

Implementación de un Filtro Impreso Pasabanda para el Estudio de la Línea de Hidrógeno
(Longitud de Onda de 21 Cm) cómo parte del Radiotelescopio Uis.

Paola Oquendo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

Director

Efrén Darío Acevedo Cárdenas

MSC Ingeniería Electrónica

Codirector

Julián Gustavo Rodríguez Ferreira

PhD Astrofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Liliana Medina, mi mejor amiga, por su constante apoyo y cariño.

A Alexandra Oquendo, mi hermana, por estar siempre a mi lado.

A mi abuela, por su amor incondicional y sabios consejos.

A mis queridos perros, por su compañía fiel y alegría contagiosa.

A mí mismo, por mi dedicación y esfuerzo en este logro.

¡Gracias a todos por estar siempre a mi lado!

Agradecimientos

Mis agradecimientos sinceros a todas las personas e instituciones que posibilitaron la realización de este proyecto. En primer lugar, quiero expresar mi gratitud de manera especial a mi director, Efrén Acevedo, cuya orientación, apoyo y guía fueron invaluable durante todo el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos y experiencia fueron fundamentales para dar forma y dirección a mis ideas.

Asimismo, deseo agradecer a la Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de estudiar y formarme como profesional. Gracias a esta institución, he adquirido los conocimientos y habilidades necesarios para llevar a cabo este proyecto con éxito.

Finalmente, quiero dedicar un agradecimiento especial a mis fieles compañeros peludos, mis perros, cuya lealtad y alegría han sido una fuente constante de inspiración y compañía durante todo este camino.

¡Gracias a todos por hacer posible este logro!

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Marco teórico	14
1.1 Antecedentes	14
1.2 Radioastronomía	16
1.3 Radiotelescopios	18
1.3.1 La Emisión de la línea de 21 cm	19
1.4 Aplicaciones de la detección.....	21
1.5 Teoría de Líneas de Transmisión	21
1.8 Filtros Microstrip	23
1.9 Materiales utilizados para el diseño de circuitos de alta frecuencia.	25
1.10 Topologías de Diseño Microstrip.....	26
1.10.1 Discontinuidad de Paso.....	27
1.10.2 Discontinuidad de Extremo Abierto	27
1.10.3 Discontinuidad de Brecha	27
1.10.4 Discontinuidad de Curvatura	28
2. Objetivos.....	29
2.1 Objetivo General.....	29
2.2 Objetivos Específicos.....	29
3. Análisis de Filtros Pasabanda para Radioastronomía	30
3.1 Topología de Filtro Pasa Banda Hairpin.....	31
3.2 Topología de Filtro Pasabanda Interdigital.....	32

3.3 Consideraciones Técnicas y Recomendación Final para el Filtro	33
4. Implementación y Validación de los Filtros Pasabanda	36
4.1 Metodología de diseño.....	36
4.1.1 Diseño del Filtro	37
4.1.1.1 Cálculo de Dimensiones Iniciales.....	37
4.1.2 Simulaciones y Ajustes Finos con Ansys HFSS Student 3D.....	44
4.1.3 Generación y Fabricación de Prototipos Altium designer	54
4.2 Análisis y comparación de Resultados	54
4.2.1 Resultados Simulados vs. Resultados Experimentales	62
4.2.1.1 Identificación del Mejor Filtro.....	62
4.2.1.2 Factores Determinantes de los Resultados.....	66
4.3 Problemas Durante el Proyecto y Errores para Futuras Mejoras	66
5. Conclusiones.....	70
6. Recomendaciones	73
Referencias Bibliográficas	75
Apéndices.....	82

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Características y precios de componentes electrónicos para diseño de RF</i>	26
Tabla 2. <i>Comparación de las propiedades de los sustratos FR4 y Rogers 5880</i>	35
Tabla 3. <i>Parámetros del Filtro Microstrip</i>	42
Tabla 4. <i>Parámetros del filtro y sus valores</i>	42
Tabla 5. <i>Características de simulación S21 de filtros y tamaño con FR4 (simulación)</i>	46
Tabla 6. <i>Características de simulación de filtros y tamaño con Rogers 5880 (simulación)</i>	46
Tabla 7. <i>Parámetros de desempeño de filtros con diferente topologías y cotas de atenuación (simulación)</i>	49
Tabla 8. <i>Ventajas y desventajas de diferentes topologías de filtros diseñado (simulación)</i>	50
Tabla 9. <i>Comparación Resultados Simulados vs. Resultados Experimentales</i>	54
Tabla 10. <i>Comparación de Parámetros de Filtros Microstrip para 1.42 GHz (experimental)</i> ...	58
Tabla 11. <i>Comparación de Ventajas y Desventajas de Diferentes Filtros Microstrip para 1.42 GHz</i>	61
Tabla 12. <i>Verificar las malas prácticas aplicadas al momento de diseñar, fabricar e implementar los filtros</i>	69

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Ejemplo de filtro de 1.42GHz de gran calidad y diseño</i>	16
Figura 2. <i>Observación astronómica con distintos instrumentos</i>	17
Figura 3. <i>Radio interferómetros</i>	18
Figura 4. <i>Esquema simplificado de un radio telescopio</i>	19
Figura 5. <i>Formación de la línea de hidrógeno de 21 cm</i>	20
Figura 6. <i>General Microstrip estructura</i>	24
Figura 7. <i>Tarjeta de circuito impreso para RF</i>	25
Figura 8. <i>Estructuras típicas y sus circuitos equivalentes</i>	28
Figura 9. <i>Diseño de filtro Hairpin-line</i>	32
Figura 10. <i>Diseño de filtro pasabanda interdigital</i>	33
Figura 11. <i>Estrategia de diseño</i>	36
Figura 12. <i>Metodología utilizada Hairpin pasabanda (HBPF)</i>	37
Figura 13. <i>Diseño de topologías usando FR4</i>	43
Figura 14. <i>Diseño de topologías usando Rogers 5880</i>	43
Figura 15. <i>Simulación de Parámetros de Dispersión S11 y S21 para Filtros Pasabanda Rogers 5880</i>	47
Figura 16. <i>Simulación de Parámetros de Dispersión S11 y S21 para Filtros Pasabanda FR4</i> ..	48
Figura 17. <i>Medidas del diseño PCB del filtro Microstrip tipo Hairpin DGS Rogers 5880</i>	54
Figura 18. <i>Prototipos de Filtros Pasabanda de Microstrip en Diferentes Topologías</i>	55
Figura 19. <i>Cartas de Smith para el análisis de parámetros S11 de los filtros experimentales</i> ...	56
Figura 20. <i>Comparación de Topologías Implementadas: Simulación vs. Mediciones</i>	56

Figura 21. <i>Comparación de topologías por material para el ancho de banda (simulación)</i>	63
Figura 22. <i>Comparación de S21 a 1420 MHz (simulación)</i>	64
Figura 23. <i>Comparación S11 a 1420 MHz (simulación)</i>	65
Figura 24. <i>Filtro de microstrip con defecto en la impresión del material Rogers 5880</i>	68

Resumen

Título: Implementación de un filtro impreso pasabanda para el estudio de la línea de hidrógeno (longitud de onda de 21 cm) cómo parte del radiotelescopio UIS*

Autor: Paola Oquendo**

Palabras Clave: Radioastronomía, Filtros impresos, Medios de transmisión.

Descripción: Con el desarrollo del proyecto se buscó evaluar diversas topologías de diseño de filtros impresos en sustratos especializados para implementar un filtro pasabanda que permitiera el estudio de la línea de hidrógeno como parte del radiotelescopio UIS, que en su fase inicial se estaba construyendo para la banda de los 21 cm. Basados en las restricciones técnicas de los instrumentos usados en radioastronomía y respaldados en documentación científica de filtros utilizados para este fin, se estableció una serie de requerimientos técnicos que fueron el pilar del proyecto y que se esperaba cubrir con la investigación.

Bajo simulación en un software de análisis electromagnético 3D, se estudió el comportamiento de varios sustratos especializados, y mediante parámetros de ajuste se determinó cuál de ellos cumplía con los requisitos técnicos de los filtros usados en radioastronomía (nuestra figura de mérito estuvo basada en tres criterios: pérdidas de retorno, pérdidas de inserción y ancho de banda). Luego de los resultados de simulación, se esperaba implementar sobre un sustrato y medir los parámetros de dispersión para evaluar los resultados de la investigación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Programa académico. Director: Efrén Darío Acevedo Cárdenas. MSC ingeniería electrónica Codirector: Julián Gustavo Rodríguez Ferreira PhD Astrofísica

Abstract

Title: Implementation of a printed bandpass filter for the study of the hydrogen line (wavelength of 21 cm) as part of the uis radio telescope*

Author(s): Paola Oquendo**

Key Words: Radioastronomy, Printed Filters, Transmission Media

Description: With the development of the project, the aim was to evaluate various design topologies of printed filters on specialized substrates to implement a bandpass filter that would allow the study of the hydrogen line as part of the UIS radio telescope, which in its initial phase was being built for the 21 cm band. Based on the technical constraints of the instruments used in radio astronomy and supported by scientific documentation of filters used for this purpose, a series of technical requirements were established, which became the foundation of the project and were expected to be met through the research.

Through simulations in 3D electromagnetic analysis software, the behavior of various specialized substrates was studied, and through adjustment parameters, it was determined which of them met the technical requirements of the filters used in radio astronomy (our figure of merit was based on three criteria: return losses, insertion losses, and bandwidth). After the simulation results, it was expected to implement on a substrate and measure the scattering parameters to evaluate the results of the research.

* Degree Work

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Academic Program. Director: Efrén Darío Acevedo Cárdenas. MSC Electronic Engineering Codirector: Julián Gustavo Rodríguez Ferreira, PhD in Astrophysics

Introducción

El presente proyecto se enfoca en la evaluación y selección de topologías de diseño de filtros impresos sobre sustratos especializados, específicamente para la implementación de un filtro pasabanda destinado al estudio de la línea de hidrógeno con longitud de onda de 21 cm, integrado al radiotelescopio UIS. En el ámbito de la radioastronomía, la precisión y sensibilidad de los instrumentos son cruciales para el estudio detallado de fenómenos astronómicos. En este contexto, el diseño y la implementación de filtros pasabanda especializados juegan un papel fundamental al optimizar la capacidad de observación de los radiotelescopios.

El radiotelescopio UIS se encuentra en su fase inicial de construcción para la banda de los 21 cm, requiriendo un filtro pasabanda específico para mejorar su capacidad de observación en la línea de hidrógeno. Este diseño implica abordar desafíos técnicos significativos para asegurar el funcionamiento en condiciones reales de observación. La investigación previa en la literatura científica proporciona diversas topologías de diseño de filtros, utilizadas con éxito en la radioastronomía ([Pal et al., 2012](#); [Yu et al., 2009](#); [Li et al., 2003](#)). Este estudio establece una base inicial para la selección y adaptación de las topologías adecuadas a las necesidades específicas del radiotelescopio UIS, ampliando de esta forma los alcances técnicos de la universidad industrial de Santander frente a los retos de ingeniería presentes en el estudio de la línea de hidrogeno facilitando así avances significativos en la capacidad de estudio de la línea de hidrógeno.

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica sobre filtros pasivos de microstrip RF, evaluando diversas topologías. Un ejemplo relevante es el filtro de acoplamiento

paralelo en cascada con respuesta de trisección, descrito por [Lu, Liao y Chang \(2008\)](#), que, aunque fue estudiado y simulado, no pudo ser implementado debido a las restricciones de tamaño a la frecuencia de 1.42 GHz. A pesar de esto, su análisis fue crucial para adquirir conocimientos y establecer las bases del desarrollo del filtro diseñado en este trabajo de grado.

El propósito de este proyecto radica en diseñar e implementar un filtro impreso pasabanda que cumpla con los requisitos técnicos y especificaciones para el estudio preciso de la línea de hidrógeno en el radiotelescopio UIS. Para alcanzar este objetivo, se lleva a cabo actividades como el estudio detallado de las topologías de diseño disponibles, la simulación avanzada en software de análisis electromagnético 3D, la identificación de estrategias de diseño, y la implementación práctica sobre sustratos especializados. Este enfoque integral no solo fortalece las capacidades tecnológicas y científicas de la Universidad, sino que también ofrece una valiosa oportunidad educativa para los estudiantes, quienes podrán aplicar teorías y conceptos aprendidos para la investigación espacial y la radioastronomía. La selección y diseño adecuado del filtro pasabanda permitirá obtener datos más precisos y relevantes sobre la línea de hidrógeno, lo que impulsará el conocimiento científico en esta área.

El uso de materiales comunes en la construcción de filtros de alta frecuencia es clave para reducir costos y fortalecer la capacidad investigativa de la Universidad, promoviendo la sostenibilidad y el desarrollo tecnológico. Durante el proceso, se trabajó con dos materiales principales para la fabricación de los filtros: Rogers 5880, con una permitividad relativa de 2.2, y FR4, un sustrato más común en la fabricación de circuitos impresos. Utilizando el software de simulación electromagnética tridimensional Ansys HFSS Student, se probaron distintas topologías

de filtros, y aquellas que mostraron mejores resultados se diseñaron en PCBs mediante Altium Designer, permitiendo así observar su desempeño en la práctica.

En el laboratorio, se realizaron mediciones utilizando un analizador de espectro ZVL6 Rohde & Schwarz calibrado, el cual proporcionó los parámetros S11 y S21, los cuales fueron procesados mediante MATLAB para extraer la carta de Smith y Ganancia del filtro realizando un análisis detallado de la respuesta en frecuencia. A partir de estas mediciones, se obtuvieron archivos CSV que permitieron visualizar la efectividad de los filtros y realizar los análisis necesarios en los diseños.

Finalmente, se realizaron comparaciones detalladas de las diferentes topologías estudiadas, evaluando su rendimiento según las pérdidas de inserción, retorno, ancho de banda, y tamaño. Estas comparaciones se presentaron en tablas que mostraban el comportamiento de los filtros según los materiales utilizados y las características físicas de cada uno. De esta manera, se lograron identificar los filtros más eficientes y viables para su implementación en futuras aplicaciones de radioastronomía, aportando una solución efectiva para el estudio de la línea de hidrógeno a 1.42 GHz.

1. Marco teórico

1.1 Antecedentes

Los filtros pasivos en radioastronomía ofrecen varias ventajas clave: son simples y confiables al no requerir energía externa, presentan baja pérdida de inserción, alta estabilidad térmica y eléctrica, y generan menos ruido, lo que es esencial para captar señales débiles. Además, su durabilidad y bajo mantenimiento los hacen ideales para entornos remotos. También pueden diseñarse para operar en un amplio rango de frecuencias, lo que es útil en diversas aplicaciones astronómicas, asegurando precisión y eficiencia en la detección de señales.

El diseño de filtros pasa banda tipo Hairpin en tecnología de microstrip ha sido ampliamente estudiado debido a su alta eficiencia y diseño compacto. Estos filtros se caracterizan por plegar resonadores de media longitud de onda, optimizando espacio sin comprometer el rendimiento. En aplicaciones de alta frecuencia, como comunicaciones satelitales y radares en la banda S, los filtros Hairpin han mostrado ser una solución efectiva para lograr un buen acoplamiento y minimizar las pérdidas de inserción.

Los estudios revisados se centran en la simulación de estos filtros usando diferentes sustratos, como FR4 y Rogers, demostrando cómo las propiedades dieléctricas del material afectan directamente las características del filtro, incluyendo su ancho de banda, frecuencia de operación y pérdidas de retorno. Algunos trabajos incorporan estructuras de tierra defectuosa (DGS) para mejorar el rendimiento, reduciendo pérdidas de inserción y mejorando la selectividad. ([Kershaw et al., 2017](#)).

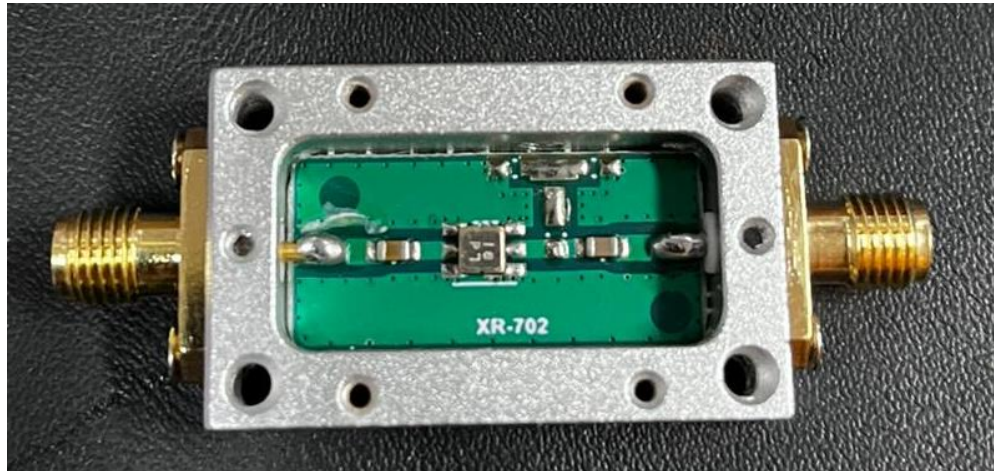
La literatura científica sobre el diseño de filtros para aplicaciones de radioastronomía y telecomunicaciones resalta varias topologías innovadoras que optimizan el rendimiento de los sistemas. [Kershaw et al. \(2017\)](#) proponen un filtro pasa banda microstrip tipo Hairpin-Line con estructura de suelo defectuoso en forma cuadrada, lo que mejora la respuesta en frecuencia y reduce las dimensiones del filtro. Por otro lado, [Lu et al. \(2008\)](#) desarrollan filtros acoplados en paralelo con respuestas trisección y cuadrupletas, adecuados para sistemas que requieren un alto control sobre las frecuencias de paso.

En el ámbito de la superconductividad, [Pal et al. \(2012\)](#) diseñan un filtro de rechazo de banda basado en materiales superconductores de alta temperatura (HTS), que es altamente eficiente para eliminar interferencias en radioastronomía. Además, [Yu et al. \(2009\)](#) introducen un filtro de banda ancha superconductora utilizando resonadores de acoplamiento fuerte, lo que permite captar señales astronómicas con mínima pérdida. Estas investigaciones subrayan el avance continuo en el desarrollo de filtros específicos para mejorar la precisión y eficiencia de sistemas de alta frecuencia en diversas aplicaciones.

Simulaciones realizadas con software como COMSOL Multiphysics, IE3D, y CST han validado la efectividad de los diseños. La implementación física de estos filtros ha sido recomendada como un paso futuro para comparar los resultados simulados con los medidos, lo que permite la reducción de costos en aplicaciones reales.

Figura 1.

Ejemplo de filtro de 1.42GHz de gran calidad y diseño



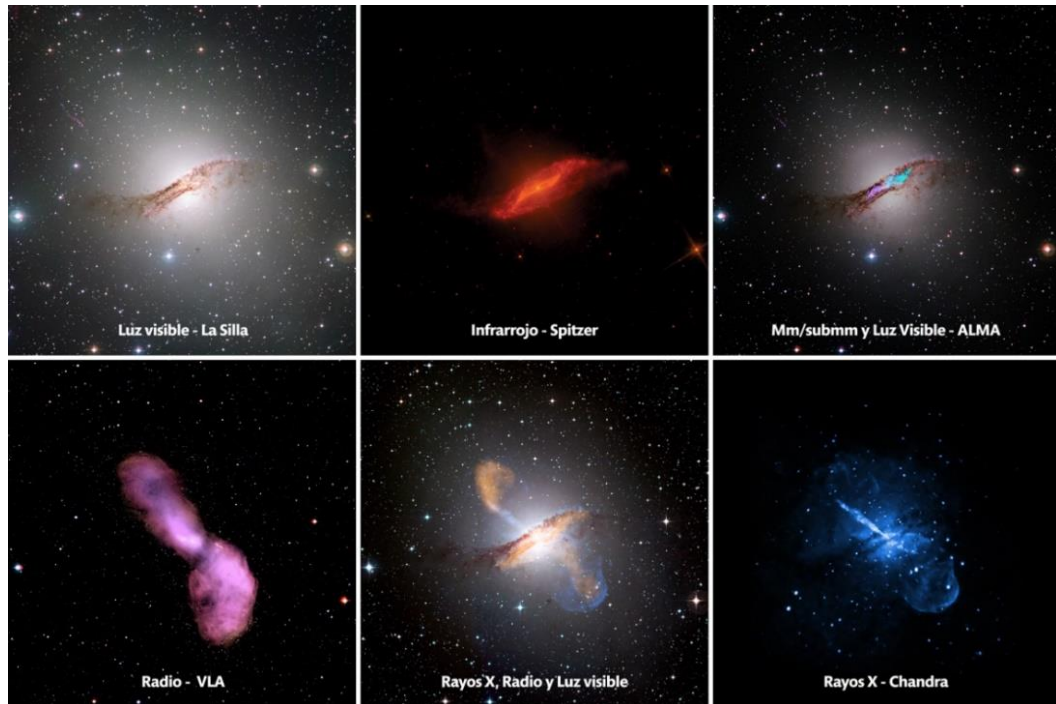
Nota. Tomado de Autores 2024.

1.2 Radioastronomía

La radioastronomía es una disciplina de la astronomía que se centra en el estudio de las ondas de radio provenientes del espacio exterior. Estas ondas, generadas por una gran variedad de fenómenos cósmicos, proporcionan información crucial sobre la naturaleza de diversos objetos astronómicos, incluyendo estrellas, galaxias y nebulosas. A través de la detección y análisis de la radiación en el espectro de radio, es posible desentrañar aspectos fundamentales como la composición, la temperatura y la dinámica de dichos objetos. De esta manera, la radioastronomía no solo complementa el estudio óptico del universo, sino que amplía nuestra capacidad de comprender fenómenos invisibles en otros rangos del espectro electromagnético ([Verschuur, 2007](#)).

Figura 2.

Observación astronómica con distintos instrumentos



Nota: Observación astronómica. Tomado de [ALMA. \(s. f.\)](#).

Con el paso del tiempo, la radioastronomía se ha consolidado como una herramienta invaluable para explorar el universo en longitudes de onda no visibles. Los radiotelescopios, instrumentos específicamente diseñados para captar estas ondas, han permitido detectar y analizar la radiación emitida por objetos ubicados a grandes distancias. A través de estos estudios, se ha logrado obtener información clave sobre fenómenos astronómicos como la actividad en núcleos galácticos, la formación estelar y los remanentes de explosiones de supernovas, ampliando considerablemente nuestro entendimiento del universo ([Verschuur, 2007](#)).

1.3 Radiotelescopios

Los radiotelescopios, a menudo comparados con telescopios ópticos, operan bajo un principio similar, pero están diseñados para reflejar y captar ondas de radio en lugar de luz visible. Estos instrumentos poseen una gran antena parabólica que dirige las ondas de radio hacia un receptor, donde son convertidas en señales eléctricas. A través de procesos de amplificación y análisis, los astrónomos pueden transformar estas señales en datos significativos para el estudio de objetos astronómicos distantes ([Verschuur, 2007](#)). Cuanto mayor sea la superficie del radiotelescopio, mayor será la cantidad de energía captada, permitiendo la detección de señales de radio extremadamente débiles provenientes de los confines del universo.

Figura 3.

Radio interferómetros

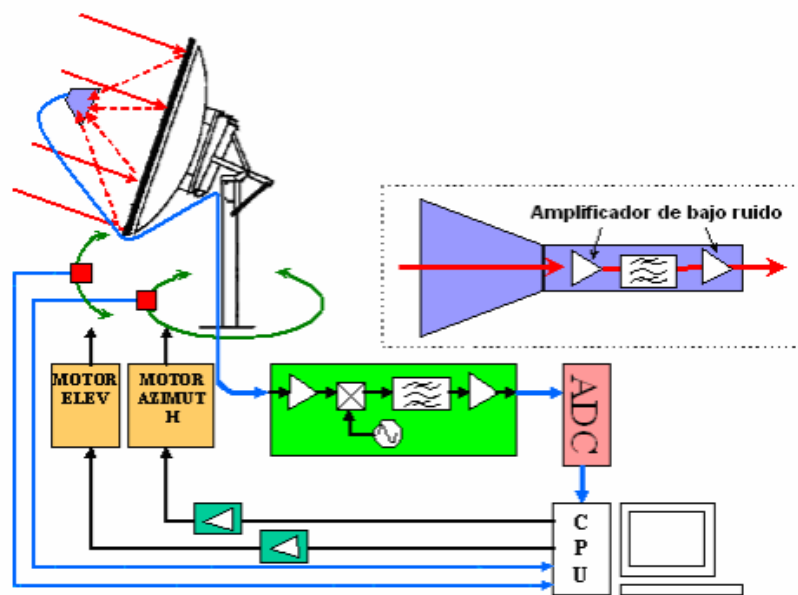


Nota. Ilustración Radio interferómetro. Tomado de [Verschuur \(2007\)](#)

El uso de radiotelescopios ha permitido la detección de diversas emisiones en el espectro de radio, ampliando significativamente nuestra comprensión del universo y proporcionando una perspectiva única sobre fenómenos astrofísicos. De hecho, los sistemas de radiotelescopios en red, conocidos como interferómetros, han mejorado considerablemente la resolución de las observaciones astronómicas, permitiendo obtener imágenes más detalladas y precisas de fuentes celestes (Peñañiel Beltrán, 2008).

Figura 4.

Esquema simplificado de un radio telescopio



Nota. Sistema de bloques. Tomado de [Peñañiel Beltrán, G. \(2008\)](#).

1.3.1 La Emisión de la línea de 21 cm

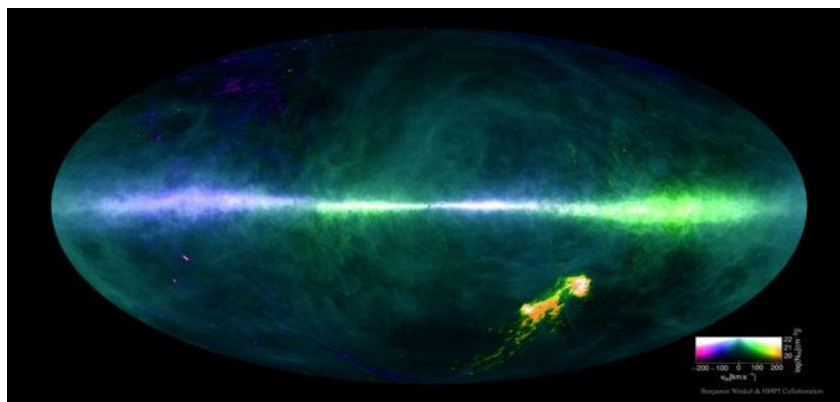
La emisión de la línea espectral de hidrógeno neutro (H I) a 21 cm es uno de los fenómenos más relevantes en la radioastronomía. Esta línea espectral, que se observa en la banda L del espectro de radio, ha sido fundamental para el estudio detallado del medio interestelar y la

estructura de nuestra galaxia ([Kulkarni & Heiles, 1987](#)). Su origen radica en la transición hiperfina del hidrógeno neutro, que ocurre cuando el electrón en un átomo de hidrógeno cambia de espín, liberando un fotón con una longitud de onda de aproximadamente 21 cm, equivalente a una frecuencia de 1420 MHz ([Dickey & Lockman, 1990](#)).

Este fenómeno es de particular interés porque permite observar el hidrógeno neutro incluso en condiciones de baja energía, como en las frías nubes de gas del espacio interestelar. Dado que el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, la línea de 21 cm se detecta en numerosas regiones del cielo, lo que ha permitido estudiar la distribución y dinámica de este gas, así como mapear la estructura de galaxias cercanas y lejanas ([Braun, 2012](#)). En síntesis, la emisión de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro sigue siendo uno de los pilares fundamentales en la investigación astrofísica.

Figura 5.

Formación de la línea de hidrógeno de 21 cm



Nota. Recuperado de [Científica, C. \(2017, 27 enero\)](#). Mapa de todo el cielo observando en la línea de 21 cm del hidrógeno atómico. Crédito: Benjamin Winkel & the HI4PI Collaboration.

1.4 Aplicaciones de la detección

La detección de emisiones de hidrógeno en el espacio tiene aplicaciones clave en la radioastronomía. La línea de hidrógeno neutro, conocida como la línea de 21 cm, es una herramienta fundamental para el estudio de la estructura y dinámica de nuestra galaxia y otras galaxias. Esta línea permite mapear la distribución de hidrógeno neutro, lo cual ayuda a entender la rotación de galaxias, la formación de brazos espirales y la distribución de materia oscura, temas tratados en obras como *Galactic Dynamics* de James Binney y Scott [Tremaine \(Binney & Tremaine, 2011\)](#).

Un filtro pasabanda centrado en 1.42 GHz, diseñado para captar esta señal, es esencial en la instrumentación de los radiotelescopios. Al seleccionar únicamente las frecuencias relevantes, se minimizan las interferencias de otras bandas, garantizando que los astrónomos puedan analizar con precisión las emisiones de hidrógeno. Esto permite depurar las señales para mejorar la linealidad y reducir el ruido e interferencias RFI en los estudios galácticos y cosmológicos, facilitando la comprensión de la evolución y estructura del universo ([Wilson et al., 2013](#)).

1.5 Teoría de Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión son estructuras físicas que confinan y transportan energía electromagnética a través de un espacio limitado. Estas están formadas por conductores eléctricos dispuestos de manera geométrica específica, lo que les permite cumplir una función esencial en diversos sistemas de comunicaciones, como la transmisión de señales telefónicas, datos y televisión, así como en aplicaciones relacionadas con circuitos resonantes, filtros y acopladores de impedancia ([Vela, 1999](#)).

El análisis de las líneas de transmisión difiere del enfoque tradicional de la teoría de circuitos, ya que las características de estas líneas están distribuidas a lo largo de su longitud, en lugar de concentrarse en un único punto. Esto implica que, para su estudio, es necesario resolver ecuaciones del campo electromagnético, lo que añade complejidad a su modelado y análisis.

Existen varios tipos de líneas de transmisión, que se clasifican en función de la tensión y la distancia sobre la que se transporta la energía. Las líneas de alta tensión se utilizan para la transmisión de energía a grandes distancias, como en redes eléctricas de distribución. Por otro lado, las líneas de baja tensión se emplean para distancias más cortas, como las que se encuentran dentro de edificios o en la distribución de energía a nivel urbano ([Vela, 1999](#)).

1.6 Líneas de Microstrip

Las líneas de transmisión de microstrip son fundamentales en circuitos de alta frecuencia, usadas en comunicaciones, radares y equipos de medición. Consisten en una tira de conductor (como cobre) sobre un sustrato dieléctrico, con un plano de tierra en la parte inferior. A diferencia de las líneas coaxiales, donde los campos electromagnéticos están confinados, en las microstrip parte del campo eléctrico se extiende fuera del sustrato, lo que genera un modo de propagación cuasi-TEM.

Las características como la impedancia y las pérdidas dependen del ancho de la tira, el grosor del sustrato, la constante dieléctrica y la frecuencia. Materiales como Rogers, PTFE y cerámicas son preferidos por su baja pérdida y estabilidad a alta frecuencia.

1.7 Estructura de Microstrip

La estructura básica de una línea de microstrip, como se ilustra en la Figura 6, consiste en una capa superior de material conductor sobre un sustrato dieléctrico. La constante dieléctrica relativa del sustrato (ϵ_r) y su espesor (h) son parámetros cruciales en el diseño, ya que influyen directamente en la velocidad de propagación de la señal y la impedancia característica de la línea. A medida que la señal se propaga a lo largo de la línea de microstrip, los campos eléctricos se extienden tanto dentro del sustrato como en el aire que rodea la estructura, mientras que los campos magnéticos se distribuyen de manera transversal.

En términos de aplicaciones, las líneas de microstrip son ampliamente utilizadas debido a su facilidad de fabricación y la integración con otras tecnologías de circuitos impresos (PCB). Su diseño flexible permite su adaptación en una amplia gama de frecuencias, desde aplicaciones de microondas hasta frecuencias milimétricas, proporcionando una solución eficiente y compacta para la transmisión de señales en sistemas de telecomunicaciones y radar. ([Hong, 2001](#)).

1.8 Filtros Microstrip

Los filtros microstrip son fundamentales en la separación y manipulación de señales en sistemas de alta frecuencia. Estos componentes son cruciales para aplicaciones de comunicaciones, sistemas de radar y electrónica de RF (Radiofrecuencia), donde es necesario aislar bandas de frecuencia específicas o eliminar interferencias no deseadas. La simplicidad en la fabricación de estos filtros es una de sus grandes ventajas, ya que pueden integrarse fácilmente en los PCB mediante procesos de fotolitografía, lo que permite su producción a bajo costo y con alta precisión.

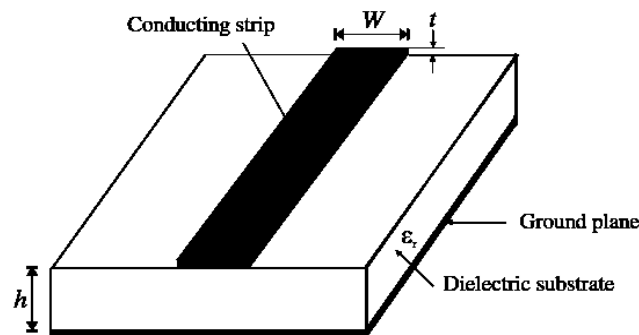
La estructura básica de un filtro microstrip incluye dos placas conductoras separadas por un sustrato dieléctrico. La distancia entre las placas es un parámetro que influye en el comportamiento electromagnético del filtro, y generalmente varía entre 1 y 2 mm. El material del

sustrato desempeña un papel crucial en la eficiencia del filtro; materiales con alta permitividad dieléctrica, como ciertos compuestos de cerámica o PTFE (politetrafluoroetileno), facilitan un mejor confinamiento de las señales dentro de la estructura, reduciendo las pérdidas por radiación. No obstante, dicho confinamiento es explotado en el diseño de antenas de microstrip, donde las pérdidas por radiación son deliberadas y útiles para la emisión de señales ([Smith, 2010](#)).

Los filtros de microstrip se clasifican principalmente en filtros pasa-bajas, pasa-altas, pasa-banda y rechaza-banda, dependiendo del rango de frecuencias que dejan pasar o bloquean. En el caso de los filtros pasa-banda, por ejemplo, se diseñan para permitir el paso de una banda específica de frecuencias mientras atenúan las demás, lo que los hace esenciales en aplicaciones como los sistemas de comunicación por satélite y la transmisión de datos en redes de telecomunicaciones. La capacidad de ajustar la respuesta en frecuencia del filtro mediante la modificación de su geometría y materiales es una ventaja significativa en aplicaciones de alta frecuencia. ([Gupta et al., 1996](#)).

Figura 6.

General Microstrip estructura



Nota. Ilustración microstrip estructura, Tomado de [Hong, \(2001\)](#)

1.9 Materiales utilizados para el diseño de circuitos de alta frecuencia.

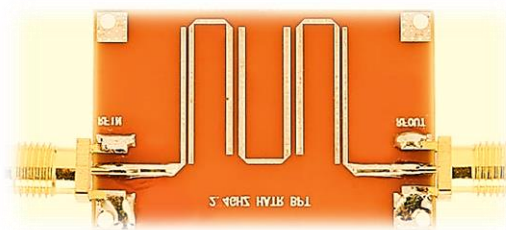
El diseño de circuitos de alta frecuencia en aplicaciones de RF y microondas requiere materiales con propiedades específicas, especialmente en cuanto a la constante dieléctrica del sustrato, que influye en la velocidad de propagación de la señal y la impedancia característica. Para minimizar las pérdidas dieléctricas y garantizar una transmisión eficiente, es crucial elegir materiales adecuados.

El FR-4 es un material común en PCBs debido a su bajo costo y propiedades eléctricas aceptables para muchas aplicaciones de RF. Sin embargo, para aplicaciones más exigentes, materiales como Rogers, PTFE, Taconic e Isola ofrecen mejor control de señales, menor atenuación y mayor durabilidad.

Rogers fabrica laminados de alta frecuencia con baja pérdida y alta estabilidad, ideales para telecomunicaciones y aplicaciones de microondas. Taconic produce laminados PTFE con baja permitividad dieléctrica y alta resistencia térmica, adecuados para sistemas de radar y entornos hostiles. Isola ofrece sustratos cerámicos y compuestos de teflón, diseñados para minimizar pérdidas y asegurar un alto rendimiento en aplicaciones de RF.




Figura 7.

Tarjeta de circuito impreso para RF



Nota. Ilustración Tarjeta de circuito impreso, Tomado de ([Bandpass Filter Module, s. f.](#))

Tabla 1.*Características y precios de componentes electrónicos para diseño de RF*

Elemento	Imagen	Características
Conector SMA de montaje de borde recto RS Pro 50Ω		Tipo de conector coaxial: SMA Hembra Montaje en borde Material de contacto: Cobre-berilio Aplicación: Conexión de antena, módems, telecomunicaciones, equipos médicos, Satcom, CCTV Serie: RT/duroid 5880
Rogers 5880 Er 2.2 espesor de 0.79 mm		Fibra de vidrio/PTFE Constante dieléctrica (ϵ_r): 2.20 Espesor dieléctrico: 0.79 mm Recubrimiento de cobre: 1 OZ doble cara Factor de disipación: 0.0009 @ 10 GHz
FR4 Epoxy Er(4.4) espesor 1.6 mm		Capacitancia por cm ² : 3.8 pF Tamaño de la placa: 152 x 228 mm Material: Baquelita/Fibra de vidrio Espesor total: 1.6 mm Calibre de cobre: 35 micras Medidas: 15x10 cm Doble cara Aplicación: Fabricación de circuitos electrónicos, PCB virgen sin perforar

Nota. Las características de los componentes electrónicos mencionados en la tabla fueron obtenidas de catálogos de fabricantes y proveedores en línea, y están sujetas a variaciones según el fabricante y las especificaciones técnicas requeridas.

1.10 Topologías de Diseño Microstrip

En el diseño de filtros de microstrip, las discontinuidades juegan un papel crucial, ya que pueden afectar significativamente el rendimiento y la eficiencia de los circuitos. Estas

discontinuidades surgen por cambios abruptos en la geometría de las pistas de microstrip, tales como pasos, extremos abiertos, curvas, y brechas. Es fundamental considerar cómo influyen en la transmisión de la señal, ya que pueden generar efectos indeseados como reflexiones, variaciones de impedancia y pérdidas de inserción. Para abordarlas, los ingenieros suelen recurrir a simulaciones electromagnéticas detalladas o a modelos matemáticos simplificados que permiten diseñar filtros eficientes y de alto rendimiento ([Hong, 2001](#)).

1.10.1 Discontinuidad de Paso

Ocurre cuando hay un cambio abrupto en el ancho de la pista de microstrip, generando reflexiones de señal y variaciones en la impedancia característica. Esto afecta la calidad del circuito o filtro. Para reducir su impacto, se recomienda suavizar la geometría de la pista mediante transiciones graduales o estructuras de compensación ([Hong, 2011](#)).

1.10.2 Discontinuidad de Extremo Abierto

Se produce cuando la línea de microstrip termina sin una carga conectada, causando fugas de energía. Este fenómeno puede modelarse como una capacitancia en derivación o una longitud equivalente de línea de transmisión, lo que ayuda a minimizar las pérdidas ([Hong, 2011](#)).

1.10.3 Discontinuidad de Brecha

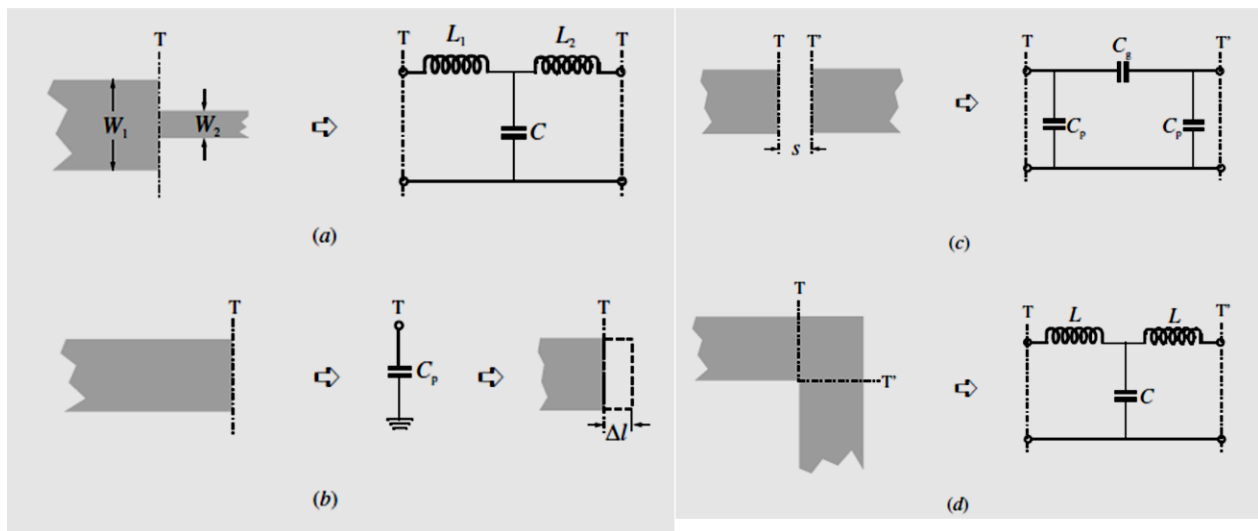
Aparece cuando hay una interrupción en la continuidad de la línea de transmisión, creando reflexiones y cambios de impedancia. Para mitigar estos efectos, se pueden añadir puentes conductores o ajustar las dimensiones de las pistas ([Hong, 2011](#)).

1.10.4 Discontinuidad de Curvatura

Surge cuando la línea de microstrip cambia de dirección. Curvas con radios pequeños generan mayores reflexiones y pérdidas de inserción. Se sugiere usar curvas con radios amplios o suavizar la transición para mejorar la transmisión ([Hong, 2011](#)).

Figura 8.

Estructuras típicas y sus circuitos equivalentes



Nota. Ilustración de "Discontinuidades de Microstrip". Tomado de [Hong \(2011\)](#). a) Discontinuidad de paso, b) Discontinuidad de extremo abierto, c) Discontinuidad de brecha, d) Discontinuidad de curvatura.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un filtro impreso pasabanda para el estudio de la línea de hidrógeno (longitud de onda de 21 cm) cómo parte del radiotelescopio UIS.

2.2 Objetivos Específicos

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Estudiar las diferentes topologías de diseño básico de circuitos pasivos para alta frecuencia.
- Simular en un software de análisis electromagnético 3D los diseños propuestos en la literatura científica donde se puedan identificar las características mínimas de diseño de este tipo de filtros.
- Identificar la estrategia de diseño que se adapte a nuestras necesidades y especificaciones planteadas.
- Implementar la topología en dos o más sustratos con diferentes permitividades donde se pueda obtener los requerimientos mínimos en términos de pérdidas de inserción y de retorno en la banda de paso.

3. Análisis de Filtros Pasabanda para Radioastronomía

Una característica importante para considerar es el ancho de banda necesario para capturar adecuadamente las señales provenientes del hidrógeno neutro. En galaxias cercanas, el ancho de banda típico para estos estudios varía entre 10 y 20 MHz, lo que permite registrar los desplazamientos Doppler producidos por la rotación galáctica ([Roberts, 1975](#)). Estos desplazamientos son fundamentales para medir la velocidad de rotación del gas y comprender mejor la dinámica interna de las galaxias ([Dickey & Lockman, 1990](#)). Sin embargo, en el caso de galaxias más distantes, el corrimiento al rojo desplaza la frecuencia de la línea de 21 cm a valores más bajos, lo que requiere un ancho de banda mayor, entre 100 y 200 MHz, para abarcar un rango más amplio de objetos y variaciones ([Madau et al., 1997](#)).

El desplazamiento Doppler es otro factor relevante en la detección de hidrógeno neutro. El gas interestelar en nuestra galaxia puede alcanzar velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo, lo que genera desplazamientos de hasta ± 0.5 MHz en la frecuencia central de 1.42 GHz ([Dickey & Lockman, 1990](#)). Por esta razón, un filtro con un ancho de banda de al menos 10 MHz es necesario para capturar el comportamiento dinámico del gas en distintas condiciones de movimiento ([Wilson et al., 2013](#)). En el caso de galaxias más distantes, los mayores desplazamientos debido al redshift y las velocidades relativas del gas hacen que sea indispensable ajustar el ancho de banda del filtro para captar con precisión las variaciones de frecuencia ([Madau et al., 1997](#)).

Finalmente, para estudios de alta resolución espectral, se pueden utilizar filtros con anchos de banda más reducidos. Esto permite observar con mayor precisión las pequeñas variaciones en la emisión de hidrógeno neutro y estudiar detalladamente la velocidad radial del gas en regiones específicas de las galaxias ([Stroe et al., 2015](#)). La capacidad de realizar este tipo de observaciones detalladas es fundamental para avanzar en la comprensión de los procesos dinámicos y evolutivos del medio interestelar ([Draine, 2011](#)).

3.1 Topología de Filtro Pasa Banda Hairpin

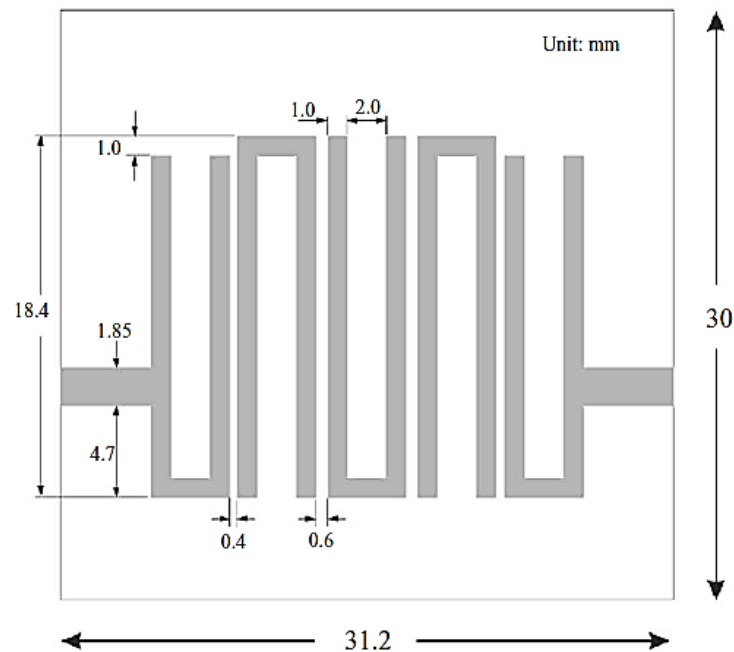
Los filtros Hairpin en tecnología microstrip se caracterizan por su diseño compacto y organizado, generando discontinuidades que ofrecen impedancia reactiva. Estos filtros utilizan líneas acopladas en paralelo para crear un funcionamiento de pasa banda, ideal para filtrar frecuencias específicas y eliminar interferencias. Su distintiva estructura de horquilla, con resonadores en forma de U, facilita su implementación frente a otros filtros, como los interdigitales. La selección del sustrato es clave, especialmente en aplicaciones como la radioastronomía, donde materiales de baja pérdida y alta estabilidad son esenciales. Ajustes en el diseño, como las dimensiones y el espacio entre resonadores, pueden mejorar el rendimiento ([Grassin, 2020](#); [Bankey & Bhargava, 2017](#)).

Al diseñar un filtro Hairpin, la selección del sustrato es crucial y varía según la aplicación. En el contexto de la radioastronomía, específicamente para la línea de 21 cm del hidrógeno (1.42 GHz), es esencial optar por un material que ofrezca baja pérdida y alta estabilidad. Según [Toshniwal y Purohit \(2015\)](#), modificar las dimensiones del filtro, el espacio entre los resonadores

y optimizar la geometría, como la inclusión de ranuras, puede mejorar de manera significativa su rendimiento.

Figura 9.

Diseño de filtro Hairpin-line.



Nota: Figura diseño de filtro Hairpin-line. Toma de [Hong. \(2011\)](#)

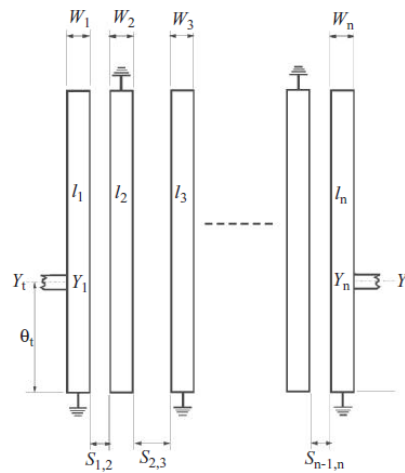
3.2 Topología de Filtro Pasabanda Interdigital

El filtro pasabanda interdigital es un tipo de filtro microstrip que utiliza resonadores de línea de transmisión dispuestos en forma interdigital, alternando entre cortocircuitos y extremos abiertos. Cada resonador tiene una longitud eléctrica específica que define su comportamiento en la frecuencia central, y el acoplamiento entre ellos se logra mediante campos electromagnéticos.

Se emplean líneas derivadas en la entrada y salida para ajustar la admitancia del filtro. A pesar de su diseño compacto, requiere resonadores con conexión a tierra mediante agujeros pasantes, lo que suprime respuestas espurias al evitar bandas indeseadas a frecuencias más altas ([Hong,2011](#)).

Figura 10.

Diseño de filtro pasabanda interdigital



Nota: Figura diseño general del filtro pasabanda interdigital. Toma de [Hong \(2011\)](#)

3.3 Consideraciones Técnicas y Recomendación Final para el Filtro

El diseño de nuestro filtro pasabanda fue inicialmente planteado para cubrir un ancho de banda de 400 MHz, adecuado para captar señales de H I no solo en nuestra galaxia sino también en galaxias más distantes que presentan corrimiento al rojo. Sin embargo, en estudios de objetos más cercanos como los de la Vía Láctea, un ancho de banda de 20-40 MHz podría ser suficiente para cubrir los desplazamientos Doppler típicos del gas, cuya velocidad puede causar desviaciones de hasta 4.7 MHz en interacciones galácticas más dinámicas.

- Δf es el cambio en frecuencia.
- f es la frecuencia central (1.420 GHz).
- v es la velocidad relativa del gas.
- c es la velocidad de la luz ($\sim 300,000$ km/s).

Ejemplos de Cálculos:

- Velocidad de 100 km/s:

$$\Delta f = f \times \frac{v}{c} = 1.420 \times \frac{100}{300,000} \approx 0.473 \text{ MHz}$$

- Velocidad de 300 km/s:

$$\Delta f = 1.420 \times \frac{300}{300,000} \approx 1.42 \text{ MHz}$$

- Velocidad de 1000 km/s (extremadamente alta):

$$\Delta f = 1.420 \times \frac{1000}{300,000} \approx 4.73 \text{ MHz}$$

Los cálculos son aproximaciones que no tienen en cuenta los efectos de la relatividad. Se utilizan en situaciones donde la velocidad del objeto, como una galaxia, es baja en relación con c . Para una mayor comprensión del tema, se recomienda consultar a [Carroll y Ostlie \(2017\)](#).

El diseño del filtro se enfoca en minimizar las pérdidas de inserción y de retorno, asegurando que la señal captada conserve su integridad. Esto permite a los radiotelescopios detectar con precisión las características de la línea de 21 cm y las variaciones en la velocidad del gas.

A continuación, se presenta la Tabla 2, que muestra una comparación entre las propiedades de los sustratos FR4 y Rogers 5880, clave para evaluar el rendimiento de los filtros en términos de pérdidas, constante dieléctrica, y estabilidad térmica.

Tabla 2*Comparación de las propiedades de los sustratos FR4 y Rogers 5880*

Parámetro	FR4	Rogers 5880	Comparación cualitativa
Constante dieléctrica (ϵ_r)	4.2 – 4.8	2.20 \pm 0.02	Rogers es mejor para alta frecuencia debido a su constante dieléctrica más baja, lo que reduce las pérdidas de señal.
Factor de disipación ($\tan \delta$)	0.015 – 0.035	0.0009 (a 10 GHz)	Rogers tiene pérdidas significativamente más bajas, ideal para aplicaciones RF y microondas.
Conductividad térmica	0.3 – 0.4 W/m*K	No especificada	FR4 tiene una conductividad térmica moderada, suficiente para aplicaciones convencionales.
Espesor del Dieléctrico	1.6 mm	0.79 mm	Rogers tiene un espesor estándar, mientras que FR4 es más flexible en cuanto a espesor dependiendo de la aplicación.
Rango de temperatura operativa	-40°C a 130°C	-55°C a +125°C	Ambos soportan rangos amplios de temperatura, pero Rogers soporta temperaturas más extremas.
Espesor del cobre	Varía según el diseño (típico 1 oz/ft ²)	1 oz/ft ² (0.035 mm)	Similar en ambos casos, aunque la disponibilidad de espesores en FR4 es más amplia.
Costo	Bajo-moderado	Alto	FR4 es mucho más económico y ampliamente disponible. Rogers es caro, enfocado en aplicaciones especializadas.
Disponibilidad	Muy alta	Moderada	FR4 es más fácil de encontrar y es la opción estándar para la mayoría de las aplicaciones. Rogers es más difícil de conseguir.
Aplicaciones típicas	Electrónica general, placas de circuito impreso de bajo y medio costo	Aplicaciones de RF y microondas, telecomunicaciones, radares	FR4 es el estándar de la industria para muchas aplicaciones. Rogers es superior para alta frecuencia y microondas.

Nota: La tabla muestra una comparación cualitativa y cuantitativa de las propiedades dieléctricas, térmicas y de costo entre los sustratos FR4 y Rogers 5880, indicando sus ventajas y desventajas para diferentes aplicaciones.

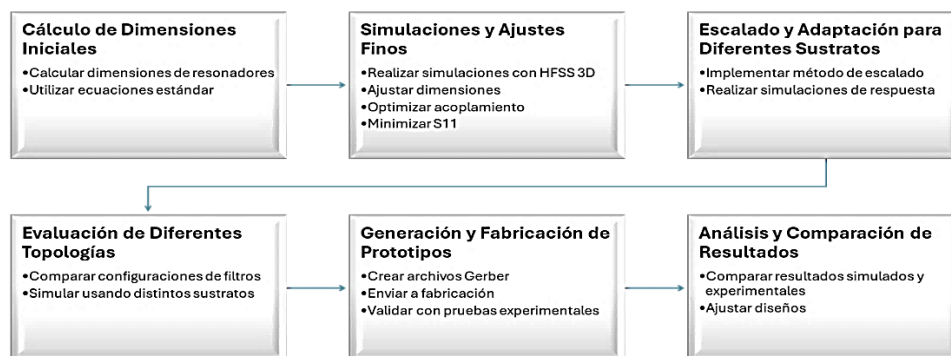
4. Implementación y Validación de los Filtros Pasabanda

4.1 Metodología de diseño

La metodología de diseño del filtro se inicia con el cálculo de las dimensiones iniciales de los resonadores, utilizando ecuaciones estándar que consideran la permitividad del sustrato para alcanzar la frecuencia de diseño especificada. A continuación, se realizan simulaciones con Ansys HFSS Student 3D para ajustar las dimensiones, optimizar el acoplamiento entre resonadores y minimizar el coeficiente de reflexión (S_{11}) y el coeficiente de TX (S_{21}). Luego, se implementa un método de escalado para adaptar el diseño a diferentes sustratos, seguido de la evaluación de diversas topologías de filtros, como Hairpin e interdigital, utilizando diferentes materiales. Una vez seleccionadas las topologías óptimas, se generan archivos Gerber para la fabricación de PCB y se validan los diseños mediante pruebas experimentales, comparando resultados simulados y medidos para realizar ajustes finales.

Figura 11.

Estrategia de diseño



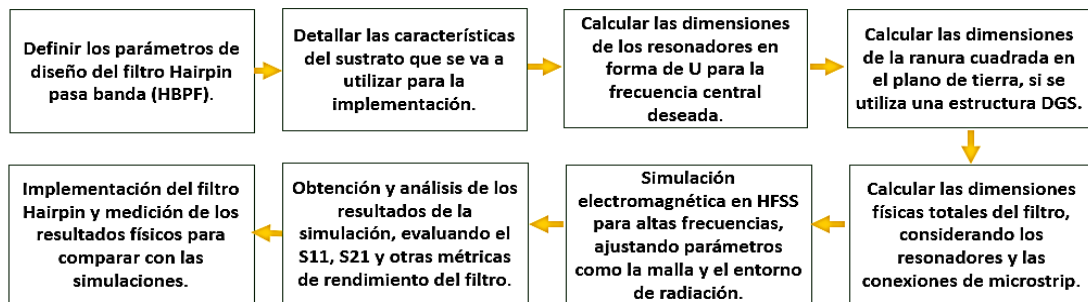
Nota. El diagrama muestra el proceso secuencial para el diseño, simulación, fabricación y análisis de prototipos de filtros de RF, incluyendo cálculos iniciales, simulaciones y ajustes, así como la fabricación y validación experimental de los prototipos.

4.1.1 Diseño del Filtro

4.1.1.1 Cálculo de Dimensiones Iniciales. En el diseño de filtros basados en resonadores tipo Hairpin, el primer paso fue calcular las dimensiones (ancho y largo) de los resonadores. Estos cálculos se realizaron para alcanzar la frecuencia de diseño especificada, utilizando ecuaciones estándar que toman en cuenta la permitividad efectiva del sustrato seleccionado. Este parámetro es crucial porque afecta la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el microstrip, lo que a su vez influye en la frecuencia de resonancia.

Figura 12.

Metodología utilizada Hairpin pasabanda (HBPF)



Nota. Diagrama de flujo diseño e implementación del filtro Hairpin pasabanda (HBPF). Las ecuaciones que se utilizaron están basadas en los modelos teóricos de resonadores Microstrip y la geometría de los resonadores tipo Hairpin. Estos cálculos iniciales permitieron establecer dimensiones aproximadas, que luego fueron ajustadas en el proceso de simulación.

Ecuaciones de diseño de Hairpin

El diseño de un filtro Hairpin requiere una serie de ecuaciones que permiten calcular parámetros esenciales como el ancho y la longitud de los resonadores, así como la frecuencia de operación. Estas ecuaciones están vinculadas a las propiedades del sustrato utilizado y al comportamiento electromagnético del filtro.

Datos de diseño:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_r &= 4.4 && \text{(Permitividad Relativa del dieléctrico)} \\
 d &= 1.6 \text{ mm} && \text{(espesor del sustrato)} \\
 Z &= 50 \Omega && \text{(impedancia de entrada)} \\
 f_0 &= 1.42 \text{ GHz} && \text{(frecuencia central)} \\
 Bw &= 400 \text{ MHz} && \text{(ancho de banda)} \\
 c &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} && \text{(velocidad de la luz)}
 \end{aligned}$$

Ecuación para calcular el ancho del resonador

En el diseño de un filtro Hairpin, es fundamental calcular la relación entre el ancho (w) del resonador y la altura (d) del sustrato, que representa la distancia entre las capas del filtro. Esta relación se define a través de la ecuación 1.

$$r = \frac{w}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (1)$$

Aquí, r es una constante que permitirá calcular posteriormente el ancho del resonador. Para obtener el valor de r , es necesario determinar previamente el valor de A .

Cálculo del valor de A

El valor de A depende de la impedancia característica del filtro (Z_c) y de la permitividad relativa del material dieléctrico (ϵ_r), la cual describe cómo las ondas electromagnéticas se propagan a través del sustrato. Para calcular A se utiliza la ecuación 2.

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

Los parámetros más relevantes aquí son Z_c que representa la impedancia característica del filtro, que suele ser de 50 ohmios en la mayoría de los circuitos de radiofrecuencia (RF) y ϵ_r que es la

permitividad relativa del sustrato, que varía según el material utilizado (por ejemplo, FR4 o Rogers).

Cálculo del ancho del resonador

Una vez calculado el valor de r , el ancho del resonador (w) se obtiene multiplicando r por la altura del sustrato (d), de acuerdo con la ecuación 3.

$$w = r * d \quad (3)$$

Este paso es esencial, ya que define las dimensiones físicas del resonador en el filtro, lo cual es crítico para el diseño.

Permitividad efectiva del sustrato (ϵ_e)

La permitividad efectiva tiene un papel crucial en la propagación de las señales dentro del sustrato, ya que toma en cuenta que el campo electromagnético no está completamente confinado en el material, sino que interactúa parcialmente con el aire.

Se calcula mediante la ecuación 4.

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{d}{w}}} \right) \quad (4)$$

Este valor ajusta las propiedades de la señal según la relación entre la permitividad del sustrato y el aire.

Cálculo de la longitud de onda (λ)

Con la permitividad efectiva determinada, se puede calcular la longitud de onda (λ) en el sustrato, un paso clave para establecer la longitud física de los resonadores. La ecuación 5.

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_e}} \quad (5)$$

Donde c es la velocidad de la luz, aproximadamente 300,000 km/s y f la frecuencia central del filtro, que en este caso es de 1.42 GHz.

Cálculo del factor de deslizamiento y longitud del resonador

Para ajustar la longitud del resonador, se introduce un ángulo de deslizamiento (θ), que ajusta las dimensiones del resonador.

$$k = \frac{\theta^\circ}{360^\circ} * \lambda \quad (6)$$

$$S_r = 2 * k \quad (7)$$

Donde k es un factor que ajusta la longitud del resonador y S_r el valor del factor de deslizamiento. La longitud del resonador se calcula con la ecuación 8.

$$l = \frac{\frac{\pi}{180} * \theta^\circ}{\sqrt{\epsilon_e * x}} * \lambda \quad (8)$$

Donde x se relaciona con la frecuencia y la velocidad de propagación de la señal, como se muestra en la ecuación 9.

$$x = \frac{2\pi f}{c} \quad (9)$$

Factor de calidad (Q)

El factor de calidad es una métrica que describe la eficiencia del filtro en términos de su capacidad para seleccionar una banda específica de frecuencias y minimizar la pérdida de energía.

Se calcula mediante la ecuación 10.

$$Q = \frac{f_o}{B_w} \quad (10)$$

Donde f_o es la frecuencia central del filtro y B_w : Ancho de banda del filtro.

Coefficiente de acoplamiento (M)

El coeficiente de acoplamiento describe la interacción entre los resonadores adyacentes en el filtro. Si los resonadores están muy cerca, el acoplamiento será demasiado fuerte, lo que afectará el rendimiento del filtro. Si están muy separados, el acoplamiento será insuficiente. El coeficiente se calcula mediante la ecuación 11:

$$M_{i,i+1} = \frac{\Delta}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (11)$$

La cantidad de veces que se calcula este coeficiente depende del orden del filtro (es decir, cuántos resonadores contiene).

Longitud del Tap y ranura cuadrada

El Tap es la línea de transmisión que acopla la señal al filtro. Para calcular su longitud se utiliza la ecuación 12:

$$T_L = 5 * d \quad (12)$$

Finalmente, el ancho de la ranura cuadrada se calcula usando la siguiente fórmula, basada en el ancho del resonador mediante la ecuación 13.

$$W_{rc} = \frac{W}{2} \quad (13)$$

Estas ecuaciones y procedimientos se basan en el trabajo de [Samaniego \(2024\)](#).

Tabla 3.*Parámetros del Filtro Microstrip*

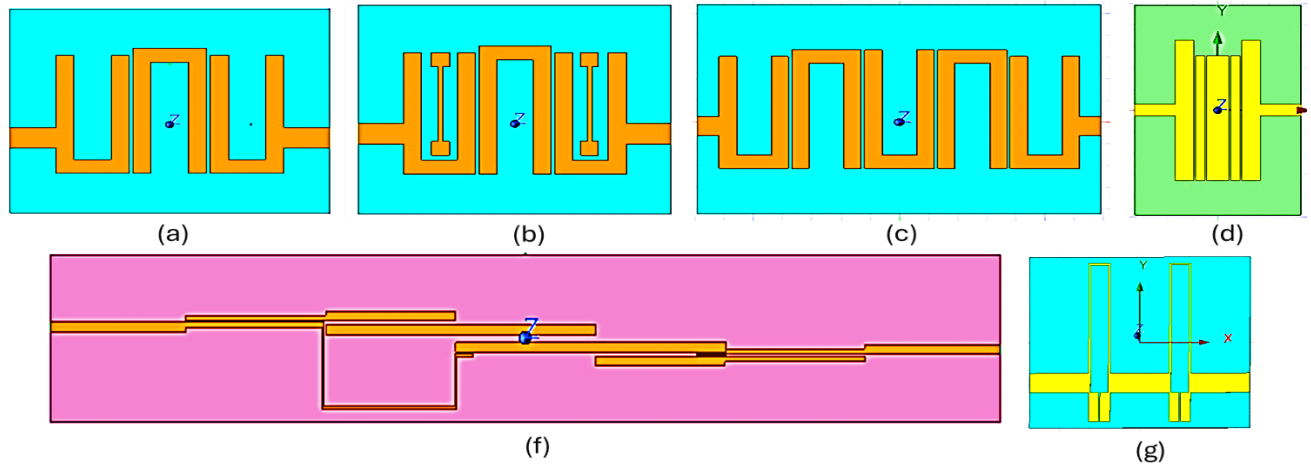
Parámetro	Valores Calculados
Ancho del resonador (W)	3.06 mm
Permitividad Efectiva (ϵ_e)	3.33
Longitud de Lambda (λ)	115.77 mm
Factor de Deslizamiento (Sr)	6.43 mm
Longitud del Brazo del resonador (L)	28.94 mm
Factor de Calidad (Q)	3.55

Nota. Esta tabla muestra un resumen de los parámetros importantes para el diseño y análisis de un resonador microstrip.

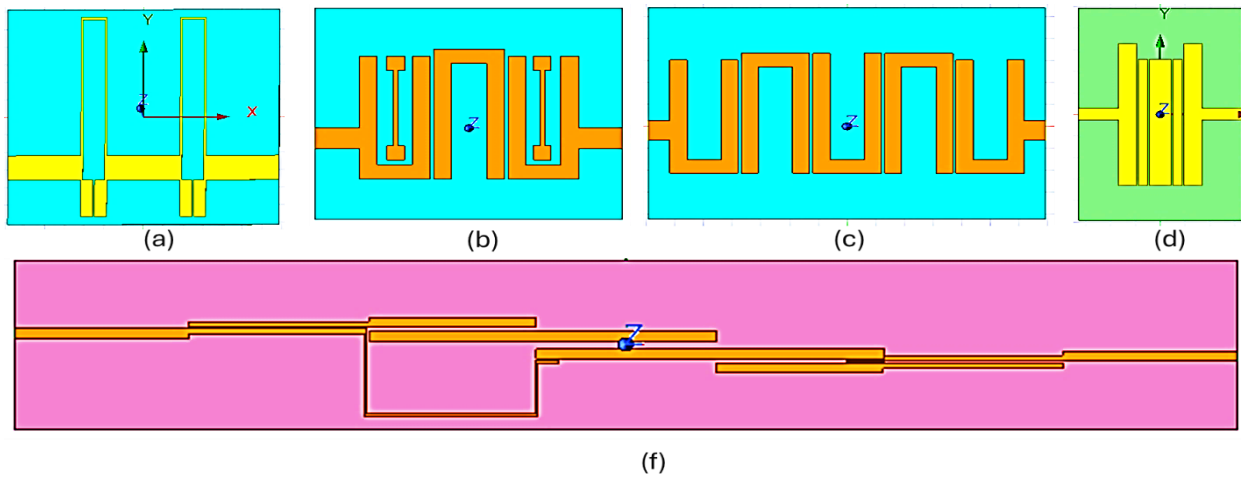
Tabla 4.*Parámetros del filtro y sus valores*

Parámetros	Valores
Rizo	0.5dB
Frecuencia Alta	1.62Ghz
Frecuencia Baja	1.22Ghz
Frecuencia media	1.42Ghz
Ancho de Banda a 3dB	400Mhz
Impedancia de Entrada	50 Ω

Nota. Esta tabla muestra los parámetros y valores específicos del filtro diseñado, incluyendo las frecuencias de operación, rizo y ancho de banda.

Figura 13.*Diseño de topologías usando FR4*

Nota. (a) Filtro pasabanda Hairpin de 3 resonadores. (b) Filtro pasabanda Hairpin con diseño DGS (Defected Ground Structure). (c) Filtro pasabanda Hairpin de 5 resonadores. (d) Filtro pasabanda Interdigital. (f) Filtro pasabanda paralelo con trisección en cascada. (g) Filtro Pasabanda Hairpin en Cascada. Imágenes utilizadas con el permiso de ANSYS, Inc.

Figura 14.*Diseño de topologías usando Rogers 5880*

Nota. (a) Filtro pasabanda Hairpin en cascada. (b) Filtro pasabanda Hairpin con diseño DGS (Defected Ground Structure). (c) Filtro pasabanda Hairpin de 5 resonadores. (d) Filtro pasabanda Interdigital. (f) Filtro pasabanda paralelo con trisección en cascada. Imágenes utilizadas con el permiso de ANSYS, Inc.

4.1.2 Simulaciones y Ajustes Finos con Ansys HFSS Student 3D

Una vez obtenidas las dimensiones iniciales, se emplea la herramienta de simulación electromagnética Ansys HFSS Student 3D para ajustar los parámetros críticos. Las simulaciones se realizaron con el objetivo de:

- Afinar las dimensiones de los resonadores para que coincidan con la frecuencia de operación deseada.
- Optimizar el acoplamiento entre los resonadores, ajustando la posición de la línea de entrada acoplada y las distancias de separación entre resonadores. Estas variaciones afectaron el rizado (ripple), el factor de calidad (Q) y el ancho de banda del filtro.
- Minimizar el coeficiente de reflexión (S11) y mejorar el rendimiento del filtro, ajustando los parámetros geométricos como el espaciado entre resonadores y la ubicación de las líneas de alimentación.

Escalado y Adaptación para Diferentes Sustratos

Una vez optimizado el diseño inicial, se implementa un método de escalado para poder replicar las simulaciones bajo diferentes sustratos con distintas permitividades relativas. Este proceso de escalado permitió ajustar automáticamente las dimensiones de los resonadores para

acomodar variaciones en la constante dieléctrica, sin tener que rediseñar el filtro desde cero para cada nuevo material.

Se realizaron múltiples simulaciones para cada variante de sustrato, destacando la importancia de controlar los factores críticos que afectan la respuesta del filtro, como:

- La frecuencia de resonancia.
- El coeficiente de reflexión (S11).
- Las pérdidas de inserción (S21).
- El ancho de banda de operación.

Evaluación de Diferentes Topologías

Para la evaluación de las distintas topologías de filtros, se consideraron varias configuraciones tanto de Hairpin como de filtros interdigitales. Las topologías incluyeron:

- Interdigital.
- Paralelo con trisección en cascada.
- Hairpin de 5 resonadores.
- Hairpin en cascada.
- Hairpin con estructura de tierra defectuosa (DGS) y 3 resonadores.
- Hairpin de 3 resonadores.

Cada una de estas topologías fue simulada utilizando diferentes sustratos, como FR4 y Rogers 5880, que tienen permitividades relativas diferentes. Las simulaciones ayudaron a comparar los resultados y seleccionar las topologías y materiales más adecuados en términos de accesibilidad, costo y tiempo de fabricación.

Tabla 5.*Características de simulación S21 de filtros y tamaño con FR4 (simulación)*

Parámetros filtros FR4 (simulación)	Interdigital	Paralelo con trisección en cascada	Hairpin 5R	Hairpin DGS
Rizo (S21)	0.74 dB	No tiene	No tiene	No tiene
Frecuencia media (S21)	1.367 GHz	1.407 GHz	1.437 GHz	1.443 GHz
Ancho de Banda a 3dB (S21)	904 MHz	211 MHz	404 MHz	184 MHz
Largo	49.2 mm	31.05 mm	48 mm	48.8 mm
Ancho	32.8 mm	203 mm	69.2 mm	50.1 mm

Nota. Los tamaños más grandes de filtros son para la topología paralelo con trisección en cascada y Hairpin de 5 resonadores en sustrato FR4.

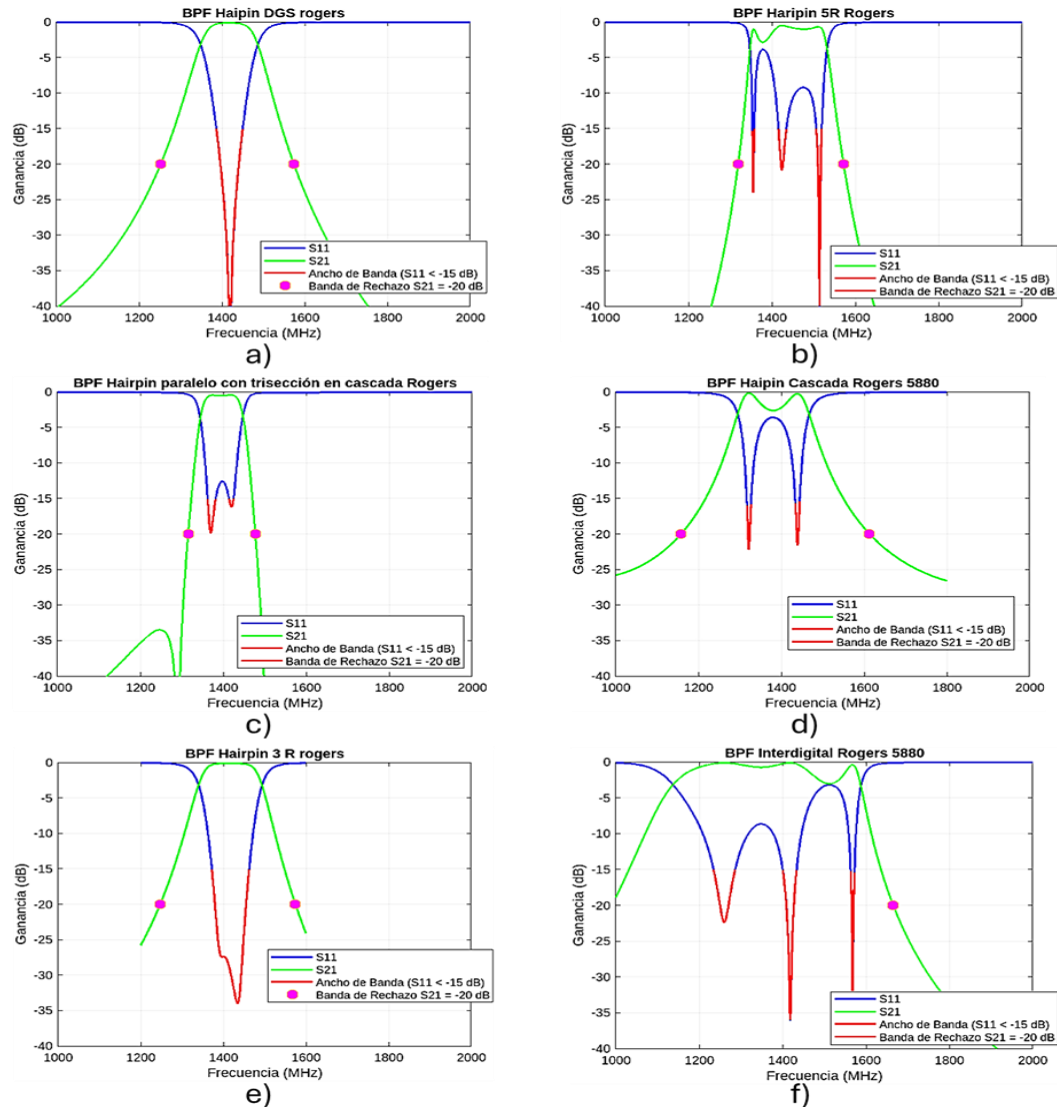
Tabla 6.*Características de simulación de filtros y tamaño con Rogers 5880 (simulación)*

Parámetros filtros Rogers 5880 (simulación)	Interdigita l	Paralelo con trisección en cascada	Hairpin 5R	Hairpin cascada	Hairpin DGS	Hairpin 3R
Rizo (S21)	2.86 dB	No tiene	2.31 dB	2.43 dB	No tiene	No tiene
Frecuencia media (S21)	1.363 GHz	1.396 GHz	1.439GHz	1.381 GHz	1.418 GHz	1.416 GHz
Ancho de Banda a 3dB (S21)	448 MHz	102 MHz	183 MHz	174 MHz	138 MHz	152 MHz
Largo	67.0 mm	41.4 mm	44.6 mm	61.5 mm	58.1 mm	58.1 mm
Ancho	44.6 mm	270.5 mm	89.3 mm	68.8 mm	68.2 mm	68.2 mm

Nota. Los tamaños más grandes de filtros son para la topología paralelo con trisección en cascada y Hairpin de 5 resonadores en sustrato Rogers 5880.

Figura 15.

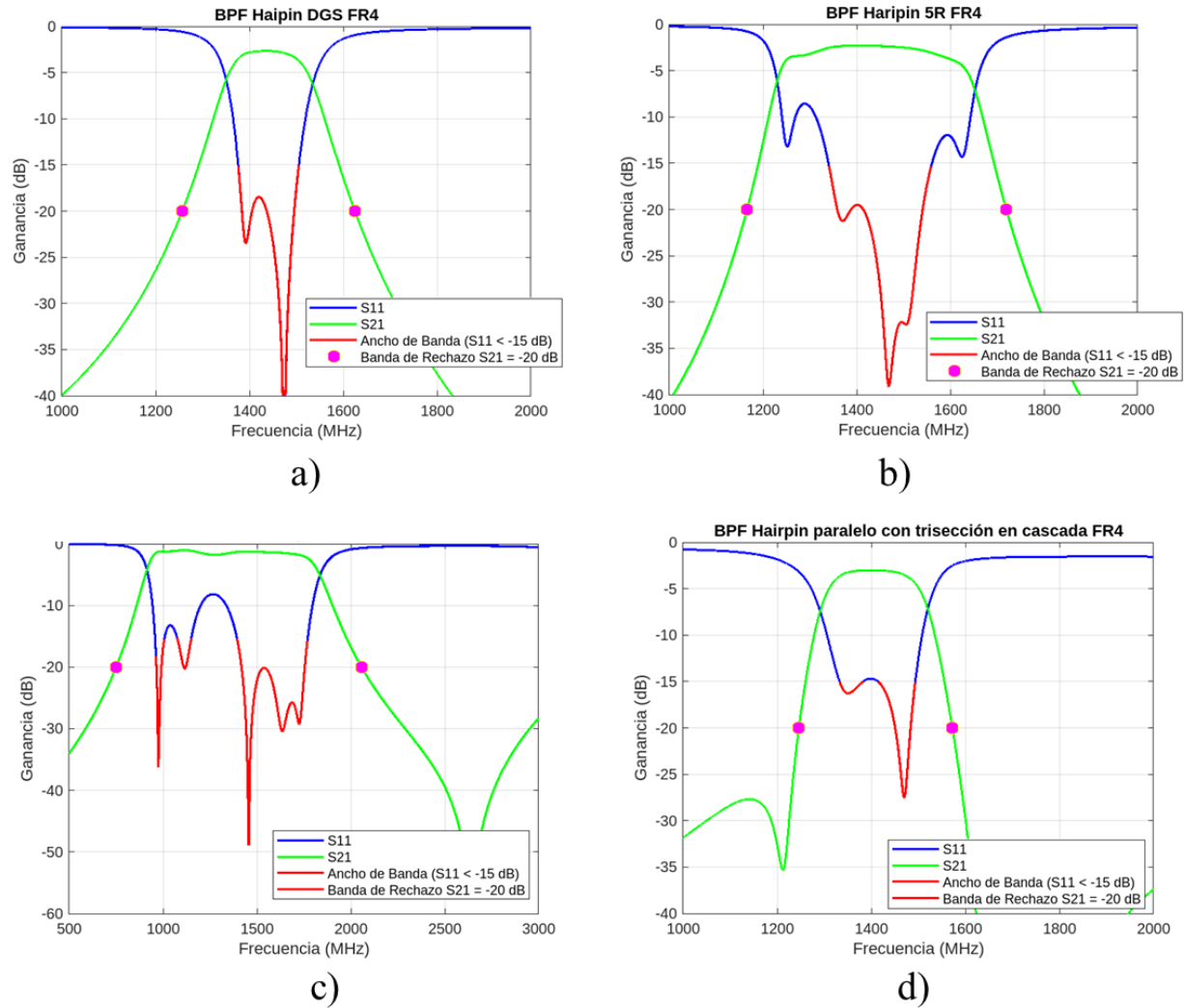
Simulación de Parámetros de Dispersión S_{11} y S_{21} para Filtros Pasabanda Rogers 5880



Nota. Parámetros de dispersión de la simulación de filtros con Rogers 5880: a) Hairpin DGS, b) Hairpin 5R (5 resonadores), c) Hairpin paralelo con trisección en cascada, d) Hairpin en cascada, e) Hairpin 3R y f) Interdigital. Las curvas representan: azul (S_{11} - reflexión), roja (ancho de banda con $S_{11} < -15$ dB), verde (S_{21} - transmisión) y los puntos en rosa indican la banda de rechazo ($S_{21} < -20$ dB). Simulaciones extraídas de ANSYS Electronics Desktop Student y Matlab.

Figura 16.

Simulación de Parámetros de Dispersión S_{11} y S_{21} para Filtros Pasabanda FR4



Nota. Se presentan los gráficos de los parámetros de dispersión para los filtros con FR4: a) Hairpin DGS, b) Hairpin 5 resonadores, c) Interdigital, d) Hairpin paralelo con trisección en cascada. Las curvas representan: azul (S_{11} - reflexión), roja (ancho de banda con $S_{11} < -15$ dB), verde (S_{21} - transmisión) y los puntos en rosa indican la banda de rechazo ($S_{21} < -20$ dB). Simulaciones extraídas de ANSYS Electronics Desktop Student. Graficado en Matlab.

Tabla 7.*Parámetros de desempeño de filtros con diferente topologías y cotas de atenuación (simulación)*

Topología con cota a (-15 dB) en S11	Polo S11	Ancho de Banda (MHz)	Frecuencia Central (MHz) S21	S21 en fc (dB)	S11 a 1420 MHz (dB)	S21 a 1420 MHz (dB)	Impedancia 1420 MHz (ohm)	Banda de rechazo MHz (-20 db) S21
Haipin 5R FR4	3,4,5	218	1450	-2.34	-20.72	-2.33	60.13	1165 – 1719
Haipin 5R Rogers	1	4.0	1356	-10.2	-18.79	-0.55	62.98	1318 – 1571
	2	18.75	1425	-0.52				
	3	13.25	1513	-0.68				
Haipin cascada rogers	1	9.61	1322	-0.17	-7.20	-1.10	127.39	1157 – 1612
	2	10.41	1439	-0.26				
Haipin DGS FR4	1	129.0	1441	-2.66	-18.47	-2.68	63.52	1256 – 1624
Haipin DGS rogers	1	63.69	1418	-0.14	-48.40	-0.14	50.38	1251 – 1573
Hairpin 3 R rogers	1	90.15	1417	-0.14	-30.26	-0.14	53.16	1246 – 1573
Hairpin paralelo trisección FR4	1	50.51	1358	-3.15	-15.29	-3.04	70.75	1245 – 1572
	2	78.52	1454	-3.23				
Hairpin paralelo trisección rogers	1	19.25	1372	-0.48	-16.15	-0.44	68.43	1315 – 1476
	2	10.75	1419	-0.44				
Interdigital FR4	1	43.75	984	-1.24	-20.22	-1.24	60.80	750 – 2056
	2	75	1113	-1.03				
	3,4,5	375	1581	-1.38				
Interdigital rogers	1	51.76	1260	-0.12	-32.2	-0.12	52.51	1000 – 1665
	2	33.0	1417	-0.12				
	3	9.0	1568	-0.39				

Nota. La tabla presenta los parámetros clave de diversas topologías de filtros, incluyendo el número de polos, el ancho de banda, la frecuencia central, el nivel de transmisión (S21), la reflexión (S11) y la impedancia a 1420 MHz. Además, se destaca la banda de rechazo en la que S21 alcanza -20 dB. Las simulaciones fueron realizadas utilizando una cota de -15 dB para S11.

Tabla 8.*Ventajas y desventajas de diferentes topologías de filtros diseñado (simulación)*

Topología	Ventajas	Desventajas
Hairpin 5R FR4	Impedancia aceptable (60.13 ohm). Ancho de banda más amplio (218.05 MHz). Muy buen S11 (-20.72 dB). Tamaño moderado	S21 algo alto (-2.33 dB).
Hairpin 5R Rogers	Impedancia aceptable (62.98 ohm). Muy buen S21 (-0.52 dB). Buen S11 (-16.15 dB).	Ancho de banda limitado (18.75 MHz). Tamaño un poco grande
Hairpin cascada Rogers	Excelente S21 (-0.17 dB). Tamaño compacto	Muy alta impedancia (127.39 ohm). S11 más alto (-7.20 dB).
Hairpin DGS FR4	Impedancia aceptable (63.52 ohm). Amplio ancho de banda (129.01 MHz). Buen S11 (-18.47 dB). Tamaño compacto	S21 algo alto (-2.68 dB). Perdidas de inserción
Hairpin DGS Rogers	Impedancia muy buena (50.38 ohm). Mejor S11 (-48.40 dB). Mejor S21 (-0.14 dB). Tamaño compacto	Ancho de banda moderado (63.69 MHz).
Hairpin 3R Rogers	Impedancia aceptable (53.16 ohm). Excelente S21 (-0.14 dB). Ancho de banda aceptable (90.15 MHz). Tamaño compacto	Ninguna significativa.
Hairpin paralelo trisección FR4	Impedancia aceptable (70.75 ohm, ligeramente fuera del rango, pero cercana). Ancho de banda aceptable (78.52 MHz). Buen S11 (-15.29 dB).	S21 alto (-3.04 dB). Tamaño muy grande
Hairpin paralelo trisección Rogers	Impedancia aceptable (52.51 ohm). Muy buen S21 (-0.44 dB).	Ancho de banda muy limitado (10.75 MHz). Tamaño muy grande
Interdigital FR4	Impedancia aceptable (60.80 ohm). Muy amplio ancho de banda (375 MHz, el más alto). Tamaño compacto Muy buen S11 (-20.22 dB).	S21 algo alto (-3.04 dB).
Interdigital Rogers	Impedancia muy buena (52.51 ohm). Muy buen S21 (-0.12 dB). Muy buen S11 (-32.2 dB). Tamaño compacto	Ancho de banda moderado (33 MHz).

Nota. Comparación de ventajas y desventajas de diferentes topologías de filtros construidos con materiales FR4 y Rogers 5880, evaluando parámetros clave como S21, S11, impedancia, ancho de banda y tamaño.

Características globales:

Hairpin DGS Rogers el filtro con mejor rendimiento global:

- Impedancia: Muy buena (50.38 ohm).
- S11: Mejor (-48.40 dB), lo que indica un excelente coeficiente de reflexión.
- S21: Muy buen valor (-0.14 dB), lo que significa mínimas pérdidas de inserción.

Desventaja: Ancho de banda moderado (63.69 MHz).

Interdigital FR4 el filtro con el ancho de banda más amplio:

- Ancho de banda: Muy amplio (375 MHz), el más alto de la tabla.
- S11: Muy buen valor (-20.22 dB).
- **Desventaja:** S21 algo alto (-3.04 dB).

Hairpin cascada Rogers el filtro con el mejor S21 (pérdidas de inserción):

- S21: Excelente (-0.17 dB), indicando muy bajas pérdidas.
- Tamaño: Compacto.
- **Desventaja:** Impedancia fuera del rango aceptable (127.39 ohm), y S11 alto (-7.20 dB).

Hairpin DGS Rogers el filtro con mejor S11 (coeficiente de reflexión):

- S11: Mejor de todos (-48.40 dB).
- Impedancia: Muy buena (50.38 ohm).

Análisis a partir de los datos de simulación:

Material del sustrato: FR4 es un material de mayor pérdida, pero ofrece un coste menor. Los filtros que utilizan este material tienen mayores anchos de banda, como se observa en el Hairpin 5R FR4 (218.05 MHz) y el Interdigital FR4 (375 MHz). Sin embargo, sufren más en términos de eficiencia de transmisión, con valores de S21 más altos (más pérdidas). Rogers 5880 es un material de baja pérdida que mejora la eficiencia de transmisión. En la mayoría de los casos, los filtros con Rogers muestran mejores S21 (menores pérdidas de señal), como el Hairpin 5R Rogers (-0.55 dB) y el Interdigital Rogers (-0.12 dB). No obstante, el ancho de banda es generalmente más limitado en los filtros Rogers, como el Hairpin paralelo con trisección Rogers (10.75 MHz).

Ancho de Banda: Los filtros con FR4 suelen tener un mayor ancho de banda en comparación con los de Rogers, lo que los hace más adecuados para aplicaciones donde se necesita capturar una mayor variedad de frecuencias. Por ejemplo, el Hairpin 5R FR4 ofrece un ancho de banda de 218.05 MHz, mientras que su contraparte en Rogers solo ofrece 18.75 MHz. Los filtros Interdigital FR4 y Interdigital Rogers también muestran una diferencia significativa en el ancho de banda, con 375 MHz y 33 MHz respectivamente.

Adaptación de Impedancia (en 1420 MHz): La mayoría de los filtros muestran una desviación respecto a los 50 ohm ideales, lo cual puede generar pérdidas adicionales. Por ejemplo, el Hairpin cascada Rogers tiene una impedancia de 127.39 ohm, lo que puede resultar en mayores pérdidas. Los filtros con impedancias más cercanas a los 50 ohm, como el Hairpin DGS Rogers (50.38 ohm) y el Interdigital Rogers (52.51 ohm), tienden a ser más eficientes en la transmisión de señales.

Pérdidas de Transmisión (S21): Los valores de S21 indican las pérdidas de transmisión. Los filtros con Rogers tienen menores pérdidas, destacando el Hairpin DGS Rogers y el Interdigital Rogers con S21 de -0.14 dB y -0.12 dB respectivamente, lo que implica una transmisión casi perfecta. Por otro lado, algunos filtros FR4 como el Hairpin paralelo con trisección FR4 tienen valores de S21 más altos (-3.04 dB), lo que sugiere mayores pérdidas de señal.

Reflexión (S11): Un valor bajo de S11 indica una buena adaptación del filtro, lo que reduce la reflexión de la señal. El Hairpin DGS Rogers destaca con un S11 extremadamente bajo (-48.40 dB), lo que indica una adaptación casi perfecta. Los filtros que muestran valores más altos, como el Hairpin cascada Rogers (-7.20 dB), indican una mayor reflexión y, por tanto, menor eficiencia.

4.1.3 Generación y Fabricación de Prototipos Altium designer

Una vez seleccionadas las topologías óptimas, se procede a la creación de archivos Gerber para la fabricación de las PCB. Estos archivos se extrajeron a partir del software de simulación, y se enviaron a una empresa de fabricación para producir los prototipos de los filtros.

Este paso fue fundamental para validar las simulaciones y realizar pruebas experimentales. La comparación entre los resultados simulados y medidos permitió afinar aún más los diseños y asegurarse de que cumplieran con los requisitos del proyecto.

4.2 Análisis y comparación de Resultados

Tabla 9.

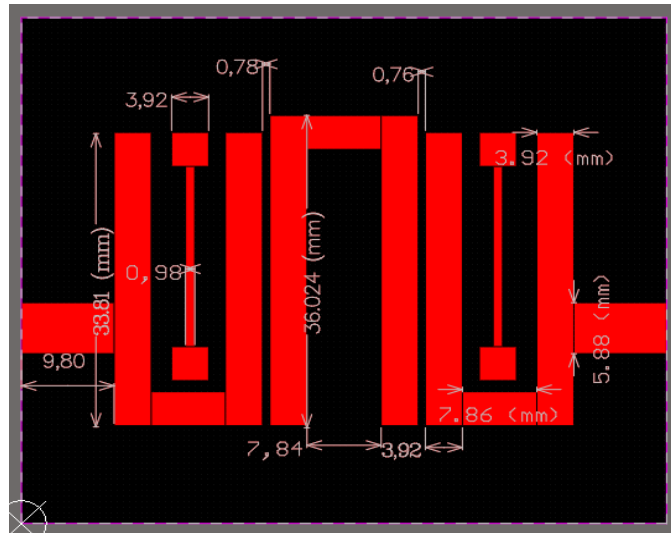
Comparación Resultados Simulados vs. Resultados Experimentales

Topologías	Polo	Ancho de banda (MHz)	Frecuencia central (MHz)	Valor de S21 en Fc (dB)	Frecuencia de banda de rechazo (-20 dB) 1 (MHz)	Frecuencia de banda de rechazo (-20 dB) 2 (MHz)	S11 en 1420 MHz (dB)	S21 en 1420 MHz (dB)	Impedancia en el umbral (-15 dB) (Ω)	Impedancia en 1420 MHz (Ω)
Haipin 5R FR4 (Simulado)	3,4,5	218.04	1450	-2.34	1165	1719	-20.72	-2.33	71.63	60.13
Haipin 5R Rogers (Simulado)	1	4.0	1356	-1.02	1318	1571	-18.79	-0.55	71.63	62.98
	2	18.75	1425	-0.52						
	3	13.25	1513	-0.68						
Haipin cascada Rogers (Simulado)	1	9.61	1322	-0.17	1157	1612	-7.20	-1.10	71.62	127.39
	2	10.41	1439	-0.26						
Haipin DGS Rogers (Simulado)	1	63.69	1418	-0.14	1251	1573	-48.40	-0.14	71.62	50.38
Interdigital Rogers (Simulado)	1	51.76	1260	-0.12	1000	1665	-32.2	-0.12	71.63	52.51
	2	33.0	1417	-0.12						
	3	9.0	1568	-0.39						
BPF Hairpin 5R FR4 (Experimental)	1	43.80	1404	-2.77	1245	1671	-14.19	-2.79	78.84	74.24
	2	67.32	1546	-3.43						
BPF Hairpin 5R Rogers 5880 (Experimental)	1	10.39	1443	-1.53	1361	1564	-3.09	-4.68	78.84	283.7
Hairpin DGS Rogers 5880 (Experimental)	2	9.15	1510	-1.69	1281	1588	-14.52	-0.72	78.84	73.11
Interdigital Rogers (Experimental)	1	24.37	1411	-0.77						
	1	18.25	1197	-0.77						
Rogers (Experimental)	2	7.0	1415	-1.14	1007	1567	-12.12	-1.29	78.84	82.92
	3	4.0	1490	-1.74						

Nota. Facilita la comparación de resultados para las diferentes topologías diseñadas.

Figura 17.

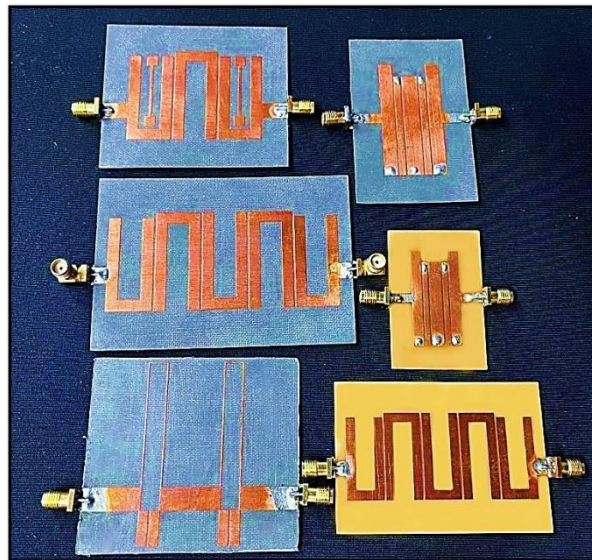
Medidas del diseño PCB del filtro Microstrip tipo Hairpin DGS Rogers 5880



Nota. Filtro pasabanda de Microstrip diseñado en Altium para la impresión de la PCB.

Figura 18.

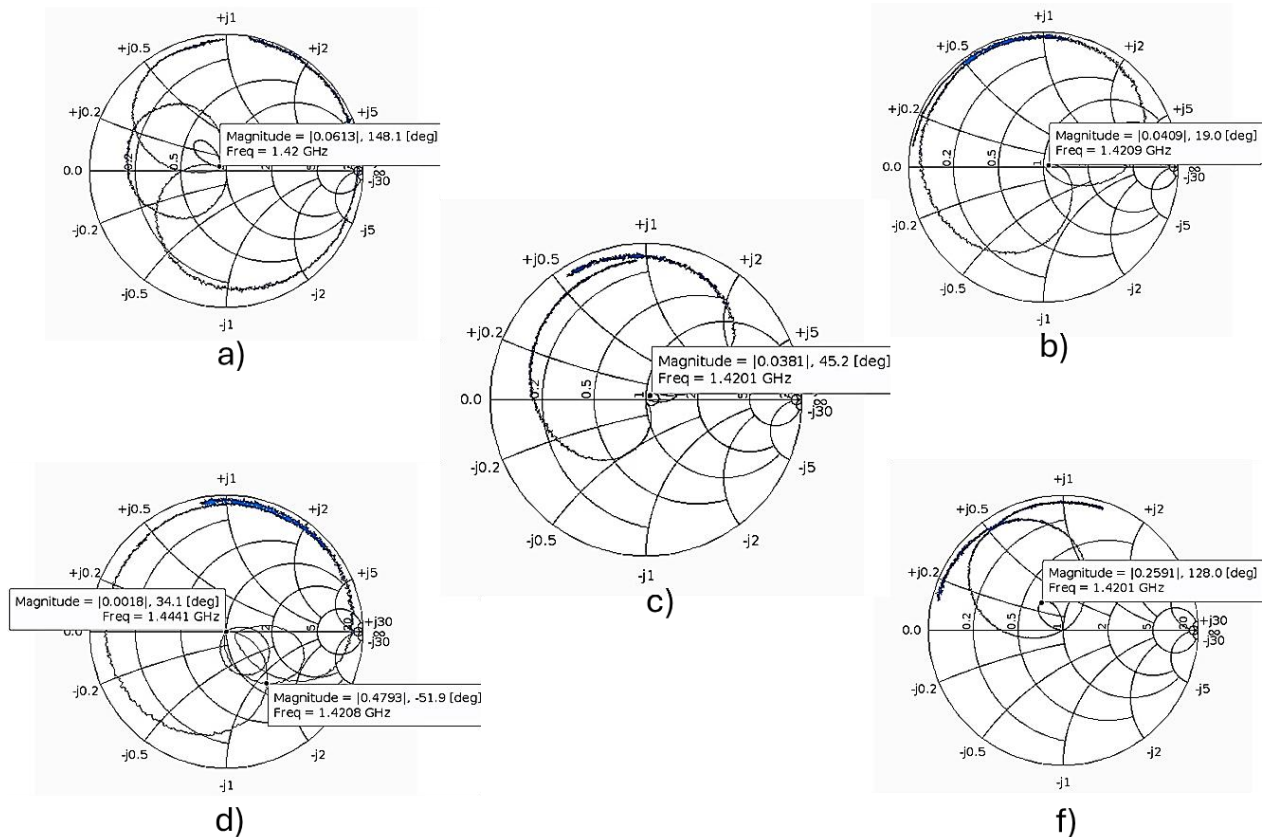
Prototipos de Filtros Pasabanda de Microstrip en Diferentes Topologías



Nota. Prototipos de filtros pasabanda diseñados utilizando líneas de cobre sobre diferentes sustratos, incluyendo Rogers 5880 y FR4.

Figura 19.

Cartas de Smith para el análisis de parámetros S11 de los filtros experimentales

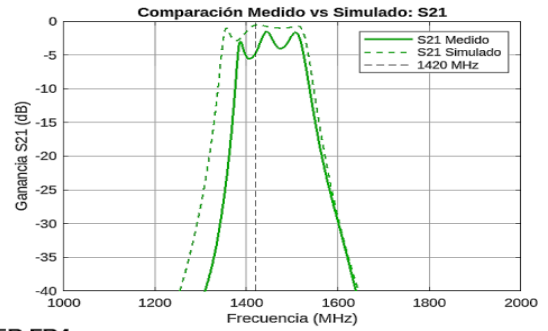
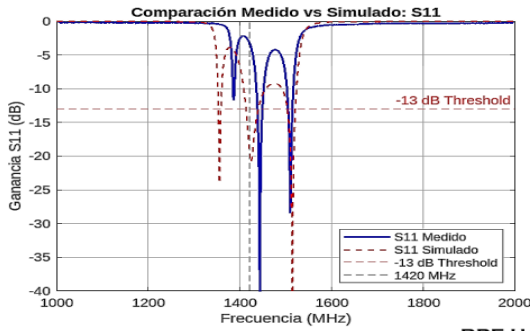


Nota. a) Interdigital Rogers 5880 b) Hairpin DGS Rogers 5880 c) Hairpin 5R FR4 d) Hairpin 5R Rogers 5880 e) Hairpin 5R Rogers 5880 f) Hairpin en cascada Rogers 5880. Los puntos indican el coeficiente de reflexión en 1.42 GHz. Esto facilita el análisis de la coincidencia de impedancias y la evaluación de parámetros de reflexión, siendo una herramienta clave en el diseño y optimización de circuitos de RF.

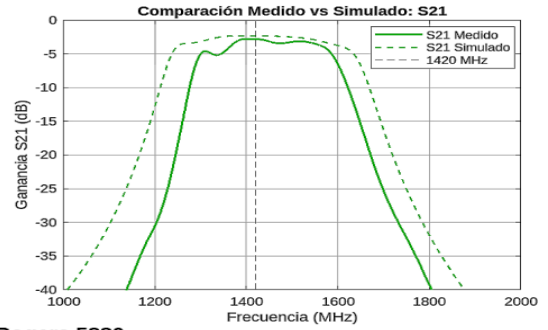
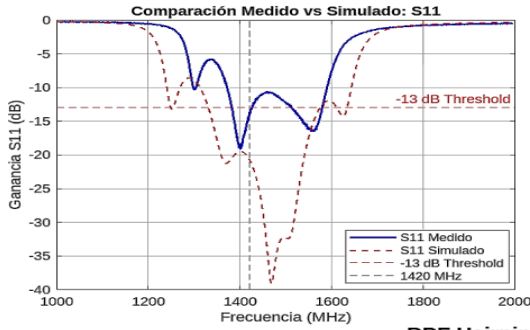
Figura 20.

Comparación de Topologías Implementadas: Simulación vs. Mediciones

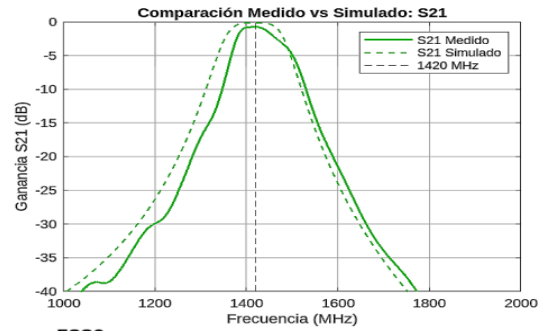
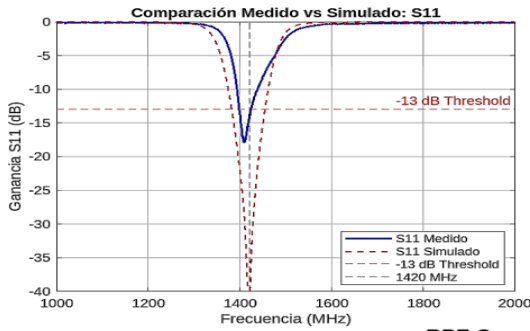
BPF Hairpin 5R Rogers 5880



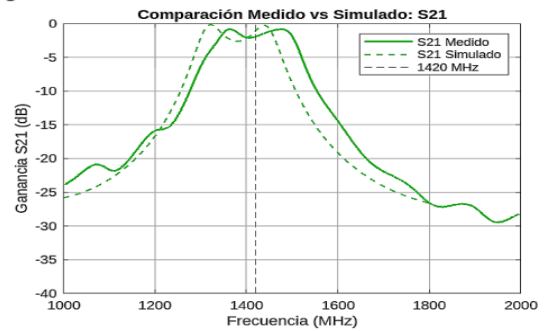
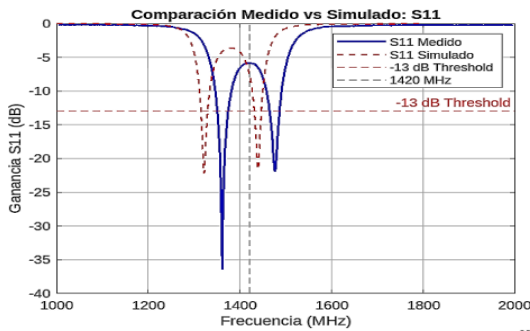
BPF Hairpin 5R FR4



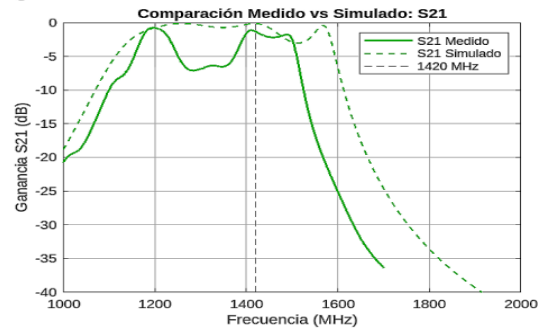
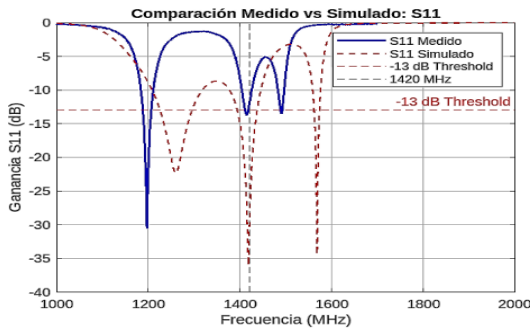
BPF Hairpin DGS Rogers 5880



BPF Cascada Rogers 5880



BPF Interdigital Rogers 5880



Nota. Resultados comparativos entre las simulaciones y las mediciones experimentales, destacando las diferencias en rendimiento de las topologías implementadas.

Tabla 10.

Comparación de Parámetros de Filtros Microstrip para 1.42 GHz (experimental)

Topología con cota a (-13 dB)	Polo	Ancho de Banda (MHz)	Frecuencia Corte Mínima (MHz)	Frecuencia Corte Máxima (MHz)	Frecuencia Central (MHz)	S21 en Frecuencia Central (dB)	S11 en 1420 MHz (dB)	Impedancia en 1420 MHz (ohm)
Hairpin 5R fr4	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		
	2	43.81	1382	1426	1404	-2.78	-14.19	74.2
	3	67.32	1513	1580	1546	-3.43		
Hairpin 5R Rogers	1	10.40	1438	1449	1443	-1.54	-3.09	283.7
	2	9.16	1505	1514	1510	-1.69		
Hairpin DGS	1	24.38	1399	1423	1411	-0.78	-14.53	73.1
Hairpin cascada	1	23.27	1351	1374	1362	-0.84	-5.87	153.6
	2	21.04	1465	1486	1476	-0.84		
Interdigital al Rogers	1	18.25	1188	1206	1197	-0.78		
	2	7.00	1411	1418	1415	-1.15	-12.12	82.9
	3	4.00	1488	1492	1490	-1.75		

Nota. La tabla presenta los resultados de mediciones experimentales de diferentes topologías de filtros con una cota de -13 dB. Incluye el número de polos, el ancho de banda, las frecuencias de corte mínima y máxima, la frecuencia central, los niveles de transmisión (S21) en la frecuencia central, la reflexión (S11) y la impedancia a 1420 MHz. Se destaca que la impedancia en la cota de -13 dB es menor a 78 ohm.

Identificación del Mejor Filtro experimental

Para identificar el mejor filtro, se evaluarán varios parámetros clave como ganancia, estabilidad de la frecuencia, ancho de banda, adaptación de impedancia, pérdidas de transmisión (S_{21}), y reflexión (S_{11}). Los filtros considerados son el BPF Hairpin 5R (FR4 y Rogers 5880), el Hairpin DGS y el filtro Interdigital.

Ganancia: Mejor opción: El filtro Hairpin DGS Rogers 5880 tiene la menor pérdida de transmisión (S_{21}) en su frecuencia central con -0.775 dB, lo que indica una buena ganancia en comparación con los otros filtros. Interdigital Rogers también es competitivo, con S_{21} en su frecuencia central de -0.779 dB en su primer polo. Los filtros con mayores pérdidas de transmisión son el BPF Hairpin 5R FR4 y el BPF Hairpin 5R Rogers 5880, que presentan mayores pérdidas en S_{21} , siendo este último el de peor desempeño con -3.4315 dB en el segundo polo.

Estabilidad de la Frecuencia: Más estable: El filtro Hairpin DGS Rogers 5880 muestra una frecuencia central bien definida y un ancho de banda moderado, lo que contribuye a la estabilidad. Además, mantiene un buen control de S_{21} en la banda de rechazo. El filtro Interdigital Rogers también es estable, Además su frecuencia central se distribuye en tres polos, lo que puede ser útil en aplicaciones que requieran filtrar múltiples rangos.

Ancho de Banda: Mejor opción: El filtro BPF Hairpin 5R FR4 tiene el ancho de banda más amplio (67.32 MHz en el segundo polo), lo que es favorable para aplicaciones que requieran cubrir una mayor porción del espectro. En contraste, el BPF Hairpin 5R Rogers 5880 presenta el

ancho de banda más estrecho (9.1575 MHz en el segundo polo), lo que lo hace más adecuado para aplicaciones de alta selectividad.

Adaptación de Impedancia (en 1420 MHz): Mejor opción: El Hairpin DGS Rogers 5880 ofrece la mejor adaptación de impedancia en 1420 MHz, con 73.12 ohms, lo que está muy cerca del valor ideal de 50 ohms en aplicaciones de RF. El BPF Hairpin 5R FR4 también tiene un buen desempeño con 74.24 ohms, mientras que el BPF Hairpin 5R Rogers 5880 tiene la peor adaptación de impedancia, con un valor de 283.70 ohms, lo que podría afectar su eficiencia en esta frecuencia.

Pérdidas de Transmisión (S₂₁): Mejor opción: El filtro Hairpin DGS Rogers 5880 destaca con la menor pérdida en transmisión a 1420 MHz, con un valor de -0.729 dB, lo que lo convierte en la mejor opción en términos de eficiencia. El filtro BPF Hairpin 5R Rogers 5880 presenta las mayores pérdidas de transmisión en esta frecuencia, con -4.688 dB.

Reflexión (S₁₁): Mejor opción: El filtro Hairpin DGS Rogers 5880 tiene la mejor adaptación de S₁₁ en 1420 MHz, con un valor de -14.527 dB, lo que indica que refleja muy poca energía y, por lo tanto, transmite la mayor parte de la señal. El filtro BPF Hairpin 5R Rogers 5880 tiene el peor desempeño en este aspecto, con un S₁₁ de -3.094 dB, lo que indica mayores reflexiones y menor eficiencia en la transmisión.

A continuación, se presenta en la Tabla 11 una comparativa que resume las principales ventajas y desventajas de distintos tipos de filtros microstrip destacando características relevantes.

Tabla 11.*Comparación de Ventajas y Desventajas de Diferentes Filtros Microstrip para 1.42 GHz*

Topología	Ventajas	Desventajas
Hairpin 5R fr4	Amplio ancho de banda en el Polo 3 (67.32 MHz).	
	Impedancia aceptable en 1420 MHz (74.24 ohm).	Impedancia cercana al umbral en Polo 3.
Hairpin 5R Rogers	Ancho de banda moderado en Polo 2 (43.81 MHz).	
	S21 relativamente bajo en las frecuencias centrales de los polos.	Impedancia muy alta en 1420 MHz (283.70 ohm), lo que puede generar pérdidas significativas.
Hairpin DGS	Material de baja pérdida (Rogers) que puede mejorar la eficiencia del filtro.	Anchos de banda pequeños (10.39 MHz y 9.16 MHz) que limitan la capacidad de captar señales.
	Buen S11 en 1420 MHz (-14.52 dB), indicando bajo nivel de reflexión.	Ancho de banda limitado (24.375 MHz).
Hairpin cascada	Impedancia cercana a la ideal en 1420 MHz (73.12 ohm).	
	Diseño con Defected Ground Structure (DGS) que mejora el rendimiento en frecuencias específicas.	
INTERDIGITAL ROGERS	S21 bajo en las frecuencias centrales de los polos (alrededor de -0.84 dB).	Impedancia elevada en 1420 MHz (153.68 ohm), lo que podría generar ineficiencia.
	Anchos de banda relativamente moderados (23.27 MHz y 21.04 MHz).	S11 en 1420 MHz no tan bajo (-5.87 dB), lo que sugiere una mayor reflexión.
INTERDIGITAL ROGERS	Buena relación entre ancho de banda y S21 en el Polo 1 (18.25 MHz, -0.78 dB).	S11 en 1420 MHz no alcanza el umbral deseado (-12.12 dB).
	Material de baja pérdida (Rogers) que mejora la eficiencia del filtro.	Anchos de banda pequeños en polos adicionales (7 MHz y 4 MHz), limitando la capacidad.
	Impedancia aceptable en 1420 MHz (82.92 ohm).	Los anchos de banda más pequeños pueden restringir la captación de señales de interés.

Nota. La tabla compara diferentes topologías de filtros, destacando las ventajas y desventajas clave de cada uno. Se resalta que el filtro Hairpin DGS presenta el mejor desempeño en términos de baja reflexión (S11) y adaptación de impedancia en 1420 MHz, mientras que el Hairpin 5R FR4 ofrece un ancho de banda amplio en su Polo 3.

4.2.1 Resultados Simulados vs. Resultados Experimentales

4.2.1.1 Identificación del Mejor Filtro. Basado en el análisis de los resultados, el filtro Hairpin DGS Rogers 5880 parece ser el mejor filtro en términos generales.

Material del Sustrato

Simulaciones: Los filtros con sustrato FR4 tienden a tener un mayor ancho de banda, pero a costa de mayores pérdidas de transmisión (S₂₁) debido a su naturaleza de mayor pérdida. Los filtros con Rogers 5880, por otro lado, demostraron un mejor rendimiento en términos de pérdidas de transmisión y eficiencia, aunque sus anchos de banda eran más estrechos.

Mediciones Experimentales: Los filtros Hairpin 5R FR4 e Interdigital FR4 también mostraron anchos de banda mayores, confirmando los resultados simulados. Sin embargo, los filtros con Rogers 5880 mostraron pérdidas de transmisión y reflexiones más bajas, alineándose con lo esperado de un material de baja pérdida.

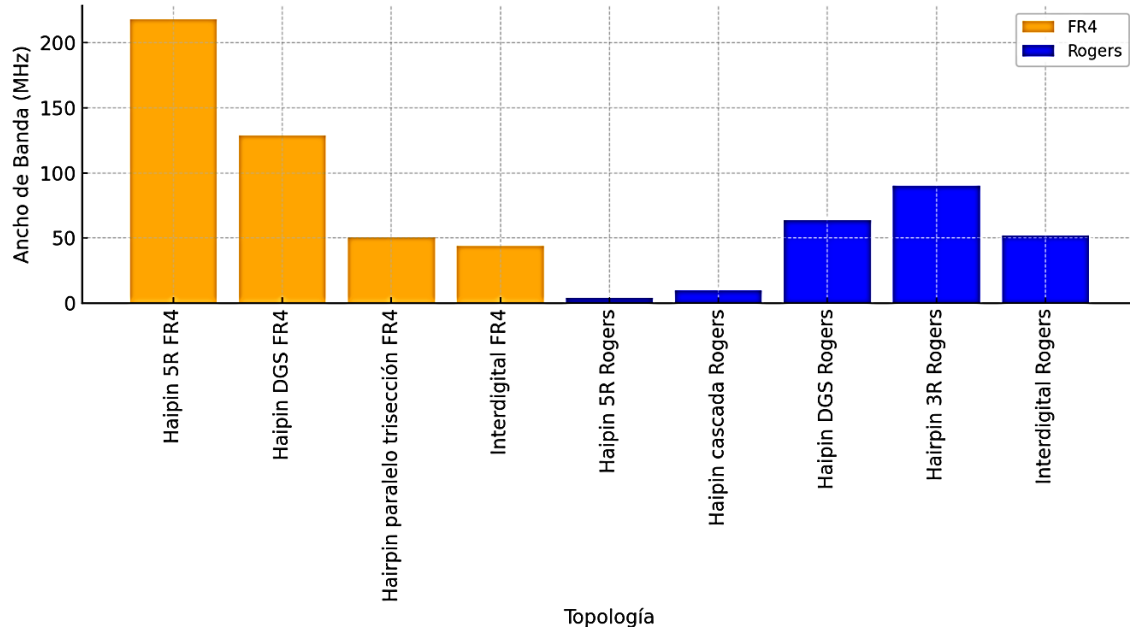
Ancho de Banda

Simulaciones: Los filtros con FR4 se destacaron por sus anchos de banda más amplios, como el Hairpin 5R FR4 (218.05 MHz) y el Interdigital FR4 (375 MHz). Los filtros con Rogers 5880 mostraron un comportamiento más selectivo, con anchos de banda más estrechos.

Mediciones Experimentales: El filtro Hairpin 5R FR4 presenta un ancho de banda notable en el Polo 3 (67.32 MHz), lo cual es consistente con los resultados simulados. El filtro Hairpin 5R Rogers muestra anchos de banda pequeños (10.39 MHz y 9.16 MHz), lo que también coincide con las simulaciones.

Figura 21.

Comparación de topologías por material para el ancho de banda (simulación)



Nota. Tendencia del sustrato FR4 a tener mayor ancho de banda.

Adaptación de Impedancia

Simulaciones: Los filtros con sustrato Rogers, como el Hairpin DGS Rogers y el Interdigital Rogers, mostraron impedancias cercanas a los 50 ohms ideales, mientras que el Hairpin cascada Rogers presenta impedancias significativamente más altas, lo que podría impactar la eficiencia.

Mediciones Experimentales: Los resultados experimentales corroboran que el Hairpin DGS Rogers tiene una impedancia cercana a la ideal (73.12 ohms en 1420 MHz), mientras que el Hairpin 5R Rogers exhibió una impedancia alta (283.70 ohms), lo que concuerda con las simulaciones y sugiere ineficiencia en esa frecuencia.

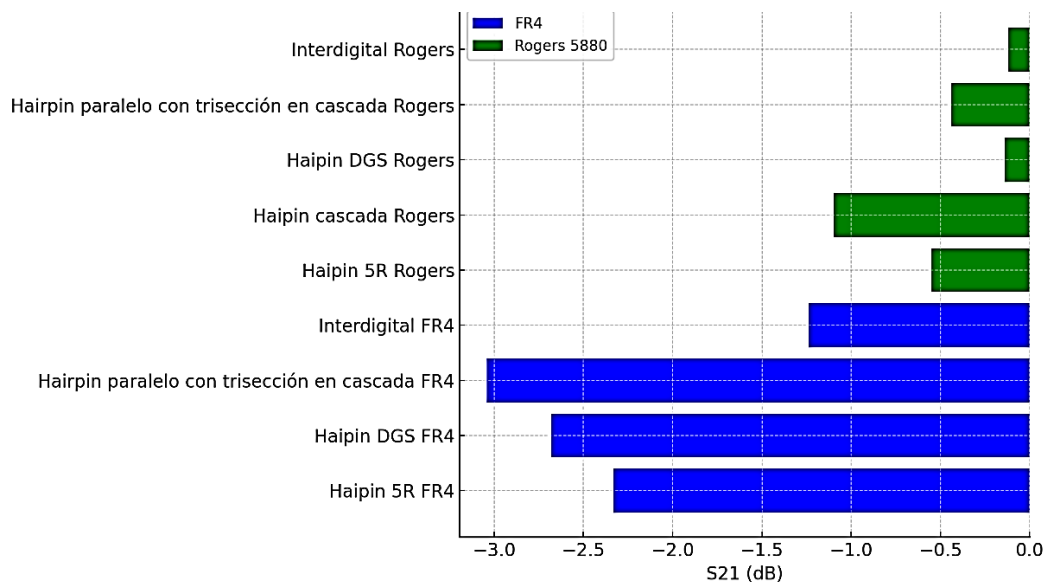
Pérdidas de Transmisión (S21)

Simulaciones: Se observa que los filtros con Rogers 5880 presentaban menores pérdidas de transmisión, con valores de S21 cercanos a 0 dB, mientras que los filtros con FR4 tiende a tener mayores pérdidas.

Mediciones Experimentales: Los resultados del Hairpin DGS con sustrato Rogers confirmaron pérdidas de transmisión mínimas (-0.729 dB), destacándose como el mejor filtro en términos de eficiencia, alineándose con los resultados simulados. Por el contrario, el Hairpin 5R Rogers mostró mayores pérdidas en S21, lo que fue consistente con su simulación.

Figura 22.

Comparación de S21 a 1420 MHz (simulación)



Nota. Tendencia del sustrato FR4 a tener mayor pérdida de inserción.

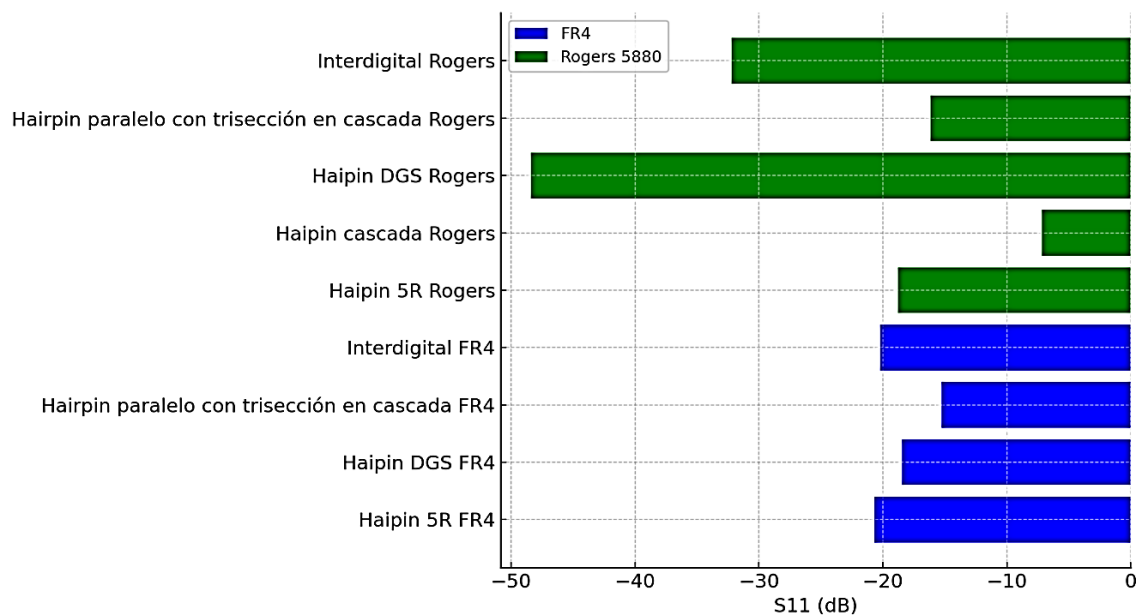
Reflexión (S11)

Simulaciones: Los valores simulados de S11 sugieren que los filtros con sustrato Rogers tienen mejor adaptación y menos reflexión, destacando el Hairpin DGS Rogers con un S11 extremadamente bajo (-48.40 dB).

Mediciones Experimentales: En los experimentos, el Hairpin DGS Rogers nuevamente demuestra un buen S11 de -14.527 dB, lo que indica una baja reflexión y coincide con los resultados de simulación. En contraste, el Hairpin 5R Rogers tuvo un peor desempeño con un S11 de -3.094 dB, lo que también fue reflejado en las simulaciones.

Figura 23.

Comparación S11 a 1420 MHz (simulación)



Nota. El sustrato de Rogers 5880 tiene menor Perdida de retorno.

4.2.1.2 Factores Determinantes de los Resultados.

Precisión del Diseño y Fabricación: Los filtros más afectados por errores de fabricación y componentes fueron aquellos basados en FR4, como el Hairpin 5R FR4. El sustrato FR4 presenta irregularidades que afectan el rendimiento y causaron grandes desplazamientos de frecuencia, además de una menor ganancia. En contraste, los filtros basados en el sustrato Rogers, como el Hairpin DGS Rogers 5880 y el Hairpin cascada Rogers 5880, presentaron mejores resultados debido a la estabilidad del material. Sin embargo, estos también sufrieron desplazamientos de frecuencia debido a la sensibilidad de la estructura del Hairpin, que requiere una fabricación extremadamente precisa.

Simulación vs. Práctica: La simulación proporciona resultados ideales, pero no considera factores prácticos como los defectos en la soldadura, las variaciones en la constante dieléctrica del sustrato, los parasitismos de los conectores y las trazas, ni los efectos de borde. Estos factores se reflejan en las diferencias significativas entre los valores simulados y los medidos.

4.3 Problemas Durante el Proyecto y Errores para Futuras Mejoras

Durante el proyecto surgieron diversos problemas que afectaron el rendimiento de los filtros diseñados. Entre ellos:

- a) **Calidad Deficiente de la Soldadura:** Una de las principales fuentes de error fue la baja calidad de la soldadura, la cual introdujo variaciones en la impedancia de los componentes. Las conexiones defectuosas entre los componentes afectaron las propiedades electromagnéticas del circuito, causando pérdidas adicionales y alterando la respuesta en frecuencia del filtro. Este factor explica las discrepancias observadas, en muchos casos, la ganancia y el ancho de banda resultaron diferentes a los esperados.

- b) Problemas con el Conector SMA:** La falta de espacio adecuado para el conector SMA, que invadió la pista de cobre, afectó negativamente el rendimiento de los filtros. Esta invasión cambió las dimensiones efectivas del Microstrip y alteró la impedancia, lo que, a su vez, impactó la respuesta en frecuencia y la ganancia. En el Hairpin 5R FR4 y otros filtros, esto probablemente contribuyó a la diferencia entre las frecuencias medidas y simuladas.
- c) Defectos en la Impresión del PCB:** La presencia de muescas y errores de precisión en la impresión del PCB afectó significativamente la respuesta del filtro. Las irregularidades en las trazas de microstrip alteraron el acoplamiento y la impedancia, lo que provocó un desplazamiento en la frecuencia central. Estos defectos impactaron en filtros como el Interdigital y el Hairpin 5R FR4, los cuales presentaron diferencias notables en el ancho de banda y las frecuencias.
- d) Irregularidades del Sustrato FR4:** Se observaron variaciones significativas en el sustrato FR4, particularmente en su constante dieléctrica. Estas variaciones afectaron la respuesta en frecuencia y generaron disparidades entre los resultados simulados y los medidos. El sustrato Rogers, por otro lado, mostró un comportamiento mucho más estable, ofreciendo mejores valores en términos de pérdidas de inserción y precisión de impedancia, pero aun así sufrió desplazamientos.
- e) Variaciones en la Constante Dieléctrica y el Espesor del Sustrato:** Los valores nominales de la constante dieléctrica y el espesor en las simulaciones no siempre coincidieron con las propiedades reales de los materiales. Estas variaciones impactaron especialmente al filtro de Hairpin 5R FR4, ya que el FR4 es conocido por tener una

constante dieléctrica menos estable en comparación con Rogers, lo que contribuyó a los desplazamientos de frecuencia observados.

- f) Malas prácticas para aplicaciones RF:** Al diseñar una PCB para aplicaciones RF, es crucial evitar una serie de malas prácticas que pueden degradar el rendimiento del circuito. Entre los aspectos que requieren especial atención se encuentran las pistas demasiado largas, el ancho de pista mal calculado, y el uso de esquinas en ángulo recto, lo que puede generar pérdidas y desadaptaciones de impedancia. Se presentaron algunos desafíos, relacionados con la desadaptación de impedancia y el uso de esquinas en ángulo recto, particularmente en la topología interdigital, lo que permitió identificar cómo estos factores afectan el rendimiento en condiciones reales, generando pérdidas de retorno y reflejos. Además, se observó que ciertas uniones SMA presentaban un exceso de estaño, lo que impactó la calidad de las conexiones. Aunque estos detalles presentaron oportunidades de mejora, proporcionaron valiosas lecciones sobre la importancia de aplicar correctamente las mejores prácticas en el diseño de RF.

Figura 24.

Filtro de microstrip con defecto en la impresión del material Rogers 5880



Nota. La figura muestra un defecto observable en la superficie del filtro, que puede afectar su rendimiento y características eléctricas.

Tabla 12.

Verificar las malas prácticas aplicadas al momento de diseñar, fabricar e implementar los filtros

Categoría	Descripción de la Mala Práctica	Hairpin DGS Rogers 5880	Hairpin 5R Rogers 5880	Inter-digital FR4 (excluida)	Inter-digital Rogers 5880	Hairpin en Cascada Rogers 5880	Hairpin 5R FR4
Pistas RF	Pistas demasiado largas		X			X	X
	Ancho de pista mal calculado (desadaptación de impedancia)			X	X		
	Uso de esquinas en ángulo recto	X	X	X	X	X	X
Plano de Tierra	Plano de tierra fragmentado o interrumpido			X	X		
	Vías insuficientes para conexión a tierra			X	X		
Conectores SMA	Conector SMA mal fijado o flojo			X	X		
	Mala transición de pista a conector SMA (desadaptación de impedancia)	X	X	X	X	X	X
	Uso de conectores SMA de baja calidad						
Soldaduras	Soldadura fría o en exceso			X	X		
	Sobrecalentamiento de componentes durante la soldadura			X	X		
Interferencia entre Componentes	Componentes demasiado cercanos (acoplamiento electromagnético)			X	X		
	Uso de componentes pasivos de baja calidad						
Disipación Térmica	Falta de diseño térmico (vías térmicas o planos de disipación)	X	X	X	X	X	X
Máscara de Soldadura/Serigrafía	Máscara de soldadura mal alineada						
	Serigrafía colocada sobre pistas de alta frecuencia						

Nota. La Tabla muestra una forma sencilla de visualizar y entender las causas de muchas complicaciones a la hora de implementar el diseño de varias topologías.

5. Conclusiones

Se logro con éxito los objetivos específicos, evidenciando un avance en el diseño de filtros pasivos para el estudio de la línea de hidrogeno en la UIS. El estudio de diversas topologías, como Hairpin e Interdigital, permitió identificar características clave que optimizan el rendimiento del filtro. Las simulaciones realizadas en Ansys HFSS Student facilitaron un ajuste de las dimensiones de los resonadores, resultando en un acoplamiento y reducción notable en el coeficiente de reflexión (S_{11}). los diseños fueron validados mediante pruebas experimentales. Este enfoque no solo acercó los resultados a los requerimientos de pérdidas de inserción y retorno en la banda de paso, sino que también sentó las bases para futuras optimizaciones.

El filtro de tipo Hairpin cascada con sustrato Rogers y 2 resonadores presenta un rendimiento destacable en términos de ancho de banda, exhibiendo bajas pérdidas de inserción, con una ganancia en S_{21} de -0.84 dB en ambos polos (1 y 2). En particular, el Polo 1 muestra un ancho de banda de 23.27 MHz y una frecuencia central de 1362 MHz, mientras que el Polo 2 tiene un ancho de banda de 21.04 MHz y una frecuencia central de 1476 MHz. Sin embargo, su efectividad se ve condicionada por la necesidad de ajustes precisos en la frecuencia de operación. A pesar de estos ajustes requeridos, el filtro en cascada ofrece resultados muy satisfactorios.

El filtro interdigital con sustrato Rogers 5880, aunque prometedor en simulaciones, enfrenta desafíos significativos en su ejecución práctica. En particular, el Polo 1 tiene un ancho de banda de 18.25 MHz con una frecuencia central de 1197 MHz y una ganancia de -0.78 dB, mientras que el Polo 2 presenta un ancho de banda más limitado de 7.00 MHz y una frecuencia central de 1415 MHz con una ganancia de -1.15 dB. Las complicaciones en el diseño de puertos y errores de

fabricación han limitado su ancho de banda y han incrementado su sensibilidad a variaciones mínimas en el diseño. Ajustar la frecuencia de operación para mejorar su rendimiento general.

La topología Hairpin de cinco resonadores con sustrato FR4 presenta un notable desafío debido a su alta pérdida de inserción, con un valor de -2.78 dB para el Polo 2 y -3.43 dB para el Polo 3. No obstante, cuenta con un ancho de banda más amplio de 43.81 MHz en el Polo 2 y 67.32 MHz en el Polo 3, y una pérdida de retorno aceptable de -14.19 dB en el Polo 2. A pesar de sus limitaciones en términos de pérdidas, su capacidad para manejar un ancho de banda mayor lo hace una opción interesante.

El diseño del filtro hairpin de cinco resonadores en sustrato Rogers muestra ventajas en términos de menores pérdidas de ganancia y retorno, con un S_{21} de -1.54 dB en el Polo 1 y -1.69 dB en el Polo 2, en comparación con su contraparte en FR4. Sin embargo, su rendimiento se ve comprometido por un ancho de banda reducido de 10.40 MHz y 9.16 MHz respectivamente, además de un rizado considerable. Los resultados actuales indican que todavía hay margen para mejoras.

Finalmente, el filtro hairpin con tierra defectuosa (DGS) se distingue por su excepcional baja pérdida de inserción, con un valor de -0.78 dB, y un ancho de banda de 24.38 MHz a una frecuencia central de 1411 MHz. A pesar de ser una estructura compacta que ofrece una buena relación tamaño-beneficio, los resultados no fueron tan altos como se esperaban. La ganancia en S_{21} de -14.53 dB indica un buen coeficiente de reflexión. Futuras optimizaciones conducirán a mejoras significativas en su rendimiento, consolidándolo como una opción prometedora.

El filtro paralelo con trisección en cascada exhibió una buena pérdida de inserción en la simulación y un coeficiente de reflexión aceptable a lo largo del ancho de banda. Sin embargo, por su gran tamaño físico no pudo ser implementado, ya que alcanzaba casi 27 cm de ancho.

Aunque se lograron buenos resultados con cada topología de filtro diseñada, es importante destacar que todos los filtros presentan oportunidades de mejora. Las variaciones en el proceso de fabricación, así como los ajustes en los diseños, podrían llevar a un rendimiento aún más optimizado. La identificación de estas áreas de mejora sugiere que, a través de un enfoque continuo en la innovación y refinamiento de las técnicas de diseño, se pueden alcanzar niveles superiores de eficiencia y rendimiento en aplicaciones de alta frecuencia. Este potencial para la mejora continua subraya la importancia de la investigación y el desarrollo en el campo de los filtros pasabanda.

Los resultados fueron influenciados por la calidad del sustrato, la precisión en la fabricación, la calidad de la soldadura y la correcta colocación de los conectores. Los errores en el diseño y la fabricación llevaron a mayores desplazamientos de frecuencia y pérdidas de ganancia en algunos filtros. Al diseñar PCBs para aplicaciones RF, es crucial evitar malas prácticas como la desadaptación de impedancia y errores en la soldadura de conectores SMA. La experiencia con la topología interdigital destacó cómo las decisiones de diseño afectan el rendimiento del filtro, especialmente en pérdidas de retorno y reflejos. Estas lecciones subrayan la importancia de seguir buenas prácticas en el diseño de RF y validar siempre los resultados con pruebas exhaustivas, contribuyendo así a mejorar futuros diseños y fortalecer las competencias técnicas.

6. Recomendaciones

Se recomienda prestar especial atención a la calidad del sustrato y los materiales utilizados en la fabricación de los filtros. El uso de sustratos como el Rogers 5880, proporciona estabilidad y un mejor comportamiento a frecuencias altas.

Mejorar los métodos de fabricación, especialmente para topologías sensibles como el Hairpin de 5 resonadores. Este diseño mostró una alta sensibilidad a pequeñas variaciones en la fabricación, lo que generó desplazamientos de frecuencia y aumentó el coeficiente de reflexión. Para minimizar estos efectos, se sugiere implementar tolerancias más estrictas en el proceso de manufactura y realizar más iteraciones de ajuste fino durante la fase de simulación y validación.

Es importante considerar la implementación de pruebas más detalladas y rigurosas para validar los diseños en las primeras etapas de desarrollo. Como se observó en el filtro Interdigital, aunque las simulaciones iniciales eran prometedoras, el desempeño real se vio afectado por errores de fabricación que podrían haberse prevenido con un mayor control en la producción. Por lo tanto, realizar pruebas intermedias antes de la fabricación final y ajustar los diseños según los resultados medidos es crucial para asegurar un rendimiento óptimo.

Además, en cuanto a las topologías de mayor tamaño, como el filtro paralelo con trisección en cascada. Aunque los resultados simulados fueron buenos, su tamaño físico impidió su uso práctico. Futuras investigaciones podrían centrarse en reducir el tamaño sin comprometer el rendimiento, utilizando técnicas avanzadas de diseño de filtros.

Finalmente, las experiencias adquiridas en este trabajo resaltan la importancia de seguir buenas prácticas de diseño en aplicaciones RF, como la correcta colocación de conectores SMA y la optimización del acoplamiento entre resonadores. La implementación de estos aprendizajes asegurará que futuros proyectos logren un mayor nivel de precisión y rendimiento, consolidando la relevancia del trabajo práctico y la mejora continua en el diseño de filtros para aplicaciones avanzadas como la radioastronomía.

Es fundamental reconocer las limitaciones del software utilizado en este trabajo de grado. La licencia académica de Ansys, que se empleó en este estudio, está restringida exclusivamente a fines no comerciales, lo que limita su uso a investigaciones académicas, proyectos estudiantiles y demostraciones educativas. Para proyectos futuros que requieran actividades como consultoría, evaluaciones comparativas o diseño comercial, es esencial obtener una licencia comercial. Esto no solo permitirá un uso más amplio y flexible del software, sino que también facilitará la implementación de herramientas avanzadas que mejoren la fabricación de filtros y permitan simulaciones más complejas y precisas.

Referencias Bibliográficas

Bankey, K., & Bhargava, A. (2017). Design of compact Microstrip Hairpin Multi Bandpass filter. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC PROGRESS AND RESEARCH (IJSPR), 66.

Bandpass Filter Module. (s. f.). Accesorios Eléctricos y Electrónicos. Walmart. <https://walmart.com.mx/ip/electricidad/bandpass-filter-module-signal-filters-board-pcb-efficient-2-3-2-5ghz-for-diy-anggrek-signal-filter-board/00645936981315>

Binney, J., & Merrifield, M. (1998). Galactic Astronomy. Princeton University Press.

Binney, J., & Tremaine, S. (2011). Galactic dynamics (Vol. 13). Princeton University Press.

Braun, R. (2012). Cosmological evolution of atomic gas and implications for 21 cm HI absorption. Manuscrito aceptado para publicación en Astrophysical Journal. <https://arxiv.org/pdf/1202.1840>

Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2017). An introduction to modern astrophysics (2.^a ed.). Cambridge University Press.

Científica, C. (2017, January 27). La emisión del hidrógeno neutro a 21 cm. Cuaderno De Cultura Científica. <https://culturacientifica.com/2017/01/20/hidrogeno-universo-i-la-emision-del-hidrogeno-neutro-21-cm/>

Cómo ve ALMA | ALMA. (n.d.). <https://www.almaobservatory.org/es/sobre-alma/observando-con-alma/como-ve-alma/>

Dickey, J. M., & Lockman, F. J. (1990). H I in the galaxy. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 28(1), 215-259. <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.28.090190.001243>

Draine, B. T. (2011). *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*. Princeton University Press.

Emonts, B. H. C., et al. (2011). Neutral hydrogen (H I) and star formation in the massive galaxy MRC 0316-257. *Astronomy & Astrophysics*, 532, A62.

Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. L. (1989). *The Feynman Lectures on Physics*. Addison Wesley Publishing Company.

Grassin, C. (2020). Hairpin filter design. Charles' Labs. <https://charleslabs.fr/en/project-Hairpin+filter+design>

Gupta, K. C., Gupta, K. C., Garg, R., & Bahl, I. J. (1996). *Microstrip Lines and Slotlines*. Artech House Microwave Library.

Haynes, M. P., Hogg, D. E., Maddalena, R. J., Roberts, M. S., & Van Zee, L. (1998). Asymmetry in High-Precision Global H [CSC]i/[CSC] Profiles of Isolated Spiral Galaxies. *The Astronomical Journal*, 115(1), 62–79. <https://doi.org/10.1086/300166>

Hogg, D. E., Roberts, M. S., Haynes, M. P., & Maddalena, R. J. (2007). Diffuse HiDisks in Isolated Galaxies. *The Astronomical Journal*, 134(3), 1046–1060. <https://doi.org/10.1086/520766>

Hong, J. (2001). Transmission Lines and Components. En *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications* (pp. 76-107). EBSCOhost Applied Science & Technology Source Ultimate.

Hong, J. (2011). *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. <https://doi.org/10.1002/9780470937297>

Kershaw, V. S., Bhadauria, S. S., & Tomar, G. S. (2017). Design of Microstrip Hairpin-Line Bandpass Filter with Square Shape Defected Ground Structure. *Asia-Pacific Journal of Advanced Research in Electrical and Electronics Engineering*, 1(1), 21–38. <https://doi.org/10.21742/ajaece.2017.1.1.03>

Kulkarni, S. R., & Heiles, C. (1987). The 21-cm line: A probe of galactic structure. *Physics Reports*, 166(1-2), 1-51. <https://adsabs.harvard.edu/full/1989AJ....98..267V>

Li, W. (2024b, febrero 28). What is Rogers PCB? Tecnología: Su Socio de Servicios de Fabricación Electrónica de Confianza. <https://www.mokotechnology.com/es/what-is-rogers-pcb/>

Liu. (2020, 13 noviembre). Materiales para PCB – La guía definitiva para la fabricación de PCB. Ensamblaje del PCB, Fabricación del PCB, Diseño del PCB - OURPCB. <https://www.ourpcbar.com/materiales-para-pcb.html>

Lu, N. J., Liao, N. C., & Chang, N. C. (2008). Microstrip Parallel-Coupled Filters With Cascade Trisection and Quadruplet Responses. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56(9), 2101–2110. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2008.2002226>

Madau, P., Meiksin, A., & Rees, M. J. (1997). 21 Centimeter Tomography of the Intergalactic Medium at High Redshift. *The Astrophysical Journal*, 475(2), 429–444. <https://doi.org/10.1086/303549>

Maselli, G., & José, D. (2013). Reconstrucción de la curva de rotación y mapeo de nuestra galaxia con el radiotelescopio SALSa a 1420 MHz. Universidad del Valle de Guatemala. <http://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/123456789/1997>

Mchaalia, R., Mejri, F., & Aguilí, T. (2023). RF Receiver Design Using Planar Technology for 21 cm Radio Telescope. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2325945/v1>

Pal, S., Lancaster, M. J., & Norrod, R. D. (2012). HTS Bandstop Filter for Radio Astronomy. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 22(5), 236–238. <https://doi.org/10.1109/lmwc.2012.2193122>

Peñañiel Beltrán, G. (2008). Estudio de técnicas de diseño para reducir el nivel de ruido en diseños de LNAs para un radiotelescopio en la banda de 1400Mhz.

Purohit, A., & Toshniwal, S. (2015). Design and simulation of hairpin band pass filter for different substrate (Vol. 3, Número 1). International Journal of Engineering and Technical Research. ISSN:2321-0869

Roberts, M. S. (1975). Radio observations of neutral hydrogen in galaxies. En A. Sandage, M. Sandage, & J. Kristian (Eds.), *Galaxies and the Universe* (p. 309). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1975gaun.book..309R> *Astronomical Journal*, 79(6), 192.

S. Mora, Y. Alonso, N. Vargas, J. Vera and J. Avendano, "Design of a bandpass filter using microstrip Hairpin resonators," 2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), Pucon, Chile, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/CHILECON.2017.8229581.

Samaniego, S. (2024). Diseño e Implementación de un Filtro Microstrip Pasa Banda Hairpin para la banda n77 de 5G. *Revista Chone Ciencia Y Tecnología*, 2(1), 1–17. <https://doi.org/10.56124/cct.v2i1.001>

Scott, D., & Rees, M. J. (1990). The 21-cm line at high redshift: A diagnostic for the origin of large scale structure. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 247, 510. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990MNRAS.247..510S>

Smith, R. C. (2010). Foundations of materials science and engineering. McGraw-Hill.

Stroe, A., Oosterloo, T., Röttgering, H. J. A., Sobral, D., Van Weeren, R., & Dawson, W. (2015). Neutral hydrogen gas, past and future star formation in galaxies in and around the ‘Sausage’ merging galaxy cluster. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 452(3), 2731–2744. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1462>

UPCT - Universidad Politécnica de Cartagena. (s. f.). Sistema de bloques radiotelescopio. <https://www.upct.es/~geat/GEAT/MapaRadioTelescopio.php>

Vela, J. (1999). Las líneas de transmisión: conceptos básicos y aplicaciones. En F. Gómez (Ed.), Ingeniería de Comunicaciones Electromagnéticas (p. 31). Editorial Tecnológica de Avanzada.

Venture. (2024, 11 marzo). Taconic TLY-5 - Venture Electronics. <https://www.venture-mfg.com/es/taconico-tly-5/>

Verschuur, G. (2007). The Invisible Universe. In Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68360-7>

Wilson, T. L., Rohlfs, K., & Hüttemeister, S. (2013). Tools of Radio Astronomy. Springer.

Yu, T., Li, C., Li, F., Zhang, Q., Sun, L., Gao, L., Wang, Y., Zhang, X., Li, H., Jin, C., Li, J., Liu, H., Gao, C., Meng, J., & He, Y. (2009). A Wideband Superconducting Filter Using Strong Coupling Resonators for Radio Astronomy Observatory. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 57(7), 1783–1789. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2009.2022812>

Yuanzhi Li, M. J. Lancaster, F. Huang and N. Roddis, "Superconducting microstrip wide band filter for radio astronomy," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2003, Philadelphia, PA, USA, 2003, pp. 551-554 vol.1, doi: 10.1109/MWSYM.2003.1210998.

Apéndices

Apéndice A. [Entregables en Google Drive de las Topologías realizadas.](#)

Entregables en Google drive de los filtros diseñados que abarcan archivos CSV con datos de mediciones reales, gráficas generadas en MATLAB, cartas de Smith también en MATLAB, simulaciones realizadas con Ansys HFSS Student 3D y proyectos diseñados en Altium Designer. Contienen archivos Gerber donde se pueden visualizar las dimensiones y especificaciones de cada filtro.

Apéndice B. [Procesamiento de Datos en MATLAB.](#)

Carpeta en Google Drive con archivos MATLAB que leen datos en formato CSV y los convierten a .mat. Estos archivos permiten graficar los parámetros S11 y S21 de cada topología de filtro, calcular el ancho de banda y generar una Carta de Smith para medir las impedancias del filtro.

Apéndice C. [Visualización interactiva de los resultados en Google Colab.](#)

Apéndice D. [Visualización interactiva de la simulación en Google Colab.](#)

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”