-integration-enhancing-your-smart-home-with-third-party-services/>. [Último acceso: 14 mayo 2024].
- [10] J. P. Boz, «Linkedin,» 19 agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/impact-ai-smart-homes-juan-pablo-boz/>. [Último acceso: 13 mayo 2024].
- [11] Tesy, «Tesy it's impressive,» 6 julio 2018. [En línea]. Available: <https://tesy.es/blog/ventajas-y-desventajas-hogar-inteligente>. [Último acceso: 14 mayo 2024].
- [12] «Fincamex Hogares Fuertes,» agosto 2023. [En línea]. Available: <https://fincamex.com.mx/2023/09/11/cual-es-el-precio-de-una-casa-inteligente-en-mexico-en-2023>. [Último acceso: 14 mayo 2024].
- [13] C. R. A. Inc, «C&T RF Antennas Inc,» 29 abril 2021. [En línea]. Available: <https://ctrfantennasinc.com/5-8ghz-wireless>. [Último acceso: 17 mayo 2024].

- [14] A. V., «Huawei,» 23 mayo 2023. [En línea]. Available: <https://forum.huawei.com/enterprise/es>. [Último acceso: 17 mayo 2024].
- [15] P. Bevelacqua, «Antenna Theory,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.antenna-theory.com/basics/whyantennasradiate.php>. [Último acceso: 19 mayo 2024].
- [16] J. S. S. Sumanpreet Kaur Sidhu, «Comparison of Different Types of Microstrip Patch Antennas,» *International Conference on Advancements in Engineering and Technology*, 2015.
- [17] H. Cheema, *Antenna-on-Chip: Design, Challenges, and Opportunities*, Artech, 2021.
- [18] «Antenna Test Lab,» 2023. [En línea]. Available: <https://antennatestlab.com/antenna-education-tutorials/return-loss-vswr-explained>. [Último acceso: 2024 junio 10].
- [19] R. Steven, «Polarización de Ondas Electromagnéticas,» Medium, 12 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://medium.com/@steven98.sr/polarizaci%C3%B3n-de-ondas-electromagn%C3%A9ticas>. [Último acceso: 25 Junio 2024].
- [20] EverythingRF, «EverythingRF,» 22 enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-axial-ratio-of-an-antenna>. [Último acceso: 10 junio 2024].
- [21] D. H. Schaubert, «A Review of Some Microstrip Antenna Characteristics,» *Electrical and computer engineering university of massachusetts*.
- [22] M. Zanh, «Polarization and conduction,» de *Electromagnetic Field Theory: A Problem Solving Approach*, vol. 3, 1979, pp. 140-146.
- [23] L. I. Williams, «Novel Bi-Polar Planar Near-Field Measurement Scanner at UCLA,» *IEEE*, 1991.
- [24] J. C. Rautio, «Measurement of Planar Substrate Uniaxial Anisotropy,» *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, vol. 57, n° 10, p. 2456, 2009.
- [25] M. Yogendrappa, «SIERRA CIRCUITS Proto Express,» 27 julio 2021. [En línea]. Available: <https://www.protoexpress.com/blog/why-fr4-material-in-pcb-fabrication/>. [Último acceso: 15 junio 2024].
- [26] B. I. J. y B. P., *Microstrip Antennas*, Dedham, MA: Artech House, 1980.
- [27] K. R. Carver y J. W. Mink, «Microstrip Antenna Technology,» *IEEE Trans. Antennas Propagat*, Vols. %1 de %2AP-29, n° 1, pp. 25-27, 1981.
- [28] P. B. Katehi y N. G. Alexopoulos, «On the Modeling of Electromagnetically Coupled Microstrip Antennas-The Printed Strip Dipole,» *IEEE Trans. Antennas Propagat*, Vols. %1 de %2AP-32, n° 11, pp. 1179-1186, 1984.
- [29] J. R. James y P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, London, UK: Peter Peregrinus, 1989.

- [30] D. M. Pozar, «Microstrip Antennas,» *IEEE*, vol. 80, nº 1, pp. 79-81, 1992.
- [31] C. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [32] E. O. Hammerstad, «Equations for Microstrip Circuit Design,» *Fifth European Microwave Conference*, pp. 268-272, 1975.
- [33] D. M. Pozar, «A Microstrip Antenna Aperture Coupled to a Microstrip Line,» *Electronic Letters*, vol. 21, pp. 49-50, 1985.
- [34] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Amherst: John Wiley & Sons, 2012.
- [35] B. Mandelbrot, *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*, Tusquets Editores, S.A., 1993.
- [36] G. R. Sánchez, «Fractales,» Universidad de Murcia, [En línea]. Available: [https://webs.um.es/jmz/DiseGrafSimula/alumnos\\_08\\_09/german\\_ros/index.files/](https://webs.um.es/jmz/DiseGrafSimula/alumnos_08_09/german_ros/index.files/). [Último acceso: 15 junio 2024].
- [37] D. L. Jaggard, «On Fractal Electrodynamics,» de *Recent Advances in Electromagnetic Theory*, New York, Springer-Verlag, 1990, pp. 183-224.
- [38] J. i. Argote, «mundo Fractal,» 06 abril 2013. [En línea]. Available: [http://www.asociacionceat.org/aw/2/dimension\\_fractal.htm](http://www.asociacionceat.org/aw/2/dimension_fractal.htm). [Último acceso: 16 junio 2024].
- [39] G. d. I. e. S. Inteligentes, «UNAM Cuautitlan Virtual,» [En línea]. Available: [https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/?page\\_id=43](https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/?page_id=43). [Último acceso: 16 junio 2024].
- [40] S. d. C. R. d. S. Simone Semmer, «Fractais, contextualização de matemática e arte,» *Espacios*, vol. 36, nº 8, p. 10, 2015.
- [41] M. Rusu y R. Baican, «Fractal Antenna Applications,» de *Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications*, IntechOpen, 2010, pp. 351-382.
- [42] N. Rao y V. D. Kumar, «Miniaturization of microstrip patch antenna for satellite communication: A novel fractal geometry approach,» *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 97, nº 3, p. 3673–3683, 2017.
- [43] M. Elhabchi y M. Nabil, «Una antena de metamaterial fractal para aplicaciones Bluetooth, WLAN, WiMAX y banda X,» *IEEE*, pp. 1-2.
- [44] K. Kavitha y J. Ananthi, «Miniaturised Circularly Polarised Koch Fractal Antenna with Rotated Fractal Slot for RFID Applications,» *IEEE*, p. 4, 2018.
- [45] S. Elumalai y V. R., «Compact slot loaded Koch fractal microstrip patch antenna,» *IEEE*, pp. 1-2.

- [46] L.-n. Wang y S. Li, «Multiband printed monopole antenna with square-nested fractal,» *IEEE*, pp. 1-2, 2011.
- [47] M. K. Khandelwal, «Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends,» *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-2, 2017.
- [48] D. Guha y S. Biswas, «Printed Antenna Designs Using Defected Ground Structures: A Review of Fundamentals and State-of-the-Art Developments,» *Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT)*, p. 2.
- [49] G. Breed, «An Introduction to Defected Ground Structures in Microstrip Circuits,» *High Frequency Electronics*, pp. 50-51, 2008.
- [50] D. S. Salgare, «A Review of Defected Ground Structure for Microstrip Antennas,» *IRJET International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, n° 06, 2015.
- [51] K. B. Ismail, «Fractal antenna with electromagnetic band gap (EBG) structure for wireless application,» *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNESTAT)*, 2015.
- [52] T. Mondal, S. Suman y S. Singh, «Novel design of fern fractal based triangular patch antenna,» *National Conference on Emerging Trends on Sustainable Technology and Engineering Applications (NCETSTEA)*, 2020.
- [53] K. Ismail y K. A. Anis, «Sierpinski Gasket fractal antenna with ring-shape defected ground structure for RFID application,» *2nd International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment*, 2014.
- [54] D. Selvaraj y L. Chandrasekar, «Design of Fractal Antenna with Modified Sierpinski Carpet for WiMAX Applications,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2018.
- [55] D. o. a. p. a. a. b. o. S. c. f. elements, «S. C. Patrício; M. Carleti; Arismar Cerqueira S.,» *International Conference on Microwave and Optoelectronics (IMOC)*, pp. 1-6, 2015.
- [56] H. B. Zhang, Z. L. Zhou, L. Wang y D. M. Li, «A Novel Compact Multi-Band Fractal Antenna with RCS Reduced,» *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, pp. 1-3, 2018.
- [57] H. Yang, «An Ultra-Wideband Microstrip Antenna Based on Koch Fractal Resonance Unit and CSRRs Defective Ground Unit,» *IEEE*, n° 9, pp. 1-2, 2020.
- [58] A. HFSS, «Module 6: HFSS Lumped and Wave Port Basics,» 2020.
- [59] S. Malathi, S. Pradhan y K. Srinivasa Naik, «Modified Sierpinski Gasket Monopole Fractal Antenna for Sub 6 GHz 5G Applications,» *Smart and Sustainable*

*Technologies: Rural and Tribal Development Using IoT and Cloud Computing. Advances in Sustainability Science and Technology*, pp. 1-4, 2022.

- [60] S. Gujral y N. Gupta, «Bandwidth Enhancement of Cross-Shaped Fractal Antenna Using Lanthanum Doped Ba-Sr Hexagonal Ferrite As Substrate Material For X-Band Applications,» *Research Square*, pp. 3-12, 2021.
- [61] B. Sugumaran y R. Balasubramanian, «Design and Analysis of Fractal Based Monopole Antenna Backed with Modified Jerusalem Cross Frequency Selective Surface for Wireless Personal Area Communications,» *Mobile Netw Appl* , vol. 25, p. 2092–2101, 2020.
- [62] V. M. Naik y A. P. Rao, «Design and Analysis of Fractal Antenna Geometry for Wideband Applications,» *ICETE*, pp. 836-844, 2023.
- [63] D. M. Pozar, «Microstrip Antennas,» *IEEE*, vol. 80, n° 1, pp. 79-81, 1992.