



“Responsabilidad con pensamiento positivo”

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL

**TRABAJO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA DIGITAL Y
TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA PIFA (PLANAR INVERTED F ANTENNA) MULTIBANDA CON RANURAS, A 1.7 GHz Y 2.1 GHz; PARA UN LABORATORIO DE RADIO FRECUENCIA Y MICROONDA DE BAJO COSTO.

AUTOR:

JORGE LUIS LARA MONAR

TUTOR:

Mg. MAURO FERNANDO BOLAGAY EGAS

QUITO, ECUADOR 2019

DECLARACIÓN

Yo, Jorge Luis Lara Monar, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. La Universidad Tecnológica Israel, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

.....
Jorge Luis Lara Monar

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo de titulación certifico:

Que el trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA PIFA (PLANAR INVERTED F ANTENNA) MULTIBANDA CON RANURAS, A 1.7 GHz Y 2.1 GHz; PARA UN LABORATORIO DE RADIO FRECUENCIA Y MICROONDA DE BAJO COSTO.”**, presentado por el Sr. Jorge Luis Lara Monar, estudiante de la carrera de Electrónica Digital y Telecomunicaciones, reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del Tribunal de Grado, que se designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Quito D.M. septiembre del 2019

TUTOR

.....

Ing. Mauro Fernando Bolagay Egas, Mg

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Proyecto de aprobación de acuerdo con el reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia de La Ingeniería de la Universidad Tecnológica Israel

Quito, septiembre 2019

Para constancia firman:
TRIBUNAL DE GRADO

F.....
PRESIDENTE

F.....
VOCAL

F.....
VOCAL

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por las incontables bendiciones a lo largo de mi vida estudiantil, el motor que me da la fuerza para seguir adelante, es quién permite que mis anhelos se cumplan y permite que sea una mejor persona día tras día.

A mi padre, Jorge Lara Rodríguez, su ejemplo de fortaleza y de trabajo diario inculcaron en mí esa fortaleza de no darme por vencido con facilidad y saber que solo con trabajo y dedicación se pueden romper barreras, su tenacidad formó en mí ese temple que tan útil me ha sido a lo largo de mi vida.

A mi madre, Marcia Monar, mi consejera, siempre apoyándome en las circunstancias más adversas, creyendo en mí, aunque a veces ni yo mismo lo hacía. Le agradezco a ella ese eterno ejemplo de perseverancia de saber levantarse una y otra vez, ese ejemplo de lucha diaria y de saber confrontar los problemas como se debe.

Quiero agradecer también mis hermanas, Pauly, María Belén, Gaby, y a mi Cuñado Camilo, sus palabras, consejos, vivencias y expectativas, me han servido más de lo que se imaginan, siempre estaré agradecido y son parte de mis éxitos.

Además, quiero agradecer a mis tutores Mg. Mauro Bolagay y Mg. Flavio Morales, todas las consideraciones impartidas en las aulas y en el presente documento han sido de vital importancia, sus enseñanzas marcan precedentes en la vida de todos los estudiantes de la Universidad Israel.

DEDICATORIA

A mis padres, Jorge y Marcia, sin lugar a dudas son la parte fundamental de cada éxito que consigo, su amor, esfuerzo y paciencia han conseguido inculcar en mí, valentía y una perspectiva clara de las cosas que quiero hacer en mi vida, sin ustedes esto sería imposible.

Gracias por la confianza que siempre han demostrado tener en mí, todas las ocasiones en las que decaí, estuvieron ustedes para levantarme y darme esas palabras de ánimo para poder salir adelante y continuar a pesar de tener, en muchas ocasiones, caminos muy complicados.

Ustedes siempre formarán parte de mis sueños y metas.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Planteamiento y justificación del problema	2
Objetivos del trabajo de titulación	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Alcance	3
Descripción de los capítulos	3
CAPÍTULO 1	5
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
1.1 Implementación de laboratorios de Radiofrecuencia y Microonda en el Ecuador	6
1.2 Problemática de la implementación para la Universidad Israel	7
1.3 Antena PIFA	9
1.4 Antena PIFA Multibanda	10
CAPÍTULO 2	19
MARCO METODOLÓGICO	19
2.1 Fundamentación teórica	19
2.2 Marco metodológico	19
2.3 Propuesta	19
2.4 Implementación	19
CAPÍTULO 3	21

PROPUESTA	21
3.1 Diseño de una antena PIFA Multibanda	21
3.1.1 Diseño geométrico	21
3.1.2 Ecuaciones de diseño	21
3.1.3 Definición del caso a aplicarse	23
3.1.4 Diseño de la antena PIFA multibanda con ranuras	24
3.2 Análisis de software capaz de simular una PIFA Multibanda con ranuras ..	28
3.3 Optimización del dispositivo utilizando el software ADS	34
3.3.1 Diseño de la antena en ADS	35
3.3.2 Definición de parámetros y simulación	39
3.4 Presupuesto requerido para el desarrollo de la antena PIFA Multibanda con ranuras	44
CAPÍTULO 4	49
IMPLEMENTACIÓN	49
4.1 Desarrollo	49
4.1.1 Construcción del hardware	49
4.1.2 Preparación de la placa	51
4.2 Pruebas de funcionamiento	54
4.2.1 Equipo Analizador de red vectorial	54
4.2.2 Prueba de funcionamiento de la antena	56
4.3 Análisis de resultados	57
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXOS	65
ANEXO 1 Manual de Usuario	65
ANEXO 2 Datos técnicos VNA y antena PIFA	72
ANEXO 3 Hoja de datos técnicos de los elementos empleados	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Partes de una antena PIFA.....	10
Figura 1.2	Camino decisivos para diferentes bandas.....	10
Figura 1.3	Sustrato FR-4.....	11
Figura 1.4	Geometría de la antena de Banda dual.....	12
Figura 1.5	Estructura y radiación de la antena.....	12
Figura 1.6	Pérdida de retorno de la antena de banda dual.....	13
Figura 1.7	Impedancia de entrada de la antena de banda dual.....	13
Figura 1.8	Patrones de radiación de la antena de banda dual.....	14
Figura 1.9	Geometría de la antena de banda triple.....	15
Figura 1.10	Estructura y radiación de la antena de banda triple.....	16
Figura 1.11	Pérdida de retorno de la antena de triple banda.....	16
Figura 1.12	Impedancia de entrada de la antena de triple banda.....	16
Figura 1.13	Patrones de radiación de la antena de triple banda.....	17
Figura 3.1	Esquema general de las dimensiones del PIFA.....	22
Figura 3.2	Estructura dimensional del PIFA a desarrollarse.....	25
Figura 3.3	Dimensiones del PIFA según los cálculos.....	28
Figura 3.4	Dimensiones tentativas para la ranura.....	29
Figura 3.5	Diagrama de bloques del proceso de fabricación.....	29
Figura 3.6	Muestra básica de los componentes de Qucs para diseño de antenas.....	30
Figura 3.7	Muestra de simulación en Sonnet.....	31
Figura 3.8	Simulación de la radiación de una antena en CST Studio.....	32
Figura 3.9	Lista de parámetros en base a los cálculos de diseño.....	32
Figura 3.10	Valores de resonancia en 1.82 GHz y 2.6 GHz.....	33
Figura 3.11	Lista de parámetros en base a los cálculos de diseño después de la optimización del diseño.....	33
Figura 3.12	Valores de resonancia en 1.7 GHz y 2 GHz.....	34
Figura 3.13	Simulación de una antena Planar en ADS.....	35
Figura 3.14	Selección de diagrama esquemático.....	36
Figura 3.15	Selección de diagrama de líneas.....	36
Figura 3.16	Plano de trabajo en diagrama de líneas.....	37
Figura 3.17	Selección de las características del sustrato para la antena.....	37

Figura 3.18.	Selección de las características del sustrato para la antena.....	38
Figura 3.19.	Selección de las capas diseñadas para la PIFA.....	38
Figura 3.20.	Diseño de la PIFA Multibanda.....	39
Figura 3.21.	Herramienta para visualización de la antena en 3D.....	39
Figura 3.22.	Visualización de la antena en 3 dimensiones.....	40
Figura 3.23.	Explicación de los parámetros S.....	41
Figura 3.24.	Herramienta Insert Pin permite colocar un conector en la placa.....	42
Figura 3.25.	Herramienta de simulación en ADS.....	43
Figura 3.26.	Selección de el parámetro a generar en la simulación.....	43
Figura 3.27.	Obtención de los parámetros S_{11} en ADS.....	44
Figura 3.28.	Patrón de radiación de la PIFA Multibanda.....	45
Figura 3.29.	Parámetros de la PIFA Multibanda a una frecuencia de 1.7 GHz.....	45
Figura 3.30.	Parámetros de la PIFA Multibanda a una frecuencia de 2.1 GHz.....	46
Figura 4.1.	Dimensiones de la placa de tierra.....	50
Figura 4.2.	Dimensiones del punto de cortocircuito y plano de alimentación.....	50
Figura 4.3.	Dimensiones de la placa superior y ranura de la antena.....	51
Figura 4.4.	Distancia entre placa superior y plano de tierra.....	51
Figura 4.5.	Dibujo del plano de tierra en el sustrato.....	53
Figura 4.6.	Dibujo de la placa superior en la parte inferior de la cinta de cobre.....	53
Figura 4.7.	Cinta de cobre cortada para diseño de la placa superior.....	54
Figura 4.8.	Diseño final artesanal de la antena PIFA Multibanda con ranuras.....	54
Figura 4.9.	Equipo VNA de dos puertos.....	56
Figura 4.10.	Lógica del funcionamiento del VNA en equipos de un puerto.....	57
Figura 4.11.	Parámetros S_{11} reales de la antena.....	57
Figura 4.12.	Gráfica de magnitud parámetros S_{11} , valores de resonancia de la simulación.....	58
Figura 4.13.	Gráfica de magnitud Parámetros S_{11} reales de la antena.....	59
Figura 4.14.	Gráficas de impedancia.....	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Características del sustrato útiles para cálculos de diseño.....	27
Tabla 3.2. Dimensiones teóricas para el diseño del PIFA.....	27
Tabla 3.3. Comparativa entre distintos softwares de diseño.....	35
Tabla 3.4. Comparativa de precios para el equipo VNA.....	46
Tabla 3.5. Comparativa de precios para la placa de fibra de vidrio.....	46
Tabla 3.6. Comparativa de precios del conector SMA hembra para placa.....	47
Tabla 3.7. Comparativa de precios de la cinta adhesiva de cobre.....	47
Tabla 3.8. Presupuesto final del proyecto.....	47
Tabla 4.1. Dimensiones para el diseño de la PIFA Multibanda con ranuras.....	52
Tabla 4.2. Comparativa de valores propuestos, simulados y reales.....	59

RESUMEN

El presente proyecto muestra el desarrollo e implementación de una antena PIFA Multibanda (Planar Inverted F Antenna) con ranuras, con valores de resonancia a 1.7 GHz y 2.1 GHz que será parte de la implementación de un laboratorio de radiofrecuencia y microonda de bajo costo. Este tipo de antenas son comúnmente utilizadas en comunicaciones inalámbricas.

El estudio se enfoca en dos aspectos importantes, inicialmente se muestran las características y sustento del desarrollo teórico (matemático), luego se realiza una síntesis de las técnicas más usadas en el diseño para mejorar el desempeño de la antena y definir sus correctas dimensiones, para, posteriormente ser utilizada en un laboratorio de bajo costo de microonda y radiofrecuencia para la Universidad Tecnológica Israel.

La aplicación del proyecto está dirigida en un entorno práctico, que permita a los estudiantes de telecomunicaciones analizar las propiedades de transmisión y reflexión (Parámetros S) de la antena, que serán desplegados en un equipo VNA (Analizador Vectorial de Redes).

Palabras clave: Antena, Laboratorio, PIFA, Radiofrecuencia, VNA.

ABSTRACT

This project shows the development and implementation of a PIFA multiband antenna (planar inverted F antenna) with slots, with resonance values of 1.7 GHz and 2.1 GHz the first part of the implementation of a low-cost radiofrequency and microwave laboratory. These types of antennas are used in wireless communications.

The study focuses on two important aspects, initially the characteristics and sustenance of the theoretical (mathematical) development are shown, then a synthesis of the most used techniques in the design is made to improve the performance of the antenna and define its correct dimensions, for, later to be used in a laboratory of low cost of microwave and radiofrequency for the Technological University Israel.

The application of the project is directed in a practical environment, which allows telecommunications students to analyze the transmission and reflection properties (Parameters S) of the antenna, which will be deployed in a VNA (Vector Network Analyzer) equipment.

Keywords: Antenna, Laboratory, PIFA, Radio Frequency, VNA

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La gran mayoría de universidades del país (ESPE, EPN, ESPOL entre otras), cuenta con laboratorios de Radiofrecuencia y Microonda para el estudio de antenas. Estos laboratorios se utilizan para proporcionar experiencia práctica en diseño, fabricación y pruebas, en diferentes prototipos de medios de transmisión y recepción.

Generalmente estos laboratorios incluyen componentes, software de diseño, equipos de test y medida; etc.

Si bien es cierto que estos laboratorios están equipados con tecnología de punta, su costo es extremadamente alto, debido a que la mayoría cuenta con dispositivos VNA (Analizador Vectorial de Redes) y SNA (Analizador Escalar de Redes) portátiles, sin embargo, surge la iniciativa de equipar un laboratorio de bajo costo que incluye un equipo VNA.

Hasta ahora el estudio de Propagación y Antenas (para el caso de la Universidad Israel) ha sido una materia que se enseña de manera numérica, por lo tanto, los estudiantes obtienen poco o nada de experiencia práctica, pero con la implementación de este laboratorio de bajo costo y diferentes tipos de antenas, filtros y stubs, los estudiantes podrán referenciar de manera práctica lo aprendido de forma teórica.

Planteamiento y justificación del problema

La investigación realizada parte de la necesidad de complementar la parte teórica conjuntamente con el enfoque práctico, para lo cual se requiere contar con un laboratorio de bajo costo de microonda y radiofrecuencia que por lo pronto no existe en la universidad; la adquisición de un equipo VNA (Analizador de redes) que es un equipo capaz de analizar las propiedades de reflexión y transmisión (Parámetros S) y diseños de diferentes elementos de transmisión, en este caso, una antena PIFA multibanda con ranuras, permitirán de forma práctica, el estudio de los parámetros mencionados anteriormente.

De esta forma se espera afianzar los conocimientos de los estudiantes de ingeniería que además de entender la materia de forma teórica, podrán plasmar en los diseños, la realidad que muestran los dispositivos.

Objetivos del trabajo de titulación

Objetivo general

Implementar una antena PIFA multibanda con ranuras, con resonancia a 1.7 GHz y 2.1 GHz, mediante el estudio, análisis y diseño práctico del dispositivo, para un laboratorio de microonda y radiofrecuencia de bajo costo.

Objetivos específicos

- Describir el funcionamiento de una antena PIFA multibanda con ranuras.
- Diseñar la antena de manera teórica.
- Optimizar el diseño teórico de la antena mediante el uso de un simulador de circuitos.
- Construir la antena cuidando los parámetros calculados y simulados.
- Validar experimentalmente la funcionalidad de la antena implementada mediante el uso del equipo VNA.

Alcance

La implementación de un laboratorio de bajo costo de radiofrecuencia y microonda permitirá al estudiante de telecomunicaciones evaluar, ejecutar, y controlar las actividades relacionadas al uso de medios de transmisión y recepción, de forma práctica, lo que conlleva a afianzar sus conocimientos en el ámbito tecnológico mediante el uso del mismo.

La dotación del laboratorio permitirá a la Universidad Israel, dar apoyo a las actividades prácticas y experimentales de los planes de estudio, a la investigación que refuerza el sentido académico y a su vez enfocar el crecimiento de la carrera de telecomunicaciones, además contar con equipamiento actualizado en las áreas definidas por los departamentos académicos.

Descripción de los capítulos

El presente proyecto consta de 4 capítulos, el capítulo 1 muestra la fundamentación teórica del proyecto donde se explica la importancia de disponer de un laboratorio de radiofrecuencia y microonda, los antecedentes de laboratorios en otras universidades del país y además se explica que es una antena PIFA Multibanda con ranuras, tema central de este proyecto.

En el capítulo 2, se trata la metodología de investigación que se aplica para el desarrollo de una antena PIFA multibanda con ranuras, en términos generales, se describe el marco metodológico para el desarrollo de dicho proyecto.

El capítulo 3, abarca la propuesta del diseño del PIFA, se muestran casos, fórmulas y cálculos que permitan la optimización del dispositivo mediante simulación, este capítulo

enfoca de manera global la parte tórica del diseño, se detallan las funciones del software que se implementó y de qué manera se desarrolló la antena.

El capítulo 4, muestra el desarrollo del proceso de fabricación del dispositivo, se define la estructura física del mismo tomando en cuenta los criterios y modelos de trabajo útiles para su desarrollo. Adicionalmente se indican las pruebas de funcionamiento que avalan el cumplimiento de las metas establecidas en el proyecto.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Al hablar del estudio de las telecomunicaciones, es de vital importancia disponer de laboratorios que permitan al estudiante de dicha carrera tener pleno conocimiento del campo en el cual se va a desempeñar, estos laboratorios deben estar diseñados para un estudio práctico que respalde la enseñanza teórica de cada tema que se haya estudiado con anterioridad en clase.

Las universidades más prestigiosas del Ecuador, cuentan con espacios destinados netamente al estudio práctico de las telecomunicaciones, por citar algunos ejemplos, la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) cuenta con un laboratorio especializado de Investigación y Desarrollo, El laboratorio de I+D, está dedicado a la generación del conocimiento en el contexto de un determinado problema relacionado con la electrónica y sus especializaciones, a través del desarrollo de: proyectos de investigación, iniciación científica, pasantías y proyectos de graduación, con un carácter social y de respeto al medio ambiente.

Otro de los laboratorios, es el de Electromagnetismo y Antenas, Siendo el Electromagnetismo y la Óptica Aplicada un área de conocimiento vital, en el campo de las telecomunicaciones, para entender los fundamentos del comportamiento de los campos electromagnéticos y su propagación en diferentes medios, libres y guiados, se implantó el laboratorio de electromagnetismo y antenas para verificar mediante la práctica los conceptos básicos y los parámetros de diferentes tipos de antenas. De igual manera se han establecido procedimientos para probar antenas que son fabricados por estudiantes de las carreras de electrónica.

La Escuela Politécnica del Ejército, también dispone de un laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas. Este espacio sirve para la investigación y desarrollo en comunicaciones inalámbricas con el fin de resolver problemas reales en el ámbito industrial, así como mejorar el nivel académico del estudiante de telecomunicaciones, redes y comunicación de datos y automatización y control a través de la interacción con equipos de escala real, como aporte al perfil profesional dentro del área del conocimiento de telecomunicaciones, automatización y control. El laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas cuenta con equipos especializados para las carreras de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Redes y Comunicación de Datos y Automatización y Control. Dispone equipos para el desarrollo de prácticas en el área de: Sensores inalámbricos (802.15.4). Redes Wireless (802.11x). Redes WIMAX. (802.16).

1.1 Implementación de laboratorios de Radiofrecuencia y Microonda en el Ecuador

Anteriormente se tomó de manera general la estructura de ciertos laboratorios de telecomunicaciones en una universidad local; el interés del presente proyecto es definir la aplicación de una antena PIFA (Planar Inverted F Antenna) Multibanda, enfocado netamente al estudio de radiofrecuencia y microonda para lo cual, se toma como referencia a la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), dicha universidad cuenta en sus instalaciones con un laboratorio de antenas que cuenta con equipos especializados.

La UPS, cuenta desde el año 2014 con este laboratorio que incluye un equipo vectorial FielFox Keysight de 18 GHz, que es un analizador de RF y microondas portátil, que permite un análisis combinado (pruebas de cable y antena, análisis de espectro, VNA).

El analizador vectorial de redes o VNA permite realizar mediciones de dos puertos (parámetros S): S11, S21, S12, S22, magnitud y fase, análisis en el dominio del tiempo y modo mixto.

También cuenta con un modo analizador de espectro permite realizar mediciones de tiempo de entrada, potencia de canal, potencia de canal adyacente, ancho de banda ocupado,

análisis de transmisión, análisis de interferencia, modulación y análisis de espectro en tiempo real. También permite realizar mediciones de potencia mediante sensores externos USB, medidor de potencia integrado y voltímetro vectorial.

La UPS se equipó con este laboratorio, con el fin de analizar señales, calibrar de cables, mejorar el área de investigación, mejorar los proyectos de investigación y titulación, además de realización de prácticas de laboratorio, donde los estudiantes prueban diferentes tipos de antenas, y desarrollan sus propios prototipos, basados en los parámetros requeridos en cada práctica.

El objetivo de este laboratorio de antenas (RF y Microonda), es ayudar al estudiante de telecomunicaciones a adquirir destreza en el manejo de quipos de campo, análisis de señales en un entorno profesional y mejorar el campo de investigación.

1.2 Problemática de la implementación para la Universidad Israel

La formación profesional en cualquier campo de ciencias aplicadas, debe permitir a los estudiantes, experimentar con la tecnología (realizar pruebas, ensayos, etc.), sin importar la carrera que elijan. Esto debido a la necesidad de aprender a desarrollar sus ideas, enfocar su capacidad analítica, y solucionar problemas; esto debe desarrollarse en un ambiente eficaz, muy adecuado y en condiciones ideales para su desarrollo. Dentro de un laboratorio el trabajo práctico, da la oportunidad a que el estudiante de ingeniería descubra por sí mismo la experimentación personal. Las prácticas de laboratorio facilitan un proceso de enseñanza-aprendizaje y ayuda a que los conocimientos sean asimilados de una manera más eficiente.

Los laboratorios universitarios, se constituyen en uno de los mecanismos fundamentales que va de la mano con los conocimientos adquiridos dentro de las aulas, esto permite al estudiante de ingeniería, la primera oportunidad de ver el desarrollo real y la aplicación de la teoría impartida por el docente en el aula.

La Universidad Tecnológica Israel, con el afán de mejorar constantemente su calidad educativa, se ve en la necesidad de equipar sus laboratorios con tecnología aplicada, siendo la carrera de Telecomunicaciones, un ejemplo puntual de esta mejora.

Con este afán nace la iniciativa de crear un laboratorio de Radiofrecuencia y Microonda de bajo costo, ya que de esta forma se construye un nexo de conocimientos entre la teoría y la práctica. Actualmente, la tendencia del aprendizaje en la universidades locales e internacionales implica un modelo que abarca: concebir, diseñar, implementar y operar; este camino permite un mejor empoderamiento del conocimiento, ya que se estimula la interacción con casos y fenómenos reales, permitiendo corroborar las teorías y modelos estudiados durante las clases teóricas dictadas en las aulas de la Universidad Israel, generando perfeccionamiento en el trabajo experimental como una actividad investigativa.

Una de las funciones que abarca la implementación del laboratorio de bajo costo de Radiofrecuencia y Microonda es facilitar una primera inducción al trabajo práctico, que podría estar enfocado al ámbito cotidiano, permitiendo al estudiante formarse como un futuro investigador, capaz de tener mayor independencia de realizar análisis profundos procurando mejorar su habilidad en el planteamiento de distintas prácticas y la interpretación de resultados experimentales.

Las prácticas de laboratorio estarán basadas en la investigación desarrollada en el presente proyecto (Antena PIFA multibanda para el presente caso), y serán complementadas por otros proyectos similares (antenas, filtros, divisores de potencia, etc.) que formarán parte activa del laboratorio. Este laboratorio establecerá un método conveniente para planteamiento de futuras hipótesis o mejoras que deseen aplicarse posteriormente.

Los laboratorios como ambientes de aprendizaje se consideran escenarios pedagógicos en donde se desarrollan actividades que permiten fortalecer la gestión del conocimiento por parte del estudiante. Estos ambientes de aprendizaje están formados por un conjunto de elementos, materiales y actores (docentes y estudiantes) que participan en el proceso de aprendizaje, basado en objetivos y propósitos claramente definidos desde el punto de vista cognitivo, procedimental y de valores.

1.3 Antena PIFA

La Antena plana en forma de F invertida (PIFA) es una antena muy utilizada en el ámbito de comunicaciones inalámbricas, un claro ejemplo de esto, son los celulares de última tecnología también conocidos como teléfonos de alta gama, estos equipos incorporan antenas PIFA, ya que, por su bajo perfil y facilidad de incorporarla al teléfono, permite la gran ventaja de reducir su tamaño, ensanchar su ancho de banda o adaptarla para que opere a distintas frecuencias.

Las antenas PIFA, se pueden considerar como un avance de las antenas IFA (Antena en forma de F invertida), ya que tanto el IFA como el PIFA, tienen una tira de tierra y una de alimentación.

Al reemplazar la franja radiante por un parche una antena IFA, se obtiene una antena PIFA. En la mayoría de los casos el parche de un PIFA está por encima del plano de tierra. (Zhang, 2017). La figura 1.1 muestra una antena PIFA.

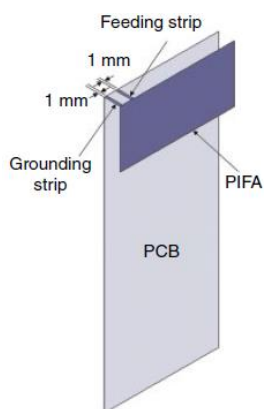


Figura 1.1. Partes de una antena PIFA.

Fuente: (Zhang, 2017)

1.4 Antena PIFA Multibanda

Se considera multibanda a una antena que puede trabajar a partir dos frecuencias de resonancia en adelante. En el punto 1.3 se mencionó brevemente el concepto general de una antena PIFA (de banda única).

Similar al PIFA de una sola banda, una antena PIFA de doble banda también tiene una tira de tierra y otra de alimentación, existen dos dimensiones muy importantes, D y C , se utilizan en la figura 1.2 para describir la ranura o hendidura de la antena. La dimensión D es la distancia entre la esquina del parche y la abertura de la ranura. La dimensión C es la longitud de la ranura. La dimensión P es la distancia entre la parte horizontal de la ranura y el borde del parche. La P no es realmente una dimensión crítica; Sin embargo, decide la forma de la hendidura. (Zhang, 2017)

La figura 1.2 muestra los caminos decisivos para una antena de diferentes bandas.

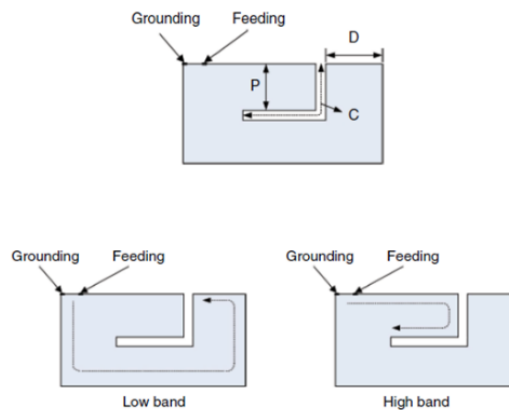


Figura 1.2. Caminos decisivos para diferentes bandas.

Fuente: (Zhang, 2017)

1.5 Sustrato para construcción de un PIFA

Para la construcción del PIFA es necesario contar con una placa de circuito impreso (PCB), que es el soporte donde se diseña la antena, básicamente, las líneas conductoras de la misma. Dependiendo del diseño del PIFA se puede utilizar un PCB con conductor en una

sola cara, o en ambas si es necesario. El soporte para estas pistas generalmente suele ser una combinación de fibra de vidrio reforzada con materiales cerámicos, resinas, plásticos y otros conductores.

Las capas conductoras de la placa están separadas por un material llamado sustrato, este sustrato puede estar diseñado de distintos materiales no conductores que permiten que las pistas eléctricas lleven su propia señal y voltaje. Para el presente proyecto se utiliza un compuesto llamado FR-4, que es un material diseñado en fibra de vidrio recubierto con resina que es altamente resistente al calor. (Guan-Yu Chen, 2009)



Figura 1.3. Sustrato FR-4

Fuente: (Guan-Yu Chen, 2009)

La placa PCB puede tener variaciones en cuanto a sus calidades, es recomendable adquirir la mejor disponible en el mercado, de preferencia una placa PCB certificada.

1.6 Otras antenas PIFA Multibanda

Antena PIFA de Banda Dual

Existe un caso similar al presentado en el presente proyecto que muestra una antena PIFA de dos bandas, en la cual se modifica la estructura. Los principales cambios realizados en este caso son: la eliminación de dos cortocircuitos verticales y la eliminación de la ranura

interior. También la posición del elemento de radiación que se convierte en el centro de la estructura, el tamaño del plano del suelo (100 X 50 mm) y el ancho de la ranura que será igual a 2,9 mm. La geometría global de la antenna se presenta en la figura 1.4. (Yamina Belhadeh, 2011)

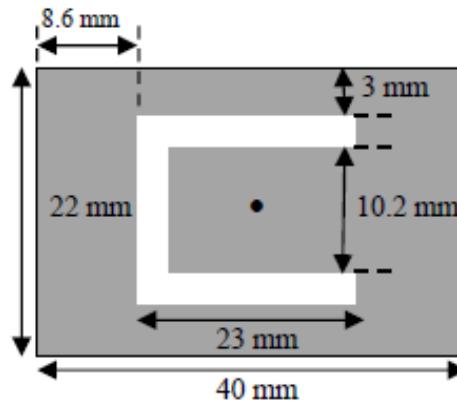


Figura 1.4. Geometría de la antena de Banda dual

Fuente: (Yamina Belhadeh, 2011)

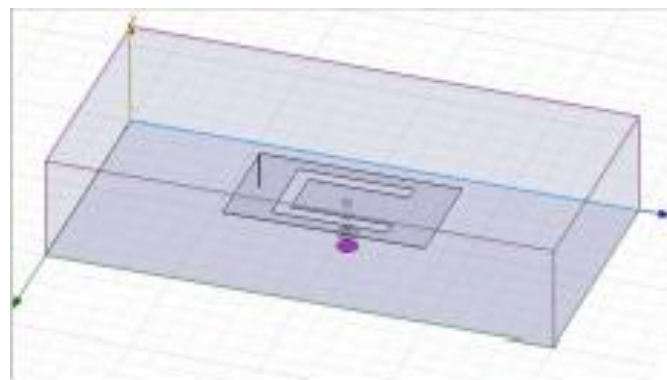


Figura 1.5. Estructura y radiación de la antena.

Fuente: (Yamina Belhadeh, 2011)

La figura 1.6 representa la pérdida de retorno y la figura 1.7 representa la impedancia de entrada de la antena PIFA de banda dual.

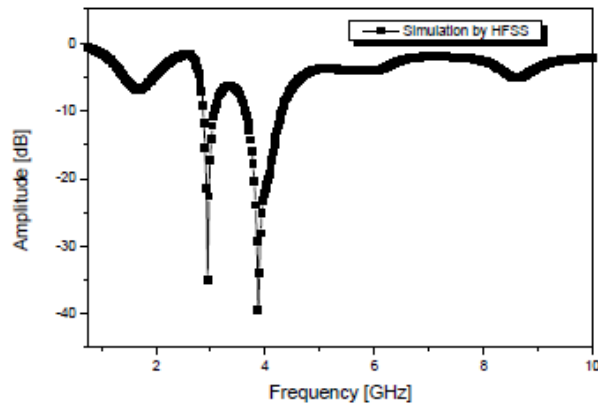


Figura 1.6. Pérdida de retorno de la antena de banda dual.

Fuente: (Yamina BelhadeF, 2011)

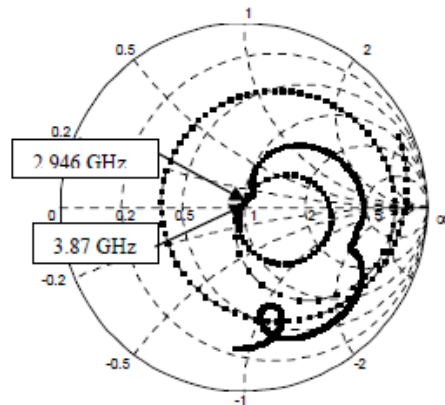


Figura 1.7. Impedancia de entrada de la antena de banda dual.

Fuente: (Yamina BelhadeF, 2011)

La antena simulada por el software HFSS está adaptada a dos frecuencias resonantes de 2.946 y 3.87 GHz. La potencia reflejada alcanza los valores de -35 dB y -39 dB con anchos de banda de 7.84% y 17.91% a estas frecuencias resonantes respectivamente. Los puntos de impedancia de entrada están en el medio del gráfico Smith para las dos frecuencias deseadas. La adaptación es perfecta y la antena se puede integrar en sistemas inalámbricos como las redes MBWA y UWB.

Los patrones de radiaciones polares en 2D se presentan en la figura 1.8. Son casi omnidireccionales en las dos frecuencias resonantes. (Yamina BelhadeF, 2011)

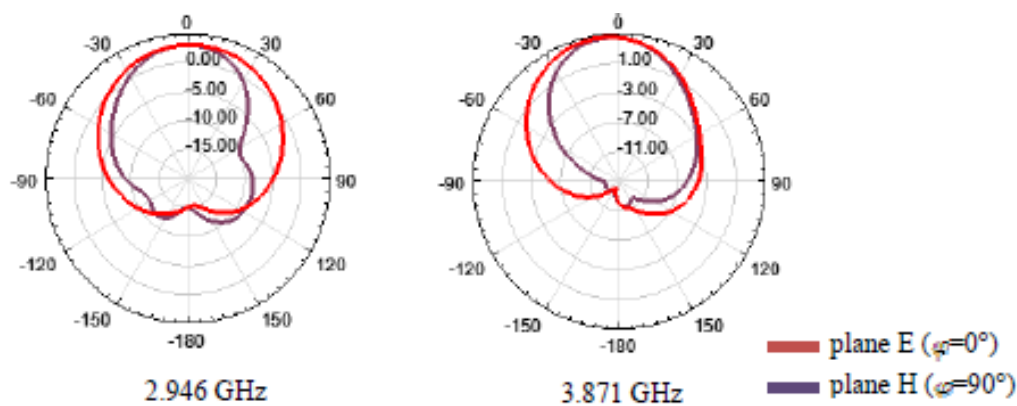


Figura 1.8. Patrones de radiación de la antena de banda dual.

Fuente: (Yamina Belhadef, 2011)

Antena PIFA de Triple Banda

Las ranuras que cortan ciertas partes de un elemento de radiación pueden permitir la aparición de nuevas resonancias. Por ejemplo, podemos observar el uso de una ranura en forma de U o el uso de una ranura con forma no especificada. Gracias a este proceso y a los efectos capacitivos creados, se pueden diseñar antenas en miniatura de banda ancha y multibanda al mismo tiempo. Esta antena se obtiene a partir de la estructura anterior para la cual se aplican técnicas de miniaturización en el elemento de radiación. Entre estas técnicas, las dos U forman ranuras de inserción en el elemento de radiación y el uso de una carga capacitiva insertada en el extremo del elemento de radiación. Su altura es igual a 1,8 mm. La estructura final se presenta en la figura 1.9.

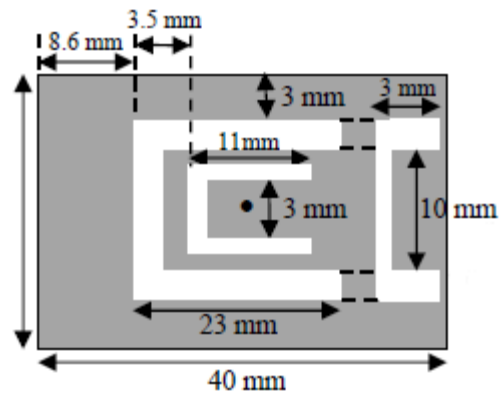


Figura 1.9. Geometría de la antena de banda triple.

Fuente: (Yamina Belhadef, 2011)

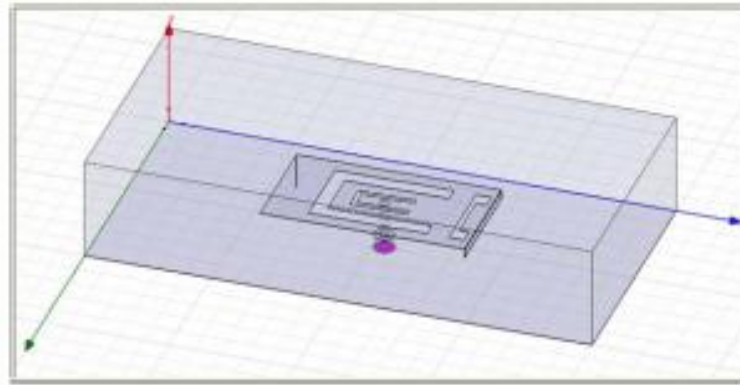


Figura 1.10. Estructura y radiación de la antena de banda triple.

Fuente: (Yamina Belhadef, 2011)

La figura 1.11 representa la pérdida de retorno y la figura 1.12 representa la impedancia de entrada de la antena PIFA de triple banda.

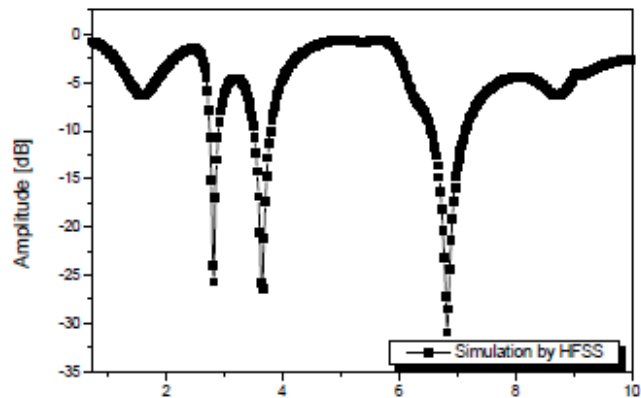


Figura 1.11. Pérdida de retorno de la antena de triple banda.

Fuente: (Yamina Belhadef, 2011)

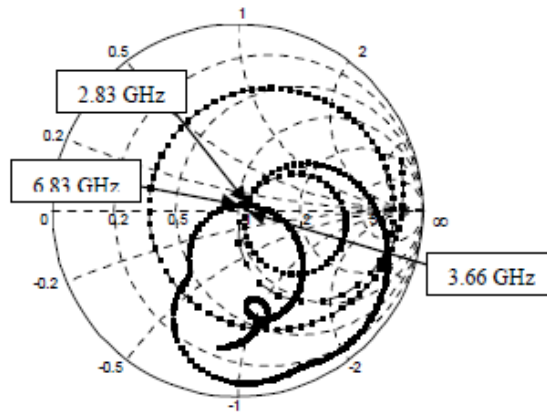


Figura 1.12. Impedancia de entrada de la antena de triple banda.

Fuente: (Yamina Belhadef, 2011)

La antena funciona a 2,83, 3,66 y 6,83 GHz; que corresponde a los estándares MBWA, UWB y MiMAX. Los anchos de banda para las 3 frecuencias son respectivamente 5.71%, 8.2% y 9.14%. La pérdida de retorno es igual a -31dB a 6.83 GHz. La impedancia de entrada para las tres frecuencias resonantes está en el medio del gráfico Smith (Figura 1.13). Los patrones de radiaciones polares en 2D son casi omnidireccionales para los planes E y H. (Yamina Belhadef, 2011)

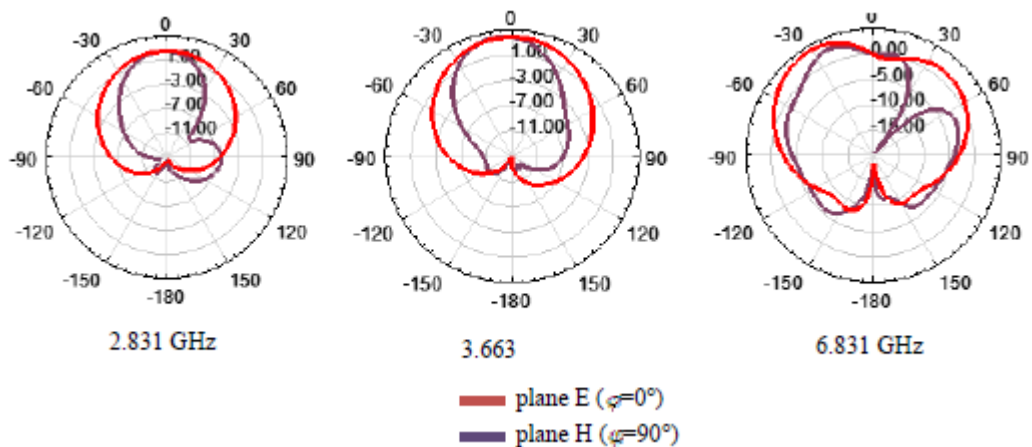


Figura 1.13. Patrones de radiación de la antena de triple banda.

Fuente: (Yamina Belhadef, 2011)

1.7 Aplicaciones de las antenas PIFA

La principal aplicación de las antenas PIFA, está enfocada a los dispositivos inalámbricos portátiles, esto debido a su reducido tamaño y a la facilidad de fabricación, a partir de las antenas PIFA se pueden desarrollar variaciones de antenas útiles para aplicaciones de Sistema de Posicionamiento Global (GPS). (Kashyap, 2014)

Otro tipo de aplicaciones de las antenas PIFA, está relacionada con la tecnología WiMAX, esta tecnología es similar al WiFi pero con un alcance superior a los 30 Km y puede alcanzar velocidades de hasta 124 Mbps.

Las antenas PIFA en la actualidad están siendo muy utilizadas en telefonía celular, un claro ejemplo de esto es que todos los modelos de Samsung de la gama “S”, incorporan antenas PIFA. (Sahil Saini, 2016)

CAPÍTULO 2

MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo del proyecto se debe tomar en cuenta que el enfoque investigativo que se llevará a cabo es mixto (cualitativo, cuantitativo y experimental), debido a que se definirán las cualidades del estudio y diseño de una antena PIFA multibanda con ranuras, buscando conceptos que formen parte de la realidad aplicable a dicha antena y de ser posible definir cualidades adicionales que puedan generarse en el diseño de la antena (análisis cualitativo).

Por otra parte, se emplearán cálculos para el diseño funcional y correcto de la PIFA, basado en análisis anteriores ya propuestos, pero brindando el enfoque que requiere la Universidad Israel, partiendo de un objetivo y alcanzado la meta establecida (análisis cuantitativo).

2.1 Fundamentación teórica

En la etapa de fundamentación teórica, se aplicó el método cualitativo, ya que se evidenció el problema existente, que radica en que la Universidad Israel no cuenta con equipos de radiofrecuencia y microonda como si disponen otras universidades que ofertan la carrera de telecomunicaciones; en este punto también se abarca el método teórico hipotético ya que, partiendo de la problemática antes mencionada, se define la hipótesis de generar diversos proyectos como antenas, filtros, etc.

De aquí nace la idea de diseñar una antena PIFA multibanda con ranuras, que es la base del presente proyecto.

En esta etapa se aplicó revisiones de diversas fuentes bibliográficas, fuentes de internet y artículos de proyectos similares que sean funcionales o hayan sido implementados previamente en diversos ámbitos.

2.2 Marco metodológico

En esta etapa se utilizó el método empírico de revisión de documentos con el objetivo de recolectar toda la información posible y mecanismos de investigación aplicable. El objetivo es mostrar la problemática de la investigación y el resultado de la aplicación sistemática y lógica del proyecto.

2.3 Propuesta

En este punto se aplicó el método inductivo, ya que se realizaron varias pruebas para el diseño del prototipo de la antena PIFA, se inician con cálculos que son la base de la estructura general de la antena, seguido del análisis de los materiales, y una vez que todo está establecido, se juntan para conformar el sistema que mediante simulaciones se espera alcanzar los resultados requeridos, y en caso de no ser así, buscar soluciones en base a todo lo realizado anteriormente.

2.4 Implementación

En la etapa final del proyecto se utilizó el método experimental, ya que la hipótesis planteada iba a ser verificada en un sistema físico, netamente funcional; es decir, una placa que contenga todos los elementos capaces de relucir una antena PIFA Multibanda con ranuras que proporcione el funcionamiento requerido.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA

En este capítulo se presenta como tema general, la ingeniería del diseño de una antena PIFA Multibanda con ranuras, mostrando diferentes casos posibles de fabricación y haciendo una revisión detallada de las fórmulas útiles para cada caso; el diseño como proceso, consiste en convertir información de condiciones y requisitos útiles, en estructuras factibles de aplicación, en este caso la idea central es plasmar las condiciones conocidas en dimensiones críticas para el diseño del PIFA.

Una vez conseguidos los esquemas y valores necesarios para el diseño del PIFA Multibanda, es necesario optimizar dichos valores, los valores calculados están hechos para dispositivos perfectos y se debe tener en cuenta que no existe dispositivo electrónico que no esté expuesto a interferencias.

La optimización busca adaptar los valores teóricos a los elementos reales que se disponen para el diseño, de manera que el dispositivo funcione de la forma más eficiente posible (en este caso, que los valores de resonancia sean 1.7 GHz y 2.1 GHz).

3.1 Diseño de una antena PIFA Multibanda

3.1.1 Diseño geométrico

Uno de los principales problemas de las antenas parche o antenas patch, es que su ancho de banda es muy limitado, pero esto se puede corregir si se implementa una antena PIFA. (Song, Hall, & Ghafouri-Shiraz, 2000) (Song, Hall, & Ghafouri-Shiraz, 2000)

Para aumentar el ancho de banda, se desarrolla la antena plana invertida F (PIFA). Los diseños de PIFA invocan la operación de un cuarto de longitud de onda. Además, el PIFA ofrece una eficiencia de radiación muy alta y un ancho de banda suficiente en una unidad compacta; es decir es más eficiente para usarla en dispositivos móviles.

Se puede emplear una técnica como el uso de un plano de tierra reducido para aumentar aún más el ancho de banda.

La capacidad de multifrecuencia con la estructura de la antena se puede lograr al excitar varios modos de resonancia utilizando una estructura ramificada, creada cortando ranuras en el elemento radiante (Nótese figura 1.1 y 1.2). (Razali & Bialkowski, 2009)

3.1.2 Ecuaciones de diseño

La figura 3.1 muestra el esquema de la antena PIFA, el largo y el ancho del parche son L_1 y L_2 respectivamente, el pasador es de ancho W , y comienza desde un borde del PIFA. La alimentación está situada a una distancia D del pasador de cortocircuito. El PIFA está a una altura H del plano de tierra. La permitividad del aire $\epsilon_r = 1$, se utiliza como sustrato entre el parche y el plano de tierra. La frecuencia de resonancia del PIFA es proporcional a la longitud efectiva de la distribución actual. (Hossa & Bialkowski, 2007)

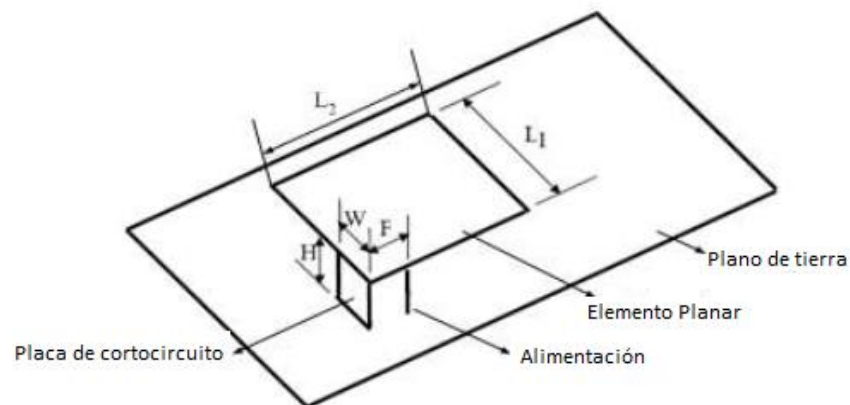


Figura 3.1. Esquema general de las dimensiones del PIFA.

Fuente: (Hossa & Bialkowski, 2007)

Se pueden considerar los siguientes casos para obtener la expresión de la frecuencia a la que irradia el PIFA.

Caso 1: $W = L_1$, es decir, cuando el ancho (W) de la placa de cortocircuito es igual a la longitud del elemento plano, es decir L_1 . Esta corresponde al caso del cortocircuito (MSA), que es una antena de un cuarto de onda. La longitud efectiva de la MSA es $L_2 + H$ donde, H es la altura de la placa de cortocircuito. La condición de resonancia entonces se expresa mediante la ecuación. 1.1

$$L_2 + H = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Fuente: (García, 2007)

Donde λ , es la longitud de onda deseada.

Se sabe que $\lambda=c/f$, donde f es la frecuencia de operación deseada del PIFA y c es la velocidad de la luz. De esta forma se define que:

$$f = \frac{c}{4(L_2+H)} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Fuente: (García, 2007)

Caso 2: $W = 0$, es decir, la placa de cortocircuito está representada por un pin delgado de cortocircuito. La longitud efectiva de la corriente es entonces $L_1 + L_2 + H$. En este caso, la condición de resonancia se expresa mediante:

$$L_1 + L_2 + H = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Fuente: (García, 2007)

Por lo tanto, se obtiene:

$$f = \frac{c}{4(L_1+L_2+H)} \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Fuente: (García, 2007)

Caso 3: $0 < W < L_1$, la frecuencia de resonancia es una combinación lineal de las frecuencias de resonancia asociadas con los casos limitantes y está dada por:

$$f = \frac{c}{4(L_1 + L_2 + H - W)} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Fuente: (García, 2007)

3.1.3 Definición del caso a aplicarse

Definidos los casos en el punto anterior, se opta por construir una antena PIFA basada en el caso 2, ya que, los parámetros fundamentales para ajustar el diseño del PIFA son la longitud del parche (L y W), la altura de la estructura h , el ancho del punto de cortocircuito w y la distancia desde la alimentación hasta el cortocircuito. Las dimensiones de L , W y H se eligen para lograr una cierta frecuencia de resonancia (García, 2007) como se muestra a continuación:

$$(L_1 + W + H)\sqrt{\epsilon_r} = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Fuente: (García, 2007)

La ecuación (3.6) claramente es la misma ecuación 3.1. Por esta razón se opta por tomar el caso 2 como referencia para el diseño de la antena.

Cabe recalcar que ϵ_r = constante dieléctrica del sustrato entre el parche y el plano del suelo λ = longitud de onda en el espacio libre, pero en el caso 2 se asumía que $\epsilon_r = 1$. Por esta razón se opta por tomar el caso 2 como referencia para el diseño de la antena. (García, 2007)

Se tomarán varias consideraciones para diseñar un PIFA: el ancho de banda del PIFA aumenta con H (como en el caso de la antena de parche convencional), y la dimensión del parche regula la frecuencia de resonancia (parche más grande, menor frecuencia). Asimismo, se han realizado las variaciones de parámetros (posición del punto cortocircuitante, posición de la alimentación, altura de la capa de aire) para ajustar la estructura. (García, 2007) (Hossa & Bialkowski, 2007)

3.1.4 Diseño de la antena PIFA multibanda con ranuras

Para obtener buenas características de radiación, la antena debe ser resonante y su tamaño debe ser comparable con la longitud de onda. Esa es la razón de la introducción de varias técnicas dirigidas a reducir las dimensiones de la estructura. El uso de una antena PIFA permite una reducción de al menos la mitad del tamaño con respecto a una antena básica de microstrip. Esto se logra con éxito por medio de una pared de cortocircuito, y si se reduce su grosor, se puede obtener una disminución de la frecuencia. Algunas ventajas de las antenas PIFA son tamaño compacto, perfil bajo, construcción fácil y un buen comportamiento eléctrico. (Hossa & Bialkowski, 2007)

Los parámetros fundamentales para ajustar el diseño PIFA son la longitud del parche (L y W), la altura de la estructura h , el ancho de la pared de cortocircuito w y la distancia desde la alimentación hasta la pared. Las dimensiones de L , W y h se eligen para lograr una cierta frecuencia de resonancia de la siguiente manera: (Hossa & Bialkowski, 2007)

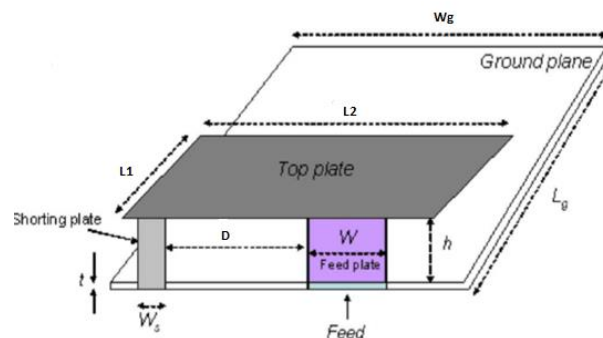


Figura 3.2. Estructura dimensional del PIFA a desarrollarse.

Fuente: (Hassan Tariq Chattha, 2009)

De la figura 3.2 se aclaran los siguientes puntos:

Ground plane: es el plano de tierra de la antena.

Feed plate: placa de alimentación de la antena.

Shorting plate: Punto de cortocircuito.

Top Plate: placa superior de la antena, en este punto se perforará una ranura para permitir la resonancia a dos frecuencias.

Wg: ancho del plano de tierra.

Lg: longitud del plano de tierra.

Ws: ancho del punto de cortocircuito.

W: ancho de la placa de alimentación.

h: altura desde el plano de tierra hasta la placa superior de la antena.

D: distancia de separación entre el punto de cortocircuito y la placa de alimentación.

L1: longitud de la placa superior.

L2: ancho de la placa superior.

t: altura del sustrato.

Una vez aclarados los puntos clave del diseño de la PIFA multibanda, y teniendo en cuenta los apartados 3.1.2 y 3.1.3, se resumen a continuación las ecuaciones de diseño útiles para la fabricación de la antena a corde a la figura 2.2:

$$Si W = L_2 \rightarrow L_1 = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Fuente: (García, 2007)

$$Si W = 0 \rightarrow L_2 + L_1 = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Fuente: (García, 2007)

$$L_1 + L_2 - W = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

Fuente: (García, 2007)

$c = \lambda f$, entonces:

$$f = \frac{c}{\lambda\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\lambda\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Fuente: (García, 2007)

Cabe recalcar que, para el diseño de la PIFA, se requiere el uso de una placa o sustrato FR-4 en fibra de vidrio, que es una clase de sustrato con resina epoxy como tela adhesiva y electrónica de la fibra de vidrio delgado como material del refuerzo. Su adhesivo y el laminado revestido de cobre delgado del núcleo lo convierte en un material ideal para el desarrollo de circuitos impresos, o para este caso en particular, el diseño de una antena.

A continuación, se muestran los datos del sustrato mencionado, en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Características del sustrato útiles para cálculos de diseño.

Sustrato	Permitividad dieléctrica relativa	Tangente del ángulo de pérdidas	Grosor del sustrato	Grosor del conductor de cobre
Placa de FR-4	4.4	0.02	1.5 mm	0.035 mm

Fuente: (Figuroa, 2006)

Con las fórmulas necesarias y los datos del sustrato a utilizarse, se procede a realizar en Excel los cálculos correspondientes obteniéndose los valores que se muestran en la tabla 3.2:

Tabla 3.2. Dimensiones teóricas para el diseño del PIFA.

	a 1.7 GHz		a 2.1 GHz	
		en cm		en cm
c	299792458		3E+08	
f	1700000000		2100000000	
ϵ_r	4,4		4,4	
l1	0,017	17	0,017	17
l4	0,017	17	0,017	17
L1	0,045800175	45.800175	0,04581758	45.817586
L2	0,0210019801	21,00198014	0,02811127	28,1112678
W		2,00396028		1,62225356
h		2,00396028		1,62225356

Fuente: Elaborado en Excel por el autor.

De la tabla 3.2 se aclaran los siguientes puntos:

c: velocidad de la luz.

f: frecuencia.

ϵ_r : permitividad relativa del sustrato.

l1, l4: dimensiones tentativas para el tamaño de las ranuras de la placa superior.

Cabe recalcar que los valores calculados siempre corresponderán a diseños perfectos, donde los elementos utilizados no presentan ningún problema físico y funcionan de manera óptima. Tales afirmaciones en la realidad no se pueden dar y más aún en el diseño de

cualquier antena que es muy sensible y propensa a interferencias, y al ser diseñada de manera artesanal requerirá un proceso de optimización.

También se debe tomar en consideración que no existe fórmula matemática para definir las dimensiones de la ranura, los valores de $I1$ e $I4$, están definidos con aproximaciones proporcionales en función del largo y el ancho de la placa superior, estas aproximaciones se consiguen de la siguiente forma:

Partiendo de que las dimensiones del plato superior (según los cálculos) son para $L1=45.8$ mm y para $L2=21$ mm, se establece (de forma empírica) que, si el corte se lo realiza de manera céntrica, las dos frecuencias de resonancia serán muy parecidas, así que basándose en la lógica básica del PIFA de la figura 1.2, no se realiza un corte céntrico sino respetando cierta distancia de separación desde el centro, como indica la figura 3.3.

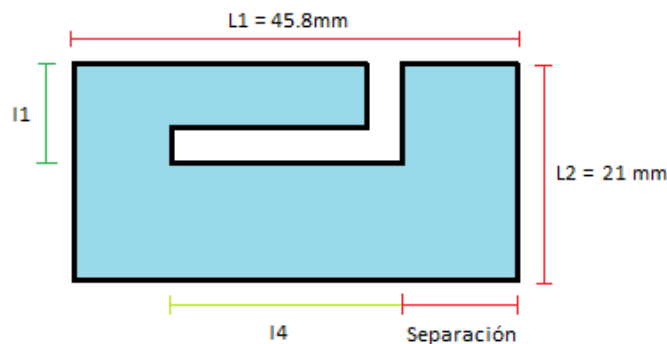


Figura 3.3. Dimensiones del PIFA según los cálculos.

Fuente: Elaborado por el autor.

Respetando esta separación, se asume una relación directamente proporcional:

$$\frac{\text{Frecuencia}}{\text{Distancia}} = \frac{\text{Frecuencia}}{\text{Distancia}}$$

Como los valores propuestos de resonancia son 1.7 GHz y 2.1 GHz nace la siguiente proporción:

$$\frac{2.1 \text{ GHz}}{21 \text{ mm}} = \frac{1.7 \text{ GHz}}{X}$$

Transformando a Hz y metros respectivamente:

$$\frac{2100000000 \text{ Hz}}{0.021 \text{ m}} = \frac{1700000000 \text{ Hz}}{X}$$

$$x = \frac{1700000000 \text{ Hz} * 0.021\text{m}}{2100000000\text{Hz}} = 0.017 \text{ m} = 17 \text{ mm}$$

Por lo tanto, inicialmente y previo a la optimización se asume que la ranura en forma de L, tendrá una longitud de 17 mm (ver figura 3.4), el ancho de la ranura se lo conseguirá netamente en el proceso de optimización.

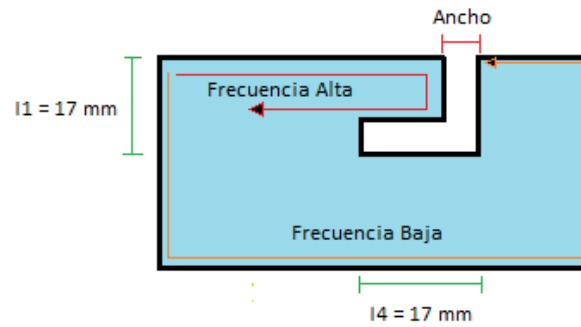


Figura 3.4. Dimensiones tentativas para la ranura.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.2 Análisis de software capaz de simular una PIFA Multibanda con ranuras

Los simuladores de circuitos electrónicos son una herramienta de software que ayuda a diseñar esquemas que posteriormente serán ensamblados, estos a su vez ayudan a entender mejor el mecanismo (en ocasiones suele ser de alta complejidad) y a mejorarlo o volverlo más eficiente si es necesario, también ayudan a detectar fallas que únicamente con los parámetros calculados no se pueden definir (véase figura 3.3).

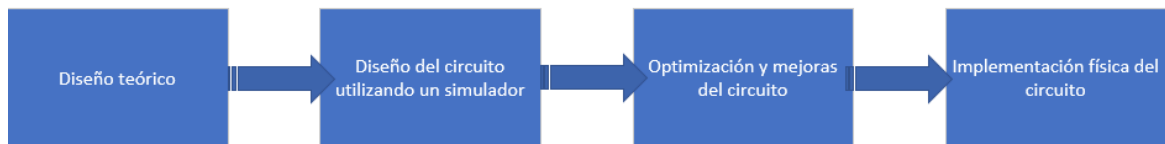


Figura 3.5. Diagrama de bloques del proceso de fabricación.

Fuente: Elaborado por el autor.

Se han evaluado algunos simuladores dentro de los cuales se podría diseñar la antena PIFA, se muestra una breve descripción a continuación:

Qucs: también denominado Quite Universal Circuit Simulator, es una herramienta que permite diseñar circuitos integrados de forma esquemática para comprobar su rendimiento.

Incluye una extensa base de datos de componentes que se pueden insertar en el circuito. Cada uno posee sus propiedades electrónicas correspondientes: resistencias, fuentes de tensión, diodos, transistores, puertas, LEDs, puentes, etcétera.

Qucs permite también calcular las propiedades eléctricas de distintas líneas de transmisión y radiofrecuencia mediante un módulo denominado QucsTranscalc. Introduce los valores de los distintos parámetros a mano para obtener un resultado preciso. (OEM, 2009)

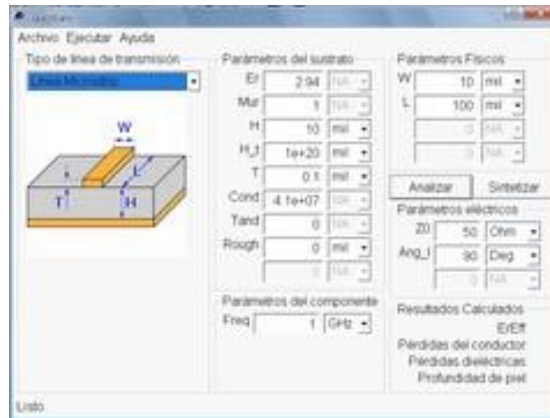


Figura 3.6. Muestra básica de los componentes de Qucs para diseño de antenas.

Fuente: (OEM, 2009)

La primera alternativa de diseño fue dicho software, pero representa un gran problema en el momento de definir las ranuras de la antena PIFA, además, para este tipo de antenas es necesario también aplicar pines de cortocircuito que dentro de Qucs se torna verdaderamente complejo, razón por la cual este software fue descartado para la optimización del dispositivo.

Sonnet: tiene los puertos más avanzados y precisos de cualquier simulador en el mercado. La capacidad matemática única, siempre le da a Sonnet una buena referencia de cálculo y permiten que incluso los puertos internos logren un nivel de ruido muy por debajo de las capacidades de los dispositivos de medición. La precisión matemática de 15 decimales y los estándares de calibración avanzados aseguran que los puertos de Sonnet no interfieran con los resultados de la simulación. (INC., 2019)

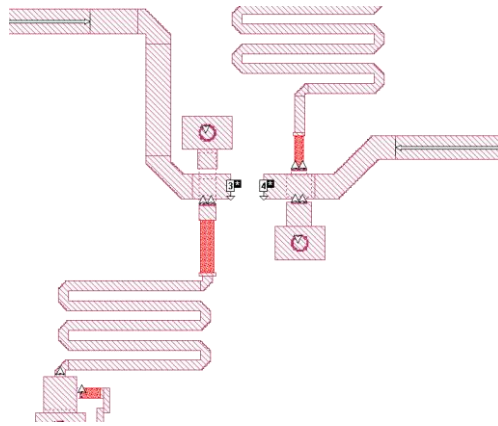


Figura 3.7. Muestra de simulación en Sonnet.

Fuente: (INC., 2019)

Sonnet sin lugar a dudas, es uno de los softwares más eficientes del mercado, tiene recursos que prácticamente permiten el desarrollo de cualquier antena o filtro que se desee. La desventaja al momento de utilizarlo, es la complejidad del manejo cuando se desea simular, ya que dependiendo el tipo de antena que se requiera, el programa otorga solamente una pequeña cantidad de memoria almacenable, y si se requiere más memoria, es necesario solicitar soporte vía e-mail, lo que no lo vuelve el programa más eficiente en cuanto a agilidad.

CST Studio Suite: CST Studio Suite es un paquete de software de análisis 3D EM de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos (EM).

Los simuladores de campos electromagnéticos para aplicaciones en todo el espectro EM están contenidos dentro de una única interfaz de usuario en CST Studio Suite. Los simuladores se pueden acoplar para realizar simulaciones híbridas, brindando a los ingenieros la flexibilidad de analizar sistemas completos formados por múltiples componentes de una manera eficiente y directa. El co-diseño con otros productos SIMULIA permite integrar la simulación EM en el flujo de diseño e impulsa el proceso de desarrollo desde las primeras etapas. (Systemes, 2019)

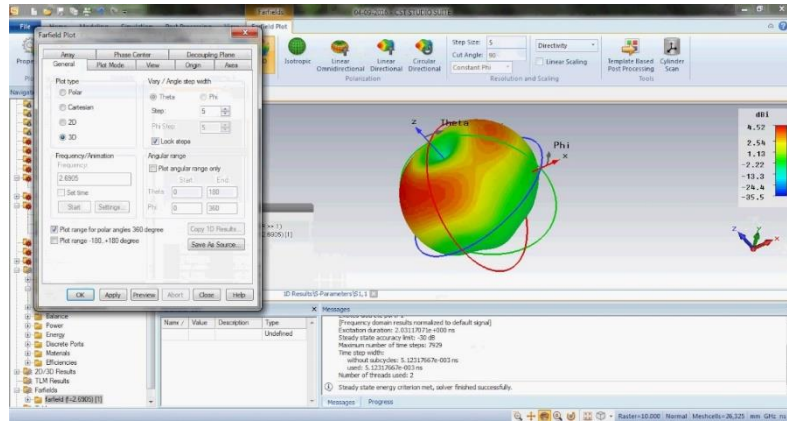


Figura 3.8. Simulación de la radiación de una antena en CST Studio.

Fuente: (Systemes, 2019)

La facilidad del manejo del programa y las herramientas del mismo, facilitaron que en primera instancia sea el programa elegido para el diseño dentro del cual para la implementación de la antena PIFA con valores de resonancia a 1.7 GHz y 2.1 GHz se obtuvieron los siguientes resultados de simulación en base a los valores calculados:

Name	Expression	Value	Description	Type
hco	= 0.035	0.035		Undefined
Gx	= 1	1		Undefined
ts	= 1	1		Undefined
w	= 1.4	1.4		Undefined
wf1	= 1.4	1.4		Undefined
wg	= 1.4	1.4		Undefined
hsu	= 1.6	1.6		Undefined
wf2	= 3	3		Undefined
Gg	= 11	11		Undefined
Gy	= 11	11		Undefined
tl	= 14	14		Undefined
hl	= 16	16		Undefined
al	= 30	30		Undefined
an	= 60	60		Undefined

Figura 3.9. Lista de parámetros en base a los cálculos de diseño.

Fuente: Elaborado por el autor en CST.

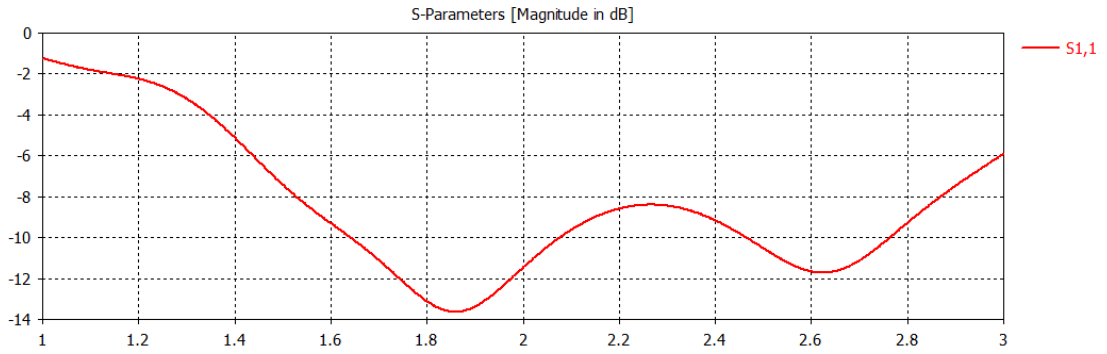


Figura 3.10. Valores de resonancia en 1.82 GHz y 2.6 GHz.

Fuente: Elaborado por el autor en CST.

Los valores mostrados en las figuras 3.7 y 3.8, si bien es cierto se aproximan a los valores propuestos en el presente diseño, no son los más óptimos, por lo tanto, después de optimizar la simulación se obtuvieron los siguientes datos:

Name	Expression	Value	Description	Type
hco	= 0.035	0.035		Undefined
Gx	= 1	1		Undefined
w	= 1.4	1.4		Undefined
wf1	= 1.4	1.4		Undefined
wg	= 1.4	1.4		Undefined
hsu	= 1.6	1.6		Undefined
ts	= 2	2		Undefined
wf2	= 2	2		Undefined
Gg	= 9.1	9.1		Undefined
Gy	= 10	10		Undefined
tl	= 14	14		Undefined
hl	= 15	15		Undefined
al	= 30	30		Undefined
an	= 60	60		Undefined

Figura 3.11. Lista de parámetros en base a los cálculos de diseño después de la optimización del diseño.

Fuente: Elaborado por el autor en CST.

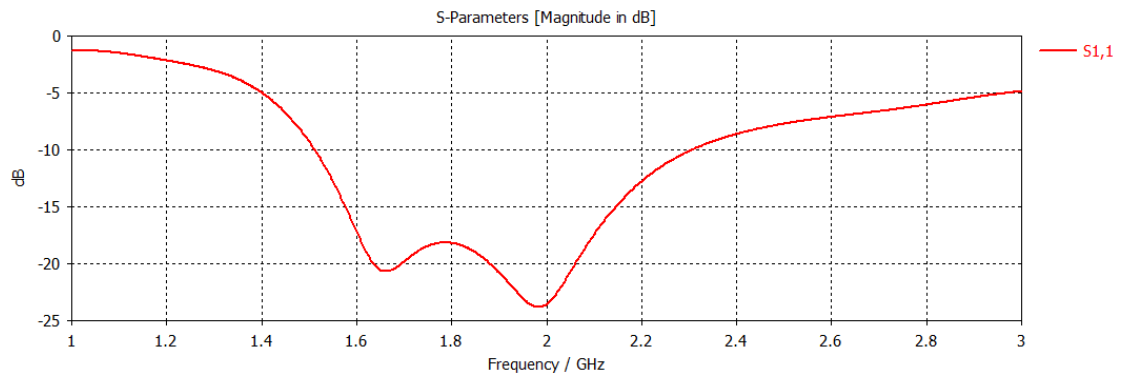


Figura 3.12. Valores de resonancia en 1.7 GHz y 2 GHz.

Fuente: Elaborado por el autor en CTS.

Los valores mostrados en las figuras 3.9 y 3.10 son producto de la optimización de la antena simulada, esto se consigue a prueba y error en los valores establecidos.

No se detalla a cabalidad cómo se consiguió que la antena resuene a estas frecuencias ya que a pesar de que el software presenta una gran herramienta de simulación, en el momento de diseñar físicamente la antena con los datos obtenidos en CST, los valores de resonancia de la antena real (el diseño físico se explica en el siguiente capítulo) no coincidían con los valores obtenidos al momento de simular, por lo tanto, se concluye que la simulación no representa una fuente fiable para una implementación real; por esta razón no se retoman nuevas simulaciones en CST.

ADS: Advanced Design System es el software de automatización de diseño electrónico líder en el mundo para RF, microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad. ADS es pionera en las tecnologías de simulación térmica de circuito integrado 3DEM más innovadoras y potentes utilizadas por empresas líderes en las industrias inalámbricas, de redes de alta velocidad, defensa aeroespacial, automotriz y de energía alternativa. Para 5G, IoT, enlaces de datos de varios gigabits, radar, satélite y diseños de fuente de alimentación de modo conmutado de alta velocidad, Keysight ADS proporciona un entorno integrado de simulación y verificación para diseñar hardware de alto rendimiento compatible con lo último en tecnología inalámbrica, digital y militar de alta velocidad. (Keysight, 2019)

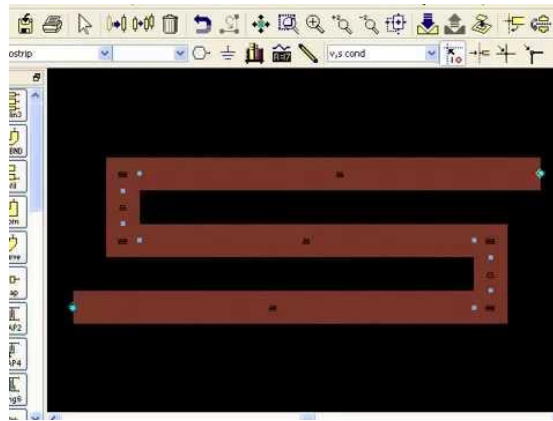


Figura 3.13. Simulación de una antena Planar en ADS.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

El Programa ADS, se convirtió en el más eficiente para una implementación física de forma óptima y apegada a los requerimientos que se han detallado hasta ahora para el diseño del PIFA; por lo tanto, en el siguiente punto (3.3) se detalla cómo se optimizó el dispositivo en ADS.

3.3 Optimización del dispositivo utilizando el software ADS

En este apartado se muestra el proceso del desarrollo y optimización de la antena utilizando el software Advance Design System, la tabla 3.3 muestra una comparativa entre los programas de simulación mencionados en el apartado anterior sustentando que a criterio personal el programa ADS es el más eficiente para el desarrollo del presente proyecto.

Tabla 3.3. Comparativa entre distintos softwares de diseño.

Programa	Interfaz amigable	Disponibilidad de herramientas y recursos	Rendimiento	Capacidad de visualización 3D
Qucs	Si	Medio	Medio	Medio
Sonnet	No	Avanzado	Bajo	Avanzado
CST	Si	Avanzado	Avanzado	Avanzado
ADS	Si	Avanzado	Avanzado	Avanzado

Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.1 Diseño de la antena en ADS

A continuación, se muestra a detalle el proceso de construcción y simulación de la antena: Como primer paso, se debe definir un nuevo proyecto, para lo cual se dispone de dos opciones de trabajo, la primera es un diseño esquemático (New Schematic Window), y la segunda es un diseño de líneas (New Layout Window), se trabajará con el diseño de líneas, ya que los cortes de diseño que tiene el PIFA difícilmente se van a lograr únicamente con un diagrama esquemático (ver figuras 3.12 y 3.13).

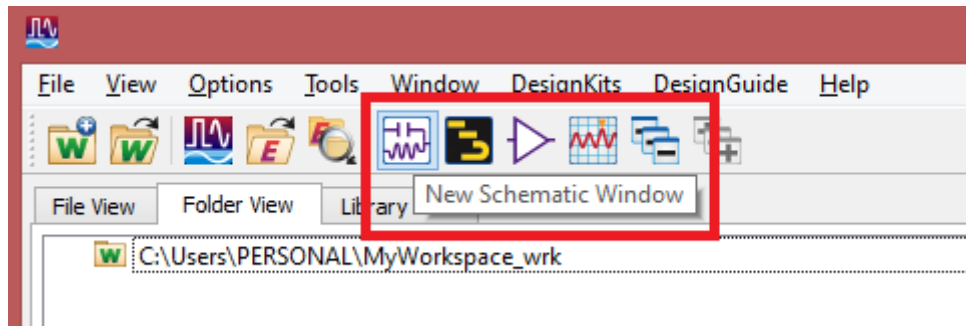


Figura 3.14. Selección de diagrama esquemático.

Fuente: Pantalla principal de ADS.

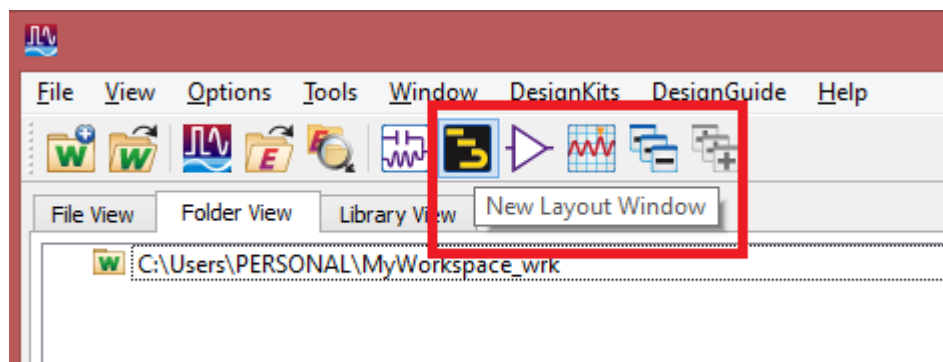


Figura 3.15. Selección de diagrama de líneas.

Fuente: Pantalla principal de ADS.

Una vez seleccionado el esquema de líneas aparecerá la pantalla mostrada en la figura 3.14

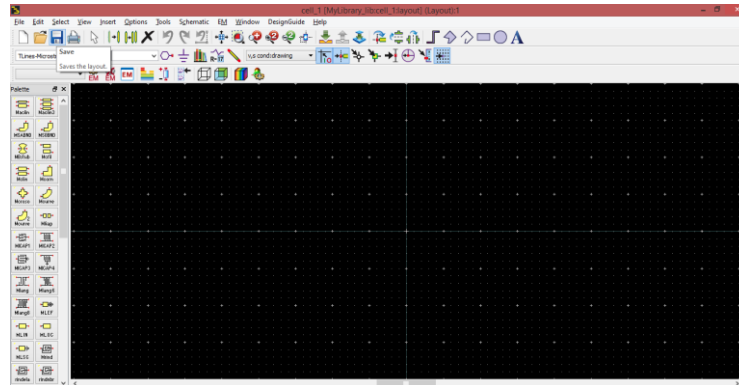


Figura 3.16. Plano de trabajo en diagrama de líneas.

Fuente: Pantalla principal de ADS.

El siguiente punto es crear una base o una idea general de la antena que se va a desarrollar, el sustrato que se va a utilizar, y sus parámetros correspondientes; para lo cual se debe dirigir a EM, Substrate y se crean las capas correspondientes a la antena (ver figuras 3.15 y 3.16).

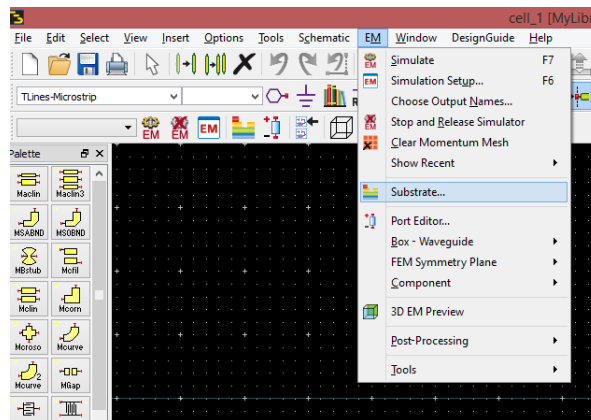


Figura 3.17. Selección de las características del sustrato para la antena.

Fuente: Captura de pantalla de ADS.

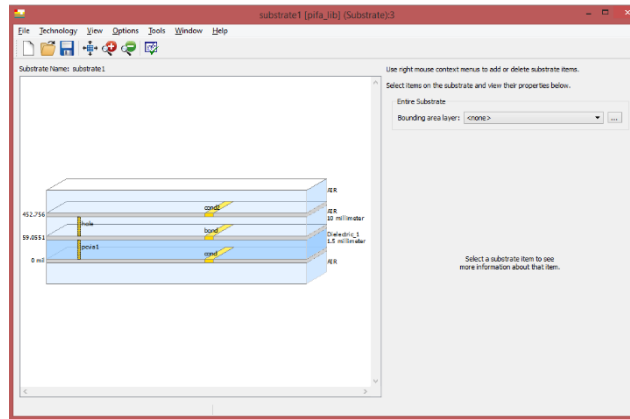


Figura 3.18. Selección de las características del sustrato para la antena.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

Una vez que se ha creado las capas correspondientes a la antena (véase figura 3.2 para una mejor referencia), se retorna al plano de trabajo en el diagrama de líneas, donde, una por una se selecciona y dibuja con el cursor especificando las dimensiones de los valores calculados (ver figura 3.17).

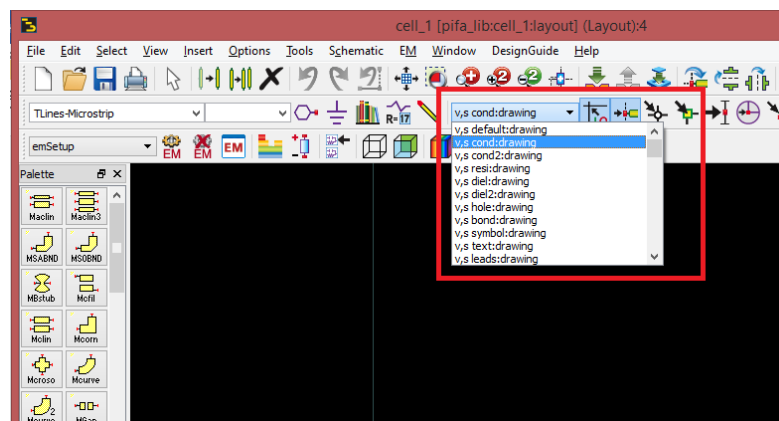


Figura 3.19. Selección de las capas diseñadas para la PIFA.

Fuente: Captura de pantalla de ADS.

Después de seleccionar una a una las capas y de graficarlas con el cursor se obtiene algo similar a la figura 3.18:

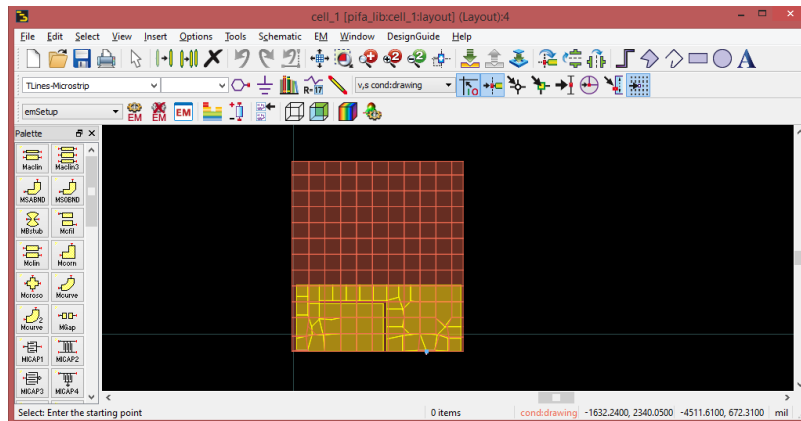


Figura 3.20. Diseño de la PIFA Multibanda.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

Como se detalla en el punto 3.1.4 no se pueden definir cálculos exactos para las dimensiones de la ranura del PIFA, de la misma forma, el ancho de dicha ranura no se puede obtener de forma matemática, es aquí donde se optimiza el dispositivo utilizando el software ADS ya que por tanteo (a prueba y error), se consigue la resonancia a los valores requeridos (1.7 GHz y 2.1 GHz) y por ende los valores reales de la ranura superior; así también se optimizan las dimensiones del punto de cortocircuito, plato superior y sustrato, generando valores reales para su construcción física.

Una vez que se han creado todos los detalles, también es posible visualizar la antena de forma 3D utilizando la herramienta 3D View como se muestran en las figuras 3.19 y 3.20:

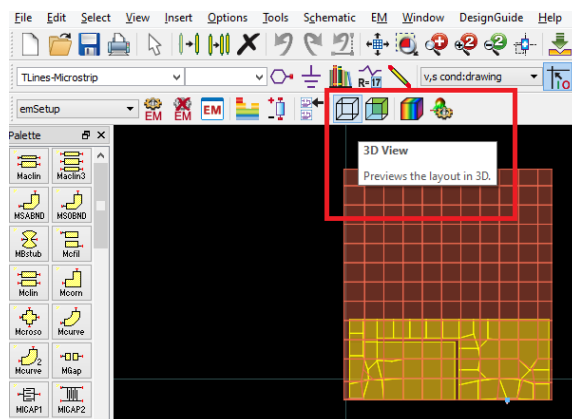


Figura 3.21. Herramienta para visualización de la antena en 3D.

Fuente: Captura de pantalla de ADS.

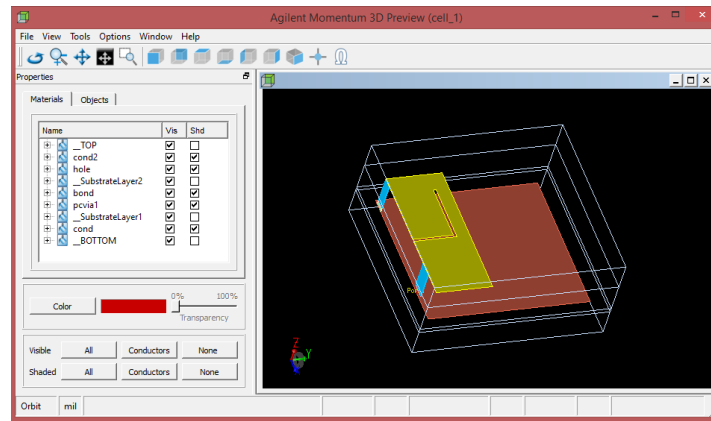


Figura 3.22. Visualización de la antena en 3 dimensiones.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

Cuando se han observado todos los detalles de la construcción del PIFA, se procede a verificar que los valores de resonancia de la misma sean lo más aproximado posible a 1.7 GHz y 2.1 GHz (valores propuestos para el presente proyecto); también a la observación de los parámetros S, y el patrón de radiación de la misma, estos detalles se explican en el apartado 3.3.2.

3.3.2 Definición de parámetros y simulación

Parámetros S

Los parámetros de dispersión (scattering en terminología inglesa), son los coeficientes de reflexión y transmisión entre la onda incidente y reflejada. Estos parámetros muestran el detalle del comportamiento del dispositivo bajo condiciones lineales en un determinado rango de frecuencia (1.7 GHz y 2.1 GHz para el presente estudio). Los parámetros S son aplicables a cualquier frecuencia, sin embargo, son utilizados principalmente para redes que operan en radiofrecuencia (RF) y frecuencia de microonda. En términos generales se puede decir que los parámetros S cambian con la frecuencia a la que se miden, razón por la cual se debe especificar la frecuencia para cualquier medición de dicho parámetro.

En el contexto de los parámetros S, dispersión se refiere a la forma en que las corrientes y tensiones que se desplazan por una línea de transmisión son afectadas cuando se encuentran

con una discontinuidad debido a la introducción de una red en una línea de transmisión. Esto equivale a la onda encontrándose con una impedancia diferente de la impedancia característica de la línea. (Colombo, 2012)

La descripción de los parámetros es la siguiente:

S_{11} : Coeficiente de reflexión a la entrada o coeficiente de reflexión directa.

S_{21} : Coeficiente de transmisión directa o ganancia con la tensión directa.

S_{22} : Coeficiente de reflexión a la salida o coeficiente de reflexión inversa.

S_{12} : Coeficiente de transmisión de ganancia con la tensión inversa.

La figura 3.21 muestra de forma gráfica la función de los parámetros S:

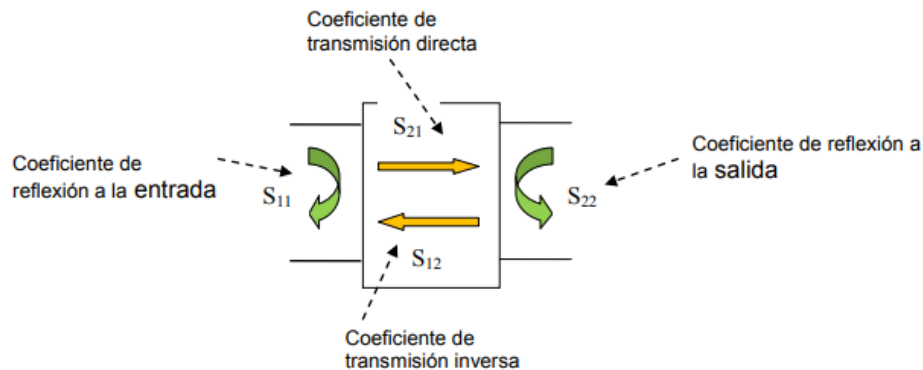


Figura 3.23. Explicación de los parámetros S.

Fuente: (Colombo, 2012)

El parámetro más destacable en el presente proyecto, es el parámetro S_{11} , debido a que es el que muestra los valores de resonancia a los que está trabajando la antena; y los valores de resonancia son la clave para poder desarrollar cualquier diseño, además el equipo VNA con el que actualmente cuenta la Universidad Israel (se explica más a detalle en el capítulo 4), permite la visualización de dicho parámetro para futuras prácticas o desarrollos de proyectos similares.

Simulación en ADS:

Una vez explicados los parámetros anteriormente expuestos, se procede a simular la antena diseñada en el punto 3.3.1 en ADS, para lo cual se debe definir el pin de conexión de la antena utilizando la herramienta Insert Pin como se muestra en la figura 3.22.

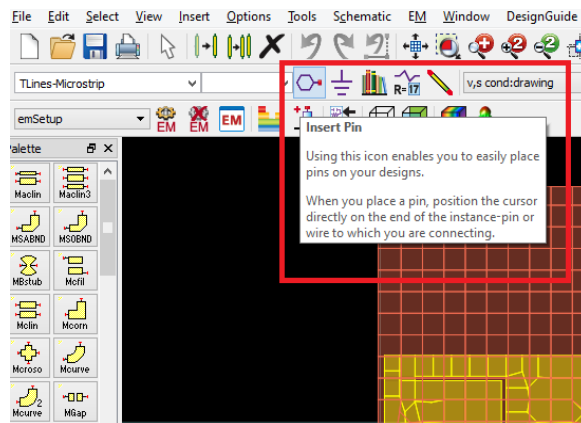


Figura 3.24. Herramienta Insert Pin permite colocar un conector en la placa.

Fuente: Captura de pantalla de ADS.

Una vez insertado el pin conector, el siguiente paso es dar click en la herramienta de simulación de la antena (EM Simulation Setup), que se muestra en la figura 3.23.

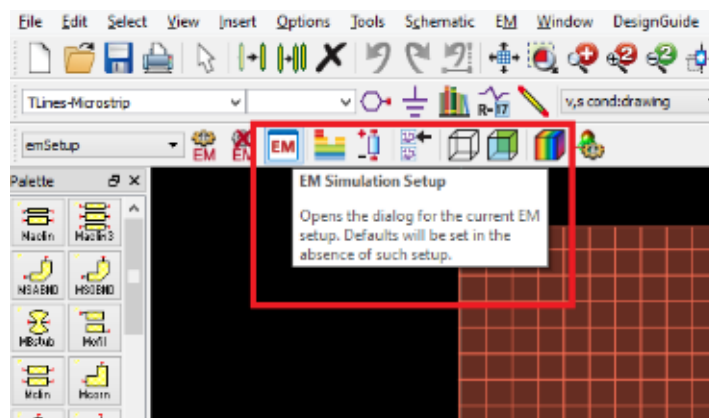


Figura 3.25. Herramienta de simulación en ADS.

Fuente: Captura de pantalla de ADS.

Se selecciona el tipo de resultado que se desea generar (Parámetros S) como se muestra en la figura 3.24.

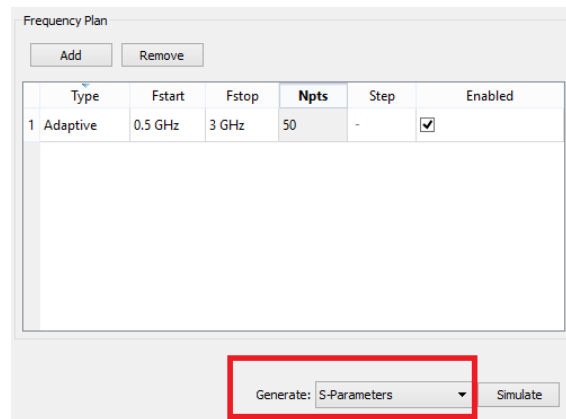


Figura 3.26. Selección de el parámetro a generar en la simulación.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

Una vez realizado este paso se procede a generar la simulación, se esperan unos segundos y se obtienen los resultados que se muestran en la figura 3.25

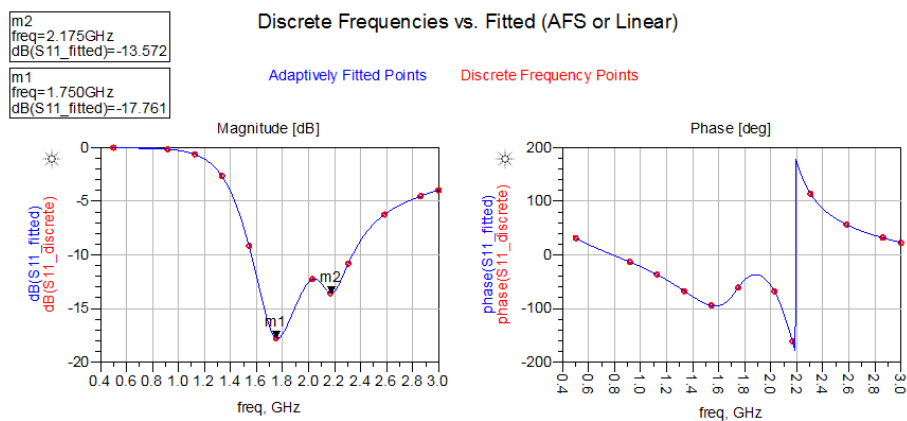


Figura 3.27. Obtención de los parámetros S_{11} en ADS.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

La figura 3.25 muestra la finalización de la propuesta de diseño ya que se obtienen los resultados del coeficiente de reflexión directa (S_{11}); las marcas en la figura de magnitud (figura izquierda), muestran que el primer valor de resonancia (m1) es de 1.750 GHz y el segundo valor de resonancia (m2) es de 2.175 MHz, por lo que la simulación cumple a

cabalidad los valores de resonancia propuestos en el presente proyecto que son 1.7GHz y 2.1 GHz.

Otra ventaja de utilizar el simulador ADS, es poder visualizar otras condiciones que con el equipo VNA que se dispone (capítulo 4), no son posibles.

Estas figuras que se muestran a continuación presentan el patrón de radiación de la antena, y los parámetros a una frecuencia de 1.7 GHz y 2.1 GHz:

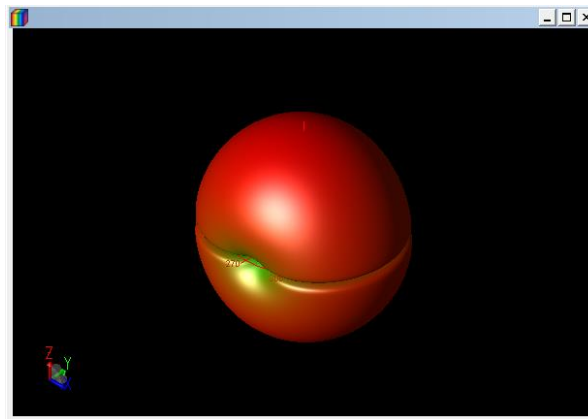


Figura 3.28. Patrón de radiación de la PIFA Multibanda.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

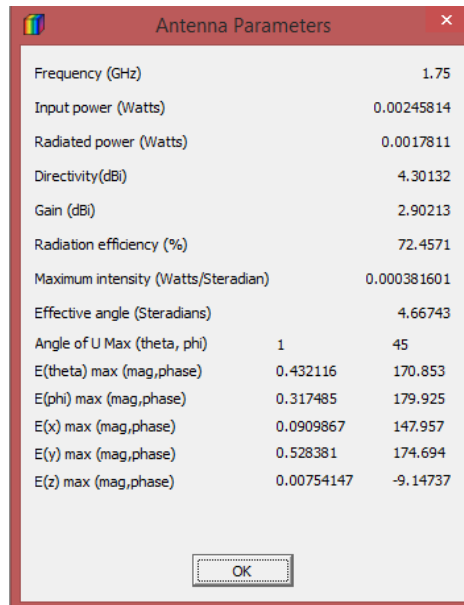
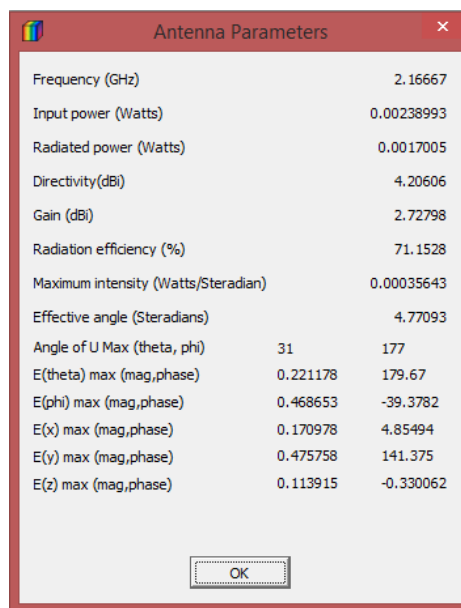


Figura 3.29. Parámetros de la PIFA Multibanda a una frecuencia de 1.7 GHz.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.



Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.16667
Input power (Watts)	0.00238993
Radiated power (Watts)	0.0017005
Directivity(dBi)	4.20606
Gain (dBi)	2.72798
Radiation efficiency (%)	71.1528
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00035643
Effective angle (Steradians)	4.77093
Angle of U Max (theta, phi)	31 177
E(theta) max (mag,phase)	0.221178 179.67
E(phi) max (mag,phase)	0.468653 -39.3782
E(x) max (mag,phase)	0.170978 4.85494
E(y) max (mag,phase)	0.475758 141.375
E(z) max (mag,phase)	0.113915 -0.330062

OK

Figura 3.30. Parámetros de la PIFA Multibanda a una frecuencia de 2.1 GHz.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.



3.4 Presupuesto requerido para el desarrollo de la antena PIFA Multibanda con ranuras

Para la implementación del laboratorio de radio frecuencia y microonda y para el desarrollo de la antena PIFA Multibanda con ranuras se requieren pocos elementos que se enlistan a continuación:

- Equipo VNA (adquirido de forma grupal)
- Placa de fibra de vidrio con conductor de cobre
- Conector SMA hembra
- Cinta adhesiva de cobre

Las tablas presentadas a comparación muestran la comparativa de precios para cada elemento mencionado:


Tabla 3.4. Comparativa de precios para el equipo VNA.

Elemento	Precio en Ecuador	Precio en la página del fabricante	Imagen
Equipo VNA	≈ \$5000	\$3202.63	
Kit de calibración	≈ \$1000	\$547.58	

Fuente: Elaborado por el autor.

Se optó por comprar el equipo y su respectivo kit de calibración directamente en la página del fabricante por la diferencia de costos.


Tabla 3.5. Comparativa de precios para la placa de fibra de vidrio.

Elemento	Precio ElectroStore	Precio otros vendedores	Imagen
Placa de fibra de vidrio con conductor de cobre	\$8.00	\$12.00	

Fuente: Elaborado por el autor

Para el caso de la compra de la placa de fibra de vidrio con conductor de cobre, se elige comprar en la tienda ElectroStore debido a que otros vendedores ofertaban la misma placa con la misma calidad y características en precios superiores.


Tabla 3.6. Comparativa de precios del conector SMA hembra para placa.

Elemento	Precio Tecmikro	Precio otros vendedores	Imagen
Conector SMA hembra	\$2.50	\$2.50	

Fuente: Elaborado por el autor.

El conector SMA hembra se adquiere en la tienda Tecmikro, cabe aclarar que el costo de otros vendedores era el mismo.

Tabla 3.7. Comparativa de precios de la cinta adhesiva de cobre

Elemento	Precio Aliexpress (Envío incluido)	Imagen
Cinta adhesiva de cobre 50mm * 50m	\$25.00	

Fuente: Elaborado por el autor.

Para el caso de la cinta adhesiva de cobre de 50mm * 50m se opta por comprar en Aliexpress debido a que en Ecuador no se consigue con ancho de 50mm.

La tabla 3.8 muestra el presupuesto para el proyecto, se incluye todo tipo de recursos aplicados para el mismo:

Tabla 3.8. Presupuesto final del proyecto.

Descripción de materiales	Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
Equipo VNA	1	\$300	\$3202.63
Kit de calibración	1	\$547.58	\$547.58
Placa de fibra de vidrio con conductor de cobre	2	\$8.00	\$16.00

Conector SMA hembra	2	\$2.50	\$5.00
Cinta adhesiva de cobre 50mm * 50m	1	\$25.00	\$25.00
Cautín de tipo lapiz Proskits	1	\$11.00	\$11.00
Rollo de estaño	1	\$6.00	\$6.00
Pasta para soldar	1	\$3.70	\$3.70
Set de estilete tipo bisturí de precisión	1	\$28.00	\$28.00
Rotulador indeleble	1	\$1.80	\$1.80
Sierra para fibra de vidrio	1	\$3.20	\$3.20
Movilización	-	\$35.00	\$35.00
Impresiones de borradores y tesis	4	\$11.00	\$44.00
Encuadernación tesis	1	\$25.00	\$25.00
Varios e Imprevistos (5% del total)	1	\$197.53	\$197.53
Total		\$1245.61	
Tiempos de desarrollo del proyecto			
Tiempo de investigación en internet	30 horas		
Tiempo de asesorías y tutorías	20 horas		
Tiempo de desarrollo teórico del proyecto	35 horas		
Tiempo de desarrollo práctico del proyecto	8 horas		
Tiempo de redacción del escrito	18 horas		
Total	111 horas		

Fuente: Elaborado por el autor.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN

Para desarrollar el prototipo artesanal de la antena PIFA Multibanda con ranuras, se tomaron en cuenta todos los datos recopilados anteriormente (Capítulo 3), se debe tomar en consideración que este tipo de proyectos pueden ser mejorados o rediseñados si es que se necesitan otros requerimientos de funcionamiento o aplicarse para desarrollar otras actividades (prácticas de laboratorio, experimentos de funcionamiento, etc.).

4.1 Desarrollo

4.1.1 Construcción del hardware

Para la construcción de la antena PIFA multibanda con ranuras, se extraen los datos de las dimensiones de la simulación en ADS (capítulo 3), primero las dimensiones de la placa de tierra (Sustrato FR-4) como muestra la figura 4.1.

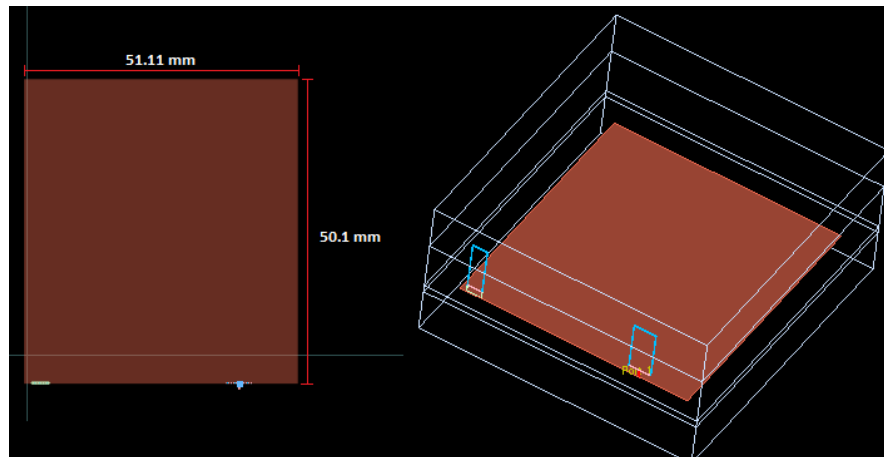


Figura 4.1. Izquierda: Dimensiones de la placa de tierra.

Derecha: Placa vista desde perspectiva 3D

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

Lo siguiente es tomar las dimensiones del punto de corto circuito y plano de alimentación de la antena como se muestra en la figura 4.2:

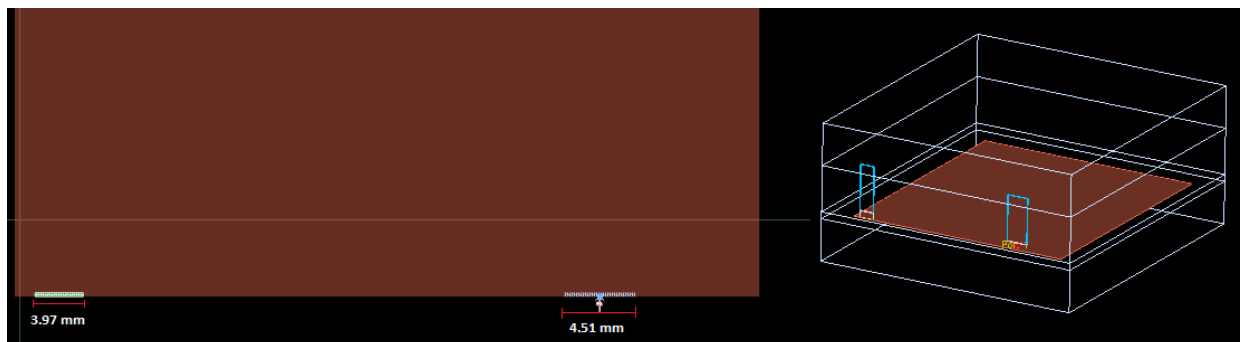


Figura 4.2. Izquierda: Dimensiones del punto de cortocircuito y plano de alimentación.

Derecha: Vista desde perspectiva 3D.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

Las dimensiones de la placa superior y de la ranura se muestran en la figura 4.3:

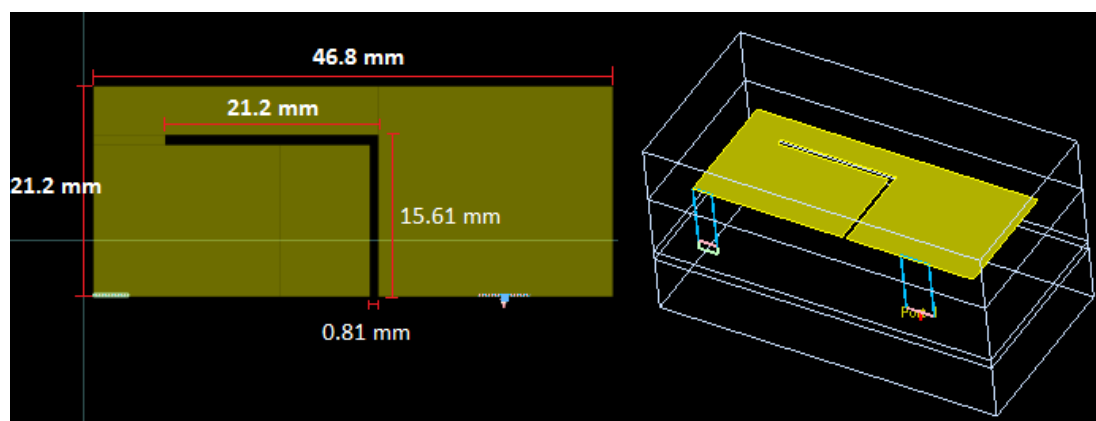


Figura 4.3. Izquierda: Dimensiones de la placa superior y ranura de la antenna.

Derecha: Placa superior vista desde perspectiva 3D.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

La altura entre el plano de tierra y la placa superior de la antenna se muestra en la figura 4.4:

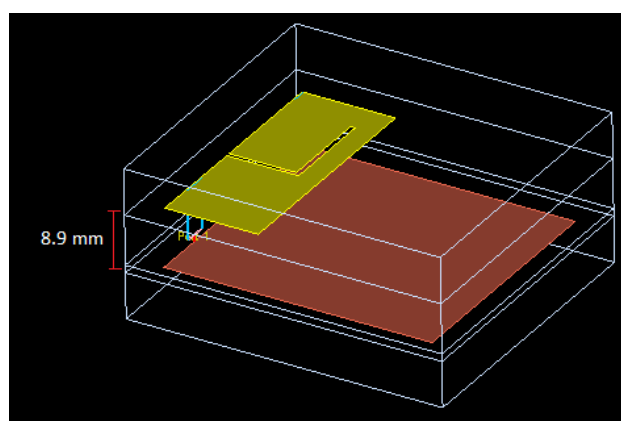


Figura 4.4. Distancia entre placa superior y plano de tierra.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

Una vez obtenidas las dimensiones reales de la antenna, se procede a realizar una tabla para resumir las medidas en base a la misma terminología propuesta para el presente proyecto y mostrada en la figura 3.2 (apartado 3.1.4).

Tabla 4.1. Dimensiones para el diseño de la PIFA Multibanda con ranuras.

Terminología	Significado	Distancia en mm
Wg	Ancho del plano de tierra	51.11
Lg	Longitud del plano de tierra	50.10
Ws	Ancho del plano de cortocircuito	3.97
W	Ancho de la placa de alimentación	4.51
H	Distancia entre el plano de tierra y placa superior	8.9
L1	Logitud de la placa superior	46.8
L2	Ancho de la placa superior	21.2
T	Altura del sustrato	1.5
I1, I4	Dimensiones de la ranura del plato superior	21.2 * 15.61 * 0.81

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.2 Preparación de la placa

Con las dimensiones obtenidas en el punto anterior, se procede a realizar el dibujo sobre la placa, cabe aclarar que, como es un diseño artesanal y el corte se lo realizará de forma manual, se trabajará únicamente con un decimal de las medidas de la tabla 4.1, utilizando un calibre de vernier que, mediante sus mordazas para medidas exteriores, utilizado tal cual fuese una regla convencional, permite trabajar con gran exactitud. El margen de error con el que se trabaja es de 0.5 mm ya que es el ancho de la sierra de fibra de carbono (funciona exactamente igual que una sierra de fibra de vidrio) y también es el ancho de la punta del rotulador permanente; esto podría alterar la dimensión decimal de la placa de tierra.

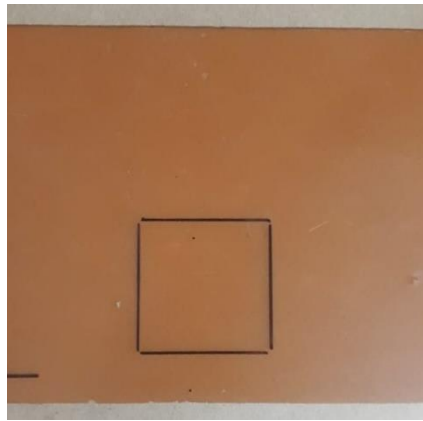


Figura 4.5. Dibujo del plano de tierra en el sustrato.

Fuente: Elaborado por el autor.

El siguiente paso es dibujar las dimensiones de la placa superior, para esto se grafica el boceto en la parte blanca de la cinta adhesiva de cobre con un lápiz portaminas con punta 0.5 mm, un calibre de vernier, una escuadra a 90° y se realiza el recorte; para los bordes se utiliza una tijera ordinaria, para las ranuras, el punto de cortocircuito y el punto de alimentación se utiliza un estilete de tipo bisturí (nuevo) con 0.2 mm de ancho de cuchilla, esto con el objetivo de disminuir al máximo el margen de error al momento de corte.

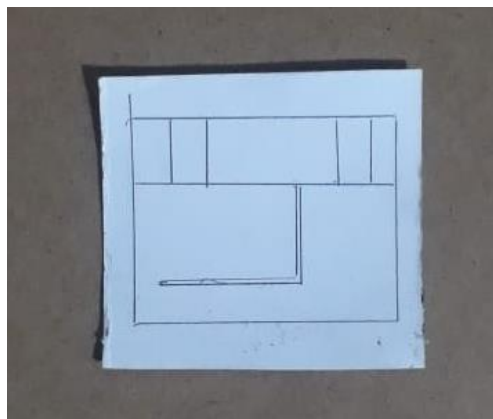


Figura 4.6. Dibujo de la placa superior en la parte inferior de la cinta de cobre.

Fuente: Elaborado por el autor.

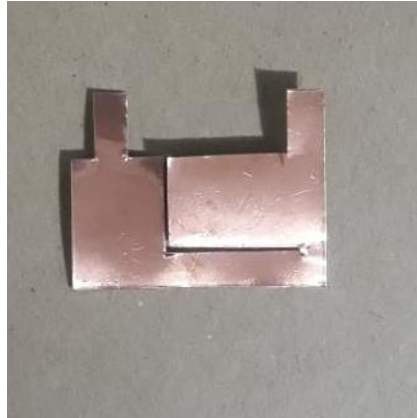


Figura 4.7. Cinta de cobre cortada para diseño de la placa superior.

Fuente: Elaborado por el autor.

Finalmente se sueldan los elementos y se obtiene el resultado final mostrado en la figura 4.8.



Figura 4.8. Diseño final artesanal de la antena PIFA Multibanda con ranuras.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2 Pruebas de funcionamiento

4.2.1 Equipo Analizador de red vectorial

Para realizar las pruebas de funcionamiento se utilizó un equipo VNA (Vector Network Analyzer) del fabricante MegiQ RF Development Tools, modelo VNA-0440.

La serie MegiQ VNA0440 / VNA0460 es un analizador de red vectorial controlado por USB que puede realizar mediciones bidireccionales completas de 2 puertos. Posee un generador interno de polarización programable. (Tomado del manual de usuario del equipo)

Características del equipo:

- El VNA04x0 es ideal para medir todo tipo de micro-circuitos como antenas, atenuadores, amplificadores, etc. Su rango de frecuencia incluye bandas de telecomunicaciones más populares como GSM-GPRS-LTE, Wi-Fi, DECT, GPS, ISM, ZigBee, Bluetooth.
- Doble canal, 2 puertos Vector Network Analyzer.
- Rango de frecuencia de 400 MHz a 4 GHz.
- calibración de paso total para las mediciones directas.
- Soporte completo para los kits de calibración.
- Configuración sencilla con funciones preestablecidas.
- barridos paramétricos complejos
- calculadora de circuitos partido incorporada.
- Diseño compacto y ligero.



Figura 4.9. Equipo VNA de dos puertos

Fuente: Tomado del manual de usuario del equipo.

Descripción general de las mediciones del VNA

El VNA mide impedancias y ganancias a altas frecuencias. Puesto que mide tanto la magnitud como la fase. Una medida consiste típicamente en un barrido en un rango de frecuencias y los resultados son generalmente las curvas de respuesta de frecuencia (Parámetro S_{11} , el parámetro de vital importancia para comprobación de la funcionalidad del presente proyecto).

Medición de un puerto

Las mediciones se pueden realizar en los dispositivos de un solo puerto, tales como antenas y circuitos. Para ello, el VNA transmitirá una señal en un puerto hacia el dispositivo bajo prueba, y al mismo tiempo recibe la señal de vuelta de ese puerto. De esta forma el VNA puede calcular la impedancia conectada al puerto.

Esta medición es aplicable al presente proyecto debido a que la antena PIFA Multibanda con ranuras diseñada, está hecha únicamente con un puerto y por lo tanto el parámetro que se puede observar es el S_{11} .

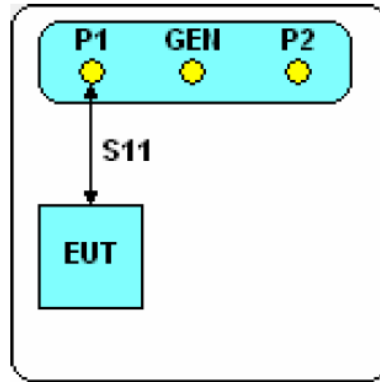


Figura 4.10. Lógica del funcionamiento del VNA en equipos de un puerto.

Fuente: Tomado del manual de usuario del equipo.

4.2.2 Prueba de funcionamiento de la antena

Después de conectar la antena al dispositivo VNA se obtiene la siguiente gráfica:

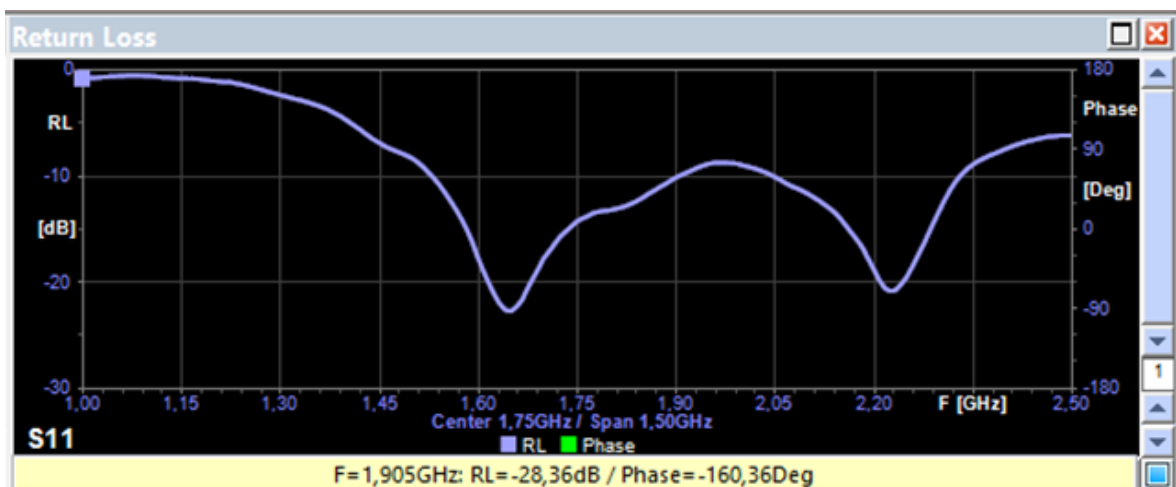


Figura 4.11. Parámetros S_{11} reales de la antena.

Fuente: Extraído de la prueba con el dispositivo VNA.

La gráfica de magnitud mostrada en la figura 4.11, indica los valores de resonancia de la antena, estos valores son 1.7 GHz y 2.2 GHz, como los valores propuestos para el presente proyecto son 1.7 GHz y 2.1 GHz, se puede decir, por lo tanto, que la antena está funcional.

4.3 Análisis de resultados

La interpretación de la figura 4.11 (gráfica de magnitud), dice que los parámetros de retorno o parámetros S_{11} corresponden a la onda de voltaje que regresa, si esta se aproxima a 0 dB significa que toda la onda de voltaje está de retorno por lo tanto la antena no está irradiando, si la magnitud nos indica un valor menor a -15 dB, se puede decir que funciona de manera adecuada, y si este valor es menor que -30 dB, entonces la antena funciona de manera óptima, en la gráfica citada se puede observar que el valor de magnitud para la frecuencia más baja (1.7 GHz) está en -23 dB, y el valor de magnitud para la frecuencia más alta (2.2 GHz) está en -21 dB, de esta forma se define entonces que la antena está operando en óptimas condiciones.

Si se comparan las gráficas de la simulación con la obtenida de la antena real, se nota que las frecuencias de resonancia son muy parecidas (Ver figuras 4.12 y 4.13).

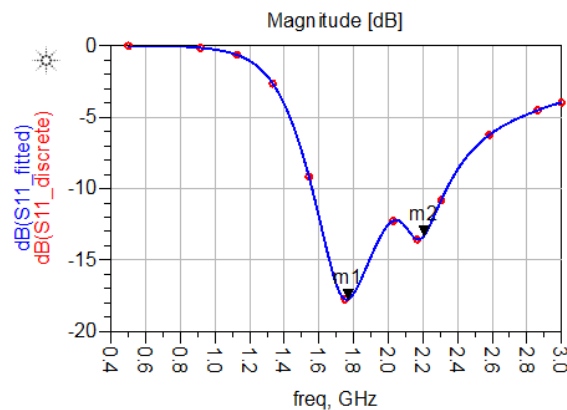


Figura 4.12. Gráfica de magnitud parámetros S_{11} , valores de resonancia de la simulación.

Fuente: Elaborado por el autor en ADS.

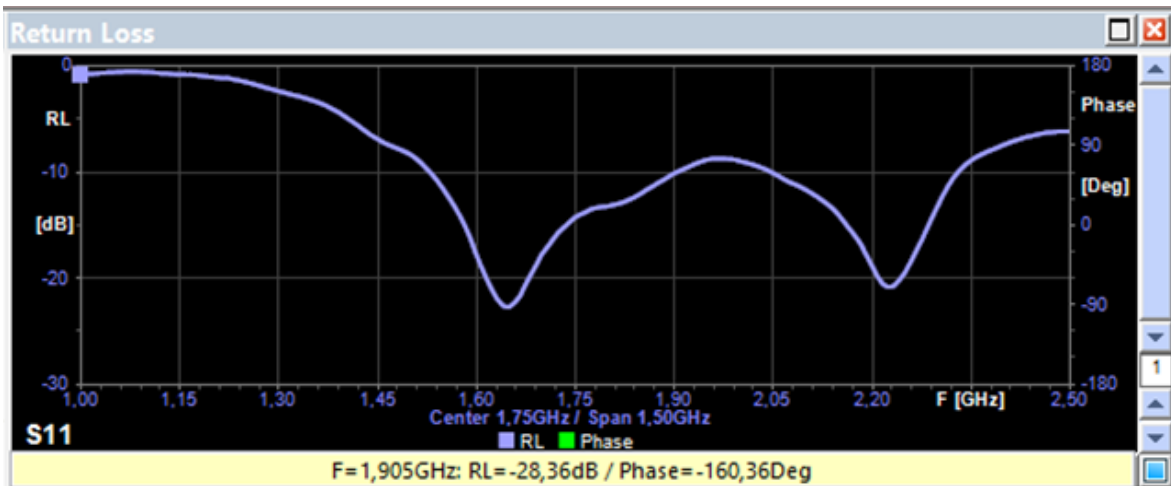


Figura 4.13. Gráfica de magnitud Parámetros S_{11} reales de la antena.

Fuente: Extraído de la prueba con el dispositivo VNA.

En cuanto a las gráficas de impedancia, la figura 4.14 muestra la comparativa de la gráfica obtenida en la simulación y la gráfica de la antena implementada.

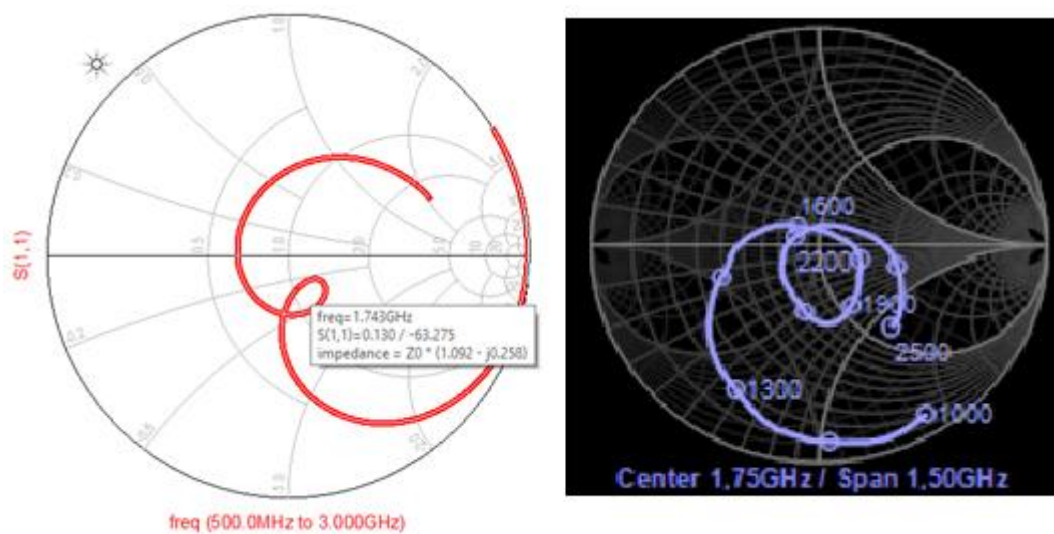


Figura 4.14. Gráficas de impedancia.

Izquierda: Simulación.

Derecha: Medición en VNA.

Fuente: Elaborado por el autor.

La impedancia medida se puede representar en diferentes tipos de gráficos, pero todos ellos se derivan del parámetro S_{11} medido en el PIFA. El gráfico de la impedancia es una representación lineal de la magnitud de la impedancia medida y su fase.

La carta de Smith se utiliza a menudo para mostrar impedancias en un plano complejo y que está muy bien adaptado, se puede observar gráficamente si coinciden los valores de resonancia con el centro de la carta (cuanto más cerca del centro, mejor se adapta la antena). La carta de Smith también puede mostrar admitancias complejas y de adaptación.

En el caso de la gráfica 4.14 (derecha), se observa que los valores de resonancia propuestos no cruzan por el centro de la carta de Smith, pero pasan lo suficientemente cerca como para considerar que la antena es funcional.

La tabla 4.2 muestra una comparativa entre los valores propuestos, simulados y reales de la antena PIFA Multibanda con ranuras.

Tabla 4.2. Comparativa de valores propuestos, simulados y reales.

Tipo de medición	Frecuencia inferior [GHz]	Frecuencia superior [GHz]	Magnitud [dB], frecuencia inferior	Magnitud [dB], frecuencia superior	% de error frecuencia inferior	% de error frecuencia superior
Propuesta	1.7	2.1	≤ -30	≤ -30	-----	-----
Simulada	1.750	2.175	≈ -19	≈ -14	imperceptible	imperceptible
Real	1.708	2.208	< -30	≈ -30	imperceptible	4.76%

Fuente: Elaborado por el autor.

El porcentaje de error se calcula tomando como referencia de un 100% (funcionamiento perfecto) los valores propuestos, en base a eso y comprándola con los valores simulados y reales en una relación directamente proporcional se obtiene el error, en la mayoría de casos es imperceptible porque prácticamente coinciden con los valores propuesto, para el caso de la frecuencia superior el error representa un 4.76% que es relativamente bajo como para afectar de forma significativo el funcionamiento de la antena, esto se justifica debido a que la antena, sobre todo la ranura del plato superior fue cortado de manera artesanal.

Cabe recalcar que los valores de magnitud de la antena real, óptimos en comparación a los de la antena simulada.

CONCLUSIONES

- Para describir el funcionamiento del PIFA Multibanda con ranuras se toma gran cantidad de información científica existente en internet, esto hace que la búsqueda de información se realice utilizando diversas herramientas disponibles en la misma red, dentro de estas se deben diferenciar: los artículos útiles, aplicación de la antena y funcionalidad de la misma. Se deben descartar los documentos que no tienen el sustento de información suficiente como para representar bases de estudio o implementación.
- Para el diseño teórico de la antena PIFA Multibanda no existe una base establecida o un modelo que se pueda seguir, ya que este tipo de diseños varía en todos los aspectos dimensionales debido a la aplicación para la cual se desea diseñar.
- Este tipo de antenas están presentes en muchos dispositivos móviles (celulares) y el simple hecho de tener una carcasa distinta entre dispositivos puede variar el diseño general del PIFA; por esta razón en cuanto a los cálculos, se puede tener una leve aproximación de las dimensiones, pero no una certeza de que solamente a base de estos se puede conseguir la funcionalidad del PIFA.
- El diseño en simulador es parte fundamental, a criterio personal, no se podría diseñar un PIFA Multibanda sin simulación previa, es aquí donde se aplica un método heurístico (prueba y error) que permite optimizar el dispositivo.
- Para el presente caso existe una gran variación entre los parámetros calculados en comparación a los simulados, citando un ejemplo, una de las variaciones más grandes, es el valor calculado de W (ancho de la placa de alimentación) es de 20 mm en comparación al simulado que es de 4.51 mm, esta diferencia de 15.49 mm impide notablemente que la antena resuene a las frecuencias propuestas.

- Cualquier cambio mínimo a las dimensiones en el proceso de simulación representa grandes variaciones en la lectura de los parámetros, por ejemplo, si el plano de tierra se acorta se puede empezar a eliminar el segundo punto de resonancia (frecuencia superior), si el ancho de la ranura se agranda, los valores de resonancia resuenan a frecuencias más altas; por esta razón se muestran algunos simuladores y se elige para trabajar al software Advance Design System (ADS), ya que es el más eficiente en cuanto a lectura de resultados, con pequeñas o grandes variaciones en la simulación.
- Se define que, al ser un diseño netamente artesanal, los cortes manuales que se aplican tanto en el sustrato como en la cinta de cobre alteran el desempeño de la antena dependiendo del grosor de los instrumentos de corte (para el caso de la sierra 0.5 mm, y para el caso del estilete 0.2 mm), esto se debe a que el simulador trabaja sin pérdidas en este aspecto, si se decide mandar a realizar la antena con un acabado profesional se puede obtener un corte hasta de 0.01 mm, lo que ayudaría notablemente al desempeño de la antena.
- Claramente, al momento de fabricar la antena, el diseño está expuesto a ciertas variaciones (véase la tabla 4.2), esto se debe también, a la calidad de los elementos con los que se fabrica, para el presente caso son elementos de gama media debido a que en nuestro medio es muy complicado conseguir sustratos certificados.
- En el diseño inicial para el presente proyecto no se pretendía trabajar con cinta de cobre como parte de la placa superior, sino en su lugar otro sustrato cortado con las mismas especificaciones, sin embargo, al momento de simular el dispositivo fue imposible conseguir los parámetros a corde al tema propuesto, esto se debe a que cuando se colocan dos placas de FR-4 cercanas, las características de permitividad dieléctrica de ambas se desfavorecen entre sí, por esta razón, se optó por realizarlo en cinta de cobre ya que el papel tiene una constante dieléctrica de 2 a 2.5, lo que impide que se altere el diseño propuesto.

RECOMENDACIONES

- Es indispensable evaluar todos los casos de antenas PIFA disponibles antes de realizar un diseño propio.
- Es recomendable utilizar elementos de la mejor calidad posible, si tienen certificación, sus parámetros serán excelentes.
- Antes de manipular el equipo VNA se recomienda leer el manual que el mismo fabricante proporciona, es indispensable saber calibrar el equipo antes de su uso ya que esto permite medir consideraciones reales.
- El presente proyecto es para dar inicio al uso de un laboratorio de RF y microonda de bajo costo, se recomienda tratar de emular el diseño de esta antena PIFA Multibanda, resonante a distintas frecuencias, con el fin de desarrollar o mejorar destrezas.

BIBLIOGRAFÍA

- Colombo, I. J. (2012). *Medición de los parámetros de dispersión "S"*. Tucumán.
- Figueroa, A. (2006). *SciELO*. Obtenido de <http://scielo.sld.cu>
- Firoozy, & Shirady. (2011). *Design of a Dual-Band PIFA*.
- García, L. (2007). *Contribution to the characterization and evaluation of multiple antenna systems for communications: prototyping, propagation and antenna perspective (Tesis Doctoral)*. Madrid.
- Guan-Yu Chen, K.-L. W.-S. (2009). Artificial Dielectric Material and Artificial Magnetic Conductor for Emerging PCB Application. *Impact*, 2.
- Hassan Tariq Chattha, Y. H. (2009). PIFA Bandwidth Enhancement by Changing the Widths of Feed and Shorting Plates. *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 8*, 637..
- Hossa, R., & Bialkowski, M. (2007). Investigations into operation of single and multi-layer configurations of planar inverted-F antenna. *IEEE Antennas Propagation Magazine*, 49, 22-33.
- INC., S. S. (2019). *Sonnet Software*. Obtenido de <http://www.sonnetsoftware.com/>.
- Kashyap, S. (2014). Planar Inverted-F Antenna for GPS Application- A Study. *Journal of Engineering Research and Applications* , 78-82.
- Keysight. (2019). *Keysight Technologies*. Obtenido de <https://www.keysight.com/>
- OEM, M. (2009). Obtenido de <https://qucs.uptodown.com>
- Razali, A., & Bialkowski, M. (2009). Coplanar inverted-F antenna with open-end ground slots for multi-band operation. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 8, 1029–1032.
- Sahil Saini, N. K. (2016). A Review of Various Planar Inverted F- Antenna (PIFA) Structures for Wireless Applications. *nt. Journal of Electrical & Electronics*, 63-64.
- Song, C. T., Hall, P. S., & Ghafouri-Shiraz, H. (2000). Triple band planar inverted F antennas for handheld. *Electronics Letters*, 36, 112-114.
- Systemes, D. (2019). *CST Studio Suite*. Obtenido de <https://www.3ds.com>
- Yamina Belhadef, N. B. (2011). Design of New Multiband Slotted PIFA Antennas. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 325-330.
- Zhang, Z. (2017). *Antenna Design For Mobile Devices*. Tsinghua, China: Wiley IEEE Press.

ANEXOS

ANEXO 1 Manual de usuario del equipo VNA

ANEXO 2 Datos técnicos VNA y antena PIFA

ANEXO 3 Datasheet de los componentes utilizados

ANEXO 1 Manual de Usuario



precauciones

Como un instrumento de medición, el VNA04x0 debe ser tratado con cierta consideración para evitar daños en el hardware.

Puertos de conexión del VNA

No apriete en exceso el conector SMA a los puertos de VNA. La fuerza de ajuste de dos dedos es suficiente.

No utilizar conectores SMA de baja calidad, esto puede arruinar el equipo VNA.

Los conectores del puerto de SMA tienen un máximo de 500 ciclos de inserción, después la fiabilidad y repetibilidad disminuye. Es buena idea usar un adaptador SMA hembra a macho como un protector de puerto.

Instalación

Instalación de software

Para instalar el software VNA, localizar el archivo 'SetupMiQVNA.exe' en el directorio de memoria USB o descargar y ejecutar este archivo. La instalación del software tiene sólo unas pocas opciones para hacer, o para dejar por defecto, su instalación es sencilla.

Por defecto, el software se instala en 'Archivos de programa (x86) \ MegiQ \ VNA'. El subdirectorio 'Datos' contiene un archivo de sesión de medición. El subdirectorio 'Controlador' contiene un archivo de descripción de controlador para aquellas instalaciones que necesitan esto. El manual 'Configuración MegiQ VNA Software' contiene detalles sobre la instalación en diferentes versiones de Windows.

Opciones de línea de comandos

c: Limpiar todas las configuraciones del usuario y volver al estado de instalación.

archivo de sesión: cargar un archivo de sesión cuando se inicia.

Instalación de hardware

La instalación de hardware tiene algunos procedimientos diferentes dependiendo del sistema operativo y versión. Los procedimientos para la instalación de hardware se describen en el manual de instalación del software.

En Windows 10 no existe un procedimiento de instalación de hardware, sólo tiene que conectar el VNA al ordenador y Windows instalará el controlador correcto.

Cuando el VNA se conecta al puerto USB sin el suministro de CC conectado entrará en el gestor de arranque. Los LED en el panel frontal se iluminan sólo vagamente. El gestor de arranque sólo permite subir nuevos archivos de firmware o de control. El modo normal del VNA también proporciona estos servicios.

Cuando el VNA está conectado al USB y de alimentación de CC que entrará en el modo normal de VNA y los LED se iluminarán en verde y azul (VNA04x0e).

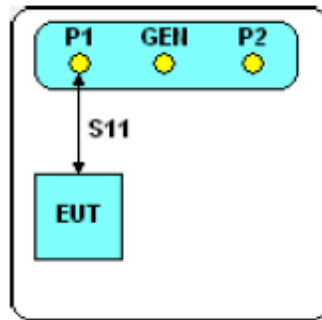
El software de aplicación para PC puede interactuar con el VNA en ambos modos, pero el gestor de arranque sólo proporciona soporte para cargar e instalar el firmware.

Descripción general de las mediciones de VNA

Un VNA mide impedancias y ganancias a altas frecuencias. Puesto que mide tanto la magnitud como la fase este proceso se lo conoce como análisis de redes vectorial. Una medida consiste típicamente en un barrido en un rango de frecuencias y los resultados son generalmente las curvas de respuesta de frecuencia.

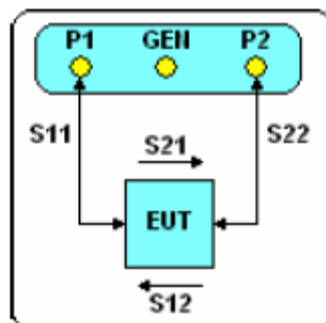
Medición de un puerto

Las mediciones se pueden realizar en los dispositivos de un solo puerto, tales como antenas y circuitos. Para ello, el VNA transmitirá una señal en un puerto hacia el dispositivo bajo prueba, y al mismo tiempo recibe la señal de vuelta de ese puerto. Al medir, recibe la señal del VNA que puede calcular la impedancia conectada al puerto.



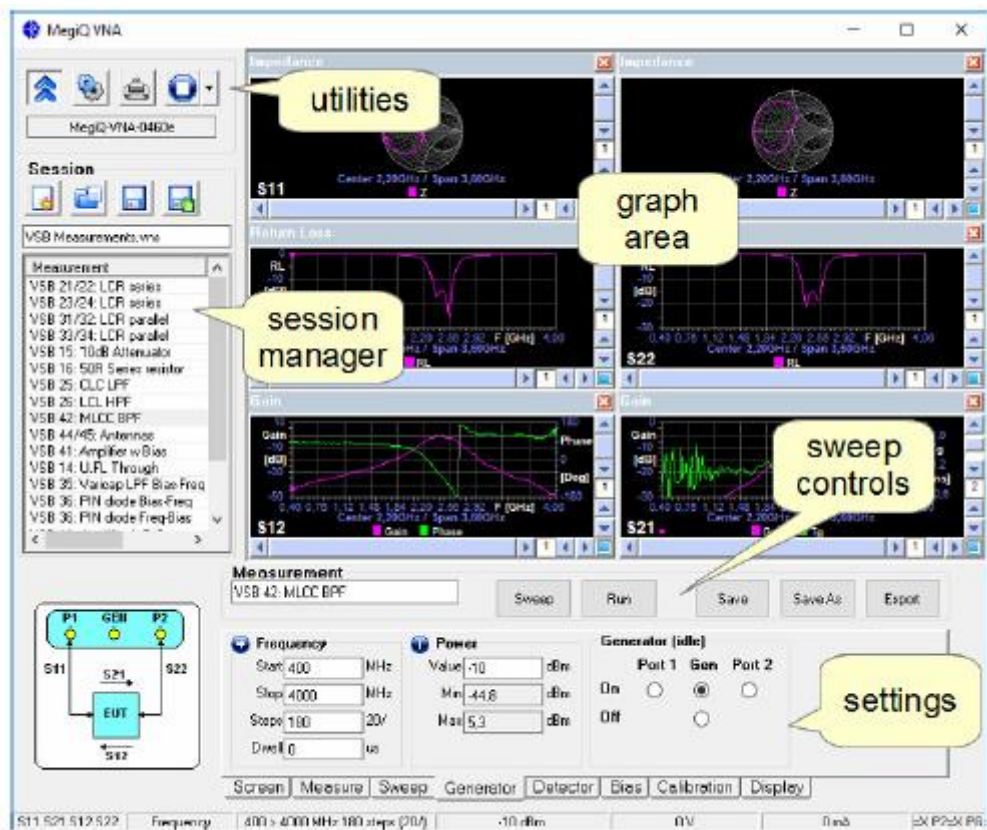
Medición de dos puertos

El VNA también puede realizar mediciones en dispositivos de dos puertos, tales como amplificadores y filtros. En esta configuración el VNA hará la medición de impedancia en dos puertos. Además, la señal también se envía a través del DUT y la señal se mide en el otro puerto. Esta es una medida de la ganancia, o pérdida, de la DUT de un puerto a otro. La medición de la ganancia se realiza en ambas direcciones para caracterizar completamente el dispositivo bajo prueba.



Software de interfaz de usuario

El instrumento en sí mismo no tiene una interfaz de usuario, pero se comunica a través de USB con un PC que proporciona una interfaz muy amigable que se ejecuta en Windows.



La mayoría de las funciones importantes de este programa son:

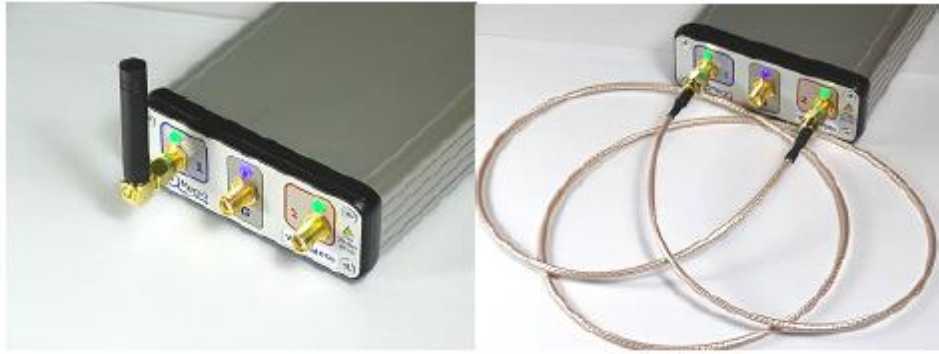
- Establecer una medición.
- Calibración de control de medición.
- Medir y mostrar los resultados.
- Guardar y recuperar las mediciones y configuraciones.
- Presentación de informes y exportar los datos de medición.

Realización de una medición

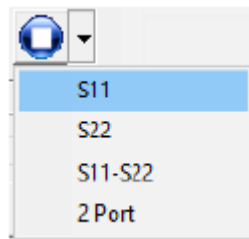
- medición sencilla
- control de barrido
- guardar mediciones

Medición sencilla

Si se está midiendo directamente hacia el puerto (s) de la VNA es muy fácil de hacer una medición. Sin calibración



1. Conectar el VNA a un puerto USB e iniciar el VNA software.
2. Espere hasta que el software se ha establecido la comunicación (El modelo de VNA se muestra y la barra de progreso se terminó).



3. Conectar el dispositivo bajo prueba al puerto (s) VNA.
4. Seleccionar una medición de preajuste, ya sea para elementos de uno o dos puertos. Esto cargará la configuración de la medición y la configuración del área de gráficos.
5. Ir a la pestaña 'Calibración' y, si es necesario, apague el casilla 'Usar calibración'.



6. Utilice el botón Barra o Ejecutar para realizar una medición.

El software VNA puede ejecutar barridos individuales o barridos continuos. Algunas personas prefieren el modo de barrido continuo, y esto puede ser útil para ver los efectos dinámicos como efectos mano alrededor de una antena o cambiantes características del dispositivo DUT.

El solo barrido es muy útil durante un desarrollo u optimización. Permite el estudio de la medición y guardarlo para recordar más tarde. Esto puede proporcionar una serie de instantáneas antes y después de varias modificaciones y permite retroceder en el proceso de comparar los resultados.

Calibración

En el análisis vectorial de redes se miden impedancias de componentes y circuitos. A altas frecuencias casi cualquier longitud de cable actuará como un transformador de impedancia, alterando así la impedancia de su apariencia real. Por otra parte, en las frecuencias más altas, incluso muchos cables se convierten en pérdidas, lo que influye en la ganancia y zonas de impedancia. Afortunadamente estos cables actúan como elementos lineales y pueden ser normalizados de forma lineal. El software lo hará por usted, pero debe ser calibrada con algunas impedancias conocidas para cada frecuencia de interés antes de empezar la medición real. Por lo tanto, antes de usar el instrumento que debe realizar una calibración, incluyendo los cables, conectores, etc., para el rango de frecuencia que desee.

Calibración independiente del dispositivo

Los datos de calibración de la VNA04x0 se normalizan al nivel de puerto. Esto significa que estos datos son independientes del hardware y es aplicable a cualquier VNA que se utiliza en la medición. Es así posible realizar la calibración con una unidad VNA04x0 y cambiar esto para otro VNA04x0 y seguir las mediciones.

Calibración OSLT

Para la calibración del software MegiQ VNA utiliza estas impedancias y conexión:

- Abierto: extremo de un circuito abierto bien definido.
- Corto: extremo de un circuito corto bien definido.
- Carga: una impedancia de 50 ohmios de precisión.
- Mediante: para la medición de dos puertos un bien definido a través de la conexión entre los dos puertos.

Este esquema de calibración es a menudo llamado OSLT o SOLT.

Durante un procedimiento de calibración de cada una de estas terminaciones se conecta a su vez y el software hace que las medidas de calibración para cada terminación.

ANEXO 2 Datos técnicos VNA y antena PIFA

Para uso del equipo VNA

Niveles de entrada

Cuidado con el máximo nivel de entrada de RF. El VNA04x0 puede sostener 20 dBm de potencia de RF. Al medir los amplificadores de potencia puede ser necesario el uso de atenuadores.

Cuidado con el máximo nivel de entrada de CC. El VNA04x0 puede sostener $\pm 20V$ DC sin daños. La máxima disipación de potencia del puerto del resistente del suelo es 0.2 Watt por lo que el usuario debe asegurarse de que una corriente en esta resistencia hace no exceda de 100 mA y la tensión hace No exceda 2V.

La fuente de alimentación estándar de la VNA es no puesta a tierra. Esto significa que el suelo del VNA está flotando.

Si el VNA está conectado a un ordenador portátil con alimentación sin conexión a tierra o no toda la instalación está flotando. Puede que sea necesario para conectar la instalación a una tierra del sistema.

General

Los conectores consiguen fácilmente suciedad y tienden a difundir la suciedad en el laboratorio. Mantenga los conectores limpios y regularmente cepillarlos con el removedor de flujo u otros disolventes (no agresivos).

Los conectores UFL son fáciles de usar, pero frágil. No forzarlo, y no tire de ellos hacia arriba y no aplicar demasiada fuerza.

Para el caso de la antena

Se muestran los parámetros técnicos de la antena PIFA Multibanda con ranuras:

Antenna Parameters		
Frequency (GHz)		1.75
Input power (Watts)		0.00245814
Radiated power (Watts)		0.0017811
Directivity(dBi)		4.30132
Gain (dBi)		2.90213
Radiation efficiency (%)		72.4571
Maximum intensity (Watts/Steradian)		0.000381601
Effective angle (Steradians)		4.66743
Angle of U Max (theta, phi)	1	45
E(theta) max (mag,phase)	0.432116	170.853
E(phi) max (mag,phase)	0.317485	179.925
E(x) max (mag,phase)	0.0909867	147.957
E(y) max (mag,phase)	0.528381	174.694
E(z) max (mag,phase)	0.00754147	-9.14737

OK

ANEXO 3 Hoja de datos técnicos de los elementos empleados

Hoja de datos técnicos del sustrato FR-4:

PARÁMETRO	VALOR
Gravedad específica / densidad	1,850 g / cm ³ (3,118 lb / cu yd)
Absorción de agua	-0,125 En <0,10%
índice de temperatura	140 ° C (284 ° F)
Conductividad térmica , a través del plano	0,29 W / (m · K), ^[1] 0,343 W / (m · K) ^[2]
conductividad térmica, en el plano	0,81 W / (m · K), ^[1] 1,059 W / (m · K) ^[2]
dureza Rockwell	escala de 110 M
La resistencia de unión	> 1,000 kg (2,200 libras)
Resistencia a la flexión (A; 0,125 en) - LW	> 440 MPa (64,000 psi)
Resistencia a la flexión (A; 0,125 en) - CW	> 345 MPa (50,000 psi)
Resistencia a la tracción (0,125 pulgadas) LW	> 310 MPa (45,000 psi)
Resistencia al impacto Izod - LW	> 54 J / m (10 ft · lb / in)
Resistencia al impacto Izod - CW	> 44 J / m (8 pies · lb / in)
Resistencia a la compresión - de plano	> 415 MPa (60,200 psi)
ruptura dieléctrica (A)	> 50 kV
ruptura dieléctrica (D48 / 50)	> 50 kV
Resistencia dieléctrica	20 MV / m
Permitividad relativa (A)	4,8
permitividad relativa (D24 / 23)	4,8
El factor de disipación (A)	0,017
El factor de disipación (D24 / 23)	0,018
Permitividad constante dieléctrica	4,70máx., 4,35 @ 500 MHz, 4,34GHz @ 1
Temperatura de transición del vidrio	Puede variar, pero es de más de 120 ° C
El módulo de Young - LW	3,5 × 10 ⁶ psi (24 GPa)
El módulo de Young - CW	3,0 × 10 ⁶ psi (21 GPa)
Coefficiente de dilatación térmica - eje x	1,4 × 10 ⁻⁵ K ⁻¹
Coefficiente de dilatación térmica - eje y	1,2 × 10 ⁻⁵ K ⁻¹
Coefficiente de expansión térmica - eje z	7,0 × 10 ⁻⁵ K ⁻¹
el coeficiente de Poisson - LW	0,136
el coeficiente de Poisson - CW	0,118
velocidad del sonido LW	3602 m / s
SW velocidad del sonido	3369 m / s
impedancia acústica LW	6,64 Mrayl

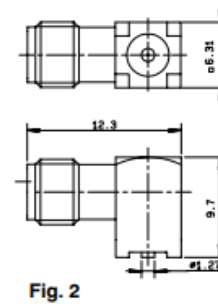
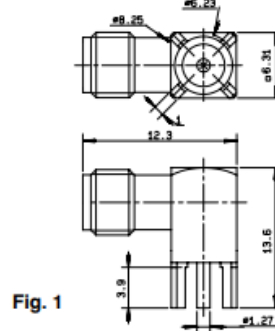
Datos técnicos de la cinta adhesiva de cobre

CARACTERÍSTICAS:

- Anchura: 50 mm
- Longitud: 50 m
- Grosor: 0.15 mm
- Adhesivo: Solvente acrílico
- Tensión de rotura: 25N/25mm
- Fuerza de adhesión: 25N/25mm
- Rango de temperatura: -20°C a +150°C
- Mínima temperatura de aplicación: +15°C
- La parte adhesiva contiene un papel protector
- Cumple las normativas RoHS y WEEE

Datos técnicos conector SMA hembra

RIGHT ANGLE FEMALE PCB RECEPTACLE



part number	fig.	PCB pattern	finish	note
R124 680 120	1	P 03	BBR	
R124 680 123	1	P 03	Gold	
R124 680 130●	1	P 03	BBR + Tin lead 60/40	
R124 680 850	1	P 03	BBR	Tube of 40 pieces
R124 680 853	1	P 03	Gold	Tube of 40 pieces
R124 681 000	2	M 09	Gold	Surface mount / Unit packaging
R124 681 800	2	M 09	Gold	Surface mount / Tape and reel of 100 pieces
R124 681 850	2	M 09	Gold	Surface mount / tube of 40 pieces