

CONSTRUCCION DE UNA ANTENA PATCH MULTIBANDA DE 2.4 GHZ Y 5 GHZ

JESSICA JULIANA GALVIS RINCÓN

000232236

GERMAN HUMBERTO VARGAS ALVAREZ

00085087

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2018

1

CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA PATCH MULTIBANDA DE 2.4 GHZ Y 5 GHZ

JESSICA JULIANA GALVIS RINCÓN

000232236

GERMAN HUMBERTO VARGAS ALVAREZ

00085087

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título

de:

Ingenieros Electrónicos

DIRECTOR

FABIO ALONSO GUZMAN SERNA

Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA

BUCARAMANGA

2018

Nota de aprobación

Firma de jurado

Firma de jurado

A mis padres y a mi hermana, quienes me han apoyado en todas las decisiones de mi vida y han sido el soporte durante todo mi proceso educativo.

Jessica Juliana Galvis Rincón

A Dios y a todos aquellos locos que luchan por cambiar la historia de su entorno.

German Humberto Vargas Álvarez

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Dios por brindarnos la fuerza y la capacidad de terminar esta etapa de nuestra educación.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por formarnos como profesionales y como personas con las capacidades de afrontar nuevos retos en la vida.

Al ingeniero Fabio Alonso Guzmán Serna por ser nuestro guía y estar siempre presente durante el proceso de este proyecto.

A todas aquellas personas quienes, de alguna manera, fueron de gran apoyo para conseguir este objetivo. Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido	
INTRODUCCIÓN.....	14
DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	15
OBJETIVOS.....	16
JUSTIFICACIÓN	17
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 Antena.....	18
1.1.1 Antenas de ranura en U	18
1.1.2 Reseña histórica	18
1.2 Parámetros de la antena.....	19
1.2.1 Patrón de radiación.....	19
1.2.2 Directividad	20
1.2.3 Ganancia	20
1.2.4 Parámetros S.....	21
1.2.5 Eficiencia	23
1.2.6 Ancho de banda	23
1.2.7 Carta de Smith.....	23
1.3 Softwares enfocados en la simulación de antenas.....	24
1.3.1 Advanced Design System (ADS)	24
1.3.2 MATLAB.....	25
1.4 Cámara anecoica	25
2 DISEÑO DE UNA ANTENA TIPO PARCHE CON INCISION EN U.....	26
2.1 Características de una antena microstrip	26
2.2 Antenas con incisión en U.....	27
2.3 Antenas con incisión en U de doble y triple banda.....	27
2.4 Características básicas: Substrato del material	28
2.5 Selección del substrato	28
2.6 TMM10i.....	29
2.7 Método de alimentación.....	30

2.8	Modelo de línea de transmisión	31
2.9	Método de los momentos.....	35
2.10	Antenna Toolbox de Matlab	35
2.11	Parámetros para simular la antena usando el software Matlab	36
2.12	Acople de impedancias	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	37
3.2	Antena rectangular con incisión en U.....	37
3.2.1	Etapa de dimensiones iniciales	37
3.2.2	Etapa de optimización.....	40
3.2.2.1	Simulación con ADS.....	40
3.2.2.2	Simulación con Matlab.....	42
3.2.2.3	Parametrización inicial.....	43
3.2.2.4	Parametrización final	46
3.3	Análisis de parametrización	50
3.4	Construcción de las antenas	51
3.5	Análisis de resultados	52
3.5	Análisis del patrón de radiación.....	54
3.5.1	Análisis del patrón de radiación de la antena de uso comercial	54
3.5.2	Análisis del patrón de radiación de la antena diseñada	55
3.6	Análisis del patrón de radiación de la antena de uso comercial	57
3.6.2	Análisis del patrón de radiación de la antena diseñada	58
3.6	Análisis de ancho de rayo de potencia de la antena.....	60
	Conclusiones Y Observaciones.....	62
	Bibliografía	63

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1 Patrón de radiación tridimensional	20
Figura. 2 Red de dos puertos.....	21
Figura. 3 Fórmulas para hallar S_{11} y S_{21}	22
Figura. 4 Fórmulas para hallar S_{12} y S_{22}	22
Figura. 5 Procedimiento para medir S_{11} . Las impedancias características de las líneas de transmisión son Z_{o1} y Z_{o2}	22
Figura. 6 Estructura de una antena Microstrip	26
Figura. 7 Configuración parche con incisión en U	28
Figura. 8 Alimentación mediante sonda coaxial.....	31
Figura. 9 Modelo de línea de transmisión de una antena.....	32
Figura. 10 Fringing effects en una antena de parche rectangular.....	33
Figura. 11 Ecuación de relación entre voltajes y corrientes de cada segmento	35
Figura. 12 ondas incidente y reflejada	38
Figura. 13 Grafica de la carta de Smith para la frecuencia de 2.4GHz	39
Figura. 14 Grafica de la carta de Smith para la frecuencia de 5GHz	39
Figura. 15 Circuito RF con parámetros de reflexión S_{11}	41
Figura. 16 Graficas de la Carta de Smith y parámetros de reflexión S_{11}	41
Figura. 17 código base para el modelado de una antena parche con incisión en U multibanda de única capa.	42
Figura. 18 Diagrama de flujo diseño antena tipo parche con incisión en U.....	44
Figura. 19 Diagrama de flujo del funcionamiento de Matlab.	45
Figura. 20 . Plano del parche con dos incisiones en U y gráfica de parámetros S_{11}	45
Figura. 21 Parámetros de reflexión S_{11}	46
Figura. 22 Parámetros de reflexión S_{11} para tres incisiones en U.	47
Figura. 23 Parámetros de reflexión S_{11} con $d= 7\text{mm}$	47
Figura. 24 Parámetros de reflexión S_{11} con $d= 9\text{mm}$	48
Figura. 25 Parámetros de reflexión S_{11} para el material TMM4 $\epsilon_r=4.7$ y $h=0.51$	49
Figura. 26 Parámetros de reflexión S_{11} para el material TMM6 $\epsilon_r=6.3$ y $h=0.38$	49
Figura. 27 Parámetros de reflexión S_{11} para el material TMM10i.	50
Figura. 28 Antena tipo parche rectangular con incisiones en U de 2.4GHz y 5GHz.....	52
Figura. 29 Gráfica S_{11} antena 2.4GHz y 5GHz.....	53
Figura. 30 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 2.4GHz	54
Figura. 31 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 2.4GHz	55
Figura. 32 Patrón de Radiación simulado para la frecuencia de 2.4GHz	55
Figura. 33 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 2.4GHz	56
Figura. 34 Patrón de radiación cartesiano Lab-Volt antena en la frecuencia de 2.4GHz... ..	56
Figura. 35 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 5GHz.....	57
Figura. 36 Patrón de radiación cartesiano Lab-Volt antena en la frecuencia de 5GHz.....	57
Figura. 37 Patrón de Radiación simulado para la frecuencia de 5GHz.....	58
Figura. 38 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 5GHz.....	58
Figura. 39 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 5GHz.....	59

Figura. 40 potencia mitad de antena en la frecuencia de 2.4GHz 60
Figura. 41 Potencia mitad de antena en la frecuencia de 5GHz 60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Hechos relevantes de las antenas microstrip con ranura	19
Tabla 2 Dieléctricos trabajados en la construcción de antenas.....	30
Tabla 3 Dimensiones de la antena de parametrización inicial.....	43
Tabla 4 Dimensiones de la antena de parametrización final.....	46

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA PATCH MULTIBANDA DE 2.4 GHZ Y 5 GHZ

AUTOR(ES): JESSICA JULIANA GALVIS RINCÓN
GERMÁN HUMBERTO VARGAS ALVAREZ

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA

RESUMEN

Este proyecto consiste en construir una antena parche multibanda que trabaje en las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz. Partiendo de los conceptos del funcionamiento de las antenas y sus propiedades, se creó un código en un software de uso matemático, con los parámetros de una antena parche con incisión en forma de U. Se simuló su funcionamiento en las bandas de 2.4 GHz y 5GHz. Se construyó la antena con un material llamado TMM10i. Se comprobaron los valores teóricos con una toma del patrón de radiación por medio del software LVADM_ANT en conjunto con el kit de Lab-Volt.

PALABRAS CLAVE:

Patrón de radiación, parámetros de las antenas microstrip y multibanda.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: CONSTRUCTION OF A MULTI-BAND PATCH ANTENNA FOR 2.4GHZ AND 5GHZ

AUTHOR(S): JESSICA JULIANA GALVIS RINCÓN
GERMÁN HUMBERTO VARGAS ALVAREZ

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA

ABSTRACT

This project consists on building a multi-band patch antenna for the frequencies of 2.4GHz and 5GHz. Based on the theoretical concepts of the patch u-slot antenna and its properties, a code was created using a mathematical-oriented software. The antenna was simulated to prove its performance on the frequencies of 2.4GHz and 5GHz. The designed antenna was built using a material called TMM10i. Several tests were made to compare the theoretical values with the experimental values taking a radiation pattern using the software LVADM_ANT along with the Lab-Volt kit

KEYWORDS:

Radiation pattern, microstrip antenna parameters and Multi-band.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se irán abarcando conceptos generales para lograr la comprensión de los resultados obtenidos y sus análisis, de los cuales se hará énfasis en el primer capítulo.

En el segundo capítulo se dan a conocer las características, ventajas y desventajas de las antenas parche multibanda con incisiones en U. Las antenas microstrip tienen como desventaja tener un ancho de banda angosto y tener un parche de gran tamaño para frecuencias en el rango de los 1000Mhz [6]. Debido a la necesidad de miniaturización por parte de la industria de las telecomunicaciones, es de utilidad recurrir a las antenas con incisión en U, las cuales ofrecen un mayor rango de banda ancha en antenas microstrip de menores dimensiones. Las antenas con incisión en U son también utilizadas para una operación de única, doble y triple banda.

Se llevará a cabo el diseño y construcción de una antena multibanda que opera en las frecuencias de 2.4GHz y 5GHz basado en la teoría recopilada en los anteriores capítulos. Se escogerá una antena con 3 incisiones en U tomando como base un ejemplo de uso libre extraído de la página de un software de enfoque matemático y documentos publicados en la IEEE, los cuales se explicarán con mayor detenimiento en el tercer capítulo. Basado en los resultados se realizarán pruebas experimentales de la antena construida y se realizarán análisis de lo obtenido experimentalmente respecto a las simulaciones usando el software LVADM_ANT en conjunto con el kit de Lab-Volt.

DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad se manejan diferentes bandas de frecuencias para una determinada aplicación, sin embargo, para cambiar de frecuencia, se deben modificar el sistema y trabajar con ellas por separado, sin tener la opción de trabajar con una misma antena para ambas frecuencias.

Para Wi-Fi , se tienen 2 bandas de frecuencias de trabajo que son 2.4GHz y 5GHz y es de nuestro interés, plantear una alternativa desde el punto de vista de las antenas para construir una que opere en ambas bandas de frecuencia.

Se propone una alternativa para este problema, haciendo uso de diferentes materiales y con una configuración diferentes y de esta manera ofrecer una manera de trabajar con ambas frecuencias a la vez.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Construir una antena patch multibanda

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- A partir de los parámetros fundamentales de las antenas, obtener las especificaciones físicas y electromagnéticas de una antena multibanda.
- Construir a partir de las especificaciones obtenidas anteriormente.
- Tomar medidas experimentales de la antena construida.

JUSTIFICACIÓN

El auge que han tomado los dispositivos que utilizan la tecnología wi-fi, ha hecho necesario el uso de componentes que sean capaces de adaptarse a diferentes formas y tener tamaño compacto.

La tecnología Microstrip ofrece la opción de construir componentes de reducido tamaño, bajo costo y eficientes.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antena

La antena es aquel dispositivo que permite la recepción y el envío de ondas electromagnéticas hacia un espacio libre. Una antena transmisora lo que hace es transformar voltajes o corrientes en ondas electromagnéticas y la receptora realiza el proceso inverso.

Dependiendo de su uso, las antenas deben expandir al máximo su potencia radiada, tal es el caso de las centrales de los teléfonos móviles o de una emisora de radio general o aquellas que canalizan la potencia para no interferir otros servicios.

Las antenas se caracterizan eléctricamente por observar algunas condiciones como el diagrama de radiación, el ancho de banda, la directividad, la ganancia, la polarización y la anchura de haz, entre las más importantes.

1.1.1 Antenas de ranura en U

Las antenas de ranura en U fueron presentadas en 1995 por Huynh y Lee como una antena de una sola capa, con un solo parche linealmente polarizado. Se estableció que la antena parche de ranura en U podía proveer impedancia de ancho de banda en exceso de un 30% para un grosor de sustrato de aire de aproximadamente $0.08\lambda_0$, y un exceso de 20% en materiales de grosor similar.

En estudios reciente se ha visto que la antena de ranura en U puede ser diseñada no solo para aplicaciones de banda ancha, sino también para aplicaciones de doble banda y triple banda, al igual que para operación de polarización circular. [2]

1.1.2 Reseña histórica

Las antenas han sido una tecnología que ha ido avanzando con el paso de los años, desde sus conceptos más básicos hace dos siglos, hasta lo que conocemos el día de hoy como el mundo de las telecomunicaciones. A continuación, se presentarán algunos de los avances más significativos de esta tecnología.

Tabla 1 Hechos relevantes de las antenas Microstrip con ranura

AÑO	SUCESO
1938	La antena de incisión fue creada por Alan Blumlein [8]
1953	G. A. Deschamps fue el primero en dar el concepto de los radiadores microstrip [3]
1955	Gutton y Baissinot patentaron el primer documento en antenas microstrip [3]
1974	Munson fue el primero en trabajar físicamente con las antenas microstrip [9]
1995	Huynh y Lee presentaron un estudio experimental sobre las antenas con incisión en U [10]

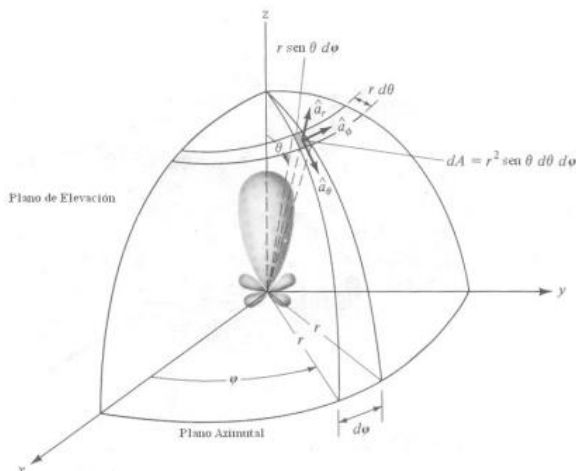
1.2 Parámetros de la antena

Cada antena tiene propiedades distintas que sirven para poder caracterizarlas, estas características son los llamados parámetros de las antenas. Estos parámetros se encuentran relacionado con la radiación que, de la antena es emitida. [4]

1.2.1 Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena se puede definir como la presentación espacial de la energía que es radiada por una antena. Esta representación generalmente se hace en el campo lejano y puede llevarse a cabo en dos o tres dimensiones. Cuando se habla de un patrón de radiación en tres dimensiones existen dos planos sobre los cuales se grafican los puntos correspondientes a la energía radiada de la antena; el plano direccional y el plano de elevación. [4]

Figura. 1 Patrón de radiación tridimensional



Fuente: Antenna Theory and Design

1.2.2 Directividad

La directividad constituye probablemente el parámetro de mayor importancia a la hora de juzgar el patrón de radiación de una antena. La directividad se define como “la razón de intensidad radiada en una dirección a la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones”. En otras palabras, la directividad se puede considerar como la razón de la intensidad radiada en una dirección a la intensidad de radiación de una antena con patrón isotrópico. Entre más alta sea la directividad, el haz de radiación será más afiliado. [2]

1.2.3 Ganancia

Las antenas son elementos pasivos y por lo tanto no pueden realizar una amplificación, es por ello por lo que el término “ganancia” cuando se habla de antenas, varía su definición convencional utilizada para circuitos electrónicos. La definición de ganancia dice que “es la razón de la intensidad de radiación en cualquier dirección a la radiación de intensidad que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de manera isotrópica”. [2]

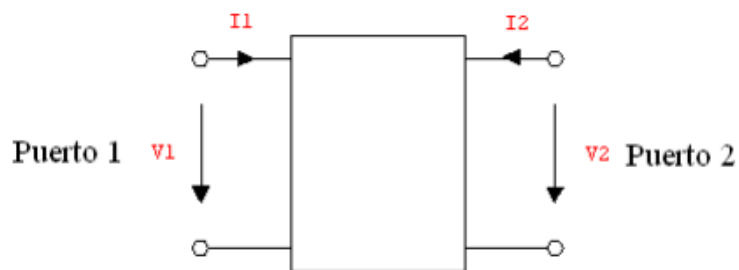
$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}$$

Ecuación 1

1.2.4 Parámetros S

Las antenas como muchos circuitos electrónicos pueden caracterizarse como una red de dos puertos, y analizar de esta forma la respuesta general del sistema. Los parámetros existentes para redes de dos puertos son: parámetros de impedancia o parámetros Z, parámetros de admitancia o parámetros Y, parámetros híbridos o parámetros H, parámetros de transmisión o parámetros T, parámetros de transmisión inversa o parámetros ABCD y parámetros de dispersión o parámetros S. una vez conociendo los parámetros de una red de dos puertos, esta se puede caracterizar en su totalidad. [2]

Figura. 2 Red de dos puertos



Fuente: Teoría básica de las antenas.

Parámetros S_{11} . Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 1 en comparación con la cantidad de potencia que se está aplicando en el puerto 1. El parámetro S_{11} también es conocido como “el coeficiente de reflexión de puerto de entrada”. [2]

Parámetros S_{12} . Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 1 en comparación con la enviada por el puerto 2. A este parámetro también se le conoce como “coeficiente de transmisión inversa”. [2]

Parámetro S_{21} . Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 2 en comparación con la enviada por el puerto 1. A este parámetro se le conoce como “coeficiente de transmisión directa”. [2]

Parámetros S_{22} . Este parámetro mide la potencia reflejada en el puerto 2 en comparación con la cantidad de potencia que se envía del puerto 2. A este parámetro también se le conoce como “coeficiente de reflexión del puerto de salida”. [2]

Figura. 3 Fórmulas para hallar S11 y S21

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \text{ y } S_{21} = \frac{b_2}{a_1} = \frac{V_2^-}{V_1^+}$$

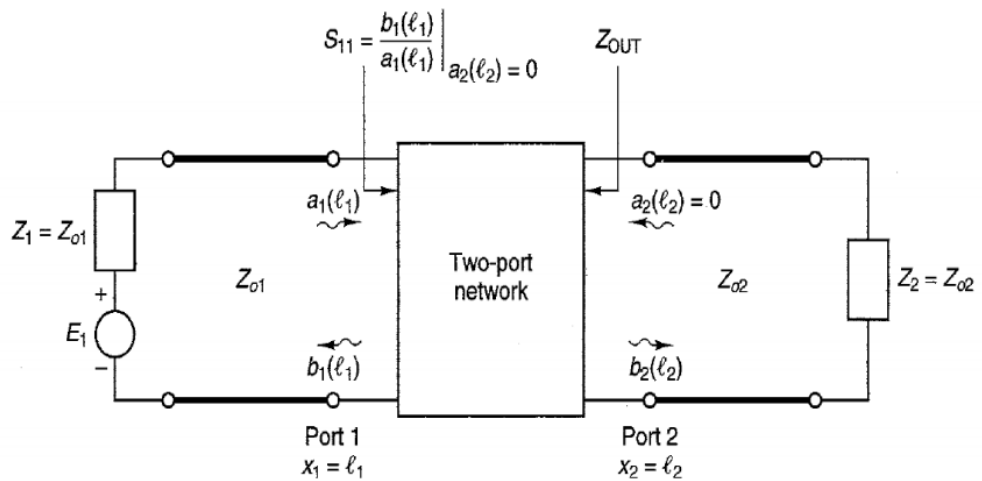
Fuentes: Modelado de componentes y circuitos de RF.

Figura. 4 Fórmulas para hallar S12 y S22

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} = \frac{V_1^-}{V_2^+} \text{ y } S_{22} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{V_2^-}{V_2^+}$$

Fuentes: Modelado de componentes y circuitos de RF.

Figura. 5 Procedimiento para medir S₁₁. Las impedancias características de las líneas de transmisión son Z_{o1} y Z_{o2}.



Fuentes: Modelado de componentes y circuitos de RF.

1.2.5 Eficiencia

La eficiencia de una antena sirve como un parámetro para determinar las pérdidas presentes en la entrada de un circuito cualquiera. Para una antena la eficiencia total está dada por: [4]

$$e_0 = e_r e_c e_d$$

Ecuación 2

e_r es la eficiencia de reflexión de una antena debida a desacoplamientos de impedancia entre la antena y la guía de transmisión.

e_c es la eficiencia de conductor asociada con las pérdidas por efecto Joule, es decir con potencia que es transferida al medio.

e_d es la eficiencia del dieléctrico asociada con las pérdidas del dieléctrico con el cual se esté trabajando. [4]

1.2.6 Ancho de banda

En antenas el ancho de banda es el rango o número de frecuencias para las cuales una antena transmite o recibe una señal es la cantidad de información o de datos que se puede enviar a través de una conexión de red en un período de tiempo dado. El ancho de banda se indica generalmente en bites por segundo (BPS), kilobytes por segundo (kbps), o megabytes por segundo (mps). [16]

1.2.7 Carta de Smith

Phillip H. Smith en 1939, teniendo presente que la impedancia $Z(z)$ está biunívocamente relacionada con el coeficiente de reflexión $\Gamma(z)$, y éste tiene un módulo acotado a uno $|\Gamma| \leq 1$, concibió una representación gráfica de la impedancia $Z(z)$ en términos del coeficiente de reflexión $\Gamma(z)$, que tiene un uso prácticamente universal en la actualidad.

La carta de Smith es un nomograma, el cual es un diagrama bidimensional que permite realizar cálculos aproximados gráficamente.

La carta de Smith permite, de manera sencilla y evitando errores en la manipulación de números complejos, calcular gráficamente la impedancia en un punto de una línea de transmisión a partir del coeficiente de reflexión en ese punto y viceversa, igualmente, permite calcular gráficamente la impedancia o el coeficiente de reflexión en un punto de una línea a partir del conocimiento de esta o el mismo en otro punto, entre otras.

La relación entre la impedancia $Z(z)$ y $\rho(z)$ se define como una impedancia normalizada respecto a la impedancia intrínseca de la línea.

$$\bar{Z} = \frac{Z}{Z_0} = r + j.x = \frac{1+\hat{\Gamma}}{1-\hat{\Gamma}}$$

Ecuación 3

$$\hat{\Gamma} = \frac{\bar{Z} - 1}{\bar{Z} + 1} \leftarrow \hat{\Gamma} = |\hat{\Gamma}|.e^{j\varphi} = \hat{\Gamma}_r + j.\hat{\Gamma}_i$$

Ecuación 4

Donde:

$\hat{\Gamma}$: coeficiente de reflexión

\bar{Z} : impedancia de la carga

Z_0 : impedancia característica de la línea de transmisión

Matemáticamente corresponde una transformación entre la impedancia normalizada y el coeficiente de reflexión complejo que se caracteriza por ser conforme (conserva los ángulos entre dos curvas) [17]

1.3 Softwares enfocados en la simulación de antenas

existen en la actualidad diversos softwares de simulación que permiten ver el funcionamiento de los circuitos electrónicos en condiciones ideales. Estos softwares constan de toolboxes que facilitan la simulación de diferentes aplicaciones en la electrónica, en este caso, de las antenas.

1.3.1 Advanced Design System (ADS)

Advanced Design System es el software creado por Keysight Technologies, líder mundialmente en la automatización de diseño electrónico para RF, microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad. Con una interfaz de fácil manejo, ADS es pionero de las tecnologías más innovadoras y comercialmente exitosas, tales como los parámetros S y los simuladores 3D EM, son usados por compañías de comunicaciones inalámbricas y de redes, al igual que en las industrias aeroespacial y de defensa. [14] [18]

1.3.2 MATLAB

El software MATLAB es un entorno de computación técnica que posibilita la ejecución de cálculo numérico y simbólico de forma rápida y precisa, acompañado de características gráficas y de visualización avanzadas aptas para el trabajo científico y la ingeniería.

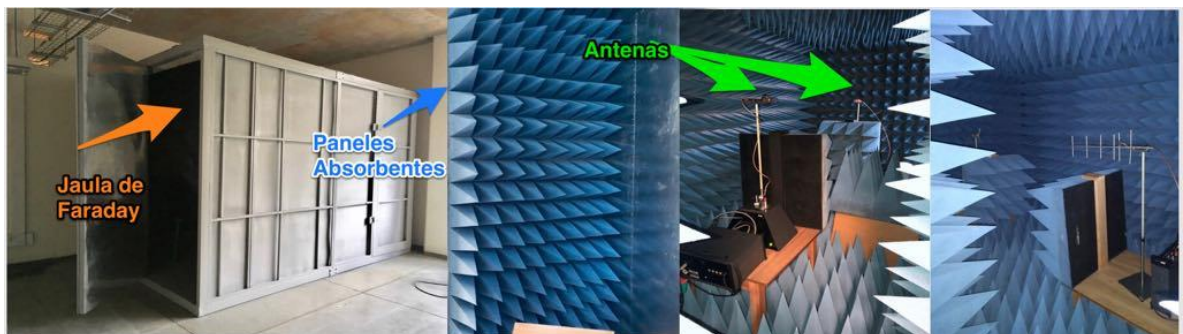
En el campo de las comunicaciones, MATLAB permite realizar modelado y diseño de sistemas DPS, trabajar con sistemas conmutados, telefonía fija y móvil o ADSL y con modelado de canales emisor-receptor. [15] [19]

1.4 Cámara anecoica

Es una especie de bóveda que además de aislar las frecuencias externas, bloquea en su interior cualquier tipo de reflexión, simulando lo que los especialistas denominan el espacio libre, un entorno donde se pueden realizar mediciones de equipos o dispositivos electrónicos de una manera totalmente libre de interferencias y reflexiones.

En comparación con la jaula de Faraday, que es solo un cuarto blindado que no deja entrar señales provenientes de estaciones de radio, televisión, de antenas de telefonía celular o wi-fi, entre otras, la cámara anecoica, además de tampoco permitir la entrada de interferencias externas, esta forrada en su interior con estructuras piramidales que, por su forma y por estar hechas de poliuretano cargado con partículas de carbón u otros materiales, transforman las ondas electromagnéticas en otro tipo de energía. De esta manera, cuando en el interior de la cámara un dispositivo emite una señal, esta no se refleja (“no rebota”) y, en consecuencia, no afecta ninguna medición. [20]

Figura 6. Estructura técnica de una cámara anecoica



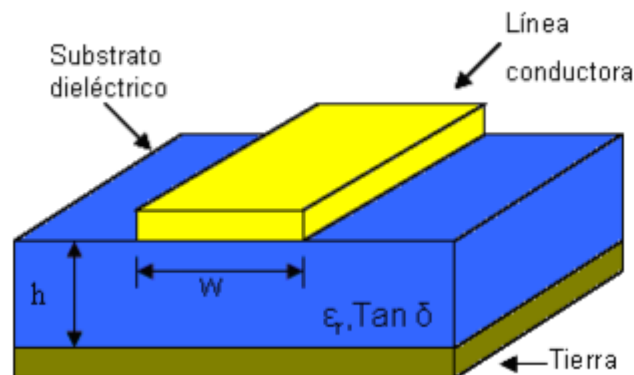
Fuente: Autor

2 DISEÑO DE UNA ANTENA TIPO PARCHE CON INCISION EN U

2.1 Características de una antena microstrip

Las antenas tipo parche están basadas en la tecnología microstrip y sus características son las siguientes: Las antenas tipo parche poseen una tira conductora de largo L , ancho W y grosor t . La tira conductora se encuentra situada en la parte superior de un sustrato dieléctrico, el cual tiene un ancho h . En la parte inferior del sustrato dieléctrico se tiene un plano referenciado a tierra. [21]

Figura. 6 Estructura de una antena Microstrip



Fuente: Capítulo 3: Antenas tipo parche o de microstrip

Los rangos de medidas y características de los parámetros mencionados son los siguientes:

El valor de t tiene que ser muy delgado: $t \ll \lambda_0$ (λ_0 es la longitud de onda de la señal en el espacio libre).

El valor de L puede variar dependiendo de la forma utilizada.

Al ancho del sustrato debe ser grueso y por lo general se puede considerar: $h \ll \lambda_0$.

La permitividad eléctrica del sustrato dieléctrico por lo general se encuentra dentro de los rangos. $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$.

El patrón de radiación de una antena de parche es omnidireccional, aunque la potencia radiada es emitida solamente hacia la parte superior de la antena en su forma ideal debido a que se considera un plano de tierra infinito, el cual bloquea radiación hacia la parte inferior de la antena debido a que el plano de tierra es de dimensiones finitas, sin embargo, los lóbulos posteriores son de pequeñas dimensiones en comparación con el lóbulo principal por lo que pueden despreciarse. [21]

2.2 Antenas con incisión en U

La geometría básica de una antena con incisión en U fue introducida en 1995 por Hyunh y Lee como una antena parche linealmente polarizada de única banda, único parche y única capa. [21]

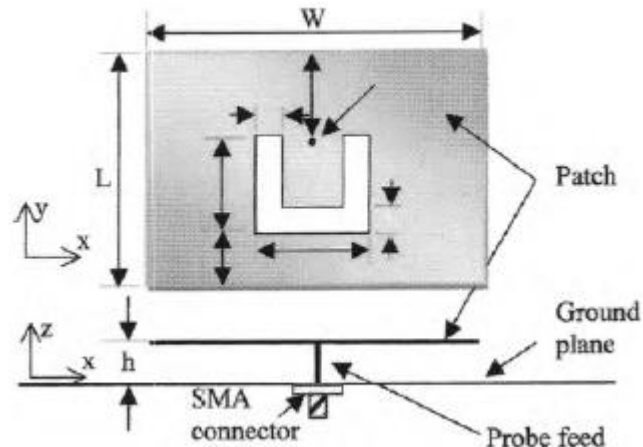
Estudios recientes han demostrado que las antenas con incisión en U pueden ser diseñadas no solo para una única banda, sino también para dos y tres bandas, al igual que para operación de polarización circular. [21]

2.3 Antenas con incisión en U de doble y triple banda

Cuando el rango de la frecuencia es mayor a 1.5, se recomienda el uso de una sonda coaxial para la alimentación, y ajustar las dimensiones de las incisiones en U para que la resonancia del parche y de la incisión no se mezclen para dar una respuesta de banda ancha.

Para alcanzar una operación de triple banda, dos incisiones son necesarias. También se ha demostrado que haciendo la segunda incisión en forma de H se consigue mayor flexibilidad. Esta configuración, cuando es diseñada apropiadamente, puede producir impedancias de banda ancha en exceso de 40%. [22]

Figura. 7 Configuración parche con incisión en U



Fuente: IEEEExplore

2.4 Características básicas: Substrato del material

Al inicio, en las primeras investigaciones de las antenas con incisión en U se usó substrato de aire o espuma, más adelante en esta investigación se confirmó que este diseño de banda ancha se podía también implementar con materiales de substrato.[22]

2.5 Selección del substrato

Es de conveniencia que el substrato dieléctrico elegido para alojar el parche sea de constante dieléctrica relativa ϵ_r baja a efectos del ancho de banda, y también la eficiencia, de la antena. Otra característica importante del material empleado como substrato es la tangente de pérdidas $\tan \delta$ que convendrá que sea lo más pequeña posible. Igualmente, importantes son las tolerancias de la constante dieléctrica y la estabilidad en temperatura.[23]

La dificultad en la selección del substrato yace en la necesidad de satisfacer de forma simultánea los requerimientos electrónicos y físicos de la antena. Por esto hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Variaciones de la constante dieléctrica y la pérdida tangencial con respecto a la temperatura.
- Rango de temperatura de homogeneidad e isotropía.
- Variaciones de la estabilidad dimensional con la temperatura, la humedad y el tiempo.

- Resistencia a los impactos.
- Resistencias a los químicos.
- Resistencia estructural.
- Flexibilidad. [24]

2.6 TMM10i

Los materiales termoestables de microondas TMM son de cerámica compuestos de polímero diseñados para la alta fiabilidad y aplicaciones de líneas con placas de microcintas. TMM laminados están disponibles en una amplia gama de constantes dieléctricas y revestimientos.

Los laminados de TMM tienen un coeficiente térmico excepcionalmente bajo de la constante dieléctrica (cualquier variación en temperatura en el material, altera la respuesta y funcionamiento de la antena). Cuando se tiene el material resguardado por un tiempo considerable las propiedades de este tienden a cambiar, la más considerable es la variación de la constante dieléctrica.

Las placas de TMM se basan en resinas termoestable y no se ablandan cuando se calientan. La unión de alambre con componentes y las pistas del circuito se puede realizar sin preocupaciones de levantamiento de plataforma o la deformación del sustrato.

Las láminas de TMM combinan muchas de las características deseables de los substratos cerámicos con la facilidad de las técnicas de procesamiento de los substratos blandos.

El sustrato base es resistente a los agentes de ataque y solventes utilizados en la producción de circuitos impresos.

Este material ofrece los siguientes parámetros:

- Constante dieléctrica= 9.8
- Espesor=6mm
- Tangente de perdidas=0.002
- Espesor del cobre =35 μm [25]

Tabla 2 Dieléctricos trabajados en la construcción de antenas

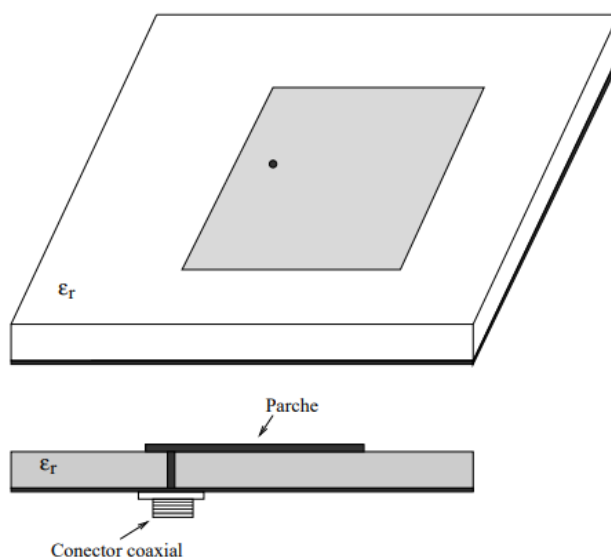
PROPERTY	TMM3	TMM4	TMM6	TMM10	TMM10i	TMM13i	DIRECTION	UNITS	CONDITIONS	TEST METHOD
⁽¹⁾ Dielectric Constant, ϵ_r , Process	3.27 ± 0.032	4.50 ± 0.045	6.00 ± 0.080	9.20 ± 0.230	9.80 ± 0.245	⁽¹⁾ 12.85 ± 0.35	Z		10 GHz	IPC-TM-650 method 2.5.5.5
⁽²⁾ Dielectric Constant, ϵ_r , Design	3.45	4.70	6.3	9.8	9.9	12.2			8 GHz - 40 GHz	Differential Phase Length Method
⁽³⁾ Dissipation Factor, $\tan \delta$	0.0020	0.0020	0.0023	0.0022	0.0020	0.0019	Z		10 GHz	IPC-TM-650 method 2.5.5.5
Thermal Coefficient of ϵ_r	+37	+15	-11	-38	-43*	-70		ppm/°K	-55 to +125°C	IPC-TM-650 method 2.5.5.5
Insulation Resistance	>2000	>2000	>2000	>2000	>2000	>2000		Gohm	C/96/60/95	ASTM D257
Volume Resistivity	3X10 ⁸	6X10 ⁸	1X10 ⁸	2X10 ⁸	2X10 ⁸	-		Mohm cm		ASTM D257
Surface Resistivity	>9X10 ⁸	1X10 ⁹	1X10 ⁹	4X10 ⁷	4X10 ⁷	-		Mohm		ASTM D257
Flexural Strength	16.53	15.91	15.02	13.62	-	-	X,Y	kpsi	A	ASTM D790
Flexural Modulus	1.72	1.76	1.75	1.79	1.80*		X,Y	Mpsi	A	ASTM D790
Water Absorption (2X2)	1.27mm (0.050")	0.06	0.07	0.06	0.09	0.16		%	D/24/23	ASTM D570
	3.18mm (0.125")	0.12	0.18	0.20	0.20	0.13	0.13			
Specific Gravity	1.78	2.07	2.37	2.77	2.77	3.0			A	ASTM D792
Specific Heat	0.87	0.83	0.78	0.74	0.72*	-		J/g/K	A	Calculated
Thermal Conductivity	0.70	0.70	0.72	0.76	0.76	-	Z	W/m/K	80°C	ASTM C518
Coefficient of Thermal Expansion	15	16	18	21	19	19	X,Y	ppm/K	0 to 140°C	ASTM E 831 IPC-TM-650, 2.4.41
	23	21	26	20	20	20	Z			
Td	425	425	425	425	425	425			°C TGA	ASTM D3850
Copper Peel Strength	5.7 (1.0)	5.7 (1.0)	5.7 (1.0)	5.0 (0.9)	5.0 (0.9)	4.0 (0.7)	X,Y	lb/inch (N/mm)	after solder float 1 oz. EDC	IPC-TM-650 Method 2.4.8
Lead-Free Process Compatible	YES	YES	YES	YES	YES	YES				

Fuente: Rogers Corporation

2.7 Método de alimentación

Sonda coaxial: El conductor interior del coaxial atraviesa el substrato y se suelda al parche mientras el conductor exterior se suelda al plano de masa inferior. El circuito de alimentación se encuentra asilado del parche microstrip debido al plano metálico de masa. De este modo, no existen radiaciones espúreas debidas a la alimentación. Otra ventaja es que es una configuración fácil de analizar de forma teórica. [23]

Figura. 8 Alimentación mediante sonda coaxial

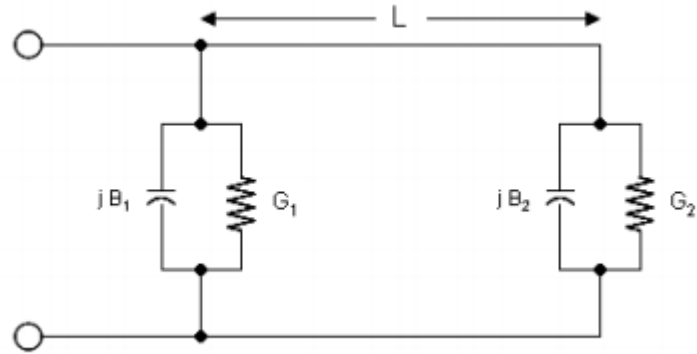


Fuente: Artículo: Procedimiento de Diseño y Realización de Antenas de parche en Tecnología Microstrip.

2.8 Modelo de línea de transmisión

El modelo de línea de transmisión presenta una gran facilidad de diseño, aunque también es el menos preciso además de que solamente puede ser utilizado para el diseño de antenas rectangulares o circulares. Este modelo considera los bordes de la antena como dos aperturas (slots) que radian. Cada apertura tiene un grosor W (ancho de la antena), una altura h (ancho del sustrato), separadas entre ellas a una distancia L (longitud de la antena). [23]

Figura. 9 Modelo de línea de transmisión de una antena



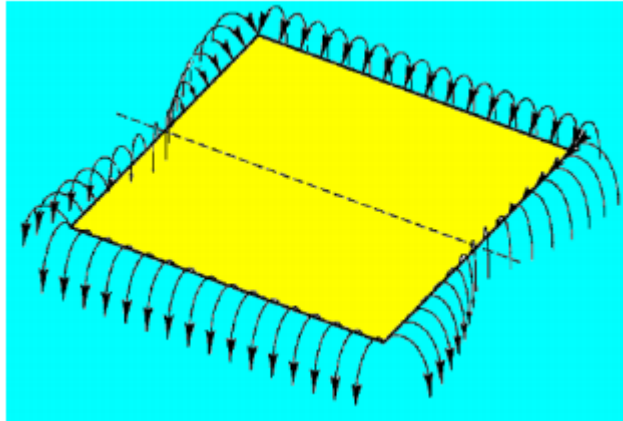
Fuente: Capitulo 3: Antenas tipo parche o de Microstrip

La distribución de los campos en una antena de parche en los bordes presenta los llamados fringing effects que forman líneas de radiación como se ve en la figura 10. [23]

Dependiendo de la frecuencia de operación, así como de los substratos utilizados para las antenas los fringing effects se presentan de diferente forma para cada diseño. Debido a los fringing effects la longitud y ancho efectivos de la antena no es de igual valor que las dimensiones físicas. A su vez los fringing effects se presentan en dos medios en una antena de microstrip: el aire y el substrato dieléctrico utilizado para la antena por lo que se tienen dos permitividades eléctricas distintas y la distribución de los campos será diferente de un medio al otro. [23]

Los fringings effects a su vez ocasionan que la longitud efectiva de la antena sea diferente a la longitud física, por lo tanto, debe de considerarse este efecto cuando se diseña una antena. [23]

Figura. 10 Fringing effects en una antena de parche rectangular



Fuente: Capitulo 3: Antenas tipo parche o de Mirostrip

El diseño mediante el método de línea de transmisión se resume en los siguientes pasos:

1. Se especifica la frecuencia de operación y el sustrato a utilizar para la construcción de la antena con lo cual se asignan los valores de: [21]

F_r (Frecuencia de operación)

ϵ_r (Permitividad eléctrica del sustrato)

h (Altura del sustrato)

2. Se obtiene el ancho efectivo de la antena de parche rectangular mediante la fórmula: [21]

$$W = \frac{1}{2 f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Ecuación 5

Donde

C es la velocidad de la luz en el espacio libre.

3. Se obtiene la permitividad eléctrica efectiva mediante la ecuación: [21]

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w}\right]^{-1/2}$$

Ecuación 6

Donde

ϵ_{ref} es la constante dieléctrica efectiva.

ϵ_r es la constante dieléctrica del sustrato

w es el ancho del parche

h es el grosor del sustrato

4. Se obtiene la extensión ΔL mediante la siguiente ecuación que derivará en la obtención de la longitud real de la antena considerando la longitud efectiva. [21]

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

Ecuación 7

5. Se obtiene la longitud real de la antena de parche rectangular considerando la longitud efectiva de esta y el valor de ΔL con: [21]

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L$$

Ecuación 8

2.9 Método de los momentos

La aplicación del método de momentos a un conductor de forma arbitraria consiste, inicialmente, en dividirlo en un número N determinado de segmentos, mismo que pueden o no tener la misma longitud. Cada segmento tiene una impedancia propia asociada; además, debido a la proximidad física entre todos los segmentos del conductor, también existe una impedancia mutua entre cada par de ellos. La relación entre los voltajes y las corrientes de los segmentos, con las impedancias propias y mutuas, se puede expresar como:

Figura. 11 Ecuación de relación entre voltajes y corrientes de cada segmento

$$\begin{aligned}V_1 &= I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} + \dots + I_N Z_{1N} \\V_2 &= I_1 Z_{21} + I_2 Z_{22} + \dots + I_N Z_{2N} \\&\vdots \\V_N &= I_1 Z_{N1} + I_2 Z_{N2} + \dots + I_N Z_{NN}\end{aligned}$$

Fuente: Revista Ingeniería

El sistema de ecuaciones en la figura 11 se puede representar en forma matricial:

$$[V]=[Z] [I]$$

Ecuación 9

Donde [V] e [I] son arreglos de N elementos y [Z] es una matriz de impedancias, cuadrada y de orden N. Si [V] y [Z] se conocen, es posible encontrar la distribución de corrientes [I], y a partir de ella, las características de radiación de la antena.[26]

2.10 Antenna Toolbox de Matlab

Ofrece funciones y aplicaciones para el diseño, análisis y visualización de los elementos de las antenas y sus arreglos. Se puede diseñar antenas solas y construir un arreglo de antenas utilizando ya sea elementos predeterminados con geometría parametrizada o elementos planares arbitrarios.

La Antenna Toolbox usa el método de los momentos (MoM) para computar propiedades de los puertos tales como impedancia, propiedades de las superficies tales como corriente y distribución de carga, y propiedades de campo tales como los patrones de radiación de campo cercano y lejano. Se

puede visualizar la geometría de la antena y los resultados de análisis en 2D y 3D. [28]

2.11 Parámetros para simular la antena usando el software Matlab

La antena de parche microstrip rectangular estándar es una antena de banda angosta que ofrece una ganancia de 6-8dBi con polarización lineal.

La antena básica con incisión en U consiste en un parche rectangular radiador entre el cual una incisión en forma de U ha sido cortada. El parche es de sustrato TMM10i y su grosor es tal que permite conseguir mayores anchos de banda. La presencia de la estructura en incisión permite alcanzar capacitancia adicional dentro de la estructura la cual, combinada con la inductancia de la alimentación de sonda larga, crean una doble resonancia dentro de la banda.[29]

2.12 Acople de impedancias

Una antena es una estructura alimentada por un puerto de alimentación y, por lo tanto, presenta una impedancia de entrada, definida como la relación entre la tensión y la corriente presente en dicho puerto.

La impedancia de entrada de una antena está compuesta por una parte real (R) y otra imaginaria (X) y ambas dependen de la frecuencia (f). La parte real se denomina resistencia de la antena y la parte imaginaria reactancia de la antena. [30]

$$Z_{in} = R(f) + jX(f)$$

Ecuación 10

3 METODOLOGIA

3.1 DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el diseño y construcción de la antena tipo parche rectangular con incisión en U, se manejó el substrato dieléctrico TMM10i. el diseño de la antena se dividió en dos etapas las cuales son:

- Etapa de dimensiones iniciales: en esta etapa se hallan dimensiones iniciales de la antena haciendo uso del modelo de línea de transmisión para hallar el punto para la sonda coaxial y del acople y su respectiva impedancia.
- Etapa de optimización: En la etapa de optimización se introdujeron los datos obtenidos en la etapa de dimensiones iniciales al software de simulación Matlab para realizar un proceso de optimización que permita llegar a las condiciones de operación deseadas y a su vez obtener el patrón de radiación.

3.2 Antena rectangular con incisión en U

3.2.1 Etapa de dimensiones iniciales

Dimensiones: como se mencionó en la introducción del desarrollo del proyecto, se implementó el método de línea de transmisión para hallar las dimensiones iniciales de la antena.

Impedancia de entrada: la impedancia de entrada aproximada de la antena se obtiene por medio del software de simulación Matlab al colocar el puerto de alimentación de 50 ohm a 7mm del borde de parche rectangular diseñado en el punto anterior y luego con el análisis de la carta de Smith generada se obtiene el coeficiente de reflexión como se observa en la figura 13. Reemplazando el coeficiente de reflexión en la ecuación se obtiene la resistencia de entrada.

Sonda coaxial de alimentación: la sonda coaxial de alimentación posee una impedancia Z_c de 50 ohmios ya que el conector coaxial requiere de este valor de impedancia. El largo de la línea es un valor escogido por el diseñador ya que este no va a influir en el patrón de radiación de la antena.

Ecuación de la carta de Smith

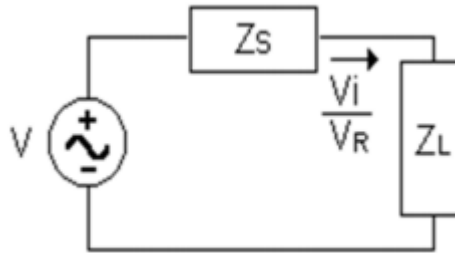
La carta de Smith fue concebida en los años 1930 por Philip Smith en los laboratorios BELL, quien quiso realizar un método más fácil para resolver las ecuaciones tediosas y repetitivas que frecuentemente aparecen en la teoría de R.F. [31]

Construcción de la carta de Smith

Considerando el circuito de la figura donde se representa una fuente de RF con una impedancia Z_s que se conecta a una carga Z_L . En el punto de conexión se puede establecer una onda incidente V_i hacia la carga y una onda reflejada V_R hacia la fuente. [31]

El coeficiente de reflexión de una impedancia de carga respecto a la impedancia de la fuente puede ser encontrada por la ecuación 10: [31]

Figura. 12 ondas incidente y reflejada



Fuente: Capitulo IV: La carta de Smith en el diseño de las Redes de Acople.

$$\rho = \frac{Z_s - Z_L}{Z_s + Z_L}$$

Ecuación 11

Normalizando esta fórmula (dividiendo numerador y denominador por Z_L): [31]

$$\rho = \frac{Z_0 - 1}{Z_0 + 1}$$

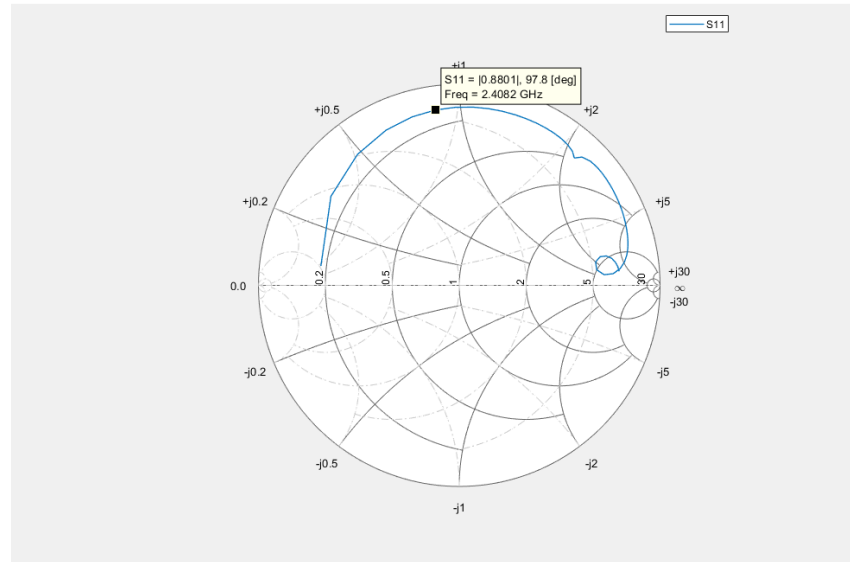
Ecuación 12

Donde $Z_0 = \frac{Z_S}{Z_L}$ es una impedancia compleja, luego [31]

$$Z_0 = R + jX$$

Ecuación 13

Figura. 13 Grafica de la carta de Smith para la frecuencia de 2.4GHz



Fuente: Autor

Figura. 14 Grafica de la carta de Smith para la frecuencia de 5GHz



Fuente: Autor

En lo observado en las simulaciones de la Carta de Smith, dependiendo de la frecuencia, obtenemos el coeficiente de reflexión. Partiendo de la ecuación 10 y el coeficiente de reflexión, podremos despejar la impedancia de acople para la antena en cada frecuencia:

$$Z_S = Z_L \frac{1 - \rho}{1 + \rho}$$

Ecuación 14

Si la reflexión ρ tiende a cero se observa que Z_S tiende a Z_L y eso da un acople perfecto.

3.2.2 Etapa de optimización

3.2.2.1 Simulación con ADS

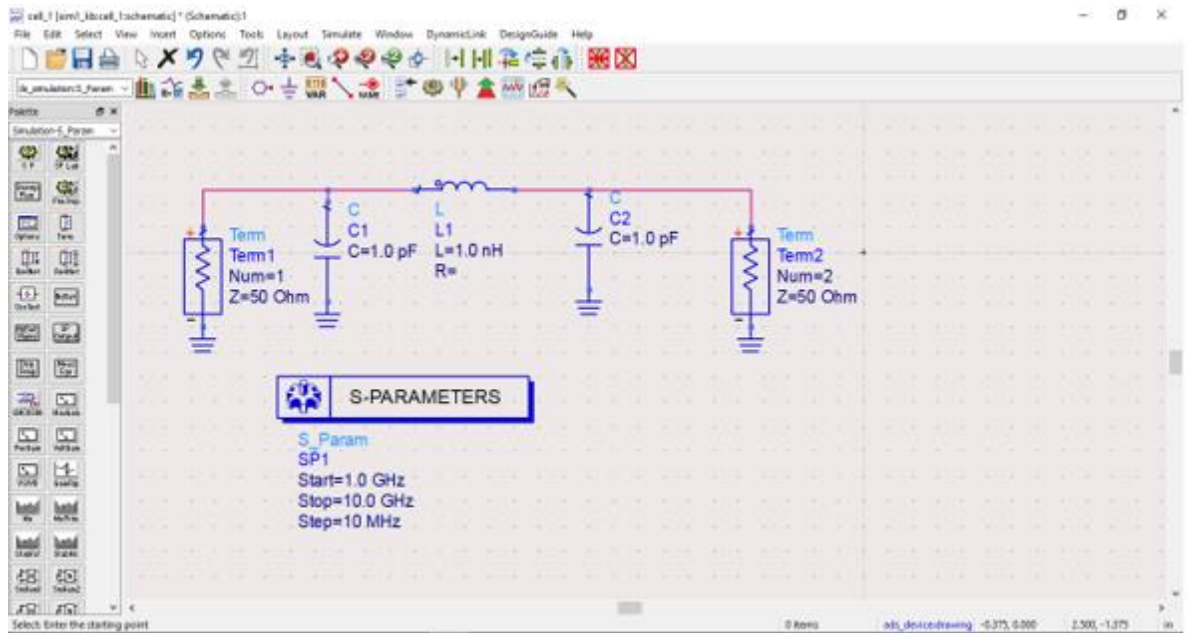
Se trabajó con el simulador Advanced Design System en su versión de prueba, diseñando el parche con sus dimensiones ya establecidas y con el material FR4. En el simulador ADS se escoge el plano en PCB para crear línea a línea del parche con sus medidas exactas y establecer las propiedades del sustrato FR4 como su grosor y constante dieléctrica. También se diseñó el plano tierra y se indicó la impedancia de acople de 50 ohm.

Una vez diseñado el parche, en la función EMDS>simulation> S-parameters. Se selecciona el rango de barrido de 1GHz a 5.5GHz y se compila. Esta simulación arroja las gráficas de los parámetros de reflexión los cuales deben indicar un nivel de reflexión por debajo de -10dB para tener un óptimo funcionamiento y la carta de Smith.

Debido a que se hizo uso de una versión de prueba, al generar la compilación para obtener los parámetros S_{11} de reflexión y la carta de Smith, el reporte arrojaba errores y no se pudo proseguir con este simulador.

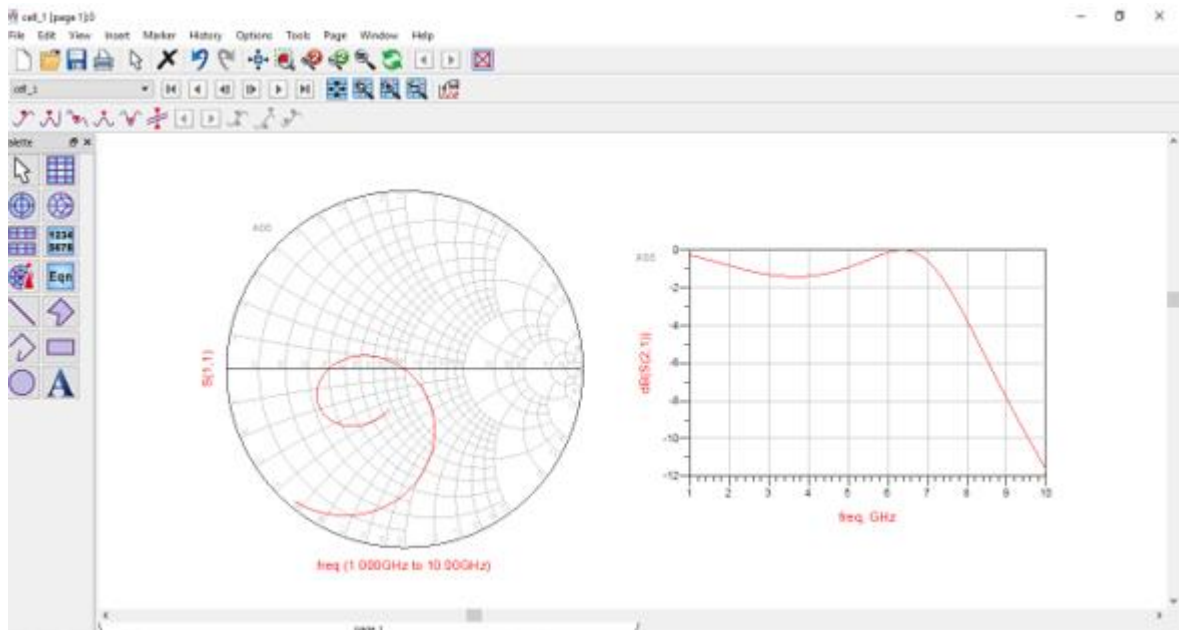
De igual manera se realizaron pruebas con el circuito de una antena parche general con valores aleatorios y se hallaron los parámetros S_{11} y los respectivos valores en la carta de Smith para el barrido de frecuencias especificado.

Figura. 15 Circuito RF con parámetros de reflexión S_{11} .



Fuente: Autor

Figura. 16 Graficas de la Carta de Smith y parámetros de reflexión S_{11} .



Fuente: Autor

3.2.2.2 Simulación con Matlab

Una vez establecidas las ventajas de las antenas con incisión en U para el funcionamiento de doble y triple banda, se encontró un código de muestra para la nueva aplicación de desarrollo de antenas de Matlab 2017b llamado Antenna Toolbox, en este documento se encontró el modelamiento de una antena multibanda parche de una hasta tres incisiones.

En el código base, se tomó el modelamiento para dos incisiones e ingresando los datos previamente establecidos en la versión de prueba de Matlab 2017b, se compiló y se sacó la gráfica del plano en PCB y los parámetros de reflexión S_{11} .

Se realizaron una serie de modificaciones controladas a la geometría de una antena microstrip con incisión en U para de esta forma obtener una serie de parámetros empíricos que permitan posteriormente reducir las iteraciones de sintonización necesarias para que la antena opere conforme a las especificaciones de diseño.

Figura. 17 código base para el modelado de una antena parche con incisión en U multibanda de única capa.

```
1 - L = 26e-3;
2 - W = 35.5e-3;
3 - Uy1 = 19.5e-3;
4 - Ux1 = 12e-3;
5 - Ua1 = 2.1e-3;
6 - Ud1 = 4.8e-3;
7 - d = 13.5e-3;
8 - h = 6e-3;
9 - s = antenna.Rectangle('Length',W,'Width',L,'NumPoints',40);
10 - h1 = antenna.Rectangle('Length',Ua1,'Width',Uy1,'NumPoints',[2 20 2 20],...
11     'Center',[-Ux1/2 + Ua1/2, -L/2 + Ud1 + Uy1/2]);
12 - h2 = antenna.Rectangle('Length',Ua1,'Width',Uy1,'NumPoints',[2 20 2 20],...
13     'Center',[Ux1/2 - Ua1/2, -L/2 + Ud1 + Uy1/2]);
14 - h3 = antenna.Rectangle('Length',Ux1,'Width',Ua1,'NumPoints',[20 2 20 2],...
15     'Center',[0,-L/2 + Ud1 + Ua1/2]);
16 - Uslot_patch = s-h1-h2-h3;
17 - figure
18 - show(Uslot_patch)
19 - Lgp = 71e-3;
20 - Wgp = 52e-3;
21 - p2 = antenna.Rectangle('Length',Lgp,'Width',Wgp);
22 - dl = dielectric('Air');
23 - slotPatch = pcbStack;
```

```

23 - slotPatch = pcbStack;
24 - slotPatch.Name = 'U-Slot Patch';
25 - slotPatch.BoardThickness = h;
26 - slotPatch.BoardShape = p2;
27 - slotPatch.Layers = {Uslot_patch,d1,p2};
28 - slotPatch.FeedLocations = [0 L/2-d 1 3];
29 - slotPatch.FeedDiameter = 0.5e-3;
30 - figure
31 - show(slotPatch)
32 - mesh(slotPatch,'MaxEdgeLength',.005)
33 - freq = linspace(3e9,6e9,51);
34 - s1 = sparameters(slotPatch,freq);
35 - s11Fig = figure;
36 - rfplot(s1,1,1)
37 - s11Ax = gca(s11Fig);
38 - hold(s11Ax,'on');
39 - figure
<

```

Fuente: MathWorks

En el código base tomado de mathworks 2017, se establecen las dimensiones del parche al igual que el plano de tierra, con la función del Antenna toolbox, antenna.Rectangle, la cual crea un rectángulo centrado en el origen y en el plano X-Y [32]. Así mismo con la función antenna.Rectangle, se hacen modificaciones de tal manera que crea las secciones de cada una de las incisiones en U, las cuales son las variables h1-h9. [33]

3.2.2.3 Parametrización inicial

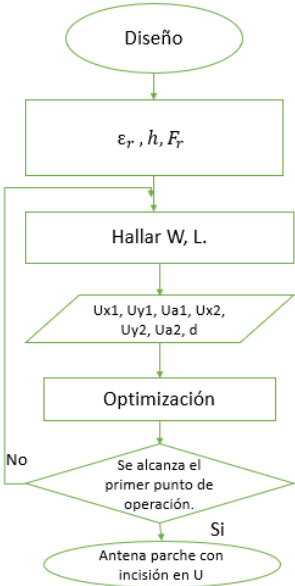
Las dimensiones iniciales de la antena usada para hallar estos parámetros son las siguientes.

Tabla 3 Dimensiones de la antena de parametrización inicial

Dimensiones de la antena microstrip con incisión en U	[mm]
Permitividad eléctrica del substrato [ϵ_r]	1.0006
Grosor del substrato [h]	6
Ancho del parche [W]	64
Longitud del parche [L]	54
Ancho de la incisión en U externa [Ux2]	34
Longitud de la incisión en U externa [Uy2]	22
Ancho de la incisión en U interna [Ux1]	28
Longitud de la incisión en U interna [Uy1]	13.5
Separación de la incisión y el borde superior del parche externo [Ud1]	6.2
Separación de la incisión y el borde superior del parche interno [Ud2]	2

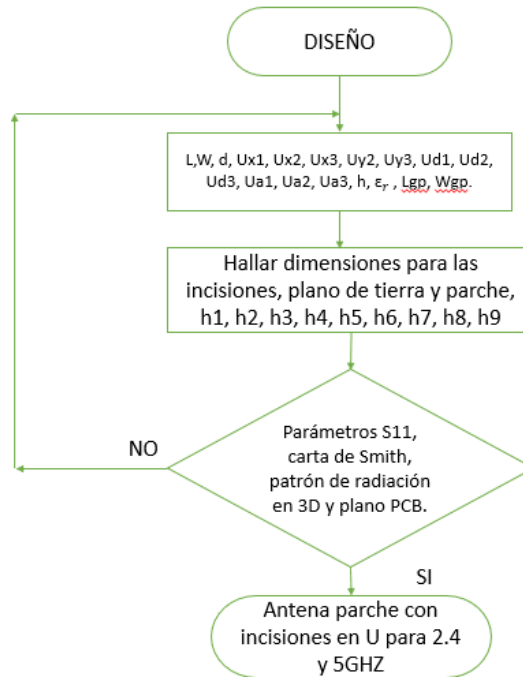
Fuente: Autor

Figura. 18 Diagrama de flujo diseño antena tipo parche con incisión en U.



Fuente: Autor

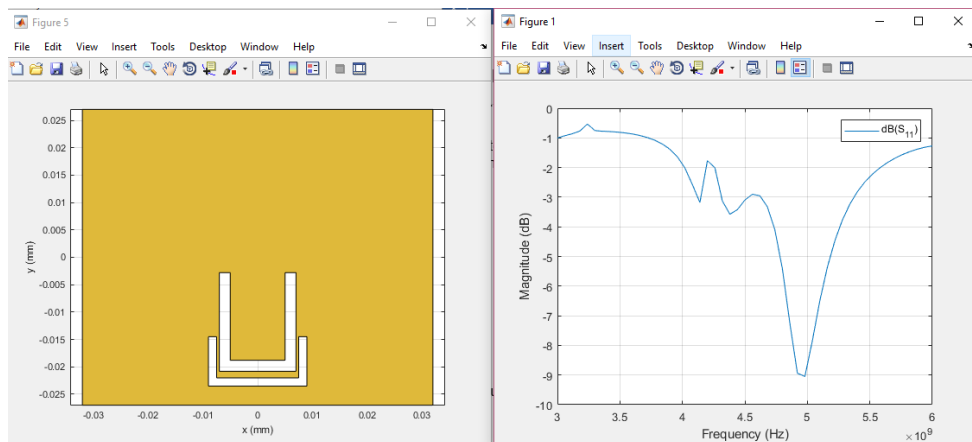
Figura. 19 Diagrama de flujo del funcionamiento de Matlab.



Fuente: Autor

En la primera prueba con dos incisiones en U, se pudo ver que la antena trabajaba solo en la banda de 5GHz y excluía la frecuencia de 2.4GHz.

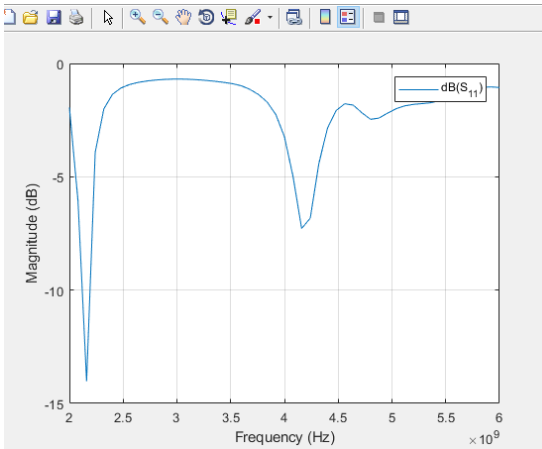
Figura. 20 . Plano del parche con dos incisiones en U y gráfica de parámetros S_{11} .



Fuente: Autor

Variación en la incisión interna, U invertida

Figura. 21 Parámetros de reflexión S_{11}



Fuente: Autor

3.2.2.4 Parametrización final

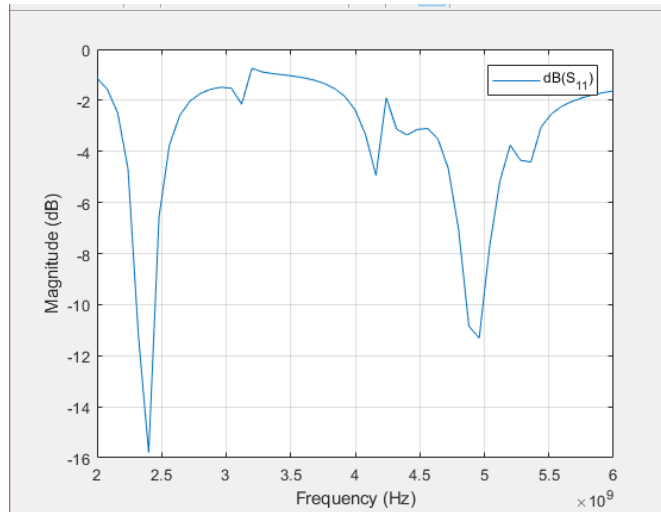
Basado en el paper de la IEEE llamado “The Versatile U-Slot Patch Antenna”, del cual se hablará más adelante, se varió la configuración inicial de dos incisiones en U a tres incisiones en U.

Tabla 4 Dimensiones de la antena de parametrización final

Dimensiones de la antena microstrip con incisión en U	[mm]
Permitividad eléctrica del sustrato [ϵ_r]	1.0006
Grosor del sustrato [h]	6
Ancho del parche [W]	64
Longitud del parche [L]	54
Ancho de la incisión en U externa [Ux2]	18
Longitud de la incisión en U externa [Uy2]	9
Ancho de la incisión en U interna [Ux1]	14
Longitud de la incisión en U interna [Uy1]	18.7
Ancho de la incisión en U externa [Ux3]	22
Longitud de la incisión en U interna [Uy3]	4
Separación de la incisión y el borde superior del parche externo [Ud1]	6.2
Separación de la incisión y el borde superior del parche interno [Ud2]	3.5
Separación de la incisión y el borde superior del parche interno [Ud3]	1.5
Posición de la alimentación con respecto a la esquina del parche [d]	12

Fuente: Autor

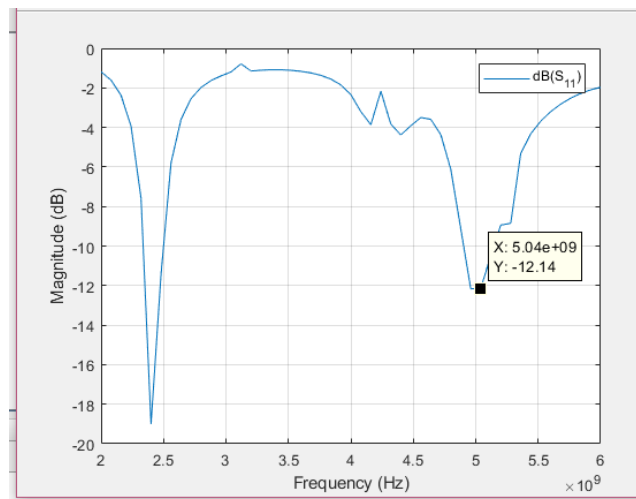
Figura. 22 Parámetros de reflexión S_{11} para tres incisiones en U.



Fuente: Autor

Variación de la distancia entre el punto de alimentación y el borde del parche.

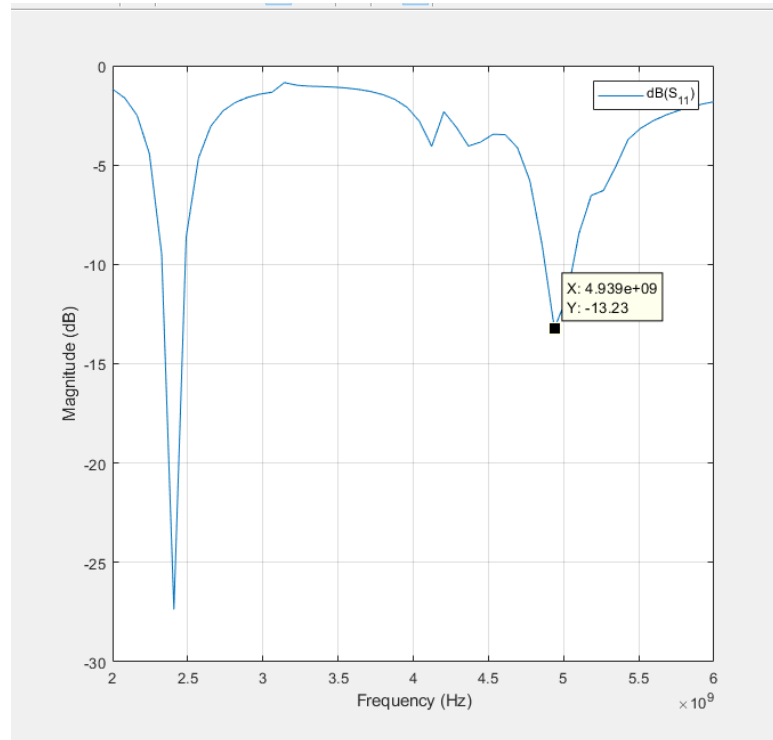
Figura. 23 Parámetros de reflexión S_{11} con $d=7\text{mm}$



Fuente: Autor

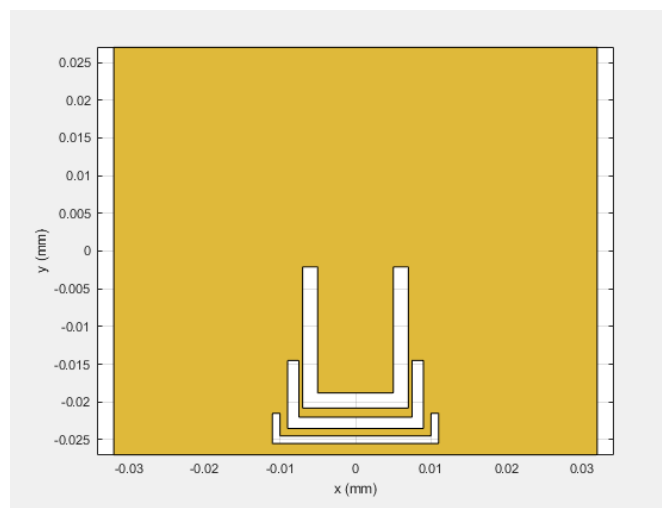
Variación de la distancia entre el punto de alimentación y el borde del parche.

Figura. 24 Parámetros de reflexión S_{11} con $d=9\text{mm}$.



Fuente: Autor

Figura. 25 Plano PCB del parche con las incisiones

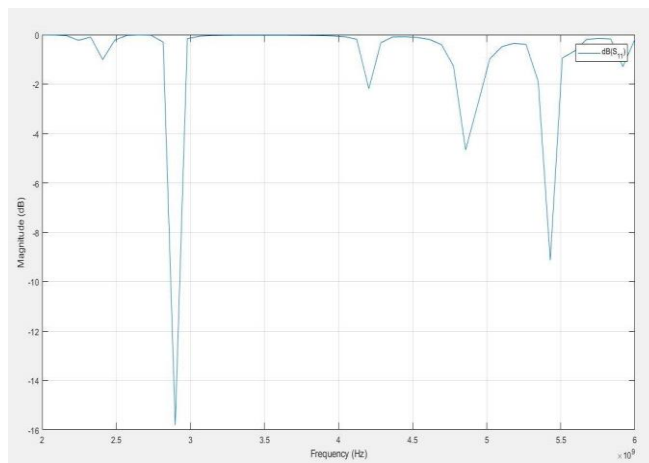


Fuente: Autor

Una vez establecidas las medidas finales para lograr una reflexión mínima de -27.37 dB para la frecuencia de 2.4 GHz y de -13.23 dB para la frecuencia de 5GHz, se realizaron pruebas para establecer el dieléctrico más conveniente con el cual construir la antena.

Variación del material dieléctrico (grosor y permitividad) TMM4.

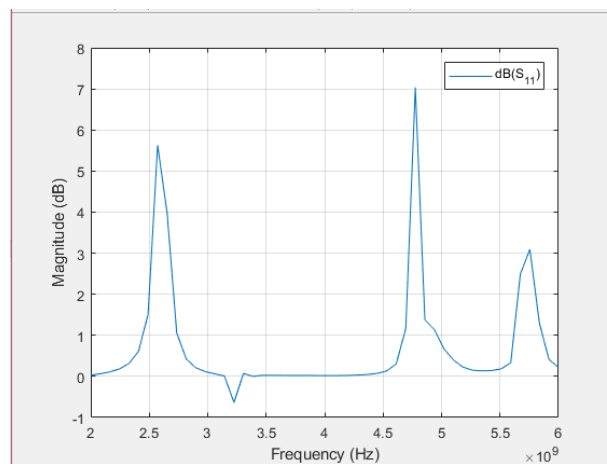
Figura. 26 Parámetros de reflexión S_{11} para el material TMM4 $\epsilon_r=4.7$ y $h=0.51$



Fuente: Autor

Segunda variación del material dieléctrico (grosor y permitividad) TMM6.

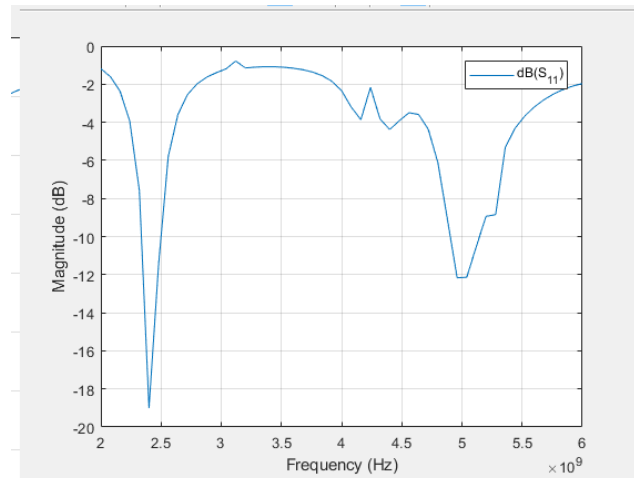
Figura. 27 Parámetros de reflexión S_{11} para el material TMM6 $\epsilon_r=6.3$ y $h=0.38$.



Fuente: Autor

Tercera variación del material dieléctrico (grosor y permitividad) TMM10i.

Figura. 28 Parámetros de reflexión S_{11} para el material TMM10i.



Fuente: Autor

3.3 Análisis de parametrización

Se puede observar en las simulaciones que los efectos generados al variar la distancia de la alimentación con respecto al borde del parche y el material dieléctrico afectan directamente las variaciones en los coeficientes de reflexión de las frecuencias de resonancia.

Se obtuvo que las antenas microstrip con incisión en U y alimentada con sonda coaxial, solo permite un pequeño margen de optimización para lograr el mínimo nivel de reflexión para cada frecuencia, este efecto se obtiene modificando la distancia que hay entre el punto de alimentación y el borde del parche.

Estas modificaciones se realizaron de igual manera en base al artículo de la IEEE para la 3ra Conferencia Europea en Antenas y Propagación llamado "The Versatile U-Slot Patch Antenna" publicado en el año 2009, el cual habla de la evolución de las antenas con incisión y sus diferentes topologías en U, de igual manera ilustra la versatilidad de este tipo de antenas en las diferentes aplicaciones prácticas. Estas aplicaciones incluyen operación en banda ancha, para doble y triple banda, con rangos de pequeñas y grandes frecuencias. [22]

3.4 Construcción de las antenas

Con base en la parametrización, se calculan todas las características de la antena a probar y así construir.

Antena: La antena construida es una antena rectangular y sus características de construcción se observan en la tabla 5.

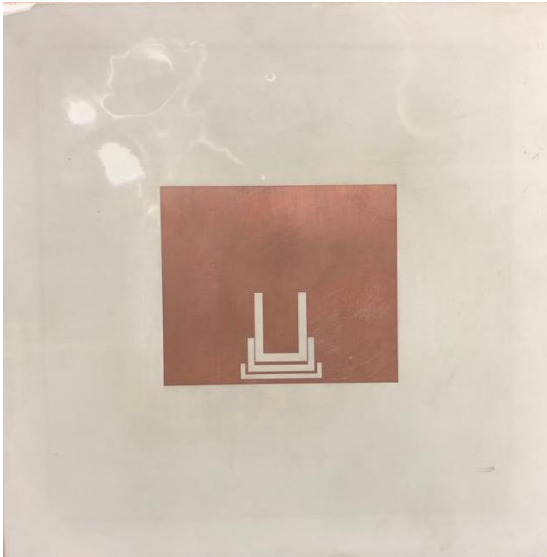
Tabla 5. Dimensiones antena tipo parche rectangular con incisiones en U 2.4GHz y 5GHz

Características	Valor
Frecuencias de trabajo [fr]	2.4GHz y 5GHz
Permitividad eléctrica del sustrato [ϵ_r]	9.8
Impedancia de alimentación [Z_L]	50 Ω
Impedancia de entrada [Z_s]	49.4 Ω y 45.7 Ω
Grosor del sustrato [h]	6mm
Ancho del parche [W]	64mm
Longitud del parche [L]	54mm
Posición de la alimentación con respecto al borde superior del parche [d]	9mm
Longitud de la U superior [U_{y1}]	18.71mm
Ancho de la U superior [U_{x1}]	14mm
Grosor U superior [U_{a1}]	2mm
Longitud de la U central [U_{y2}]	9mm
Ancho de la U central [U_{x2}]	18mm
Grosor U central [U_{a2}]	1.5mm
Longitud de la U inferior [U_{y3}]	4mm
Ancho de la U inferior [U_{x3}]	22mm
Grosor U inferior [U_{a3}]	1mm

El sustrato dieléctrico para la construcción de la antena es el TMM10i.

Con los datos de la tabla 5 se construyó la antena la cual se observa en la figura 28.

Figura. 29 Antena tipo parche rectangular con incisiones en U de 2.4GHz y 5GHz



Fuente: Autor

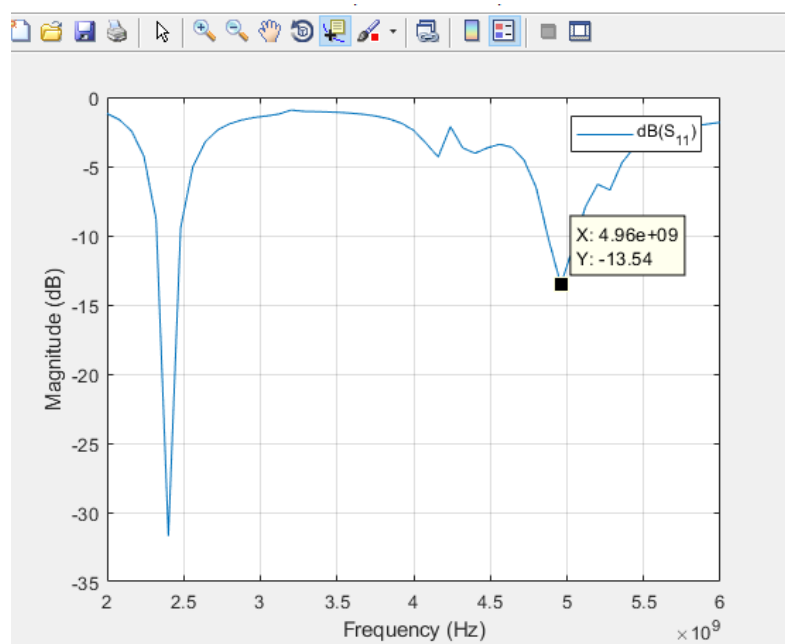
3.5 Análisis de resultados

Al tener conexión por sonda coaxial, nos aseguramos de que el acople de impedancias sea el mejor posible dado que el cable coaxial de alimentación es de 50Ω y se ubicó el punto en el parche donde se obtuviese este acople. En esta parte se hace el análisis de la antena construida por medio de los datos obtenidos de la carta de Smith y se comprueba con el programa LVDAM-ANT de LabVolt donde se toma el señal de potencia de la antena receptora construida para la frecuencia 2.4GHz y 5GHz haciendo uso de un router comercial que trabaja a esas mismas frecuencias. Tanto la antena construida como el router comercial y el equipo de labVolt se introdujeron en la cámara anecoica de la Universidad Pontificia Bolivariana para, de esta manera, evitar la interferencia de señales externas que pudieran afectar la toma de la señal de potencia.

En el análisis de la señal de potencia, se tomó el campo eléctrico y se hace la comparación numérica con el generado por el software utilizado para la simulación del diseño de la antena y el equipo de medición LabVolt

Análisis de acople de impedancias:

Figura. 30 Gráfica S11 antena 2.4GHz y 5GHz



Fuente: Autor

En la figura 29 se observa el coeficiente de reflexión representado en la gráfica de reflexión a la entrada (S11). Con estas graficas se puede determinar que tan bueno es el acople entre la impedancia de alimentación y el parche. Para la frecuencia de 2.4GHz que tiene un coeficiente de reflexión de -32dB aproximadamente y para la frecuencia de 5GHz se tiene un coeficiente de reflexión de -13.54dB aproximadamente; lo que indica que hay un acople del 99% para la frecuencia de 2.4GHz y de 90.4% para la frecuencia de 5GHz.

Estos valores se demostrarán a continuación reemplazando en la ecuación 13:

Para la frecuencia de 2.4GHz se tiene un coeficiente de reflexión ρ de 0.0006, valor que se tomó de la figura 29 donde:

$$\rho = 0.0006$$

$$Z_L = 50\Omega$$

$$\log_{10} 0.0006 = 3.2 \times 10 = 32dB$$

$$Z_s = 50 \frac{1 - 0.0006}{1 + 0.0006}$$

$$Z_s = 50(0.99) = 49.5\Omega$$

Para la frecuencia de 5GHz se obtuvo un coeficiente de reflexión ρ de 0.045, valor tomado de igual manera de la figura 29 donde:

$$\rho=0.045$$

$$Z_L=50\Omega$$

$$\log_{10} 0.045 = 1.34 \times 10 = 13.54dB$$

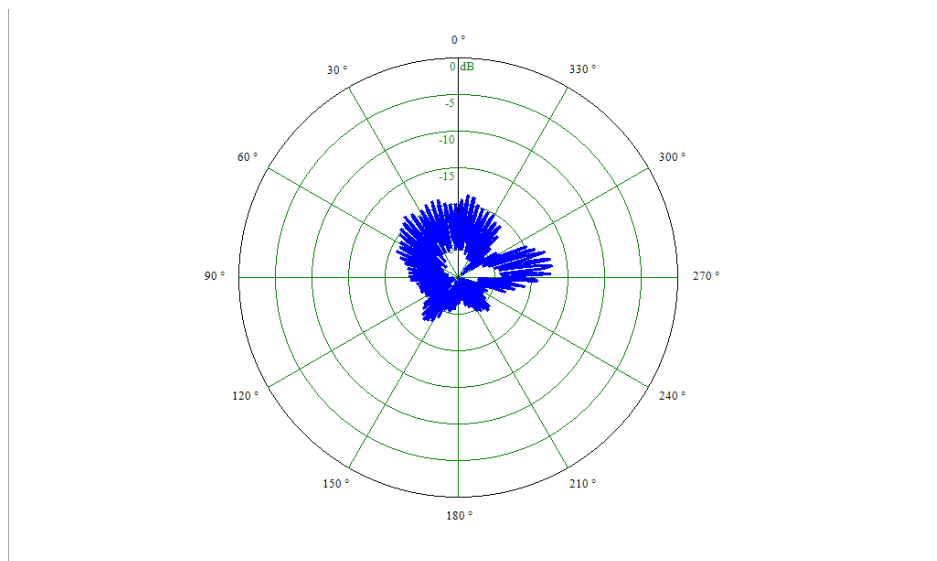
$$Z_s = 50 \frac{1 - 0.045}{1 + 0.045}$$

$$Z_s = 50(0.91)=45.7\Omega$$

3.5 Análisis del patrón de radiación.

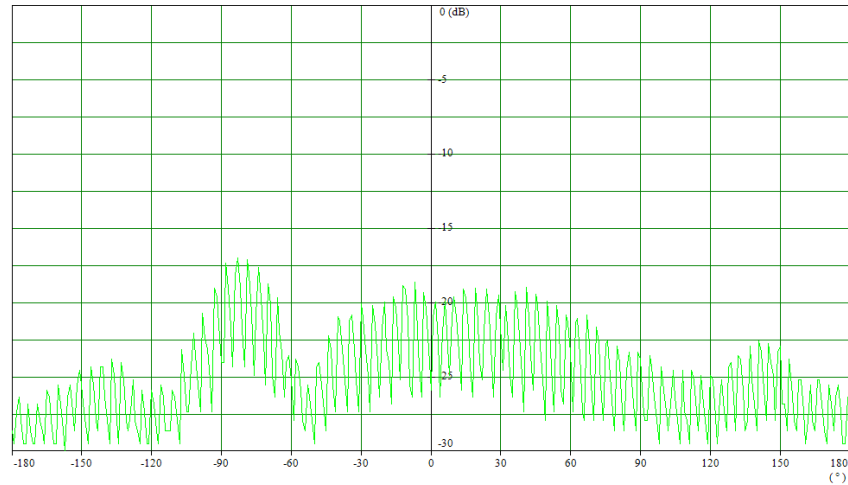
3.5.1 Análisis del patrón de radiación de la antena de uso comercial

Figura. 31 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 2.4GHz



Fuente: Autor

Figura. 32 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 2.4GHz

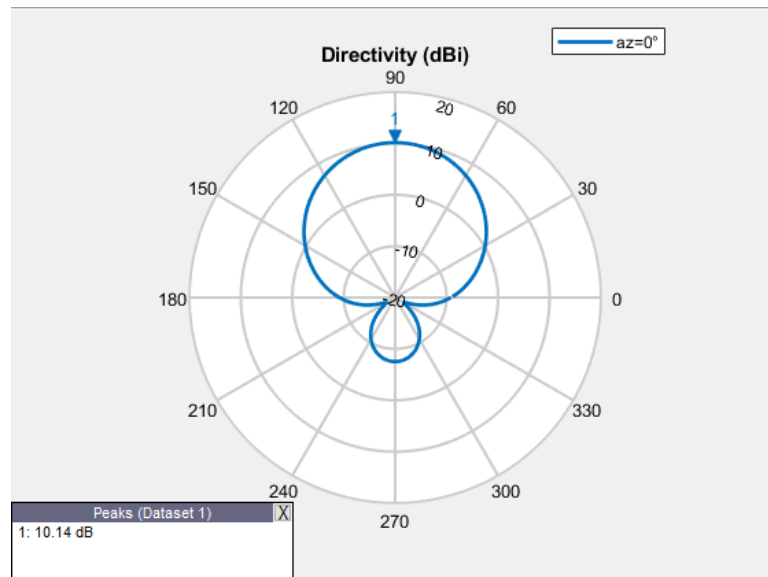


Fuente: Autor

La señal de este router no es posible verse de manera continua como los patrones de radiación que se emiten con el transmisor del equipo de Lab-Volt sino por pulsaciones, ya que desafortunadamente este solo opera para 1GHz y 10GHz.

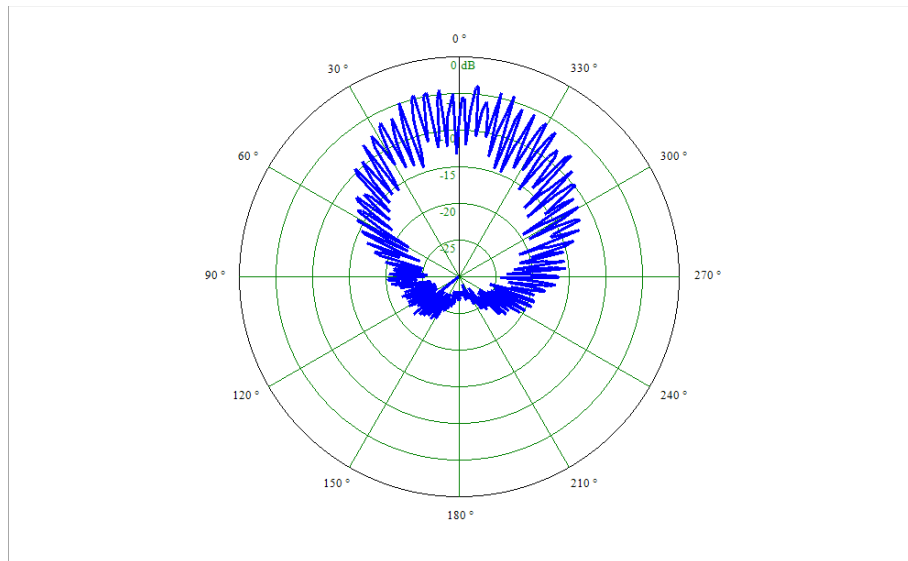
3.5.2 Análisis del patrón de radiación de la antena diseñada

Figura. 33 Patrón de Radiación simulado para la frecuencia de 2.4GHz



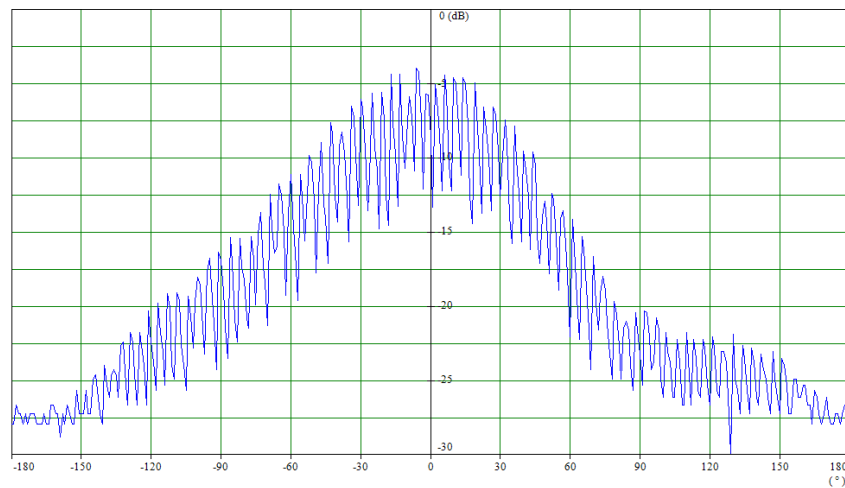
Fuente: Autor

Figura. 34 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 2.4GHz



Fuente: Autor

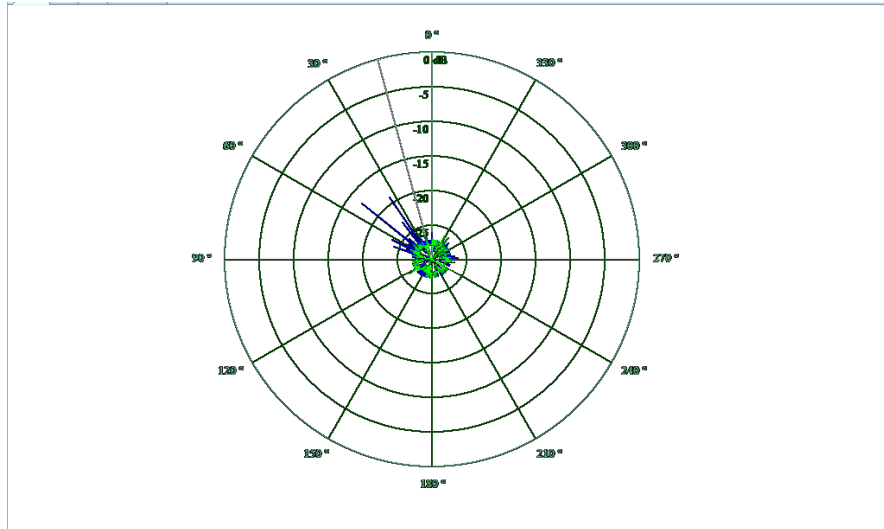
Figura. 35 Patrón de radiación cartesiano Lab-Volt antenna en la frecuencia de 2.4GHz



Fuente: Autor

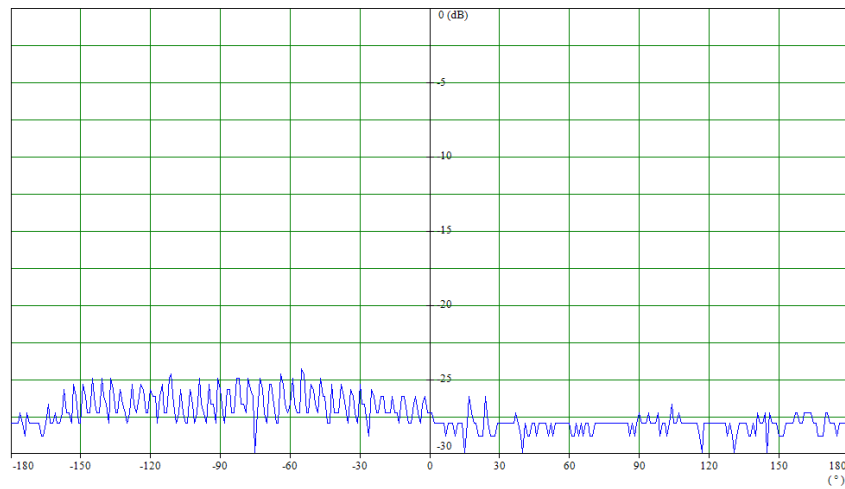
3.6 Análisis del patrón de radiación de la antena de uso comercial

Figura. 36 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 5GHz



Fuente: Autor

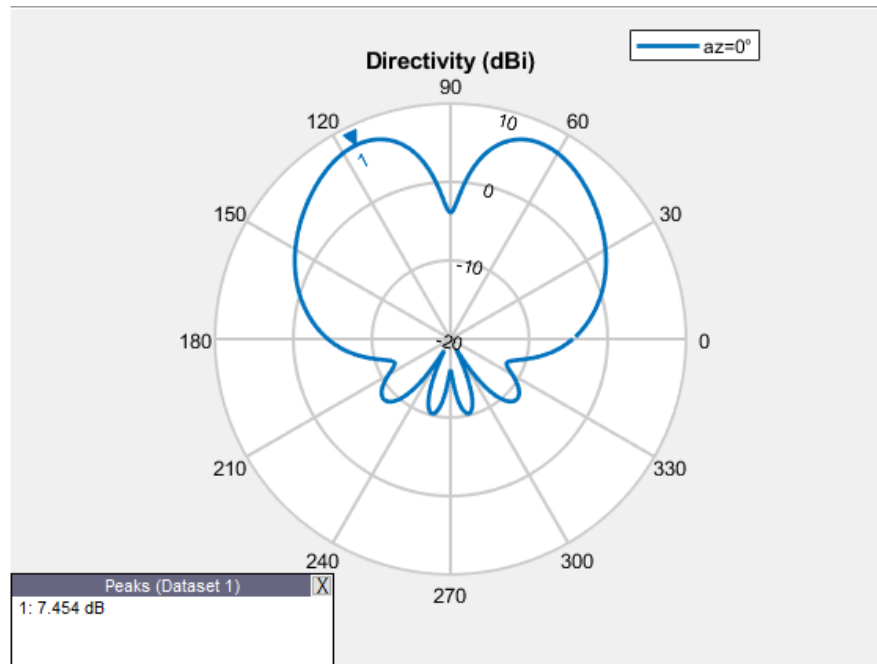
Figura. 37 Patrón de radiación cartesiano Lab-Volt antena en la frecuencia de 5GHz



Fuente: Autor

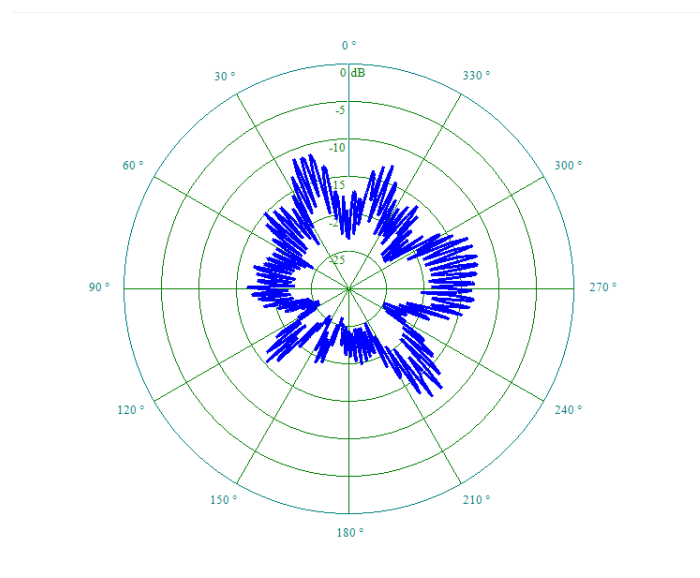
3.6.2 Análisis del patrón de radiación de la antena diseñada

Figura. 38 Patrón de Radiación simulado para la frecuencia de 5GHz



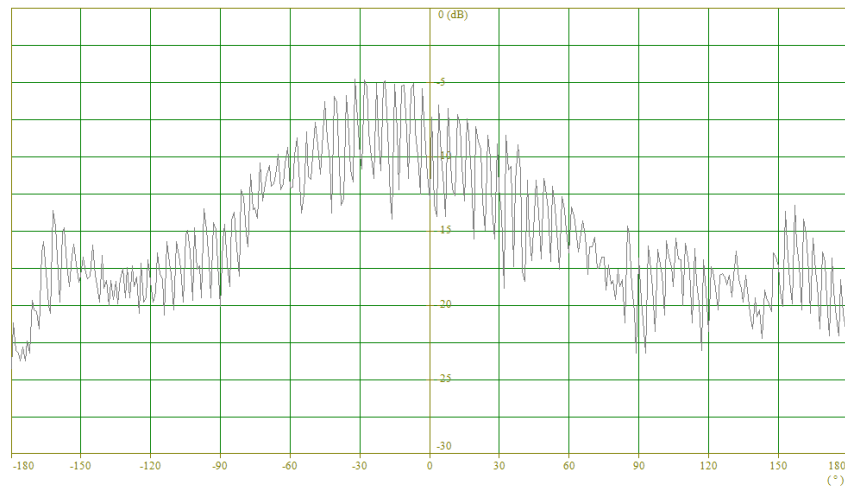
Fuente: Autor

Figura. 39 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 5GHz



Fuente: Autor

Figura. 40 Patrón de radiación medido en Lab-Volt para la frecuencia de 5GHz

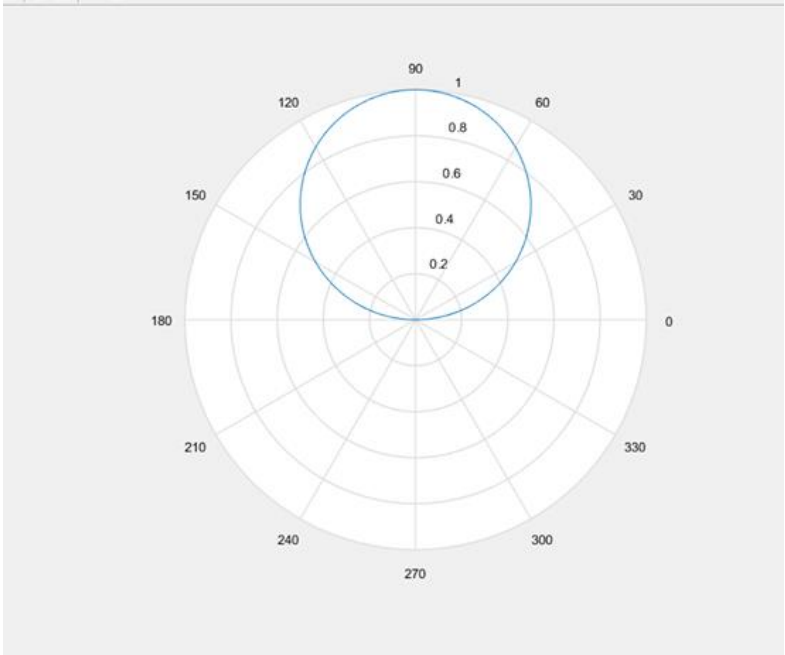


Fuente: Autor

Con esta antena tipo parche con incisiones en U se quiere demostrar su funcionamiento en las frecuencias de 2.4GHz y 5GHz. Las imágenes del patrón de radiación simulada y tomada con el equipo Lab-Volt, muestran que cuando la antena se encuentre frente a la antena transmisora (en 0 grados) que radia a una frecuencia de 2.4GHz y de 5GHz la potencia del patrón de radiación es máxima comprobando de esta manera que las antenas tipo parche con incisiones en U obtenemos la posibilidad de que opere a más de una frecuencia a diferencia de las rectangulares tipo parche.

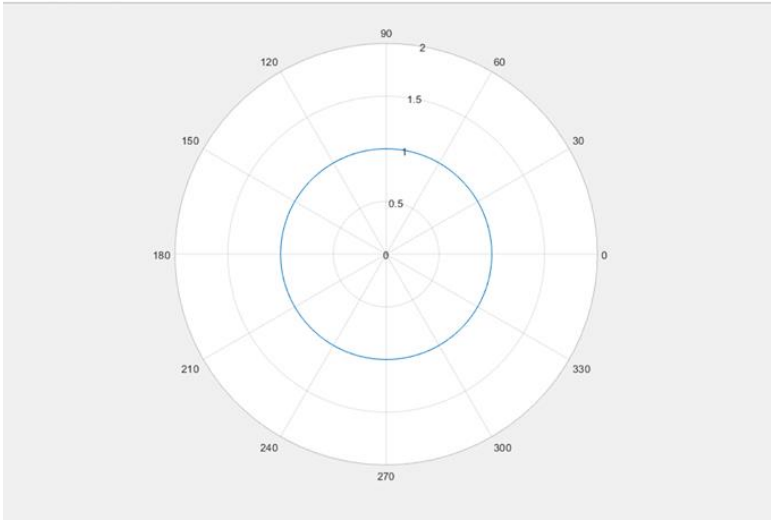
3.6 Análisis de ancho de rayo de potencia de la antena

Figura. 41 potencia mitad de antena en la frecuencia de 2.4GHz



Fuente: Autor

Figura. 42 Potencia mitad de antena en la frecuencia de 5GHz



Fuente: Autor

Se observa claramente que el ancho de rayo de potencia mitad de la antena nos da la idea del espacio, en este caso el patrón generado arroja valores muy cercanos a los obtenidos en la simulación todos dentro del Angulo que subtiende los dos puntos sobre el lóbulo principal (0° y 120°). El valor máximo que se mide es -4 dB (potencia), por la forma de la comunicación se debe hacer un proceso de linealización ya que el emisor emite la señal en forma de pulsos consecutivos.

Conclusiones Y Observaciones

- Se observó por medio del software de simulación que, al realizar pequeñas alteraciones en la distancia del punto de alimentación dentro del parche, genera desplazamientos en las frecuencias de las dos bandas, demostrados teóricamente en la gráfica de la carta de Smith.
- Se realizó el proceso de linealización de las gráficas de potencia obtenidas de las frecuencias de 2.4GHz y 5GHz para su posterior análisis debido a que los equipos de Lab-Volt toman la señal de potencia como pulsaciones y no lineales.
- Para la frecuencia de 2.4GHz, el objetivo se cumple teniendo buena comunicación y la antena se comporta de acuerdo con la simulación hecha con el software.
- Para la frecuencia de 5GHz, el objetivo se cumple teniendo buena comunicación y la antena se comporta de acuerdo con la simulación hecha con el software.
- Se determinó la ventaja de la alimentación por sonda, ya que el acople entre la impedancia de entrada y de alimentación, ubicando el punto más conveniente de alimentación en el parche, es óptimo y por lo tanto se obtiene un valor bajo del parámetro de reflexión S_{11} bajo.
- Se pudo comprobar que las antenas parche con incisiones en U, ofrece la ventaja de poder trabajar a más de una frecuencia a diferencia de las antenas parche rectangulares. Se tiene en cuenta que cuando se trabaja con más de una frecuencia, se obtiene una mejor respuesta en una frecuencia que en otra.
- Para futuros proyectos que tenga que ver con la construcción y análisis de antenas tipo parche rectangular con incisiones en U o para cualquier otro tipo de antena multibanda, sería conveniente contar con equipos que permitan la correcta medición experimental de las mismas y no solo a 1GHz y 10GHz.

Bibliografía

- [1] F. Ucha, «Definicion ABC,» 17 Marzo 2009. [En línea]. Available: <https://www.definicionabc.com/comunicacion/antena.php>.
- [2] J. y. M. M. Perez, «Definicion.de,» Definicion.de, 2015. [En línea]. Available: <https://definicion.de/antena/>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [3] «Copro,» [En línea]. Available: <https://copro.com.ar/Microstrip.html>. [Último acceso: 3 septiembre 2018].
- [4] «Catarina,» [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo2.pdf. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [5] «Antenna Theory,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.antenna-theory.com/definitions/permittivity.php>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [6] A. y. A. S. R. D, «U-slot cut shorted square microstrip antenna,» de *International conference in Advanced in Electronics*, 2016.
- [7] A. A. Deshmukh, K. Ray y P. Chine, «IEEE Xplore,» 2009. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5430706>. [Último acceso: 25 Octubre 2018].
- [8] A. A. Deshmukh, K. Ray y T. Tirodkar, «IEEE Xplore,» 2013. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6524724>. [Último acceso: 25 Octubre 2018].
- [9] W. C. Mok, S. H. Wong y K. M. Luk, «IEEE Xplore,» 2013. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6516965>. [Último acceso: 25 Octubre 2018].
- [10] L. A. Quiroz, «udistrital,» 2016. [En línea]. Available: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4101/1/QuirozLuisAlejandro2016.pdf?fbclid=IwAR1cWwZ5sQezH8D2t07zbs9Q-7ijPbxIN6HsW-0rhbHkv3Kshihwke8CtpU>. [Último acceso: 25 Octubre 2018].
- [11] C. Suárez, D. Méndez, A. Pineda y A. Puerto, «Antena de parche con sentido de giro reconfigurable para aplicaciones en satélites CubeSat,» *Bdigital*, vol. 83, nº 199, pp. 157-164, 2016.

- [12] J. Cabrera y C. Páez, «Diseño de una Antena de Patrón Conmutado para Banda ISM,» de *III Conferencia Internacional de Telecomunicaciones, Tecnologías de la información y Comunicaciones* .
- [13] S. Martínez y R. Jiménez, «Alejandria UPB,» 2010. [En línea]. Available: https://biblioteca.bucaramanga.upb.edu.co/docs/digital_19593.pdf. [Último acceso: 25 Octubre 2018].
- [14] A. Porras y S. López, «Alejandria UPB,» 2014. [En línea]. Available: https://biblioteca.bucaramanga.upb.edu.co/docs/digital_27610.pdf. [Último acceso: 25 Octubre 2018].
- [15] G. Quintero y C. Sarmiento, «Alejandria UPB,» 2012. [En línea]. Available: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1762/digital_22742.pdf?sequence=1&fbclid=IwAR19Jzd9ZdAmN312GsN_BbYEirSeS6a0mnfLMwGYI-DPuYYNEOwc1qISGVE. [Último acceso: 25 Octubre 2018].
- [16] «Mas adelante,» 1999-2018. [En línea]. Available: <http://www.masadelante.com/faqs/ancho-de-banda>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [17] «Agamenon,» [En línea]. Available: <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/it/rd/images/csmithpropagacion2blog.pptx> . [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [18] «Keysight,» 2000-2018. [En línea]. Available: <https://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads?cc=CO&lc=eng>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [19] C. P. Lopez, «Mad engineering,» 1 Febrero 2011. [En línea]. Available: <http://madengineerin.blogspot.com/2011/02/resena-de-matlab.html>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [20] «centro de inverstigacion cientifica y de educacion superior de enseñanza,» [En línea]. Available: <https://centrosconacyt.mx/objeto/camara-anecoica/>. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [21] «capitulo 3. Antenas tipo parche o de microstrip,» [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo3.pdf. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [22] L. Kai Fong, Y. Shing Lung y A. Kishk, «The Versatile U-Slot Patch Antenna,» de *3rd European Conference on Antenna and progrgation* , 2009.

- [23] J. L. Jimenez Martin, J. M. Rodriguez Martin y V. Gonzalez Posadas, «Procedimiento de Diseño y Realización de Antenas de Parche en Tecnología Microstrip,» 2011.
- [24] S. A. Lopez Ayala y A. B. Porras Garcia, «Construcción de una Antena Microstrip con Incisiones Multibanda,» 2014.
- [25] [En línea]. Available: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10545/135.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [26] «Neri-Vela, Rodolfo,» Diciembre 1998. [En línea]. Available: <http://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/1999/v01n2-03.pdf>. [Último acceso: 7 Septiembre 2018].
- [27] «EcuRed,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/MATLAB> . [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [28] Mathworks, «Design, analyze, and visualize antenna elements and antenna arrays,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/antenna.html>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [29] Mathworks, «mathworks,» [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/antenna/examples/modeling-and-analysis-of-single-layer-multi-band-u-slot-patch-antenna.html?searchHighlight=dual%20band%20antenna%20u-slot&s_tid=doc_srchtile. [Último acceso: 4 Septiembre 2018].
- [30] G. M. Lopez, Junio 2013. [En línea]. Available: https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl_2072_234678/PFC_GerardMateoLopez.pdf. [Último acceso: 4 Septiembre 2018].
- [31] «La Carta de Smith en el diseño de las redes de acople,» [En línea]. Available: <http://ingenieria1.udistrital.edu.co/archivosudin/cancino/Libro/PDF%20RF%20y%20las%20Com.%20Analogicas/6%20Cap.%204%20Diseno%20de%20redes%20de%20acople%20con%20Carta%20de%20Smith.pdf>. [Último acceso: 4 Septiembre 2018].
- [32] Mathworks, «Mathworks,» 2017. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/antenna/ref/antenna.rectangle.html> . [Último acceso: 06 Noviembre 2018].

- [33] C. A. Choque Ibañez, «Scribd,» 11 Junio 2015. [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/document/268422537/concepto-Dielectrico>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [34] A. J. y. N. R. D. Sarmiento, «Slideshare,» 27 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/jetpo27/slot-antenna>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [35] D. Schaubert, «Taylor & Francis online,» 8 Febreo 2007. [En línea]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02726349208908321?journalCode=uemg20&>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [36] D. G. Fang, «Google Books,» 19 Diciembre 2017. [En línea]. Available: https://books.google.com.co/books?id=50mNX2SMsGQC&dq=outstanding+work+on+slot+antennas&source=gbs_navlinks_s. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [37] F. Silveira, 2015. [En línea]. Available: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/69982/mod_resource/content/3/param_S_2015.pdf. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [38] «Curiosidades de la audio digital,» [En línea]. Available: <https://curiosidadesdelaudiodigital.wordpress.com/2012/11/20/la-camara-anecoica/>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [39] R. Corporation, «Rogers Corporation,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.rogerscorp.com/documents/728/acs/TMM-Thermoset-Laminate-Data-Sheet-TMM3-TMM4-TMM6-TMM10-TMM10i-TMM13i.pdf>. [Último acceso: 3 Septiembre 2018].
- [40] R. Minguez Salido, «Diccionario Empresarial,» [En línea]. Available: http://diccionarioempresarial.wolterskluwer.es/Content/Documento.aspx?params=H4slIAAAAAAEAMtMSbF1jTAAASMTMwtztlUOuLM_DxblwMDS0NDQ7BAZlqlS35ySGVBqm1aYk5xKgA10ormNQAAAA==WKE. [Último acceso: 3 septiembre 2018].
- [41] J. Medina Gomez, 2016. [En línea]. Available: http://oa.upm.es/44463/1/TFG_JESUS_MEDINA_GOMEZ.pdf. [Último acceso: 4 Septiembre 2018].
- [42] Mathworks, «Modeling and Analysis of Single Layer Multi-band U-Slot Patch Antenna,» 1994-2018. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/antenna/examples/modeling-and-analysis-of-single-layer-multi-band-u-slot-patch-antenna.html?searchHighlight=dual%20band%20antenna%20u-slot&s_tid=doc_srchtile. [Último acceso: 7 Septiembre 2018].

