



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES**  
**Y REDES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA FRACTAL A**  
**2.4 GHz UTILIZANDO TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA**  
**DISPOSITIVOS PORTABLES”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**TIPO: PROPUESTA TECNOLÓGICA**

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y**  
**REDES**

**AUTORA: VALERIA KATHERINE HERNÁNDEZ AMBATO**

**TUTOR: Ing. HUGO OSWALDO MORENO AVILÉS. PhD**

Riobamba – Ecuador

2019

**©2019, Valeria Katherine Hernández Ambato**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, VALERIA KATHERINE HERNÁNDEZ AMBATO, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 03 de julio de 2019

**Valeria Katherine Hernández Ambato**

**060410632-8**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES  
Y REDES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo Propuesta Tecnológica **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA FRACTAL A 2.4 GHz UTILIZANDO TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA DISPOSITIVOS PORTABLES**, realizado por la señorita **VALERIA KATHERINE HERNÁNDEZ AMBATO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación. El mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Dr. Washington Luna

**DECANO DE LA FACULTAD DE  
INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Patricio Romero

**DIRECTOR DE LA ESCUELA DE  
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
TELECOMUNICACIONES Y REDES**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Hugo Moreno Avilés, PhD.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Jefferson Ribadeneira, PhD

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación en primer lugar a mi padre del cielo y a la virgen María por haber bendecido mi ser hasta cumplir esta meta. A mis amados padres Jorge Eduardo y Martha Fabiola por haber inculcado en mí sus principios y valores. En especial a mi madre por enseñarme con su ejemplo a ser una mujer fuerte e independiente. A mis hermanos Jorge Luis, Catalina y Diana por que aun si no se lo imaginan son mi inspiración para formarme como excelente profesional al igual que ellos. A mis queridos sobrinos Paula, Victoria y Samuel porque son mi motivación para siempre intentar ser la mejor versión de mí y de esta manera poder guiar y apoyar sus vidas. A mis amigos y familiares que formaron parte de esta etapa de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi padre del cielo y a la virgen María por la fortaleza, inteligencia y paciencia que me han concedido para superar cada obstáculo y disfrutar cada momento a lo largo de mis estudios.

A la querida Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la cual he podido formarme como profesional y la cual se ha convertido en estos años en mi segundo hogar. A todos los docentes y administrativos que compartieron conmigo sus conocimientos y consejos.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis, Ing. Hugo Moreno; quien con su conocimiento y guía contribuyó de manera significativa al desarrollo de este trabajo de titulación.

Agradezco a mis amados padres y hermanos por su apoyo moral y económico que me permitieron terminar de la mejor manera esta etapa de mi vida. A mis amigos y familiares por el apoyo que me brindaron en el transcurso de mi carrera universitaria.

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1

## CAPITULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Introducción.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. Fundamentos de antenas.....</b>	<b>6</b>
<i>1.2.1. Definición de antena.....</i>	<i>6</i>
<i>1.2.1.1. Principio de reciprocidad.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.2. Parámetros de una antena.....</i>	<i>7</i>
<i>1.2.2.1. Densidad de potencia radiada.....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.2.2. Intensidad de radiación.....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.2.3. Directividad.....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.2.4. Ganancia.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2.5. Impedancia.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2.6. Ancho de banda.....</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.7. Relación de onda estacionaria.....</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.8. Parámetros de dispersión.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2.2.9. Patrón de radiación.....</i>	<i>11</i>
<b>1.2.3. Tipos de antenas.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Tecnología Microstrip.....</b>	<b>15</b>
<i>1.3.1. Líneas microstrip.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.1.1. Tipos de ondas en líneas microstrip.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.2. Antenas microstrip.....</i>	<i>16</i>
<i>1.3.2.1. Características de una antena microstrip.....</i>	<i>16</i>
<i>1.3.2.2. Diseños de parche microstrip.....</i>	<i>17</i>
<i>1.3.2.3. Patrón de radiación de una antena microstrip.....</i>	<i>17</i>

1.3.2.4.	<i>Modos de alimentación para antena microstrip</i> .....	19
1.3.2.5.	<i>Material para antenas microstrip</i> .....	21
1.3.2.6.	<i>Aplicaciones de antenas microstrip</i> .....	22
1.3.3.	<b><i>Ventajas y desventajas de microstrip</i></b> .....	22
1.4.	<b>Geometría Fractal</b> .....	23
1.4.1.	<b>Definición</b> .....	23
1.4.1.1.	<i>Autosimilitud</i> .....	24
1.4.1.2.	<i>Dimensión fractal</i> .....	24
1.4.2.	<b>Clasificación de fractales</b> .....	24
1.4.3.	<b>Antenas fractales</b> .....	25
1.4.3.1.	<i>Diseños de antenas fractales</i> .....	26
1.4.3.2.	<i>Aplicación de antenas fractales</i> .....	27
1.5.	<b>Frecuencia de Operación</b> .....	27
1.5.1.	<b>Servicios inalámbricos a frecuencia de 2.4 GHz</b> .....	27
1.5.1.1.	<i>IEEE 802.11</i> .....	27
1.5.1.2.	<i>Bluetooth</i> .....	28

## CAPITULO II

2.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	29
2.1.	<b>Introducción</b> .....	29
2.2.	<b>Diseño del parche fractal microstrip</b> .....	30
2.2.1.	<b>Métodos de análisis de antenas microstrip</b> .....	30
2.2.1.1.	<i>Modelo de la línea de transmisión</i> .....	31
2.2.2.	<b>Diseño de antena microstrip a 2.4 GHz</b> .....	32
2.2.2.1.	<i>Elección del material sustrato</i> .....	32
2.2.2.2.	<i>Dimensionamiento de antena microstrip a 2.4 GHz</i> .....	33
2.2.3.	<b>Técnicas de miniaturización de antenas microstrip</b> .....	36
2.2.3.1.	<i>Miniaturización por ranura en el parche</i> .....	36
2.2.3.2.	<i>Miniaturización por forma del parche</i> .....	37
2.2.4.	<b>Diseño del parche fractal microstrip miniaturizado</b> .....	38
2.2.4.1.	<i>Dimensionamiento del parche con diseño fractal de Cesareo</i> .....	39
2.2.4.2.	<i>Dimensionamiento del parche con diseño fractal del T-cuadrado</i> .....	40
2.3.	<b>Simulación de antena fractal microstrip a 2.4 GHz</b> .....	42
2.3.1.	<i>Especificación del material sustrato</i> .....	43
2.3.2.	<i>Especificación de los parámetros de simulación</i> .....	43
2.3.3.	<i>Construcción del diseño de la antena fractal microstrip</i> .....	45



2.3.3.1.	<i>Antena microstrip a 2.4 GHz.....</i>	45
2.3.3.2.	<i>Primera iteración de antena fractal microstrip a 2.4 GHz.....</i>	47
2.3.3.3.	<i>Primera iteración de antena fractal microstrip a 2.4 GHz con ranura .....</i>	48
2.3.3.4.	<i>Segunda iteración de antena fractal microstrip a 2.4 GHz .....</i>	49
2.3.4.	<b><i>Optimización del diseño de la antena fractal microstrip a 2.4 GHz.....</i></b>	51
2.4.	<b>Implementación de antena fractal microstrip miniaturizada a 2.4 GHz.....</b>	52
2.4.1.	<b><i>Fabricación de la antena fractal microstrip .....</i></b>	52
2.4.1.1.	<i>CNC Router.....</i>	53
2.4.2.	<b><i>Encapsulamiento de la antena en un prototipo de estructura de smartwatch.....</i></b>	54
2.5.	<b>Evaluación de funcionamiento de la antena .....</b>	55
2.5.1.	<b><i>Protocolo del diseño experimental para pruebas y mediciones .....</i></b>	55
2.5.1.1.	<i>Materiales utilizados .....</i>	56
2.5.1.2.	<i>Procedimiento .....</i>	56
2.5.2.	<b><i>Equipos utilizados para la evaluación del funcionamiento de la antena .....</i></b>	57
2.5.2.1.	<i>Generador de Señales Anritsu MG3690C .....</i>	57
2.5.2.2.	<i>Analizador de Espectros Anritsu MS2427C.....</i>	57
2.5.3.	<b><i>Escenario para la evaluación del funcionamiento de la antena.....</i></b>	58

### **CAPITULO III**

3.	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	60
3.1.	<b>Introducción.....</b>	60
3.2.	<b>Resultados de la etapa de diseño del parche fractal miniaturizado .....</b>	60
3.3.	<b>Resultados de la etapa de simulación de la antena optimizada .....</b>	61
3.4.	<b>Resultado del encapsulamiento de la antena en el prototipo.....</b>	64
3.5.	<b>Resultado de las medidas de laboratorio con la antena implementada .....</b>	65
3.6.	<b>Discusión de resultados .....</b>	71

<b>CONCLUSIONES.....</b>	77
--------------------------	----

<b>RECOMENDACIONES.....</b>	79
-----------------------------	----

### **GLOSARIO**

### **BIBLIOGRAFÍA**

### **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1.</b>	Tipos de antenas.....	14
<b>Tabla 2-1.</b>	Modos de alimentación Microstrip.....	20
<b>Tabla 3-1.</b>	Ventajas y Desventajas de Microstrip.....	22
<b>Tabla 4-1.</b>	Diseños conocidos de antenas fractales.....	26
<b>Tabla 5-1.</b>	Servicios inalámbricos a 2.4 GHz.....	28
<b>Tabla 1-2.</b>	Propiedades del material RO4003C.....	33
<b>Tabla 2-2.</b>	Datos para el dimensionamiento de la antena.....	33
<b>Tabla 3-2.</b>	Dimensionamiento de la antena microstrip a 2.4 GHz.....	46
<b>Tabla 4-2.</b>	Dimensionamiento de la antena fractal microstrip a 2.4 GHz primera iteración.....	48
<b>Tabla 5-2.</b>	Dimensionamiento de la antena fractal microstrip con ranura.....	48
<b>Tabla 6-2.</b>	Dimensionamiento de la antena fractal con segunda iteración.....	50
<b>Tabla 7-2.</b>	Dimensionamiento de la antena microstrip miniaturiza.....	51
<b>Tabla 1-3.</b>	Porcentaje de miniaturización del parche.....	60
<b>Tabla 2-3.</b>	Porcentaje de miniaturización del total de la antena.....	61
<b>Tabla 3-3.</b>	Comparación entre smartwatch funcional y prototipo.....	64
<b>Tabla 4-3.</b>	Niveles de potencia recibida de 2.2 a 2.6 GHz.....	66
<b>Tabla 5-3.</b>	Niveles de potencia recibida en $\theta = 90^\circ$ cuando $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ y $270^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ .....	68
<b>Tabla 6-3.</b>	Niveles de potencia recibida en $\varphi = 0^\circ$ cuando $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ .....	69
<b>Tabla 7-3.</b>	Niveles de ganancia de la antena fractal microstrip.....	70
<b>Tabla 8-3.</b>	Comparación del diagrama de radiación simulado y medido en el Plano E.....	74
<b>Tabla 9-3.</b>	Comparación del diagrama de radiación simulado y medido en el Plano H.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1.</b>	Esquema de un sistema de comunicación inalámbrico. ....	7
<b>Figura 2-1.</b>	Diagrama de radiación 2D.....	12
<b>Figura 3-1.</b>	Lóbulos de un patrón de radiación. ....	13
<b>Figura 4-1.</b>	Patrón de radiación, (a) Isotrópico, (b) Omnidireccional, (c) Directivo.....	13
<b>Figura 5-1.</b>	Antena microstrip, (a) Estructura de la antena, (b) Vista lateral de la antena....	16
<b>Figura 6-1.</b>	Diseños de parche microstrip. ....	17
<b>Figura 7-1.</b>	Campo eléctrico y distribución de corrientes para el modo $TM_{10}$ .....	18
<b>Figura 8-1.</b>	Direcciones de radiación en un parche microstrip. ....	18
<b>Figura 9-1.</b>	Patrón de radiación de una antena microstrip. (a) Plano E, (b) Plano H. ....	18
<b>Figura 10-1.</b>	Material RO4000®. ....	21
<b>Figura 11-1.</b>	Fractales de la naturaleza: (a) Copo de nieve, (b) Pulmones humanos. ....	23
<b>Figura 12-1.</b>	Proceso de generación iterativo: (a) Isla de Minkowski, (b) Lazo de Koch.....	25
<b>Figura 1-2.</b>	Categorías de los métodos de análisis de antenas microstrip. ....	30
<b>Figura 2-2.</b>	Modelo de la línea de transmisión. ....	31
<b>Figura 3-2.</b>	Efecto fringing en los bordes de antena. ....	31
<b>Figura 4-2.</b>	Antena de parche cuadrado microstrip a 2.4 GHz. ....	35
<b>Figura 5-2.</b>	Técnicas de miniaturización de antenas microstrip. ....	36
<b>Figura 6-2.</b>	Tipos de ranuras para miniaturización. ....	37
<b>Figura 7-2.</b>	Geometrías fractales para parche. ....	37
<b>Figura 8-2.</b>	Parche original a 2.4 GHz. ....	38
<b>Figura 9-2.</b>	Fractal de Cesareo con cuatro iteraciones. ....	39
<b>Figura 10-2.</b>	Primera iteración del fractal de Cesarea. ....	39
<b>Figura 11-2.</b>	Segunda iteración del fractal de Cesarea. ....	40
<b>Figura 12-2.</b>	Fractal del T-cuadrado con cuatro iteraciones.....	40
<b>Figura 13-2.</b>	Primera iteración del fractal del T-cuadrado. ....	41
<b>Figura 14-2.</b>	Segunda iteración del fractal del T-cuadrado. ....	41
<b>Figura 15-2.</b>	Proceso de optimización por simulación. ....	42
<b>Figura 16-2.</b>	Icono de Ansoft Designer. ....	42
<b>Figura 17-2.</b>	Configuración por defecto del material dieléctrico. ....	43
<b>Figura 18-2.</b>	Configuración para el material RO4003C. ....	43
<b>Figura 19-2.</b>	Configuración de Setup a 2.4 GHz. ....	44
<b>Figura 20-2.</b>	Sweep de frecuencias de 1.9 a 2.9 GHz. ....	44
<b>Figura 21-2.</b>	Sweep de frecuencia a 2.4 GHz. ....	45

<b>Figura 22-2.</b>	Antena microstrip a 2.4 GHz. ....	46
<b>Figura 23-2.</b>	Parámetro S de antena microstrip a 2.4 GHz. ....	47
<b>Figura 24-2.</b>	Antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la primera iteración. ....	47
<b>Figura 25-2.</b>	Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la primera iteración. ....	48
<b>Figura 26-2.</b>	Antena fractal microstrip a 2.4 GHz con ranura. ....	49
<b>Figura 27-2.</b>	Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz con ranura. ....	49
<b>Figura 28-2.</b>	Antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la segunda iteración. ....	50
<b>Figura 29-2.</b>	Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la segunda iteración. ....	50
<b>Figura 30-2.</b>	Antena fractal microstrip a 2.4 GHz optimizada. ....	51
<b>Figura 31-2.</b>	Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz optimizada. ....	52
<b>Figura 32-2.</b>	Diseño de antena fractal microstrip en Gerber. ....	53
<b>Figura 33-2.</b>	Maquina CNC utilizada para fabricación. ....	53
<b>Figura 34-2.</b>	Antenas fractal microstrip a 2.4 GHz fabricadas. ....	54
<b>Figura 35-2.</b>	Medidas de smartwatch prototipo. ....	55
<b>Figura 36-2.</b>	Medidas de smartwatch real. ....	55
<b>Figura 37-2.</b>	Prototipo de estructura de smartwatch con antena fractal microstrip. ....	55
<b>Figura 38-2.</b>	Antena implementada para pruebas. ....	56
<b>Figura 39-2.</b>	Generador de señales Anritsu MG3690C. ....	57
<b>Figura 40-2.</b>	Analizador de espectros Anritsu MS2724C. ....	58
<b>Figura 41-2.</b>	Esquema del escenario para pruebas y mediciones. ....	59
<b>Figura 42-2.</b>	Escenario para mediciones de campo radiado. (a) Plano E, (b) Plano H. ....	59
<b>Figura 1-3.</b>	Proceso de análisis de resultados. ....	60
<b>Figura 2-3.</b>	Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz optimizada. ....	61
<b>Figura 3-3.</b>	Parámetro ROE de antena fractal microstrip a 2.4 GHz optimizada. ....	62
<b>Figura 4-3.</b>	Frecuencias con el parámetro VSWR igual a 2 dB. ....	62
<b>Figura 5-3.</b>	Patrón de radiación en frecuencia de 2.4 GHz. ....	63
<b>Figura 6-3.</b>	Diagrama de ganancia aceptada en frecuencia de 2.4 GHz. ....	64
<b>Figura 7-3.</b>	Nivel de potencia recibida en la antena fractal microstrip a 2.4 GHz. ....	65
<b>Figura 8-3.</b>	Barrido de frecuencias dentro del span de 400 MHz. ....	66
<b>Figura 9-3.</b>	Nivel de potencia recibida en la antena fractal microstrip a 2.41 GHz. ....	67
<b>Figura 10-3.</b>	Plano E patrón de radiación medido de la antena fractal microstrip a 2.41 GHz. ....	68
<b>Figura 11-3.</b>	Plano H del patrón de radiación medido de la antena fractal a 2.41 GHz. ....	69
<b>Figura 12-3.</b>	Ganancia medida de la antena fractal microstrip a 2.41 GHz. ....	70

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3.</b>	Comparación de porcentaje de miniaturización del parche fractal microstrip....	71
<b>Gráfico 2-3.</b>	Comparación de la dimensión máxima entre antenas.....	72
<b>Gráfico 3-3.</b>	Tamaño de smartwatch vs antena implementada.....	72
<b>Gráfico 4-3.</b>	Ancho de banda simulado vs medido en 2.40 GHz.....	73
<b>Gráfico 5-3.</b>	Ancho de banda medido en 2.40 GHz vs 2.41 GHz.....	73
<b>Gráfico 6-3.</b>	Ganancia simulada en 2.40 GHz vs medida en 2.41 GHz.....	76

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-1.</b> Densidad de potencia.....	8
<b>Ecuación 2-1.</b> Intensidad de radiación.....	8
<b>Ecuación 3-1.</b> Densidad de potencia isotrópica.....	9
<b>Ecuación 4-1.</b> Directividad.....	9
<b>Ecuación 5-1.</b> Ganancia.....	9
<b>Ecuación 6-1.</b> Impedancia.....	10
<b>Ecuación 7-1.</b> Ancho de Banda.....	10
<b>Ecuación 8-1.</b> ROE.....	10
<b>Ecuación 9-1.</b> Parámetro S11.....	11
<b>Ecuación 10-1.</b> Campo radiado para el plano E.....	19
<b>Ecuación 11-1.</b> Campo radiado para el plano H.....	19
<b>Ecuación 12-1.</b> Dimensión fractal.....	24
<b>Ecuación 1-2.</b> Longitud de onda.....	33
<b>Ecuación 2-2.</b> Ancho del parche.....	34
<b>Ecuación 3-2.</b> Constante dieléctrica efectiva.....	34
<b>Ecuación 4-2.</b> Longitud efectiva del parche.....	34
<b>Ecuación 5-2.</b> Longitud del sustrato.....	34
<b>Ecuación 6-2.</b> Longitud real del parche.....	35
<b>Ecuación 7-2.</b> Distancia mínima para Far Field.....	58
<b>Ecuación 1-3.</b> Ancho de banda en simulación.....	63
<b>Ecuación 2-3.</b> Ancho de banda en 2.4 GHz.....	65
<b>Ecuación 2-3.</b> Ancho de banda en 2.41 GHz.....	67

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** ADAPTACION DE LA ANTENA FRACTAL MICROSTRIP PARA PRUEBAS

**ANEXO B:** CONEXIÓN DE EQUIPOS Y ESCENARIO

**ANEXO C:** PRUEBAS Y MEDICIONES CON LA ANTENA IMPLEMENTADA

**ANEXO D:** DATASHEET DEL MATERIAL

**ANEXO E:** DATASHEET DE EQUIPOS

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realizó el diseño e implementación de una antena fractal microstrip miniaturizada con frecuencia de operación a 2.4 GHz para su aplicación en dispositivos portables. La antena se desarrolló aplicando la metodología de diseño de antenas microstrip que depende de la frecuencia de operación y del material sustrato. El material utilizado es RO4003C con permitividad dieléctrica  $\epsilon_r = 3.38$  y espesor  $h = 0.254$  mm. Se emplearon los métodos de Cesareo y T-Cuadrado como propuestas para la forma fractal del parche de la antena. Después de comparar el porcentaje de miniaturización en cada caso, se eligió el diseño fractal del T-Cuadrado para la etapa de optimización debido a una mejor reducción del espacio utilizado. La optimización del diseño de la antena fractal fue realizada mediante simulaciones aplicando los conceptos del método de análisis de antenas microstrip según el modelo de la línea de transmisión y las técnicas de miniaturización por la forma y ranura en el parche. Se fabricaron dos ejemplares de la antena optimizada destinados a funcionar como antena transmisora y receptora. Para las pruebas de validación se especificó un protocolo de caracterización de las antenas. Las mediciones se realizaron con la antena transmisora y receptora separadas a 15 cm de distancia con potencia de entrada de 15 dBm. La aplicación del diseño fractal del T-Cuadrado permitió obtener el 46,65% de miniaturización del tamaño del parche con respecto a la forma original. La optimización del diseño por medio de simulaciones favoreció la miniaturización general de la antena en un 62,2% con respecto a la antena microstrip inicial. Los resultados de medición muestran que la antena posee una ganancia de 18,4 dBm cuando  $\theta = 90^\circ$ . Se concluye que la antena fractal microstrip implementada funciona de acuerdo con los requerimientos planteados de diseño.

**Palabras clave:** <TELECOMUNICACIONES>, <ANTENAS>, <MICROSTRIP>, <FRACTAL>, <MINIATURIZACIÓN>, <PARÁMETROS>, <DIAGRAMA DE RADIACIÓN>, <GANANCIA>.



## SUMMARY

The design and implementation of a miniaturized microstrip fractal antenna with operating frequency at 2.4 GHz for its application in portable devices were carried out in this titling work. The antenna was developed applying the microstrip antenna design methodology that depends on the frequency of operation and the substrate material. The material used is RO4003C with dielectric permittivity  $\epsilon_r = 3.38$  and thickness  $h = 0.254$  mm. The methods of Cesareo and T-Squared were used as proposals for the fractal shape of the antenna patch. After comparing the percentage of miniaturization in each case, the fractal design of the T-Squared was chosen for the optimization stage due to a better reduction of the space used. The optimization of the design of the fractal antenna was carried out through simulations applying the concepts of the microstrip antenna analysis method according to the model of the transmission line and the miniaturization techniques by the shape and slot in the patch. Two specimens of the optimized antenna were manufactured to function as a transmitting and receiving antenna. For the validation tests, a protocol for the characterization of the antennas was specified. The measurements were made with the transmitting and receiving antenna separated at 15 cm distance with an input power of 15 dBm. Concerning the original form, the application of the fractal design of the T-square allowed obtaining 46.65% of miniaturization of the size of the patch. The optimization of the model using simulations favored the general miniaturization of the antenna in 62.2% for the original microstrip antenna. The measurement results show that the antenna has a gain of 18.4 dBm when  $\theta = 90^\circ$ . It is concluded that the microstrip fractal antenna implemented works following the design requirements.

**Keywords:** <TELECOMMUNICATIONS>, <ANTENNAS>, <MICROSTRIP>, <FRACTAL>, <MINIATURIZATION>, <S PARAMETER>, <RADIATION DIAGRAM>, <GAIN>.

## **INTRODUCCIÓN**

Los sistemas de comunicación inalámbrica permiten una comunicación entre dos estaciones separadas sin necesidad de estar conectadas por un medio guiado o cable. El sistema de comunicación está conformado por el canal de transmisión o espacio libre también de los sistemas de transmisión y recepción. La comunicación inalámbrica es posible con la utilización de antenas en cada uno de estos sistemas y es uno de los elementos de alta importancia.

Las especificaciones, características del diseño y tipo de antena permiten establecer las expectativas del funcionamiento de un sistema. La calidad de señal emitida y recibida está relacionada con la capacidad de las antenas, dependiendo de la ganancia y parámetros S que posea la antena. Es necesario también tener claro que la calidad o eficiencia de la comunicación inalámbrica depende del comportamiento y calidad del canal de transmisión.

La aplicación de una metodología de diseño de antenas garantiza o ayuda en el correcto diseño e implementación de antenas que funcionen con eficiencia dentro de los parámetros necesarios para generar una buena comunicación. Al contrario de esto si el diseño no es apropiado puede afectar de forma directa al rendimiento o funcionamiento general de todo el sistema de comunicación.

El tamaño de la antena está relacionado con la frecuencia de operación del sistema de comunicación. A frecuencias bajas el tamaño es mayor y viceversa. Los dispositivos portables tienen acceso a servicios como celular, wifi y bluetooth. Los dos últimos mencionados pueden operar a frecuencia de 2.4 GHz, siendo una frecuencia alta, se considera que el tamaño de las antenas será pequeño. El espacio disponible de los dispositivos portables es muy reducido por lo que se necesita optimizar el diseño de las antenas haciendo referencia al tamaño.

El presente trabajo de titulación pretende alcanzar un diseño de antena lo más pequeño posible mediante la aplicación de la geometría fractal y los beneficios aportados por las características del sustrato elegido para el diseño e implementación de una antena para dispositivos portables.

## ANTECEDENTES

Nathan Cohen, astrónomo de la Universidad de Boston, construyó la primera antena fractal conocida en 1988. La misma fue instalada para el funcionamiento de una estación de radio que operaba en su apartamento. Consecuentemente, Cohen fundó Fractal Antenna Systems Inc. En la patente de su creación, Cohen describió que históricamente el diseño de antenas ha sido determinado por la geometría euclidiana donde el área cerrada de la antena es directamente proporcional al perímetro de la antena. Dependiendo de la frecuencia de operación, los clásicos diseños eran circulares, rectangulares, y paraboloides. También mencionó la geometría fractal como una estructura que se puede agrupar en figuras fractales o fragmentos aleatorios. Las antenas diseñadas con este tipo de geometría muestran un diseño repetitivo y fragmentado, motivo por el cual han sido denominadas antenas fractales (Ramos, 2017, p. 20) (Wilson, Zhang, & Glazer, 2016, p. 14)

El avance tecnológico, y la necesidad de reducir el tamaño de las antenas sin afectar la comunicación inalámbrica, impulsan la evolución de las antenas fractales generando varios tipos y diseños. Estos diseños están basados en estructuras fractales lineales, es decir generados mediante interacciones geométricas. Los diseños alfombra y triángulo de Sierpinski eran los ejemplos más conocidos de diseños de antenas fractales (Herrera & Inclán, 2004, p. 17).

La posibilidad de tener varias copias de un objeto con diferentes dimensiones dentro de sí mismo donde cada copia tiene el mismo comportamiento a diferentes frecuencias permitió diseñar antenas multibanda. Otro avance importante fue que los elementos radiantes fractales fueron dispuestos para formar determinados arreglos de antenas fractales tal que su comportamiento sea como el de una sola antena con su propio patrón de radiación (Ramos, 2017, p. 35).

En la actualidad para el diseño de antenas fractales se está considerando estructuras curvas y objetos fractales como triángulos de Sierpinski, arboles fractales, curvas e islas de Koch, entre otras. Las características de las figuras de mérito que persigue el diseño de antenas fractales son: un gran ancho de banda, una ganancia considerable, un patrón de radiación estable, y una mayor miniaturización posible (Olivarez, 2015, p. 16)

En el ámbito nacional, concretamente en la Universidad Nacional de Chimborazo de la ciudad de Riobamba, se realizó un estudio de antenas fractales evidenciando en los resultados que este modelo de diseño amplía las bandas de frecuencia y tienden a la miniaturización. En la mencionada investigación se detalla la aplicación de las antenas fractales multibanda trabajando en 2 – 5 GHz (Olivarez, 2015). Por otro lado, en el ámbito internacional, específicamente en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Taipéi en República de

China, se desarrolló el diseño de una antena Microstrip con un arreglo de cuatro monopolos para smartwatch con tecnología 5G mostrando excelentes resultados en la aplicación y pruebas con la antena totalmente funciona (Wu et al., 2018)

En el presente anteproyecto de titulación el impacto Socio Tecnológico es evidente debido a la idea de crear una antena fractal partiendo de la necesidad actual de construir antenas cada vez más pequeñas sin afectar la comunicación inalámbrica, así también se busca incentivar la innovación nacional enfocado al diseño de antenas fractales para aplicaciones en dispositivos portables.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Es posible diseñar e implementar una antena fractal a 2,4 GHz utilizando tecnología Microstrip para dispositivos portables con un tamaño compacto sin afectar la comunicación inalámbrica?

## **JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

El diseño e implementación de una antena fractal para banda ancha en la frecuencia de 2.4 – 2.5 GHz fue desarrollada por Olivarez José Vinicio como tema de su trabajo de profesionalización de la Universidad Nacional de Chimborazo en la ciudad de Riobamba. Esta investigación logró mejorar el rendimiento de una antena fractal con mayor ganancia y efectividad (Olivarez, 2015). Otra investigación, presentada por Chia-Hao Wu, Jwo-Shiun Sun y Bo-Shiun Lu del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Taipéi en la República de China, plantea el desarrollo de antenas MIMO para aplicaciones inalámbricas (Wu et al., 2018).

Esta investigación muestra el diseño de una antena MIMO de cuatro elementos monopolo de estructura simple e implementada en un smartwatch. Se desarrollaron dos tipos de pruebas con el smartwatch: sobre una muñeca humana y un prototipo de muñeca. Las medidas realizadas fueron la eficiencia máxima y la ganancia de la antena. El parámetro de ganancia alcanzó valores entre 4dBi y 5.6 dBi, mientras que la eficiencia máxima se estableció en valores de 55% y el 97%.

El presente anteproyecto de investigación plantea a diferencia de los proyectos anteriormente mencionados, el diseño e implementación de una antena fractal orientado a futuras aplicaciones con dispositivos portables. Esta antena trabajará con una frecuencia de 2,4 GHz utilizando la tecnología Microstrip que ofrece características como: estructuras compactas, bajo peso y costo.

El diseño de la antena fractal a 2.4 GHz será en base a la teoría de la geometría fractal y el modelamiento matemático en base a una metodología de diseño. Los parámetros técnicos necesarios para el diseño de la antena fractal serán determinados mediante la aplicación de la propuesta de metodología de diseño para antenas microstrip propuesta en (Ramírez & Urquizo, 2010). La simulación del diseño se desarrollará en un software de simulación que permita la visualización de la antena en 3D y posea más estados de condición sobre los cuales se analizará los resultados permitiendo tener una noción más cercana a la realidad.

Una de las características que ofrece el diseño fractal es la tendencia a la miniaturización de la antena normal en Microstrip, debido a que el espacio donde se implementan las antenas en cualquier dispositivo móvil o portable es muy limitado y valorado. En este sentido, el diseño es mejor si el espacio que utiliza un componente dentro de una circuitería es mínimo. Entonces, es primordial que sea factible la implantación de la antena en un dispositivo portable, como por ejemplo un smartwatch.

Desde el punto de vista de ingeniería la justificación teórica de este trabajo de titulación es conseguir reducir al máximo posible el tamaño del parche de la antena microstrip alcanzando un funcionamiento aceptable para futuras aplicaciones en dispositivos portables. Para el diseño se debe considerar los conceptos de condiciones necesarias para una óptima comunicación inalámbrica que han sido aprendidos a lo largo del estudio de la carrera de ingeniería.

## **JUSTIFICACIÓN APLICATIVA**

En los últimos años se ha desarrollado dispositivos inalámbricos portátiles para ofrecer una comunicación más versátil, donde sí el dispositivo es más compacto entonces tiene alta demanda de adquisición. Poseer buena comunicación inalámbrica es uno de los desafíos de estos dispositivos por lo que es necesario diseñar un apropiado sistema de comunicación.

La antena es uno de los componentes importantes de los sistemas de comunicación de un dispositivo portable, la cual además de ser capaz de operar en diferentes estándares de comunicación, debe tener un tamaño lo más reducido posible para permitir aprovechar el espacio disponible dentro de la estructura del dispositivo.

Debido a que Ecuador se dedica más a la comercialización que a la implementación de estos dispositivos, la justificación aplicativa es claramente detectada por el hecho de que permitirá abrir nuevas líneas de investigación para la aplicación y optimización de los parámetros de la conectividad de dispositivos portables.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar una antena fractal a 2.4 GHz utilizando tecnología Microstrip para dispositivos portables.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estudiar el estado del arte de la tecnología Microstrip y la metodología de diseño para el desarrollo de la antena fractal a frecuencia de 2.4 GHz.
- Realizar el diseño óptimo de la antena fractal a frecuencia de 2.4 GHz para dispositivos portables mediante un software de simulación.
- Implementar la antena diseñada.
- Evaluar el funcionamiento de la antena diseñada mediante la recolección y tabulación de medidas de ganancia.

# CAPITULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Introducción

La revisión teórica de los temas necesarios para el desarrollo de este tema permite conocer los conceptos básicos a considerar para el presente trabajo de titulación. La estructura del marco teórico se lo realizó posterior a la planeación y desarrollo de los procesos de investigación. La idea principal de este trabajo es la elaboración de una antena fractal microstrip a 2.4 GHz.

Se consideró la idea principal para definir los temas a desarrollarse dentro del marco teórico. Entonces, es importante empezar con la revisión de los fundamentos de antenas para entender cuáles son las características generales que debe poseer una antena. El tipo de antena hace referencia a las características específicas, por este motivo se estudió la tecnología microstrip.

El diseño de la antena fractal se realizó posterior al estudio de la geometría fractal y en consideración de la frecuencia de operación. Los conceptos teóricos de los temas antes mencionados se detallan a continuación.

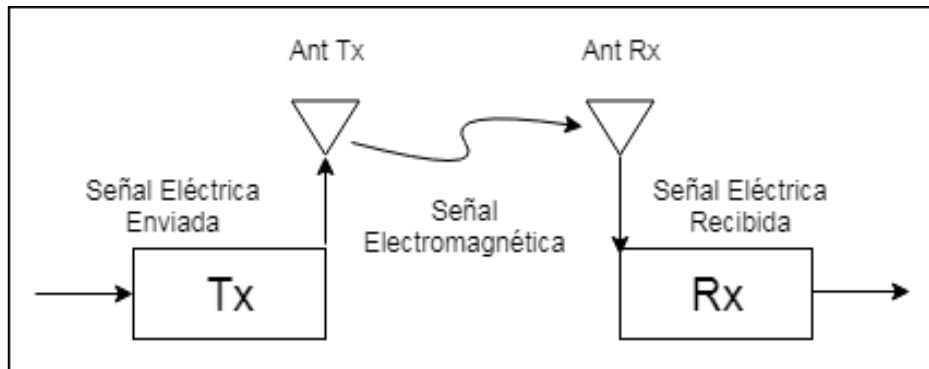
### 1.2. Fundamentos de antenas

La antena es un elemento de los sistemas de comunicación que permite que una señal u onda de radio se desplace de un punto a otro. El funcionamiento de las antenas permite el diseño de sistemas de radiocomunicación con características de portabilidad. Es necesario conocer la definición de antena desde el punto de vista de ingeniería, así como reconocer los parámetros que las caracterizan y sobre los cuales se evalúan.

#### 1.2.1. Definición de antena

El estándar IEEE define a una antena como “un medio para radiar o recibir ondas de radio”. Balanis interpreta y amplía esta definición de antena como “la estructura tradicional entre el espacio libre y un dispositivo guiado” donde este dispositivo guiado hace uso de una línea de transmisión por donde circula energía generada en la fuente o emisor hacia la antena de un sistema de comunicación o viceversa. Es decir, una antena está enviando y otra recibiendo una señal electromagnética (Balanis, 2013, p. 1).

La antena es un elemento que permite radiar una señal o energía electromagnética de forma eficiente. Las propiedades de una antena para transmisión son las mismas que de una antena para recepción. Es decir, una misma antena puede radiar y también puede recibir radiación. La señal es electromagnética únicamente cuando se encuentra viajando o desplazándose en el canal de transmisión, ya sea enviada o recibida. Cuando está siendo procesada dentro del sistema emisor o receptor es una señal eléctrica, esto se muestra en la Figura 1-1 (Murillo, 2007, p. 23).



**Figura 1-1.** Esquema de un sistema de comunicación inalámbrico

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

#### 1.2.1.1. Principio de reciprocidad

Las antenas son elementos pasivos porque no amplifican o modifican una señal. En relación con la potencia de la señal, se verá que la antena recibe la potencia de la misma forma que la transmite. Entonces se considera que las propiedades de una antena son bidireccionales. Parámetros como la ganancia, directividad, ancho de banda, patrón de radiación son los mismos en emisión como en la recepción. Por esta propiedad, dadas dos antenas, incluso distintas, la potencia recibida por una cuando se entrega una potencia determinada a la otra es la misma que la recibida cuando se entrega la misma potencia a la otra antena (Murillo, 2007, p. 24) (Gallardo, 2015, p. 97).

#### 1.2.2. Parámetros de una antena

El nivel de potencia de la señal radiada por una antena en cualquier dirección dependerá de dos aspectos. El primero, de la potencia con la que alimentamos la antena, denominándose “potencia entregada” y el segundo de como distribuya la antena esa energía en el canal de transmisión. El segundo aspecto depende de los parámetros de una antena (Murillo, 2007, p. 34).



### 1.2.2.1. Densidad de potencia radiada

La densidad de potencia radiada se define como la potencia o nivel de señal por unidad de superficie en una dirección determinada. Las ondas electromagnéticas son utilizadas para transmitir información por un canal inalámbrico, por esto se considera que la densidad de radiación está relacionada con los campos que componen la señal, es decir los campos electromagnéticos. La potencia asociada con las ondas electromagnéticas se describe con el tiempo promedio del vector de Poynting o densidad de potencia promedio (Ferrando & Valero, 2005b, p. 9) (Balanis, 2013, p. 38).

$$\vec{W} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*)$$

**Ecuación 1-1.** Densidad de potencia.

Donde:

$$\vec{E} = \text{campo eléctrico} \left( \frac{V}{m} \right)$$

$$\vec{H}^* = \text{campo magnético} \left( \frac{A}{m} \right)$$

### 1.2.2.2. Intensidad de radiación

La intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección. Es un parámetro de campo lejano o far - field y se calcula multiplicando la densidad de potencia de radiación por el cuadrado de la distancia.

$$U = r^2 W$$

**Ecuación 2-1.** Intensidad de radiación.

Donde:

$$U = \text{intensidad de radiación} \left( \frac{W}{\text{unidad de ángulo sólido}} \right)$$

$$W = \text{densidad de radiación} \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

En otras palabras una antena debe tener la capacidad de radiar, el patrón de radiación de una antena es la medida de la potencia radiada en una determinada dirección, sin embargo, el rendimiento de una antena es medido en términos de la ganancia (Balanis, 2013, p. 40).

### 1.2.2.3. Directividad

La directividad de una antena está definida por la relación entre la densidad de potencia radiada de la antena en cuestión en una dirección a una determinada distancia y la densidad de potencia

que radiaría una antena de referencia o isotrópica. Se considera que ambas antenas están situadas en un mismo punto y que ambas están radiando la misma potencia. La directividad solo considera las propiedades direccionales de la antena (Gallardo, 2015, p. 100). La densidad de potencia radiada por una antena isotrópica está dada por:

$$U_o = \frac{P_{referencia}}{4\pi r^2}$$

**Ecuación 3-1.** Densidad de potencia isotrópica.

La directividad entonces se determina mediante:

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{referencia}}$$

**Ecuación 4-1.** Directividad.

Donde:

$$P_{referencia} = \text{Potencia radiada}$$

$$D = \text{Directividad}$$

#### 1.2.2.4. Ganancia

La ganancia de una antena está relacionada con la directividad donde se considera la eficiencia de la antena además de las características direccionales. Se define como la razón entre la intensidad de radiación en una determinada dirección y la intensidad de radiación que se obtendría si fuera radiada por una antena isotrópica. Es decir, la ganancia hace referencia al nivel de potencia entregada a una antena (Zurita, 2017, p. 21) (Balanis, 2013, p. 65).

$$G = 4\pi \frac{U}{P_{in}}$$

**Ecuación 5-1.** Ganancia.

Donde:

$$P_{in} = \text{Potencia de entrada o fuente sin pérdidas}$$

$$U = \text{Intensidad de radiación}$$

#### 1.2.2.5. Impedancia

La impedancia se refiere a la relación entre la tensión y la corriente en los terminales de una antena. Está compuesta por una parte real e imaginaria. La componente real se denomina resistencia y la componente imaginaria representa la reactancia. Ambas componentes dependen de la frecuencia. Una antena sin parte imaginaria es de tipo resonante. (Gallardo, 2015, p. 100).

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = R_a + jX_a$$

**Ecuación 6-1.** Impedancia.

Donde:

$R_a =$  Resistencia

$X_a =$  Reactancia

#### 1.2.2.6. Ancho de banda

El ancho de banda es el intervalo de frecuencias en que la antena debe funcionar. Se representa en términos de porcentaje considerando las frecuencias máximas y mínimas además de la frecuencia central o la frecuencia a la cual ha sido diseñada. Así el ancho de banda será constante para una determinada frecuencia de operación. El ancho de banda que maneje una antena permite la clasificación como antenas de banda ancho o de banda estrecha (Zurita, 2017, p. 20).

$$BW(\%) = 100 * \frac{f_H - f_L}{f_c}$$

**Ecuación 7-1.** Ancho de Banda.

Donde:

$f_H =$  frecuencia más alta

$f_L =$  frecuencia más baja

$f_c =$  frecuencia de corte

#### 1.2.2.7. Relación de onda estacionaria

La razón de onda estacionaria también conocida como ROE, es la relación entre la potencia emitida y la potencia reflejada. Indica el nivel de adaptación que posee una antena al medio libre. El valor de ROE varía entre 1 a  $\infty$ . En un caso ideal, el valor de 1 indica que la antena está perfectamente adaptada y que el total de potencia es transmitida sin existir potencia reflejada. Generalmente se considera el valor de ROE igual a 2 para realizar el diseño de antenas. ROE se expresa mediante la ecuación (Zurita, 2017, p. 17).

$$ROE = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_e}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_e}}}$$

**Ecuación 8-1.** ROE.

Donde:

$P_r = \text{potencia reflejada}$

$P_e = \text{potencia entregada}$

#### 1.2.2.8. Parámetros de dispersión

Los parámetros S permiten determinar la frecuencia de resonancia de un circuito o antena. Se determina mediante los niveles de potencia que se perciben en las terminales del elemento de análisis. Existen cuatro parámetros S y se definen así:

$S_{11}$ : Coeficiente de reflexión a la entrada, salida acoplada

$S_{12}$ : Coeficiente de transmisión inversa, entrada acoplada.

$S_{13}$ : Coeficiente de transmisión directo, salida acoplada.

$S_{14}$ : Coeficiente de reflexión a la salida, entrada acoplada.

En antenas tipo parche se analiza el parámetro  $S_{11}$  porque indica la referencia de pérdidas reflejadas ocasionadas por acoplar dos elementos, es decir antena con línea de transmisión u otros elementos radiantes (Zurita, 2017, p. 40).

$$S_{11} = \frac{Z_{in1} - Z_{01}}{Z_{in1} + Z_{01}}$$

**Ecuación 9-1.** Parámetro  $S_{11}$ .

Donde:

$Z_{in1} = \text{impedancia de entrada}$

$Z_{01} = \text{impedancia de la carga}$

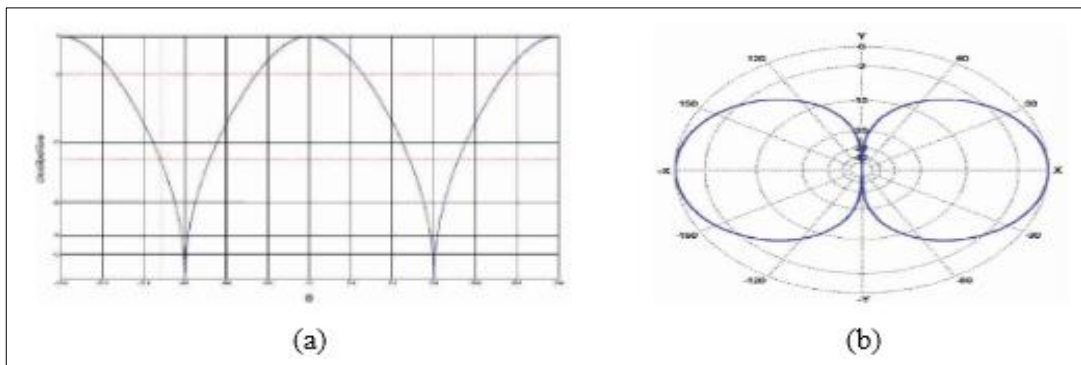
#### 1.2.2.9. Patrón de radiación

El patrón o diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las distintas direcciones del espacio, a una determinada distancia. El patrón de radiación que se considera es el que se determina en campo lejano o far-field. La interpretación del patrón de radiación determina la intensidad de campo radiado en función de la dirección angular. Si la radiación está expresada en función de la intensidad de campo se tiene un patrón de intensidad de campo de otra manera si la radiación está en función de la potencia por unidad de ángulo sólido se tiene un patrón de potencia. (Balanis, 2013, p. 27).

Ambos casos se consideran como patrón de radiación absoluto porque representan una potencia fija frente a una distancia variable. Caso contrario, si la distancia es fija e intensidad de campo variable se conoce como patrón de radiación relativo. El patrón de radiación se puede observar en 2D y 3D (Gallardo, 2015, p. 97).

En general se representa en un sistema de coordenadas esférico como se muestra en la Figura 2-1. En este sistema cualquier punto está perfectamente determinado por la distancia al centro de coordenadas. El plano XY es el plano ecuatorial donde cualquier plano que forme con este un ángulo de  $90^\circ$  se denomina plano meridiano. Si se ubica una antena en el centro del sistema de coordenadas se puede representar el diagrama de radiación relativa. Se considera la Figura 4-1 como ejemplo (Gallardo, 2015, p. 98).

El patrón de radiación 2D puede representarse en coordenadas polares y cartesianas. Un ejemplo de patrón de radiación en coordenadas polares que se puede observar en la Figura 3-1, donde el ángulo indica la dirección y el radio representa la amplitud del campo eléctrico o la densidad de potencia. En coordenadas cartesianas se tiene sobre el eje de abscisas-x el ángulo de radiación de la antena, mientras que sobre el eje de ordenadas-y se representa la amplitud como se indica en la Figura 3-1 (Gallardo, 2015, p. 98).

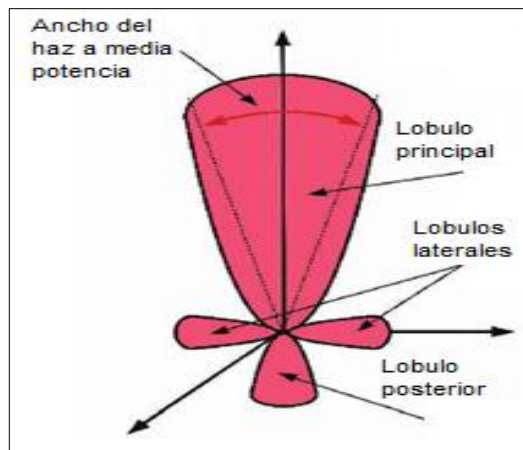


**Figura 2-1.** Diagrama de radiación 2D. a) Coordenadas cartesianas. b) Coordenadas polares

Fuente: Gallardo,2015

El patrón de radiación 3D está representado por coordenadas esféricas, donde la antena es puesta como centro y la distancia permanece constante durante la medición. El comportamiento del diagrama es representado por el plano E que contiene el vector de campo eléctrico además de la dirección de máxima radiación mientras que el plano H que contiene el vector de campo magnético. Estos campos son perpendiculares entre sí debido a que las radiaciones en el campo eléctrico y magnético forman ondas electromagnéticas. Una representación de un patrón de radiación en 3D se muestra en la Figura 3-1.

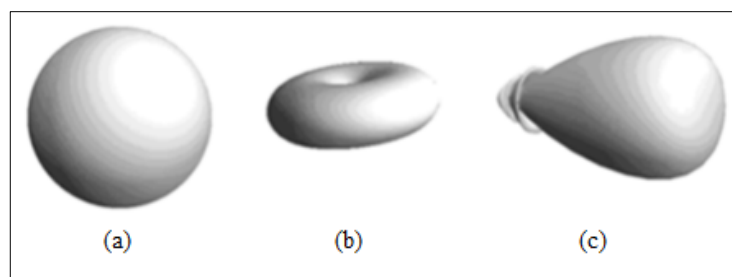
La magnitud del campo eléctrico es expresada en decibelios donde a mayor radiación en una dirección del patrón el valor será 0 dB mientras que en los otros puntos tendrán valores negativos. El patrón de radiación típico está representado por la mayor amplitud de radiación en una determinada dirección, esta amplitud es conocida como lóbulo o haz principal. Este haz está rodeado por otras amplitudes de menor radiación conocidos como lóbulos secundarios y se observa en la Figura 3-1 (Gallardo, 2015, p. 99).



**Figura 3-1.** Lóbulos de un patrón de radiación

Fuente: Gallardo,2015

Las antenas según el patrón de radiación se clasifican en isotrópicas, omnidireccionales y directivas. La antena isotrópica es ideal o hipotética, se entiende que es una antena que no posee pérdidas es decir radia con la misma intensidad en todas las direcciones del espacio. La antena omnidireccional tiene la capacidad de radiar en todas las direcciones es decir en  $360^\circ$  pero a diferencia de la anterior radia en cada dirección con diferente intensidad, pero en sus zonas centrales los lóbulos de energía se presionan hacia adentro generando que no exista radiación encima ni debajo de la antena. Finalmente, la antena directiva radia en una sola dirección debido a esto aumenta la distancia de radiación, pero en ángulo de radiación se decrementa. Los tres tipos de antenas según el patrón de radiación se muestran en la Figura 4-1 (Zurita, 2017, p. 24).



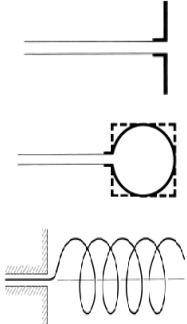
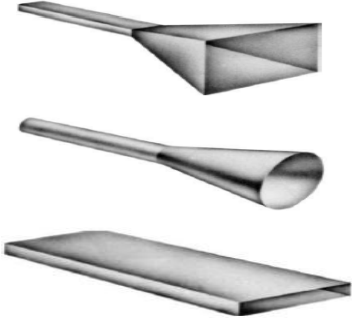
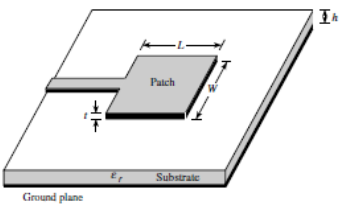
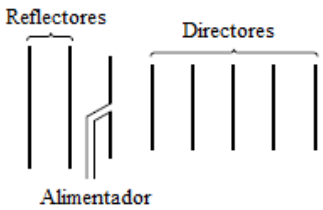
**Figura 4-1.** Patrón de radiación, (a) Isotrópico, (b) Omnidireccional, (c) Directivo

Fuente: Zurita, 2017

### 1.2.3. Tipos de antenas

Las antenas son utilizadas en distintos sistemas de comunicación por lo que existen diferentes tipos. Existen muchas formas de clasificar las antenas y esto depende de las características de diseño y funcionamiento. En Tabla 1-1 se detalla algunos tipos de antenas (Balanis, 2013, p. 4):

**Tabla 1-1.** Tipos de antenas

<p>Wire Antenas o antenas de alambre</p>	<p>Son las más reconocidas debido a su alta aplicación en la vida cotidiana, de esta manera son apreciadas en automóviles, construcciones, barcos, aviones, etc. Ejemplos son la antena dipolo, lazo circular, helicoidal, etc.</p>	
<p>Antenas de apertura</p>	<p>Surgen por la demanda de antenas más sofisticadas para altas frecuencias, son útiles para aplicaciones en aviones y naves espaciales. Pueden ser cubiertas por material dieléctrico sin afectar en el funcionamiento. Se muestran tres antenas de apertura: horn pirámide, horn cónica y guía de onda.</p>	
<p>Antenas microstrip</p>	<p>Estas antenas consisten en un parche metálico sobre un material substrato a tierra. El parche metálico tiene diferentes configuraciones, los más conocidos son los parches rectangulares y circulares debido a las características de radiación.</p>	
<p>Arreglo de antenas</p>	<p>Esta configuración surgió por la necesidad con respecto a las características de radiación que no pueden ser realizado por una sola antena. Algunos ejemplos son array patch microstrip y array Yagi-Uda.</p>	

Fuente: Balanis, 2013

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### **1.3. Tecnología Microstrip**

El origen de esta tecnología empieza en los años 50 donde los primeros circuitos impresos se denominaron stripline. Esto es una tira conductora muy delgada sobre un dieléctrico. Este material dieléctrico posee dos capas metalizadas en cada una de sus superficies. Estas características son similares en microstrip. Desde su origen se orientó hacia el diseño de antenas con reducidas dimensiones. La tecnología microstrip ayuda en el desarrollo de antenas y líneas de transmisión (Estela, 2017, p. 4).

#### ***1.3.1. Líneas microstrip***

En 1952 aparecen por primera vez las líneas microstrip a diferencia de stripline, se retiró del sustrato la parte superior quedando en el exterior solo la línea conductora. Debido a que este modelo de estructura era muy abierto presentaba pérdidas por radiación. Así que el principal objetivo fue generar dieléctrico con menores pérdidas (Estela, 2017, p. 4).

##### ***1.3.1.1. Tipos de ondas en líneas microstrip***

En las líneas microstrip se generan cuatro tipos de ondas que son: espaciales, superficiales, de fuga y ondas guía. Las ondas espaciales son enviadas en el espacio libre. En estas condiciones la onda pierde magnitud y se atenúa en relación de la distancia. En líneas microstrip las ondas espaciales representan las pérdidas y por tanto se busca eliminarlas (Estela, 2017, p. 5).

Las ondas superficiales están encerradas dentro del material dieléctrico y son no uniformes. Esto se produce debido al esquema “reflexión interna total” que mantiene a la onda reflejándose entre el plano tierra y el material dieléctrico. La señal enviada está compuesta por esta onda por tal se aumenta las pérdidas (Estela, 2017, p. 6).

Las ondas de fuga son enviadas en el espacio libre pero dentro de un límite de rango de ángulo. Tiene similitud a las ondas superficiales porque se encuentra reflejándose dentro del material dieléctrico pero la diferencia es que una parte de onda atraviesa la entrecara del sustrato. Este tipo de onda pueden ser utilizados como parches para aumentar la dimensión de la antena y por consiguiente la ganancia de la misma (Estela, 2017, p. 6).

Las ondas guiadas se encuentran en las líneas de transmisión o guías de onda. Se generan cuando está en su mayoría metalizada la parte superior del sustrato. Estas ondas existen solo para valores



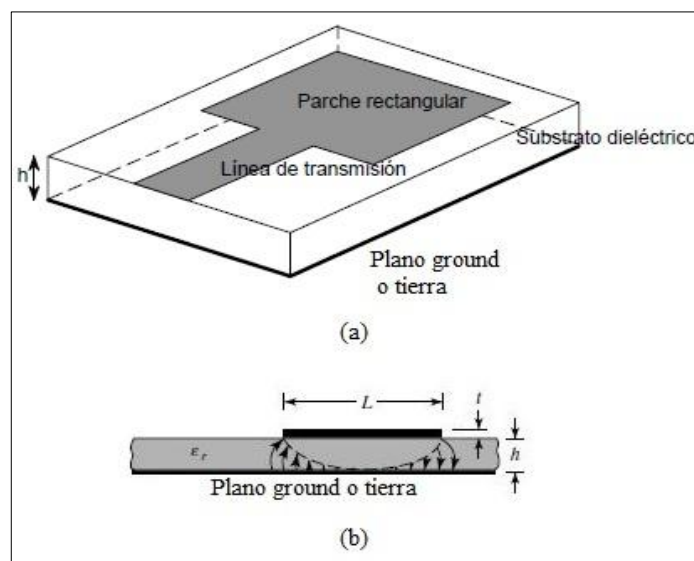
específicos de ángulo de incidencia. Las ondas guiadas rebotan en la parte metalizada como en el plano de tierra (Estela, 2017, p. 7).

### 1.3.2. Antenas microstrip

Las antenas microstrip también denominadas antenas parche se diseñan en base a los conceptos de las líneas de transmisión y resonadores microstrip. En la Figura 5-1, se muestra la estructura general de una antena microstrip. La estructura está compuesta de un parche metálico sobre el material dieléctrico sin pérdidas y en la parte inferior tiene un plano conductor conocido como tierra o plano de masa. El parche está conectado a la línea de transmisión, en este caso la alimentación de la antena es por línea. Este tipo de antenas se integran en circuitos de microondas por lo que es prioritario asegurar una buena relación entre el diseño del circuito y el desempeño de la antena (Ferrando & Valero, 2005b, p. 5).

#### 1.3.2.1. Características de una antena microstrip

- El espesor del dieléctrico ( $h$ ) varía entre  $(0.003\lambda_0 < h < 0.05 \lambda_0)$ .
- El valor de la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) del dieléctrico varía entre  $(2.2 < \epsilon_r < 12)$ .
- El espesor del parche o material metálico ( $t$ ) es muy delgado ( $t \ll \lambda_0$ ).
- Donde  $\lambda_0$  se refiere a la longitud de onda en el espacio libre en que opera la antena.
- En un parche rectangular la longitud ( $L$ ) varía entre  $(\frac{\lambda_0}{3} < L < \frac{\lambda_0}{2})$

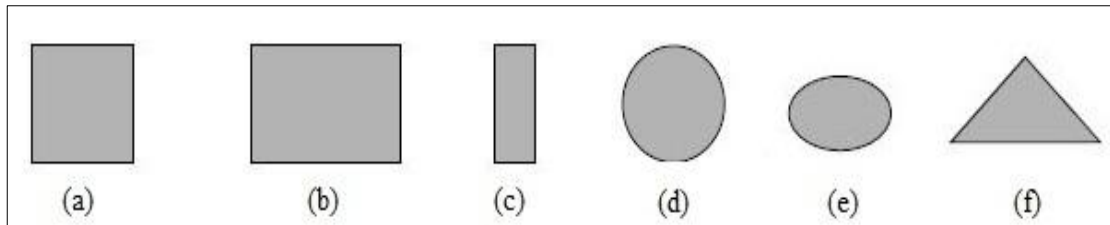


**Figura 5-1.** Antena microstrip, (a) Estructura de la antena, (b) Vista lateral de la antena.

**Fuente:** (Balanis, 2013) (Ferrando & Valero, 2005b)

### 1.3.2.2. Diseños de parche microstrip

En una antena microstrip el elemento radiante o parche puede tener la forma de un cuadrado, rectángulo, circular, elíptica, triangular, etc. Sin embargo, debido a la facilidad de análisis y fabricación los diseños cuadrados, rectangulares y circulares son los más utilizados además que poseen buenas características de radiación (Balanis, 2013, p. 811).



**Figura 6-1.** Diseños de parche, (a) Cuadrado, (b) Rectangular, (c) Dipolo, (d) Circular, (e) Elíptica, (f) Triangular

Fuente: (Balanis, 2013)

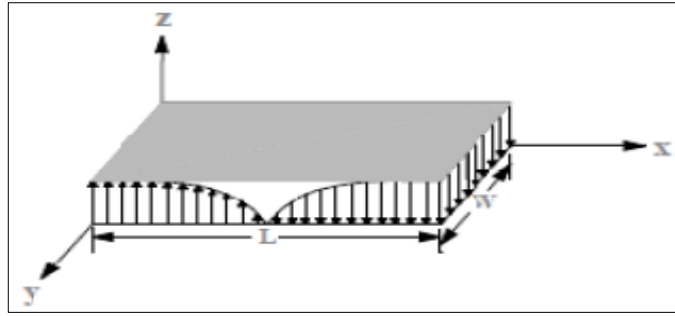
En la Figura 6-1, se muestra las formas básicas de diseño del parche de una antena microstrip. Nuevos diseños pueden surgir, el propósito del presente trabajo de titulación es lograr el diseño de una antena microstrip combinada con el concepto de una antena fractal.

### 1.3.2.3. Patrón de radiación de una antena microstrip

Se determina a partir del campo eléctrico de la antena microstrip y sus correspondientes corrientes magnéticas para un modo TM. El modo TM dominante está en función de la frecuencia de resonancia. Las opciones posibles son:

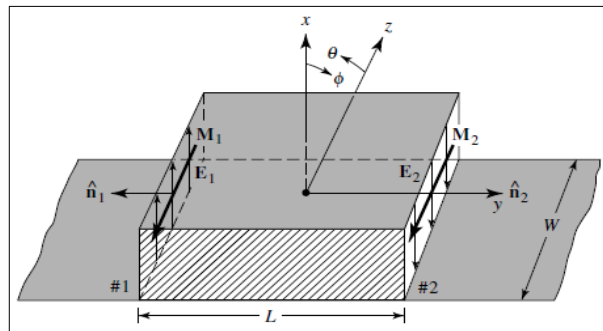
- $TM_{10}$ , si  $h \ll L$  y  $L > W > h$
- $TM_{01}$ , si  $L > W > L/2 > h$
- $TM_{20}$ , si  $L/2 > W > h$
- $TM_{02}$ , si  $W > W/2 > L > h$

En este caso no se tiene valor de  $W$  por ser un parche cuadrado por lo que se define como modo  $TM_{10}$  debido a que cumple con la condición de los valores  $L$  y  $h$ . La distribución de corrientes según este modo se muestra en la Figura 7-1.



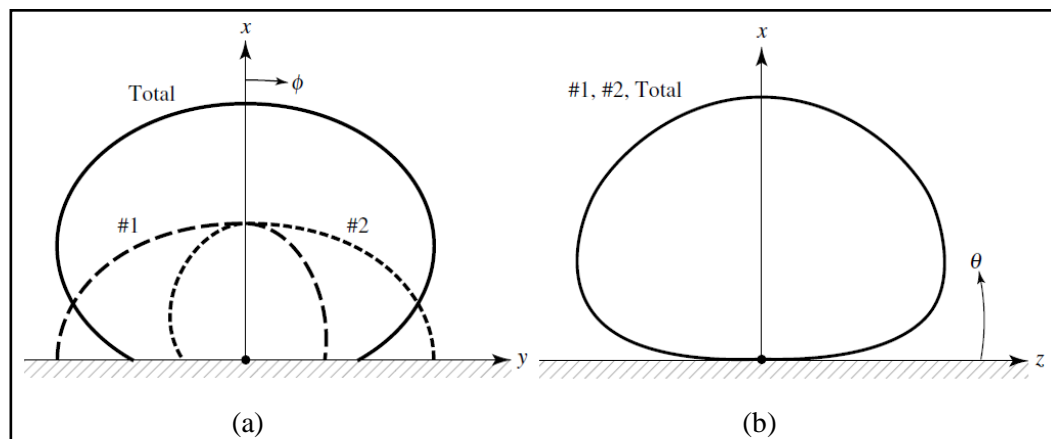
**Figura 7-1.** Campo eléctrico y distribución de corrientes para el modo  $TM_{10}$   
**Fuente:** (Ramírez & Urquiza, 2010)

Existe el principio de equivalencia, en este caso hace referencia a que cada ranura irradia el mismo campo magnético, se define como  $M_s$ , en cada ranura es la misma en magnitud y fase. Por lo tanto, estas dos ranuras forman una matriz de dos elementos con las densidades de corriente separadas por  $L$  como se observa en la Figura 8-1 (Balanis, 2013).



**Figura 8-1.** Direcciones de radiación en un parche microstrip  
**Fuente:** (Balanis, 2013)

Esto genera que las dos corrientes en función del sistema tridimensional generen el campo radiado que se descompone en dos planos E y H, esto se muestra en la Figura 9-1 (Balanis, 2013).



**Figura 9-1.** Patrón de radiación de una antena microstrip. (a) Plano E, (b) Plano H  
**Fuente:** (Balanis, 2013)

El valor del campo radiado para los planos E y H están definidos a continuación:

- Plano – E: ( $\theta = 90^\circ$ ,  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$  y  $270 \leq \varphi \leq 360^\circ$ )

$$E_{\varphi}^t = +j \frac{K_0 W V_0 e^{-jK_0 r}}{\pi r} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{K_0 h}{2} \cos \varphi\right)}{\frac{K_0 h}{2} \cos \varphi} \right\} \cos\left(\frac{K_0 L}{2} \sin \varphi\right)$$

**Ecuación 10-1.** Campo radiado para el plano E

Donde:

$k_0 =$  constante de fase en el espacio libre

$L =$  largo de antena microstrip

$W =$  ancho de antena microstrip

$h =$  espesor del substrato

$V_0 =$  Tension de entrada

- Plano – H: ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ )

$$E_{\theta}^t = +j \frac{K_0 W V_0 e^{-jK_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin\left(\frac{K_0 h}{2} \sin \theta\right) \sin\left(\frac{K_0 h}{2} \cos \theta\right)}{\frac{K_0 h}{2} \sin \theta \frac{K_0 h}{2} \cos \theta} \right\}$$

**Ecuación 11-1.** Campo radiado para el plano H

Donde:

$k_0 =$  constante de fase en el espacio libre

$L =$  largo de antena microstrip

$W =$  ancho de antena microstrip

$h =$  espesor del substrato

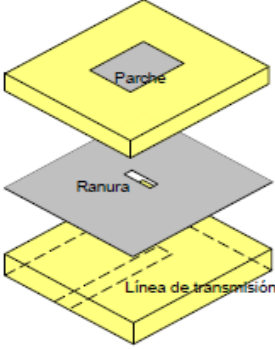
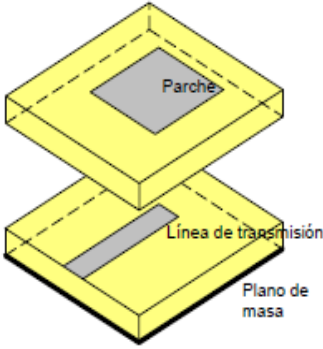
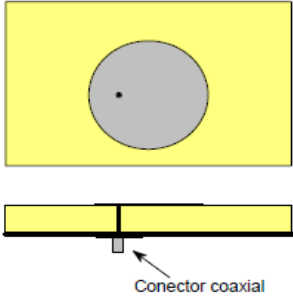
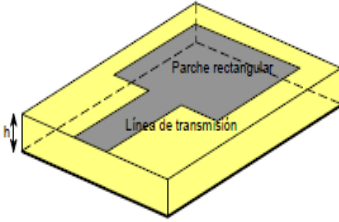
$V_0 =$  Tension de entrada

#### 1.3.2.4. Modos de alimentación para antena microstrip

Existen varios modos para alimentar una antena microstrip, pero las más populares son: acoplamiento de apertura, acoplamiento de proximidad, sonda coaxial y líneas microstrip. Se detallan cada uno en la Tabla 2-1.

La línea microstrip y la sonda coaxial presentan asimetrías inherentes produciendo radiación de polarización cruzada. En busca de solucionar este problema se han desarrollado los modos de alimentación por acoplamiento de apertura y proximidad (Balanis, 2013, p. 813).

**Tabla 2-1.** Modos de alimentación Microstrip

<p>Acoplamiento de apertura</p>	<p>Se realiza entre dos sustratos separados por un plano de tierra. El parche se alimenta mediante la energía que se acopla desde una línea microstrip ubicada en la parte inferior del sustrato inferior. Es el modo de alimentación más difícil de implementar y posee ancho de banda estrecho. El beneficio de este modo es que presentan una radiación de espuria moderada.</p>	
<p>Acoplamiento de proximidad</p>	<p>Se realiza en estructuras multicapa. Posee el mayor ancho de banda. Presenta baja radiación de espuria. El inconveniente es que la implementación es difícil en comparación de los otros modos de alimentación. Se debe controlar la relación entre el ancho de la línea microstrip y la longitud del stub de alimentación.</p>	
<p>Sonda coaxial</p>	<p>Alimentación mediante conector coaxial. Es común en antenas no directivas. Permite baja radiación de espurias, sin embargo, se opta por este modo de alimentación en sustratos no muy gruesos. Presenta un ancho de banda estrecho.</p>	
<p>Líneas microstrip</p>	<p>Alimentación mediante una línea de transmisión microstrip unida al parche. Se necesita controlar la posición donde se une la línea con el parche. Ideal para sustratos delgados por que la cantidad de ondas superficiales es mínima y de esta manera en diseños prácticos no se limitan el ancho de banda.</p>	

Fuente: (Balanis, 2013)(Ferrando & Valero, 2005b)

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 1.3.2.5. Material para antenas microstrip

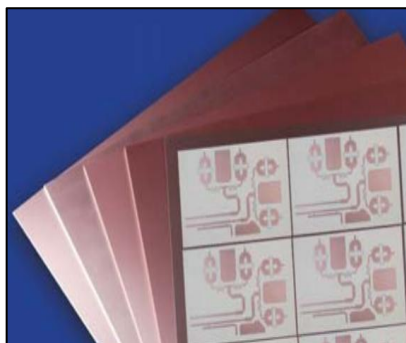
Las antenas microstrip se implementan sobre un material dieléctrico, también conocido como sustrato. Algunos materiales actúan como sustrato, por ejemplo: madera, plástico, vidrio, etc. La utilización de sustratos en las antenas microstrip debe lograr el comportamiento de un resonador dieléctrico el cual a partir del campo eléctrico externo debe generar un campo eléctrico interno. Para aplicaciones en frecuencias de microondas, es mejor un sustrato delgado en el orden de los milímetros, pero con constante dieléctrica alta. Estas características permiten campos estrechamente unidos para reducir la radiación de ondas superficiales. También ayuda a reducir el tamaño de los diseños de antenas (Zemanate, 2016, p. 26). (Balanis, 2013, p. 811).

#### *Roger 4000®*

Es un material de laminados cerámicos de hidrocarburo que ofrece buen rendimiento para diseños a altas frecuencias, se muestra en la Figura 10-1. Además es un material de baja pérdida en el cual se puede fabricar diseños utilizando procesos similares con FR4. Posee las propiedades que se necesitan para circuitos de microondas de RF y líneas de transmisión de impedancia controlada. A diferencia de los materiales de alto rendimiento basados en PTFE, no requieren un proceso de preparación especializado, como el grabado con sodio. Este material es un laminado termoestable que puede procesarse mediante sistemas de manejo automatizados (Rogers, 2015, p. 1)

#### Características y Beneficios:

- Permite aplicaciones con altas frecuencias operativas.
- Ideal para aplicaciones de banda ancha.
- Baja tolerancia dieléctrica y baja pérdida.
- Propiedades eléctricas estables vs. frecuencia.
- Bajo coeficiente térmico de la constante dieléctrica.



**Figura 10-1.** Material RO4000®

**Fuente:** (Rogers, 2015, p. 1)

### 1.3.2.6. Aplicaciones de antenas microstrip

Hoy en día las antenas Microstrip tienen gran aceptación y aplicación en diferentes ámbitos tecnológicos. Por la facilidad de adaptarse a la superficie donde se vaya a implementada pueden ser ubicadas en superficies de naves espaciales, aviones, satélites, automóviles, teléfonos móviles y en dispositivos portables. La aplicación en dispositivos portables es tema de estudio en este trabajo de titulación (Ferrando & Valero, 2005a, p. 6).

Los dispositivos portables participan en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas como Bluetooth, WiFi. El smartwatch es un dispositivo portable con buena acogida, el limitante en la construcción de este dispositivo es el tamaño total que debe tener. El tamaño de los dispositivos que lo componen es muy importante. Con la aplicación de los conceptos de las antenas fractales combinados con la tecnología microstrip se pretende alcanzar un diseño de antena lo más compacto para dispositivos portables.

### 1.3.3. Ventajas y desventajas de microstrip

**Tabla 3-1.** Ventajas y Desventajas de Microstrip

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Bajo perfil</li><li>• Se adaptan a la forma de la estructura ya sea plana o curva</li><li>• Fácil y económica de fabricar</li><li>• Aptas para implementarse en circuitos integrados o dispositivos compactos</li><li>• Livianas y compactas</li><li>• Compatibles para diseños a alta frecuencia</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Baja potencia y eficiencia</li><li>• Elevado factor de calidad</li><li>• Radiación con espuria</li><li>• Estrecho ancho de banda</li><li>• Presentar ondas superficiales que degradan el patrón de la antena</li><li>• Mejores resultados con sustrato de alta calidad</li></ul>

Fuente: (Balanis, 2013)

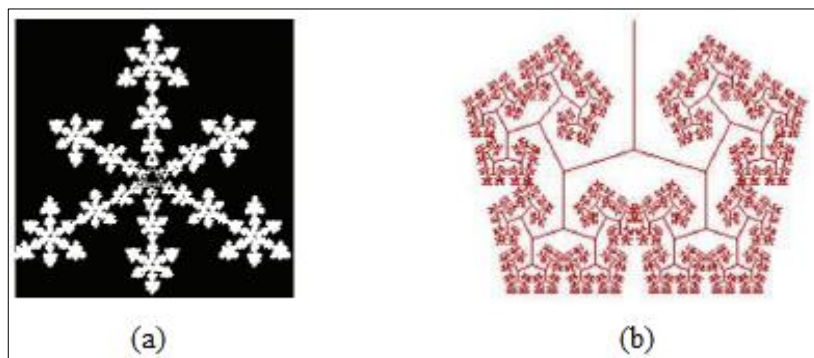
Realizado por: Valeria Hernández, 2019

## 1.4. Geometría Fractal

El estudio de la geometría fractal surge con el estudio de la naturaleza, en la búsqueda de patrones que definan o describan los elementos que componen un medio. Benoit Mandelbrot (1977) después de interpretar las formas de la naturaleza deduce que es imposible definir las según la teoría euclidiana. La geometría euclidiana consiste en términos de líneas rectas o círculos. Es decir, una geometría lineal la cual puede describir estructuras regulares. La geometría fractal también fue creada con el propósito de solucionar los problemas presentes en las líneas telefónicas generados por el ruido (Figuroa, 2016, p. 19) (Barrera, 2018, p. 16).

### 1.4.1. Definición

Mandelbrot define por primera vez la palabra fractal que proviene del latín “fractus” como una figura formada de partes similares a la forma completa, la cual posee simetría. También propuso la geometría de la naturaleza la cuál describe un conjunto de estructuras irregulares y complejas descritos alrededor de algoritmos matemáticos. En la composición de las estructuras irregulares existen patrones de recurrencia. La geometría fractal puede describir objetos como relámpagos, árboles, el perfil de las costas de mar, etc. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 11-1 (Figuroa, 2016, p. 19).



**Figura 11-1.** Fractales de la naturaleza: (a) Copo de nieve, (b) Pulmones humanos

**Fuente:** (Figuroa, 2016, p. 18)

Las propiedades de la geometría fractal o de una Figura fractal son la autosimilitud, dimensión fractal y relleno del espacio. El relleno del espacio en una estructura fractal conlleva a la generación de formas curvas con larga longitud eléctrica pero ajustándose a un volumen físico compacto (AZARI, 2011, p. 1724).



#### 1.4.1.1. Autosimilitud

La autosimilitud significa que un objeto este compuesto por réplicas de sí mismo a diferentes escalas, la combinación de estas escalas se denominan interacciones (Figueroa, 2016, p. 19). Según la característica de autosimilitud, se clasifican los fractales en Autosimilitud (Barrera, 2018, p. 18):

- Exacta: un fractal es idéntico a diferentes escalas.
- Cuasi-autosimilitud: un fractal parece idéntico, pero contiene copias a menor escala y distorsionadas.
- Estadística: un fractal tiene medidas estadísticas constantes con el cambio de escala.

#### 1.4.1.2. Dimensión fractal

En geometría euclidiana la dimensión de un objeto está definida en los números enteros. Se interpreta una dimensión como ya conocemos: 1D, 2D y 3D. En cambio, en los objetos fractales la dimensión es racional o fraccionaria, por lo que un objeto fractal no puede ser medido en longitud, área ni volumen. La dimensión fractal está definida por la relación entre el factor de reducción y el número de partes resultantes. Se expresa en la ecuación de Dimensión de Hausdorff que se detalla a continuación (Montoya, n.d., p. 1);

$$D = \frac{\text{Log } N}{\text{Log } (1/\delta)}$$

**Ecuación 12-1.** Dimensión fractal.

Donde:

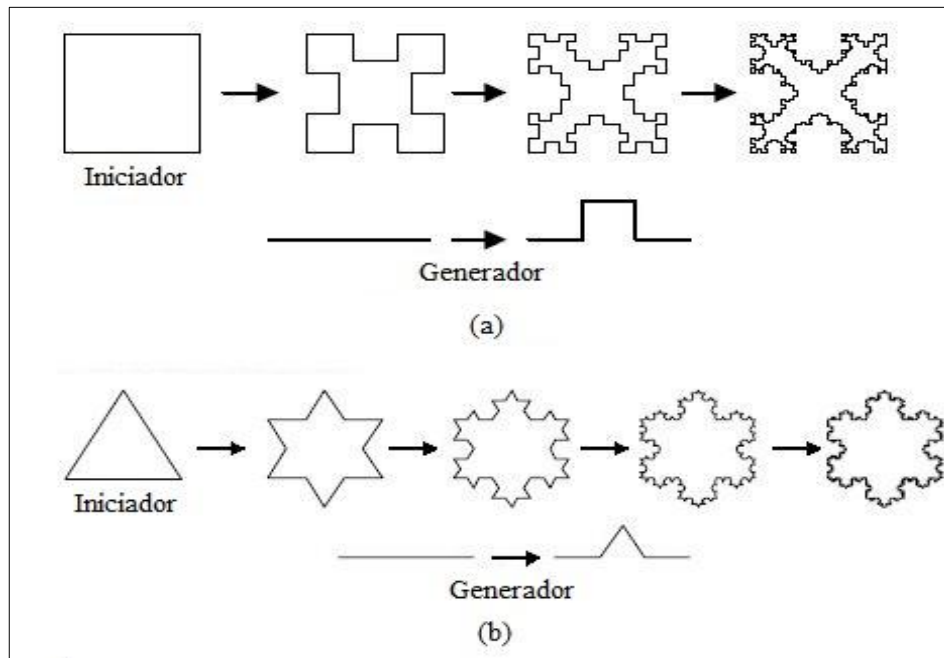
- $D$  = dimensión fractal
- $N$  = numero de particiones
- $\delta$  = tamaño de los objetos

#### 1.4.2. Clasificación de fractales

El concepto de fractal se ha extendido en el diseño clasificándose en dos categorías: deterministas y aleatorios. Determinísticos, como la isla de Minkowski y el lazo de Koch, son aquellos que se generan de varias copias reducidas a diferentes escalas y rotadas de sí mismos. Los fractales aleatorios también contienen elementos de aleatoriedad que permiten la simulación de fenómenos naturales (Balanis, 2013, p. 642).

El proceso de generación de un fractal determinístico comienza con una geometría básica denominada iniciador, en la Figura 12-1 (a) se muestra un euclídeo cuadrado donde cada uno de

los cuatro lados rectos del cuadrado se reemplaza con un generador que se muestra en la parte inferior y en la Figura 12-1 (b) un lóbulo euclidiano donde el tercio medio de cada lado del triángulo se reemplaza con su propio generador. Se muestran las primeras cuatro iteraciones generadas. La tendencia de la antena fractal se puede deducir observando varias iteraciones del proceso (Balanis, 2013, p. 642).



**Figura 12-1.** Proceso de generación iterativo: (a) Isla de Minkowski, (b) Lazo de Koch

Fuente: (Balanis, 2013, p. 643)

### 1.4.3. Antenas fractales

Las antenas fractales se basan en la geometría fractal, es decir es generada por formas recursivas con dimensiones fraccionarias representadas a escala. Una antena fractal pretende utilizar eficientemente el espacio disponible también conocido como relleno del espacio (Balanis, 2013, p. 642).

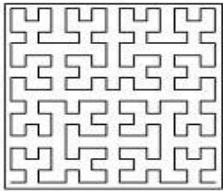
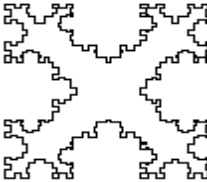
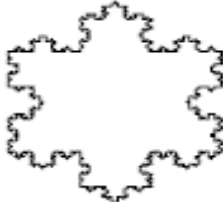
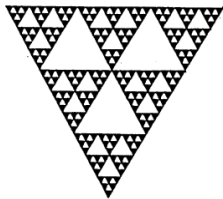
Las antenas fractales son multibanda y banda ancha ya que la estructura fractal se genera a partir de un proceso recursivo donde la geometría y las formas complejas determinan un menor tamaño de la antena y determinan las frecuencias de operación. Es posible obtener bajo factor de calidad y anchos de banda más grandes. Los sistemas de comunicación inalámbrica pretenden diseñar antenas pequeñas con banda ancha para facilitar la comunicación personal con la utilización de dispositivos de tamaño estándar (Balanis, 2013, p. 642) (Oraizi & Hedayati, 2011, p. 67).

Las especificaciones que la antena sea pequeña implican limitaciones en su diseño. Se señala que el ancho de banda de una antena encerrada en una esfera de radio  $r$  puede mejorar con la utilización eficiente de una configuración geométrica. Para mejorar el ancho de banda en el diseño de antenas se considera la tecnología Microstrip (Balanis, 2013, p. 642).

#### 1.4.3.1. Diseños de antenas fractales

La geometría fractal se utiliza en el diseño de antenas eléctricamente pequeñas algunos diseños conocidos son la curva de Hilbert, la isla de Minkowski, monopolos con geometría Koch (dipolo y lazo de Koch), con geometría Sierpinski (monopolo y triángulo de Sierpinski), matriz lineal de Cantor, curvas de Smale, etc. Estos diseños de antenas tienen mejores características de radiación y se emplean en aplicaciones de radio. Además, poseen características deseables: perfil bajo, tamaño compacto, multibanda y banda ancha. La propiedad autosimilitud se encuentra en antenas multifrecuencia como es el triángulo de Sierpinski (Figuroa, 2016, p. 19) (Chavka, 2007, p. 76). Los diseños mencionados se muestran en la Tabla 4-1:

**Tabla 4-1.** Diseños conocidos de antenas fractales

Curva de Hilbert	
Isla de Minkowski	
Geometría Koch	
Geometría Sierpinski	

Fuente: (Balanis, 2013, pp. 643–644) (<http://www.asociacionceat.org/aw/2/peano.htm>)

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

#### *1.4.3.2. Aplicación de antenas fractales*

Las antenas fractales son una opción para cumplir con requerimientos de miniaturización, multibanda y ancho de banda presentes en algunas aplicaciones en sistemas de telecomunicación. Al cumplir con los requerimientos y con las características mencionadas anteriormente hacen posible que las antenas fractales sean aplicadas en sistemas móviles celulares tanto en las estaciones base como en los teléfonos celulares. En redes 3G y 4G permiten la integración de servicios porque pueden operar en diferentes bandas siendo una solución económica y reduciendo el impacto visual que se produce cuando se utiliza muchas antenas (Rodas, 2010, p. 106).

Considerando la capacidad de miniaturización de las antenas fractales se pueden implementar en sistemas que se necesite una antena embebida dentro de un dispositivo como por ejemplo en dispositivos portables.

### **1.5. Frecuencia de Operación**

Es la frecuencia a la cual una antena tiene resonancia, es decir, en la cual radia potencia al espacio libre. Por este motivo también se denomina frecuencia de resonancia. La frecuencia de operación define el tamaño de la antena. Mientras más alta es la frecuencia de operación más pequeño es el tamaño de la antena y viceversa. La resonancia de una antena ocurre cuando la componente imaginaria de la impedancia es igual a cero esto quiere decir que a la frecuencia de operación, una antena es puramente resistiva (Herrera & Inclán, 2004, p. 22).

#### *1.5.1. Servicios inalámbricos a frecuencia de 2.4 GHz*

Las redes WLAN trabajan en las bandas de frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz y permiten la comunicación mediante sistemas inalámbricos. Además, presentan dinamismo para establecer conexión y se pueden adaptar a diferentes aplicaciones (Zurita, 2017, p. 10).

##### *1.5.1.1. IEEE 802.11*

El protocolo IEEE 802.11 se encuentra dentro de las redes WLAN. Este protocolo es la versión estándar para que un dispositivo pueda conectarse hacia la red. Trabaja en dos capas del modelo OSI que son la MAC y la física. La MAC determina las reglas de acceso al medio y envió de datos mientras que de los detalles de transmisión y recepción de datos se encarga la capa física. Existen varias versiones, pero las que trabajan en la frecuencia de 2.4 GHz son 802.11b (Wifi) y

802.11g (acceso de alta velocidad a Internet). Este último se considera como una evolución del primero. Al ser compatibles es posible la coexistencia de ambas dentro de una misma red (Yunquera, 2015, p. 43). Las características se muestran en la Tabla 5-1.

#### 1.5.1.2. Bluetooth

Es un estándar global de corto alcance, baja potencia y bajo costo. Está orientado a la tecnología inalámbrica que permite a los dispositivos comunicarse entre sí mediante un enlace de radio. Este enlace es de corto alcance. En la actualidad está presente en los teléfonos, tablets, laptops y dispositivos portables. Las características se muestran en la Tabla 5-1.

**Tabla 5-1.** Servicios inalámbricos a 2.4 GHz.

<b>Estándar WLAN</b>	<b>802.11b</b>	<b>802.11g</b>	<b>Bluetooth</b>
<i>Organismo</i>	<i>IEEE (USA)</i>	<i>IEEE</i>	<i>Bluetooth SIG</i>
<i>Finalización</i>	<i>1999</i>	<i>2003</i>	<i>2002</i>
<i>Banda frecuencias</i>	<i>2.4 GHz (ISM)</i>	<i>2.4 GHz</i>	<i>2.4 GHz</i>
<i>Velocidad máx</i>	<i>11 Mbps</i>	<i>54 Mbps</i>	<i>0.72 Mbps</i>
<i>Interfaz aire</i>	<i>SSDS/FH</i>	<i>OFDM</i>	<i>DSSS/FHSS</i>
<i>Disponibilidad</i>	<i>&gt;1000</i>	<i>Algunos</i>	<i>Muchos</i>
<i>Nº de canales</i>	<i>3c no solapados</i>	<i>3c no solapados</i>	<i>-</i>

Fuente: (Yunquera, 2015, p. 36)

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

La frecuencia de operación de la antena microstrip con diseño fractal desarrollada en este trabajo de titulación es de 2.4 GHz. De esta manera se proyectó que la antena pueda trabajar en los servicios inalámbricos Wifi o Bluetooth.

## CAPITULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1. Introducción

En este capítulo se describe paso a paso cada una de las etapas del proceso de diseño e implementación de la antena fractal. El proceso se enfoca en cumplir los objetivos propuestos previo al desarrollo del presente trabajo de titulación.

La primera etapa fue el estudio teórico de la metodología de diseño según la tecnología microstrip considerando la frecuencia de operación a 2.4 GHz, las características físicas que debe poseer la antena y hacia que servicio está orientada la antena. Fue necesario desarrollar al mismo tiempo el estudio de la metodología de diseño con geometría fractal para determinar la forma y tamaño final del parche microstrip para esto se aplicó una investigación documental.

En la segunda etapa se realizó la simulación del diseño de la antena microstrip basada en geometría fractal. El software que se utilizó bajo la versión de prueba es Ansoft Designer. En el diseño y simulación se consideró las limitaciones dimensionales de los dispositivos portables. Fue necesario controlar estas variables hasta lograr optimizar el diseño y funcionamiento de la antena para este paso se aplicó una investigación experimental.

La tercera etapa fue la implementación de la antena, el material utilizado es denominado Rogers 4003C®, el cual posee características de flexibilidad. Posterior se realiza la aplicación de la antena dentro del prototipo de dispositivo portable que se construyó por la necesidad de ejemplificar la aplicación de la antena. Esta etapa se desarrolló mediante investigación de laboratorio.

Finalmente se evaluó el funcionamiento de la antena mediante pruebas de laboratorio, posterior se tabuló los datos obtenidos de las mediciones. Fue necesario procesar los datos mediante Matlab el cual permitió observar el comportamiento de la antena, así también el patrón de radiación. Esta etapa se desarrolló bajo la investigación de laboratorio y experimental.

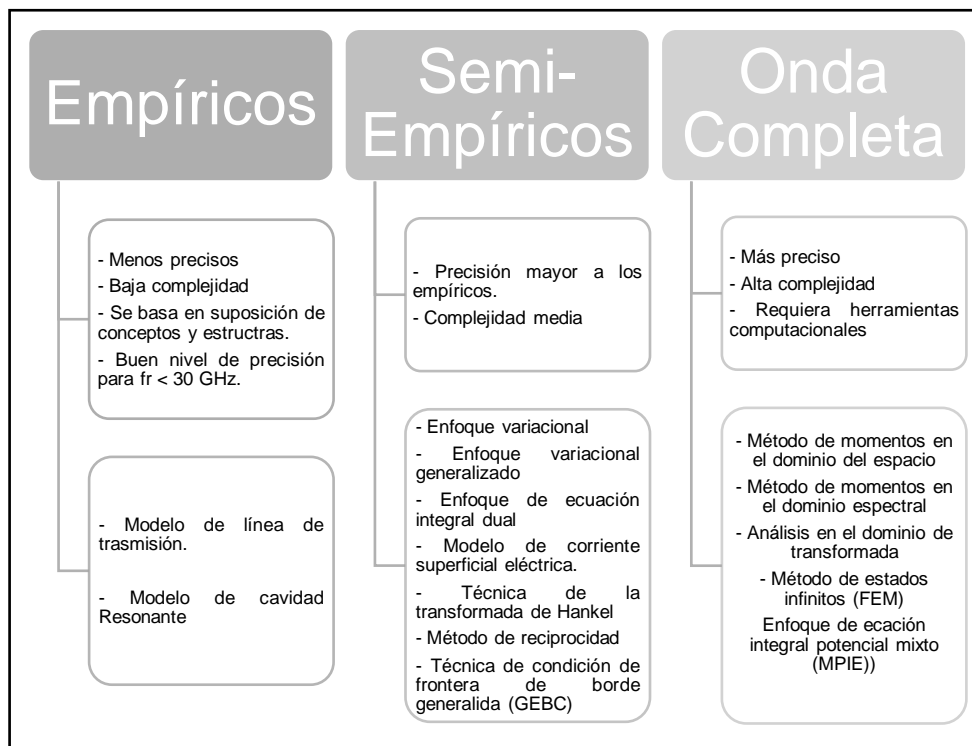
El presente trabajo de titulación se desarrolló en base a la metodología de diseño de una antena microstrip propuesta por Ramírez & Urquiza (2010, pp. 38–40) y para la reducción del tamaño del parche de la antena se realizó considerando las técnicas de miniaturización de antenas microcintas propuesta por Estela (2017, pp. 28–38).

## 2.2. Diseño del parche fractal microstrip

En el Capítulo I se desarrolló la primera etapa del estudio de la tecnología microstrip donde se abarca los temas teóricos respecto al diseño y construcción de antenas microstrip. Se aprendió las características generales, los tipos de alimentación posibles con que se puede alimentar una antena microstrip y el tipo de materiales que se puede utilizar para su implementación.

### 2.2.1. Métodos de análisis de antenas microstrip

La segunda etapa de estudio se reservó para esta sección debido que para la correcta metodología de diseño es importante tener presente los diferentes métodos de análisis de una antena microstrip. Existen varios modelos para realizar el análisis, en esta vez se revisa a simple hecho tres de las principales categorías, pero se profundiza solo en una de ellas. Las tres categorías descritas en Martínez & Jimenez (2010, pp. 41–46) se muestran en la Figura 1-2.

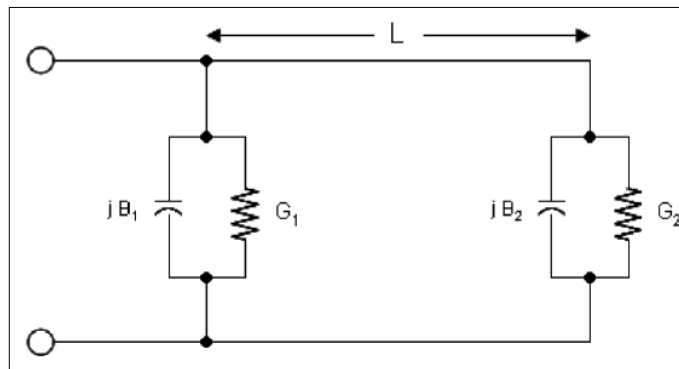


**Figura 1-2.** Categorías de los métodos de análisis de antenas microstrip

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 2.2.1.1. Modelo de la línea de transmisión

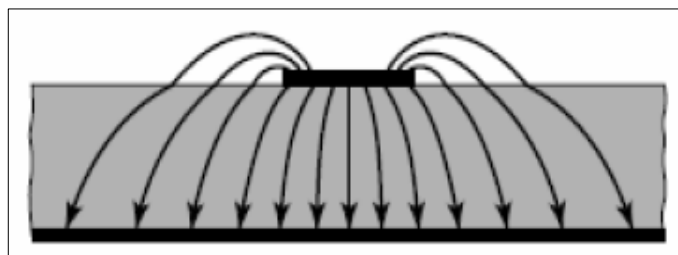
Es un modelo para diseño de antenas microstrip utilizado para desarrollar parches de forma rectangular o circular. Es de fácil interpretación, pero carece de precisión en el diseño. El modelo de la línea de transmisión considera los bordes de la antena como dos slots o aperturas que irradian energía. Cada uno de los slots está definido por una medida. Estas medidas se describen como  $W$  (ancho de la antena) y  $L$  (largo de la antena). Se considera que los slots son admitancias complejas que están compuestas por una conductancia  $G$  y susceptancia  $B$  (Martínez & Jimenez, 2010, p. 43). El circuito equivalente del modelo de línea de transmisión se muestra en la Figura 2-2.



**Figura 2-2.** Modelo de la línea de transmisión

Fuente: (Martínez & Jimenez, 2010)

La distribución de la radiación considerada en los bordes de la antena se denomina fringing effects lo que significa que es un efecto de interferencia por difracción en los bordes. Esto depende de la frecuencia de operación de la antena y del material sustrato. Este efecto se presenta en el aire y en el sustrato. En cada uno de estos medios se posee diferentes constantes dieléctricas por lo que existe diferente distribución de campo. En la Figura 3-2 se observa una representación:



**Figura 3-2.** Efecto fringing en los bordes de antena

Fuente: (Martínez & Jimenez, 2010)



Este modelo idea la forma de combinar los dos medios mediante el cálculo de una sola constante dieléctrica denominada permitividad eléctrica efectiva ( $\epsilon_{ref}$ ). La permitividad eléctrica determina la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico. Es decir, la permitividad ayuda a que la antena se adapte al medio. Por esta razón es importante que el dimensionamiento de la antena no solo este en función de la frecuencia sino también de la permitividad.

En este trabajo de titulación se eligió el modelo de la línea de transmisión para el diseño de la antena considerando que la antena se implementará en un prototipo de dispositivo portable. Por este motivo el modo de alimentación es por línea de transmisión esperando llegar a la realidad de la forma en como es dispuesto los componentes electrónicos dentro del espacio de circuitería en un dispositivo.

### ***2.2.2. Diseño de antena microstrip a 2.4 GHz***

La metodología propuesta en Ramírez & Urquiza (2010, p. 47) inicia con la elección del material substrato sobre el cual se realizó el diseño, segundo, el cálculo de las dimensiones de la antena porque depende del tipo de material utilizado y posteriormente se calculó los parámetros de una antena que ya se especificó en el Capítulo I. Luego de obtener el diseño original del parche se modificó la forma y tamaño del diseño con la aplicación de los conceptos de la geometría fractal. A continuación, se describe cada uno de los pasos de la metodología de diseño:

#### ***2.2.2.1. Elección del material substrato***

El substrato debe cumplir con los requerimientos necesarios que se pretende para la antena. Por ejemplo: espesor, permitividad dieléctrica, factor de disipación tangencial, su variación en función de la temperatura y frecuencia, etc. No existe un substrato ideal todo está en función de la aplicación de la antena.

En este caso los requerimientos del substrato necesario para el diseño e implementación fueron:

- Espesor delgado, de esta manera la antena adquiere características de flexibilidad.
- Alta permitividad dieléctrica, permite diseños más pequeños del parche microstrip.
- Bajo factor de disipación tangencial, controla que no exista altas pérdidas en el material.

Después del análisis de diferentes tipos de substratos se eligió el material Rogers de la serie 4000®. En la Tabla 1-2 se muestra las propiedades de este material.

**Tabla 1-2.** Propiedades del material RO4003C

Nombre	Rogers
Serie	RO4003C
Tipo	Poliéster/cerámico
Frecuencias	Microondas – altas frecuencias
Espesor	0.254 mm
Constante dieléctrica $\epsilon_r$ , para proceso	$3.38 \pm 0.05$
Constante dieléctrica $\epsilon_r$ , para diseño	3.55
Factor de disipación tangencial	0.0021 ~ 2.5 GHz

Fuente: (Rogers, 2015)

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 2.2.2.2. Dimensionamiento de antena microstrip a 2.4 GHz

El dimensionamiento del parche microstrip a frecuencia de operación de 2.4 GHz se define mediante el cálculo de las ecuaciones descritas en esta sección. Los datos necesarios para el cálculo se detallan en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2.** Datos para el dimensionamiento de la antena

Datos	
Frecuencia	2.4 GHz
Velocidad de la luz	$3 \times 10^8$ m/s
Espesor del substrato	0.254 mm
Constante dieléctrica $\epsilon_r$ , para diseño	3.55
Ancho de la línea de transmisión proporcionado por el fabricante	0.56 mm

Fuente: <https://www.rf-microwave.com/en/rogers-corp/ro4003c-0100-5ed-5ed/double-side-laminate-with-polyester-ceramic-dielectric/ro4003-10-05-192x220/#>

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

1. Longitud de onda.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

**Ecuación 1-2.** Longitud de onda

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9} = 125 \text{ mm}$$

2. Ancho del parche

$$We = \frac{c}{2 * f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

**Ecuación 2-2.** Ancho del parche

$$We = \frac{3x10^8}{2 * 2.4x10^9} \sqrt{\frac{2}{3.55 + 1}} = 41.44 \text{ mm}$$

3. Constante dieléctrica efectiva

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 * \sqrt{1 + 12 \frac{h}{We}}}$$

**Ecuación 3-2.** Constante dieléctrica efectiva

$$\epsilon_{eff} = \frac{3.55 + 1}{2} + \frac{3.55 - 1}{2 * \sqrt{1 + 12 \frac{0.254}{41.44}}} = 3.51$$

4. Longitud efectiva del parche

$$L_{eff} = \frac{c}{2 * f * \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

**Ecuación 4-2.** Longitud efectiva del parche

$$L_{eff} = \frac{3x10^8}{2 * 2.4x10^9 * \sqrt{3.51}} = 33.36 \text{ mm}$$

5. Longitud del sustrato

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

**Ecuación 5-2.** Longitud del sustrato

$$\Delta L = (0.412 * 0.254) \frac{(3.51 + 0.3) \left( \frac{41.44}{0.254} + 0.264 \right)}{(3.51 - 0.258) \left( \frac{41.44}{0.254} + 0.8 \right)} = 0.12 \text{ mm}$$

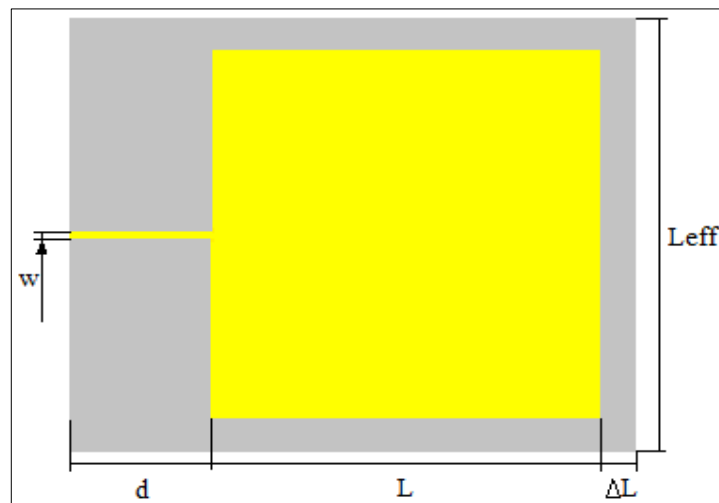
6. Longitud real del parche

$$L = L_{eff} - 2\Delta L$$

**Ecuación 6-2.** Longitud real del parche

$$L = 33.36 - (2 * 0.12) = 33.12 \text{ mm}$$

Esto significa que el parche es un rectángulo de medidas W x L (41,44mm x 33.36mm) pero para la aplicación de geometría fractal es conveniente trabajar con una estructura cuadrada. Así que se puede tomar estas medidas en la forma W x W o L x L. Se decidió por el dimensionamiento más pequeño es decir L x L. La aplicación de este arreglo en el dimensionamiento se basó en el trabajo presentado por Bahjat (2016, p. 232). Finalmente, el diseño del parche microstrip con modelo de la línea de transmisión se muestra en la Figura 4-2.



**Figura 4-2.** Antena de parche cuadrado microstrip a 2.4 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

En la Figura 4-2 se observa el diseño original del parche cuadrado, en este caso el valor de  $\Delta L$  debe conservarse alrededor de todo el parche debido a que es L x L. El valor de la longitud de la línea de transmisión “d” varía en función de la simulación, esta distancia debe ser lo suficiente para lograr eliminar la parte imaginaria de la impedancia de la antena.

### 2.2.3. Técnicas de miniaturización de antenas microstrip

El anteproyecto de este trabajo de titulación se sustentó en que la aplicación de geometría fractal sobre una estructura ayudaría a su miniaturización. Esta idea surgió al estudiar las técnicas de miniaturización de antenas microstrip descritas por Estela (2017, pp. 28–41). Las antenas microstrip son de tamaño pequeño, pero es conveniente reducir a lo máximo posible para aplicaciones que necesitan que se cumpla este requerimiento, ejemplo: teléfonos celulares. El caso propuesto en este trabajo es la aplicación en dispositivos portables ejemplificado por un smartwatch. Estela explica siete técnicas de miniaturización que se detallan en la Figura 5-2.

Por naturaleza del sustrato	•Depende de las propiedades electromagnéticas del material es decir de la constante dieléctrica del sustrato.
Por ranura en el parche	•Implementación de una ranura dentro del área del parche microstrip.
Por el uso de cargas distribuidas sobre el parche	•Cargar la antena con ranura con inductores en serie distribuidos en diferentes lugares de la antena.
Por simetría	•Consiste en ubicar puntos de simetría mediante el uso de postes metálicos entre el plano de tierra y el parche radiante.
Por forma del parche	•Modificando la geometría y forma del parche. Geometría fractal
Por el uso de estructuras periódicas EBG	•Utilización de estructuras periódicas EBG (Electromagnetic Band-Gap) que se comportan como dieléctricos artificiales.
Por metamateriales	•Uso de materiales artificiales que generan un gran número de sub-longitudes de onda u obstáculos conductores embebidos.

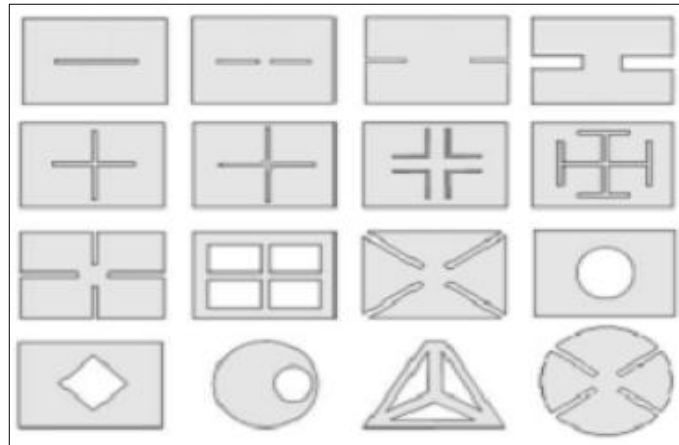
**Figura 5-2.** Técnicas de miniaturización de antenas microstrip

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

#### 2.2.3.1. Miniaturización por ranura en el parche

Esta técnica consiste en la eliminación de una o varias secciones de material conductor y/o dieléctrico del interior del área del parche microstrip. Esto genera que se modifique la distribución de corriente eléctrica del parche, produciéndose un recorrido más largo. Este efecto significa que la propagación de onda será más lenta causando una frecuencia de resonancia u operación más

baja. Sin embargo, tiene aspectos negativos en el ancho de banda de la antena, ganancia y efectividad. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 6-2 (Estela, 2017, p. 32).

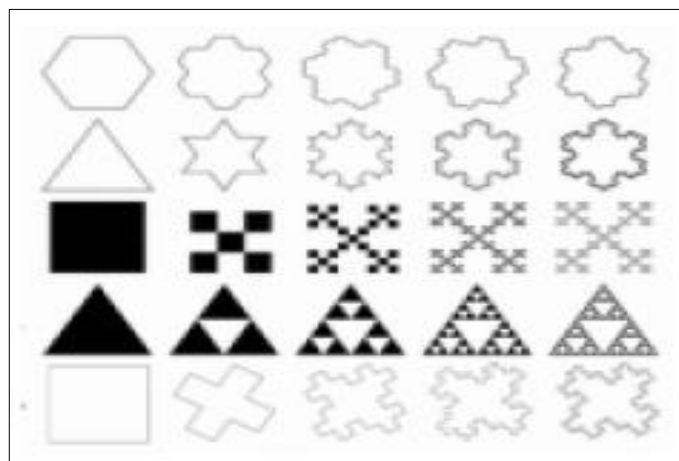


**Figura 6-2.** Tipos de ranuras para miniaturización.

Fuente: (Estela, 2017)

#### 2.2.3.2. Miniaturización por forma del parche

Es una opción para lograr una antena más pequeña y menos voluminosa. Un ejemplo clásico es la antena invertida en L que es una derivación de la antena monopolo. Lo importante de esta técnica es el cambio en la geometría de la antena. La geometría fractal o diseños fractales logran diseños que presentan buenas características de radiación para antenas microstrip. Ejemplos de geometrías fractales en diferentes iteraciones se muestran en la Figura 7-2 (Estela, 2017, p. 38).



**Figura 7-2.** Geometrías fractales para parche

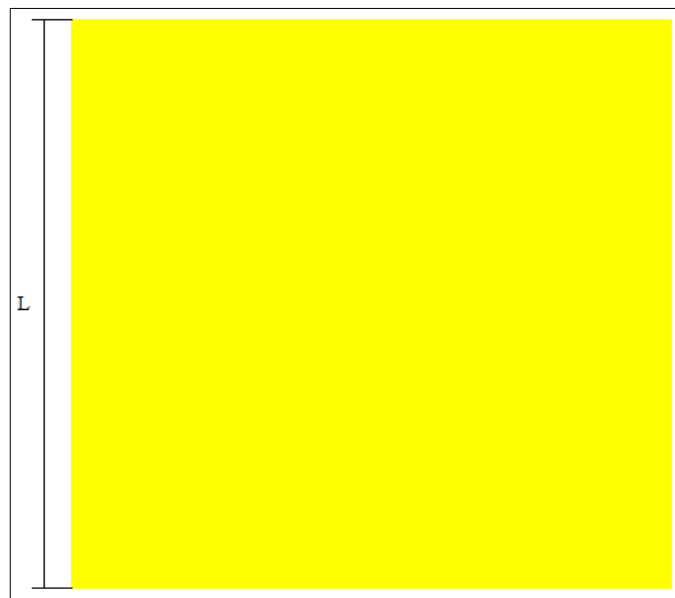
Fuente: (Estela, 2017)

#### 2.2.4. *Diseño del parche fractal microstrip miniaturizado*

Al dimensionamiento del parche original se aplicó las interacciones fractales como método de miniaturización. El número de interacciones fueron los necesarios hasta cumplir con el objetivo de miniaturizar al máximo posible la longitud del parche microstrip. El desafío de este método fue mantener la frecuencia de operación de la antena en 2.4 GHz.

La aplicación de geometría fractal en el parche microstrip consistió en realizar modificaciones en la forma en cada uno de los lados del parche cuadrado. Se propone cumplir que la sumatoria de las medidas de todos los segmentos en que se fragmente el lado modificado del parche debe ser igual a la medida original.

Se realizó dos novedosos diseños de antenas con geometría fractal. Utilizando el método comparativo se eligió el que poseía mayor porcentaje de miniaturización para ser simulado e implementado. El primer diseño está basado en el fractal de Cesareo mientras que el segundo en el fractal del T-cuadrado. El diseño original del parche cuadrado tiene por medida  $L = 33.12$  mm como se observa en la Figura 8-2. A continuación, se detalla paso a paso el proceso de dimensionamiento de los dos diseños de parche microstrip.

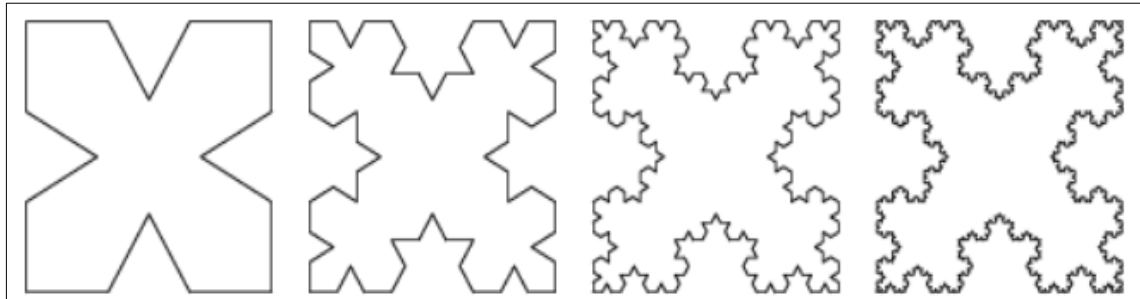


**Figura 8-2.** Parche original a 2.4 GHz

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

### 2.2.4.1. Dimensionamiento del parche con diseño fractal de Cesareo

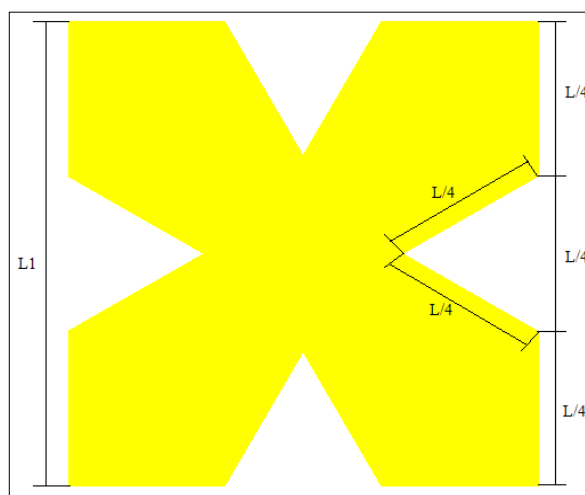
El proceso de modificación de la geometría de una estructura está relacionado con el número de iteraciones de un patrón, en la Figura 9-2 se muestra distintas iteraciones del fractal de Cesareo. A continuación, se detalla el procedimiento para la miniaturización del parche microstrip:



**Figura 9-2.** Fractal de Cesareo con cuatro iteraciones.

Fuente: [http://iesrosachacel.net/vox\\_populi\\_digital/XXVIII/paginas/4.php](http://iesrosachacel.net/vox_populi_digital/XXVIII/paginas/4.php)

1. La primera iteración se observa en la Figura 10-2 y consiste en substraer en cada uno de los lados del parche cuadrado una porción en forma de triángulo. Dónde, la nueva medida del lado del parche cuadrado es  $L_1 = 24,84$  mm. La sumatoria de todas las subdivisiones sigue siendo el valor original del parche es decir  $L$ .

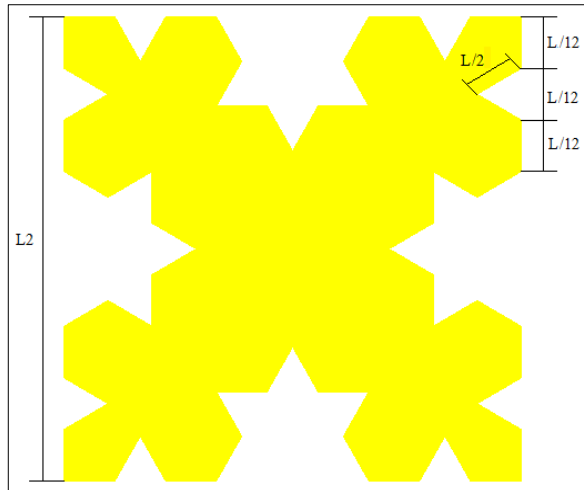


**Figura 10-2.** Primera iteración del fractal de Cesarea

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

2. En la segunda iteración se substraen en cada una de las subdivisiones una porción en forma de triángulo equilátero. Ahora el lado cuadrado del parche mide  $L_2 = 18,63$  mm como se muestra en la Figura 11-2. Se mantiene que la sumatoria de las subdivisiones es igual al lado  $L$  del parche original.



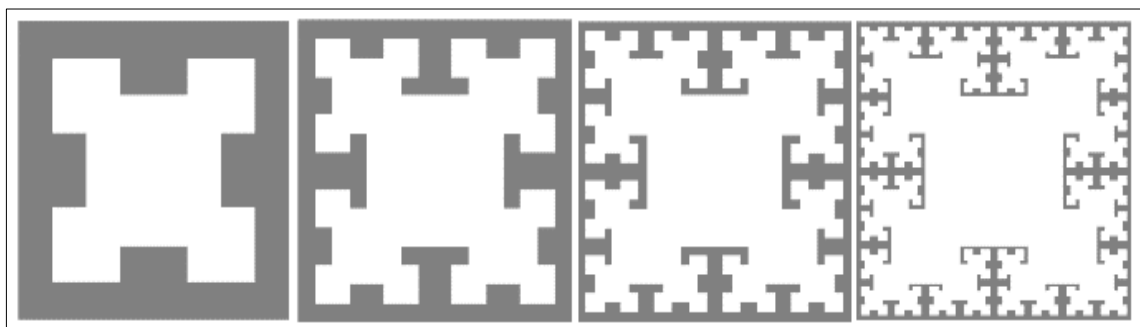


**Figura 11-2.** Segunda iteración del fractal de Cesarea

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

#### 2.2.4.2. Dimensionamiento del parche con diseño fractal del T-cuadrado

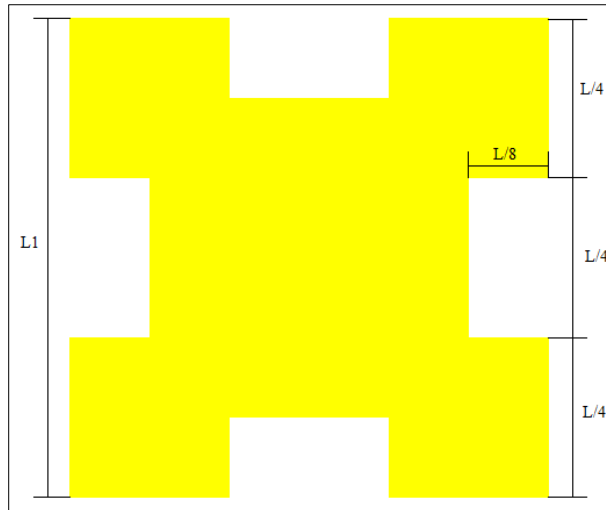
El segundo diseño que se eligió para la miniaturización del parche fue el fractal del T-cuadrado. Es un diseño que no ha sido muy aplicado por lo que hace novedoso este trabajo de titulación, en la Figura 12-2 se muestra las distintas iteraciones de este tipo de fractal. A continuación, se detalla el procedimiento de esta opción para la miniaturización del parche microstrip a 2.4 GHz:



**Figura 12-2.** Fractal del T-cuadrado con cuatro iteraciones.

Fuente: <https://www.geogebra.org/m/sn2FbBNr>

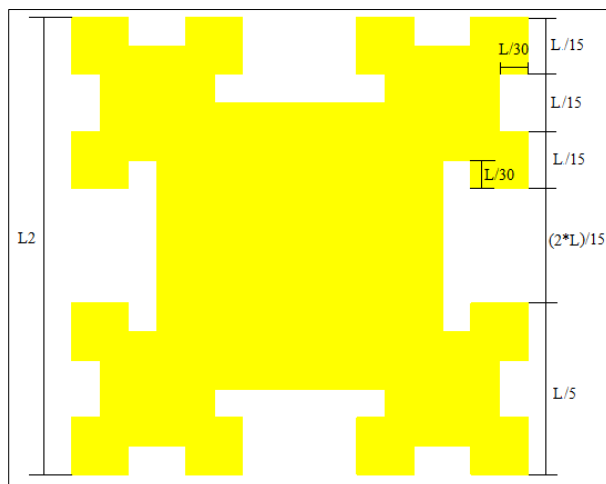
1. La primera iteración se observa en la Figura 13-2. Se substrajo en cada uno de los lados del parche cuadrado una porción en forma de rectángulo. Dónde, la nueva medida del lado del parche cuadrado es  $L_1 = 24,84$  mm. La sumatoria de todas las subdivisiones sigue siendo el valor original del parche es decir  $L$ .



**Figura 13-2.** Primera iteración del fractal del T-cuadrado

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

2. En la segunda iteración se sustrae en cada una de las subdivisiones una porción en forma de rectángulo. En la parte central de cada uno de los lados del parche cuadrado se reduce la distancia del corte para dar el aspecto de una T. En los lados internos de este corte se sustrajo solo la mitad de un rectángulo. Ahora el lado cuadrado del parche mide  $L_2 = 17,664$  mm como se muestra en la Figura 14-2. Se mantiene que la sumatoria de las subdivisiones es igual al lado L del parche original.



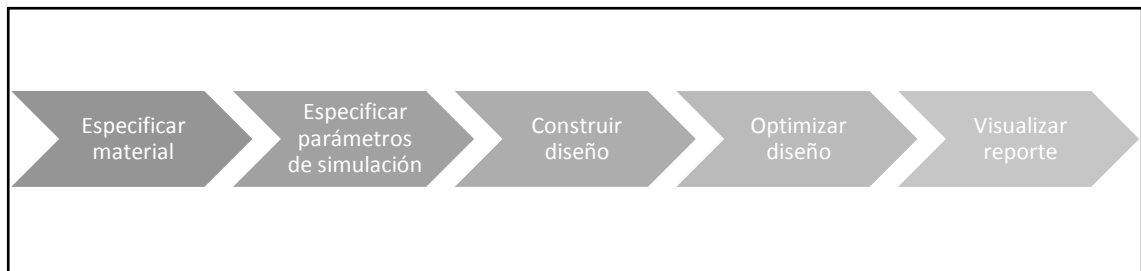
**Figura 14-2.** Segunda iteración del fractal del T-cuadrado

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

### 2.3. Simulación de antena fractal microstrip a 2.4 GHz

La simulación de la antena se realizó en el programa Ansoft Designer versión estudiante o de prueba, es un programa que permite modelar en 2D y simular estructuras diseñadas para altas frecuencias. Ansoft Designer tiene la opción de crear reportes donde se puede visualizar el comportamiento resultante de las ondas electromagnéticas posterior a la simulación.

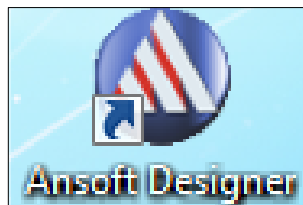
En la sección anterior ya se especificó el diseño del parche de la antena microstrip y el ancho de la línea de transmisión, pero el diseño completo de la antena se lo realizó con ayuda de la simulación con el objetivo de ir optimizando cada uno de los parámetros de la antena. Por este motivo en esta sección se muestra desde el inicio todo el proceso de simulación hasta lograr el diseño completo y optimizado. En la Figura 15-2, se especifica todo el proceso de simulación.



**Figura 15-2.** Proceso de optimización por simulación.

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

Previo a empezar todo el proceso de simulación se debe tener correctamente instalado el programa Ansoft Designer. De esta manera se evitará contratiempos a futuro. El icono de instalación de este programa se muestra en la Figura 16-2.



**Figura 16-2.** Icono de Ansoft Designer

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 2.3.1. Especificación del material substrato

El programa no cuenta con la configuración predeterminada del tipo material que se va a utilizar que es el RO4003C. Las características de este material se muestran en la Tabla 1-2. Una vez abierto el programa un nuevo proyecto de trabajo ya se ha generado. Seleccionamos el icono de insertar un diseño planar, el cual permite la construcción en 2D de la estructura de la antena.

Una vez creada el área de trabajo seleccionamos la opción de Stackup, aquí se realiza la configuración capa por capa de los materiales necesario para la construcción de la antena. Se agrega los materiales en el orden metalizesignal, dielectric y signal. Es decir, tierra, dieléctrico y cobre. Por defecto un tipo de dieléctrico es agregado. Se hace doble sobre el nombre del material dieléctrico para configurar el material que se dispone. Esto se muestra en la Figura 17-2.

	Name	Type	Material	Drag Mode	Thickness
—	c	signal	copper	middle align	0mm
▨	d	dielectric	Rogers R...		1.6mm
—	g	metalized...	copper	middle align	0mm

**Figura 17-2.** Configuración por defecto del material dieléctrico

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

Siguiendo el ejemplo de la Figura 18-2 se debe agregar la información del material con el que se diseñó. Es necesario especificar la permitividad relativa, perdidas tangenciales, espesor y el nombre de referencia. Estos datos son proporcionados por el proveedor.

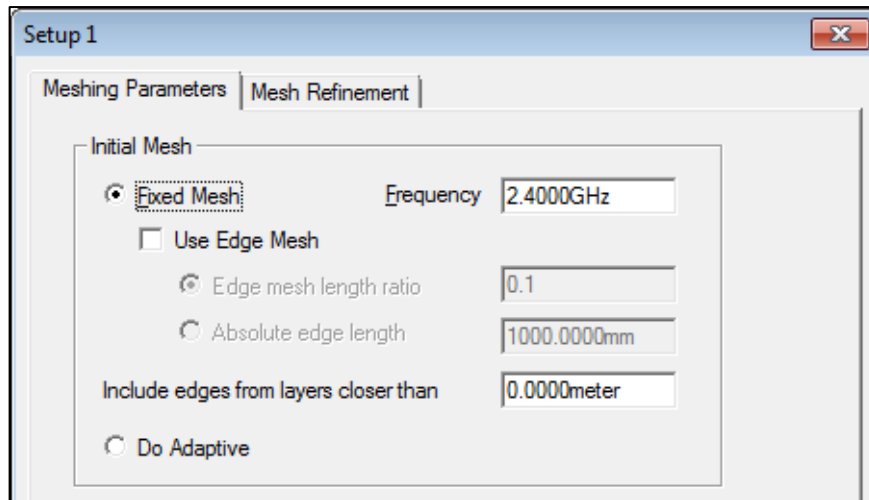
Material Name				
RO4003C				
Properties of the Material				
	Name	Type	Value	Units
	Relative Permittivity	Simple	3.55	
	Relative Permeability	Simple	1	
	Bulk Conductivity	Simple	0	siemens/m
	Dielectric Loss Tangent	Simple	0.0021	
	Magnetic Loss Tangent	Simple	0	

**Figura 18-2.** Configuración para el material RO4003C

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 2.3.2. Especificación de los parámetros de simulación

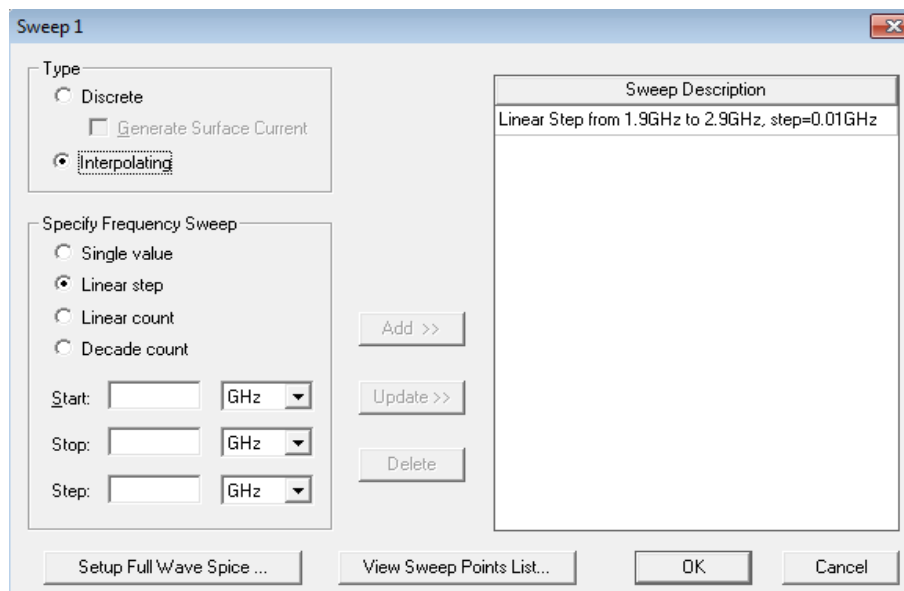
Esta configuración es para especificar la frecuencia de operación a la cual está diseñada la antena e indicar el número de puntos con los cuales se desea que se sea evaluada el funcionamiento de la antena. En la Figura 19-2 se muestra el Setup principal donde se especifica la frecuencia.



**Figura 19-2.** Configuración de Setup a 2.4 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

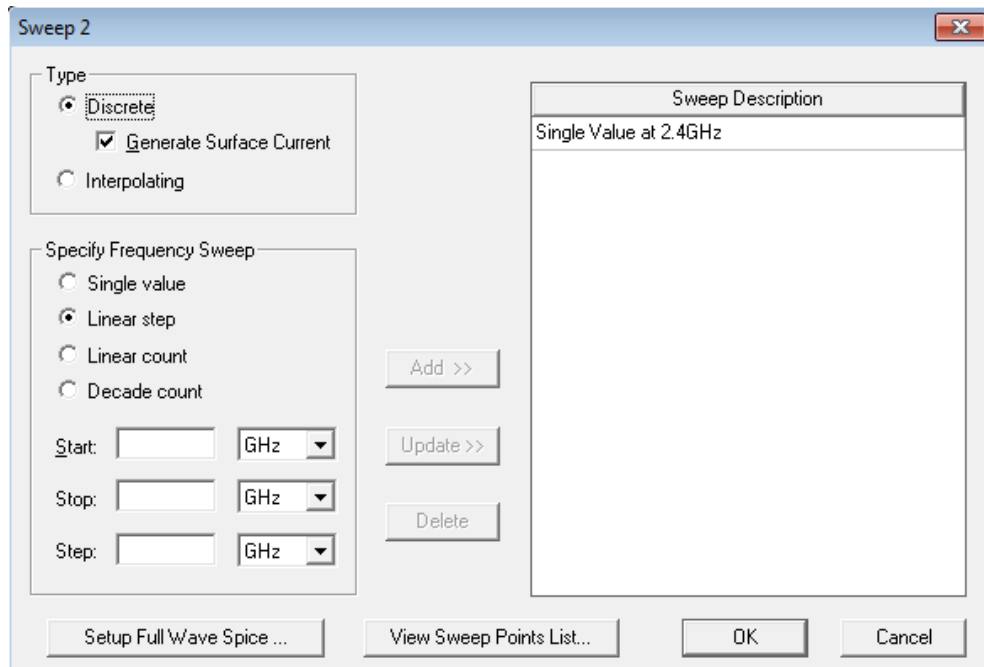
En la Figura 20-2 se muestra la configuración del primer Sweep de frecuencias. Aquí se especifica los límites de inicio y fin para el análisis del parámetro S, VSWR y Z. Es decir, el rango de frecuencias respecto a las cuales se evaluará la antena en la simulación.



**Figura 20-2.** Sweep de frecuencias de 1.9 a 2.9 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

En la Figura 21-2 se muestra el segundo Sweep de frecuencia, este es utilizado para la evaluación del patrón de radiación de la antena a frecuencia de 2.4 GHz. El tipo de análisis es discreto donde se genera una corriente de superficie. Esto es necesario para evaluar el campo radiado por la antena en Far Field siendo posible analizar el patrón de radiación.



**Figura 21-2.** Sweep de frecuencia a 2.4 GHz

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

La configuración del Setup y Sweeps es importante porque en base a estas configuraciones posterior a la construcción y simulación de cada uno de los diseños se debe analizar el comportamiento de la antena para esto se genera los reportes en base al Setup configurado previamente a la ejecución de la simulación. Los reportes finales que se necesitan son: parámetro S, VWSR y patrón de radiación.

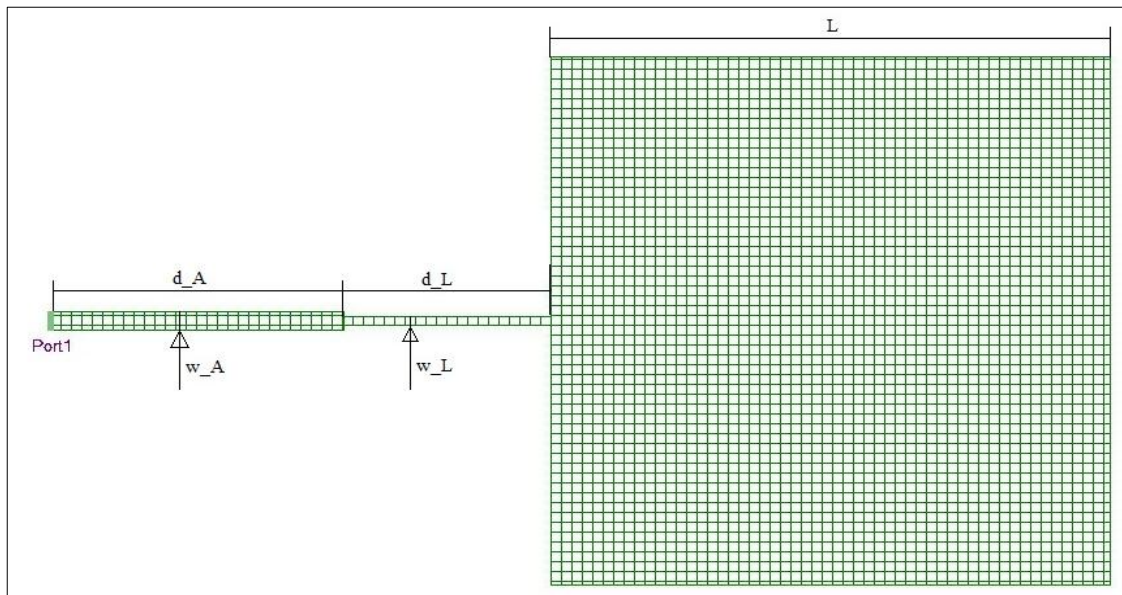
### 2.3.3. Construcción del diseño de la antena fractal microstrip

En esta sección se especifica cada una de las fases de diseño debido a que con ayuda de simulación se fueron modificando las dimensiones de las líneas microstrip de la antena. Para un mejor funcionamiento se agregó un acoplador de lambda cuartos para optimizar el parámetro S de la antena. La estructura de color verde representa la forma de la antena microstrip, es decir, la forma de la capa de cobre. La alimentación de la antena es por la línea de transmisión o Port1 como esta especificado en cada diseño.

#### 2.3.3.1. Antena microstrip a 2.4 GHz

El primer diseño que se construyó es el parche microstrip original a 2.4 GHz. Debido a las propiedades del material la línea de transmisión es muy delgada y esto generó que sea muy larga. Sin embargo, el parámetro S no fue eficiente por lo que se requirió añadir un acoplador de cuarto

de onda para reducir el efecto de reflexión de la onda que se estaba generando. Esto se muestra en la Figura 22-2. Las dimensiones de la antenna se detallan en la Tabla 3-2.



**Figura 22-2.** Antena microstrip a 2.4 GHz.

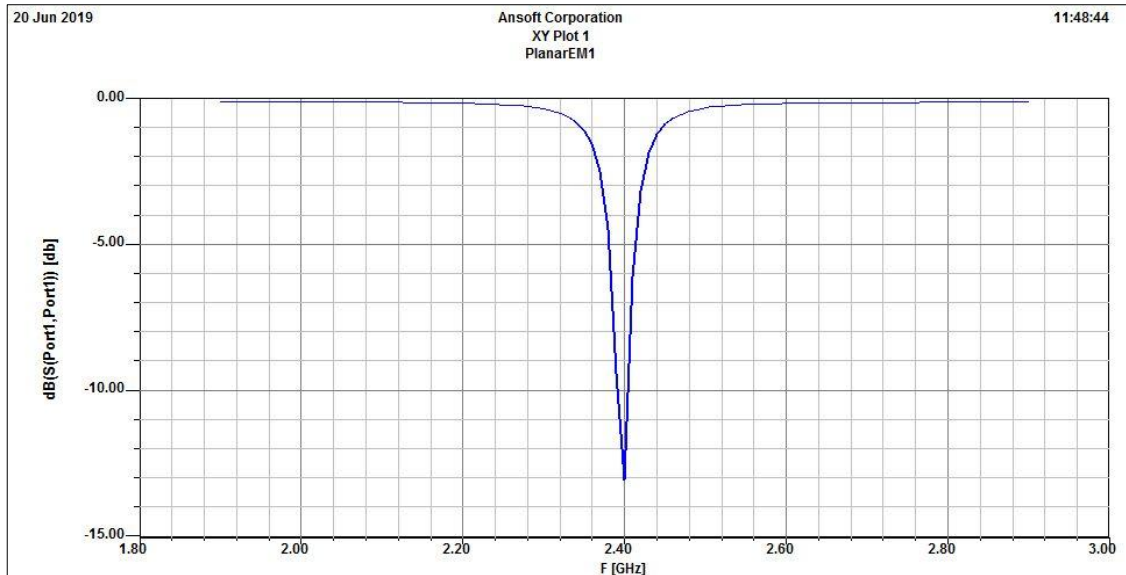
**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

**Tabla 3-2.** Dimensionamiento de la antena microstrip a 2.4 GHz

Variable	Valor	Variable	Valor
L	33.12 mm	d_A	17.4 mm
d_L	12.25 mm	w_A	1.17 mm
w_L	0.56 mm	---	---

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

Para continuar con el diseño de la antena en función de la simulación es necesario analizar el parámetro S de la antena. En la Figura 23-2 se observa que la frecuencia de operación está en 2.4 GHz por lo que se puede empezar con las iteraciones fractales para la miniaturización.

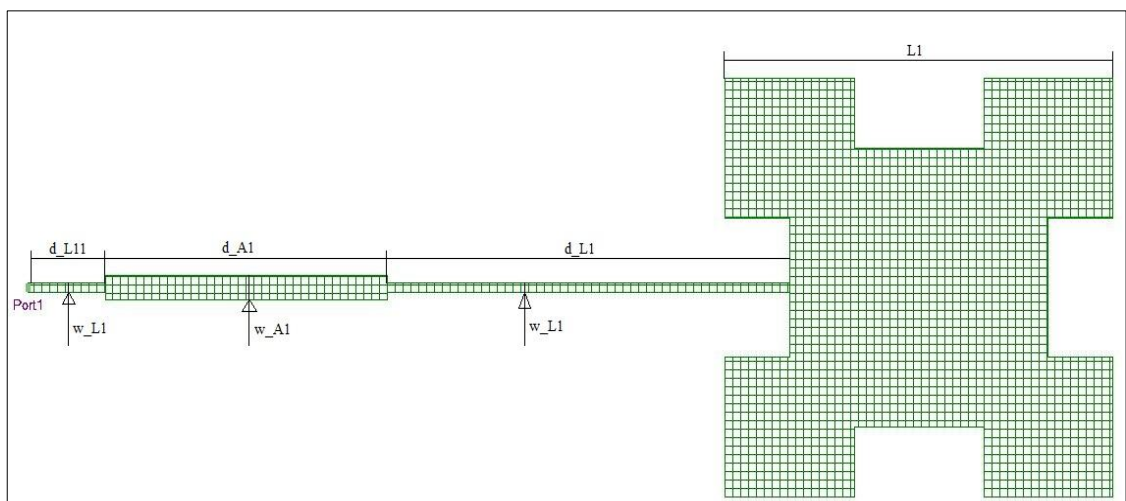


**Figura 23-2.** Parámetro S de antena microstrip a 2.4 GHz.

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

### 2.3.3.2. Primera iteración de antena fractal microstrip a 2.4 GHz

La construcción de la antena a la primera iteración se realiza con el diseño fractal del T-cuadrado. Las dimensiones del parche se especifican en la Figura 11-2. Al igual que en la antena anterior fue necesario la utilización de un acoplador de cuarto de onda como se muestra en la Figura 24-2. Las dimensiones de las líneas de transmisión fueron adaptadas a razón de obtener un buen acople de impedancias. Estas medidas se detallan en la Tabla 4-2. El parámetro S de esta antena se muestra en la Figura 25-2. Se observa que la frecuencia de operación de la antena se desplazó hasta aproximadamente 2.7 GHz.



**Figura 24-2.** Antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la primera iteración

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019



**Tabla 4-2.** Dimensionamiento de la antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la primera iteración

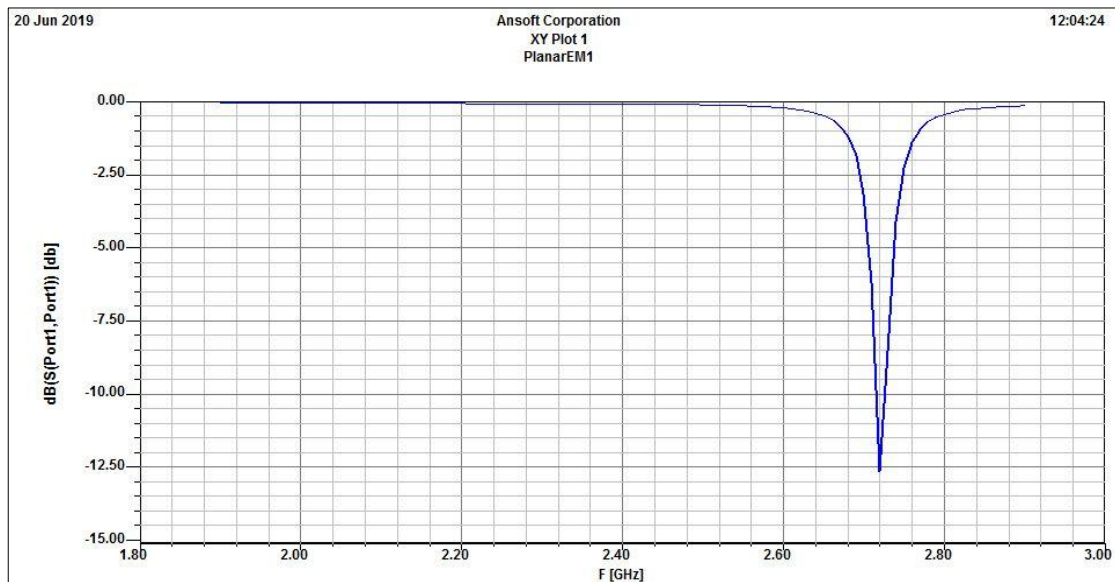
Variable	Valor	Variable	Valor
L1	24.84 mm	d_A1	18 mm
d_L1	25.785 mm	w_A1	1.46 mm
w_L1	0.56 mm	d_L11	5 mm

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

**Tabla 5-2.** Dimensionamiento de la antena fractal microstrip con ranura

Variable	Valor	Variable	Valor
L1	24.84 mm	d_A1	18 mm
d_L1	25.785 mm	w_A1	1.46 mm
w_L1	0.56 mm	d_L11	5 mm
D	8.28 mm	---	---

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

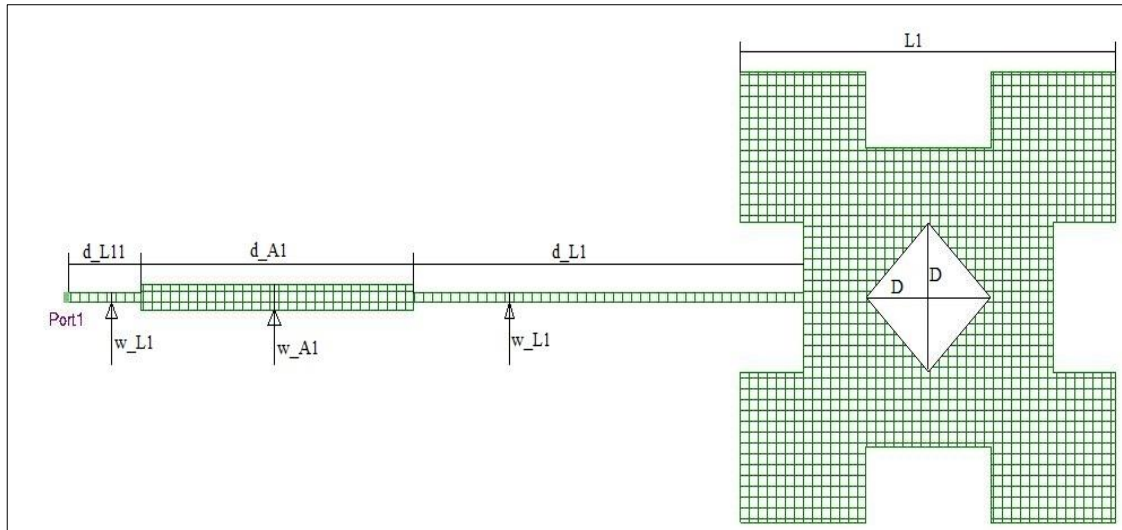


**Figura 25-2.** Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la primera iteración

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 2.3.3.3. Primera iteración de antena fractal microstrip a 2.4 GHz con ranura

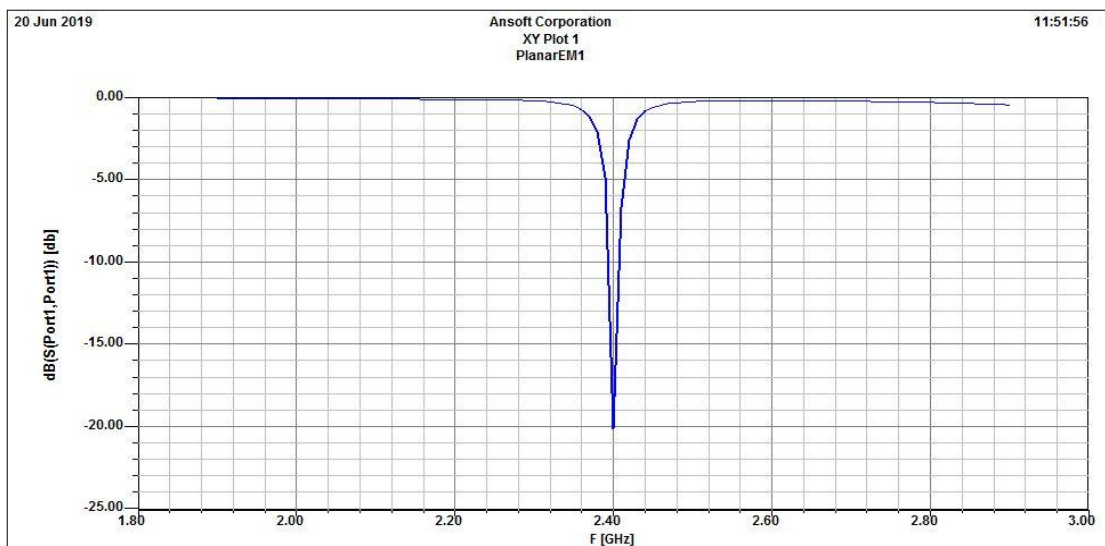
Se recuerda que otra técnica de miniaturización es la aplicación de ranura en el parche. Mediante un procedimiento empírico se define la dimensión necesaria de la ranura. En la Figura 26-2 se muestra en diseño de la antena con ranura de forma cuadrada ubicada en el centro del parche. Las medidas para la antena se detallan en la Tabla 5-2.



**Figura 26-2.** Antena fractal microstrip a 2.4 GHz con ranura

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

En la Figura 27-2 se muestra el parámetro S de la antena con ranura y se observa que la frecuencia se desplazó a 2.4 GHz. Se puede aplicar la segunda iteración a este diseño.

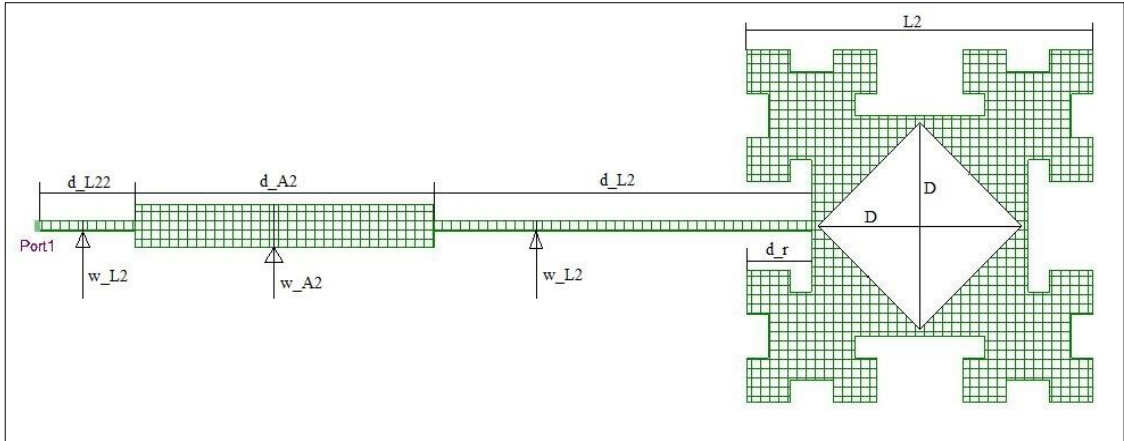


**Figura 27-2.** Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz con ranura

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

#### 2.3.3.4. Segunda iteración de antena fractal microstrip a 2.4 GHz

Se aplica la segunda iteración al diseño anterior, siguiendo un proceso empírico considerando el acople de impedancias y determinando la frecuencia de resonancia en 2.4 GHz se obtiene el diseño que se muestra en la Figura 28-2. Las medidas del diseño de la antena se especifican en la Tabla 6-2.



**Figura 28-2.** Antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la segunda iteración

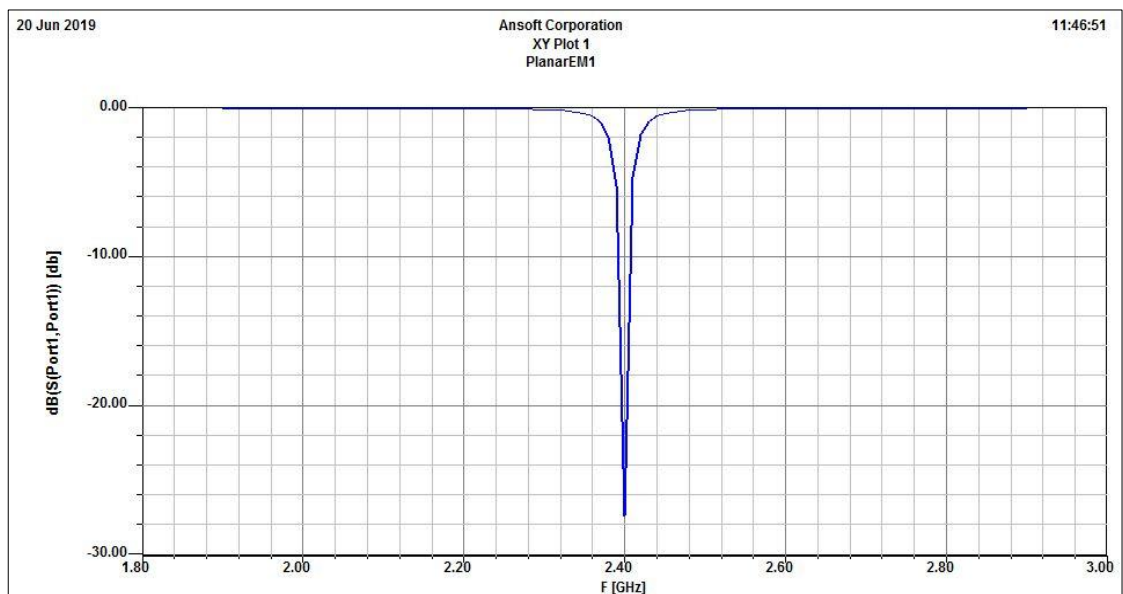
Realizado por: Valeria Hernández, 2019

**Tabla 6-2.** Dimensionamiento de la antena fractal con segunda iteración

Variable	Valor	Variable	Valor
L2	17.664 mm	w_A2	2.134 mm
d_L2	19.195 mm	d_L22	5 mm
w_L2	0.56 mm	D	10.4 mm
d_A2	15.263 mm	d_r	3.312 mm

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El parámetro S de la antena fractal microstrip con dos iteraciones se muestra en la Figura 29-2. Se observa que la frecuencia de resonancia de la antena está en 2.4 GHz.

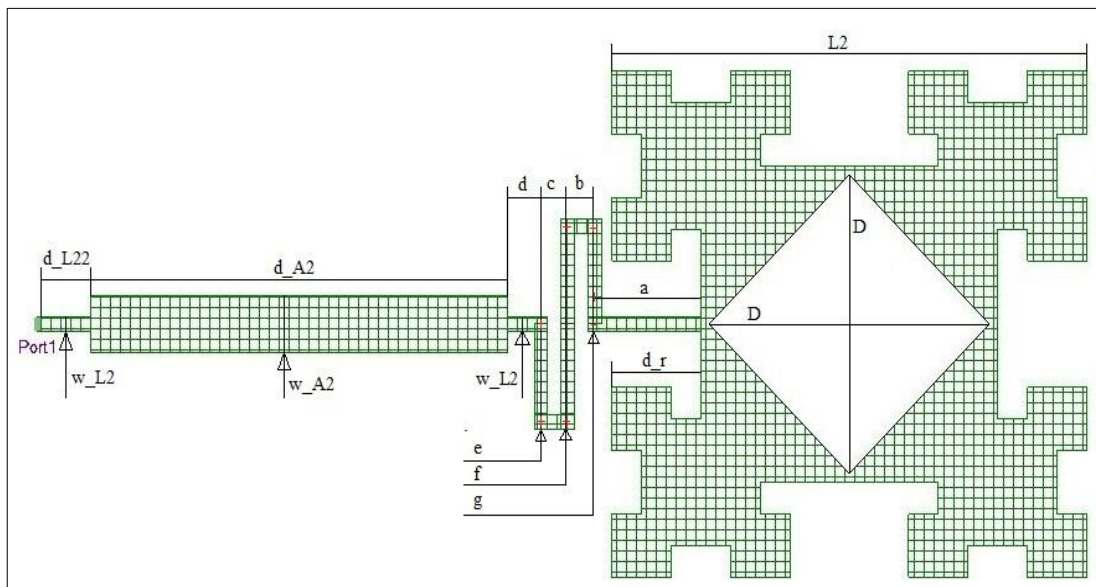


**Figura 29-2.** Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz a la segunda iteración

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 2.3.4. Optimización del diseño de la antena fractal microstrip a 2.4 GHz

La optimización de la antena fractal microstrip se realizó modificando la forma de la línea de alimentación previa al acoplador de cuarto de onda para reducir la longitud total del arreglo de la antena. La nueva forma es espiral rectangular, la distancia de la espiral es la necesaria para que la parte imaginaria de la carga previo al acoplador sea cero. El ancho de la línea de transmisión fue modificado con el propósito de mejorar el nivel del parámetro S. El diseño final de la antena fractal microstrip miniaturizada que se implementó se muestra en la Figura 30-2. Las dimensiones de la antena se indica en la Tabla 7-2.



**Figura 30-2.** Antena fractal microstrip a 2.4 GHz optimizada

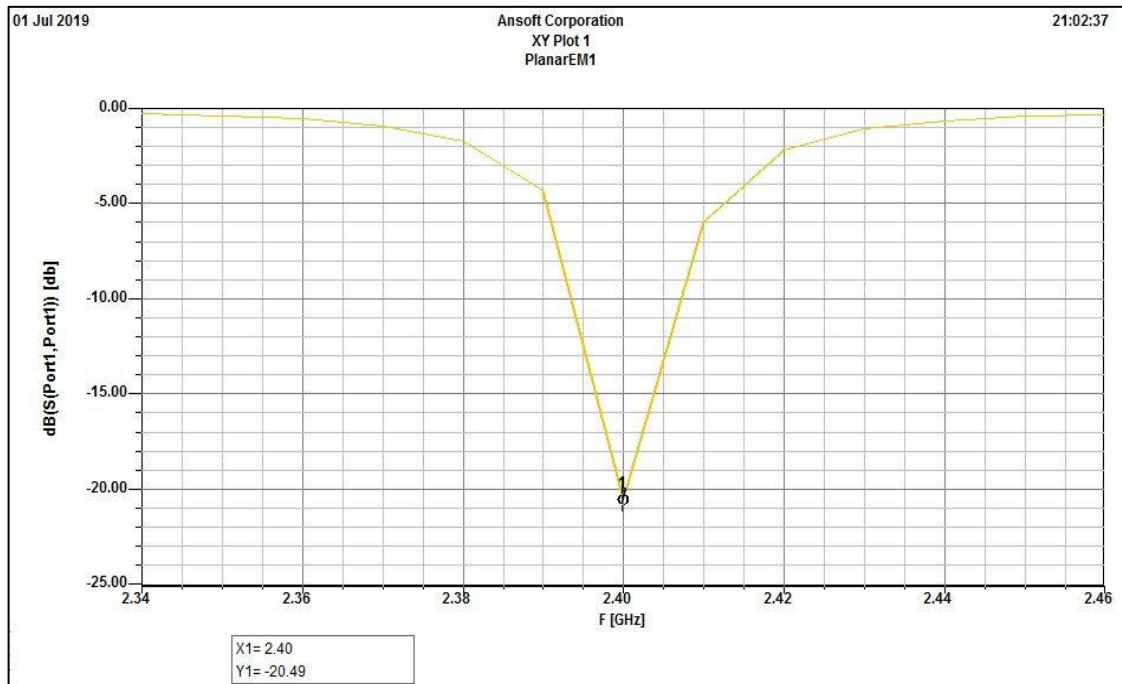
Realizado por: Valeria Hernández, 2019

**Tabla 7-2.** Dimensionamiento de la antena microstrip miniaturizada

Variable	Valor	Variable	Valor
L2	17.664 mm	a	3.95 mm
w_L2	0.5 mm	b	1 mm
d_A2	15.5 mm	c	1 mm
w_A2	1.946 mm	d	1.25 mm
d_L22	2 mm	e	3.428 mm
D	10.4 mm	f	6.85 mm
d_r	3.312 mm	g	3.428 mm

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El comportamiento del parámetro S de la antena fractal microstrip miniaturizada y optimizada se muestra en la Figura 31-2. El nivel de potencia es -20.49 dB a la frecuencia de 2.4 GHz. Cuando el valor del parámetro S de una antena supera los -10 dB se considera que la antena tiene un correcto funcionamiento.



**Figura 31-2.** Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz optimizada

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

## 2.4. Implementación de antena fractal microstrip miniaturizada a 2.4 GHz

En referencia a la simulación se determinó el diseño final de la antena fractal microstrip a 2.4 GHz a ser implementado. Para concluir este trabajo de titulación es importante disponer de la antena de forma física y mediante pruebas determinar el funcionamiento.

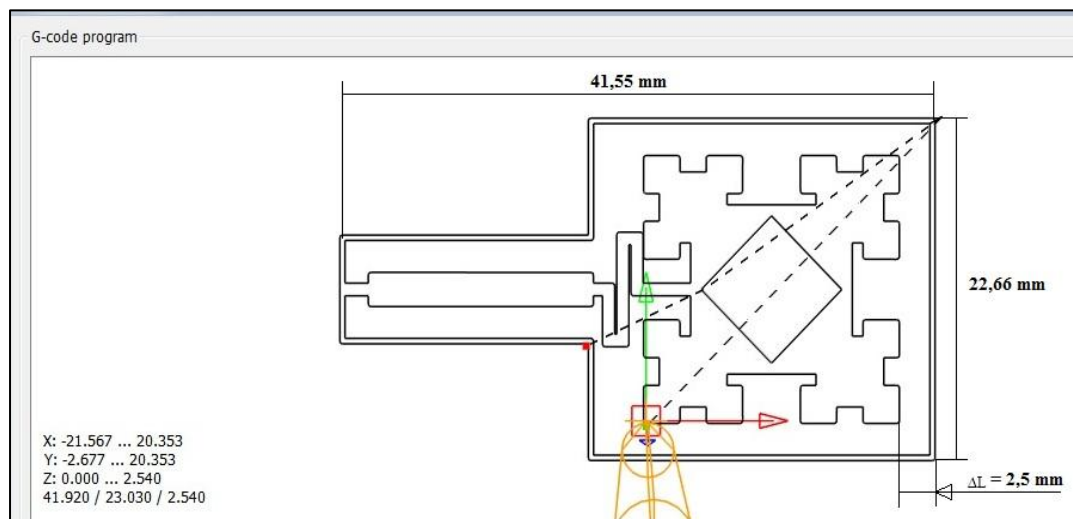
### 2.4.1. *Fabricación de la antena fractal microstrip*

Las técnicas para la fabricación de antenas microstrip son similares a las de PCB. A nivel académico la más utilizada es la de transferencia, pero no es la opción más óptima. En esta ocasión se aplicó una técnica industrial porque se busca obtener precisión en la fabricación de la antena debido a que tiene dimensiones muy pequeñas y detalles que deben ser precisos.

### 2.4.1.1. CNC Router

Esta técnica se desarrolló con la utilización de una CNC Router, esta máquina permite la fabricación de la antena mediante el tallado de la placa retirando las partes de cobre que no debe ir en la antena. El proceso de fabricación se detalla a continuación:

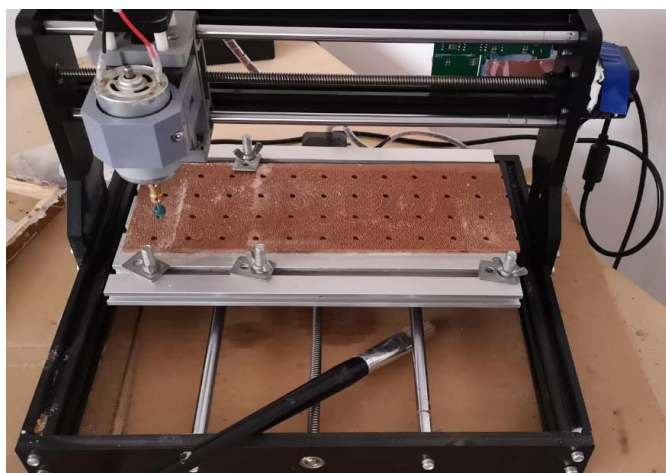
1. Exportar el diseño de la antena fractal microstrip a un archivo con la extensión .ger, este archivo se conoce como archivo Gerber y contiene información del diseño para la fabricación de la antena.
2. Rutear el diseño desde el programa a la CNC. Se utilizó el programa Gerber. En la Figura 32-2 se muestra el diseño en formato Gerber.



**Figura 32-2.** Diseño de antena fractal microstrip en Gerber

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

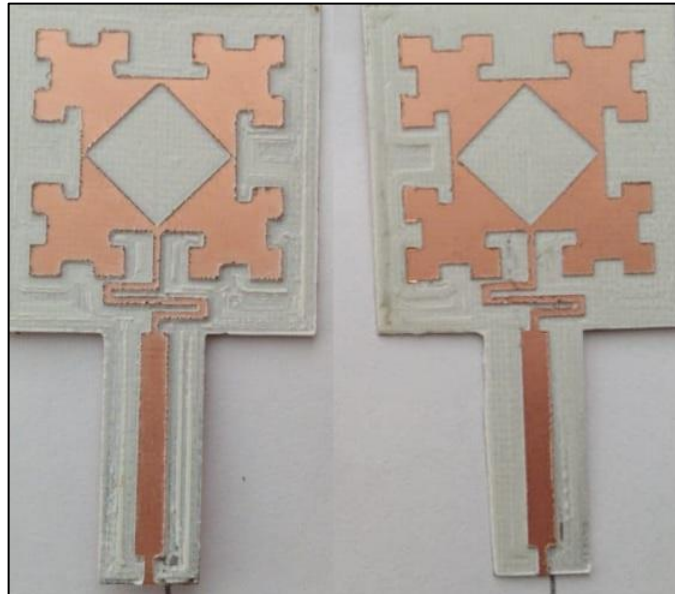
3. Fabricación de la antena, en la Figura 33-2 se muestra la máquina CNC utilizada para la fabricación de la antena.



**Figura 33-2.** Máquina CNC utilizada para fabricación

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

4. Se fabrico dos ejemplares de la antena. En la Figura 34-2 se muestra las antenas fabricada con la CNC.



**Figura 34-2.** Antenas fractal microstrip a 2.4 GHz fabricadas

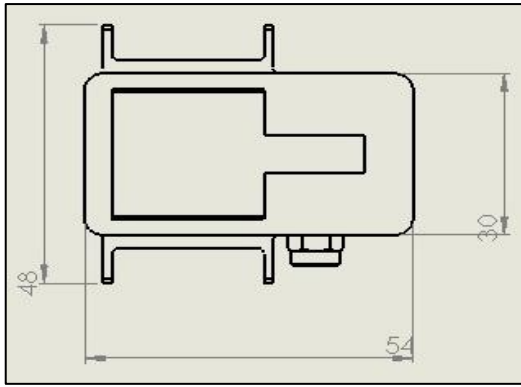
Realizado por: Valeria Hernández, 2019

#### ***2.4.2. Encapsulamiento de la antena en un prototipo de estructura de smartwatch***

Se implementó la antena dentro de un prototipo de estructura de smartwatch que se construyó para ejemplificar la aplicación en un dispositivo portable. El prototipo se construyó en una impresora 3D con material PLA en color negro.

Un smartwatch es un reloj inteligente que hoy en día pueden realizar varias funcionalidades de un teléfono celular. Es decir, un smartwatch trabaja con aplicaciones como wifi y bluetooth. Estas aplicaciones trabajan en la frecuencia 2.4 GHz, frecuencia de operación de la antena diseñada.

El prototipo se dimensionó en función de la antena fractal microstrip implementada. En la Figura 35-2 se muestra el esquema del prototipo de estructura de smartwatch. Es importante comparar con un dispositivo smartwatch funcional para determinar si el tamaño de la antena es conveniente para una implementación real. En la Figura 36-2 se muestra el esquema de un smartwatch funcional.



**Figura 35-2.** Medidas de smartwatch prototipo

Realizado por: Valeria Hernández, 2019



**Figura 36-2.** Medidas de smartwatch real

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

La implementación final del prototipo de estructura de smartwatch se muestra en la Figura 37-2. Se observa la ubicación de la antena implementada dentro del prototipo y el conector SMA para que sea factible comprobar el funcionamiento de forma similar a la implementación de la imagen 37-2.



**Figura 37-2.** Prototipo de estructura de smartwatch con antena fractal microstrip

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

## 2.5. Evaluación de funcionamiento de la antena

La evaluación del funcionamiento de la antena implementada es la última etapa del desarrollo del trabajo de titulación para lo cual se realizó pruebas de laboratorio para lo cual se utilizó un generador de onda y un analizador de espectro.

### 2.5.1. Protocolo del diseño experimental para pruebas y mediciones

La utilización de la CNC solo realiza la impresión de la antena, pero se necesita terminar la fabricación de manera manual. Para esto se necesitó otros materiales aparte de la lámina del material Rogers 4003C. Se implementó dos antenas para transmisión y recepción.



### 2.5.1.1. Materiales utilizados

- 2 Pigtail estándar 50 ohm a SMA Jack hembra (cable coaxial para GPRS)
- 2 placas plásticas para soporte
- Barniz protector de placas
- Estaño
- Cautín
- Taladro
- Broca
- Cinta scotch

### 2.5.1.2. Procedimiento

1. Hacer un hueco en el soporte plástico con el taladro y la broca. Este orificio tiene el mismo diámetro del Jack hembra del cable coaxial.
2. Fijar el cable coaxial en el soporte plástico.
3. Soldar con el cautín y estaño el extremo libre del pigtail en la línea de alimentación de la antena.
4. Comprobar continuidad de la antena entre el plano de tierra con el borde del Jack y entre el parche con el agujero hembra del Jack.
5. Aplicar el barniz protector de placas para evitar oxidación de la antena en el futuro.
6. Fijar la antena en la posición necesaria para las pruebas con la utilización de cinta scotch.

En la Figura 38-2 se muestra la antena totalmente construida para la realización de pruebas.



**Figura 38-2.** Antena implementada para pruebas

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 2.5.2. Equipos utilizados para la evaluación del funcionamiento de la antena

Los equipos que se detallan a continuación se encuentran en el laboratorio de microondas en el edificio de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH. En este lugar se efectuaron las pruebas de laboratorio.

#### 2.5.2.1. Generador de Señales Anritsu MG3690C

Es un equipo electrónico que genera señales de banda ancha que cubre frecuencias en las bandas HF, VHF, UHF. En el rango de 0,1 a 70 GHz. La salida de la señal desde el cable coaxial, en la Figura 39-2 se lo puede apreciar. Tiene una interfaz de usuario que es fácil de interactuar. El fabricante describe las siguientes ventajas: (Anritsu, 2013).

- Amplia cobertura de frecuencia.
- Mejor ruido de fase de la industria.
- Modulación de pulso mejorada.
- Rápida velocidad de conmutación.
- Modulación análoga completa.
- Potencia de salida alta.
- Fácil conFigurabilidad.



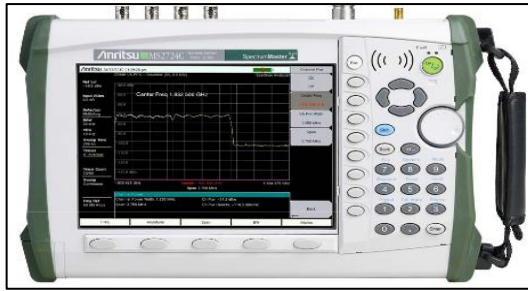
**Figura 39-2.** Generador de señales Anritsu MG3690C

Fuente: Anritsu, 2013

Nota: El datasheet del equipo se puede revisar en el anexo E

#### 2.5.2.2. Analizador de Espectros Anritsu MS2427C

Equipo electrónico que permite visualizar en pantalla las componentes de espectro que están siendo utilizadas dentro de un determinado rango de frecuencias, es posible medir ondas acústicas, eléctricas y ópticas. La pantalla está compuesta por el eje de las ordenadas o potencia de la señal medida en dB y el eje de las abscisas o frecuencia. Este equipo se muestra en la Figura 40-2.



**Figura 40-2.** Analizador de espectros Anritsu MS2724C

**Fuente:** Anritsu, 2013

El fabricante describe las siguientes características que se detallan a continuación. (Anritsu, 2013)

- Rango de frecuencias de 9 KHz a 20 GHz.
- Resolución de ancho de banda de 1 Hz a 10 MHz.
- Sensibilidad de 20 dB debido a los preamplificadores de banda ancha.

Nota: El datasheet del equipo se puede revisar en el anexo E

### 2.5.3. *Escenario para la evaluación del funcionamiento de la antena*

Previo a las mediciones de laboratorio fue necesario determinar la distancia mínima entre la antena transmisora y receptora para evaluar el campo en Far Field. Este radio se determinó con la siguiente ecuación. Donde, D es la medida más larga de la antena:

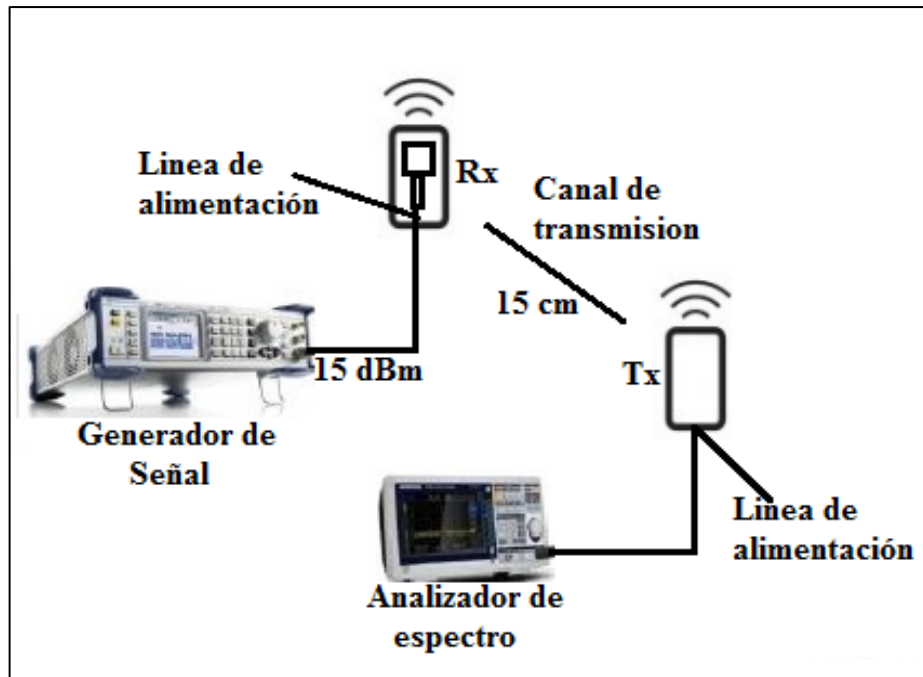
$$R2 = \frac{2D^2}{\lambda}$$

**Ecuación 7-2.** Distancia mínima para Far Field.

$$R2 = \frac{2(41.552 * 10^{-3})^2}{\frac{3 * 10^8}{2,4 * 10^9}}$$

$$R2 = 27.625 \text{ mm} \approx 28 \text{ mm}$$

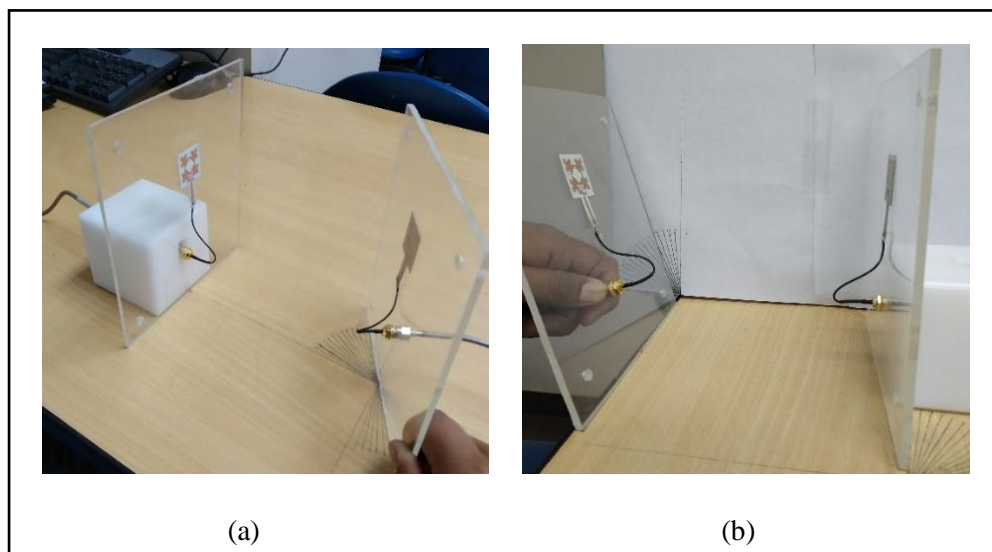
En la Figura 41-2 se observa un esquema con la posición de las antenas, el analizador de espectros conectado hacia la antena Rx y el generador de señal hacia la antena Tx. Las antenas están ubicadas a 15cm de separación. Las mediciones se efectuaron bajo estas condiciones: el generador de señal se configuró para emitir señales desde 1.9 GHz a 2.9 GHz con intervalos de 10 MHz y con potencia de salida de 15 dBm. El analizador de espectro se configuró con span de 1 GHz y con frecuencia central a 2.4 GHz. El piso de ruido detectado en el analizador de espectros se ubicó en -95 dBm. El escenario físico se muestra en el anexo B.



**Figura 41-2.** Esquema del escenario para pruebas y mediciones

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El escenario para determinar el patrón de radiación de la antena en el plano E y H, se muestra en la Figura 42-2. Para realizar las mediciones se varió la posición de la antena Tx, cada 5 grados. La toma de datos se realizó cada 15 s en cada posición, este tiempo se estima suficiente para que la señal se estabilice en cada determinada posición. Al ser iguales las antenas Tx y Rx, la variación de posición de cualquiera de las antenas no infiere en el patrón de radiación que se determine.



**Figura 42-2.** Escenario para mediciones de campo radiado. (a) Plano E, (b) Plano H

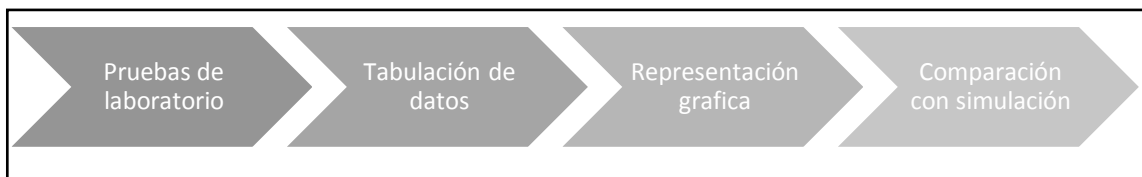
Realizado por: Valeria Hernández, 2019

## CAPITULO III

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Introducción

El análisis de resultados permite evaluar el funcionamiento de la antena fractal microstrip diseñada, se consideró los resultados de la simulación para comparar con los resultados de las medidas de laboratorio. Los parámetros que se evaluó en las pruebas de laboratorio fueron el nivel de potencia recibida y el patrón de radiación generado por la antena. El proceso de análisis de resultados se detalla en la Figura 1-3.



**Figura 1-3.** Proceso de análisis de resultados

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El desarrollo de este capítulo consiste en el análisis de los resultados de las etapas de diseño, simulación, implementación y evaluación del funcionamiento. Este capítulo permite determinar si se cumplió con los objetivos planteados al principio de este trabajo de titulación. A continuación, se desarrolla el análisis de cada una de las etapas mencionadas.

#### 3.2. Resultados de la etapa de diseño del parche fractal miniaturizado

En la etapa de diseño del parche fractal con el propósito de miniaturizarlo, se consideró dos opciones, el fractal de Cesareo y el fractal del T-cuadrado. El valor final de la longitud del parche después de dos iteraciones en cada caso se muestra en la Figura 9-2 y Figura 12-2. En la Tabla 1-3 se detalla el porcentaje de miniaturización en cada caso.

**Tabla 1-3.** Porcentaje de miniaturización del parche

Diseño	L inicial (mm)	L final (mm)	% miniaturización
Fractal de Cesareo	33.12	18,63	42.75
Fractal del T-cuadrado	33.12	17.664	46.65

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

La comparación entre el tamaño del diseño original de la antena microstrip a 2.4 GHz y el tamaño alcanzado de la antena optimizada es importante para determinar el porcentaje de miniaturización total de la antena fractal microstrip. En la Figura 19-2 y Figura 27-2 se muestra las dimensiones de las antenas mencionadas en la Tabla 2-3.

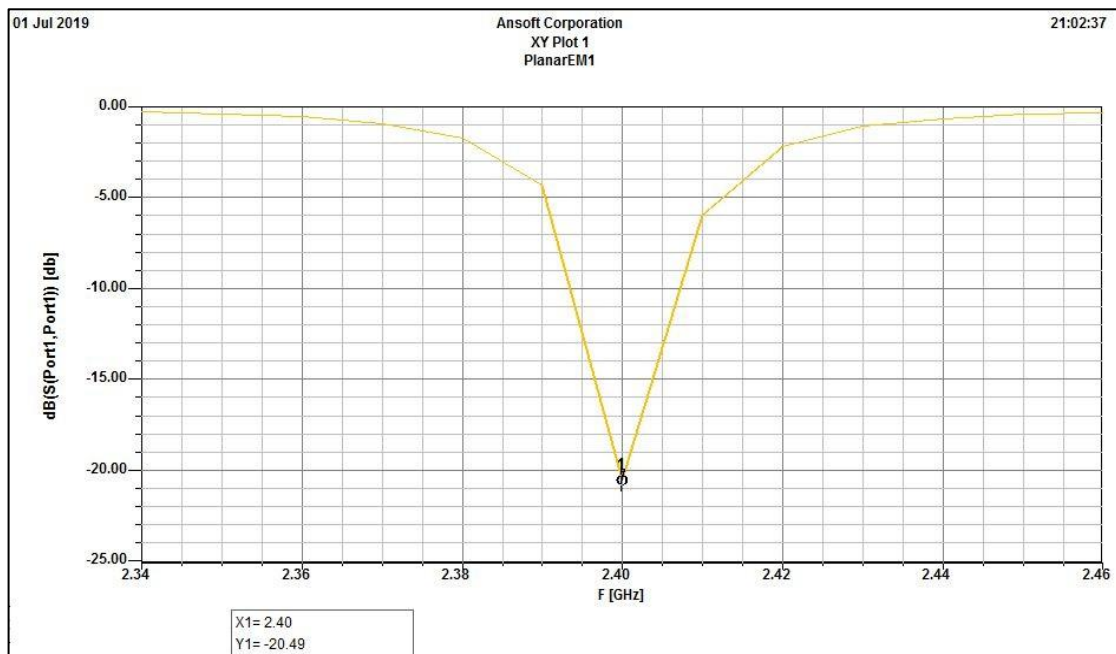
**Tabla 2-3.** Porcentaje de miniaturización del total de la antena

Antena	Dimensión máxima (mm)	% Miniaturización
Original	62.77	62.2
Optimizada	39.052	

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 3.3. Resultados de la etapa de simulación de la antena optimizada

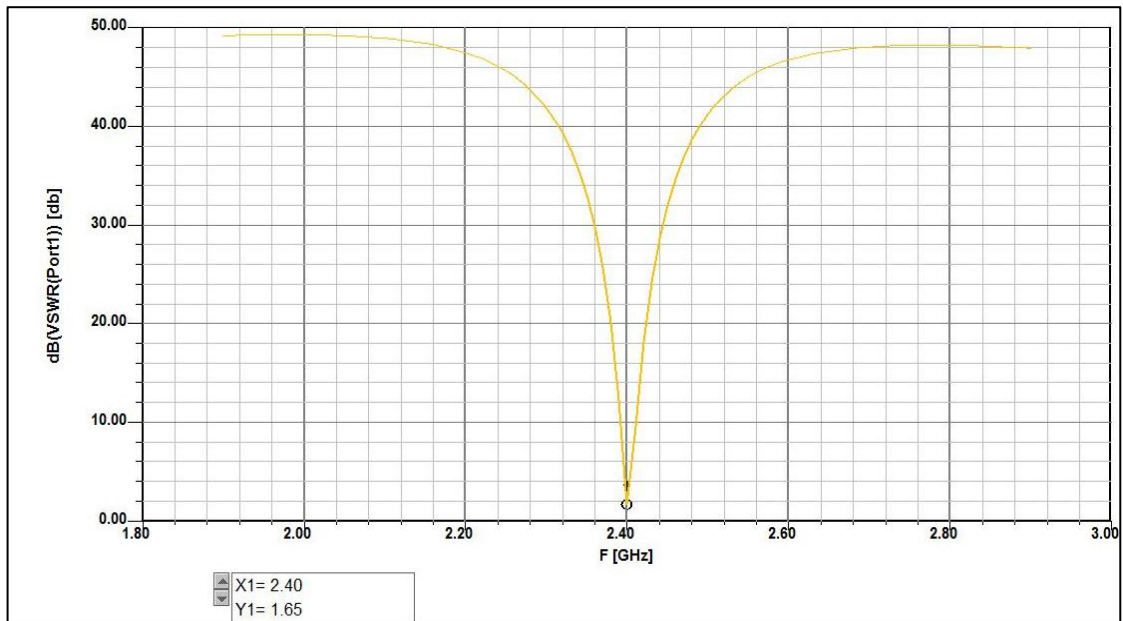
Los resultados de la simulación que se analizó son el parámetro S, el coeficiente VSWR y el patrón de radiación. Esto permite tener una referencia de cuáles serán los resultados de las mediciones de laboratorio. El comportamiento del parámetro S de la antena fractal microstrip miniaturizada y optimizada se muestra en la Figura 2-3. El nivel de potencia es -20.5 dB a la frecuencia de 2.4 GHz.



**Figura 2-3.** Parámetro S de antena fractal microstrip a 2.4 GHz optimizada

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

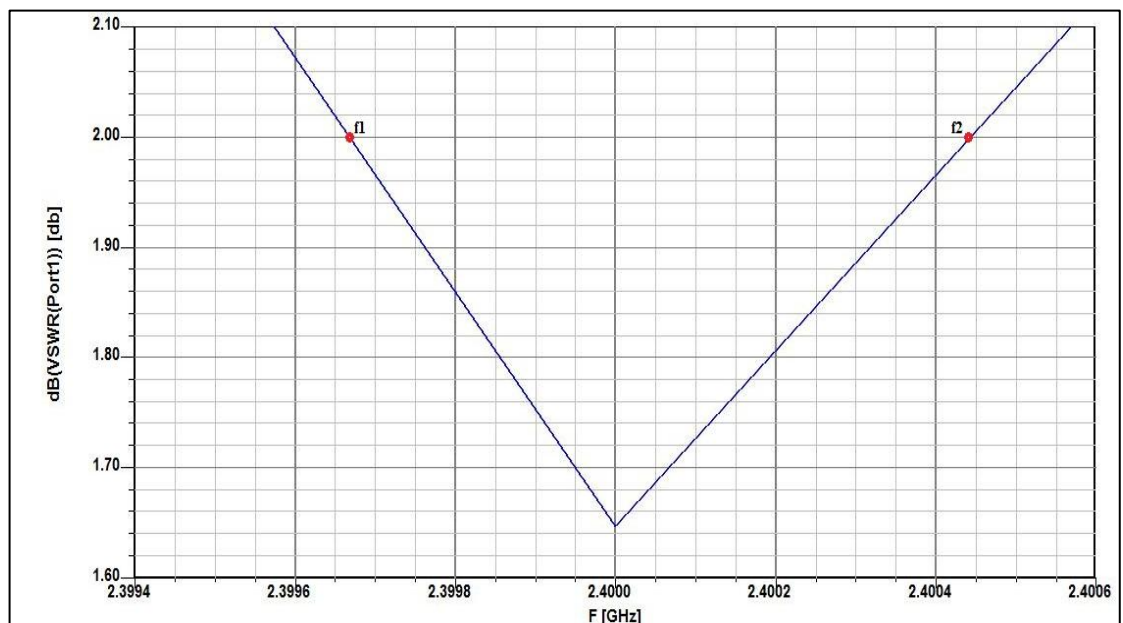
El valor del coeficiente ROE o VSWR debe ser menor a dos para que exista un buen nivel de radiación de la potencia entregada a la antenna. En la Figura 3-3 se observa la curva de este parámetro con el marcador posicionado en 2.4 GHz donde se tiene un valor de 1.65 dB.



**Figura 3-3.** Parámetro ROE de antenna fractal microstrip a 2.4 GHz optimizada

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El ancho de banda de la antenna se calculó de la curva de coeficiente VSWR con los limites en frecuencia de los puntos de corte entre la curva y el valor de dos. En la Figura 4-3 se observa los puntos para f1 y f2, donde f1 = 2.39967 GHz y f2 =2.40044 GHz.



**Figura 4-3.** Frecuencias con el parámetro VSWR igual a 2 dB

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

Con las frecuencias definidas en el parámetro VSWR igual a dos se determinó el ancho de banda en simulación con la siguiente ecuación:

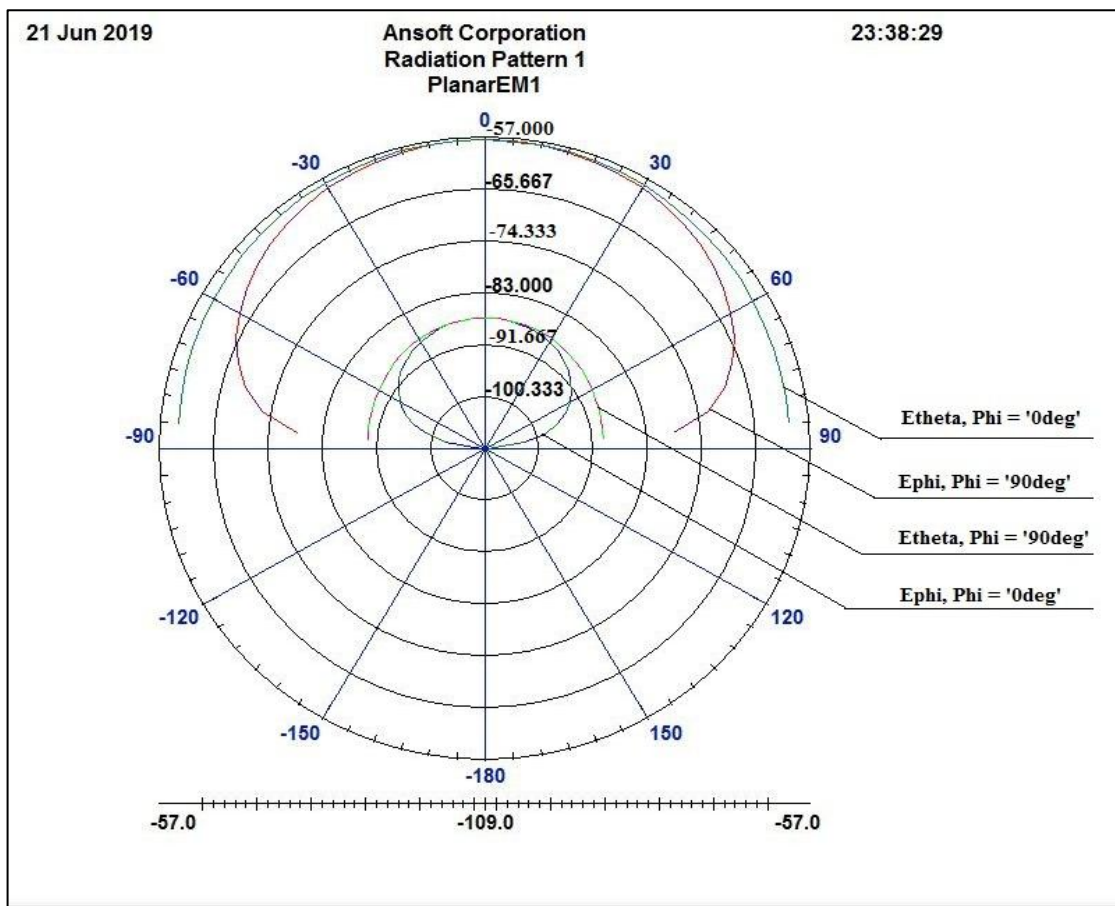
$$BW = f2 - f1$$

**Ecuación 1-3.** Ancho de banda en simulación

$$BW = (2.40044 - 2.39967)GHz$$

$$BW = 770 KHz$$

El patrón de radiación resultante de la simulación se muestra en la Figura 5-3. Se graficó el plano E y plano H en 0 y 90 grados para los diferentes ángulos de Phi y Tetha. Se observa que la antena fractal microstrip diseñada presenta un patrón de tipo omnidireccional en ambos planos. El valor máximo de radiación es aproximadamente a -57 dB en 0 grados.

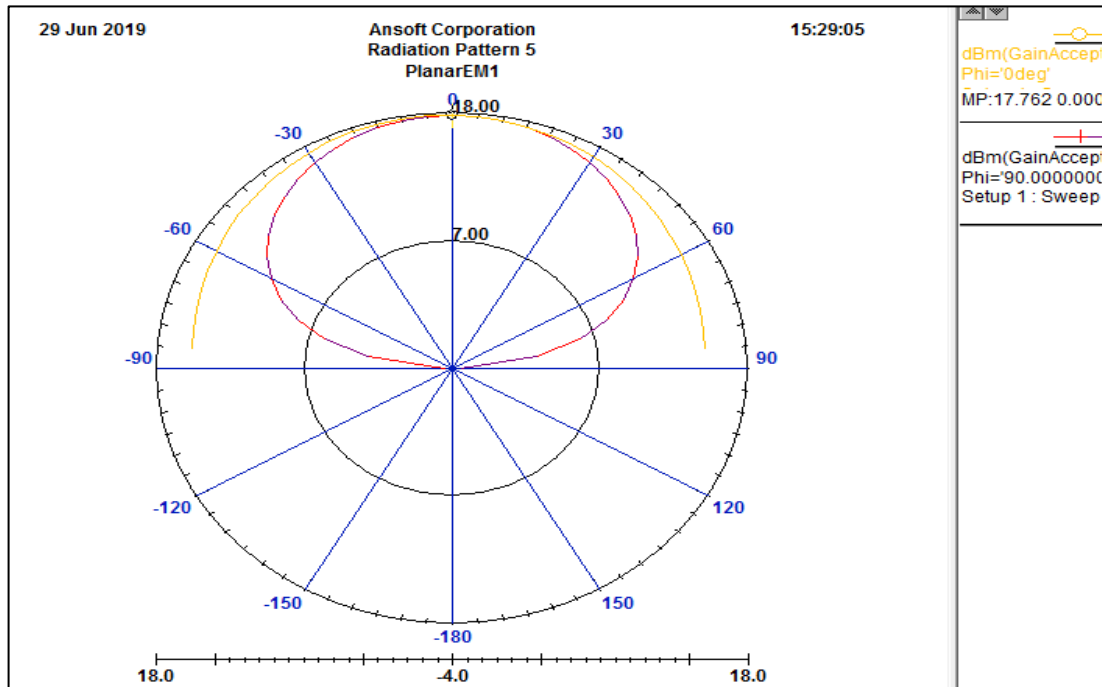


**Figura 5-3.** Patrón de radiación en frecuencia de 2.4. GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019



En la Figura 6-3 se muestra el diagrama de la ganancia total aceptada entre los planos E y H de la antena fractal microstrip. La ganancia se determina considerando las pérdidas de la antena, conductor, dieléctrico, modo de alimentación. Se observa que en la parte de máxima radiación se obtiene el valor de 17.76 dBm ubicado en el punto central de la curva de color amarillo como indica el marcador.



**Figura 6-3.** Diagrama de ganancia aceptada en frecuencia de 2.4 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 3.4. Resultado del encapsulamiento de la antena en el prototipo

Posterior a la implementación de la antena en un prototipo de estructura de smartwatch se compara las dimensiones con un smartwatch funcional y las dimensiones de la antena implementada. Las dimensiones se muestran en la Figura 32-2, Figura 33-2 y Figura 28-2 respectivamente. En la Tabla 3-3 se muestra la comparación para determinar si el prototipo implementado está en relación con un smartwatch funcional y si la antena implementada cumple con el dimensionamiento de una smartwatch funcional.

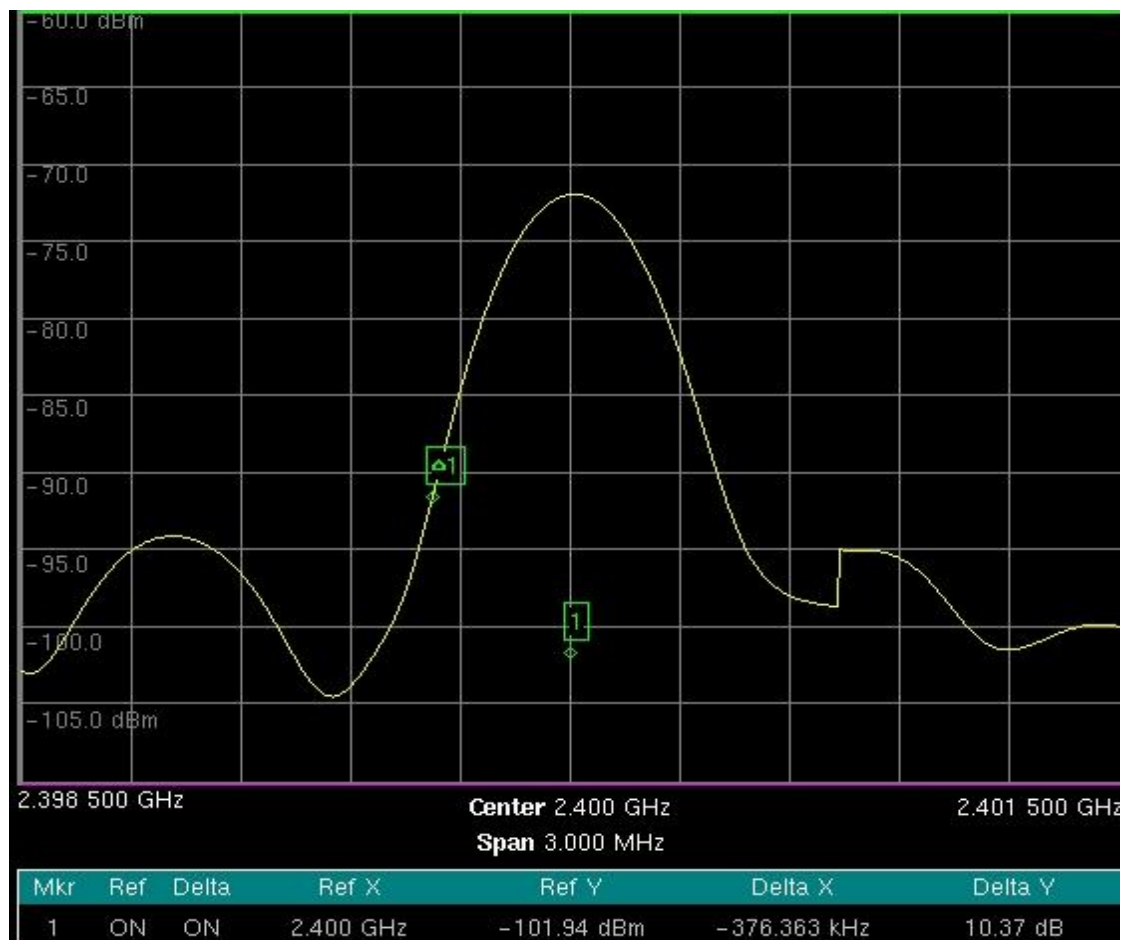
**Tabla 3-3.** Comparación entre smartwatch funcional y prototipo

Dimensión	Smartwatch Funcional	Smartwatch Prototipo	Antena Implementada
Largo	48 mm	54 mm	41.55 mm
Ancho	40 mm	30 mm	22,66 mm

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 3.5. Resultado de las medidas de laboratorio con la antena implementada

Las mediciones de laboratorio de la antena fractal microstrip implementada se desarrolló bajo el esquema del escenario mostrado en la Figura 40-2, donde la distancia de separación entre las antenas fue de 15 cm. En la Figura 7-3 se observa que en analizador de espectros el nivel de potencia recibido en la frecuencia 2.4 GHz es de -72.5 dBm con piso de ruido en -95 dBm.



**Figura 7-3.** Nivel de potencia recibida en la antena fractal microstrip a 2.4 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El ancho de banda definido en la Figura 7-3 se calcula considerando el valor absoluto del indicador  $\Delta 1 = -376.36$  KHz. En señales de alta frecuencia el ancho de banda se determina posicionando el indicador  $\Delta$  a la altura del piso de ruido. El ancho de banda es:

$$BW = 2 * |\Delta 1|$$

**Ecuación 2-3.** Ancho de banda en 2.4 GHz

$$BW = 2 * 376.36 = 752.72 \text{ KHz}$$

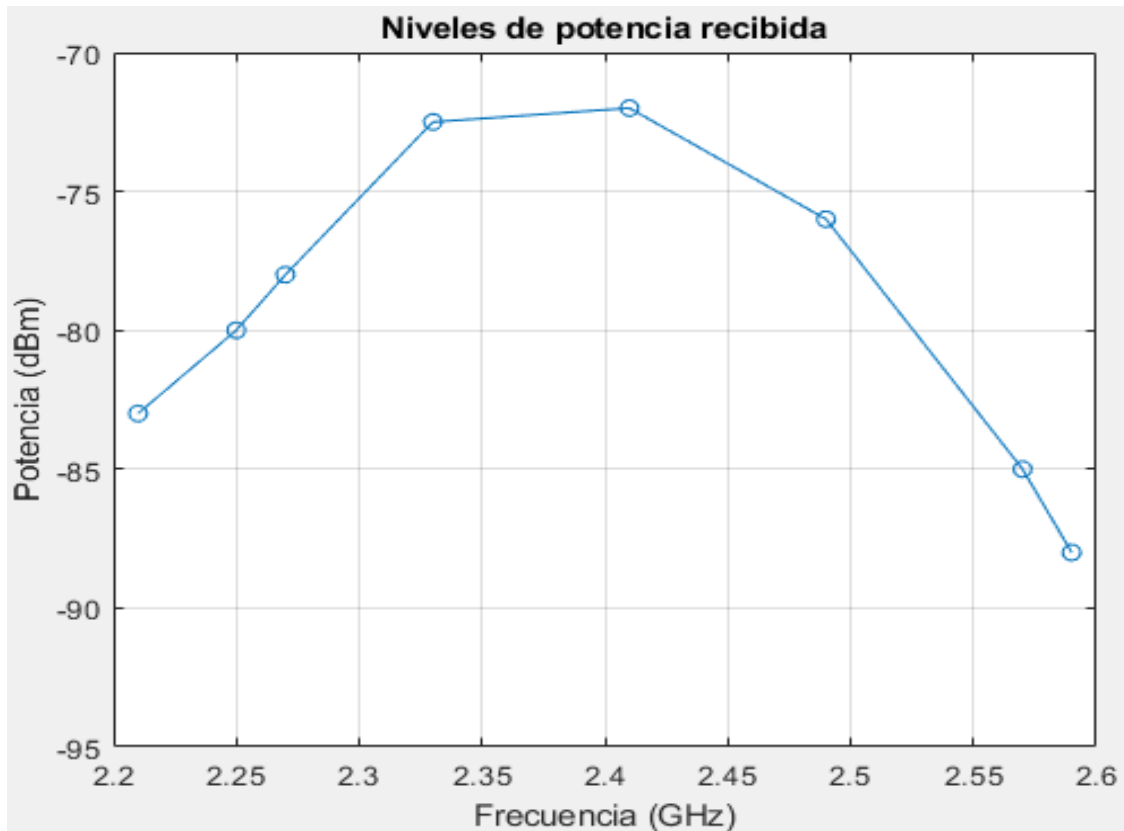
$$BW \approx 753 \text{ KHz}$$

Se realizó un barrido de frecuencias dentro del span de 1 GHz, es decir, desde 1.9 GHz a 2.9 GHz con frecuencia central en 2.4 GHz para determinar la curva del nivel de potencia recibida dentro de ese rango de frecuencias. Esto se muestra en la Figura 8-3, se observa que desde 2.2 GHz a 2.6 GHz la antenna tiene altos nivel de potencia recibida también se observa que en 2.4 GHz se tiene aproximadamente -72.3 dBm de potencia recibida sin embargo presenta un nivel más alto en 2.41 GHz. En la Tabla 4-3 se muestra los datos tabulados y utilizados para la elaboración de la gráfica en Matlab.

**Tabla 4-3.** Niveles de potencia recibida de 2.2 a 2.6 GHz

Frecuencia (GHz)	Potencia (dBm)
2,21	-83
2,25	-80
2,27	-78
2,33	-72,5
2,40	-72,3
2,41	-72
2,49	-76
2,57	-85
2,59	-88

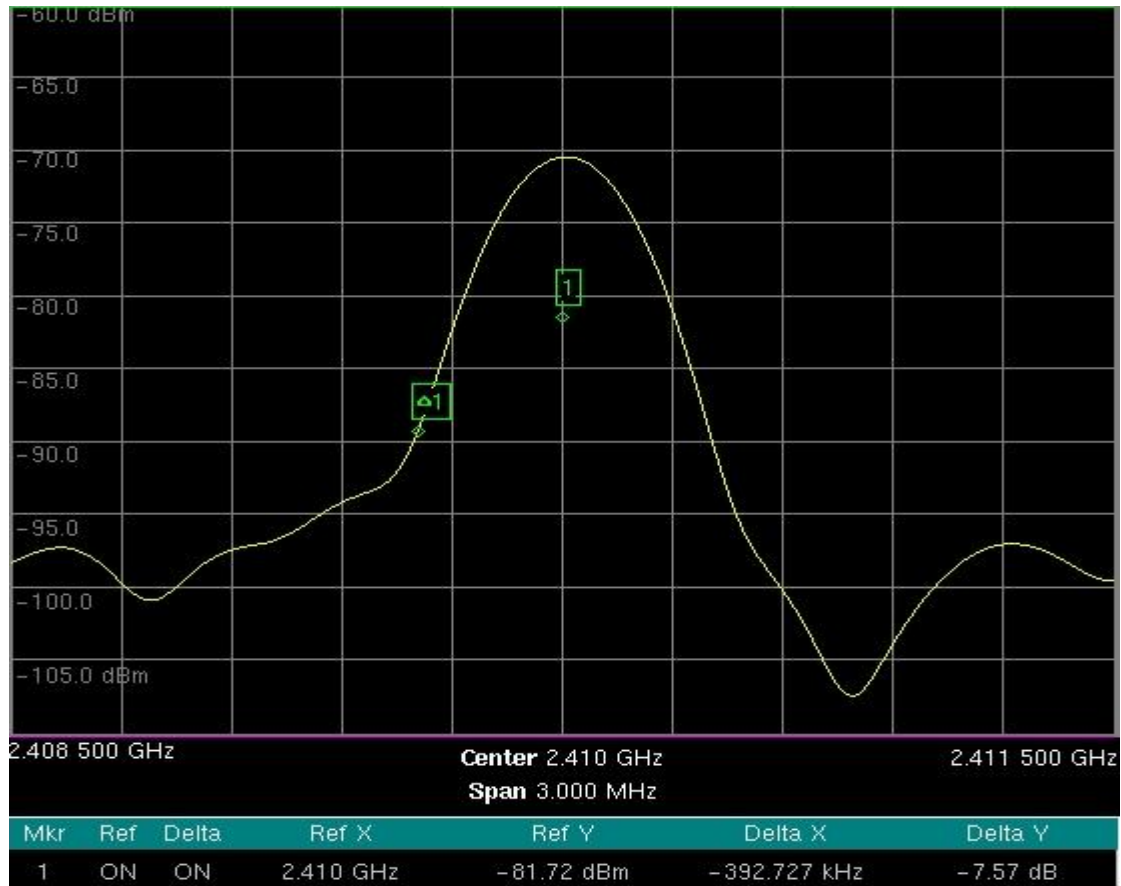
Realizado por: Valeria Hernández, 2019



**Figura 8-3.** Barrido de frecuencias dentro del span de 400 MHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

La frecuencia 2.41 GHz se encuentra dentro del rango de operación estimado de la antena. En la Figura 9-3 se observa que en la frecuencia 2.41 GHz el nivel de potencia recibido es -72 dBm con piso de ruido en -95 dBm. Por ser mayor al nivel de potencia en 2.4 GHz, se decide analizar su patrón de radiación para comparar con los resultados de simulación.



**Figura 9-3.** Nivel de potencia recibida en la antena fractal microstrip a 2.41 GHz

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

El ancho de banda definido en la Figura 9-3 se calcula considerando el valor absoluto del indicador  $\Delta 1 = -392.72$  KHz. La ecuación para calcular el ancho de banda es:

$$BW = 2 * |\Delta 1|$$

**Ecuación 2-3.** Ancho de banda en 2.41 GHz

$$BW = 2 * 392.72 = 785.44 \text{ KHz}$$

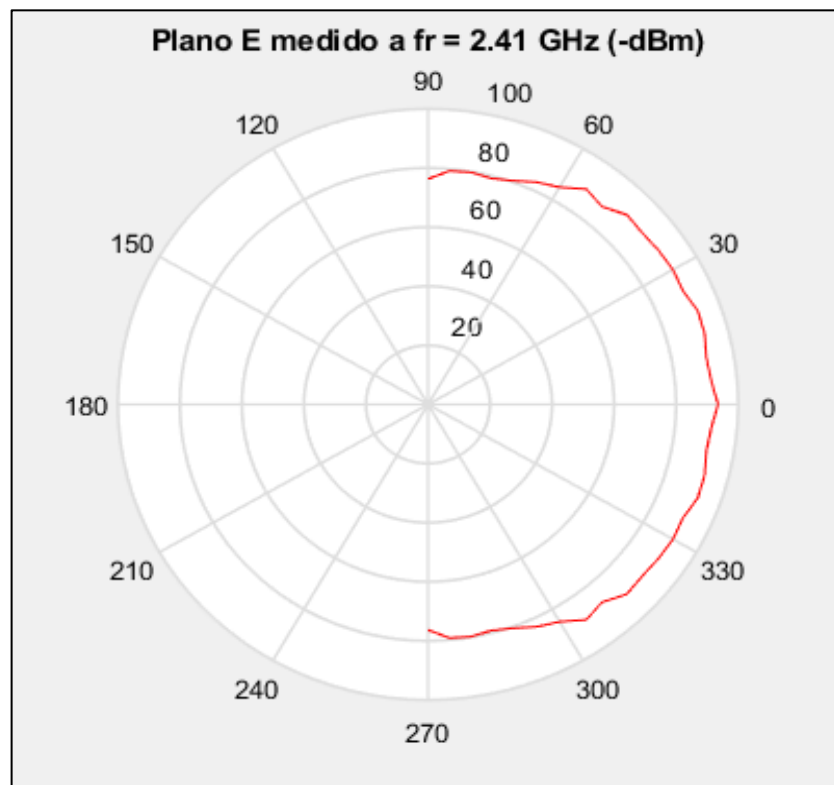
$$BW \approx 785 \text{ KHz}$$

El patrón de radiación de la antena fractal microstrip a frecuencia de 2.41 GHz se determinó en los planos E y H. El plano E se muestra en la Figura 10-3 donde se observa que el campo radiado en este plano se encuentra ubicado en  $0^\circ \leq \varphi \leq 90$  y  $270 \leq \varphi \leq 360$ . En la Tabla 5-3 se muestra los datos tabulados y utilizados para elaborar la gráfica en Matlab.

**Tabla 5-3.** Niveles de potencia recibida en  $\theta = 90^\circ$  cuando  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$  y  $270^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$

Ángulo ( $^\circ$ )	Potencia dBm	Ángulo ( $^\circ$ )	Potencia dBm	Ángulo ( $^\circ$ )	Potencia dBm
0	-93.5	65	-82.99	305	-88.94
5	-91.67	70	-80.52	310	-87.33
10	-91.11	75	-79.16	315	-90.71
15	-92.35	80	-79.75	320	-90.22
20	-92.55	85	-79.29	325	-90.78
25	-90.74	90	-76.27	330	-91.18
30	-91.18	270	-76.27	335	-90.74
35	-90.78	275	-79.29	340	-92.55
40	-90.22	280	-79.75	345	-92.35
45	-90.71	285	-79.16	350	-91.11
50	-87.33	290	-80.52	355	-91.67
55	-88.94	295	-82.99	360	-93.5
60	-84.86	300	-84.86	---	---

Realizado por: Valeria Hernández, 2019



**Figura 10-3.** Plano E del patrón de radiación medido de la antena fractal microstrip a 2.41 GHz

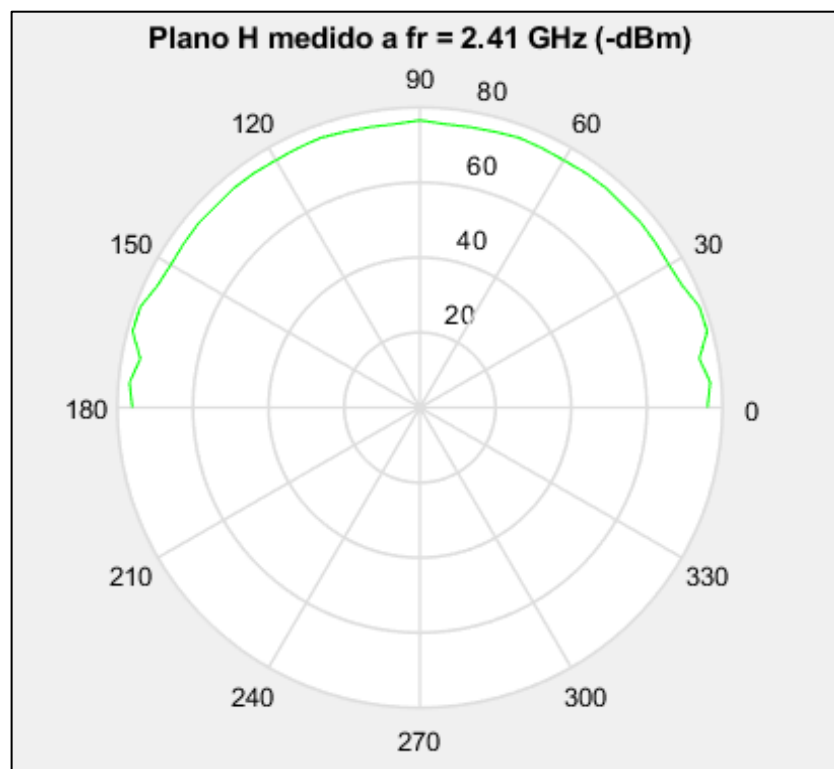
Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El plano H del patrón de radiación de la antena fractal microstrip se muestra en la Figura 11-3. El campo radiado se encuentra en  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ . En la Tabla 6-3 se muestra los datos tabulados y utilizados para elaborar la gráfica en Matlab.

**Tabla 6-3.** Niveles de potencia recibida en  $\varphi = 0^\circ$  cuando  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$

Ángulo ( $^\circ$ )	Potencia dBm	Ángulo ( $^\circ$ )	Potencia dBm	Ángulo ( $^\circ$ )	Potencia dBm
0	-76,02	65	-76,31	130	-76,41
5	-77,05	70	-76,52	135	-76,12
10	-75,01	75	-76,11	140	-76,4
15	-78,64	80	-75,9	145	-76,2
20	-78,6	85	-75,82	150	-76,04
25	-76,63	90	-76,55	155	-76,63
30	-76,04	95	-75,82	160	-78,6
35	-76,2	100	-75,9	165	-78,64
40	-76,4	105	-76,11	170	-75,01
45	-76,12	110	-76,52	175	-77,05
50	-76,41	115	-76,31	180	-76,02
55	-76,34	120	-76,1	---	---
60	-76,1	125	-76,34	---	---

Realizado por: Valeria Hernández, 2019



**Figura 11-3.** Plano H del patrón de radiación medido de la antena fractal a 2.41 GHz

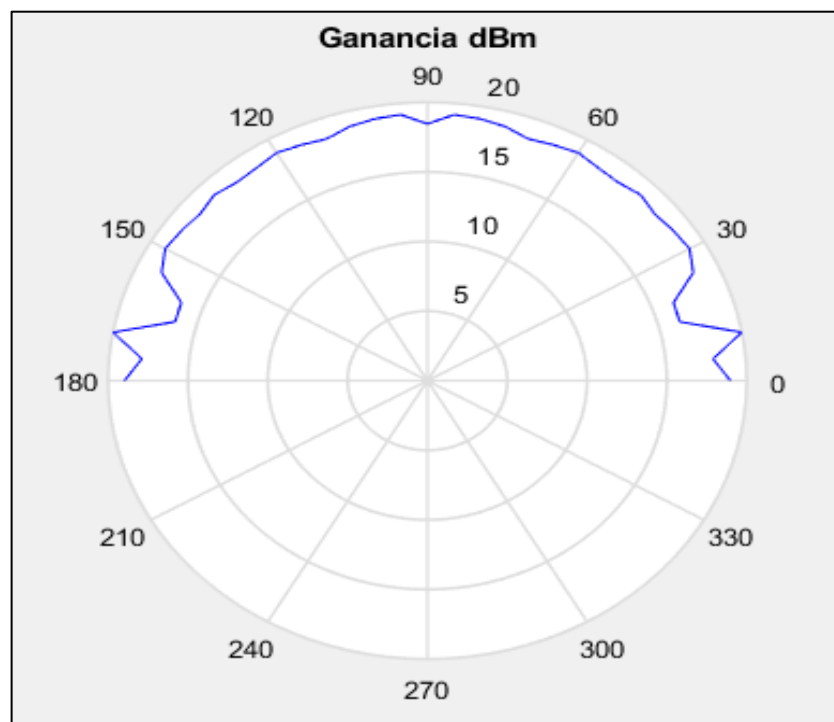
Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El diagrama de la ganancia medida de la antena implementada se muestra en la Figura 12-3, se observa que el valor en el punto central de la curva tiene el valor de 18.45 dBm. En la Tabla 7-3 se muestran los valores de ganancia utilizados para graficar en Matlab.

**Tabla 7-3.** Niveles de ganancia de la antena fractal microstrip

Ángulo (°)	Potencia dBm	Ángulo (°)	Potencia dBm	Ángulo (°)	Potencia dBm
0	18.98	65	18.69	130	18.59
5	17.95	70	18.48	135	18.88
10	19.99	75	18.89	140	18.60
15	16.36	80	19.10	145	18.80
20	16.40	85	19.18	150	18.96
25	18.37	90	18.45	155	18.37
30	18.96	95	19.18	160	16.40
35	18.80	100	19.10	165	16.36
40	18.60	105	18.89	170	19.99
45	18.88	110	18.48	175	17.95
50	18.59	115	18.69	180	18.98
55	18.66	120	18.90	---	---
60	18.90	125	18.66	---	---

Realizado por: Valeria Hernández, 2019



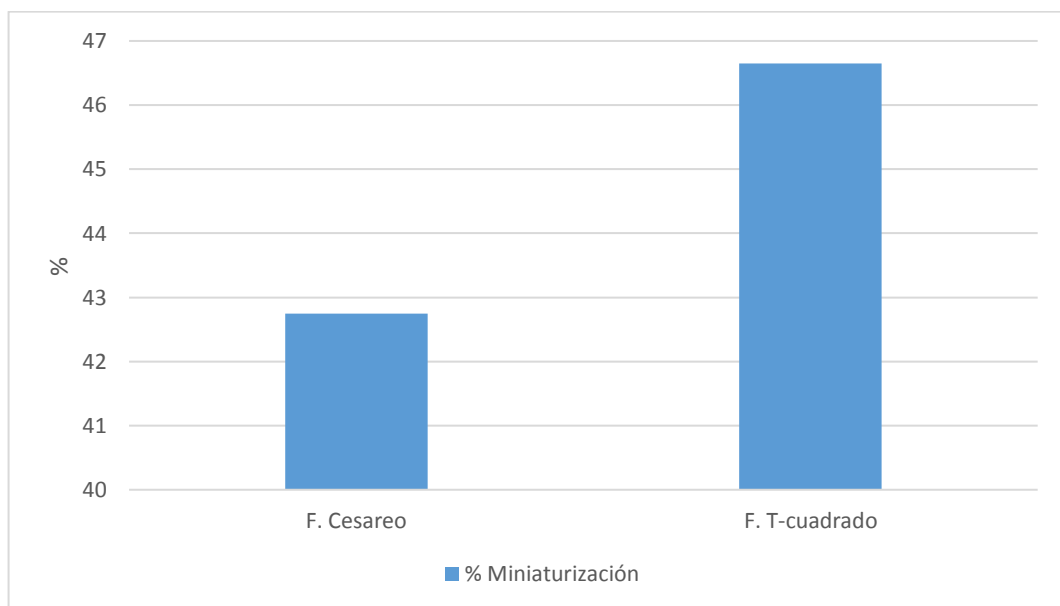
**Figura 12-3.** Ganancia medida de la antena fractal microstrip a 2.41 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

### 3.6. Discusión de resultados

La discusión de resultados pretende sintetizar los resultados obtenidos en esta sección para que de esta manera sea más fácil reconocer y redactar las conclusiones este trabajo de titulación. El gráfico 1-3 hace referencia a la Tabla 1-3 y muestra la comparación en un diagrama de barras de los porcentajes de miniaturización resultantes de cada una de las dos propuestas de diseño fractal para el parche microstrip.

Se observa que el diseño de Cesareo tiene aproximadamente 42.7% mientras que el diseño del T-cuadrado presenta aproximadamente 46,6% siendo este último el de mayor porcentaje de miniaturización.

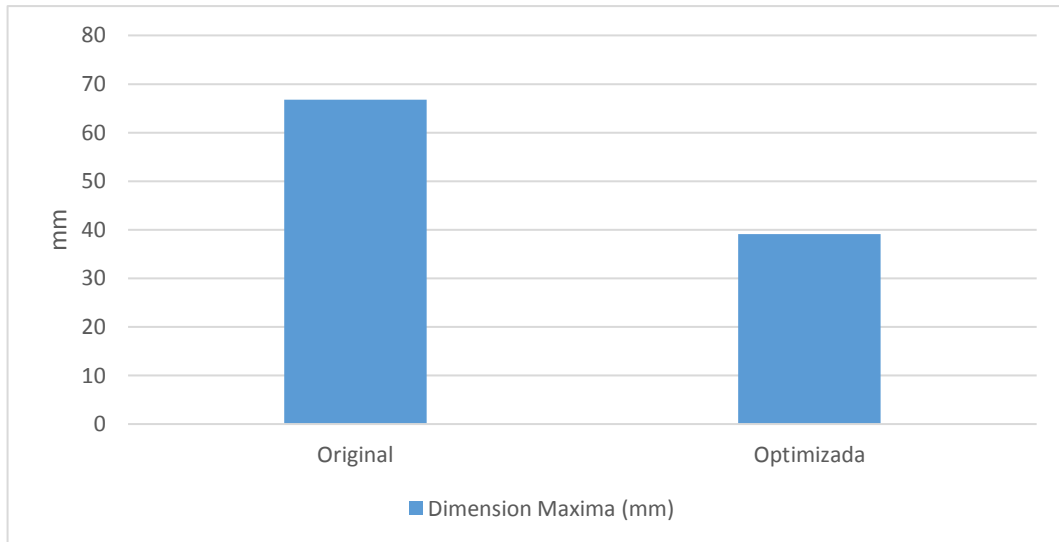


**Gráfico 1-3.** Comparación de porcentaje de miniaturización del parche fractal microstrip

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

En el grafico 2-3 está en referencia de la Tabla 2-3. Se muestra en diagrama de barras la diferencia de dimensión máxima entre el diseño de antena microstrip original y la antena fractal optimizada e implementada. La antena microstrip original muestra una dimensión máxima de aproximadamente 62.77 mm mientras que la antena optimizada mediante simulación presenta aproximadamente 39.05 mm siendo evidente la miniaturización.



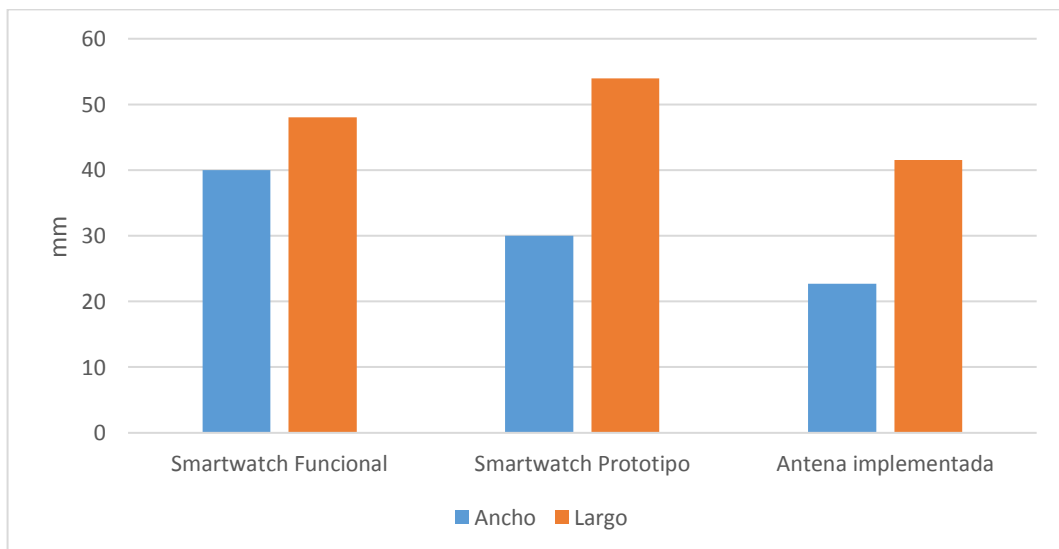


**Gráfico 2-3.** Comparación de la dimensión máxima entre antenas

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

Es importante determinar si el tamaño de la antena implementada posee un tamaño apto para ser implementada en un dispositivo portable funcional. Se consideró un smartwatch como ejemplo, el gráfico 3-3 hace referencia a la Tabla 3-3, en la cual se observa una comparación de medidas de ancho y largo entre un smartwatch funcional, prototipo y la antena fractal implementada.

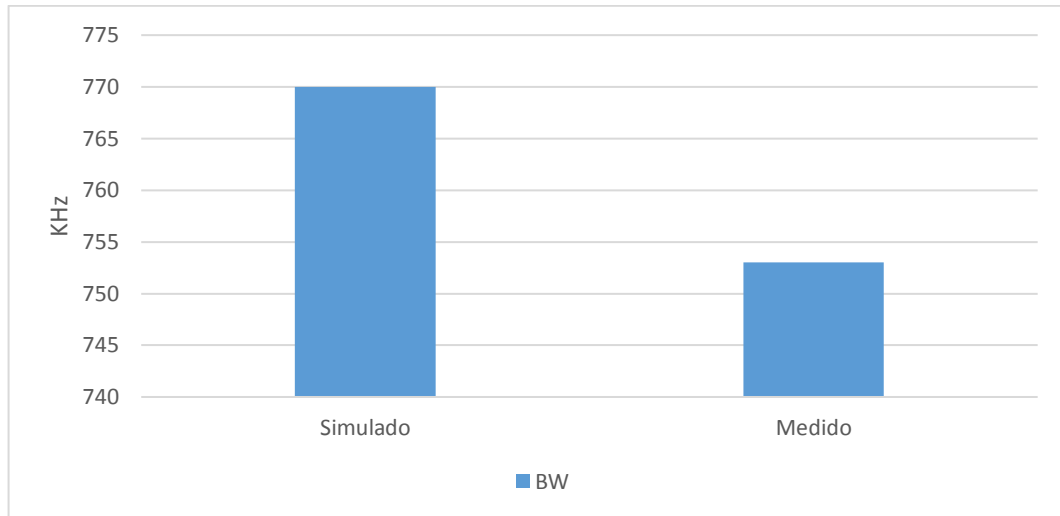
Se observa que el tamaño de la antena es menor que el tamaño del smartwatch funcional pero también se observa que el smartwatch prototipo es más largo que el funcional, pero esto fue debido al cable coaxial utilizado para la alimentación por línea de transmisión. Se debe considerar que en un dispositivo electrónicamente implementado el modo de alimentación se lo realiza de manera compacta sin la necesidad de utilizar cables.



**Gráfico 3-3.** Tamaño de smartwatch vs antena implementada

**Realizado por:** Valeria Hernández, 2019

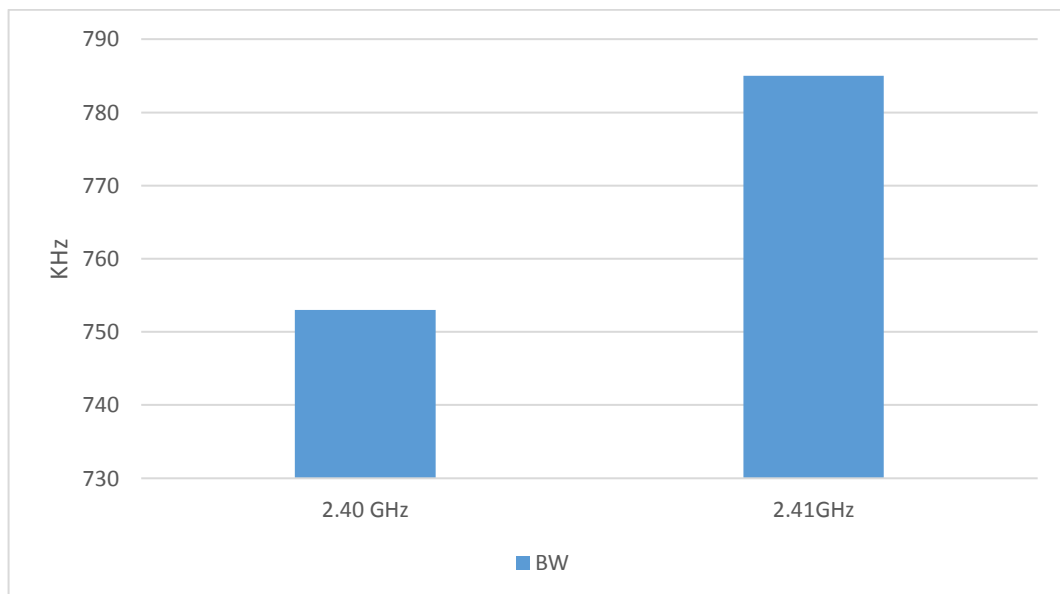
El gráfico 4-3 está relacionado con la Figura 3-3 y Figura 6-3, Se observa una comparación en diagrama de barras entre el ancho de banda simulado y medido en la frecuencia 2.4 GHz. El ancho de banda simulado esta aproximadamente en 770 KHz mientras que el valor de ancho de banda medido es aproximadamente 753 KHz.



**Gráfico 4-3.** Ancho de banda simulado vs medido en 2.40 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

El gráfico 5-3 está relacionado con la Figura 6-3 y Figura 8-3, Se observa una comparación en diagrama de barras entre el ancho de banda medido entre las frecuencias 2.40 GHz y 2.41 GHz. El ancho de banda medido en 2.40 GHz es aproximadamente 753 KHz mientras que el valor de ancho de banda medido en 2.41 GHz es aproximadamente 785 KHz.

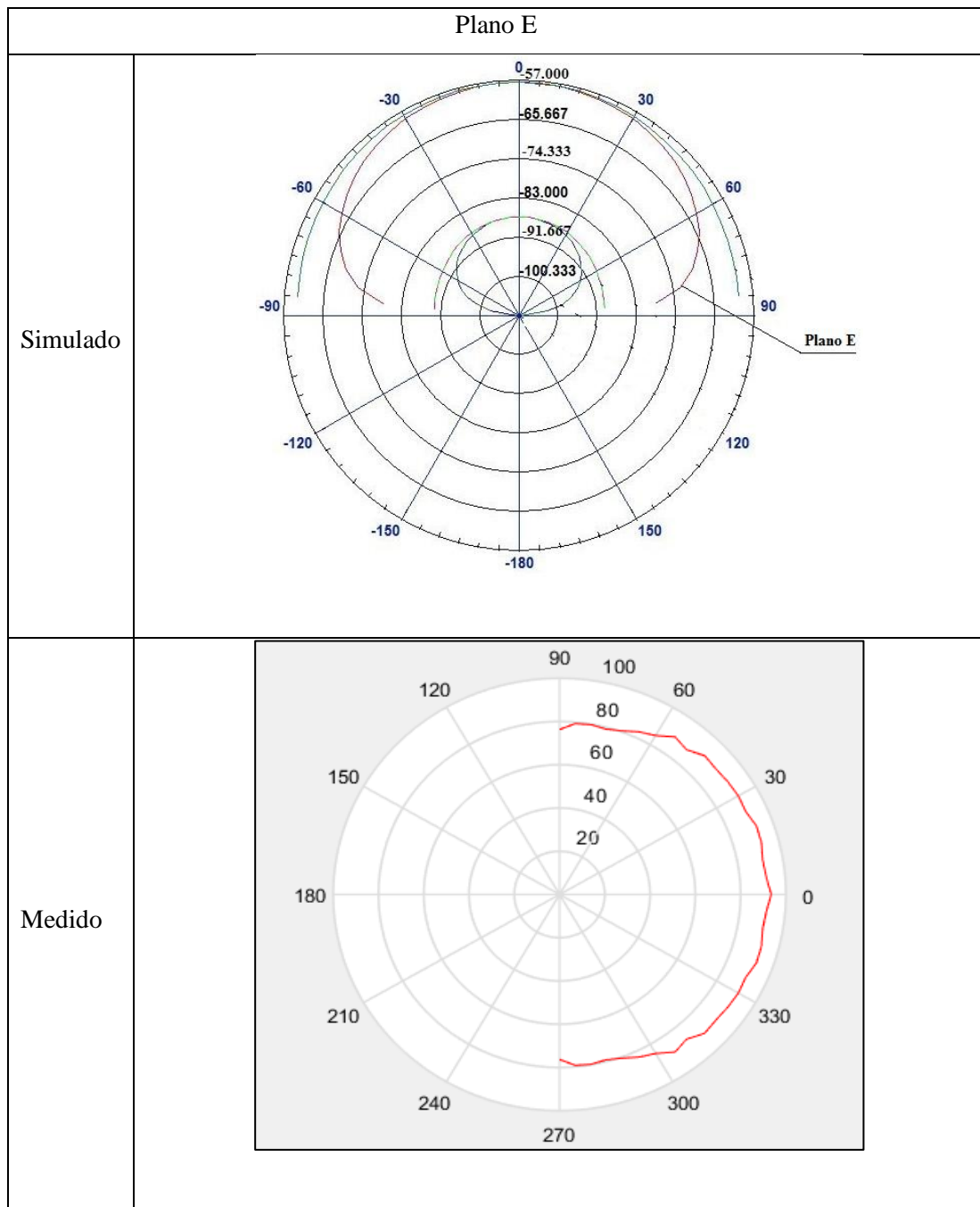


**Gráfico 5-3.** Ancho de banda medido en 2.40 GHz vs 2.41 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

En la Tabla 8-3 se muestra una comparación del diagrama de radiación en el plano E simulado y el diagrama resultante de la medición de laboratorio. Se observa que tienen gran similitud en la forma siendo ambos patrones son omnidireccionales. Los niveles de potencia también mantienen similitud. En el diagrama de la simulación el máximo nivel de radiación está en  $\varphi = 0^\circ$  mientras que en la simulación también el máximo valor está en  $\varphi = 0^\circ$ .

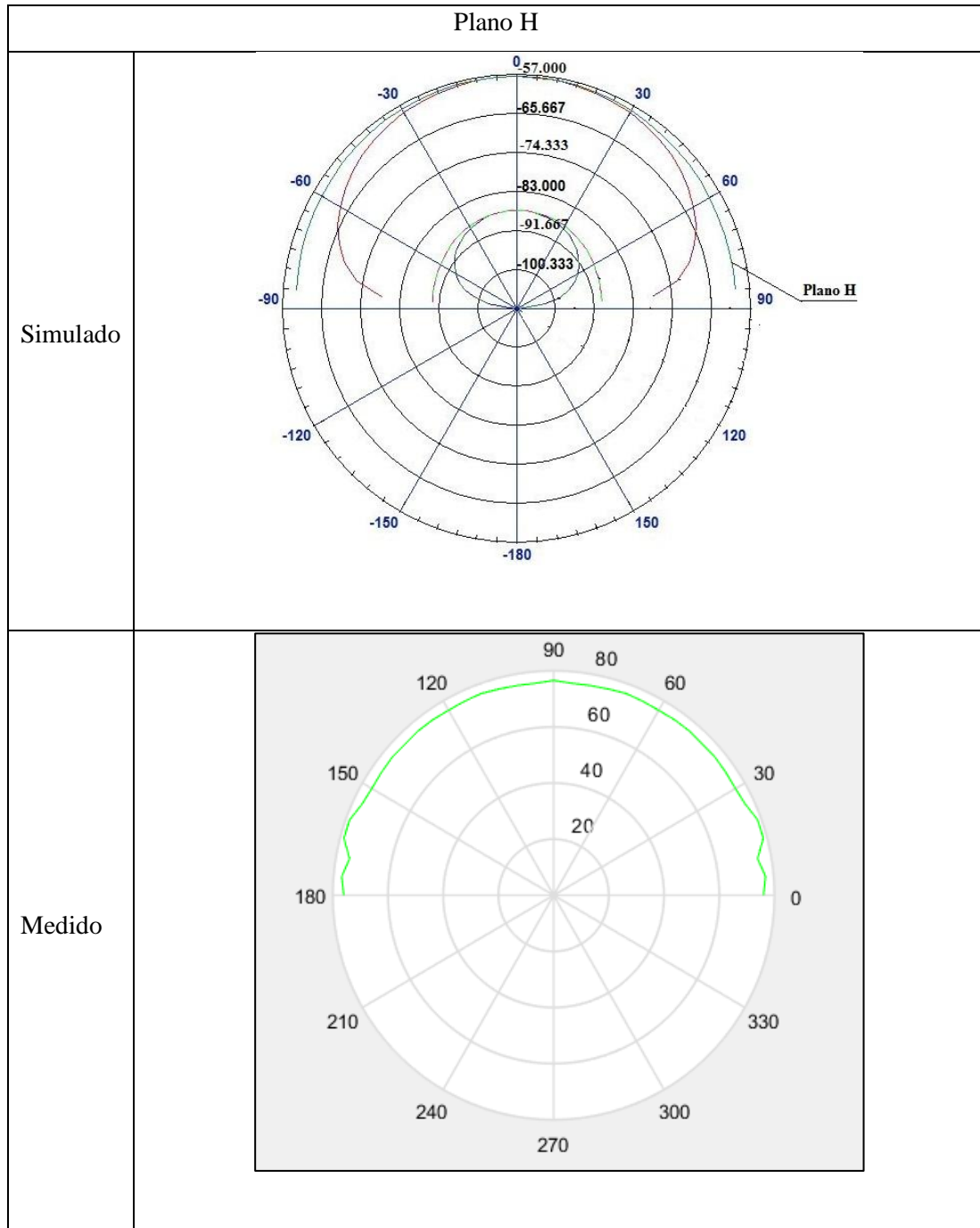
**Tabla 8-3.** Comparación del diagrama de radiación simulado y medido en el Plano E



Realizado por: Valeria Hernández, 2019

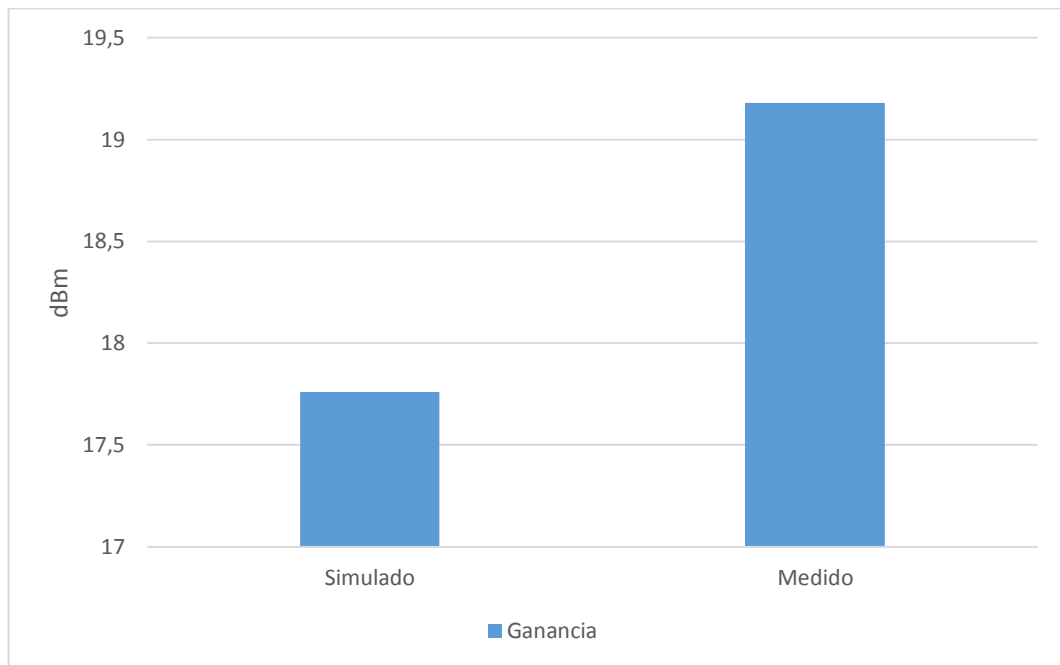
En la Tabla 9-3 se muestra una comparación del diagrama de radiación en el plano H simulado y el diagrama resultante de la medición de laboratorio. Se observa que el patrón de radiación tiene gran similitud en la forma siendo ambos patrones son omnidireccionales. Los niveles de potencia también mantienen similitud. En el diagrama de la simulación el máximo nivel de radiación está en  $\theta = 90^\circ$  mientras que en la simulación también el máximo valor está en  $\theta = 90^\circ$ .

**Tabla 9-3.** Comparación del diagrama de radiación simulado y medido en el Plano H



Realizado por: Valeria Hernández, 2019

En el gráfico 6-3 se observa la comparación en diagrama de barras del valor de la ganancia simulado versus el valor medido. Esta grafica está en relación con la Figura 5-3 y Figura 11-3. Estos valores de ganancia están determinados en el plano H en el ángulo  $\theta = 90^\circ$  y se observa que la ganancia medida es aproximadamente 18,4 dBm mientras que el valor de ganancia simulado fue de 17.762 dBm.



**Gráfico 6-3.** Ganancia simulada en 2.40 GHz vs medida en 2.41 GHz

Realizado por: Valeria Hernández, 2019

## CONCLUSIONES

Una vez concluido el presente trabajo de titulación, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El estudio previo de la tecnología microstrip y de una metodología de diseño facilitó el desarrollo del diseño fractal de la antena requerida considerando las características del material Rogers RO4003C y la frecuencia de operación a 2.4 GHz.
- Durante el desarrollo, se optó por el método de diseño fractal del T-cuadrado y Cesareo para la forma del parche debido a la tendencia de reducir el espacio utilizado en cada iteración a diferencia de otros diseños mencionados en el marco teórico de este documento. Finalmente se eligió el fractal del T cuadrado para la optimización porque presentó el 46.6 % de miniaturización respecto al tamaño del parche original, este valor es mayor al 42.7% que presentó la propuesta del diseño de Cesareo.
- Mediante simulación se optimizó el tamaño de la antena fractal microstrip aplicando las técnicas de miniaturización por la forma del parche y por ranura además de modificar la forma de la línea de alimentación. El diseño final de la antena optimizada posee como dimensión máxima en el largo el valor de 39.052 mm siendo menor que la dimensión máxima de la antena microstrip original que es 62,77 mm.
- En la simulación la frecuencia de resonancia del diseño fractal es 2.4 GHz con valor de pérdidas de retorno o parámetro S de -20.5 dB y el valor del parámetro VSWR fue de 1.65 dB; lo que indica una buena efectividad de acoplamiento sin embargo no presenta un buen ancho de banda se concluye que el alto valor de la constante de permitividad del material ayudo en la miniaturización de la antena, pero no favoreció en el ancho de banda.
- La implementación de la antena fractal microstrip permitió la construcción de un prototipo de estructura de smartwatch para ejemplificar la aplicación en un dispositivo portable. Además, permitió realizar una comparación de tamaño entre un smartwatch funcional y el prototipo. Se concluye que la antena fractal microstrip a 2.4 GHz presentada en este trabajo de titulación cumple con el dimensionamiento máximo por lo que podría ser implementado en este dispositivo.

- Posterior al barrido de frecuencias para determinar el rango de frecuencias al que trabaja la antena implementada, se observó que la antena presenta en mínima diferencia con un mejor nivel de potencia en la frecuencia 2.41 GHz sin embargo esta frecuencia está dentro del rango de operación para las aplicaciones requeridas.
- En la simulación el ancho de banda fue 770 KHz mientras que el ancho de banda medido que presenta la antena implementada es 753 KHz también se obtuvo un patrón de radiación simulado con forma omnidireccional y una ganancia aceptada de 17.76 dBm en dirección de  $\theta=90^\circ$ ; el patrón de radiación resultante de las mediciones también es omnidireccional y la antena posee una ganancia de 18,4 dBm. Considerando los resultados de estos parámetros se concluye que la antena fractal microstrip implementada tiene un buen funcionamiento.

## RECOMENDACIONES

- La distancia de separación entre emisor y receptor determinaría diferentes resultados a los presentados en este documento, por lo que se recomienda explorar y hacer pruebas en diferentes distancias para determinar diferentes comportamientos.
- Se recomienda calibrar correctamente los equipos de laboratorio antes de empezar las mediciones de esta manera se evitará perder tiempo de prueba o la toma incorrecta de datos.
- Se recomienda para futuros estudios de miniaturización de antenas aplicando fractales desarrollar el mismo diseño, pero utilizando un material con mayor espesor para comprobar si el ancho de banda mejora con respecto a la propuesta de este trabajo de titulación.
- El material elegido tiene bajo espesor ya que se tenía el deseo de implementar una antena flexible, pero al momento de implementar la antena por su reducido tamaño perdió las propiedades de flexibilidad por lo que se recomienda aplicar esta propuesta de diseño fractal en un material totalmente flexible.



## GLOSARIO

<b>1D</b>	Una dimensión
<b>2D</b>	Dos dimensiones
<b>3D</b>	Tres dimensiones
<b>3G</b>	Tercera generación de tecnologías de telefonía móvil
<b>4G</b>	Cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil
<b>5G</b>	Quinta generación de tecnologías de telefonía móvil
<b><math>\epsilon_r</math></b>	Permitividad eléctrica relativa
<b><math>\epsilon_{ref}</math></b>	Permitividad eléctrica efectiva
<b><math>\lambda</math></b>	Longitud de onda
<b>CNC</b>	Computer Numerical Control – Control numérico de un sistema
<b>dB</b>	Decibelio
<b>dB<sub>i</sub></b>	Decibelio con respecto a antena isotrópica
<b>dB<sub>m</sub></b>	Decibelio - milivatio
<b>DSSS</b>	Espectro ensanchado por secuencia directa
<b>ESPOCH</b>	Escuela superior politécnica de Chimborazo
<b>FHSS</b>	Espectro ensanchado por salto de frecuencia
<b>FR4</b>	Material laminado epoxi reforzado con vidrio
<b>GHz</b>	Giga hertzios
<b>h</b>	Altura del substrato
<b>HF</b>	Alta frecuencia
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
<b>ISM</b>	bandas de radio industriales, científicas y médicas

<b>KHZ</b>	Kilo hertzios
<b>L</b>	Longitud del parche
<b>MAC</b>	Control de acceso al medio
<b>MIMO</b>	Múltiples entradas múltiples salidas
<b>mm</b>	Milímetros
<b>OFDM</b>	Multiplexación por división de frecuencias ortogonales
<b>Ohm</b>	Unidad derivada de resistencia eléctrica
<b>OSI</b>	Modelo de interconexión de sistemas abiertos
<b>PCB</b>	Placa de circuito impreso
<b>PLA</b>	Filamento más usado en impresión 3d
<b>PTFE</b>	Politetrafluoroetileno
<b>RF</b>	Radio frecuencia
<b>ROE</b>	Relación de onda estacionaria
<b>Rx</b>	Antena transmisora
<b>S</b>	Parámetro de reflexión
<b>SMA</b>	SubMiniature version A
<b>TM</b>	Transversal Magnético
<b>Tx</b>	Antena reflectora
<b>UHF</b>	Ultra alta frecuencia
<b>VHF</b>	Muy alta frecuencia
<b>VSWR</b>	Relación de Onda Estacionaria o ROE
<b>W</b>	Ancho del substrato
<b>Wifi</b>	tecnología de comunicación inalámbrica que permite conexión a internet
<b>WLAN</b>	Red de Área Local Inalámbrica
<b>Z</b>	Impedancia

## BIBLIOGRAFÍA

**ANRITSU.** *Anritsu Group.* [en línea]. United States, 2013. Spectrum Master MS2724C. [Consulta: 15 junio 2019]. Disponible en: <https://www.anritsu.com/en-US>

**AZARI, Abolfazl.** "A New Super Wideband Fractal Microstrip Antena." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [En línea], 2011, Vol. 59, pp. 1724–1727. [Consulta: 04 marzo 2019] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5732664>

**BAHJAT, Mohammed.** "Design a square microstrip patch antenna at 2.4 GHz , and comparison between unslotted and slotted version." *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* [En línea], 2015, pp. 231-235 [Consulta: 04 marzo 2019] ISSN 1817 - 3195 Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/283771713>

**BALANIS, Constantine.** *Antenna Theory Analysis and Design.* Tercera Edición, 2013, Vol. 25, pp. 611-650, 811-876 [Consulta: 06 marzo 2019] ISSN 0-471-66782-X

**BARRERA, Nathaly.** "Diseño, modelado y construcción de una antena fractal para recepción de televisión digital terrestre en el Ecuador" [En línea] (Tesis), (Pregrado) Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Ecuador. 2018. pp. 16-18. [Consulta: 06 marzo 2019] Disponible en: <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/9998>

**CHAVKA, G.** "Beauty of fractals, design of fractal antennas." *6th International Conference on Antenna Theory and Techniques* [En línea], 2007, Ucrania. pp. 76–81. [Consulta 15 marzo 2019] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4425120?arnumber=4425120>

**ESTELA BRAVO, Julio Francisco.** "Técnicas de miniaturización en antenas microcintas." [En línea] (Tesis), (Trabajo de Diploma) Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones. Cuba. 2017. pp. 4-7, 28-41. [Consulta: 09 marzo 2019] Disponible en: <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/7919>

**FERRANDO, Miguel & VALERO, Alejandro.** *Aperturas en plano de masa.* [Blog] 2005a. [Consulta: 13 marzo 2019] Disponible en: [http://www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Antenas\\_microstrip.pdf](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Antenas_microstrip.pdf)

**FERRANDO, Miguel & VALERO, Alejandro.** *Parámetros de Antenas.* [Blog] 2005b. [Consulta: 13 marzo 2019] Disponible en: [http://www.upv.es/antenas/Documentos\\_PDF/Notas\\_clase/Tema\\_1.PDF](http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF)

**FIGUEROA TORRES, Cruz Ángel.** *"Investigación y análisis electromagnético de estructuras de antenas fractales de banda ancha"* [En línea] (Tesis). (Doctorado) Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. México. 2016. pp. 18-19 [Consulta: 17 marzo 2019] Disponible en: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1342>

**GALLARDO VÁZQUEZ, Sergio.** *"Elementos de Sistemas de Telecomunicaciones."* [En línea] Madrid, España. Parainfo, SA. ISBN: 978-84-283-3663-5. 2015. [Consulta: 19 marzo 2019] Disponible en: <https://www.paraninfo.es/catalogo/9788428336635/elementos-de-sistemas-de-telecomunicaciones>

**HERRERA HOLGUÍN, Mario Patricio & INCLÁN LUNA, Juan Carlos.** *"Estudio y Metodología de Diseño de Antenas utilizando Geometría Fractal (Antenas Fractales)."* [En línea] (Tesis). (Pregrado) Escuela Politécnica Nacional, Escuela de Ingeniería. Quito. 2004. [Consulta: 06 marzo 2019] Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11124>

**MARTÍNEZ CAMPO, Sergio Daniel & JIMENEZ BERMUDEZ, Rosa María.** *"Análisis de la simulación del patrón de radiación en una antena tipo parche"* [En línea] (Tesis). (Pregrado) Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela Ingeniería y Administración. Bucaramanga. 2010. pp. 41-46. [Consulta: 09 marzo 2019] Disponible en: [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/912/digital\\_19593.pdf?sequence=1](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/912/digital_19593.pdf?sequence=1)

**MONTOYA, Adrian.** *"Antenas Fractales: Un Paso En La Evolución De Las Telecomunicaciones"*. [En línea] Universidad de Antioquia. Colombia. p. 1 [Consulta: 17 marzo 2019] Disponible en: [http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas\\_fractales.pdf](http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas_fractales.pdf)

**MURILLO FUENTES, Juan José.** *"Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación"*. [En línea] Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros. España. 2007. ISBN: 978-84-88783-84-4 [Consulta: 15 abril 2019] Disponible en: <https://personal.us.es/murillo/docente/Libros/FundRadiacionyRadiocom.pdf>

**OLIVAREZ YACHIMBA, José Vinicio.** *"Diseño y construcción de una antena fractal para banda ancha en la frecuencia de 2.4 – 2.5 GHz, pruebas de operación y análisis de resultados "* [En línea] (Tesis). (Pregrado) Universidad Nacional de Chimborazo, Escuela de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Ecuador. 2015. pp. 16 [Consulta: 05 abril 2019] Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/816/1/UNACH-EC-IMB-2015-0005..pdf>

**ORAIZI, Homayoon & HEDAYATI, Shahram.** *"Miniaturized UWB monopole microstrip antenna design by the combination of Giuseppe Peano and Sierpinski carpet fractals."* *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. [En línea] 2011. Vol. 10. pp. 67-70. [Consulta: 13 abril 2019] Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5703103>

**RAMIREZ VILLEGAS, Rossana, & URQUIZO RUVALCABA, Ismael.** *"Metodología de diseño para antenas microcinta de parche rectangular"* [En línea] (Tesis). (Pregrado) Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas". México. 2010. pp. 38-40. [Consulta: 19 abril 2019] Disponible en: [https://www.academia.edu/18164470/Metodologia\\_de\\_diseño\\_para\\_antenas\\_microcinta\\_7](https://www.academia.edu/18164470/Metodologia_de_diseño_para_antenas_microcinta_7)

**RAMOS FLORES, Santiago Ignacio.** *"Diseño y simulación de dos antenas fractales basadas en la alfombra y el triángulo de Sierpinski."* [En línea] (Tesis). (Master) Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Ecuador. 2017. pp. 20-35. [Consulta: 11 marzo 2019] Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/7303>

**RODAS VÁSQUEZ, Alejandro.** "Aplicación de las antenas fractales en las telecomunicaciones". (Tesis). (Pregrado) Universidad Católica Popular del Risalda, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería. Colombia. 2010. p. 106. [Consulta: 21 abril 2019]

**ROGERS.** *RO4000* ® Series High Frequency Circuit Materials [En línea] 2015. pp. 1–4. [Consulta: 23 abril 2019] Disponible en: <https://www.rogerscorp.com/acs/producttypes/9/RO4000-Laminates.aspx>

**WILSON, A., ZHANG, H., & GLAZER, B.** "Fractal Antennas and Fractal Resonators." *United States Patent*, [En línea] 2016. p. 14 [Consulta: 07 marzo 2019] Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/91/15/81/591cfabf47f4bb/US6452553.pdf>

**WU, Chia-Hao, SUN, Jwo-Shiun, & LU, Bo-Shiun** "Watchstrap-Embedded Four-Element Multiple-Input–Multiple-Output Antenna Design for a Smartwatch in 5.2–5.8GHz" *Wireless Applications. International Journal of Antennas and Propagation*. [En línea] 2018. [Consulta: 04 marzo 2019] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/324633907\\_Watchstrap-Embedded\\_Four-Element\\_Multiple-Input-Multiple-Output\\_Antenna\\_Design\\_for\\_a\\_Smartwatch\\_in\\_52-58\\_GHz\\_Wireless\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/324633907_Watchstrap-Embedded_Four-Element_Multiple-Input-Multiple-Output_Antenna_Design_for_a_Smartwatch_in_52-58_GHz_Wireless_Applications)

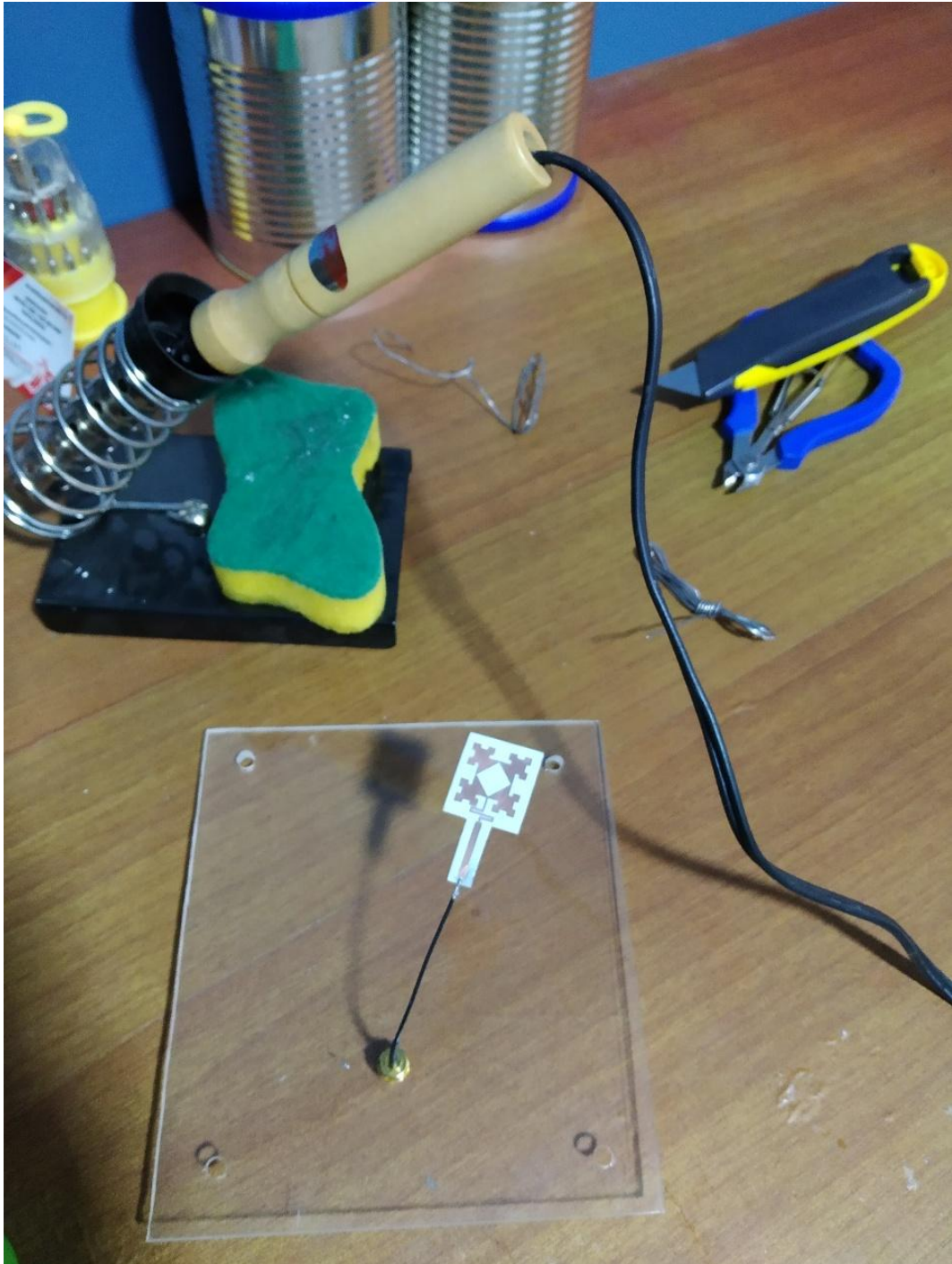
**YUNQUERA, Juan.** "Diseño de una red Wi-Fi para la E.S.I. Tesis Ing. en Telecomunicación " [En línea] Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Electrónica. España. 2015. Capítulo 3. pp. 36–43. [Consulta: 29 marzo 2019] Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11138/fichero/memoria%252FCap%EDtulo+3.pdf>

**ZEMANATE RENGIFO, Gaby Edilma.** "Miniaturización de antenas microstrip para aplicaciones RFID" [En línea] (Tesis). (Master) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computacao. Brasil. 2016. p. 26 [Consulta: 11 abril 2019] Disponible en: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/305437>

**ZURITA MONTESDEOCA, Erika.** *"Diseño e implementación de un antena microstrip de banda ancha para la frecuencia de 2.4 GHz mediante el algoritmo Slot-loaded"*. [En línea] (Tesis) (Pregrado). Facultad de Informática y Electrónica, Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes Riobamba – Ecuador. 2017. pp. 10-40 [Consulta: 23 febrero 2019]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6866/1/98T00145.pdf>

## ANEXOS

### ANEXO A: ADAPTACION DE LA ANTENA FRACTAL MICROSTRIP PARA PRUEBAS





## ANEXO B: CONEXIÓN DE EQUIPOS

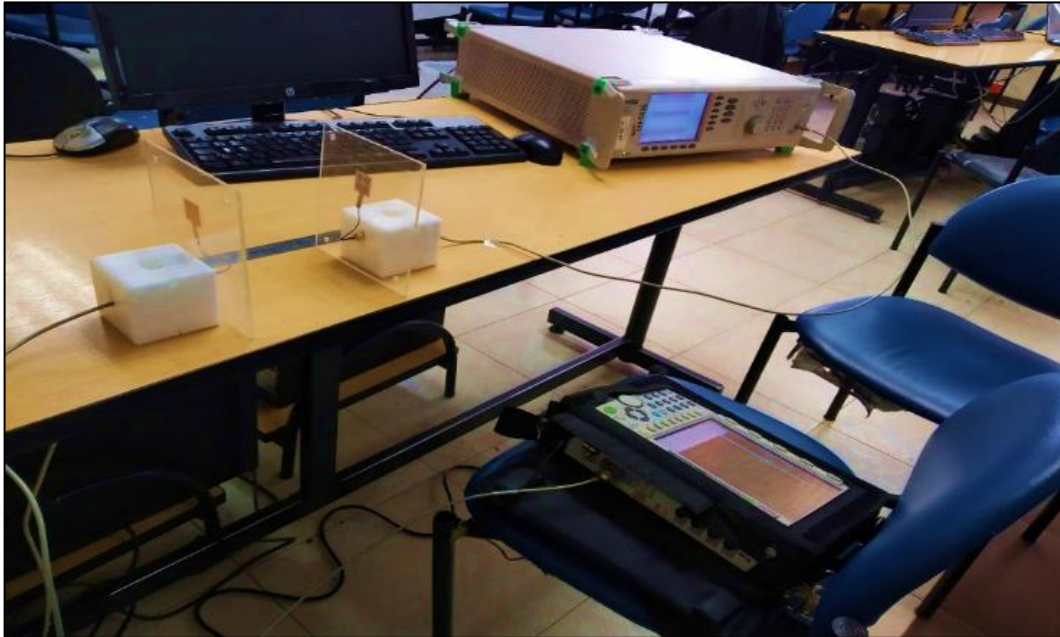
- Conexión del generador de señal con la antena Tx



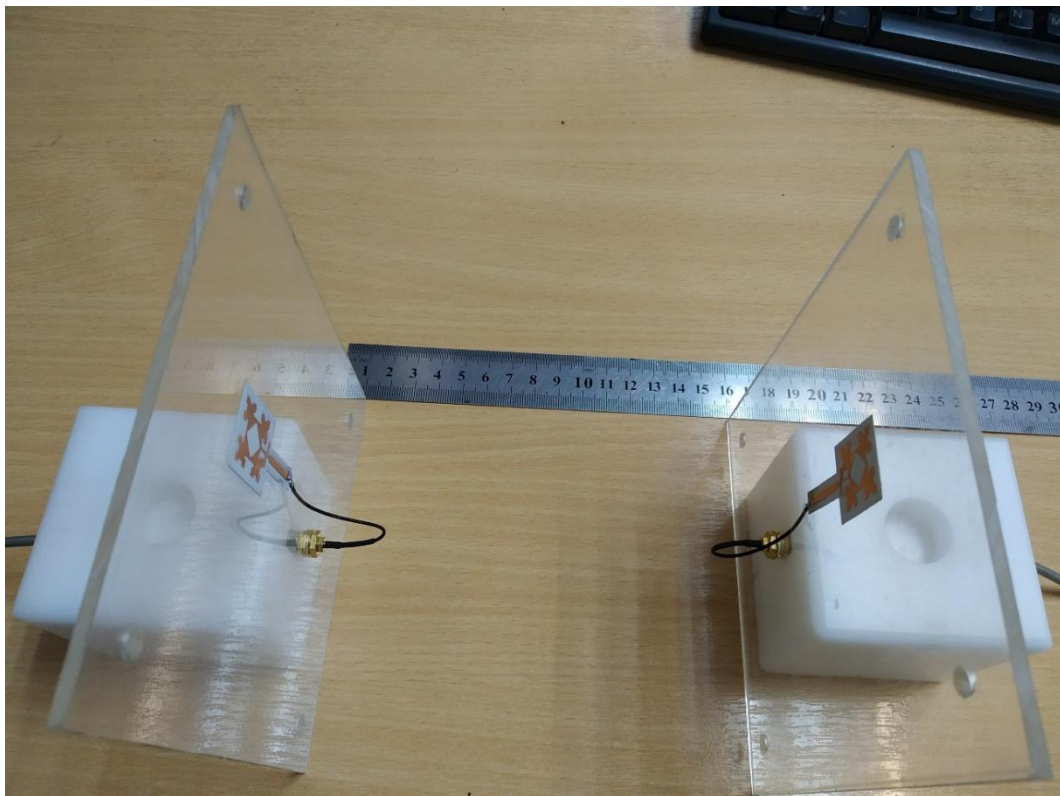
- Conexión del analizador de espectro con la antena Rx



- Escenario para pruebas de funcionamiento de la antena



- Distancia entre antenas

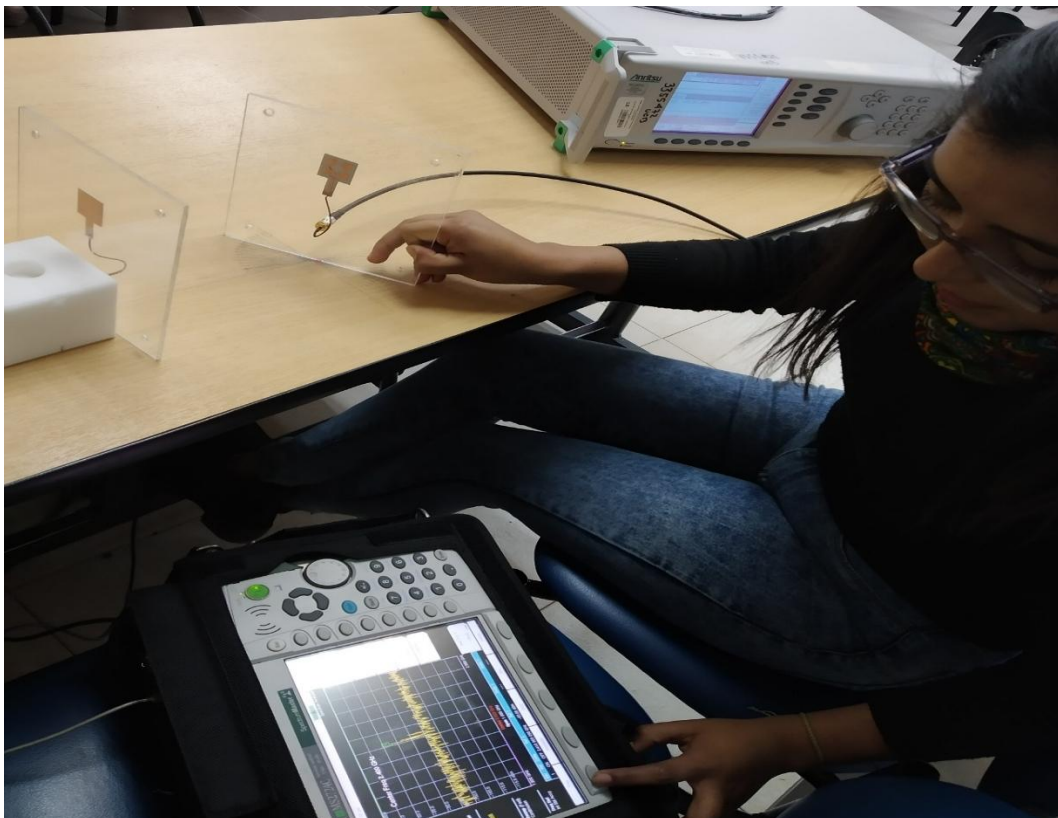


## ANEXO C: PRUEBAS Y MEDICIONES CON LA ANTENA IMPLEMENTADA

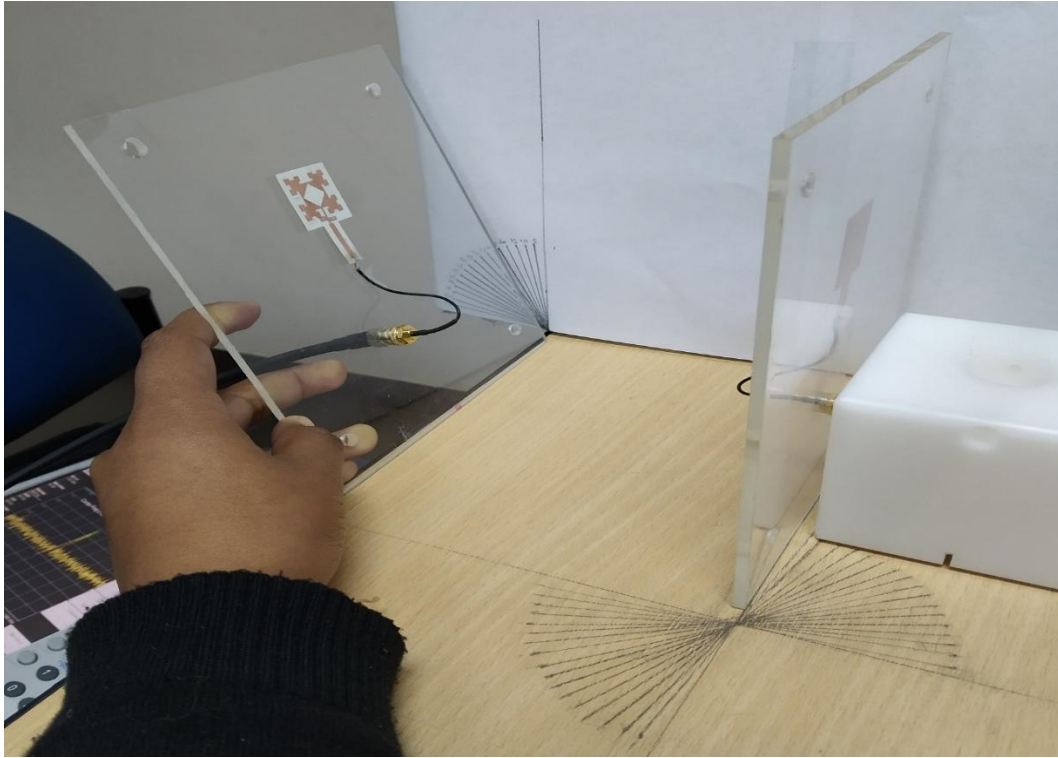
- Mediciones para determinar la curva de nivel de potencia recibida



- Mediciones para determinar el plano E del campo radiado



- **Mediciones para determinar el plano H del campo radiado**



## ANEXO D: DATASHEET DEL MATERIAL

- ROGERS 4003C

Property	Typical Value		Direction	Units	Condition	Test Method
	RO4003C	RO4350B				
Dielectric Constant, $\epsilon_r$ , Process	3.38 ± 0.05	3.48 ± 0.05	Z	--	10 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5 Clamped Stripline
<sup>(1)</sup> Dielectric Constant, $\epsilon_r$ , Design	3.55	3.66	Z	--	8 to 40 GHz	Differential Phase Length Method
Dissipation Factor tan, $\delta$	0.0027 0.0021	0.0037 0.0031	Z	--	10 GHz/23°C 2.5 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Thermal Coefficient of $\epsilon_r$	+40	+50	Z	ppm/°C	-50°C to 150°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Volume Resistivity	1.7 X 10 <sup>10</sup>	1.2 X 10 <sup>10</sup>		MΩ•cm	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Surface Resistivity	4.2 X 10 <sup>9</sup>	5.7 X 10 <sup>9</sup>		MΩ	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Electrical Strength	31.2 (780)	31.2 (780)	Z	KV/mm (V/mil)	0.51mm (0.020")	IPC-TM-650 2.5.6.2
Tensile Modulus	19,650 (2,850) 19,450 (2,821)	16,767 (2,432) 14,153, (2,053)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Tensile Strength	139 (20.2) 100 (14.5)	203 (29.5) 130 (18.9)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Flexural Strength	276 (40)	255 (37)		MPa (kpsi)		IPC-TM-650 2.4.4
Dimensional Stability	<0.3	<0.5	X,Y	mm/m (mils/inch)	after etch +E2/150°C	IPC-TM-650 2.4.39A
Coefficient of Thermal Expansion	11 14 46	10 12 32	X Y Z	ppm/°C	-55 to 288°C	IPC-TM-650 2.4.41
Tg	>280	>280		°C TMA	A	IPC-TM-650 2.4.24
Td	425	390		°C TGA		ASTM D3850
Thermal Conductivity	0.71	0.69		W/m/°K	80°C	ASTM C518
Moisture Absorption	0.06	0.06		%	48 hrs immersion 0.060" sample Temperature 50°C	ASTM D570
Density	1.79	1.86		gm/cm <sup>3</sup>	23°C	ASTM D792
Copper Peel Strength	1.05 (6.0)	0.88 (5.0)		N/mm (pli)	after solder float 1 oz. EDC Foil	IPC-TM-650 2.4.8
Flammability	N/A	<sup>(2)</sup> V-0				UL 94
Lead-Free Process Compatible	Yes	Yes				

NOTES:

(1) The design Dk is an average number from several different tested lots of material and on the most common thickness/s. If more detailed information is required,

## ANEXO E: DATASHEET DE EQUIPOS

- Analizador de espectro MS2724C

Technical Data Sheet

Anritsu

# Spectrum Master™

## High Performance Handheld Spectrum Analyzer

### MS2724C

9 kHz to 20 GHz

#### Introduction

Anritsu's high performance handheld spectrum analyzer provides the wireless professional the performance needed for the most demanding measurements in harsh RF and physical environments. Whether it is for spectrum monitoring, broadcast profiling, interference analysis, RF and microwave measurements, regulatory compliance, or Wi-Fi and wireless network measurements, the Spectrum Master is the ideal instrument for making fast and reliable measurements.

#### Spectrum and Interference Analyzer Highlights

- Measure: Occupied Bandwidth, Channel Power, ACPR, C/I
- Interference Analyzer: Spectrogram, Signal Strength, RSSI
- Dynamic Range: > 104 dB in 1 Hz RBW
- DANL: -180 dBm in 1 Hz RBW
- Phase Noise: -100 dBc/Hz @ 10 kHz offset at 1 GHz
- Frequency Accuracy: ± 25 ppb with GPS On
- 1 Hz to 10 MHz Resolution Bandwidth (RBW)
- Traces: Normal, Max Hold, Min Hold, Average, # of Averages
- Detectors: Peak, Negative, Sample, Quasi-peak, and True RMS
- Markers: 6, each with a Delta Marker, or 1 Reference with 6 Deltas
- Limit Lines: up to 40 segments with one-button envelope creation
- Trace Sever-on-Event: crossing limit line or sweep complete

#### Capabilities and Functional Highlights

- LTE, TD-LTE
- GSM/EDGE
- W-CDMA/HSPA+
- TD-SCDMA/HSPA+
- CDMA, EV-DO
- Fixed, Mobile WiMAX
- AM/FM/SSB Demodulator
- Zero-span IF Output
- Gated Sweep
- GPS Logging of stored traces
- Internal Pre-amplifier standard
- High Accuracy Power Meter
- 4, 8, 8, 18, 28 GHz USB Sensors
- Channel Scanner
- 3.4 inch Display
- Burst Detect
- 4.5 minute warm-up time
- 2.5 hour battery operation time
- Ethernet/USB Data Transfer
- MST Remote Access Tool



Spectrum Master™ MS2724C Spectrum Analyzer  
Handheld Size: 318 mm x 211 mm x 77 mm (12.4 in x 8.3 in x 3.0 in), Lightweight: 3.5 kg (7.8 lb)

 **Spectrum Analyzer**

All specifications and characteristics apply to revision 1 instruments under the following conditions, unless otherwise stated: 1) Instrument within its recommended calibration cycle, 2) After 5 minutes of warm-up time, where the instrument has completely stabilized to the ambient temperature, 3) Internal frequency reference used, 4) Cable analyzer and VNA measurements applicable after standard CGI calibration is performed using Anritsu calibration components, 5) Typical data does not include guard band for measurement uncertainty and temperature variation and is not warranted, 6) All specifications subject to change without notice, 7) Recommended calibration cycle is 12 months.

**Measurements**

<b>Smart Measurements</b>	Field Strength (uses antenna calibration tables to measure dBm/m <sup>2</sup> , dBW/m <sup>2</sup> , V/m, A/m, WdE/m <sup>2</sup> , WdE/cm <sup>2</sup> , or dBmV/m) Occupied Bandwidth (measures 99 % to 1 % power channel of a signal) Channel Power (measures the total power in a specified bandwidth) ACPR (adjacent channel power ratio) AM/FM/SSB Demodulation (wide/narrow FM, upper/lower SSB), (audio out only) C/I (carrier-to-interference ratio) Emission Mask (recall limit lines as emission mask)
---------------------------	---

**Setup Parameters**

Frequency	Center/Start/Stop, Span, Frequency Stop, Signal Standard, Channel #
Amplitude	Reference Level (RL), Scale, Attenuation Auto/Level, RL Offset, Pre-Amp On/Off, Detection
Span	Span, Span Up/Down (1-2-5), Full Span, Zero Span, Last Span
Bandwidth	RBW, Auto RBW, VBW, Auto VBW, RBW/VBW, Span/RBW
File	Save, Recall, Delete, Directory Management
Save/Recall	Setups, Measurements, Limit Lines, Screen Shots JPEG (save only), Severon-Event
Severon-Event	Creating Limit Line, Sweep Complete, Severon-Stop, Clear All
Delete	Selected File, All Measurements, All Made Files, All Content
Directory Management	Sort Method (Name/Type/Date), Ascend/Descend, Internal/USB, Copy
Application Options	Impedance (50 Ω, 75 Ω, Other)

**Sweep Functions**

Sweep	Single/Continuous, Manual Trigger, Recal, Detection, Minimum Sweep Time, Trigger Type
Sweep Mode	Fast, Performance, No FFT, Burst Detect
Detection	Peak, RMS/Avg, Negative, Sample, Quasi-peak
Triggers	Free Run, External, Video, Delay, Level, Slope, Hysteresis, Holdoff, Force Trigger Once

**Trace Functions**

Traces	Up to three traces (A, B, C), View/Blank, Write/Hold, Trace A/B/C Operations
Trace A Operations	Normal, Max Hold, Min Hold, Average, # of Averages, (always the live trace)
Trace B Operations	A → B, B ←→ C, Max Hold, Min Hold
Trace C Operations	A → C, B ←→ C, Max Hold, Min Hold, A → B → C, B → A → C, Relative Reference (dB), Scale

**Marker Functions**

Markers	Markers 1-6 each with a Delta Marker, or Marker 1 Reference with Six Delta Markers, Marker Table (On/Off/Large), All Markers Off
Marker Types	Style (Fixed/Tracking), Noise Marker, Frequency Counter Marker
Marker Auto-Position	Peak Search, Next Peak (Right/Left), Peak Threshold %, Set Marker to Channel, Marker Frequency to Center, Delta Marker to Span, Marker to Reference Level
Marker Table	1-6 markers frequency and amplitude, plus delta markers frequency offset and amplitude

**Limit Line Functions**

Limit Lines	Upper/Lower, On/Off, Edit, Move, Envelope, Advanced, Limit Alarm, Default Limit
Limit Line Edit	Frequency, Amplitude, Add Point, Add Vertical, Delete Point, Next Point Left/Right
Limit Line Move	To Current Center Frequency, By dB or Hz, To Marker 1, Offset from Marker 1
Limit Line Envelope	Create Envelope, Update Amplitude, Number of Points (41), Offset, Shape Square/Slope
Limit Line Advanced	Type (Absolute/Relative), Mirror, Save/Recall

**Frequency**

Frequency Range	9 kHz to 20 GHz (tunable to 0 Hz), Preamps 100 kHz to 20 GHz
Tuning Resolution	1 Hz
Frequency Reference	Aging: ±1.0 ppm/10 years Accuracy: ±0.3 ppm (25 °C ±25 °C) + aging
Autotuning External Frequency Reference	1, 1.2288, 1.544, 2.048, 2.4576, 4.8, 4.9152, 9, 9.8304, 10, 13, 19.8608 MHz
Frequency Span	10 Hz to 20 GHz including zero span
Sweep Time	10 μs to 600 seconds in zero span
Sweep Time Accuracy	±2 % in zero span

**Bandwidth (Performance Sweep Mode)**

Resolution Bandwidth (RBW)	1 Hz to 10 MHz in 1-3 accuracy ±10 % (-3 dB bandwidth)
Video Bandwidth (VBW)	1 Hz to 10 MHz in 1-3 accuracy (-3 dB bandwidth)
RBW with Quasi-Peak Detection	200 Hz, 9 kHz, 120 kHz (-6 dB bandwidth)
VBW with Quasi-Peak Detection	Auto VBW is On, RBW/VBW = 1

- **Generador de Señales MG3690C**

Technical Data Sheet

Anritsu

# RF/Microwave Signal Generators MG3690C

RF/Microwave Signal Generator,  
0.1 Hz to 70 GHz/500 GHz

## Introduction

The MG3690C is the "ideal microwave signal generator," offering unsurpassed frequency coverage, the lowest phase noise, leveled output power, spectral purity, switching speed, modulation performance, size, upgradability, reliability, and service. Our signal generators are configurable for a broad range of applications from R&D to manufacturing and depot repair. Anritsu provides you a total solution including proven reliability and standard 3 year warranty plus pre-sale and post-sale support that is the best in the industry.



MG3690C Microwave Signal Generator



**Signal Generator**

The specifications in the following pages describe the warranted performance of the instrument for 25 ± 10 °C. "Typical" specifications describe expected, but not warranted performance. They do not guarantee the performance of any individual product.

Frequency Coverage		
Model/Option No.	Frequency Coverage <sup>a</sup>	Output Connector
MG3692C	2 GHz to 20 GHz	2.92 mm K(f)
MG3694C	2 GHz to 40 GHz	2.92 mm K(f)
MG3695C	2 GHz to 50 GHz	1.85 mm V(f)
MG3697C	2 GHz to 67 GHz <sup>b</sup>	1.85 mm V(f)
Option 4	8 MHz to 2.2 GHz <sup>c</sup>	Model No. Dependent
Option 5	8 MHz to 2 GHz <sup>c</sup>	Model No. Dependent
Option 22	0.1 Hz to 10 MHz	Model No. Dependent

a. For frequency coverage beyond 70 GHz, utilize millimeter-wave multiplier 2000-1694 series (see page 18).

b. Operational to 70 GHz

c. All specifications apply ≥ 10 MHz

Options 4 and 5	Frequency extension down to 8 MHz Two options are available to extend the 2 GHz low end frequency limit of the base models down to 8 MHz. Option 4 uses a digital down-converter (DDC) with successive divide-by-two circuitry. It offers the best phase noise performance of the two choices, at the expense of some analog performance < 500 MHz. In that range, analog sweep mode is not available, and pulse modulation performance is specified as typical. In addition, frequency and phase modulation mod Index is scaled by the division ratio of each band of the DDC. Option 5 maintains all analog performance by using a heterodyne mixing down-converter, but does not improve phase noise performance.
Option 22	If frequency coverage down to 0.1 Hz is desired, Option 22 can be added with either Option 4 or 5. Option 22 uses Direct Digital Synthesis (DDS) for CW and Step Sweep modes of operation. Modulation and analog sweep are not available in the DDS band. Frequency resolution < 10 MHz is 0.02 Hz. Output power across the complete instrument frequency range is degraded by 2 dB.

**CW Mode**

Accuracy	Same as internal or external 10 MHz time base
Internal Time Base Stability	With aging: < $2 \times 10^{-9}$ /day (< $5 \times 10^{-10}$ /day with Option 16) With temperature: < $2 \times 10^{-8}$ /°C over 0 °C to 55 °C (< $2 \times 10^{-10}$ /°C with Option 16)
Resolution	0.01 Hz
Internal Time Base Calibration	The internal time base can be calibrated via the System Cal menu to match an external reference (10 MHz ± 50 Hz).
External 10 MHz Reference Input	Accepts external 10 MHz ± 50 Hz (typical) 0 dBm to +20 dBm time base signal Automatically disconnects the internal high-stability time-base option (if installed) Rear panel BNC (50 Ω Impedance) Selectable bandwidth for best phase noise immunity or best phase tracking performance
10 MHz Reference Output	1 V <sub>rms</sub> into 50 Ω AC coupled Rear panel BNC (50 Ω Impedance)
Phase Offset	Adjustable in 0.1 degree steps
Electronic Frequency Control (EFC)	-4 V to +4 V Input range 0.2 ppm/V typical sensitivity (0.08 ppm/V typical for Option 3x) ≤ 250 Hz modulation bandwidth Rear panel BNC (high impedance)

**Phase-Locked Step Sweep Mode**

Sweep Width	Independently selected, 0.01 Hz to full range Every frequency step in sweep range is phase-locked.
Accuracy	Same as internal or external 10 MHz time base
Resolution (Minimum Step Size)	0.01 Hz
Linear/Log Sweep	User-selectable linear or log sweep In log sweep, step size logarithmically increases with frequency.
Steps	User-selectable number of steps or the step size
Number of Steps	Variable from 1 to 10,000
Step Size	0.01 Hz to the full frequency range of the instrument If the step size does not divide into the selected frequency range, the last step is truncated.
Dwell Time Per Step	Variable from 1 ms to 99 s
Fixed Rate Sweep	Variable from 30 ms to 99 s Allows the user to set the total time of the sweep, including lock time.