

# PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ESTUDIO Y DISEÑO DE FILTRO INTERDIGITAL  
CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA  
APLICACIONES EN UHF;  
UTILIZANDO SOFTWARE LIBRE

JAVIER ALVARO RIVERA SUAÑA  
ALBERTO PARICAHUA HUAYNAPATA  
RAÚL REYNALDO ITO DÍAZ  
ARMANDO ANTONIO SALINAS DEL CARPIO

  
Año 2024

# PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ESTUDIO Y DISEÑO DE FILTRO INTERDIGITAL  
CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA  
APLICACIONES EN UHF;  
UTILIZANDO SOFTWARE LIBRE

JAVIER ALVARO RIVERA SUAÑA  
ALBERTO PARICAHUA HUAYNAPATA  
RAÚL REYNALDO ITO DÍAZ  
ARMANDO ANTONIO SALINAS DEL CARPIO

  
Año 2024

**Editora jefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora ejecutiva**

Natalia Oliveira

**Asistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecario**

Janaina Ramos

**Proyecto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

**Imágenes de portada**

iStock

**Edición de arte**

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Derechos de autor © Atena Editora

Derechos de autor del texto © 2024

Los autores

Derechos de autor de la edición ©

2024 Atena Editora

Derechos de esta edición concedidos a Atena Editora por los autores.

Publicación de acceso abierto por Atena Editora



Todo el contenido de este libro tiene una licencia de Creative Commons Attribution License. Reconocimiento-No Comercial-No Derivados 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

El contenido del artículo y sus datos en su forma, corrección y confiabilidad son de exclusiva responsabilidad de los autores, y no representan necesariamente la posición oficial de Atena Editora. Se permite descargar la obra y compartirla siempre que se den los créditos a los autores, pero sin posibilidad de alterarla de ninguna forma ni utilizarla con fines comerciales.

Todos los manuscritos fueron previamente sometidos a evaluación ciega por pares, miembros del Consejo Editorial de esta editorial, habiendo sido aprobados para su publicación con base en criterios de neutralidad e imparcialidad académica.

Atena Editora se compromete a garantizar la integridad editorial en todas las etapas del proceso de publicación, evitando plagios, datos o entonces, resultados fraudulentos y evitando que los intereses económicos comprometan los estándares éticos de la publicación. Las situaciones de sospecha de mala conducta científica se investigarán con el más alto nivel de rigor académico y ético.

**Consejo Editorial****Ciencias Exactas y de la Tierra e Ingeniería**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

# Proyecto de Investigación Estudio y Diseño de Filtro Interdigital con Tecnología Microstrip para Aplicaciones en UHF; Utilizando Software Libre

**Diagramación:** Ellen Andressa Kubisty  
**Corrección:** Jeniffer dos Santos  
**Indexación:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisión:** Los autores  
**Autores:** Javier Álvaro Rivera Suaña  
Alberto Paricahua Huaynapata  
Raúl Reynaldo Ito Díaz  
Armando Antonio Salinas Del Carpio

## Datos de catalogación en publicación internacional (CIP)

P969 Proyecto de Investigación Estudio y Diseño de Filtro Interdigital con Tecnología Microstrip para Aplicaciones en UHF; Utilizando Software Libre / Javier Álvaro Rivera Suaña, Alberto Paricahua Huaynapata, Raúl Reynaldo Ito Díaz, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.

Otro ator  
Armando Antonio Salinas Del Carpio

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acceso: World Wide Web  
Inclui bibliografía  
ISBN 978-65-258-2418-5  
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.185241804>

1. Circuitos y dispositivos electrónicos. 2. Software Libre. I. Suaña, Javier Álvaro Rivera. II. Huaynapata, Alberto Paricahua. III. Díaz, Raúl Reynaldo Ito. IV. Título.

CDD 621.381

Preparado por Bibliotecario Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br

## DECLARACIÓN DE LOS AUTORES

Los autores de este trabajo: 1. Certifican que no tienen ningún interés comercial que constituya un conflicto de interés en relación con el artículo científico publicado; 2. Declaran haber participado activamente en la construcción de los respectivos manuscritos, preferentemente en: a) Concepción del estudio, y/o adquisición de datos, y/o análisis e interpretación de datos; b) Elaboración del artículo o revisión para que el material sea intelectualmente relevante; c) Aprobación final del manuscrito para envío; 3. Acreditan que el artículo científico publicado está completamente libre de datos y/o resultados fraudulentos; 4. Confirmar la cita y la referencia que sean correctas de todos los datos e interpretaciones de datos de otras investigaciones; 5. Reconocen haber informado todas las fuentes de financiamiento recibidas para la realización de la investigación; 6. Autorizar la publicación de la obra, que incluye las fichas del catálogo, ISBN (Número de serie estándar internacional), D.O.I. (Identificador de Objeto Digital) y demás índices, diseño visual y creación de portada, maquetación interior, así como su lanzamiento y difusión según criterio de Atena Editora.

## DECLARACIÓN DEL EDITOR

Atena Editora declara, para todos los efectos legales, que: 1. Esta publicación constituye únicamente una cesión temporal del derecho de autor, derecho de publicación, y no constituye responsabilidad solidaria en la creación de manuscritos publicados, en los términos previstos en la Ley. sobre Derechos de autor (Ley 9610/98), en el artículo 184 del Código Penal y en el art. 927 del Código Civil; 2. Autoriza y estimula a los autores a suscribir contratos con los repositorios institucionales, con el objeto exclusivo de difundir la obra, siempre que cuente con el debido reconocimiento de autoría y edición y sin fines comerciales; 3. Todos los libros electrónicos son de acceso abierto, por lo que no los vende en su sitio web, sitios asociados, plataformas de comercio electrónico o cualquier otro medio virtual o físico, por lo tanto, está exento de transferencias de derechos de autor a los autores; 4. Todos los miembros del consejo editorial son doctores y vinculados a instituciones públicas de educación superior, según recomendación de la CAPES para la obtención del libro Qualis; 5. No transfiere, comercializa ni autoriza el uso de los nombres y correos electrónicos de los autores, así como cualquier otro dato de los mismos, para fines distintos al ámbito de difusión de esta obra.

Este material va dedicado con mucho cariño y aprecio para mis Padres, Hermanos, Abuelo y a la memoria de mi Abuela Juana ...

Alvaro

A mi madre Emeteria Huaynapata, Vda. de Paricahua.  
A mis alumnos de la universidad por motivarme a seguir adelante  
y esperar que este libro despierte su interés por la ingeniería ...

Alberto

Con cariño y aprecio para mi Madre ...

Raúl

Este proyecto de investigación ha sido el resultado de un gran empeño y dedicación a lo largo de muchas horas de trabajo. Con la misma intensidad y entusiasmo queremos expresar nuestro agradecimiento a los miembros de este gran equipo de trabajo.

El presente proyecto de investigación presenta el estudio y diseño de un filtro interdigital desarrollado con tecnología microstrip para aplicaciones en UHF (Ultra High Frequency); utilizando software libre. El proyecto muestra el estudio y diseño de filtros pasa-banda desarrollados con dos tipos de tecnología; primero aplicando elementos concentrados (uso de inductores, condensadores, etc) y en el segundo método aplicando tecnología microstrip. El desarrollo de los filtros comprende el estudio, diseño y simulación para el caso del filtro a ser analizado con elementos concentrados y, para el desarrollo del filtro con tecnología microstrip comprende el estudio, diseño, simulación e implementación para su respectiva medición y caracterización para aplicaciones en la banda IV de radiofrecuencia UHF, establecido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) del Perú. Por consiguiente, el desarrollo del filtro diseñado con tecnología microstrip ha permitido obtener una respuesta bastante aceptable con las simulaciones realizadas y su respectiva medición; obteniendo así a frecuencia central de 518 MHz una atenuación de 5.31 dB, mientras que a frecuencia inferior de corte a 492 MHz se obtuvo una atenuación de 5.86 dB; y a frecuencia superior de corte a 530 MHz se obtuvo una atenuación de 6.57 dB; lográndose así un ancho de banda de 38 MHz. De igual manera en las frecuencias de pérdidas de inserción se han obtenido atenuaciones mayores de 34.7 dB & 40.5 dB. Finalmente, como principal herramienta de diseño del filtro interdigital desarrollado con tecnología microstrip se utilizó el software de acceso libre QUCS (Quite Universal Circuit Simulator).

This research project presents the study and design of an interdigital filter developed with microstrip technology for applications in UHF (Ultra High Frequency), using open-source software. The project demonstrates the study and design of bandpass filters developed using two types of technology: firstly, by applying lumped elements (such as inductors, capacitors, etc.), and secondly, by employing microstrip technology. The development of the filters encompasses the study, design, and simulation for the case of the filter analyzed with lumped elements, and for the development of the filter with microstrip technology, it involves the study, design, simulation, and implementation for its respective measurement and characterization for applications in the UHF radio frequency band IV, as established by the Ministry of Transport and Communications (MTC) of Peru. Consequently, the development of the filter designed with microstrip technology has allowed for obtaining an acceptable response with the simulations conducted and their respective measurements. Thus, an attenuation of 5.31 dB was obtained at the central frequency of 518 MHz, while at the lower cutoff frequency of 492 MHz, an attenuation of 5.86 dB was achieved, and at the upper cutoff frequency of 530 MHz, an attenuation of 6.57 dB was obtained, thus achieving a bandwidth of 38 MHz. Similarly, at the insertion loss frequencies, higher attenuations of 34.7 dB & 40.5 dB have been achieved. Finally, as the main design tool for the interdigital filter developed with microstrip technology, the freely accessible software QUCS (Quite Universal Circuit Simulator) was used.

UHF:	Ultra-High Frequency
QUCS:	Quite Universal Circuit Simulator
RF:	Radio Frequency
DUT:	Device Under Test
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú
VNA:	Vector Network Analyzer
S - P:	S-Parameters
BPF:	Band-Pass Filter
LPF:	Low-Pass Filter
BSF:	Band-Stop Filter
HPF:	High-Pass Filter

<b>CAPITULO I - ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del Problema .....	2
1.1.1 Problema General .....	2
1.1.2 Problemas Específicos .....	2
1.2 Objetivos del Estudio .....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Justificación del Estudio .....	2
<b>CAPITULO II - MARCO TEORICO .....</b>	<b>4</b>
2.1 Antecedentes de la Investigación .....	4
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	4
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	5
2.2 Filtros Pasivos.....	6
2.2.1 Filtros de Radiofrecuencia.....	6
2.2.2 Elementos Concentrados.....	9
2.2.3 Tecnología Microstrip.....	13
2.2.4 Líneas de Transmisión Microstrip.....	14
2.2.5 Normativa Técnica Peruana de Radiodifusión .....	18
<b>CAPÍTULO III - METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>19</b>
3.1 Diseño de la Investigación.....	19
3.1.1 Herramientas de Diseño.....	19
3.1.2 Etapas de Desarrollo del Proyecto .....	21
<b>CAPITULO IV - INGENIERÍA DEL PROYECTO.....</b>	<b>25</b>
4.1 Diseño del Filtro Utilizando Elementos Concentrados .....	25
4.1.1 Entorno de Diseño Utilizando QUCS .....	25
4.1.2 Entorno de Diseño Utilizando Keysight.....	31
4.2 Diseño de Filtro Interdigital con Tecnología Microstrip .....	36

4.2.1 Caracterización de una Línea de Transmisión Microstrip.....	37
4.2.2 Diseño del Filtro Interdigital .....	39
4.2.3 Diseño PCB Layout.....	44
4.2.4 Simulación de Coeficientes de Reflexión.....	44
4.2.5 Simulación de Impedancia Característica.....	45
<b>CAPÍTULO V - RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>46</b>
5.1 Método de Fabricación .....	46
5.2 Medición del Filtro Interdigital & VNA.....	47
5.3 Medición del Filtro Interdigital & AA-1400.....	49
5.4 Discusiones .....	51
5.5 Conclusiones .....	52
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>54</b>
<b>SOBRE LOS AUTORES.....</b>	<b>55</b>

## ASPECTOS GENERALES

Actualmente el estudio y diseño de filtros interdigitales utilizando tecnología microstrip se considera como una disciplina bastante sólida de la ingeniería de microondas; debido a que el concepto de tecnología microstrip fue desarrollado hace más de 50 años, y probablemente por la aplicación más emblemática desarrollado en ese tiempo fue el radar. Sin embargo, los últimos años han traído desarrollos sustanciales y continuos en dispositivos de estado sólido de alta frecuencia, circuitos integrados de microondas, técnicas de diseño y las aplicaciones cada vez más amplias de la tecnología de radiofrecuencia RF, microondas en el estudio de filtros.

Por lo tanto, las aplicaciones desarrolladas en el campo de la ingeniería de radiofrecuencia RF y microondas generalmente cubre el comportamiento de señales de corriente alterna con frecuencias en el rango de 100 MHz a 1000 GHz. Las frecuencias de RF van desde muy alta frecuencia VHF (Very High Frequency) en un rango de 30 a 300 MHz; como también a ultra alta frecuencia UHF (Ultra High Frequency) en un rango de 300 a 3000 MHz, mientras que el término microondas se utiliza normalmente para frecuencias entre 3 y 300 GHz con una correspondiente longitud de onda;  $\lambda = c/f$ , comprendida entre  $\lambda = 10 \text{ cm}$  y  $\lambda = 1 \text{ mm}$  respectivamente (Poza, 2012). Por consiguiente, las señales con longitudes de onda en el orden de los milímetros a menudo se denominan ondas milimétricas.

Por otro lado, una de las aplicaciones en UHF es el desarrollo de filtros, el cual es una red de dos puertos que se utiliza para controlar la respuesta de frecuencia en un punto determinado, en un sistema de RF o microondas proporcionando transmisión a frecuencias dentro de la banda de paso del filtro y, atenuación en la banda de supresión del filtro. Las respuestas de frecuencia típicas incluyen características de pasa-bajo, pasa-alto, pasa-banda y rechaza-banda.

Por lo tanto, en el presente proyecto de investigación se propone el estudio y diseño de un filtro interdigital utilizando tecnología microstrip para aplicaciones en la banda UHF, en específico para la banda IV establecido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC). Si bien se tiene estudios realizados utilizando dicha tecnología para el desarrollo de aplicaciones de componentes pasivos y activos, pero en alta frecuencia; es decir por encima de 1 GHz. Por consiguiente, el objetivo será realizar el diseño de un filtro pasa-banda para una frecuencia central a 500 MHz y determinar su máximo ancho de banda. También se realizará un diseño de filtro pasa-banda desarrollado con elementos concentrados utilizando un software especializado en alta frecuencia; ADS (Advanced Design System) con su versión de licencia de demostración o prueba. Y como herramienta principal se utilizará otro software de diseño de acceso libre QUCS (Quite Universal Circuit Simulator). Los diseños de filtros con elementos concentrados se realizarán con el fin de comparar los resultados de los coeficientes de reflexión, y así poder utilizar como herramienta principal de diseño del filtro interdigital el software QUCS en todo el estudio y diseño del presente proyecto de investigación.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1.1 Problema General

- ¿Se puede desarrollar el estudio y diseño de filtros interdigitales utilizando tecnología microstrip para aplicaciones en la banda UHF del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú?

### 1.1.2 Problemas Específicos

- ¿Se puede utilizar la herramienta virtual de acceso libre QUCS para el diseño y simulación del proyecto de investigación y desarrollo?
- ¿Se puede obtener una respuesta pasa-banda del filtro interdigital a frecuencia central de 500 MHz utilizando tecnología microstrip?

## 1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

### 1.2.1 Objetivo General

- Desarrollar el estudio y diseño de filtros interdigitales utilizando tecnología microstrip para aplicaciones en la banda UHF establecido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Utilizar una herramienta virtual de acceso libre QUCS para el diseño y simulación del proyecto de investigación y desarrollo.
- Obtener una respuesta pasa-banda del filtro interdigital a frecuencia central de 500 MHz utilizando tecnología microstrip

## 1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Hoy en día el desarrollo de aplicaciones en el diseño de filtros utilizando tecnología microstrip tiene múltiples ventajas con respecto al uso de elementos concentrados. Una de las ventajas significativas es el rendimiento de los filtros diseñados con tecnología microstrip, el cual casi siempre supera a las aplicaciones con elementos concentrados. Sin embargo, dado que el componente básico de un filtro microstrip es una línea de transmisión microstrip de un cuarto de longitud de onda; lo que implica que el diseño puede ser relativamente grande en dimensión física a menor frecuencia. Por lo que actualmente se tiene desarrollo de aplicaciones utilizando esta tecnología microstrip a frecuencias

superiores por encima de los GHz. Por tal razón, uno de los aportes que propone el presente proyecto de investigación es desarrollar una aplicación de filtro interdigital utilizando tecnología microstrip a una frecuencia en el orden de MHz, con el fin de obtener un diseño del filtro con una dimensión física estándar y compacta para su fabricación.

Y como segundo aporte, se propone el diseño del filtro interdigital utilizando un software de acceso libre QUCS. Puesto que en la actualidad el uso de entornos de desarrollo de código abierto o licencia gratuita, está emergiendo en el desarrollo de aplicaciones en diferentes áreas como la industria, educación e incluso en el campo de la investigación científica; enmarcando con énfasis esta última con el desarrollo del presente proyecto de investigación. Por tal razón; QUCS es un paquete de uso en radiofrecuencia RF & microondas, por ende, dicha herramienta implica un nombre genérico para un grupo de simuladores de circuitos y softwares de modelamiento bajo licencia pública general GLP (General Public Licence). Por lo tanto, se utilizará la herramienta de diseño y simulación QUCS para el desarrollo del filtro interdigital utilizando tecnología microstrip. Este método propuesto es una alternativa de uso para las Universidades en nuestra Región, los cuales no tienen acceso a licencias de uso de herramientas de desarrollo más sofisticados en aplicaciones de RF & microondas.

## MARCO TEORICO

### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1.1 Antecedentes Internacionales

En el artículo desarrollado por (Chaudhary, Roshani, & Shabani, 2023) propusieron el diseño de dos filtros pasa-banda interdigitales a frecuencias de resonancia de 2.1 GHz y 5.1 GHz utilizando redes neuronales artificiales, como también el desarrollo de un diplexor para bandas UHF/SHF. Donde para el desarrollo del diplexor utilizaron tecnología microstrip para obtener un diseño compacto con un alto aislamiento entre sus canales de frecuencia. Los autores utilizaron el software ADS para el desarrollo de los filtros en conjunto con el diplexor. Por consiguiente, los autores concluyeron con resultados bastante aceptables con los parámetros de diseño establecidos en su trabajo de investigación.

En su estudio (Tu, 2016) desarrolló su trabajo de investigación titulado: Design, modelling and implementation of several multi-estándar high performance single-wideband and multi-wideband microwave planar filters. Donde analizó en detalle el diseño y desarrollo de filtros pasa-bajo de microcinta de tipos Butterworth y Chebyshev. El autor también realizó un análisis riguroso de los métodos de transformación de filtros de prototipo de paso-bajo a filtros de paso-alto, como también de filtros pasa-banda a filtros rechaza-banda. En este trabajo de investigación el autor utilizó la herramienta de diseño y simulación ADS (Advanced Design System). Análogamente el trabajo de investigación se centró en el diseño de resonadores de impedancia escalonada (SIR). Concluyendo con la obtención de resultados bastante prometedores.

En el trabajo de investigación (Saran Krishna, 2014); realizó su trabajo de investigación titulado: Investigations on some planar microwave filters. Donde se enfocó en el diseño de filtros pasa-banda de microonda. Cuyas técnicas de diseño optado fue el uso de resonadores de bucle koch dividido abierto, resonadores de bucle cuadrado dividido abierto y resonadores multimodos en forma de estrella. Dichas técnicas de desarrollo fueron optadas por las dimensiones compactas de diseño al momento de la fabricación de los filtros. El diseño fue desarrollado en un sustrato PTFE (Polytetrafluoroethylene), cuyas propiedades dieléctricas son bastantes pequeñas; donde su espesor dispone de 0.49 mm y con una permitividad dieléctrica  $\epsilon_r = 2.43$ , el cual lo hace óptimo para trabajos en alta frecuencia, en este proyecto la frecuencia de diseño fue optado mayor de 3 GHz. La herramienta de simulación utilizada fue CST Microwave studio. Concluyendo así con resultados bastante aceptables desde el punto de vista de las predicciones teóricas y de simulaciones en el rango de frecuencias establecido alrededor del filtro y respuesta aceptable de la banda de paso.

En la disertación (Liu, 2013) desarrolló su trabajo de tesis de pregrado. Donde

realizó su investigación en el área de telecomunicaciones, titulado: Diseño de un filtro pasa-banda para aplicaciones GSM-900; el cual está orientado para sistemas globales de comunicaciones móviles. La tecnología de diseño que aplicó el autor fue la de utilización de líneas microstrip para el diseño, simulación y fabricación del filtro. Teniendo como objetivo tener una baja pérdida de retorno y trabajo en alta potencia; el rango de frecuencia establecido fue de 900 MHz hasta 1000 MHz, con una potencia de trabajo de 200 Watts en RMS y 800 Watts de potencia pico con un rizado de 0.1 dB en la banda de paso, como también con una supresión del 2 y 3 armónico de al menos 20 dB. La investigación comprendió dos tipos de métodos en el diseño del filtro como: filtro por acoplamiento paralelo y filtros con diseño de longitud de onda media, con stubs en circuito abierto. La herramienta que utilizó el autor fue el software ADS y, el sustrato de trabajo RT6035HTC. Finalmente, el autor concluyó con la obtención de resultados satisfactorios de todos los requerimientos de diseño propuestos, validando así su trabajo de investigación y desarrollo a través de la simulación, implementación y medición del proyecto.

En la memoria (Cansever, 2013) realizó su investigación titulada “Design of a Microstrip Bandpass Filter for 3.1-10.6 GHz UWB Systems”. Donde estudió los filtros de microcinta de banda ancha con una frecuencia de operación muy alta comprendida desde 3.6 GHz a 10.6 GHz, este proyecto estaba destinado para aplicaciones de sistemas UWB o también llamado ultra banda ancha. El énfasis de revisar dicha investigación fue que el autor realizó primero una simulación avanzada con todos los criterios o márgenes de error que pudieran presentarse en la implementación de los filtros, seguidamente realizó una optimización de sus diseños utilizando un software AWR, luego utilizó Sonnet EM Simulation y finalmente CST EM Simulation que a simple vista se puede notar que utilizó simulaciones bastante avanzadas para cubrir los objetivos de su investigación, claro esto es factible con el uso de herramientas con licencias profesionales y así obtener resultados más precisos. Luego realizó una caracterización del filtro a fin de comprobar el performance de sus diseños. Concluyendo con resultados bastante aceptables para la industria, donde; dichos diseños es factible ser utilizados en sistemas donde requieren ancho de banda considerable.

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

La investigación de (Huamán Palma, 2018) desarrolló el “Diseño de un Sistema de Ampliación de Cobertura Celular para las Bandas de Frecuencias en 850 MHz y 1900 MHz”. Donde; diseñó e implementó un prototipo amplificador de señales de bajo costo utilizando tecnología microcinta, para ampliar la cobertura de celular para las zonas rurales donde no se tiene buena señal de celular. El autor enfatizó más en el desarrollo de aplicaciones con componentes activos es decir el estudio de la arquitectura en diseño de amplificadores de microcinta y el diseño de antenas de parche rectangulares para aplicaciones en la

banda de 850 MHz a 1900 MHz. Para el diseño y simulación utilizó un software bastante especializado en trabajos de alta frecuencia, como es de la firma Keysight Technologies. Finalmente, el autor realizó una evaluación de las etapas de desarrollo de los prototipos desde la caracterización de líneas de transmisión microcinta para mantener la impedancia característica de los componentes, también utilizó equipos como analizadores de espectro y medidores de potencia; concluyendo así que el desarrollo de la investigación fue óptimo para ser utilizado en la ampliación de cobertura móvil.

## 2.2 FILTROS PASIVOS

### 2.2.1 Filtros de Radiofrecuencia

Según (Collin, 2001) afirma que los filtros son dispositivos electrónicos más fundamentales que se utilizan en la actualidad; ya sea para múltiples aplicaciones como: procesamiento de señales, etapas de selectividad de frecuencia en sistemas de comunicaciones de radiofrecuencia y en alta frecuencia o microondas. Dichos dispositivos constan de elementos que almacena energía eléctrica y magnética; compuesto por condensadores, inductores y líneas de transmisión para obtener características dependientes de la frecuencia. El objetivo primordial de los filtros es:

- Controlar el ruido en un determinado ancho de banda de operación del filtro.
- Mantener señales no deseadas fuera de la banda de transmisión, especialmente de los armónicos que puede presentar un sistema de comunicación.
- Presentar sólo la señal deseada en una banda específica en la etapa de recepción (receptor).

En aplicaciones de radiofrecuencia, se tienen tipos básicos de respuesta espectral de la mayoría de los filtros de RF como:

- Pasa-bajo
- Pasa-alto
- Pasa-banda
- Rechaza-banda

En el presente proyecto de investigación y desarrollo, se enfocará en el estudio del filtro de tipo interdigital por su diseño compacto de fabricación y analizar sus propiedades de selectividad de frecuencia. Para el diseño con elementos concentrados se utilizará valores normalizados para diseño de filtros de tipo Chebyshev.

La Figura 1 muestra el espectro radioeléctrico para diferentes aplicaciones.

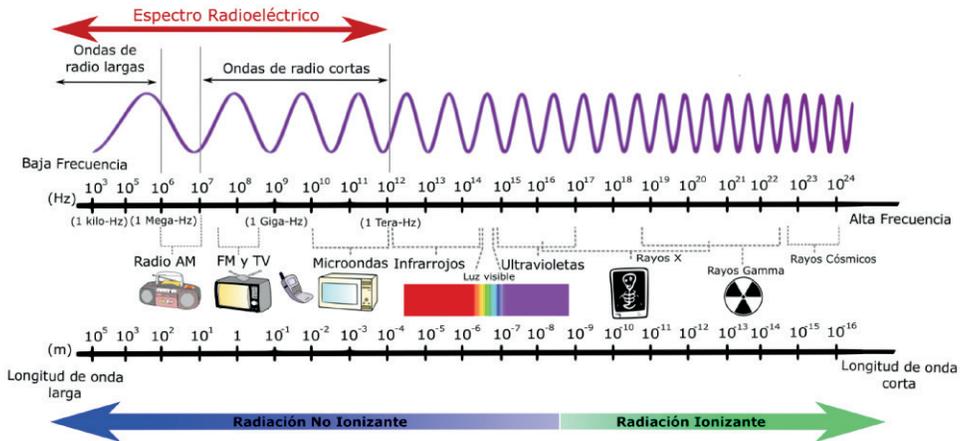


Figura 1. Espectro radioeléctrico.

### 2.2.1.1 Filtro Chebyshev

La definición realizada según (Collin, 2001), los filtros Chebyshev tienen mejores respuestas cerca del borde de la banda deseada, con una menor pérdida de inserción, pero a costa de rizados en la banda de paso. Por lo tanto, se tiene la forma general del coeficiente de transmisión definido por la Ecuación (1)

$$|T(s)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 |K(s)|^2} \quad (1)$$

Donde,  $\epsilon$  es un parámetro extra de diseño y define el rizado en la banda de paso PBR (Pass-band Ripple) definido por la Ecuación (2)

$$\text{PBR} = \frac{1}{1 + \epsilon^2}$$

$$\text{PBR}_{\text{dB}} = 10 \text{ Log} \left( \frac{1}{1 + \epsilon^2} \right) \quad (2)$$

Y para un orden  $n$ , la aproximación de un filtro Chebyshev pasa-bajo, el cuadrado de la función característica está definido por la Ecuación (3)

$$|K_n(\omega)|^2 = \cos^2[n * \cos^{-1}(\omega)] \quad (3)$$

La Figura 2 muestra la respuesta de un filtro Chebyshev de 7mo orden, en el cual se puede apreciar el rizado constante en la banda de paso; sin embargo, en comparación con una respuesta máximamente plana, la respuesta de Chebyshev tiene mejor atenuación en las bandas de atenuación.

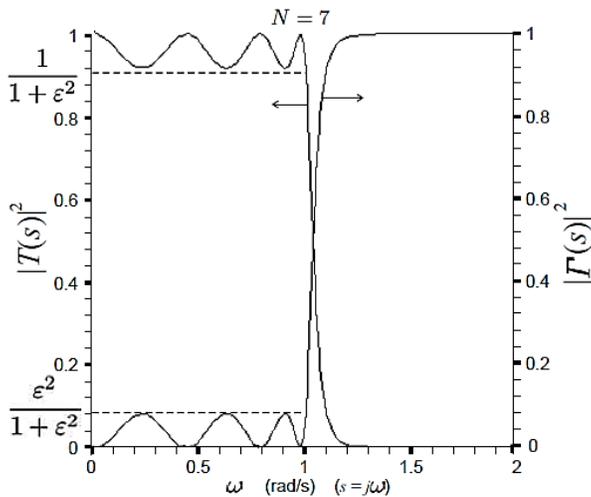


Figura 2. Respuesta de filtro Chebyshev pasa-bajo de 7mo orden.

Concerniente al establecimiento del orden de los filtros, se tiene valores normalizados para prototipos de filtros pasa-bajo; como se muestra en la Tabla 1. Donde se puede divisar un rango dinámico de orden del filtro determinado por N. Teniendo en cuenta que sólo los valores impares terminan en impedancia característica normalizada.

Por otro lado, también se tiene gráficas que muestran las frecuencias normalizadas versus atenuación en relación con el orden del filtro. Como se muestra en la Figura 3. (Pozar, 2012)

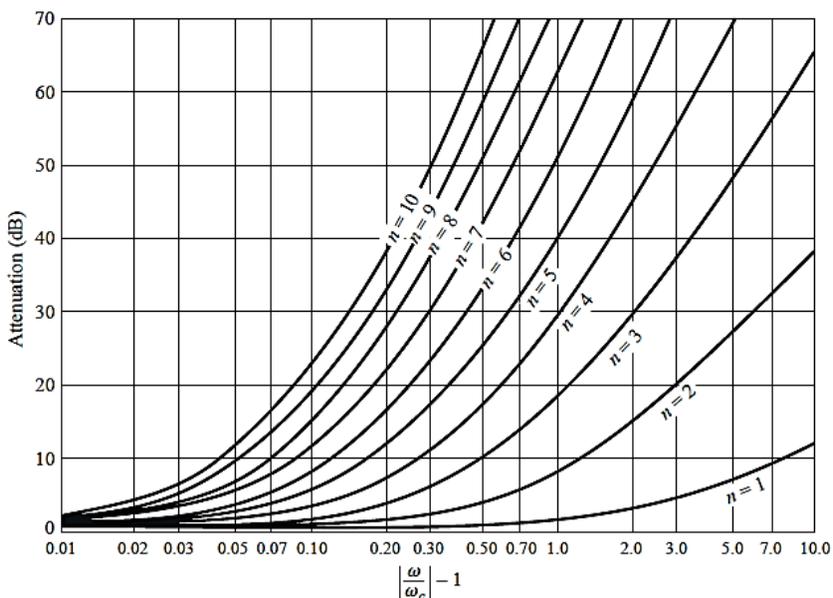


Figura 3. Atenuación vs frecuencia normalizada para filtro Chebyshev.

Como también se tiene valores normalizados para prototipos de filtros pasa-bajo con rizado constante de 0.5 dB, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Elementos normalizados para prototipos de filtros pasa-bajo.

0.5 dB Ripple											
$N$	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$	$g_7$	$g_8$	$g_9$	$g_{10}$	$g_{11}$
1	0.6986	1.0000									
2	1.4029	0.7071	1.9841								
3	1.5963	1.0967	1.5963	1.0000							
4	1.6703	1.1926	2.3661	0.8419	1.9841						
5	1.7058	1.2296	2.5408	1.2296	1.7058	1.0000					
6	1.7254	1.2479	2.6064	1.3137	2.4758	0.8696	1.9841				
7	1.7372	1.2583	2.6381	1.3444	2.6381	1.2583	1.7372	1.0000			
8	1.7451	1.2647	2.6564	1.3590	2.6964	1.3389	2.5093	0.8796	1.9841		
9	1.7504	1.2690	2.6678	1.3673	2.7239	1.3673	2.6678	1.2690	1.7504	1.0000	
10	1.7543	1.2721	2.6754	1.3725	2.7392	1.3806	2.7231	1.3485	2.5239	0.8842	1.9841

## 2.2.2 Elementos Concentrados

### 2.2.2.1 Transformación Pasa-bajo a Pasa-banda

Como primera etapa de análisis y diseño del proyecto, comprenderá la correspondiente transformación del circuito filtro pasa-bajo en su formato pasa-banda, según su respuesta espectral como se muestra en la Figura 4; considerando así la respuesta de frecuencia positiva y negativa (Steer, 2010).

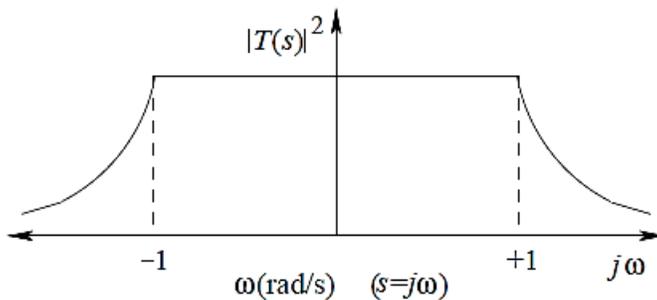


Figura 4. Respuesta en frecuencia de filtro pasa-bajo de dos lados.

Una vez realizado el análisis de transformación del filtro pasa-bajo en formato pasa-banda, la respuesta es desplazado en frecuencia para obtener un comportamiento pasa-banda. Como se muestra en la Figura 5.

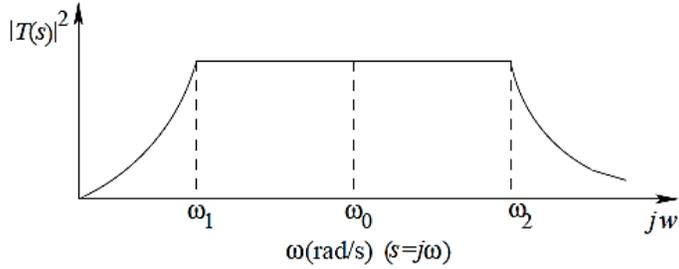


Figura 5. Respuesta aproximada en frecuencia de filtro pasa-banda.

Matemáticamente la transformación de frecuencia en radianes;  $\omega$ , la respuesta de la función se reemplazará por su forma de paso-banda, como se define en la Ecuación (4)

$$\omega \rightarrow \left[ \frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right] \quad (4)$$

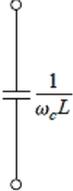
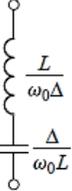
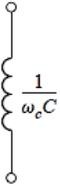
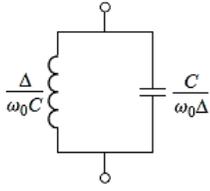
Donde:

$\omega$  ; Frecuencias laterales inferior y superior.

$\omega_o$ ; Frecuencia central de operación.

Por lo tanto, la Tabla 2 muestra la transformación de los elementos concentrados de un prototipo de filtro pasa-bajo para obtener un filtro pasa-banda. Donde, la frecuencia normalizada de corte de un filtro pasa-bajo es 1 *rad/s*. Y en la transformación del filtro pasa-banda, se tiene:  $\omega_o = 1/\sqrt{L_1 C_1} = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$ ; donde,  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son las frecuencias de borde de la banda de paso. Y finalmente,  $\alpha$  es la constante de transformación. (Johnson & Sothares, 2003)

Tabla 2. Transformación de prototipos de filtros.

<b>TRANSFORMACIÓN DE FILTROS</b>		
Fuente (Steer, 2010)		
Prototipo básico	Prototipo pasa-banda	Transformación de Reactancias
		$C_1 = \frac{\alpha C_0}{\omega_0} \quad L_1 = \frac{1}{(\alpha C_0 \omega_0)}$
		$L_1 = \frac{\alpha L_0}{\omega_0} \quad C_1 = \frac{1}{(\alpha L_0 \omega_0)}$

### 2.2.2.2 Respuesta Pasa-Banda

El diseño del prototipo de filtro pasa-banda se realiza mediante transformación de frecuencias. Donde;  $\omega_1$  y  $\omega_2$  denotan los bordes de la banda de paso, entonces la respuesta de pasa-banda se puede obtener utilizando la sustitución de frecuencia definido por las Ecuaciones (5-6)

$$\omega \leftarrow \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \frac{1}{\Delta} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (5)$$

Donde:

$$\Delta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \quad (6)$$

es el ancho de banda fraccional de la banda de paso. La frecuencia central  $\omega_0$ , puede elegirse como la media aritmética de  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , por lo que las ecuaciones son más simples si se elige como una media geométrica. Entonces, se puede determinar valores concentrados establecido por las Ecuaciones (7-8)

$$L'_k = \frac{L_k}{\Delta \omega_0} \quad (7)$$

$$C'_k = \frac{\Delta}{\omega_0 L_k} \quad (8)$$

La Figura 6 muestra algunos elementos concentrados en una tarjeta de desarrollo electrónico PCB o sobre un sustrato FR4.

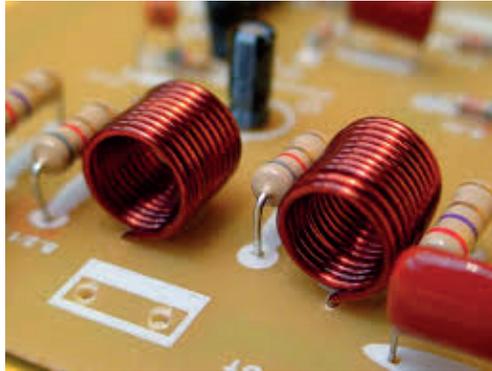


Figura 6. Circuito electrónico con elementos concentrados.

### 2.2.2.3 Carta de Smith

La carta de Smith es una herramienta gráfica de mucha ayuda en investigación y desarrollo como se muestra en la Figura 7. En el presente proyecto se utilizará dicha herramienta para verificar la impedancia característica  $Z_0$  que debe tener los filtros de RF, a fin de prevenir posibles reflexiones no deseadas en el sistema de comunicación. (Davis & Agarwal, 2001)

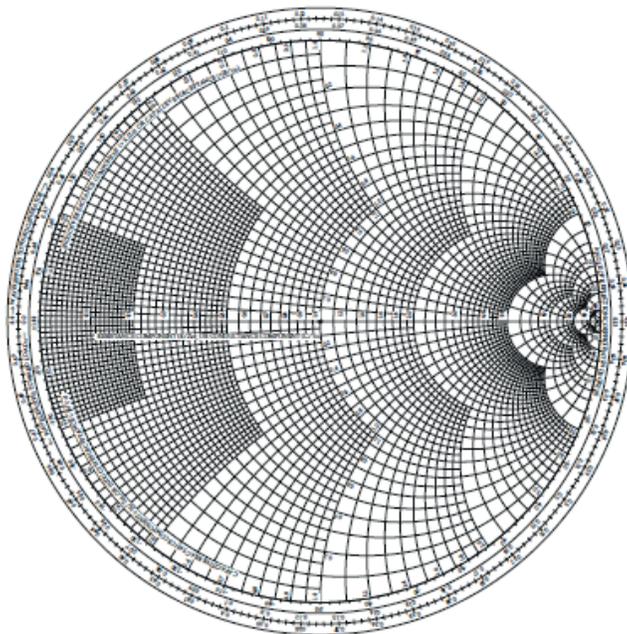


Figura 7. Carta de Smith.

### 2.2.3 Tecnología Microstrip

Según (Pozar, 2012) afirma que; en aplicaciones de radiofrecuencia RF o microondas, un filtro puede constar únicamente de elementos concentrados y distribuidos (tecnología microstrip). Los elementos distribuidos pueden ser líneas de transmisión microstrip de implementaciones basadas en componentes de un filtro con elementos concentrados. Por ejemplo, las líneas acopladas tienen características selectivas de frecuencias particulares que pueden explotarse. En este contexto, las pérdidas en elementos agrupados, particularmente están por encima de unos pocos gigahercios, el cual significa que el rendimiento de los filtros microstrip casi siempre supera al de circuitos con elementos concentrados. Sin embargo, dado que el componente básico de un filtro distribuido es una línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda, los filtros con tecnología microstrip pueden ser relativamente grande en dimensión a menor frecuencia. La Figura 8 muestra un filtro diseñado con tecnología microstrip.

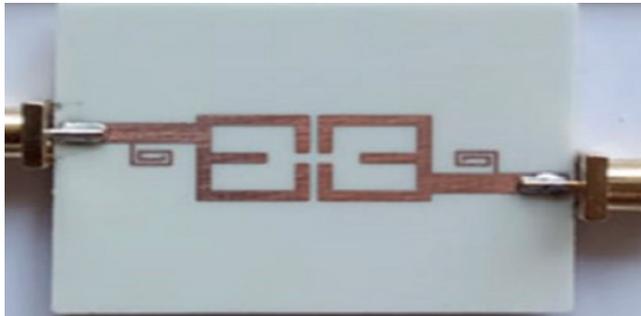


Figura 8. Filtro diseñado con elementos distribuidos (Ibrahim et al., 2020).

En esta sección se estudiará el desarrollo de la transformación de elementos concentrados a elementos distribuidos (líneas de transmisión microstrip). Para la realización de inductores en serie y condensadores en paralelo. Por ejemplo, una línea corta (menos de un cuarto de longitud de onda); será relativamente una línea de alta impedancia, el cual se comportará predominantemente como inductancias en serie. Análogamente, otra línea muy corta en longitud de onda (mucho menos de un cuarto de longitud de onda); relativamente actuará como una línea de baja impedancia y, se comportará como capacitancia en paralelo (Pozar, 2012).

Entonces un circuito con elementos concentrados se puede realizar con secciones alternas de líneas de transmisión microstrip de baja y alta impedancia, como se muestra en la Figura 9.

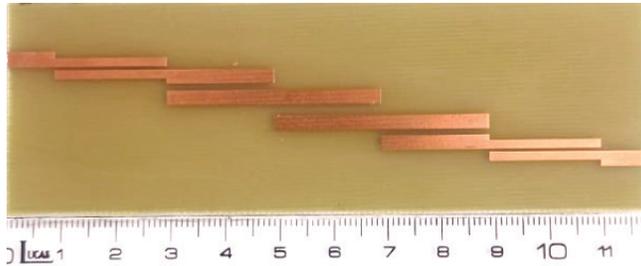


Figura 9. Diseño de filtro con tecnología microstrip (Rivera et al., 2023).

## 2.2.4 Líneas de Transmisión Microstrip

Las líneas de transmisión microstrip son un tipo de líneas más accesibles para su fabricación por su popularidad al momento de la fabricación. Sin embargo, dichas líneas de transmisión operan en un medio dieléctrico que no puede soportar el modo TEM. Las propiedades de campo que operan en una línea microstrip está parte en el aire y parte en el material dieléctrico entre la tira de conductores y la tierra. Por lo tanto, los campos electromagnéticos que operan en una línea microstrip son denominados cuasi-TEM (Gupta, Garg, Bahl, & Bhartia, 1996). La Figura 10 muestra las propiedades dieléctricas de un sustrato.

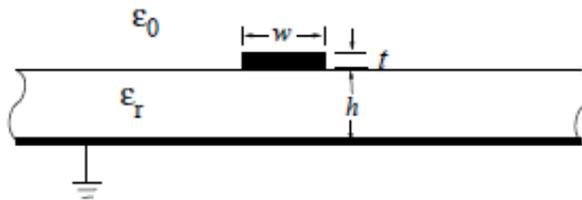


Figura 10. Línea de transmisión microcinta (Steer, 2010).

Donde, uno de los parámetros de mayor relevancia en trabajos de alta frecuencia UHF, es la constante dieléctrica relativa;  $\epsilon_r$ , el cual tiene relación con la frecuencia de operación del proyecto. Dicha constante dieléctrica relativa se puede interpretar con la constante dieléctrica efectiva, entonces este valor se puede interpretar como la constante dieléctrica de un medio homogéneo que reemplaza el aire y las regiones dieléctricas de la línea microcinta. Dado que parte del campo cuasi-EM está en el material dieléctrico y un porcentaje está en el aire. Por lo tanto, la constante dieléctrica efectiva satisface la Relación (9)

$$1 < \epsilon_e < \epsilon_r \quad (9)$$

Por tal razón, la constante dieléctrica efectiva está definido por la Ecuación (10) como

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \right) \quad (10)$$

Donde:

$h$ ; Espesor del sustrato [mm].

$w$ ; Ancho de línea de transmisión [mm].

Como se definió anteriormente concerniente a la impedancia característica de los componentes en alta frecuencia, dicha impedancia será analizada y diseñada para establecer el diseño de los filtros con la utilización de ecuaciones fundamentales y el uso de la carta de Smith. Por lo tanto, las siguientes ecuaciones serán de mucha utilidad para diseñar los filtros con elementos distribuidos; donde se tiene relaciones del ancho de la línea microstrip;  $w$  con el espesor del sustrato FR4  $d$ , definido por la Ecuaciones (11-12)

Para;  $\frac{W}{d} \leq 1$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left( \frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) \quad (11)$$

Para;  $\frac{W}{d} \geq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} \left[ \frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W}{d} + 1.444 \right) \right]} \quad (12)$$

Como también; para una impedancia característica establecida ( $Z_0$ ) y, la constante dieléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ), la relacion de  $W/d$  puede ser determinado por las Ecuaciones (13-16)

Para;  $\frac{W}{d} < 2$

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (13)$$

Para;  $\frac{W}{d} > 2$

$$\frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (14)$$

Donde:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (15)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (16)$$

#### 2.2.4.1 Transformación de Richard & Kuroda

La transformada de Richard se define utilizando la Ecuación (17), (Pozar, 2012)

$$\Omega = \tan \beta \ell = \tan \left( \frac{\omega \ell}{v_p} \right) \quad (17)$$

Donde se asigna el plano de frecuencia;  $\omega$ , al plano de impedancia;  $\Omega$ , que se repite con un período de  $\omega \ell / v_p = 2\pi$ . Esta transformación fue introducida por P. Richards para sintetizar una red  $LC$  utilizando redes abiertas y Stubs de líneas de transmisión en cortocircuito, definido por la Ecuación (18)

$$jX_L = j\Omega L = jL \tan \beta \ell \quad (18)$$

y la susceptancia de un condensador definido por la Ecuación (19)

$$jB_c = j\Omega C = jC \tan \beta \ell \quad (19)$$

Estos resultados indican que un inductor se puede reemplazar por un trozo de línea (Stub) cortocircuitado de longitud  $\beta \ell$  e impedancia característica  $L$ , mientras que un condensador se puede reemplazar por un trozo (Stub) en circuito abierto de longitud  $\beta \ell$  e impedancia característica  $1/C$ . Para obtener la misma frecuencia de corte que el filtro transformado de Richards, definido por la Ecuación (20)

$$\Omega = 1 = \tan \beta \ell \quad (20)$$

el cuál es la longitud eléctrica del Stub;  $\ell = \lambda/8$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda de la línea en la frecuencia de corte;  $\omega_c$ . En principio, la transformación de Richards permite que los inductores y condensadores de un filtro de elementos agrupados pueda ser reemplazado con líneas de transmisión (Stubs) en cortocircuito y circuito abierto, como se ilustra en las Figuras 11 - 12. Dado que las longitudes eléctricas de todos es la misma ( $\lambda/8$  en  $\omega_c$ ).

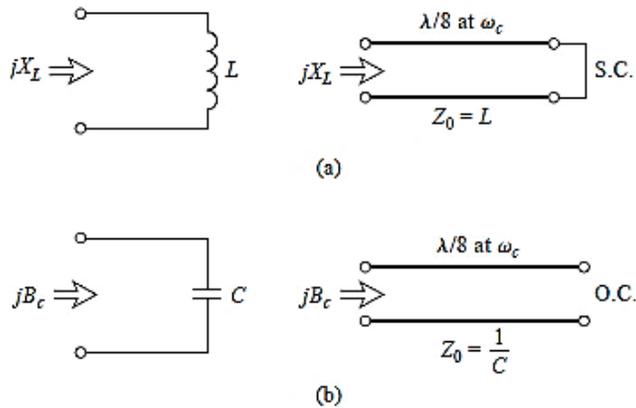


Figura 11. Circuitos de transformaciones de Richards.

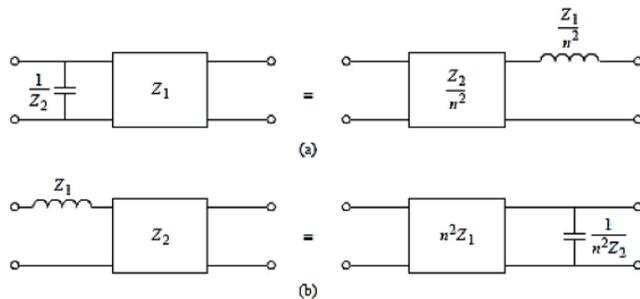


Figura 12. Configuración de transformaciones de Kuroda.

#### 2.2.4.2 Líneas Acopladas & Capas Interdigitales

Una propuesta considerada en el proyecto de investigación utilizando tecnología microstrip fue utilizando las líneas de transmisión acopladas en paralelo; como se muestra en la Figura 13, el cual también se puede utilizar para construir muchos tipos de filtros. Donde, la fabricación del filtro pasa-banda o multisección son particularmente fáciles en forma de microstrip para anchos de banda de aproximadamente el 20% (Steer, 2010).

Por lo que se realizó el estudio y diseño del filtro utilizando líneas acopladas de cuarto de onda; donde, a la frecuencia de diseño de 500 MHz se obtuvo una dimensión física demasiado grande, aproximadamente de 60 cm. Lo cual hizo del diseño no muy práctico ni usual para su uso en aplicaciones UHF.

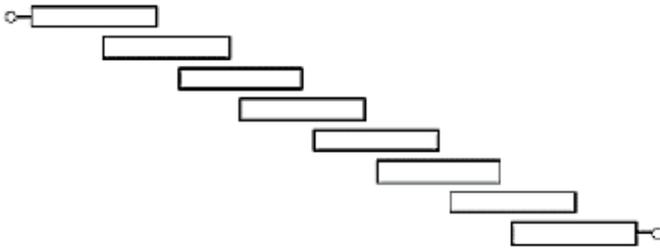


Figura 13. Línea microstrip acoplada en paralelo.

Por consiguiente, se realizó una búsqueda de referencias de técnicas de utilización de líneas microstrip de capas interdigitales entre sí, como se muestra en la Figura 14. Como también de filtros diseñados con técnicas interdigitales que pudieran trabajar a frecuencias en el orden de MHz.

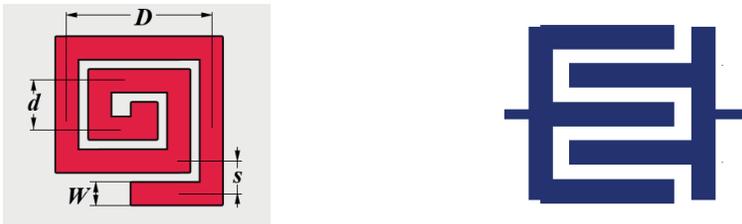


Figura 14. Técnicas de elementos microstrip interdigitales.

### 2.2.5 Normativa Técnica Peruana de Radiodifusión

La banda de radiodifusión establecida por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC del Perú, establece una parte de espectro radioeléctrico destinado a ser utilizada por una estación de radio-frecuencia cuyo ancho de banda es de 6 MHz. Por lo tanto, se dispone de las bandas de frecuencias en UHF, (Comunicaciones, s.f.):

Canales:

- (14 – 69) (470 – 806 MHz)

Donde:

- Banda I: establece, 54 – 88 MHz
- Banda II: establece, 174 – 216 MHz
- Banda IV: establece, 470 – 584 MHz
- Banda V: establece, 584 – 806 MHz

## METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Con la finalidad de validar el presente proyecto de investigación se empleará el diseño experimental de los filtros pasa-banda de tipo Chebyshev, utilizando elementos concentrados. Para este fin se utilizará las herramientas de desarrollo, diseño y simulación de la firma Keysight Technologies, y el software de código abierto QUCS. Por lo tanto, con la herramienta Keysight se desarrollará el diseño esquemático y su respectiva simulación a fin de realizar una comparación de resultados de coeficientes de reflexión con el software QUCS; en el cual también realizaremos el diseño, simulación y generación del formato layout para la respectiva fabricación del filtro con tecnología microstrip, para luego realizar un test de medición del filtro con un analizador de redes vectoriales y un analizador de antenas AA-1400.

#### 3.1.1 Herramientas de Diseño

##### 3.1.1.1 Keysight Technologies

Bueno como se mencionó al inicio de la investigación, el uso del software de la firma Keysight será para fines de verificación y comparación de los valores de componentes concentrados. El cual nos permitirá medir el performance de uso de la herramienta principal QUCS para desarrollos de aplicaciones que requieran precisión en trabajos de alta frecuencia. También se analizará una comparación de respuestas de simulaciones que nos proporcionará las dos herramientas virtuales (QUCS & Keysight).

La Figura 15 muestra el logotipo de la firma Keysight.



Figura 15. Entorno de desarrollo Keysight Technologies.

##### 3.1.1.2 QUCS

Para el diseño del filtro interdigital se utilizará el software QUCS, como principal herramienta de diseño y simulación. QUCS es un software de código abierto destinado para la investigación de proyectos que requieren ser analizados en un rango de frecuencias como RF o microondas, por su versatilidad en componentes que proporciona el software;

hace que cada vez más profesionales e investigadores utilicen esta herramienta. Entre sus potencialidades QUCS proporciona un análisis en donde se requieren caracterizar los parámetros de dispersión de componentes activos y pasivos. Como también se tiene disponible una amplia gama de librerías de líneas de transmisión microstrip.

La Figura 16 muestra el entorno de trabajo del software QUCS.

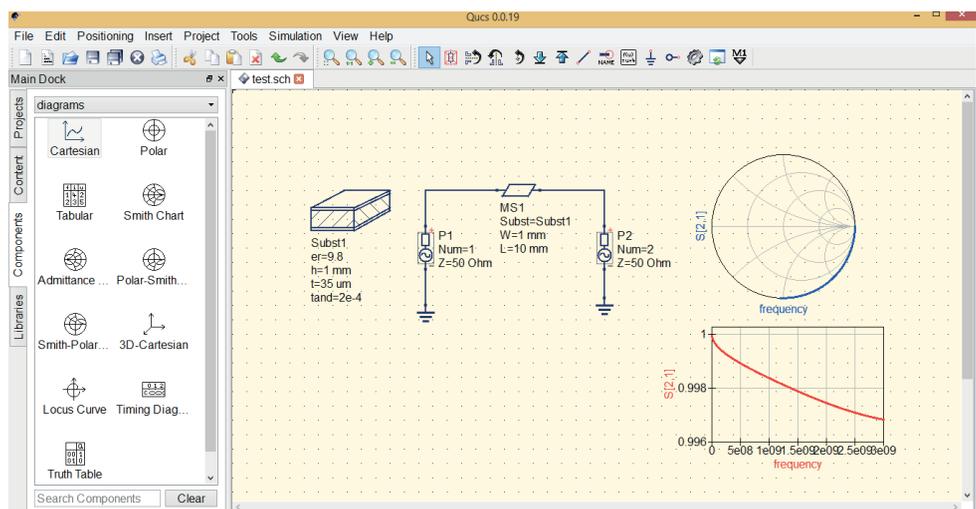


Figura 16. Entorno de desarrollo de QUCS.

### 3.1.1.3 Analizador de Redes Vectoriales

Para la medición y caracterización del proyecto se utilizará un analizador de redes vectoriales, a fin de verificar características del filtro; concierne a la atenuación que dispondrá los valores de la pérdida de inserción y el ancho de banda que dispondrá para una frecuencia de radiofrecuencia en UHF. La Figura 17 muestra un analizador de redes vectoriales.

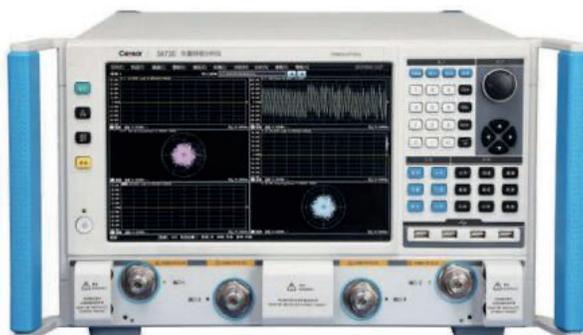


Figura 17. Analizador de redes vectoriales.

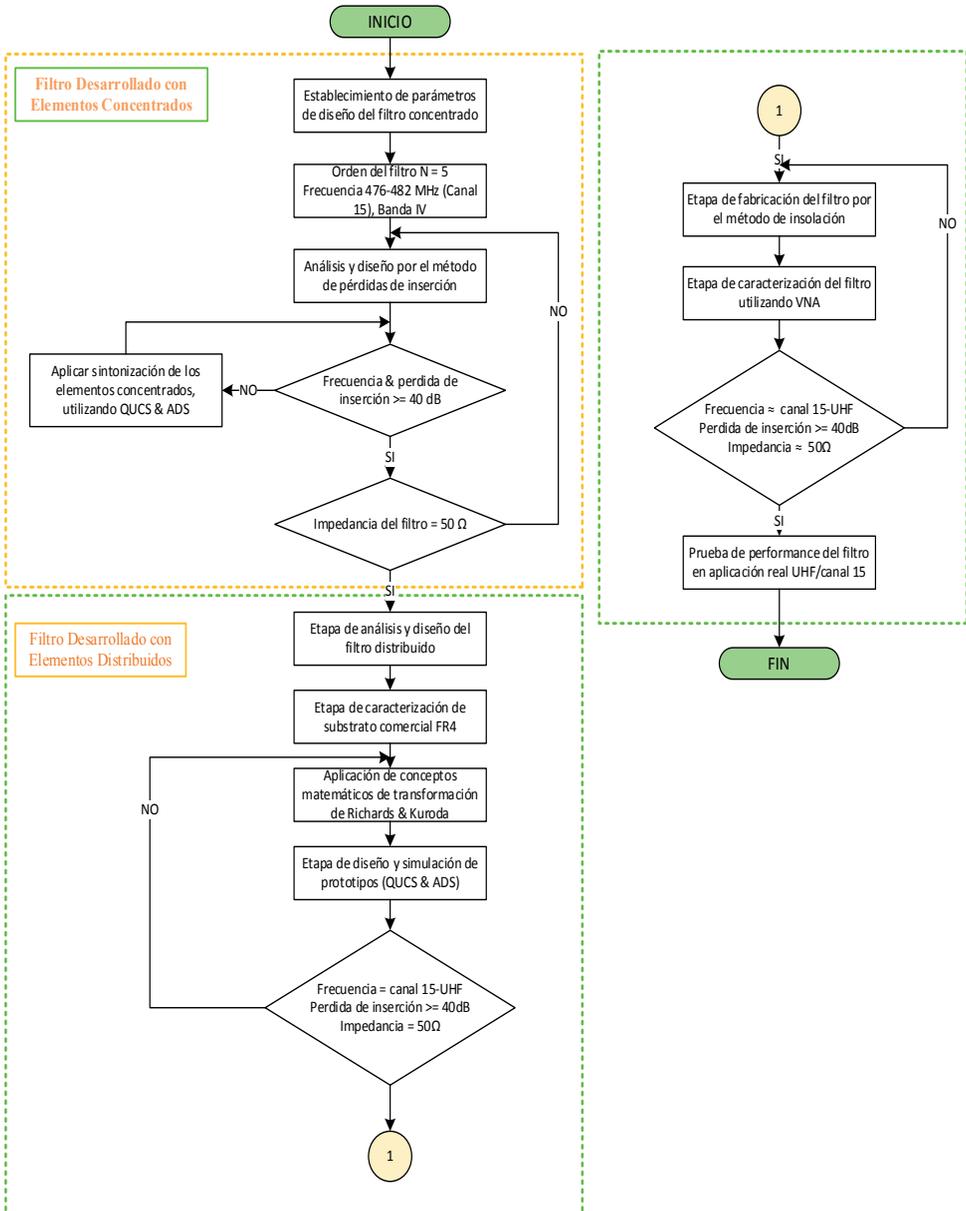
## 3.1.2 Etapas de Desarrollo del Proyecto

### 3.1.2.1 Desarrollo Analítica - Teórico

El proceso de análisis matemático para el desarrollo de los filtros contempla los procesos siguientes:

- Para el desarrollo del filtro por el método de diseño con elementos concentrados, se utilizará la Tabla 1 de valores normalizados para establecer el orden del filtro  $N = 5$ ; para el canal 15 de la banda UHF. Luego, se utilizará la Figura 3 de atenuación versus la frecuencia de normalización para determinar la pérdida de inserción del filtro a fin de contemplar la atenuación  $\geq 40$  dB; según lo establecido por el MTC para potencias promedio a 25 Watts.
- Para el proceso de análisis matemático de componentes concentrados de filtro, se desarrollará las transformaciones de frecuencia; es decir convertir un prototipo de filtro pasa-bajo a filtro pasa-banda. Una vez desarrollado la transformación del filtro, se utilizará el escalado de frecuencia e impedancia característica de los filtros.
- Concerniente al desarrollo del filtro con tecnología microstrip, se analizará en detalle la técnica de líneas de transmisión interdigitales, a fin de poder diseñar el filtro de respuesta pasa-banda para una frecuencia central de 500 MHz. Y finalmente poder fabricar el proyecto como un diseño compacto y versátil para su caracterización.

### 3.1.2.2 Diagrama de Bloques



Flujograma de desarrollo del proyecto

### 3.1.2.3 Parámetros de Diseño

Para el desarrollo del proyecto se estableció los siguientes parámetros de diseño, según muestra la Tabla 3

Tabla 3. Especificaciones de diseño del filtro.

ELEMENTOS	PARÁMETROS	ESPECIFICACIONES
<b>Concentrados</b>	Orden	N = 5
	Impedancia	50 $\Omega$
	Atenuación	$\geq 40$ dB
	Tipo	Chebyshev
	Frecuencia	UHF / Canal 15
	Rizado	0.3 dB
	Método de análisis	Perdida de inserción
<b>Tecnología microstrip</b>	Sustrato	FR4
	Orden	N = 5
	Ancho de Banda	$\leq 10$ %
	Atenuación	$\geq 40$ dB
	Impedancia	50 $\Omega$
	Frecuencia $f_c$	UHF / 500 MHz
	Método de análisis	Técnicas Interdigitales

Concerniente a la potencia nominal de  $\approx 25$  Watts que establece el MTC para atenuaciones en las frecuencias de pérdidas de inserción es de 40 dB; dicha potencia se asumirá como un valor referencial, con el fin de cumplir los parámetros de diseño del proyecto. Sin embargo, es conveniente precisar que el sustrato FR4 comercial a utilizar soporta hasta 300 Watts de potencia nominal y hasta 500 Watts de potencia en extremo uso. Según el MTC a potencias superiores de 25 Watts se tendría que superar una atenuación mayor a 60 dB, este valor se podría alcanzar utilizando sustratos más sofisticados que tengan menor pérdida de atenuación de señales.

### 3.1.2.4 Test de Medición

Para la aplicación de funcionamiento del proyecto se realizará pruebas de medición en la banda UHF, como se muestra en la Figura 18, en donde se podrá verificar la capacidad de selectividad de la banda de frecuencia diseñada.

También se podrá caracterizar los valores de perdida de inserción a fin de cumplir con las especificaciones técnicas del MTC.



Figura 18. Test de medición del filtro a diseñar.

## INGENIERÍA DEL PROYECTO

### 4.1 DISEÑO DEL FILTRO UTILIZANDO ELEMENTOS CONCENTRADOS

En esta etapa de desarrollo del proyecto se mostrará la metodología de análisis, diseño y simulación del filtro pasa-banda Chebyshev utilizando elementos concentrados, para este fin se desarrolló con dos herramientas de diseño y simulación de componentes de alta frecuencia y RF; keysight & QUCS; a fin de realizar una comparativa de resultados y realizar una verificación de los elementos del filtro.

Cabe mencionar que para el diseño del proyecto con elementos concentrados será solamente de diseño y simulación con las dos herramientas de uso (Keysight & QUCS). Por otro lado, el desarrollo del proyecto utilizando tecnología microstrip comprenderá el diseño, simulación, implementación y caracterización del proyecto a fin de verificar el óptimo funcionamiento en un sistema de comunicación.

#### 4.1.1 Entorno de Diseño Utilizando QUCS

Según los parámetros de diseño establecido en el presente proyecto de investigación; como se muestra en la Tabla 4, se realizará el estudio y diseño del filtro pasa-banda con elementos concentrados.

Tabla 4. Parámetros de diseño del filtro con elementos concentrados.

Parámetro	Valor
Banda	IV - UHF
Canal	15
Banda de paso	476 - 482 MHz
Frecuencia central	479 MHz
Orden	5
Pérdida de inserción	$\geq 40$ dB
Rizado	0.5 dB

Si se tiene la definición de la frecuencia central definido por la Ecuación (6) como

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2} = 479 \text{ MHz}$$

Y el ancho de banda fraccional definida por la Ecuación (7) como

$$\Delta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = 0.0125$$

Por lo tanto, se puede obtener el valor de frecuencia normalizada de la Figura 19, donde nos muestra una intersección de relación de frecuencias normalizadas con respecto a la atenuación de pérdidas de inserción del filtro a diseñar.

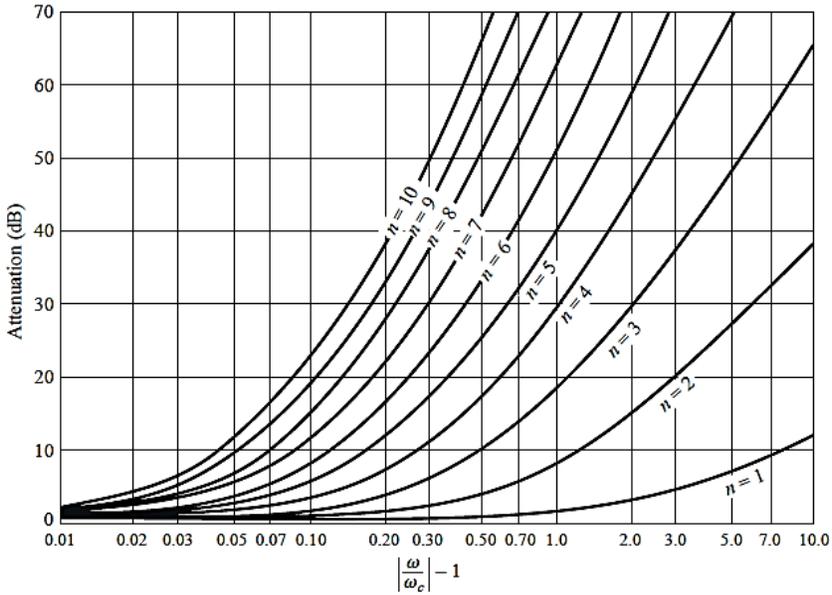


Figura 19. Frecuencia normalizada vs atenuación.

Luego, se puede determinar la relación de respuesta de filtro pasa-banda utilizando la Ecuación (5) como:

$$\omega \leftarrow \left| \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right| - 1$$

$$\omega \leftarrow \left| \frac{1}{\Delta} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right| - 1$$

$$\omega \leftarrow \left| \frac{1}{\Delta} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right| - 1 = 2$$

Reemplazando valores de diseño; como la frecuencia central de 479 MHz y el ancho de banda fraccional de 0.0125 en la ecuación anterior, se tiene una ecuación cuadrática como se describe a continuación:

$$\omega \leftarrow \left| \frac{1}{0.0125} \left( \frac{\omega}{479 \text{ MHz}} - \frac{479 \text{ MHz}}{\omega} \right) \right| - 1 = 2$$

$$\omega^2 - 17.9625\omega - 229441 = 0$$

Por lo tanto, resolviendo la ecuación cuadrática anterior se puede determinar las frecuencias de pérdida de inserción  $\omega_1$  &  $\omega_2$ .

$$\omega_1 = -470.103 \text{ MHz}$$

$$\omega_2 = 488.065 \text{ MHz}$$

Donde:  $\omega_1$  representa la frecuencia inferior de pérdida de inserción, y  $\omega_2$  representa la frecuencia superior de pérdida de inserción. Por consiguiente, se tiene el modelo básico de filtro pasa-bajo con cinco elementos concentrados, como se muestra en la Figura 20. Para luego realizar la transformación a una respuesta de filtro pasa-banda.

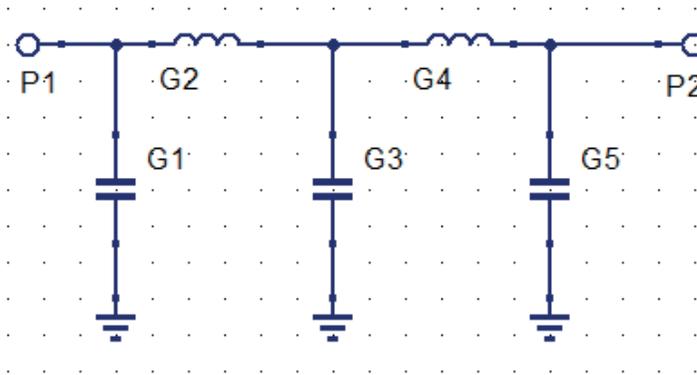


Figura 20. Prototipo de filtro pasa-bajo de orden N=5.

Por lo tanto, de la Tabla 1 se obtiene los valores normalizados de prototipo pasa-bajo, para luego ser transformados a un diseño de filtro pasa-banda utilizando la definición de escalado de frecuencia. Por consiguiente, la Tabla 5 muestra la distribución de valores normalizados para el filtro pasa-bajo.

Tabla 5. Valores normalizados de prototipo de filtro pasa-bajo.

N	Valor
G1	1.7058
G2	1.2296
G3	2.5408
G4	1.2296
G5	1.7058

Luego se procede a determinar los valores concentrados de cada componente del filtro pasa-bajo a ser transformado a una respuesta de filtro pasa-banda, considerando el escalado de frecuencia e impedancia, utilizando las Ecuaciones (7-8) del inductor en serie y el capacitor en paralelo como:

- Para el inductor en serie, se tiene

$$L'_k = \frac{L_k}{\Delta\omega_0}$$

$$C'_k = \frac{\Delta}{\omega_0 L_k}$$

- Y para el capacitor en paralelo la ecuación siguiente

$$L'_k = \frac{\Delta}{\omega_0 C_k}$$

$$C'_k = \frac{C_k}{\Delta\omega_0}$$

Aplicando las ecuaciones anteriores se puede determinar la distribución de componentes del filtro pasa-bajo en su equivalente de prototipo pasa-banda como se muestra en la Figura 21.

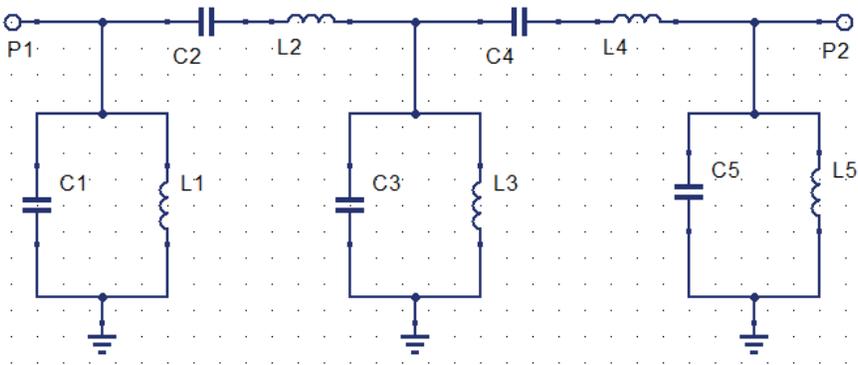


Figura 21. Prototipo de filtro pasa-banda de orden N=5.

Por consiguiente, se tiene los valores del filtro pasa-banda con su respectivo escalado en frecuencia e impedancia, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores calculados del filtro pasa-banda.

Componente	Valor	Componente	Valor
L1	0.122 nH	L4	1.634 uH
C1	0.906 nF	C4	67.55 fF
L2	1.634 uH	L5	0.122 nH
C2	67.55 fF	C5	0.906 nF
L3	81.73 pH		
C3	1.3507 nF		

Luego se procede a establecer los valores en el circuito de diseño del filtro pasa-banda a fin de simular y poder ver el comportamiento de los parámetros de dispersión S. La Figura 22 muestra el filtro pasa-banda con todos los valores calculados anteriormente.

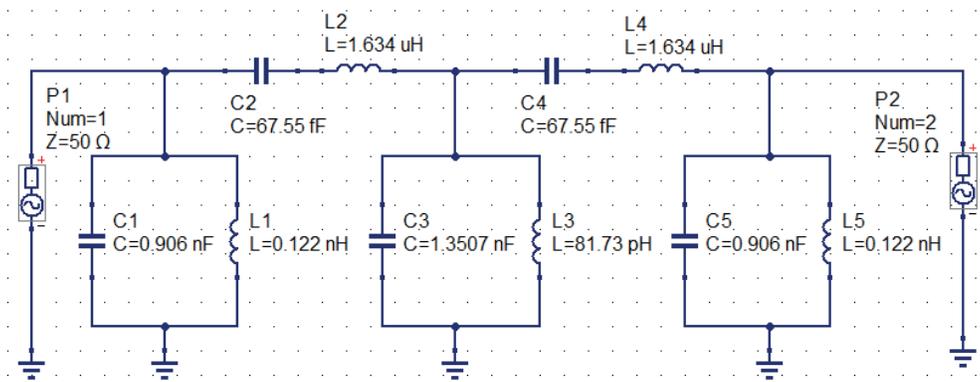


Figura 22. Prototipo de filtro pasa-banda con elementos concentrados.

En esta etapa del proyecto, se procede a analizar el comportamiento de los parámetros de dispersión S, en especial los coeficientes de reflexión directa  $S_{[2,1]}$  y el coeficiente de reflexión a la entrada del filtro;  $S_{[1,1]}$ . Por lo tanto, la Figura 23 muestra el comportamiento del filtro pasa-banda con el coeficiente de reflexión directa; Donde, a frecuencia central de 479 MHz se tiene una atenuación de 0.094 dB; de manera similar se puede ver que a frecuencia inferior de paso de: 476 MHz se tiene una atenuación de 0.741 dB, y a frecuencia superior de paso de 482 MHz se tiene 0.909 dB de atenuación. Concerniente a las atenuaciones que presenta en filtro pasa-banda en las frecuencias de pérdidas de inserción superan a lo establecido en los parámetros de diseño; donde, a 470 MHz se tiene 63.7 dB, y a 488 MHz tiene 63.9 dB de atenuación.

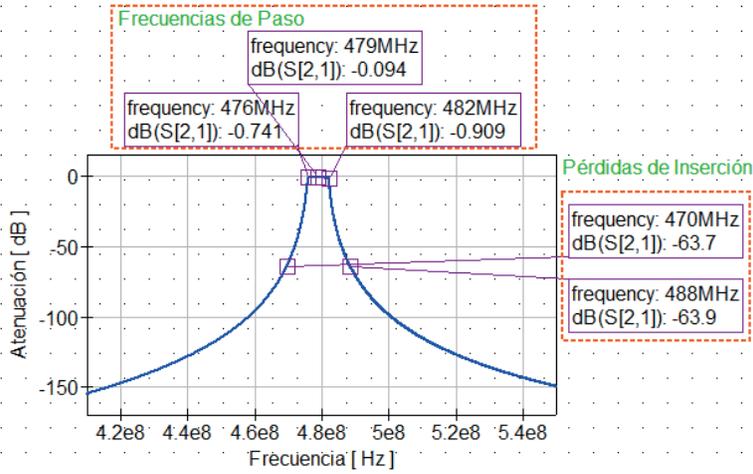


Figura 23. Respuesta de coeficiente de reflexión directa del filtro.

De igual manera se analizó el comportamiento del coeficiente de reflexión a la entrada del filtro:  $S[1,1]$ . Como se puede ver en la Figura 24, a frecuencias inferiores de 476 MHz toda señal se refleja, al igual que sucede a frecuencias superiores de 482 MHz. Sin embargo, a la frecuencia de paso del filtro pasa-banda el coeficiente de reflexión presenta una atenuación promedio de 10 dB, lo cual indica un correcto funcionamiento del filtro pasa-banda.

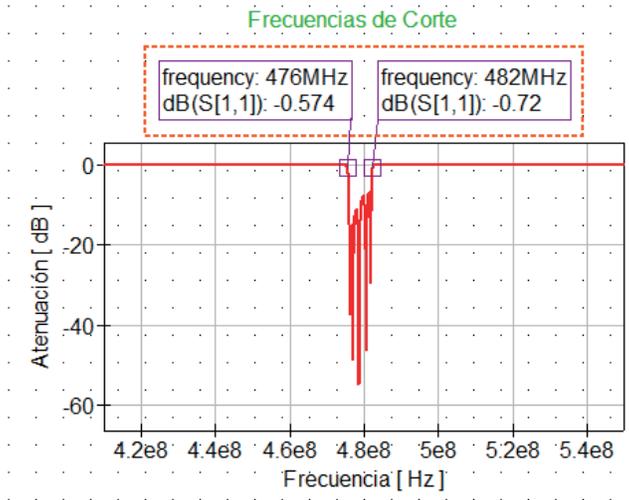


Figura 24. Respuesta de coeficiente de reflexión  $S[1,1]$  del filtro pasa-banda.

Finalmente, se realizó una comparativa de resultados de los coeficientes de reflexión del filtro pasa-banda diseñado con elementos concentrados, como se puede ver en la Figura 25.

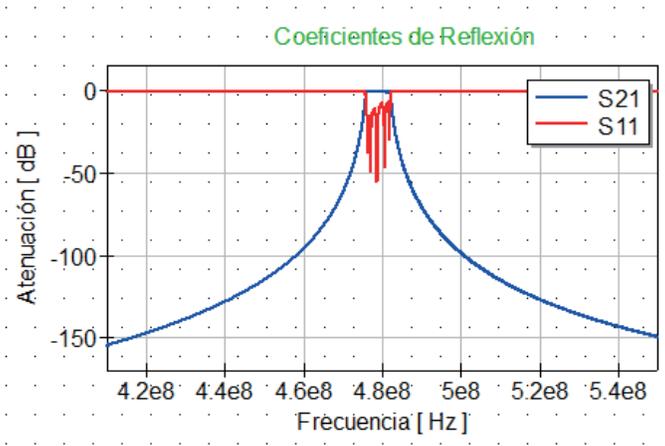


Figura 25. Respuesta de coeficientes de reflexión S<sub>2,1</sub> & S<sub>1,1</sub> del filtro.

#### 4.1.2 Entorno de Diseño Utilizando Keysight

En esta etapa de desarrollo del filtro pasa-banda, también se realizó el estudio y análisis de diseño del filtro utilizando una herramienta especializada para trabajos en alta frecuencia de la firma Keysight Technologies. Por consiguiente, se utilizó una licencia de prueba del software a fin de utilizarlo como una herramienta de comparación de resultados de los coeficientes de dispersión obtenidos con el entorno del software QUCS. Por lo tanto, se procedió a ejecutar dicha herramienta para realizar algunas configuraciones recomendadas para un óptimo análisis y diseño.

Para este fin se procedió a ejecutar dicha herramienta, como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Entorno de desarrollo de Keysight Technologies.

Al iniciar el entorno de desarrollo del software se puede ver una generación de entornos de trabajo de algunos proyectos de prueba. En este apartado es muy importante definir algunos parámetros de medida, según lo que recomienda la firma de keysight para el desarrollo de proyectos más avanzados que requieran utilizar líneas de transmisión

microstrip, si fuera el caso de estudio. Por consiguiente, como se está utilizando una licencia de prueba del software las opciones de simulación más avanzada están limitadas. La Figura 27 muestra el entorno de inicio del software Keysight.

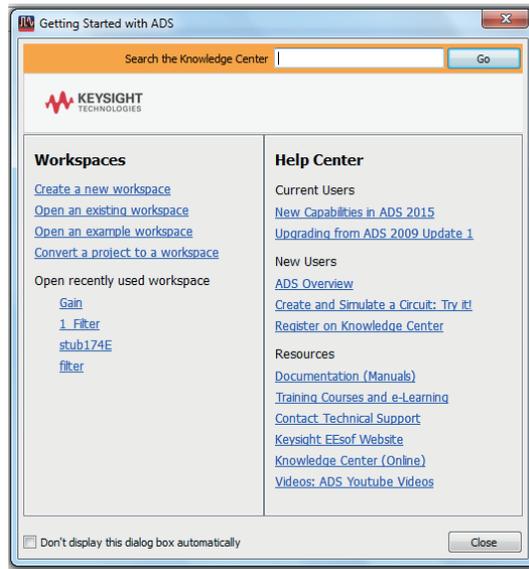


Figura 27. Entorno de inicio Keysight Technologies.

Una vez explorado los beneficios que ofrece el software ADS, se procede a crear un entorno de trabajo (*workspace*) a fin de establecer unidades internacionales de medida y poder crear un ambiente de diseño del filtro en un entorno *schematic* para el desarrollo del proyecto. Para este fin, se procede a seleccionar la opción de File, New & Workspace; como se muestra en la Figura 28.

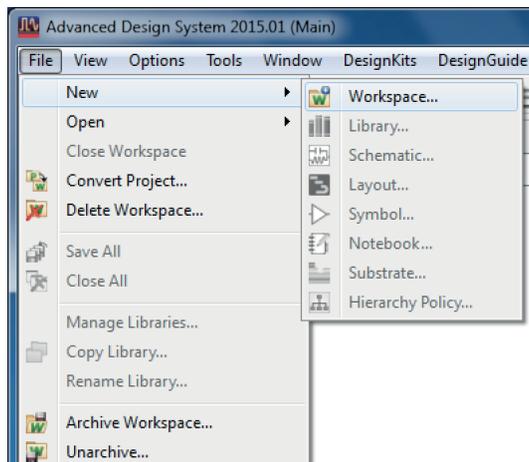


Figura 28. Creación de un ambiente de trabajo Workspace - Keysight.

Luego aceptamos las opciones por defecto de creación de un ambiente de trabajo, como se muestra en la Figura 29.

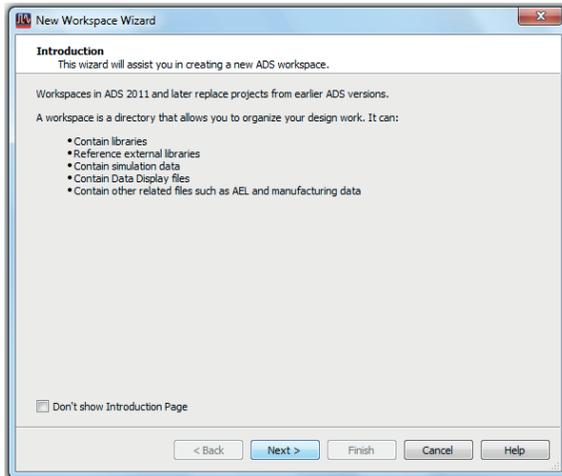


Figura 29. Aceptación de creación Workspace - Keysight.

Realizado las configuraciones se tiene el ambiente de trabajo schematic, como se muestra en la Figura 30; donde se muestra las opciones de diseño como la ejecución de un proyecto (Simulate), y lo más importante las librerías que nos ofrece esta herramienta.

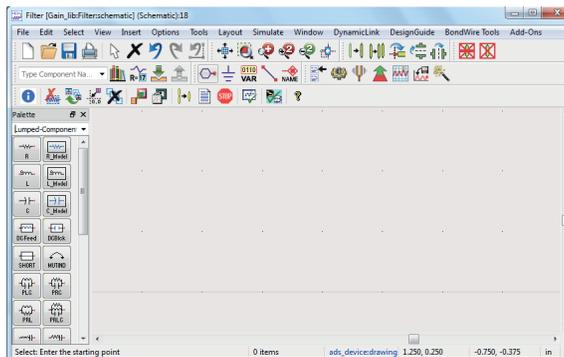


Figura 30. Entorno schematic - Keysight.

Para empezar a realizar el diseño del filtro con elementos concentrados, se utilizó la librería Lumped-component como se muestra en la Figura 31, en esta librería se observa una variedad de componentes concentrados tanto de forma individual como de forma concatenada en serie y paralelo; lo cual lo hace más interactivo en comparación con otras herramientas.

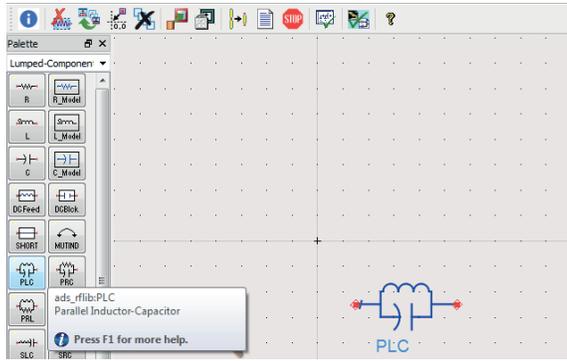


Figura 31. Librería lumped components de Keysight.

Por lo tanto, la Figura 32 muestra el diseño del filtro con la misma configuración realizado en el entorno de QUCS, en este caso varía un poco en cuanto al puerto utilizado, puesto que el entorno de Keysight dispone un puerto especializado para trabajos en alta frecuencia o RF, con una configuración de impedancia característica de  $Z_0 = 50\Omega$ .

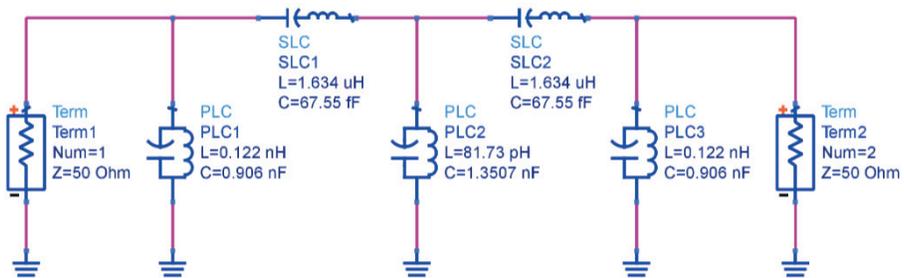


Figura 32. Filtro pasa-banda en entorno de Keysight.

Luego, se procedió a realizar la simulación correspondiente a fin de analizar la respuesta de los coeficientes de reflexión del filtro para poder realizar una comparativa con el entorno de diseño de QUCS. Por lo tanto, la Figura 33 muestra el coeficiente de reflexión directa  $S[2,1]$  para analizar la atenuación del filtro a frecuencia central, y las pérdidas de inserción en las frecuencias laterales.

Como se muestra en la Figura 33, la atenuación a frecuencia central de 479 MHz se obtiene 0.165 dB, y en las frecuencias de paso se obtiene una atenuación de 0.741 dB a 476 MHz, de manera similar a 482 MHz se obtiene 0.586 dB de atenuación. Mientras que en las frecuencias de pérdidas de inserción se tiene atenuaciones mayores a 60 dB.

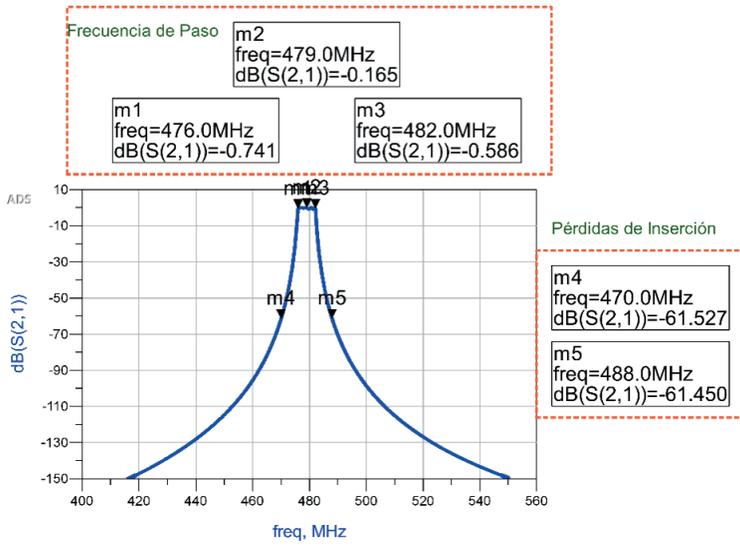


Figura 33. Respuesta de coeficiente de reflexión directa S[2,1].

Luego se analizó el coeficiente de reflexión S[1,1] a la entrada del filtro, como se muestra en la Figura 34; donde a frecuencia de corte inferior de 475.5 MHz se tiene una atenuación de 0.574 dB, de igual manera a frecuencia de corte superior de 482.4 MHz se tiene una atenuación de 0.720 dB.

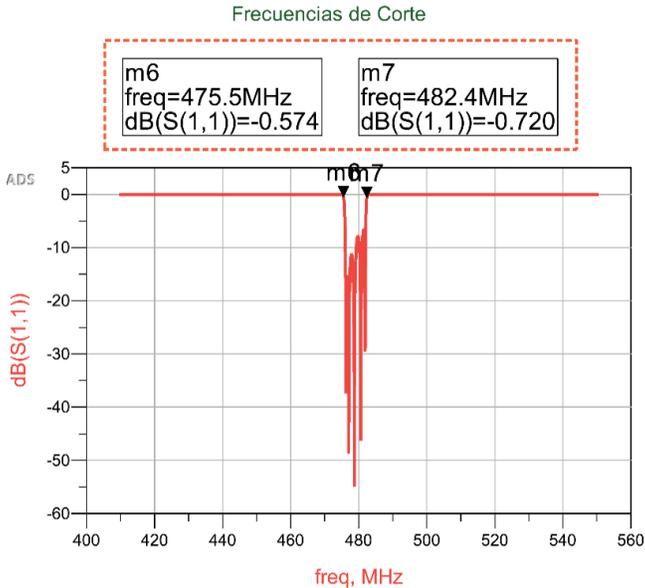


Figura 34. Respuesta de coeficiente de reflexión S[1,1].

Finalmente, se realizó una comparativa de resultados de los coeficientes de reflexión directa, y a la entrada del filtro, como se muestra en la Figura 35; donde se tiene un comportamiento de respuesta pasa-banda con algunas variaciones en los resultados de atenuación en comparación a los resultados obtenidos con el diseño del filtro en el entorno de trabajo de QUCS.

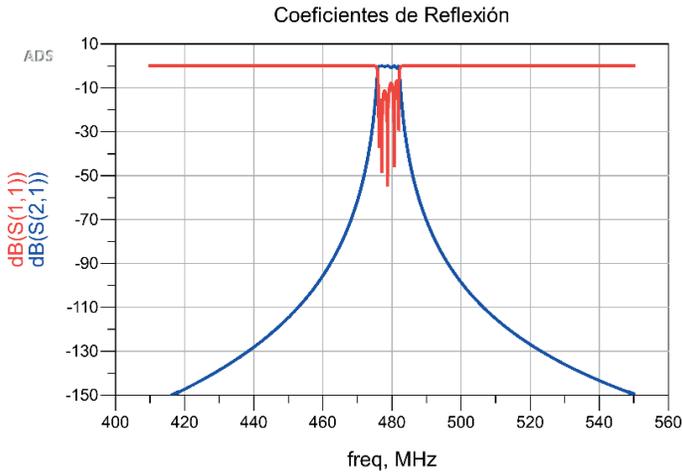


Figura 35. Respuesta de coeficientes de reflexión S[2,1] & S[1,1].

En esta etapa de desarrollo del proyecto de investigación, se realizó una comparativa de los resultados obtenidos con el entorno de desarrollo de QUCS & Keysight; donde se comprobó que el software de acceso libre QUCS tiene algunas variaciones mínimas en los resultados obtenidos en los coeficientes de reflexión, a comparación de los resultados obtenidos en el entorno de Keysight. Por lo tanto, podemos afirmar que el software QUCS tiene cualidades aceptables para el desarrollo de aplicaciones en alta frecuencia o radiofrecuencia.

## 4.2 DISEÑO DE FILTRO INTERDIGITAL CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP

En esta etapa del proyecto se explica el proceso de análisis y diseño del filtro pasa-banda utilizando líneas de transmisión microstrip, para este fin se seguirá una secuencia sistemática para establecer parámetros de diseño del filtro y algunas consideraciones para obtener óptimos resultados de simulación para luego ser caracterizado a fin de ver la funcionalidad del filtro en un ambiente real.

A continuación, se detalla el proceso de diseño del filtro utilizando tecnología microstrip. Para lo cual se estableció los parámetros de diseño a ser considerado en el análisis, diseño y simulación del filtro, el cual se muestra en la Tabla 7. Dónde, para fines de análisis de performance del filtro y cubrir un buen porcentaje de ancho de banda UHF; se estableció un ancho de banda fraccional;  $\Delta \leq 10\%$ .

Tabla 7. Parámetros de diseño del filtro interdigital con tecnología microstrip.

Parámetro	Valor
$f_c$	500 MHz
$\Delta$	$\leq 10\%$
$Z$	50 $\Omega$
$N$	5
$IL$	$\geq 40dB$

#### 4.2.1 Caracterización de una Línea de Transmisión Microstrip

A fin de evitar desadaptaciones de impedancia del filtro interdigital en un sistema de comunicación, lo primero será evaluar una línea de transmisión microstrip para establecer una impedancia característica de 50 $\Omega$ . Para lo cual se utilizó las Ecuaciones 13-16 a fin de obtener dicha impedancia en la línea de transmisión a ser diseñado en un sustrato FR4 comercial. Considerando las dimensiones físicas de una línea microstrip en función de los parámetros dieléctricos del sustrato, como se definió anteriormente con el uso de ecuaciones de análisis:

$$\text{Para; } \frac{W}{d} < 2$$

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}$$

$$\text{Para; } \frac{W}{d} > 2$$

$$\frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]$$

Donde:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

Por consiguiente, al realizar la caracterización del espesor del sustrato se determinó una dimensión aproximada de 1.52 mm y por referencia en (Rivera et al., 2021) se tiene un valor aproximado del espesor del conductor en 35  $\mu m$ . De igual manera se utilizó los coeficientes dieléctricos de un sustrato FR4 comercial. Por lo tanto, con estos parámetros se procedió a diseñar y simular la respuesta de impedancia característica de una línea microstrip a fin de ser utilizado en el diseño del filtro pasa-banda interdigital.

Para este proceso de diseño, se estableció un barrido de frecuencia lineal desde 290 MHz hasta 730 MHz con una resolución de 5000 puntos, como se muestra en la Figura 36.

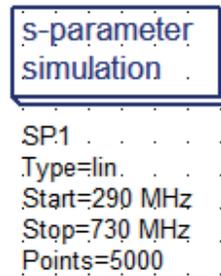


Figura 36. Parámetros de simulación S.

Luego en la ventana de componentes del software, se utilizó la librería que contiene componentes de líneas de transmisión microstrip (Transmission lines), a fin de analizar las dimensiones físicas de una línea microstrip para obtener impedancia característica en el filtro interdigital, como se muestra en la Figura 37.

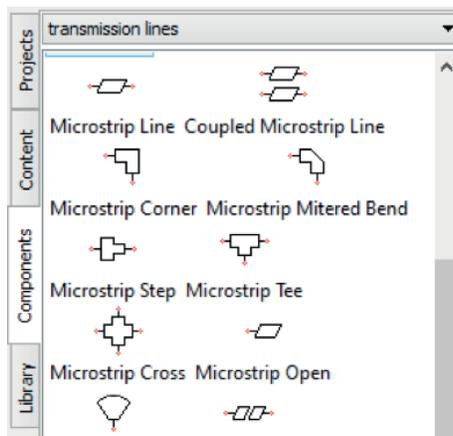


Figura 37. Componentes de líneas de transmisión microstrip.

Finalmente, con la utilización de ecuaciones definidas para el cálculo de dimensiones físicas de una línea microstrip; se determinó un espesor de línea de  $2.459 \text{ mm}$  aproximadamente para obtener una impedancia característica  $Z_0$ , mientras que la dimensión de longitud se obtuvo de  $10 \text{ mm}$ , cabe mencionar que la longitud de una línea microstrip no determina su impedancia, dicho parámetro solo se refleja en el desfase que presentaría una señal de RF. Por lo tanto, la Figura 38 muestra el diseño de la línea microstrip con impedancia característica.

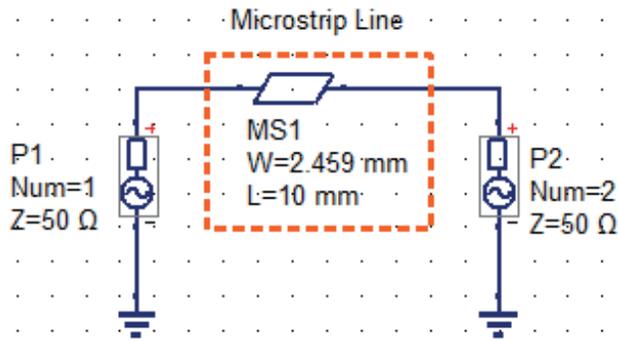


Figura 38. Línea de transmisión característica.

Finalmente, se tiene la respuesta de impedancia de la línea microstrip, como se muestra en la Figura 39, donde a frecuencia central de diseño de 500 MHz se obtiene un valor de impedancia de  $50.1 \Omega$ .

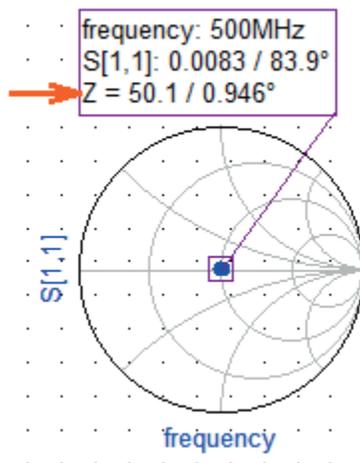


Figura 39. Impedancia característica de línea de transmisión microstrip.

Por consiguiente, en el resto de diseño del filtro interdigital se procederá con el uso de la dimensión de grosor de la línea de transmisión de  $2.459 \text{ mm}$  para garantizar impedancia característica del filtro pasa-banda.

#### 4.2.2 Diseño del Filtro Interdigital

Para el diseño del filtro interdigital de respuesta pasa-banda se utilizó el método de líneas acopladas interdigitales como se muestra en la Figura 40; donde se consideró las dimensiones métricas de una línea microstrip característica a fin de establecer una impedancia característica  $Z_0$  del filtro. Este diseño se utilizó en el proyecto de investigación porque presentó un diseño compacto es decir por su reducido tamaño en dimensiones físicas; a comparación de otras técnicas de diseño como líneas de transmisión acopladas,

en el cual se obtuvo una dimensión física en diseños realizados de casi 60 *cm* de longitud para la frecuencia central de diseño de 500 MHz, lo cual hace de un diseño no muy estético al momento de la implementación & fabricación. Por consiguiente, a raíz de múltiples diseños realizados, se consideró en utilizar la técnica interdigital en el desarrollo del proyecto por su respuesta bastante aceptable para frecuencias de trabajo en UHF.

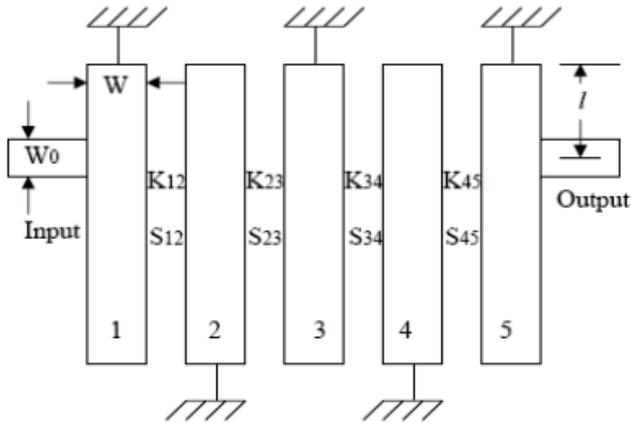


Figura 40. Filtro pasa-banda interdigital de orden  $N=5$  (Makrariya & Khare, 2015).

Los filtros de paso-banda interdigitales tienen varias características, como son estructuras muy compactas. Las tolerancias requeridas en la fabricación son relativamente tolerables debido al espacio compacto entre los elementos del resonador. En la mayoría de los casos, la longitud del resonador es ligeramente más corta que  $\lambda/4$  (Makrariya & Khare, 2015).

Esto facilita tanto el caso de afinación como el máximo factor de calidad descargado de cada resonador, el acoplamiento a la entrada y la salida se logra a través del contacto en el nivel bajo de la impedancia del resonador. La segunda banda de paso es centrada en tres veces la frecuencia central de la primera banda de paso. Además de eso, no hay posibilidades de espurias (respuestas intermedias). Por lo tanto, para los filtros con acoplamiento paralelo, resonadores de media longitud de onda, una banda de paso no deseado alrededor casi siempre se excita el doble de la frecuencia de banda media.

El filtro interdigital se puede fabricar en formas estructurales, que son autoportantes, por lo que no es necesario utilizar material dieléctrico. Por consiguiente, se puede eliminar la pérdida dieléctrica. La fuerza de la banda de parada y las tasas de corte se pueden mejorar con varios polos de pedido de atenuación en DC e incluso múltiplos de la frecuencia central de la primera banda de paso. Típicamente tienen menor pérdida que las estructuras de línea de tipo peine y son más fáciles de sintonizar. Este filtro pasa-banda interdigital de orificio de paso es particularmente adecuado para filtros de ancho de banda más amplio porque las dimensiones del filtro son más realizables que los filtros de acoplamiento lateral.

En esta etapa del proyecto de investigación, se analizó la longitud eléctrica  $\theta$  del filtro para un determinado ancho de banda, definido por la Ecuación (21)

$$\theta = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{BW}{2} \right) \quad (21)$$

Luego se determinó la admitancia  $Y$  en términos de  $Y_1$  usando  $\theta$ , como se define en la Ecuación (22)

$$Y = \frac{Y_1}{\tan \theta} \quad (22)$$

Donde:  $Y_1$ , es la admitancia de la línea microstrip de entrada.

Luego se procedió a determinar la siguiente relación, definido por la Ecuación (23)

$$J_{i,i+1} = \frac{Y_1}{\tan \theta \sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad , \quad \text{para: } i = 1 \dots n-1 \quad (23)$$

Donde:  $g_i$  representa valores de los elementos de tipo escalera de un prototipo de filtro pasa-bajo con una frecuencia de corte normalizado  $\Omega_c = 1$ .

Seguidamente, se determinó la admitancia  $Y_{i,i+1}$  de  $J_{i,i+1}$  utilizando la Ecuación (24)

$$Y_{i,i+1} = J_{i,i+1} \sin \theta \quad , \quad \text{para: } i = 1 \dots \quad (24)$$

Luego se procedió a determinar la admitancia característica  $Y_t$ , de las líneas microstrip del filtro interdigital, utilizando la Ecuación (25)

$$Y_t = Y_1 - \frac{Y_{1,2}^2}{Y_1} \quad (25)$$

En el cual se sustituye  $Y_t = \frac{1}{50}$ , y se obtiene  $Y_1$ .

En el desarrollo de este tipo de filtro interdigital simétrico de pasa-banda, donde todas las dimensiones de ancho de la línea microstrip son iguales, es decir  $W_i = W$ , para  $i = 1$  hasta  $n$ . Se utilizó las Ecuaciones 21-25, donde la admitancia característica de la entrada de resonador fue analizada, sabiendo que su inversa es igual a la impedancia característica  $Z_1$  a la entrada del resonador o filtro interdigital.

Por lo tanto, para determinar el ancho de la línea microstrip del filtro  $W_1$  con impedancia característica  $Z_1$ , se utilizó las Ecuaciones (26-27)

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \left( \frac{7\varepsilon_r + 4}{11\varepsilon_r} * A + \frac{\varepsilon_r + 1}{0.81\varepsilon_r} \right)^{1/2}}{A} \quad (26)$$

Donde:

$$A = e^{\left( \frac{Z_1}{42.4\sqrt{\varepsilon_r+1}} \right)} - 1 \quad (27)$$

Luego, la longitud eléctrica  $\theta_t$  de los terminales en corto circuito de la entrada y salida del filtro se determinó utilizando la Ecuación (28)

$$\theta_t = \frac{\sin^{-1} \left( \sqrt{\frac{Y \sin^2 \theta}{Y_0 g_0 g_1}} \right)}{1 - \frac{BW}{2}} \quad (28)$$

Luego para compensar el desplazamiento de frecuencia del filtro por efecto de la línea microstrip escalonado a la entrada y salida del filtro, se procedió a determinar la capacitancia definido por la Ecuación (29)

$$C_t = \frac{\cos \theta_t \sin^3 \theta_t}{\omega_0 Y_t \left( \frac{1}{Y_0^2} + \frac{\cos^2 \theta_t \sin^2 \theta_t}{Y_t^2} \right)} \quad (29)$$

De igual manera las impedancias par e impar de las líneas acopladas del filtro se determinó utilizando las Ecuaciones (30-31)

$$Z_{0e\ 1,2} = \frac{1}{Y_1 - Y_{1,2}} \quad (30)$$

$$Z_{0o\ 1,2} = \frac{1}{Y_1 + Y_{1,2}} \quad (31)$$

Para determinar las dimensiones de las longitudes de entrada y salida del filtro interdigital se utilizó la definición de la Ecuación (32)

$$l_1 = l_n = \frac{\lambda_{g01}}{4} - \Delta l_1 + \Delta l_c \quad (32)$$

Finalmente, la longitud física  $l_t$  medida a la entrada y salida del filtro terminado en corto circuito de la línea microstrip acoplada se determinó utilizando la Ecuación (33)

$$l_t = \frac{\theta_t}{2\pi} \lambda_{g01} \quad (33)$$

Realizado las configuraciones del filtro interdigital para un orden N=5, se diseñó la configuración esquemática del filtro a fin de generar el diseño Layout; para este fin también se utilizaron puertos de comunicación de impedancia característica el cual están establecidas por los componentes P1 & P2, de igual forma se utilizó conexiones a masa o tierra designados por las nomenclaturas MS14-20; como se muestra en la Figura 41 el diseño completo del filtro pasa-banda interdigital utilizando tecnología microstrip.

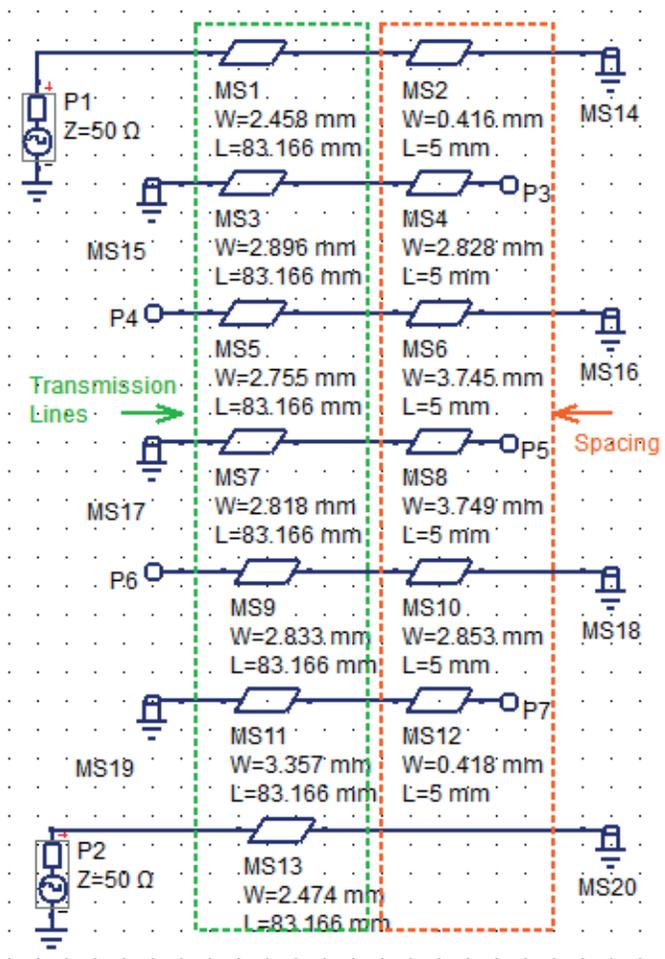


Figura 41. Diseño del filtro pasa-banda interdigital con tecnología microstrip.

Por lo tanto, la Tabla 8 resume todas las dimensiones físicas del filtro interdigital, determinado para su respectivo diseño y simulación.

Tabla 8. Dimensiones físicas calculadas del filtro interdigital microstrip.

Línea Microcinta	Ancho (Width)	Separación (Space)
Línea Tx 1 & 7	2.458 mm	0.416 mm
Línea Tx 2	2.896 mm	2.828 mm
Línea Tx 3	2.755 mm	3.745 mm
Línea Tx 4	2.818 mm	3.749 mm
Línea Tx 5	2.833 mm	2.853 mm
Línea Tx 6	3.357 mm	0.418 mm

### 4.2.3 Diseño PCB Layout

Para este proceso de diseño, se configuró la herramienta Create PCB layout del filtro diseñado a fin de establecer las dimensiones físicas calculadas de las líneas de transmisión microstrip. Por lo tanto, la Figura 42 muestra la configuración física del filtro pasa-banda interdigital en el sustrato FR4 caracterizado para su respectiva fabricación del proyecto.



Figura 42. Generación PCB layout del filtro interdigital.

### 4.2.4 Simulación de Coeficientes de Reflexión

Luego se realizó la simulación de los coeficientes de reflexión directa  $S[2,1]$  &  $S[1,1]$  a fin de verificar el comportamiento de respuesta pasa-banda. Por lo tanto, la Figura 43 muestra la respuesta del filtro interdigital diseñado. Donde a frecuencia inferior de paso de 480 MHz se obtuvo una atenuación de 7.73 dB, mientras que a frecuencia superior de paso a 520 MHz se obtuvo 8.55 dB de atenuación; por consiguiente, a la frecuencia central de diseño de 500 MHz se obtuvo una atenuación de 6.53 dB. Análogamente se caracterizó las frecuencias de pérdidas de inserción para verificar la atenuación requerida según se estableció en los parámetros de diseño, con el objetivo de cumplir una atenuación mayor o igual a 40 dB, y analizando el resultado del coeficiente de reflexión  $S[2,1]$  se puede ver que la atenuación en ambas frecuencias está cumpliendo con dicho parámetro de diseño.

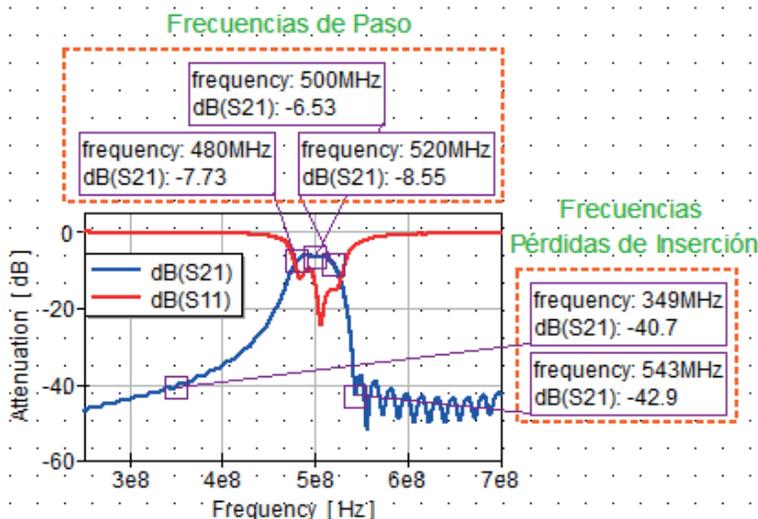


Figura 43. Coeficientes de reflexión del filtro interdigital.

#### 4.2.5 Simulación de Impedancia Característica

La Figura 44 muestra la respuesta de la impedancia característica del filtro interdigital diseñado, para dicho análisis se utilizó la carta de Smith; donde se tomó como referencia las frecuencias de paso desde 481 MHz hasta 515 MHz, rango de frecuencias donde la impedancia característica del filtro dispone de  $45 \Omega$ .

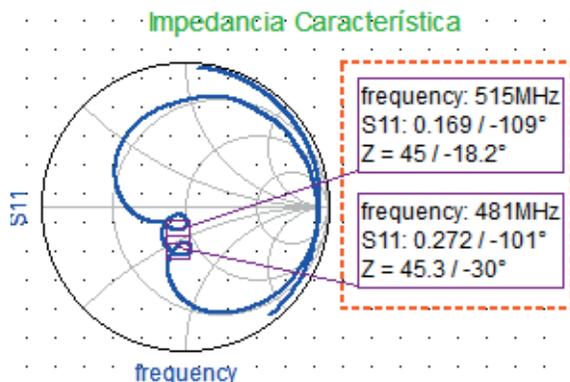


Figura 44. Impedancia característica del filtro interdigital.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 5.1 MÉTODO DE FABRICACIÓN

Para el proceso de fabricación del filtro interdigital se desarrolló utilizando el método de insolación, a fin de tener las dimensiones métricas de diseño Layout del filtro con la mayor precisión posible. La Figura 45 muestra el diseño layout del filtro para luego ser fabricado en un sustrato FR4.



Figura 45. Proceso de insolación PBC del filtro diseñado.

Siguiendo con el proceso de fabricación del filtro, la Figura 46 muestra el producto terminado después de un proceso sistemático para su correcto funcionamiento; acorde a las dimensiones físicas obtenidas en el proceso de análisis y diseño. También se consideró la conexión de dos puertos SMA para la respectiva medición y caracterización propia con un analizador de redes vectoriales. Finalmente, se consideró la conexión interdigital de plano de masa o tierra al extremo de cada línea de transmisión interdigital, como se diseñó en la configuración schematic del proyecto.

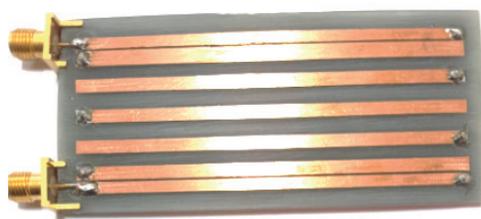


Figura 46. Filtro interdigital fabricado.

## 5.2 MEDICIÓN DEL FILTRO INTERDIGITAL & VNA

En esta etapa de medición del proyecto se realizó la caracterización de los parámetros de reflexión  $S[2,1]$  &  $S[1,1]$  utilizando un analizador de redes vectoriales, como se muestra en la Figura 47.



Figura 47. Medición de coeficientes de reflexión utilizando VNA.

Por consiguiente, para caracterizar mejor dichos parámetros de reflexión, se realizó la exportación de los datos medidos para luego ser representados en el software QUCS; como se muestra en la Figura 48. Donde el coeficiente de reflexión directa  $S[2,1]$  a frecuencia central de 518 MHz tiene una atenuación de 5.31 dB. De igual manera se tiene resultados de la medición de las frecuencias laterales de paso; donde, a frecuencia de 492 MHz se obtiene una atenuación de 5.86 dB, mientras que a frecuencia de 530 MHz se obtuvo una atenuación de 6.57 dB.

Y con respecto a la medición de atenuaciones en las frecuencias de pérdidas de inserción se obtuvo; a frecuencia lateral superior de 574 MHz se tiene un promedio de atenuación de 40.5 dB, mientras que a frecuencia de pérdida de inserción inferior de 348 MHz se tiene una atenuación de 34.7 dB.

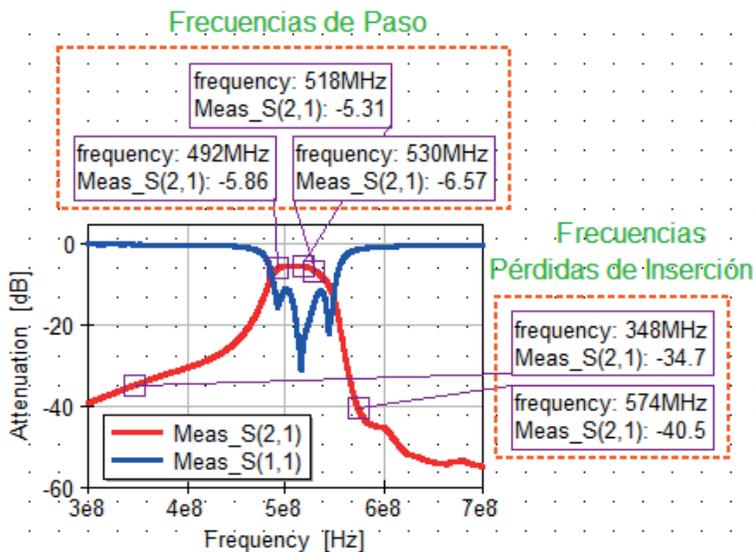


Figura 48. Representación de coeficientes de reflexión utilizando QUCS.

De manera similar se realizó la medición y caracterización de la impedancia característica del filtro en las frecuencias de banda de paso, como se muestra en la Figura 49. La impedancia óptima del filtro se sitúa en la frecuencia central de 518 MHz donde se obtiene  $Z_L = 50 \Omega$ . Sin embargo, a frecuencias laterales de paso se obtienen valores de impedancia cercano a  $Z_0$ .

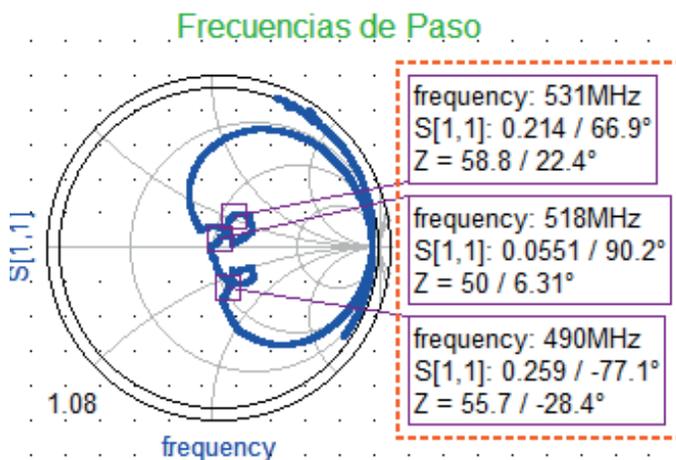


Figura 49. Medición de impedancia característica del filtro fabricado.

También se realizó la medición de la relación de onda estacionaria de voltaje; VSWR, para determinar si el filtro diseñado se adapta de una manera óptima ante la presencia de una carga referencial en el rango de frecuencias de la banda de paso. Por lo tanto, la Figura 50 muestra la caracterización realizada del parámetro VSWR del filtro interdigital. Donde se puede ver que en las frecuencias de corte inferior y superior se obtiene valores de VSWR; de 1.19 y 1.15, siendo la mejor respuesta a frecuencia central de 518 MHz con un valor de VSWR=1.

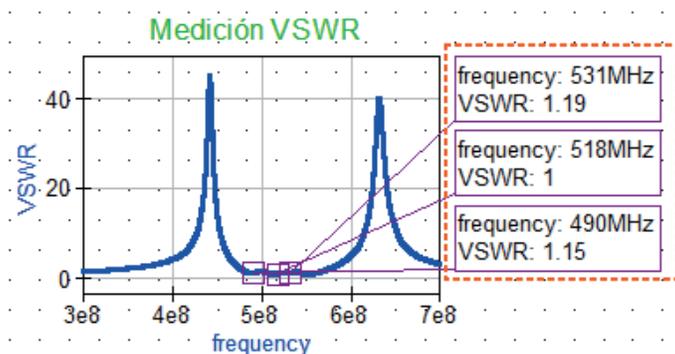


Figura 50. Medición de VSWR del filtro fabricado.

### 5.3 MEDICIÓN DEL FILTRO INTERDIGITAL & AA-1400

Para la prueba de test de campo del filtro diseñado se realizó la medición VSWR utilizando un analizador de antenas modelo AA-1400, a fin de verificar la frecuencia de resonancia del filtro como también su impedancia característica. Como se puede ver en la Figura 51, la relación VSWR a una frecuencia pico de resonancia de 521.625 MHz obtiene un valor medido de 1.09, lo cual nos indica que es la frecuencia de resonancia con la mejor respuesta para la frecuencia central.

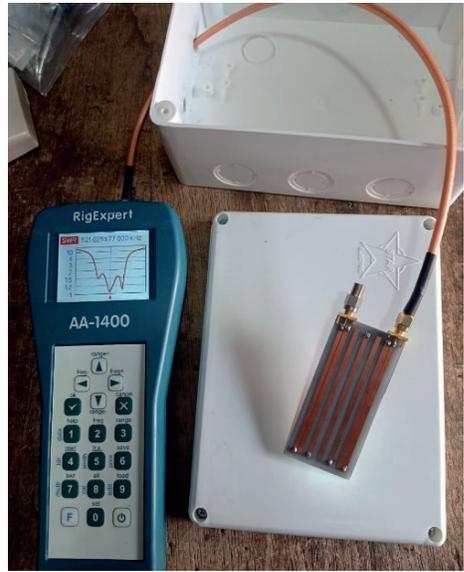
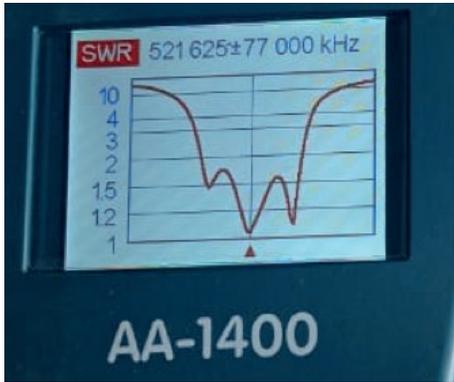


Figura 51. Medición de VSWR del filtro fabricado utilizando AA-1400.

Concerniente a la impedancia que posee el filtro diseñado, como se muestra en la Figura 52, donde a frecuencia de 521. 625 MHz se tiene una impedancia del filtro de  $46 \Omega$ , indicando así un valor de impedancia bastante aceptable para efectos de prevenir posibles reflexiones al momento de poner operativo nuestra aplicación en un ambiente de radiofrecuencia UHF.



Figura 52. Medición de impedancia del filtro fabricado utilizando AA-1400.

## 5.4 DISCUSIONES

En primer lugar, se ha analizado el diseño de un filtro pasa-banda desarrollado con elementos concentrados, para este fin se utilizó las herramientas de diseño y simulación: QUCS & ADS, a fin de comparar los resultados de los coeficientes de reflexión de ambas herramientas.

Por lo tanto, la Tabla 9 muestra la comparación de resultados obtenidos de la simulación de coeficientes de reflexión directa  $S[2,1]$ ; donde, se puede analizar que se tiene una diferencia mínima en cuanto a los valores de atenuaciones obtenidos por ambas herramientas. Por consiguiente, la respuesta de un comportamiento de pasa-banda en ambas herramientas es muy selectivo en frecuencia; sin embargo, cabe mencionar que es una simulación ideal, puesto que si se pretendiera realizar la fabricación del filtro sería muy complicado por los valores obtenidos en algunos componentes concentrados (inductores & capacitores) puesto que se tienen valores muy ideales como:  $81.73 \text{ pH}$  y  $67.55 \text{ fF}$ .

Tabla 9. Resultados de simulación del coeficiente  $S[2,1]$  en entornos de QUCS & ADS.

COEFICIENTES [2,1]	FRECUENCIA [MHz]	QUCS Atenuación [dB]	ADS Atenuación [dB]
Banda de Paso	476	0.741	0.741
	479	0.094	0.165
	482	0.909	0.586
Pérdidas de Inserción	470	63.7	61.527
	488	63.9	61.450

Por tal razón, se ha propuesto analizar y diseñar un filtro interdigital microstrip para obtener una respuesta pasa-banda a frecuencia central de 500 MHz, utilizando QUCS para aplicaciones en UHF.

Por lo tanto, la Tabla 10 muestra una comparativa de resultados de simulación y medición concerniente a los parámetros de reflexión directa  $S[2,1]$ . Donde se puede analizar que existe un desfaseamiento en la banda de paso; referente a la simulación a frecuencia central de diseño de 500 MHz, se obtuvo una atenuación de 6.53 dB; mientras que la medición VNA a mejor frecuencia central se dio a 518 MHz con una atenuación de 5.31 dB. Por otro lado, se tiene un comportamiento en su ancho de banda de 40 MHz y 38 MHz, respectivamente en la simulación como en la medición VNA lo cual está acorde a la establecido en los parámetros de diseño concerniente a su ancho de banda fraccional  $\Delta \leq 10\%$ .

En este punto queremos enfatizar que este fenómeno de desfase es causado por el parámetro dieléctrico relativo;  $\epsilon_r$  del sustrato FR4 utilizado, puesto que en este tipo de aplicaciones dicho parámetro tiene una relación directa con la frecuencia de diseño. Este

comportamiento es habitual porque en el proyecto de investigación se utilizó un sustrato FR4 comercial y de bajo costo, lo que implica que sus parámetros dieléctricos tienen mayor pérdida; a comparación de sustratos especiales para este tipo de trabajos microstrip como de la firma ROGERS, el cual poseen mínimas pérdidas para un diseño microstrip óptimo.

Finalmente, analizando las atenuaciones en las pérdidas de inserción se tiene una diferencia aceptable entre resultados de la simulación y medición; donde se consigné obtener una atenuación mayor o igual a 40 dB.

Tabla 10. Comparativa de resultados - parámetro S[2,1], simulación & medición VNA.

SIMULACIÓN		MEDICIÓN - VNA	
FRECUENCIA [MHz]	PARÁMETROS [2,1] - dB	FRECUENCIA [MHz]	PARÁMETROS [2,1] - dB
480	-7.73	492	-5.86
500	-6.53	518	-5.31
520	-8.55	530	-6.57
349	-40.7	348	-34.7
543	-42.9	574	-40.5

## 5.5 CONCLUSIONES

Se ha realizado el estudio y diseño de un filtro interdigital de respuesta pasa-banda utilizando tecnología microstrip para aplicaciones de radiofrecuencia en la banda UHF del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

Se utilizó el software QUCS como principal herramienta de análisis y diseño para el desarrollo del presente proyecto de investigación, el cual es una herramienta de código abierto para aplicaciones en radiofrecuencia y microondas.

Se han obtenido resultados bastante prometedores con respecto a los parámetros de diseño establecidos y las mediciones realizadas. Donde, se ha verificado que existe un desfaseamiento con respecto a la frecuencia central de diseño de 500 MHz; frente a la medición real obtenida con el VNA, donde a frecuencia central 518 MHz se ha obtenido una mejor respuesta en atenuación e impedancia.

Finalmente, como propuesta de trabajos futuros se propone diseñar filtros interdigitales microstrip con anchos de banda más selectivos, es decir con mejores respuestas de pérdida de inserción que pudieran superar los 60 dB de atenuación.

...

# BIBLIOGRAFÍA

Cansever, C. (2013). *Design of a Microstrip Bandpass Filter for 3.1-10.6 GHz Uwb Systems*. Syracuse University.

Chaudhary, M., Roshani, S., & Shabani, S. (2023). A Miniaturized Dual-Band Diplexer Design with High Port Isolation for UHF/SHF Applications Using a Neural Network Model. *Artificial Intelligence for Micro/Nano Materials and Devices*. doi:<https://doi.org/10.3390/mi14040849>

Collin, R. (2001). *Foundations for microwave engineering*. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.

Comunicaciones, M. d. (s.f.). *Normas técnicas del servicio de radiodifusión*. Obtenido de <https://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/autorizaciones/radiodifusion/documentos/nradio.pdf>

Davis, W., & Agarwal, K. (2001). *Radio frequency circuit design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Gupta, K., Garg, R., Bahl, I., & Bhartia, P. (1996). *Microstrip lines and slotlines*. Boston: Artech House.

Huamán Palma, R. (2018). *Diseño de un sistema de ampliación de cobertura celular para las bandas de frecuencias en 850 MHz y 1900 MHz*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Ibrahim, A. A., Ali, W. A., & Abdelghany, M. A. (15 de octubre de 2020). Design of Dual-Band Dual-Mode Band-Pass Filter Utilizing 0° Feed Structure and Lumped Capacitors for WLAN/WiMAX Applications. *Electronics, Microwave and Wireless Communications*, 1-14. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics9101697>

Johnson, C., & Sothares, W. (2003). *Telecommunication breakdown concepts of communication transmitted via software-defined radio*. University of Wisconsin - Madison.

Johnson, J. C. (2003). *Telecommunication breakdown*. USA: School of electrical and computer engineering, Cornell University.

Liu, B. (2013). *Design a bandpass filter for GSM 900*. Sweden: University of Gavle.

Makrariya, A., & Khare, P. (2015). Design and analysis of a 5-pole interdigital band-pass filter at 2.4GHz. *2015 International Conference on Communication Networks*, 93-96. doi:10.1109/ICCN.2015.19

Pozar, D. (2012). *Microwave engineering*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Rivera Suaña, J. A., & Castillo Alarcón, O. (2023). *Fundamentos de Ingeniería de Microondas y Aplicaciones en Filtros* (Vol. I). Juliaca, Perú.

Rivera Suaña, J. A., Mendoza Montoya, J. J., Castillo Alarcón, O., & Ávila Navarro, E. (2021). Using Open-Source Software QucsStudio to Design a Microwave Amplifier for SDR Applications. *2021 IEEE URUCON*, 177-181. doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647337

Saran Krishna, K. (2014). *Investigations on some planar microwave filters*. Odisha: National institute of technology Rourkela.

Steer, M. (2010). *Microwave and RF design, a systems approach*. USA: Scitech publishing, Inc.

Tu, Y. (2016). *Design, modelling and implementation of several multi-standard high performance single-wideband and multi-wideband microwave planar filters*. University of Bradford.

# ANEXOS

## **PAPER SUBMITTED**

Analysis and Design of an Interdigital Band-pass Filter Developed with Distributed Elements Using Free Software. In: Proceedings of the 9th Brazilian Technology Symposium (BTSym'23) Emerging Trends in Human Smart and Sustainable Future of Cities (Volume 1). Springer (2023).

**JAVIER ALVARO RIVERA SUAÑA** - es Ingeniero Electrónico, cuenta con un master en electrónica. Docente universitario con especialidad en el diseño y optimización de componentes de microondas y procesamiento de señales.

<https://orcid.org/0000-0002-8943-7414>

**ALBERTO PARICAHUA HUAYNAPATA** - es Ingeniero Mecánico Electricista de profesión, maestro en educación, mención: investigación y docencia en educación superior. Actualmente es docente universitario.

<https://orcid.org/0000-0001-6315-3600>

**RAÚL REYNALDO ITO DÍAZ** - es Ingeniero de Sistemas, Lic. en Educación con especialidad en Matemáticas, con Maestría en Marketing y Finanzas, con segunda especialidad en didáctica universitaria. Docente de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Docente de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables de la Universidad Nacional de Juliaca.

<https://orcid.org/0000-0003-3370-5990>

**ARMANDO ANTONIO SALINAS DEL CARPIO** - es Ingeniero Mecánico Electricista de profesión, maestro en Proyectos de Inversión (U. Católica de Santa María de Arequipa-Perú) y maestro en Energías Renovables y Proyectos Energéticos (U. de Alcalá en Madrid-España), especialista en Gestión de Mantenimiento Industrial (TECSUP-SUR). Docente universitario especialista en Energía Eólica, Desarrollador de proyectos de generación de energía eléctrica utilizando energías renovables (eólico y solar).

<https://orcid.org/0000-0002-1032-0388>

# PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ESTUDIO Y DISEÑO DE FILTRO INTERDIGITAL  
CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA  
APLICACIONES EN UHF;  
UTILIZANDO SOFTWARE LIBRE

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ESTUDIO Y DISEÑO DE FILTRO INTERDIGITAL  
CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA  
APLICACIONES EN UHF;  
UTILIZANDO SOFTWARE LIBRE

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)