



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE  
POTENCIA PARA LA BANDA DE FRECUENCIA DE 0.05 GHZ A 6  
GHZ CON TECNOLOGÍA MMIC”**

**Trabajo de Titulación**

**Tipo:** Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y  
REDES**

**AUTOR:**

**LUIS DANIEL MARIÑO GÓMEZ**

Riobamba – Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE  
POTENCIA PARA LA BANDA DE FRECUENCIA DE 0.05 GHZ A 6  
GHZ CON TECNOLOGÍA MMIC”**

**Trabajo de Titulación**

**Tipo:** Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y  
REDES**

**AUTOR:** LUIS DANIEL MARIÑO GÓMEZ

**DIRECTOR:** ING. HUGO OSWALDO MORENO AVILES

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Luis Daniel Mariño Gómez

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

Yo, Luis Daniel Mariño Gómez, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 27 de noviembre del 2023






**Luis Daniel Mariño Gómez**

**060413045-0**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA PARA LA BANDA DE FRECUENCIA DE 0.05 GHZ A 6 GHZ CON TECNOLOGÍA MMIC**, realizado por el señor: **LUIS DANIEL MARÍÑO GOMEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Pedro Severo Infante Moreira, PhD <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-11-27
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Aviles, PhD <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2023-11-27
Ing. Jefferson Alexander Ribadeneria Ramirez, PhD <b>ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2023-11-27

## **DEDICATORIA**

Con profundo agradecimiento, dedico este trabajo a Dios, quien me ha otorgado la vida, la salud y la sabiduría necesaria para alcanzar una de mis metas más significativas en los momentos más desafiantes, permitiéndome superar obstáculos que se han convertido en valiosas lecciones en mi vida. A mis amados padres, Luis y Elizabeth, les extiendo mi gratitud eterna por su apoyo total e inquebrantable. Sus palabras alentadoras y su constante ánimo me han impulsado tanto en mi camino académico como en mi desarrollo personal. Gracias a su esfuerzo incansable, he sido moldeado en una persona con valores éticos y sólidos principios. En los momentos más difíciles, han estado a mi lado, ofreciéndome un hombro en el cual apoyarme, asegurándose de que nunca renuncie y siga avanzando. Este logro es un reflejo de su amor y dedicación, y lo dedico con cariño en reconocimiento de todo lo que han hecho por mí.

Daniel

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme la invaluable oportunidad de estudiar en su prestigiosa institución. A mis maestros, les agradezco mucho por enseñarme con respeto y dedicación, dejando una marca importante en mi vida como estudiante. Especialmente, quiero destacar a mi director de tesis, el Ing. Hugo Moreno, quien fue de gran ayuda en este proyecto, siempre dispuesto a responder mis preguntas y aclarar mis dudas, asegurando que todo saliera bien. Y especialmente a mi familia, mis padres y hermanos a quienes les agradezco de corazón por su apoyo constante, tanto directo como indirecto, su respaldo ha sido un pilar fundamental en este camino, este logro también es gracias a ellos.

Daniel

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
RESUMEN .....	xiv
SUMMARY .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

## CAPÍTULO I

<b>1.</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1</b>	<b>Tecnología de sistemas de microondas .....</b>	<b>7</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Conceptos básicos de microondas .....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Líneas de transmisión planares.....</i>	<i>9</i>
<i>1.1.3</i>	<i>Parámetros S y matriz de dispersión .....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.4</i>	<i>Dispositivos pasivos de microondas .....</i>	<i>11</i>
<i>1.1.5</i>	<i>Aplicaciones de los sistemas de microondas .....</i>	<i>12</i>
<b>1.2</b>	<b>Tecnología MMIC .....</b>	<b>13</b>
<i>1.2.1</i>	<i>Conceptos básicos .....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.1.1</i>	<i>Definición de MMIC (Circuito Integrado de Microondas Monolítico).....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.1.2</i>	<i>Características y propiedades de los MMIC.....</i>	<i>15</i>
<i>1.2.1.3</i>	<i>Clasificación de los MMIC.....</i>	<i>16</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Proceso de fabricación de MMIC .....</i>	<i>17</i>
<i>1.2.2.1</i>	<i>Tecnologías de fabricación de circuitos integrados a escala de microondas.....</i>	<i>17</i>
<i>1.2.2.2</i>	<i>Proceso de diseño de MMIC .....</i>	<i>18</i>
<i>1.2.3</i>	<i>Aplicaciones de los amplificadores de potencia MMIC .....</i>	<i>18</i>
<b>1.3</b>	<b>Amplificadores de Potencia .....</b>	<b>19</b>
<i>1.3.1</i>	<i>Principales Características.....</i>	<i>20</i>



<b>1.3.2</b>	<b><i>Tipos de amplificadores de potencia</i></b> .....	<b>21</b>
1.3.2.1	<i>Clase A</i> .....	21
1.3.2.2	<i>Clase B</i> .....	22
1.3.2.3	<i>Clase AB</i> .....	22
1.3.2.4	<i>Clase C</i> .....	23
<b>1.3.3</b>	<b><i>Amplificadores monolíticos</i></b> .....	<b>23</b>
1.3.3.1	<i>PHA-1H+</i> .....	24
1.3.3.2	<i>PMA-5451+</i> .....	26
 <b>CAPÍTULO II</b> .....		<b>28</b>
<b>2.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>28</b>
2.1	<b>Introducción</b> .....	<b>28</b>
2.2	<b>Diseño de los amplificadores</b> .....	<b>28</b>
2.3	<b>Requerimientos del sistema</b> .....	<b>29</b>
2.4	<b>Diseño del sistema de amplificación con el módulo PHA-1H+</b> .....	<b>29</b>
2.5	<b>Diseño del sistema de amplificación con el módulo PMA-5451+</b> .....	<b>30</b>
2.6	<b>Diseño Electrónico</b> .....	<b>31</b>
2.6.1	<i>Diseño esquemático</i> .....	32
2.6.2	<i>Diseño en la placa de circuito</i> .....	33
 <b>CAPÍTULO III</b> .....		<b>36</b>
<b>3.</b>	<b>MARCO DE RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
3.1	<b>Introducción</b> .....	<b>36</b>
3.2	<b>Implementación de los amplificadores de potencia MMIC</b> .....	<b>36</b>
3.2.1	<i>Implementación del amplificador PHA-1H+ y PMA-5451+</i> .....	37
3.3	<b>Mediciones de los amplificadores</b> .....	<b>41</b>
3.3.1	<i>Mediciones del amplificador PHA-1H+</i> .....	43
3.3.2	<i>Mediciones del amplificador PMA-5451+</i> .....	44

3.3.3	<i>Comparación de las potencias recibidas .....</i>	46
3.3.4	<i>Ganancia de los amplificadores .....</i>	46
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>48</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>50</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Designación de la banda de frecuencias .....	8
<b>Tabla 1-2:</b> Designación de la banda de frecuencia de microondas .....	8
<b>Tabla 1-3:</b> Características principales amplificador PHA-1H+ .....	25
<b>Tabla 1-4:</b> Características principales amplificador PMA-5451+.....	27
<b>Tabla 2-1:</b> Descripción de los elementos utilizados en la implementación de los amplificadores .....	32
<b>Tabla 3-1:</b> Potencias recibidas sin amplificadores .....	42

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Ilustración 1-1:</b> Líneas de transmisión planas utilizadas en circuitos integrados de microondas. .....	9
<b>Ilustración 1-2:</b> Definición convencional de los parámetros de dispersión.....	11
<b>Ilustración 1-3:</b> Disposición de un circuito integrado monolítico de microondas.....	14
<b>Ilustración 1-4:</b> Amplificador de potencia como parte de un sistema sencillo de telecomunicaciones.....	19
<b>Ilustración 1-5:</b> Amplificador Monolítico PHA-1H+.....	24
<b>Ilustración 1-6:</b> Curva de rendimiento de Ganancia vs Frecuencia vs Temperatura del amplificador PHA-1H+.....	25
<b>Ilustración 1-7:</b> Amplificador Monolítico PMA-5451+.....	26
<b>Ilustración 1-8:</b> Curva de rendimiento de Ganancia vs Frecuencia vs Temperatura del amplificador PMA-5451+.....	26
<b>Ilustración 2-1:</b> Diagrama de bloques del sistema de amplificación con el módulo PHA-1H+ .....	28
<b>Ilustración 2-2:</b> Diagrama de bloques del sistema de amplificación con el módulo PMA-5451+ .....	29
<b>Ilustración 2-3:</b> Esquema simplificado y descripción de pines del módulo PHA-1H+.....	30
<b>Ilustración 2-4:</b> Circuito esquemático amplificador PHA-1H+.....	30
<b>Ilustración 2-5:</b> Esquema simplificado y descripción de los PADS del módulo PMA-5451+ .....	31
<b>Ilustración 2-6:</b> Circuito esquemático amplificador PMA-5451+.....	31
<b>Ilustración 2-7:</b> Diseño esquemático para el amplificador PHA-1H+ en Altium Designer .....	32
<b>Ilustración 2-8:</b> Diseño esquemático para el amplificador PMA-5451+ en Altium Designer ..	33
<b>Ilustración 2-9:</b> Diseño en la PCB del amplificador PHA-1H+ .....	33
<b>Ilustración 2-10:</b> Diseño en la PCB del amplificador PMA-5451+ .....	34
<b>Ilustración 2-11:</b> Diseño en PCB del amplificador PHA-1H+ en vista 3-D.....	34
<b>Ilustración 2-12:</b> Diseño en PCB del amplificador PMA-5451+ en vista 3-D.....	35
<b>Ilustración 3-1:</b> Construcción de los amplificadore.....	37
<b>Ilustración 3-2:</b> Planchado de las pistas en los circuitos .....	38
<b>Ilustración 3-3:</b> Eliminación del cobre sobrante de la placa.....	38
<b>Ilustración 3-4:</b> Placa de los amplificadores luego de pasar por el ácido.....	39
<b>Ilustración 3-5:</b> Colocación de los componentes en cada placa .....	40
<b>Ilustración 3-6:</b> Amplificador PHA-1H+ y PMA-5451+ .....	40
<b>Ilustración 3-7:</b> Pruebas de recepción sin los amplificadores.....	41

<b>Ilustración 3-8:</b> Grafica de potencias recibidas en función de la frecuencia sin amplificadores .....	43
<b>Ilustración 3-9:</b> Conexión y toma de medidas del amplificador PHA-1H+ .....	43
Ilustración 3-10: Grafica de potencias recibidas en función de la frecuencia del amplificador PHA-1H+ .....	44
<b>Ilustración 3-11:</b> Conexión y toma de medidas del amplificador PMA-5451+ .....	45
<b>Ilustración 3-12:</b> Grafica de potencias recibidas en función de la frecuencia del amplificador PMA-5451+ .....	45
<b>Ilustración 3-13:</b> Potencias recibidas sin amplificación, con el módulo PHA-1H+ y PMA-5451+ .....	46
<b>Ilustración 3-14:</b> Ganancia del amplificador PHA-1h+ y PMA-5451+ en función de la frecuencia .....	47

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Hoja de datos del amplificador PHA-1H+

**ANEXO B:** Hoja de datos del amplificador PMA-5451+

**ANEXO C:** Transmisión de la señal

**ANEXO D:** Recepción de la señal antes de ser amplificada

**ANEXO E:** Recepción de la señal luego de ser amplificada

**ANEXO F:** Potencias recibidas del amplificador PHA-1H+

**ANEXO G:** Potencias recibidas del amplificador PMA-5451+

**ANEXO H:** Resultados de ganancias del amplificador PHA-1H+

**ANEXO I:** Resultados de ganancias del amplificador PMA-5451+

## RESUMEN

Se diseñó e implementó dos amplificadores de potencia de bajo costo diseñados para operar en frecuencias inferiores a 6 GHz mediante el uso de circuitos integrados de microondas monolíticos, que permitió efectivamente que la carrera de telecomunicaciones contara con un equipo adecuado para la realización de laboratorios prácticos en el ámbito de las comunicaciones en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura existente relacionada con amplificadores, tecnología MMIC, diseño de circuitos de microondas y la disponibilidad de componentes electrónicos para el desarrollo del dispositivo. Con base en el conocimiento adquirido durante la revisión bibliográfica, se diseñó un plan que incluía la selección de componentes, la arquitectura de bloques de los amplificadores, la elección de materiales, y la consideración de los circuitos de protección. Se llevaron a cabo las actividades de implementación y construcción, que involucraron la adquisición de los componentes, la fabricación de placas de circuito y el ensamblaje de los amplificadores. Se realizaron pruebas y mediciones exhaustivas con los amplificadores, utilizando equipos de medición adecuados y generadores de señales para evaluar su desempeño en un rango de frecuencias de 0.05 GHz a 6 GHz. Se recopilaron y analizaron los datos obtenidos durante las pruebas para evaluar la respuesta de frecuencia y la ganancia de cada amplificador, se obtuvo que el sistema proporciona una ganancia máxima de 18 dBm en el amplificador PHA-1H+ y 14 dBm por parte del amplificador PMA-5451+. Por consiguiente, se concluyó que los dispositivos efectivamente exhibieron una amplificación en señales de alta frecuencia, lo que habilitó la creación de un sistema de dimensiones reducidas y con bajas pérdidas de transmisión.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, <AMPLIFICADORES DE POTENCIA>, <LINEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA>, < CIRCUITOS INTEGRADOS >.



## SUMMARY

Low-cost power amplifiers were designed and implemented to operate at frequencies below 6 GHz using monolithic microwave integrated circuits (MMICs). This development effectively provided the Telecommunications department with suitable equipment for practical laboratories in the communication field at the Polytechnic School of Chimborazo. A comprehensive review of the existing literature related to amplifiers, MMIC technology, microwave circuit design, and the availability of electronic components was carried out to develop the device. Based on the knowledge acquired during the literature review, a plan was devised, encompassing component selection, amplifier block architecture, material choice, and consideration of protective circuits. Implementation and construction activities were carried out to involve component acquisition, circuit board fabrication, and amplifier assembly. Exhaustive tests and measurements were conducted on the amplifiers using appropriate measurement equipment and signal generators to evaluate their performance across a frequency range from 0.05 GHz to 6 GHz. Data obtained during the tests were collected and analyzed to assess frequency response and gain of each amplifier. It determined that the system provided a maximum gain of 18 dBm for the PHA-1H+ amplifier and 14 dBm for the PMA-5451+ amplifier. Consequently, it was concluded that the devices effectively exhibited signal amplification at high frequencies, enabling a compact system creation with low transmission losses.

**Keywords:** <ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <TELECOMMUNICATIONS>, <POWER AMPLIFIERS>, <ELECTRICAL TRANSMISSION LINES>, <INTEGRATED CIRCUITS>.



Lenin Iván Lara Olivo

0602546103



## INTRODUCCIÓN

La tecnología MMIC se ha convertido en una opción muy popular en el diseño de circuitos de alta frecuencia, debido a su capacidad para integrar múltiples funciones en un solo chip y su alto rendimiento en aplicaciones de microondas y de radiofrecuencia (RF). Un amplificador de potencia es un componente fundamental en muchos sistemas de comunicaciones inalámbricas, radar y mediciones científicas, ya que permite amplificar señales de entrada con una alta ganancia y baja distorsión.

La banda de frecuencia de 0.05 GHz a 6 GHz es una de las más utilizadas en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas, tales como sistemas Wi-Fi, Bluetooth, satelitales, de navegación, entre otros. En esta banda de frecuencia, los amplificadores de potencia deben tener un alto rendimiento en términos de ganancia, eficiencia y estabilidad para poder operar en condiciones de alta potencia y en un amplio rango de frecuencias.

El diseño e implementación de un amplificador de potencia para esta banda de frecuencia utilizando tecnología MMIC, es un tema de gran interés en la actualidad, ya que permite obtener un alto rendimiento en términos de ganancia, eficiencia y estabilidad en un solo chip. Además, la implementación de un amplificador de potencia utilizando tecnología MMIC puede reducir significativamente el costo, tamaño y peso del sistema en comparación con otros enfoques de diseño.

En esta investigación, se procedió al diseño y la implementación de un amplificador de potencia destinado a operar en un espectro de frecuencia que abarca desde 0.05 GHz hasta 6 GHz, empleando tecnología MMIC. Se eligió una topología específica con el objetivo de maximizar la ganancia, la eficiencia y la estabilidad en un rango amplio de frecuencias. Para llevar a cabo el diseño, se utilizó un conjunto de herramientas de simulación y software de diseño asistido por ordenador (CAD) con el fin de evaluar y mejorar el rendimiento del circuito. A continuación, se procedió a la implementación del amplificador en un prototipo de circuito impreso, seguido de pruebas experimentales para evaluar su desempeño en términos de ganancia, eficiencia y estabilidad.

Los resultados obtenidos de este trabajo podrían tener una aplicación directa en sistemas de comunicaciones inalámbricas, radar, mediciones científicas y en sistemas de control de potencia de motores eléctricos, entre otros. Además, este trabajo contribuirá al avance del conocimiento en el diseño y desarrollo de amplificadores de potencia de alta frecuencia utilizando tecnología MMIC.

## **ANTECEDENTES**

En los últimos años, la tecnología MMIC (Amplificadores Monolíticos de Microondas) ha surgido como una solución prometedora para abordar estas limitaciones. Los MMIC son circuitos integrados de microondas que permiten la construcción de amplificadores en un solo chip de silicio, mejorando la eficiencia, reduciendo costos y simplificando el proceso de diseño. Esta tecnología ha demostrado ser especialmente eficaz en aplicaciones de alta frecuencia, como las comprendidas en la banda de 0.05 GHz a 6 GHz. La tecnología MMIC tiene sus raíces en los circuitos de microondas, que datan de la década de 1950. A medida que la tecnología de semiconductores avanzó, surgieron los amplificadores monolíticos de microondas (MMIC), que permiten la integración de múltiples componentes en un solo chip. La evolución de los MMIC ha sido significativa, mejorando en términos de ganancia, eficiencia y rango de frecuencias. Los diseños MMIC han pasado de ser relativamente simples a incorporar amplificación en una variedad de aplicaciones de alta frecuencia, desde radares hasta comunicaciones por satélite.

El amplificador de potencia (PA) en radio frecuencia y microonda es un componente clave en la arquitectura transmisor-receptor ya que es el mayor consumidor de energía. En este contexto, la eficiencia de la linealidad y el rendimiento del ancho de banda son fundamentales y, por lo tanto, representan un factor importante de cualquier diseño de amplificador. Para superar los retos de eficiencia de ancho de banda asociados a los sistemas de alta relación pico-potencia media, se han descrito numerosas técnicas que significan un progreso significativo hacia la realización de PAs de RF y microondas de banda ancha y altamente eficientes para diversas tecnologías de semiconductores. El PA Doherty de modulación de carga dinámica (DPA), introducido en 1936, combina la potencia de salida (Pout) de dos dispositivos activos que funcionan como PA principal y de pico a través de una red de modulación de carga. El DPA se caracteriza por la sencillez de la implementación de los circuitos, que permite el funcionamiento en banda ancha. (SAJEDIN, M, et al, 2021 págs. 1,2)

En el International Multi-Disciplinary Conference: Integrated Sciences and Technologies (IMDC-IST) en Suiza en el año 2021 se presentó un novedoso circuito de amplificador de potencia (PA) de modulación de carga dinámica que podía proporcionar un equilibrio óptimo entre linealidad y eficiencia al tiempo que cubría múltiples bandas de frecuencia celular. Aprovechando la tecnología de circuitos integrados monolíticos de microondas (MMIC), se propuso una arquitectura Doherty PA de 1W totalmente integrada basada en la tecnología AlGaAs/InGaAs DepletionMode (D-Mode) de 0,1  $\mu\text{m}$  proporcionada por la fundición WIN Semiconductors. El DPA de banda ancha propuesto incorporaba el modo de funcionamiento de clase J de sintonización armónica, cuyo objetivo es diseñar la forma de onda de la tensión a través de la terminación de la carga capacitiva del segundo armónico. Además, la técnica de post-matching aplicada no sólo reduce la relación de transformación de la impedancia del DPA convencional, sino que también restablece su correcta modulación de carga. Los resultados de la simulación indicaban que el PA monolítico de modulación de carga a 4 V de tensión de funcionamiento proporcionaba un 44% de PAE a la máxima potencia de salida de 30 dBm en el punto de compresión de 1 dB, y un 34% de eficiencia de potencia añadida (PAE) a 6 dB de retroceso de potencia (PBO). Se consiguió una estabilidad de ganancia de potencia de unos  $14 \pm 0,5$  dB en la banda de frecuencias de 23 GHz a 27 GHz. La técnica de modulación de carga MMIC compacta desarrollada para el teléfono móvil 5G ocupa un área de matriz de  $3,2 \text{ mm}^2$ . (SAJEDIN, M, et al, 2021, 2021 pág. 2)

Por otra parte, en Colombia se presentó el diseño de un amplificador de potencia Doherty (DPA) el cual estaba orientado a la tecnología WiMAX, este trabajaba a una frecuencia de 3.5 GHz; con el objetivo de incrementar los niveles de ganancia dentro de la región Doherty se adiciono una etapa de pre-amplificación. Los resultados obtenidos en la simulación de este amplificador fueron muy buenos, donde la máxima eficiencia de potencia agregada (PAE) fue de 44%, la potencia de salida de saturación de hasta 43 dBm y valores de ganancia en la zona de Doherty mayores a 20 dBm, que representan un incremento del 110% comparado con un amplificador Doherty. (Soler, 2015 pág. 39)

En el 2017 en Ecuador en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se implementó un amplificador de alta frecuencia en la banda K con tecnología de Circuitos Integrados Monolíticos de Microondas (MMIC) el cual a partir de una arquitectura de bloques de amplificadores permitió el funcionamiento de todos los bloques en conjunto, de esta manera llegando a cubrir un rango

mayor de frecuencias que iban desde los 0.05 GHz hasta los 26.5 GHz. El dispositivo formado por atenuadores, circuitos integrados, componentes pasivos, circuitos de protección y la utilización de un cable coaxial de 50 ohmios formando un solo dispositivo. Las pruebas realizadas fueron satisfactorias al entregar una amplificación de hasta 22dBm con un ancho de banda considerable permitiendo también amplificar ondas de alta frecuencia. (Fiallos, 2017)

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿La implementación de un amplificador para frecuencias menores a 6 GHz que trabajen con circuitos integrados de microondas monolíticos a un bajo costo permitirá a la carrera de telecomunicaciones contar con un equipo para realizar laboratorios?

## **SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo funciona la tecnología MMIC en un amplificador de potencia?

¿De qué manera los módulos de amplificación intervienen en la amplificación en la banda sub-6 GHz?

¿Cuáles son las técnicas de diseño en amplificadores basados en MMIC?

¿Qué inconvenientes surgen en la implementación de un amplificador de potencia con circuitos integrados de microondas monolíticos?

## **JUSTIFICACION DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

Los sistemas de amplificación de altas frecuencias están siendo empleados en diferentes campos, por este motivo existe una necesidad en cubrir este tipo de frecuencias con el diseño e implementación de este tipo de equipos a un costo moderado.

Los circuitos MMIC al trabajar en frecuencias microondas que van desde los 300 MHz a los 300 GHz se adecuan a los requerimientos de los amplificadores de alta potencia los cuales vienen a ser un transistor de potencia que cuenta con una impedancia característica de entrada como de salida de 50 ohm nos permiten crear amplificadores de alta potencia, permitiendo cubrir un amplio rango de frecuencias necesarias para este estudio. La principal característica de estos circuitos son sus pequeñas dimensiones y su bajo consumo energético. (Yuk, Kelvin; Branner, G, 2017 págs. 803,804)

El objetivo de este proyecto es crear un dispositivo de amplificación que trabaje en frecuencias menores a 6 GHz a un bajo costo, cumpliendo así con las necesidades de la tecnología en la actualidad sin ser extremadamente costoso. (DETRATTI, 2014 pág. 1)

## **JUSTIFICACIÓN APLICATIVA**

Los circuitos integrados monolíticos MMIC permite una configuración de circuito PA ultra compacto y ofrece las ventajas potenciales de un grosor de metal fino, un diseño multietapa para una mayor ganancia, un mejor seguimiento de la amplitud y la fase, una mayor frecuencia de funcionamiento, un rendimiento de banda ancha, una flexibilidad de diseño de circuitos y una mayor fiabilidad. Estos circuitos tienen excelentes características para la cobertura de pequeñas dimensiones y alta frecuencia. (Sih-Han Li, 2018 págs. 5676-5684)

El sistema de amplificación propuesto consta de su módulo de amplificación con su respectivo circuito de protección diseñados e implementados con la tecnología microstrip el cual protegerá los equipos de medición y los circuitos integrados MMIC.

La tecnología de transistores en los circuitos MMIC de alta movilidad de electrones facilita la integración monolítica de componentes pasivos de bajo ruido y bajas pérdidas que abarcan desde frecuencias inferiores a 6 GHz hasta la banda de ondas milimétricas. De hecho, es más fiable en el funcionamiento a baja tensión en términos de desbordamiento térmico, y posee las ventajas de una alta ganancia, una buena linealidad y una gran frecuencia de transición.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar un amplificador de potencia para la banda de frecuencia de 0.05 GHz hasta los 6 GHz con componentes MMIC.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estudiar la tecnología MMIC para la aplicación en amplificadores de potencia.
- Realizar el estudio de las técnicas para el diseño de amplificador basados en circuitos MMIC.
- Diseñar e implementar el módulo de amplificación de potencia como su respectivo circuito de protección necesario para la banda de frecuencia menor a 6 GHz.
- Comprobar el funcionamiento del amplificador, así como el módulo de amplificación, su fuente y el atenuador.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Tecnología de sistemas de microondas

La tecnología de sistemas de microondas se enfoca en la generación, transmisión, recepción y manipulación de señales de radiofrecuencia con frecuencias que van desde los 300 MHz hasta los 300 GHz. En comparación con las señales de radiofrecuencia de baja frecuencia, como las utilizadas en la transmisión de señales de televisión y radio, las señales de microondas tienen longitudes de onda mucho más cortas, lo que les da características y propiedades únicas. (Pozar, 2011 pág. 1)

#### 1.1.1 Conceptos básicos de microondas

Las microondas son una forma de energía electromagnética que se encuentra en la región del espectro electromagnético entre las ondas de radio y la luz visible. Las microondas tienen una frecuencia más alta que las ondas de radio convencionales y una longitud de onda más corta que las ondas de luz. Las microondas se pueden generar utilizando diversos dispositivos, como diodos Gunn, osciladores de microondas, amplificadores de microondas y fuentes de microondas. La frecuencia típica de las microondas varía de 0.3 a 300 GHz, lo que corresponde a longitudes de onda de 1 m a 1 mm. Las microondas se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como las comunicaciones inalámbricas, la transmisión de televisión y radio, la defensa, la medicina, la investigación científica y la navegación. (Pozar, 2011 págs. 1,2)

Las señales de microondas se generan mediante la excitación de un oscilador de microondas. Los osciladores de microondas pueden ser de diversos tipos, como diodos Gunn, osciladores de onda continua (CW), osciladores de modo de pulso (PM) y osciladores de barrido. Cada uno de estos osciladores tiene sus propias características y aplicaciones específicas en la generación de señales de microondas. La elección del tipo de oscilador dependerá de los requisitos específicos de la aplicación. (Pozar, 2011 págs. 20-25)

Las ondas electromagnéticas con longitudes de onda de 1 a 10 mm se denominan ondas milimétricas. El espectro de radiación infrarroja comprende ondas electromagnéticas con longitudes de onda comprendidas entre 1  $\mu\text{m}$  y 1 mm. Más allá del rango infrarrojo se encuentra el espectro óptico visible, el espectro ultravioleta y, por último, los rayos X. Existen varios esquemas de clasificación para designar las bandas de frecuencia del espectro electromagnético.

En las tablas 1.1. y 1.2. se resumen los esquemas de clasificación. (COLLIN, 2001, pág. 1). Estos esquemas de clasificación se resumen en las tablas 1-1 y 1-2.

**Tabla 1-1:** Designación de la banda de frecuencias

Bandas de Frecuencia	Siglas	Denominación
3 – 30 kHz	VLF	Frecuencias muy bajas
30 – 300 kHz	LF	Frecuencias bajas
300 – 3,000 kHz	MF	Frecuencias medias
3 – 30 MHz	HF	Frecuencias altas
30 – 300 MHz	VHF	Frecuencias muy altas
300 – 3,000 MHz	UHF	Frecuencias ultra altas
3 – 30 GHz	SHF	Frecuencias super altas
30 – 300 GHz	EHF	Frecuencias extra altas

Fuente: Collin, 2001

**Tabla 1-2:** Designación de la banda de frecuencia de microondas

Frecuencia	Designación de la banda de microondas	
	Antigua	Nueva
500 – 1,000 MHz	VHF	C
1 – 2 GHz	L	D
2 – 3 GHz	S	E
3 – 4 GHz	S	F
4 – 6 GHz	C	G
6 – 8 GHz	C	H
8 – 10 GHz	X	I
10 – 12.4 GHz	X	J
12.4 – 18 GHz	Ku	J
18 – 20 GHz	K	J
20 – 26.5 GHz	K	K
26.5 – 40 GHz	Ka	K

Fuente: Collin, 2001

La mayoría de los circuitos de comunicaciones se construyen utilizando componentes de circuito de parámetros concentrados en la banda UHF hasta aproximadamente una frecuencia de 1 GHz. La ingeniería de microondas se ocupa del diseño y la implementación de sistemas que operan en el rango de frecuencia de 1 a 100 GHz, donde se utilizan componentes de línea de transmisión y guía de ondas en lugar de elementos de circuito con parámetros concentrados. Estos sistemas tienen numerosas aplicaciones en el campo de las comunicaciones, el radar, la radiometría, la industria, la medicina y la ciencia. Para analizar y diseñar circuitos de microondas, se emplean

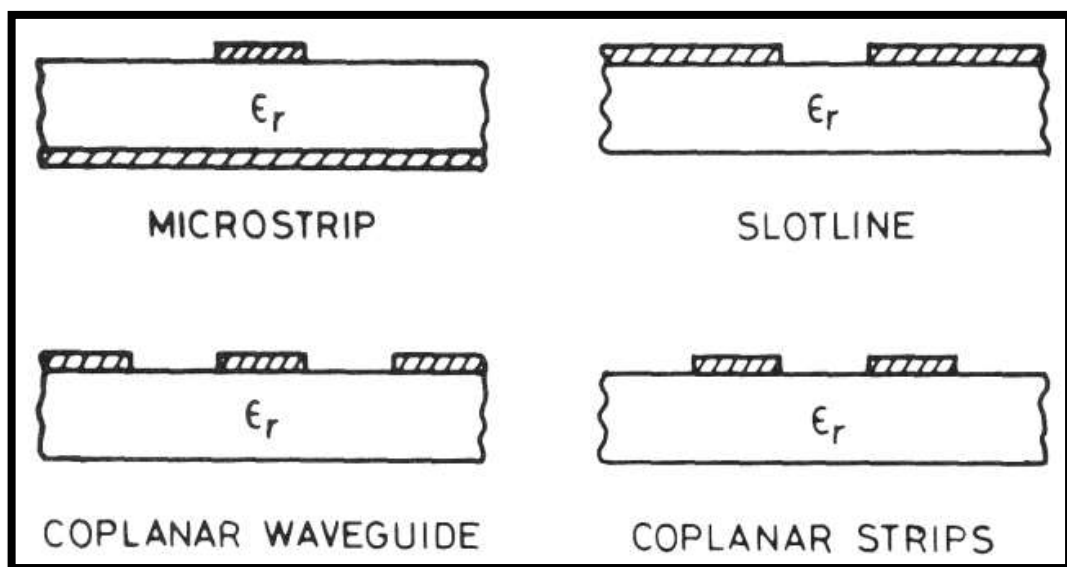


técnicas específicas como la carta de Smith, los parámetros S, las redes de adaptación y los stubs. Los sistemas microondas requieren un conocimiento profundo de la teoría electromagnética, las propiedades de los materiales y las características de los dispositivos. (Collin, 2001, pág. 3)

### 1.1.2 Líneas de transmisión planares

Las líneas de transmisión son elementos fundamentales en los sistemas de microondas, utilizadas para transportar la señal de un punto a otro. Las líneas de transmisión planares son una alternativa a las líneas de transmisión convencionales como las coaxiales y las de guía de onda. Este tipo de líneas se caracterizan por tener una geometría plana y una construcción a base de materiales dieléctricos, lo que les confiere una serie de ventajas respecto a las líneas convencionales, como una mayor integrabilidad y facilidad de fabricación en circuitos planos. Además, son muy utilizadas en aplicaciones de alta frecuencia debido a su bajo coste y pérdidas de propagación. (Pozar, 2011, pág. 95)

Las líneas de transmisión planares se dividen en dos categorías: microstrip y guía de onda de ranura. La línea de transmisión microstrip consiste en una línea de señal y una línea de tierra que se separan por un sustrato dieléctrico, mientras que la guía de onda de ranura se compone de una línea de señal rodeada por dos planos de tierra que se separan por una ranura. Ambos tipos de líneas de transmisión planares tienen sus ventajas y desventajas, y su elección depende de la aplicación específica. (GARG, R, BAHL, I, BOZZI, M, 2013, págs. 1-2)



**Ilustración 1-1:** Líneas de transmisión planas utilizadas en circuitos integrados de microondas.

Fuente: GARG, R, BAHL, I, BOZZI, M, 2013

En la Figura 1.1 se muestran las vistas transversales de estas líneas de transmisión en donde las líneas de transmisión planares más utilizadas son las microstrip, las coplanar y las de ranura. La línea de microstrip consiste en una pista conductor en una capa dieléctrica que se encuentra encima de una capa de masa. La línea coplanar consta de una pista conductor en una capa dieléctrica flanqueada por dos planos de masa en los lados opuestos. La línea de ranura se compone de una pista conductor situada en una capa dieléctrica entre dos planos de masa, pero a diferencia de las líneas anteriores, la pista conductor se encuentra interrumpida por una o varias ranuras. (Wong, 2003, págs. 11,13)

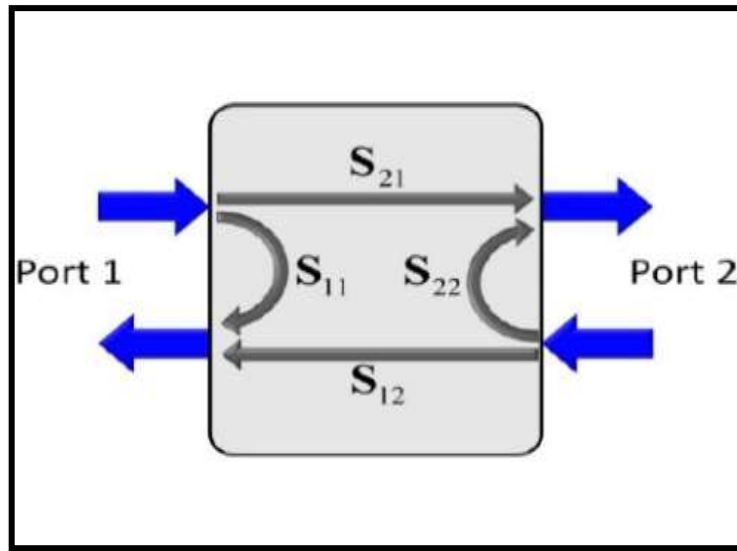
Para minimizar las pérdidas, se utilizan técnicas de diseño, como la optimización del ancho y el espesor de la pista de transmisión, la selección del material dieléctrico, la disminución de la rugosidad de la superficie y la reducción de la radiación. Además, se utilizan técnicas de fabricación avanzadas, como la deposición de capas delgadas y la litografía de alta resolución, para garantizar la calidad y la precisión de las líneas de transmisión. (Pozar, 2011, pág. 460)

Las líneas de transmisión planares son elementos clave en la tecnología de microondas, y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde dispositivos de baja potencia hasta sistemas de alta potencia. Su diseño y fabricación adecuados son cruciales para garantizar el rendimiento y la calidad de la señal en sistemas de microondas. (CLIVE, et al, 2015 págs. 52,53)

### **1.1.3 Parámetros S y matriz de dispersión**

Los parámetros de dispersión, también conocidos como Scattering o parámetros S es una herramienta esencial para el análisis de los sistemas microondas y es muy utilizada en la tecnología de estos sistemas. Los parámetros S describen la relación entre las ondas incidentes y reflejadas en una red de dos puertos y se representan mediante una matriz de coeficientes complejos.

La matriz de dispersión y la interpretación física de los parámetros S se ilustran en la figura 2. La matriz de parámetros S es una matriz cuadrada de  $2 \times 2$  que representa la relación entre las ondas incidentes y reflejadas en una red de dos puertos. Los elementos de la matriz de parámetros S son los coeficientes de reflexión ( $S_{11}$  y  $S_{22}$ ) y los coeficientes de transmisión ( $S_{21}$  y  $S_{12}$ ), que describen cómo se refleja y transmite una onda electromagnética a través de la red. (Pozar, 2011, pág. 178)



**Ilustración 1-2:** Definición convencional de los parámetros de dispersión.  
Fuente: Rumpf, 2011

La ventaja de utilizar parámetros  $S$  es que permiten el análisis de circuitos de forma independiente de la fuente y la carga, lo que significa que se pueden analizar redes con diferentes combinaciones de fuentes y cargas sin necesidad de recalculer los parámetros. Además, los parámetros  $S$  son invariantes bajo transformaciones de fuente y carga, lo que permite una mayor flexibilidad en el diseño de circuitos. (GARG, R, BAHL, I, BOZZI, M, 2013, pág. 189)

Para calcular los parámetros  $S$  de una red, se pueden utilizar diferentes métodos, como la técnica de los puertos abiertos y cortocircuitados, la técnica del puente de onda y la técnica de la matriz de medición. Cada método tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección del método dependerá de la aplicación específica y de las limitaciones del equipo de medición disponible. (Pozar, 2011, pág. 185)

#### **1.1.4 Dispositivos pasivos de microondas**

Los dispositivos pasivos son elementos que no generan energía, pero son esenciales para la transmisión y recepción de señales en sistemas de microondas. Entre los dispositivos pasivos más comunes se encuentran los acopladores, los divisores de potencia, los filtros, las antenas y las líneas de transmisión. Estos dispositivos pueden ser implementados utilizando diferentes tecnologías.

Los acopladores son dispositivos que dividen la energía de la señal en dos o más caminos sin que haya pérdidas significativas de potencia. Los acopladores pueden ser direccionales o no direccionales. Los acopladores direccionales dividen la energía de la señal en dos o más caminos

y permiten la medición de la potencia en cada uno de ellos. Los acopladores no direccionales dividen la energía de la señal en dos o más caminos, pero no permiten la medición de la potencia en cada uno de ellos. Los acopladores se utilizan en aplicaciones como divisores de potencia, amplificadores de banda ancha y medición de potencia. (Razavi, 2011, pág. 475)

Los divisores de potencia son dispositivos que dividen la señal de entrada en dos o más salidas, estos pueden ser simétricos o asimétricos. Los divisores de potencia simétricos dividen la señal de entrada en dos o más salidas con la misma potencia. Los divisores de potencia asimétricos dividen la señal de entrada en dos o más salidas con diferentes potencias. Los divisores de potencia se utilizan en aplicaciones como amplificadores de banda ancha, transmisión de señales y medición de potencia. (Pozar, 2011, pág. 317)

Los filtros son dispositivos que permiten el paso de señales dentro de una banda de frecuencia específica y atenúan las señales fuera de esa banda de frecuencia. Los filtros pueden ser pasivos o activos. Los filtros pasivos no requieren alimentación externa, mientras que los filtros activos requieren alimentación externa. Los filtros se utilizan en aplicaciones como transmisión y recepción de señales, eliminación de ruido y separación de señales. (Pozar, 2011, pág. 380)

Las antenas son dispositivos que convierten señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa. Las antenas pueden ser de diferentes tipos, como antenas de parche, antenas de ranura, antenas helicoidales, antenas Yagi, antenas de bocina, antenas de corneta, antenas parabólicas, entre otras. Las antenas se utilizan en aplicaciones como transmisión y recepción de señales, radar, telefonía móvil, televisión, entre otras. (Collin, 2001, pág. 4)

Las líneas de transmisión son uno de los dispositivos pasivos más básicos en microondas y se utilizan para transportar señales de alta frecuencia desde un punto a otro en un sistema de microondas. Hay varios tipos de líneas de transmisión, como líneas de transmisión coaxiales, líneas de transmisión de microcinta, líneas de transmisión de ranura y líneas de transmisión de coplanar. Cada uno de estos tipos de líneas de transmisión tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de pérdidas de inserción, ancho de banda y capacidad de integración con otros componentes del sistema. (Razavi, 2011, pág. 476)

### ***1.1.5 Aplicaciones de los sistemas de microondas***

El uso de la tecnología de microondas ha demostrado tener aplicaciones en una amplia variedad de campos. En la industria, se utiliza para la producción y procesamiento de alimentos, la

fabricación de productos electrónicos, la medicina, la exploración espacial y la comunicación de alta velocidad. En la investigación científica, se utiliza para el análisis de materiales y la realización de experimentos en física y química. Además, los sistemas de microondas también se utilizan en la seguridad y defensa, en aplicaciones militares y de vigilancia. (Collin, 2001 págs. 3,4)

En la industria alimentaria, la tecnología de microondas se utiliza para la cocción, descongelación, pasteurización y secado de alimentos. También se utiliza para la esterilización de envases y utensilios. Esta tecnología permite una mayor eficiencia energética y una reducción en los tiempos de procesamiento en comparación con los métodos tradicionales de cocción y procesamiento de alimentos. (Balanis, 2016 pág. 5)

En la fabricación de productos electrónicos, los sistemas de microondas se utilizan en la producción de componentes electrónicos como diodos, transistores y circuitos integrados. La tecnología de microondas también se utiliza en la investigación y el desarrollo de materiales y dispositivos electrónicos avanzados. (Pozar, 2011 págs. 3-5)

En el campo de la medicina, la tecnología de microondas se utiliza para el tratamiento de tumores y lesiones, en terapias de hipertermia y en la desinfección de instrumentos médicos. Además, los sistemas de microondas también se utilizan en la exploración del cuerpo humano mediante la tecnología de imágenes de resonancia magnética. (Pozar, 2011 pág. 3)

En la exploración espacial, los sistemas de microondas se utilizan en la comunicación de alta velocidad entre la Tierra y las naves espaciales. Además, la tecnología de microondas se utiliza en la investigación astronómica para la detección de señales y la medición de la radiación de fondo del universo. (Pozar, 2011 pág. 3)

En la seguridad y defensa, los sistemas de microondas se utilizan en la detección de explosivos y en la vigilancia remota. Además, la tecnología de microondas también se utiliza en aplicaciones militares como la detección y el seguimiento de aviones y misiles. Las aplicaciones de los sistemas de microondas son numerosas y variadas, y continúan expandiéndose en una amplia variedad de campos. (Pozar, 2011 pág. 6)

## **1.2 Tecnología MMIC**

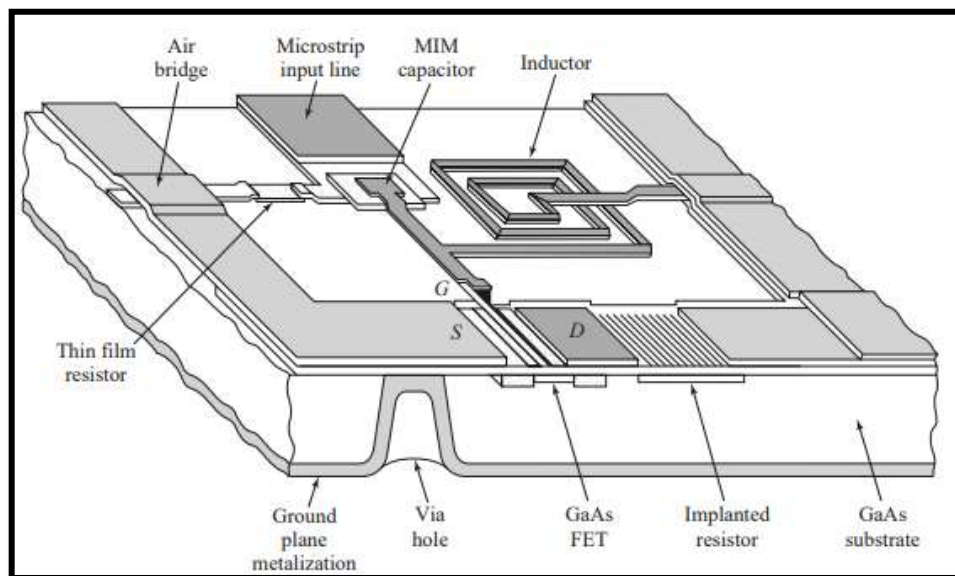
En la actualidad, la necesidad de contar con sistemas de comunicación y radar más eficientes y precisos ha impulsado el desarrollo de tecnologías capaces de trabajar en la banda de frecuencia

de microondas. Dentro de estas tecnologías, destaca el Circuito Integrado de Microondas Monolítico (MMIC) el cual ha permitido la creación de sistemas de comunicación inalámbricos y sistemas de radar más compactos y eficientes.

### 1.2.1 Conceptos básicos

#### 1.2.1.1 Definición de MMIC (Circuito Integrado de Microondas Monolítico)

El MMIC es un tipo de circuito integrado diseñado para trabajar en el rango de frecuencia de microondas (aproximadamente 300 MHz a 300 GHz). Su diseño monolítico y la utilización de tecnologías de fabricación avanzadas permiten la integración de varios componentes activos y pasivos en un mismo sustrato, lo que se traduce en un menor tamaño y peso, así como en una mayor eficiencia energética. Además, los MMIC son capaces de trabajar a altas frecuencias y de manejar señales con alta potencia. (Pozar, 2011, pág. 549)



**Ilustración 1-3:** Disposición de un circuito integrado monolítico de microondas.

Fuente: Pozar, 2011

En la figura 2.1 se muestra la estructura típica de un MMIC, para permitir la producción de dispositivos activos, el sustrato de un MMIC debe ser un material semiconductor; el tipo de dispositivo y la gama de frecuencias determinan el tipo de material del sustrato. El MESFET de GaAs es un componente extremadamente adaptable que se utiliza en conmutadores, mezcladores, osciladores, desfasadores, amplificadores de alta ganancia, amplificadores de bajo ruido y amplificadores de banda ancha. Por ello, el silicio, el silicio sobre zafiro (SoS), el carburo de silicio (SiC) y la InP son otros sustratos frecuentes para los MMIC, además del GaAs. (Pozar, 2011, pág. 550)

Los MMICs se fabrican utilizando tecnologías de circuitos integrados a escala de microondas, que permiten la integración de múltiples componentes de microondas, como transistores, resistencias, inductores y condensadores, en un solo chip monolítico. Esta integración permite la fabricación de dispositivos de alta frecuencia con un alto nivel de integración, lo que reduce el tamaño, el peso y el costo de los sistemas, lo que los hace ideales para aplicaciones de alta frecuencia como sistemas de comunicaciones inalámbricas, radares, satélites y otros sistemas de microondas y de radiofrecuencia. (COLLIN, 2001, pág. 714)

#### *1.2.1.2 Características y propiedades de los MMIC*

Los circuitos integrados de microondas monolíticos (MMIC) son dispositivos electrónicos de alta frecuencia que se caracterizan por su capacidad para operar en un amplio rango de frecuencias, desde unos pocos megahertz hasta varias decenas de gigahertz. Los MMIC tienen numerosas ventajas sobre otros dispositivos electrónicos de alta frecuencia, como los circuitos impresos, los circuitos híbridos y los diodos de barrera Schottky. En particular, los MMIC ofrecen una alta ganancia, un bajo ruido, una alta eficiencia y una alta estabilidad, lo que los hace ideales para una amplia variedad de aplicaciones en los campos de las comunicaciones inalámbricas, la electrónica de defensa, los sistemas de radar y otros sistemas de microondas y de radiofrecuencia. (Cripps, 2006, pág. 106)

La principal característica de los MMIC es su capacidad para integrar una gran cantidad de componentes activos y pasivos en un solo chip, lo que permite una alta densidad de integración y una reducción significativa del tamaño y peso del circuito. Además, los MMIC se fabrican utilizando tecnologías de proceso avanzadas que permiten la producción de circuitos con características eléctricas precisas y repetibles. Como resultado, los MMIC ofrecen una alta uniformidad y una alta confiabilidad en la producción en masa. (Pojar, 2011, pág. 202)

Otra característica importante de los MMIC es su capacidad para operar a altas frecuencias con un bajo nivel de ruido. Esto se debe a que los MMIC utilizan dispositivos activos de alta movilidad electrónica, como los transistores de efecto de campo de arseniuro de galio (GaAs FETs) y los transistores de heterounión bipolar de arseniuro de galio (GaAs HBTs), que tienen un alto ganancia, una alta velocidad de conmutación y una baja corriente de fuga. (Pojar, 2011, pág. 550)

Los MMIC también ofrecen una alta eficiencia energética, lo que significa que son capaces de convertir una gran cantidad de la energía de entrada en energía de salida útil. Esto se debe a que

los MMIC utilizan circuitos de amplificación de clase A, B, AB o C, que permiten una alta eficiencia energética a diferentes niveles de potencia de salida. (COLLIN, 2001, pág. 715)

### *1.2.1.3 Clasificación de los MMIC*

Los MMIC se clasifican de acuerdo con su aplicación y diseño. En cuanto a la aplicación, los MMIC se pueden clasificar en amplificadores de bajo ruido (LNA), amplificadores de potencia (PA), mezcladores, divisores de potencia, filtros, osciladores y otros componentes de microondas. En cuanto al diseño, los MMIC se pueden clasificar en tipos de etapa única, multietapa, amplificadores de banda ancha y amplificadores de banda estrecha, entre otros.

Los amplificadores de bajo ruido (LNA) son un tipo de MMIC utilizado en la recepción de señales de microondas y RF en sistemas de comunicaciones inalámbricas y satelitales, así como en aplicaciones de radar y vigilancia electrónica. Estos amplificadores tienen una ganancia alta y una figura de ruido baja para mejorar la relación señal/ruido de la señal recibida. Los LNA se utilizan en la entrada de sistemas de comunicación para amplificar señales de baja potencia y aumentar la sensibilidad del receptor.

Los amplificadores de potencia (PA) son MMIC que se utilizan para amplificar señales de microondas y RF a niveles de potencia más altos para aplicaciones de transmisión, como sistemas de comunicación por satélite, enrutadores inalámbricos y sistemas de radar de alta potencia. Los PA son diseñados para proporcionar una alta ganancia y un alto rendimiento de potencia, y se clasifican según su capacidad de trabajar en clase A, B, AB, C, D, E o F.

Los mezcladores son MMIC que se utilizan para mezclar dos señales de entrada en una salida de frecuencia diferente, lo que permite la modulación de señales de RF y microondas, la generación de frecuencias intermedias y la conversión de frecuencia. Los mezcladores se utilizan en sistemas de comunicación para convertir señales de RF de alta frecuencia en señales de frecuencia intermedia (IF) de baja frecuencia para su posterior procesamiento.

Los divisores de potencia son MMIC que se utilizan para dividir una señal de entrada en múltiples salidas de señal de igual amplitud y fase, lo que permite la distribución de señales de RF y microondas a múltiples dispositivos o sistemas. Los divisores de potencia se utilizan en sistemas de comunicación y otras aplicaciones de RF y microondas donde se requiere la distribución de señales.



Los filtros son MMIC que se utilizan para filtrar señales de RF y microondas para eliminar las señales no deseadas y permitir solo las señales de frecuencia deseada. Los filtros se utilizan en sistemas de comunicación, enrutadores inalámbricos, sistemas de radar y otras aplicaciones de RF y microondas.

Los osciladores son MMIC que se utilizan para generar señales de RF y microondas en sistemas de comunicación, sistemas de radar, sistemas de navegación y otras aplicaciones. Los osciladores se utilizan para proporcionar una señal de referencia estable y precisa para la sincronización de sistemas y dispositivos de comunicación.

## ***1.2.2 Proceso de fabricación de MMIC***

### *1.2.2.1 Tecnologías de fabricación de circuitos integrados a escala de microondas*

Los circuitos integrados a escala de microondas se fabrican utilizando procesos específicos que difieren significativamente de los procesos de fabricación de los circuitos integrados a escala de circuitos integrados digitales (IC). Los procesos de fabricación de MMIC deben ser capaces de producir dispositivos con características eléctricas y mecánicas específicas que sean necesarias para el funcionamiento de los circuitos en la banda de frecuencia de microondas.

Una de las tecnologías de fabricación más comunes utilizadas para producir MMIC es la tecnología de arseniuro de galio (GaAs), que ofrece una alta movilidad electrónica y velocidad de conmutación, lo que la hace adecuada para aplicaciones de alta frecuencia. El proceso de fabricación de MMIC GaAs se basa en el crecimiento epitaxial de capas delgadas de arseniuro de galio sobre sustratos de arseniuro de galio de alta pureza. Luego, se utilizan técnicas de litografía y grabado en seco para producir los elementos activos del circuito, como transistores y diodos, en la capa epitaxial. Los circuitos pasivos, como las líneas de transmisión y los capacitores, se crean mediante la eliminación selectiva de material dieléctrico utilizando técnicas de grabado en húmedo. (Grebennikov, 2007 págs. 850,851)

La tecnología CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) también se utiliza cada vez más para la fabricación de MMIC, especialmente para aplicaciones de baja potencia y frecuencias más bajas. El proceso de fabricación de MMIC CMOS implica la utilización de técnicas de litografía y grabado en seco para producir los elementos activos y pasivos del circuito en una estructura de óxido de silicio-sustrato de silicio. Este proceso de fabricación es compatible con la

fabricación de IC digitales y, por lo tanto, ofrece la posibilidad de integrar la funcionalidad digital y analógica en un solo chip.

#### *1.2.2.2 Proceso de diseño de MMIC*

El proceso de diseño de un MMIC es fundamental para lograr un circuito integrado de alto rendimiento y confiabilidad. El diseño de MMIC se realiza mediante software de diseño asistido por ordenador (CAD) especializado en microondas, como Microwave Office, Advanced Design System, Ansoft Designer entre otros. El proceso de diseño incluye varias etapas, como la selección del proceso de fabricación, la definición de la topología del circuito, la simulación y optimización del diseño, la generación del layout, la verificación del diseño y la fabricación de prototipos.

#### *1.2.3 Aplicaciones de los amplificadores de potencia MMIC*

Los amplificadores de potencia MMIC tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos campos, principalmente en sistemas de comunicaciones inalámbricas y satelitales, sistemas de radar y de vigilancia electrónica, y otros sistemas de microondas y de radiofrecuencia. Estos amplificadores pueden proporcionar altas ganancias, eficiencias energéticas y ancho de banda, lo que los hace ideales para muchas aplicaciones de alta frecuencia.

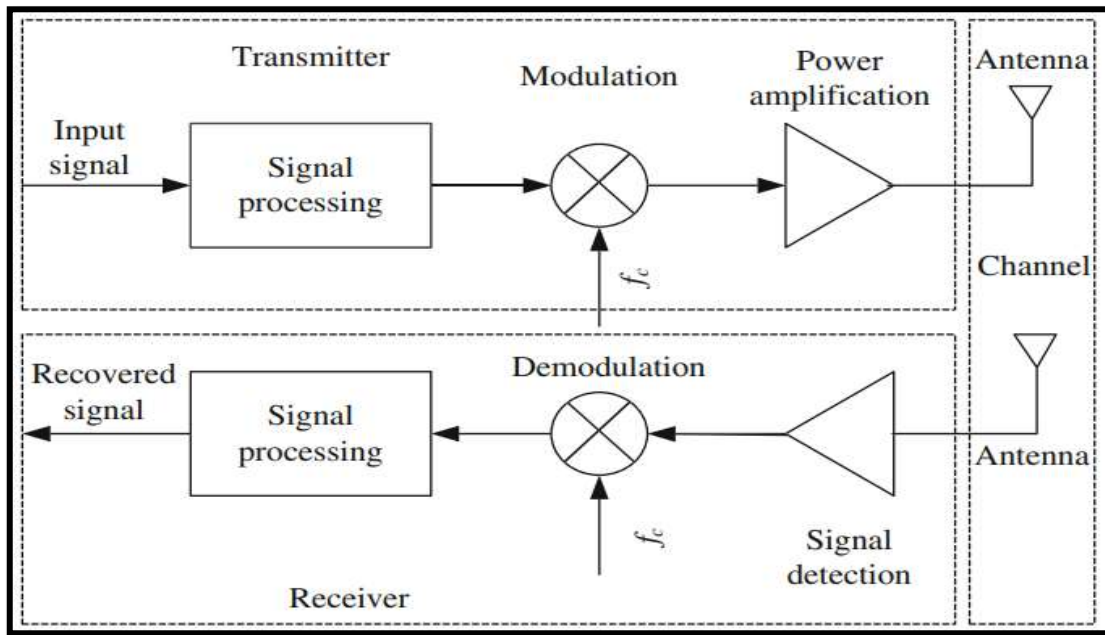
En sistemas de comunicaciones inalámbricas y satelitales, los MMIC se utilizan para amplificar y transmitir señales de alta frecuencia. Los amplificadores de potencia MMIC se han utilizado en sistemas de comunicaciones móviles, incluidos los teléfonos móviles, los sistemas de navegación por satélite y los sistemas de transmisión de televisión por satélite. Además, los MMIC también se utilizan en sistemas de comunicaciones de defensa, como sistemas de guerra electrónica y sistemas de comunicaciones militares.

En sistemas de radar y de vigilancia electrónica, los amplificadores de potencia MMIC se utilizan para aumentar la potencia de transmisión de los sistemas de radar y mejorar la detección y el seguimiento de objetivos. Los MMIC se utilizan en sistemas de radar de banda X, banda Ku y banda Ka, así como en sistemas de vigilancia electrónica de alta frecuencia. Los MMIC también se utilizan en sistemas de radar de apertura sintética y en sistemas de radar de imagen de alta resolución.

Estos amplificadores también se utilizan en otros sistemas de microondas y de radiofrecuencia, como sistemas de telemetría, sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de detección de metales, sistemas de monitoreo ambiental y sistemas de espectroscopía.

### 1.3 Amplificadores de Potencia

En un sistema de comunicación típico consta de un transmisor, así como de un receptor como se muestra en la figura 4. La señal se procesa antes de transmitirse, lo que implica generalmente algún tipo de codificación digital. Luego, la señal se modula en una frecuencia portadora utilizando diferentes tipos de modulación. (Mladen Božanić, Saurabh Sinha, 2016 pág. 2)



**Ilustración 1-4:** Amplificador de potencia como parte de un sistema sencillo de telecomunicaciones.

**Fuente:** Mladen Božanić, Saurabh Sinha, 2016

Después de establecer los niveles de tensión de la señal, la frecuencia portadora y el ancho de banda, la señal aún no está lista para su transmisión. Se requiere aumentar la potencia para alimentar la antena, esta es la etapa de amplificación de potencia, que es la tercera etapa del transmisor y la última antes de la antena, convierte la potencia de entrada de corriente continua (CC) proveniente de los circuitos de alimentación en una cantidad significativa de potencia de o microondas o radiofrecuencia (RF). En el receptor, se lleva a cabo un proceso similar, pero en sentido contrario. Comenzando con la detección de la señal en donde se utiliza generalmente un amplificador de bajo ruido (LNA), luego pasa por el demodulador para finalizar con el procesamiento de la señal para su recuperación. (Mladen Božanić, Saurabh Sinha, 2016 págs. 2-3)

### 1.3.1 Principales Características

Las principales características de los amplificadores de potencia son la ganancia, la eficiencia, la linealidad y la capacidad de manejo de potencia.

La ganancia es una medida fundamental en los amplificadores, ya que indica cuánto se amplifica una señal de entrada. Se define como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, y se expresa en decibelios (dB). Una alta ganancia significa que la señal de salida es considerablemente más grande que la señal de entrada. La ganancia es uno de los objetivos principales al diseñar un amplificador de potencia, y diferentes aplicaciones pueden requerir diferentes niveles de ganancia. (Pozar, 2011 pág. 597)

$$Ganancia (dB) = 10 \log\left(\frac{P_{salida}}{P_{entrada}}\right) \text{ Ecuación 1-1}$$

La eficiencia es otra característica importante en los amplificadores de potencia, ya que indica la capacidad del dispositivo para convertir la energía consumida en potencia de salida útil. Una alta eficiencia implica que el amplificador está utilizando la energía de manera efectiva y está minimizando las pérdidas. En los amplificadores de potencia, la eficiencia puede estar influenciada por factores como la topología de amplificación utilizada, el tipo de dispositivo activo empleado (como transistores bipolares o de efecto de campo), y las técnicas de diseño implementadas para mejorar la eficiencia energética. (Cripps, 2006 pág. 45)

$$Eficiencia(\%) = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100 \text{ Ecuación 1-2}$$

La eficiencia se calcula como relación entre su potencia de salida y su potencia de entrada y se expresa en porcentaje.

La linealidad es esencial en aplicaciones donde se requiere una amplificación precisa de la señal sin distorsiones significativas. Un amplificador lineal es capaz de reproducir fielmente la forma de onda de la señal de entrada en la señal de salida, sin introducir distorsión ni alteración en su contenido espectral. La linealidad puede ser especialmente importante en aplicaciones de comunicaciones, donde es necesario mantener la integridad de la información transmitida. Los amplificadores lineales se caracterizan por tener una respuesta en frecuencia plana y una baja distorsión armónica. (Razavi, 2011 pág. 757)

La capacidad de manejo de potencia es otra característica crítica en los amplificadores de potencia, particularmente en aplicaciones de alta potencia. Esta característica se refiere a la cantidad máxima de potencia de entrada que el amplificador puede manejar sin sufrir daños ni degradar el rendimiento. La capacidad de manejo de potencia está influenciada por diversos factores, como la disipación de calor, la resistencia al estrés eléctrico y térmico de los componentes utilizados, y la eficiencia energética del diseño. Para aplicaciones de alta potencia, se deben considerar cuidadosamente los requisitos de manejo de potencia y diseñar el amplificador con componentes adecuados para garantizar su operación segura y confiable. (Mladen Božanić, Saurabh Sinha, 2016 pág. 11)

### ***1.3.2 Tipos de amplificadores de potencia***

La gran abundancia de tipos de amplificadores de potencia (denominados clases) indica que no existe una única configuración que pueda lograr un rendimiento satisfactorio en todos los rangos de frecuencia y para todas las aplicaciones. (Mladen Božanić, Saurabh Sinha, 2016 pág. 1)

Existen varios tipos de amplificadores de potencia, cada uno con características distintas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones. Algunos de los tipos más comunes son los siguientes: clase A, clase B, clase AB y clase C.

#### ***1.3.2.1 Clase A***

Los amplificadores de clase A son amplificadores de potencia que se caracterizan por su excelente linealidad y baja distorsión, lo que los hace ideales para aplicaciones donde se requiere una amplificación precisa de la señal sin introducir deformaciones significativas. (Kazimierzczuk, 2014 págs. 65-67)

La principal característica de los amplificadores de clase A es que están polarizados de manera constante en su región activa, lo que significa que el transistor de potencia utilizado en el amplificador siempre conduce corriente, incluso en ausencia de señal de entrada. Esta polarización continua permite que el transistor esté listo para amplificar la señal en cualquier momento. (Mladen Božanić, Saurabh Sinha, 2016 pág. 61)

La polarización constante en la región activa garantiza que el transistor siempre se encuentre en su punto de funcionamiento óptimo, lo que resulta en una amplificación precisa y una reproducción fiel de la forma de onda de la señal de entrada. Sin embargo, la polarización

constante en la región activa de los amplificadores de clase A también tiene un inconveniente importante: su baja eficiencia energética. Dado que el transistor de potencia está siempre conduciendo corriente, incluso cuando no hay señal de entrada, estos amplificadores consumen una cantidad considerable de energía y generan calor en el proceso. Esta ineficiencia energética limita su uso en aplicaciones que requieren un alto rendimiento y una eficiencia energética significativa, como en sistemas de comunicaciones de gran escala. (Mladen Božanić, Saurabh Sinha, 2016 pág. 62)

#### *1.3.2.2 Clase B*

Los amplificadores de clase B son amplificadores de potencia que se caracterizan por su mayor eficiencia en comparación con los amplificadores de clase A. A diferencia de los amplificadores de clase A, los amplificadores de clase B están polarizados en su punto de corte, lo que significa que el transistor de potencia utilizado en el amplificador no conduce corriente cuando no hay señal de entrada. Esto resulta en una menor disipación de potencia y, por lo tanto, en una mayor eficiencia energética.

La polarización en el punto de corte implica que el transistor de potencia solo conduce corriente cuando la señal de entrada alcanza un cierto nivel que activa el transistor. Esta característica de polarización discontinua introduce una distorsión conocida como distorsión de cruce. La distorsión de cruce se produce en el momento en que la señal de entrada atraviesa el punto de corte y se transfiere de un transistor a otro en un amplificador de clase B. Esta transición puede causar una distorsión en la forma de onda de la señal amplificada. En aplicaciones donde se requiere una amplificación de baja potencia, los amplificadores de clase B pueden experimentar una menor eficiencia, ya que el transistor puede no estar completamente activado y puede haber una pérdida de potencia en forma de corriente de polarización. (Pozar, 2011 pág. 598)

#### *1.3.2.3 Clase AB*

Los amplificadores de clase AB son una configuración intermedia entre los amplificadores de clase A y los amplificadores de clase B. Esta configuración se utiliza para minimizar la distorsión introducida por los amplificadores de clase B y mejorar su eficiencia en comparación con los amplificadores de clase A.

Cuando hay una señal de entrada, el amplificador de clase AB activa más completamente el transistor de potencia, permitiendo una amplificación más eficiente. Esto significa que el amplificador de clase AB logra una mayor eficiencia energética en comparación con el

amplificador de clase A. Sin embargo, la eficiencia de los amplificadores de clase AB sigue siendo menor en comparación con los amplificadores de clase B puros, ya que todavía hay una pequeña corriente de polarización constante que se consume incluso cuando no hay señal de entrada. (Mladen Božanić, Saurabh Sinha, 2016 pág. 73)

#### *1.3.2.4 Clase C*

Los amplificadores de clase C son amplificadores de potencia que se caracterizan por su alta eficiencia energética. A diferencia de los amplificadores de clase A y clase B, los amplificadores de clase C están altamente polarizados en la región de corte del transistor de potencia, lo que significa que el transistor solo conduce corriente durante una fracción del ciclo de la señal de entrada. Esta polarización hacia el corte se utiliza para lograr una eficiencia energética máxima, ya que el transistor consume muy poca energía en ausencia de señal y solo conduce corriente cuando la señal de entrada alcanza un nivel suficientemente alto para activar el transistor.

Debido a su alta eficiencia, los amplificadores de clase C son ampliamente utilizados en aplicaciones de radiofrecuencia (RF) y microondas, donde la eficiencia energética es un factor clave. Estos amplificadores se encuentran comúnmente en sistemas de comunicaciones inalámbricas, transmisores de radio y televisión, radares y sistemas de transmisión de datos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los amplificadores de clase C introducen una distorsión significativa en la forma de onda de la señal de salida debido a su alta polarización hacia el corte. Esta distorsión limita su uso en aplicaciones que requieren una amplificación lineal y una reproducción precisa de la señal. (Cripps, 2006 pág. 53)

#### *1.3.3 Amplificadores monolíticos*

Los amplificadores monolíticos, también conocidos como amplificadores integrados o amplificadores de circuito integrado (IC), son dispositivos que combinan múltiples componentes activos y pasivos en un solo chip semiconductor. Estos amplificadores se fabrican utilizando tecnología de semiconductores, como la tecnología MMIC, que permite integrar transistores, resistencias, capacitores y otros elementos en un solo sustrato de semiconductor. (Pozar, 2011 pág. 524)

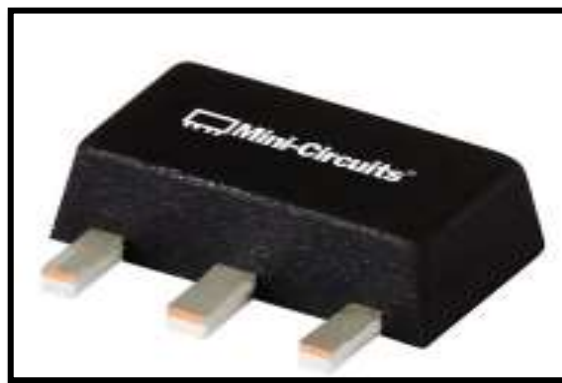
Una de las principales ventajas de los amplificadores monolíticos es su tamaño compacto y su facilidad de integración en sistemas electrónicos. Al combinar múltiples componentes en un solo chip, se reducen los requisitos de espacio y se simplifica el diseño de circuitos. Además de su tamaño compacto, los amplificadores monolíticos ofrecen un rendimiento excepcional en términos de ancho de banda, ganancia, linealidad y ruido. La tecnología MMIC, en particular, se

utiliza comúnmente en aplicaciones de radiofrecuencia (RF) y microondas, ya que permite la fabricación de amplificadores con características de alta frecuencia y baja pérdida de señal. (Pozar, 2011 pág. 550)

Algunos ejemplos de amplificadores monolíticos son el PHA-1H+ y el PMA-5451+, que pertenecen, estos amplificadores están diseñados específicamente para aplicaciones de RF y ofrecen características como amplio rango de frecuencia, alta ganancia y bajo ruido.

#### 1.3.3.1 PHA-1H+

El PHA-1H+ es un amplificador de circuito integrado de microondas monolítico (MMIC) fabricado por Mini-Circuits. Es un amplificador de banda ancha y bajo ruido que funciona desde 50 MHz hasta 6 GHz. El PHA-1H+ es ideal para diversas aplicaciones, como comunicaciones inalámbricas, radar y comunicaciones por satélite.

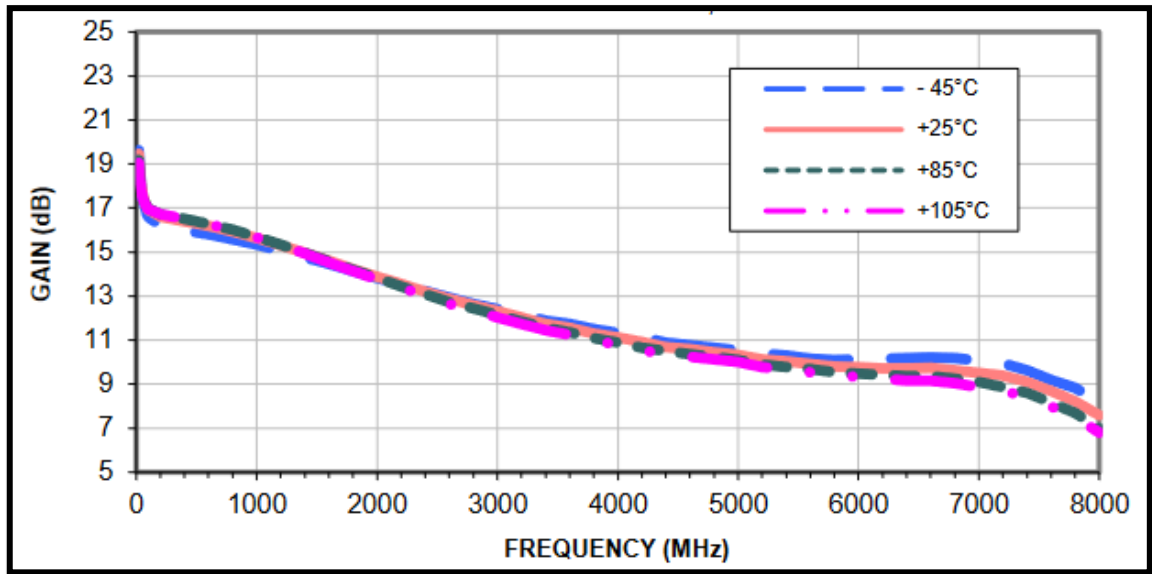


**Ilustración 1-5:** Amplificador Monolítico PHA-1H+

**Fuente:** Mini-Circuits, 2016

El PHA-1H+ presenta una ganancia de 16 dB a 1 GHz y un factor de ruido de 2,6 dB. Tiene un IP3 de 30 dBm y un punto de interceptación de tercer orden (TOI) de 35 dBm. El PHA-1H+ está adaptado internamente a 50 ohmios y consume 20 mA de corriente. Está disponible en un pequeño encapsulado SOT-89 de 8 pines.





**Ilustración 1-6:** Curva de rendimiento de Ganancia vs Frecuencia vs Temperatura del amplificador PHA-1H+

**Fuente:** Mini-Circuits, 2016

En el gráfico 3.2 nos muestra la curva de ganancia en función de la frecuencia y la temperatura del amplificador MMIC PHA-1H+ señala que la ganancia del amplificador va disminuyendo mientras la frecuencia aumenta. La ganancia máxima la tenemos en los 19 dB y disminuye con la frecuencia por de debajo de los 9 dB más allá de 6GHz de frecuencia. La temperatura no tiene un gran efecto en la ganancia del amplificador.

Las principales características de este amplificador la podemos observar en la tabla 1-3.

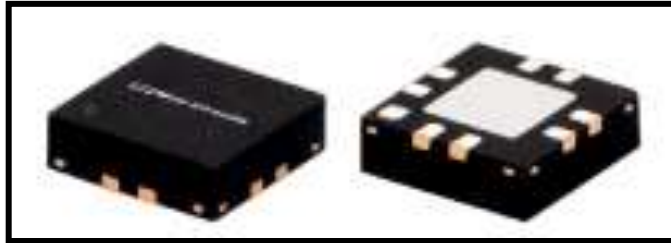
**Tabla 1-3:** Características principales amplificador PHA-1H+

Característica	Valor
Rango de frecuencias	50 MHz - 6 GHz
Ganancia	10 dB
Factor de ruido	2,6 dB
IP3	30 dBm
TOI	35 dBm
Impedancia	50 ohmios
Corriente	20 mA
Encapsulado	SOT-89 de 8 pines

**Realizado por:** Luis M., 2023

### 1.3.3.2 PMA-5451+

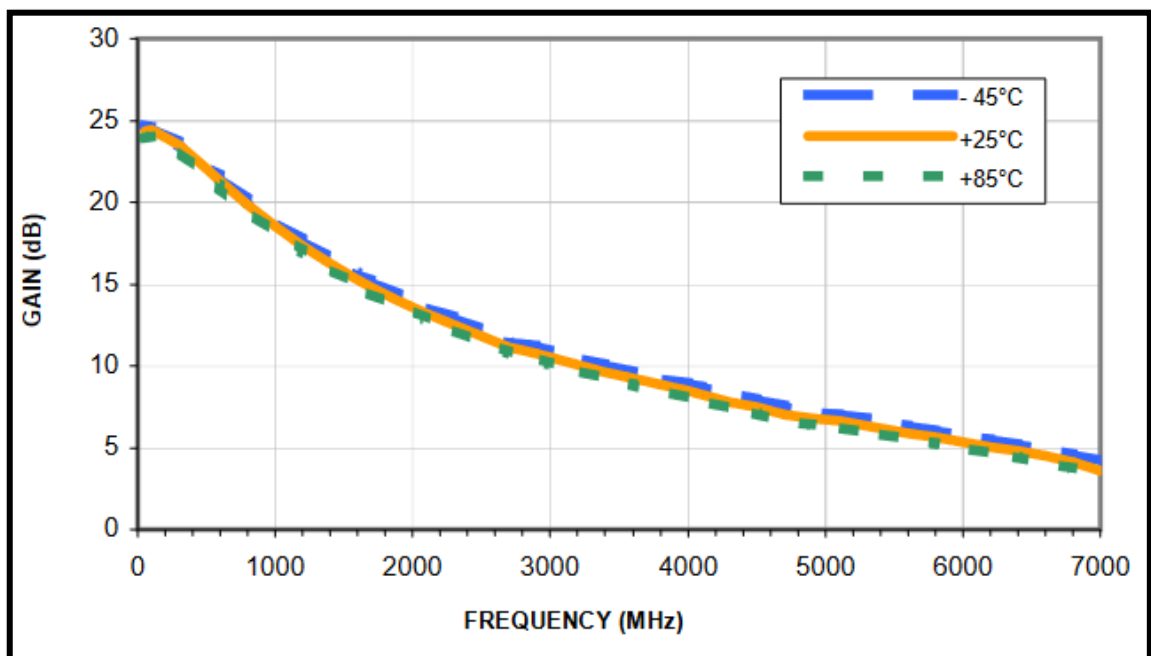
El PMA-5451+ es un amplificador de circuito integrado de microondas monolítico (MMIC) fabricado por Mini-Circuits. Es un amplificador de bajo ruido y alto IP3 que funciona desde 50 MHz hasta 6 GHz. El PMA-5451+ es ideal para aplicaciones de receptores sensibles como análisis de espectro, equipos de prueba e instrumentación de prueba.



**Ilustración 1-7:** Amplificador Monolítico PMA-5451+

**Fuente:** Mini-Circuits, 2017

El PMA-5451+ presenta una ganancia de 19 dB a 1 GHz y un factor de ruido de 0,7 dB. Tiene un IP3 de 25 dBm y un punto de intercepción de tercer orden (TOI) de 30 dBm. El PMA-5451+ está adaptado internamente a 50 ohmios y consume 30 mA de corriente. Está disponible en un pequeño encapsulado QFN de 8 pines.



**Ilustración 1-8:** Curva de rendimiento de Ganancia vs Frecuencia vs Temperatura del amplificador PMA-5451+

**Fuente:** Mini-Circuits, 2017

En la ilustración 1-8 se observa la curva de ganancia en función de la frecuencia y la temperatura del amplificador MMIC PMA-5451+ muestra que la ganancia del amplificador disminuye mientras aumenta la frecuencia. La ganancia máxima la tenemos en los 25 dB y disminuye con la frecuencia por de debajo de los 5 dB más allá de 6GHz. La ganancia del amplificador casi no se ve afectada por la por la temperatura.

Estas son las principales especificaciones del PMA-5451+:

**Tabla 1-4:** Características principales amplificador PMA-5451+

Característica	Valor
Rango de frecuencias	50 MHz - 6 GHz
Ganancia	6 dB
Factor de ruido	0,7 dB
IP3	25 dBm
TOI	30 dBm
Impedancia	50 ohmios
Corriente	30 mA
Encapsulado	QFN de 8 pines

Realizado por: Luis M., 2023

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

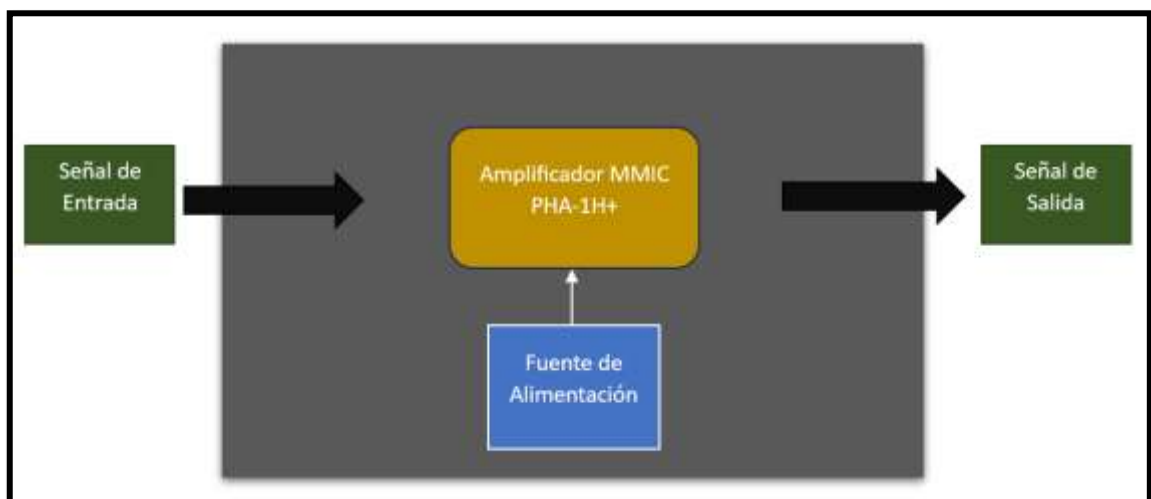
#### 2.1 Introducción

En este capítulo se presenta la propuesta de diseño de un sistema de amplificación de alta frecuencia, junto con sus componentes correspondientes. Estos elementos están organizados en un conjunto de bloques, cuyo funcionamiento se describirá detalladamente.

Además, se proporcionarán los requisitos de hardware necesarios para el funcionamiento y la operación del sistema. Esto permitirá comprender la función de cada uno de los componentes del sistema, así como los procesos llevados a cabo durante la implementación.

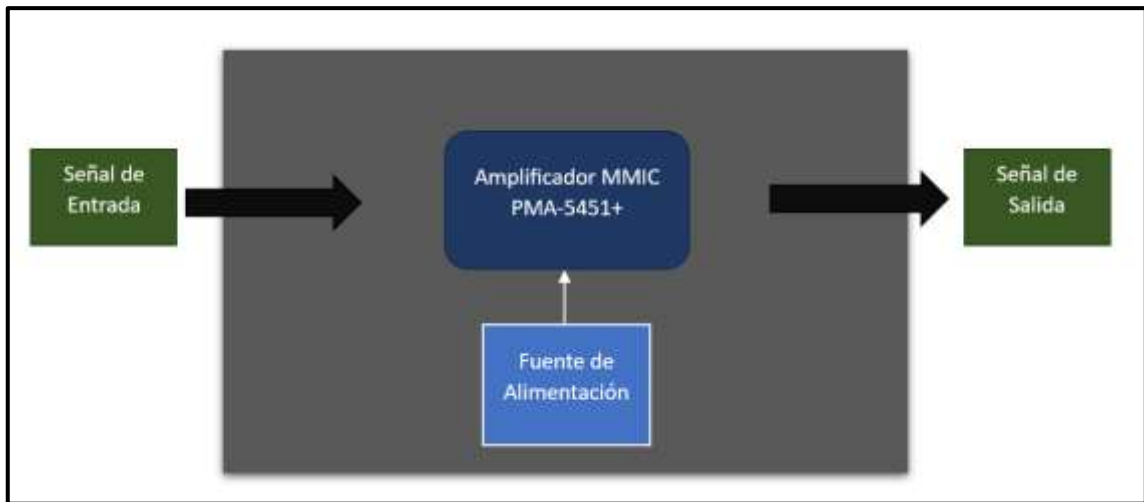
#### 2.2 Diseño de los amplificadores

Con el fin de proponer un diseño para el amplificador, se investigaron los diferentes tipos de circuitos integrados MMIC disponibles en el mercado y se identificaron los fabricantes correspondientes. Se encontró una amplia gama de elementos entre los cuales se seleccionaron cuidadosamente aquellos que cumplen con el rango establecido.



**Ilustración 2-1:** Diagrama de bloques del sistema de amplificación con el módulo PHA-1H+

Realizado por: Luis M., 2023



**Ilustración 2-2:** Diagrama de bloques del sistema de amplificación con el módulo PMA-5451+

**Realizado por:** Luis M., 2023

En la figura 2-1 y 2-2 se puede observar el diagrama de bloques que visualmente representa los componentes que conforman el sistema del amplificador con el módulo PHA-1H+ y PMA-5451+ respectivamente.

### 2.3 Requerimientos del sistema

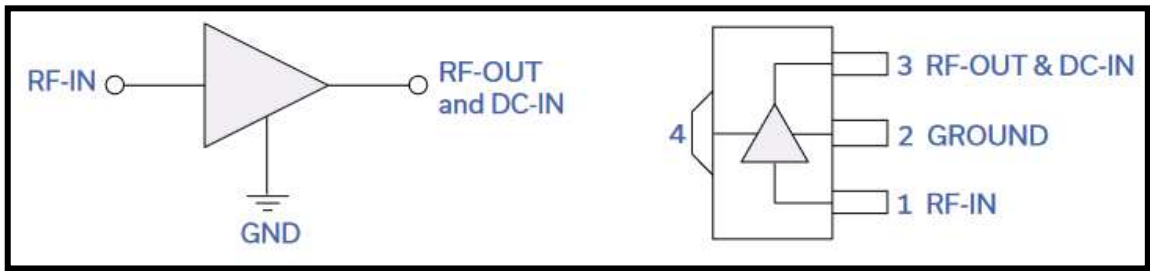
La figura 2-1 y 2-2 ilustra un sistema compuesto por varios bloques que trabajan en conjunto para lograr una respuesta adecuada y un funcionamiento óptimo. Uno de los componentes clave del sistema es la fuente de alimentación, cuya función principal es suministrar los valores correctos de voltaje y corriente, debidamente rectificadas, para alimentar cada uno de los módulos de amplificación.

Los amplificadores son los componentes principales dentro de cada uno de los bloques. Estos módulos contienen circuitos integrados MMIC en su interior, los cuales se encargan de amplificar los diferentes rangos de frecuencia.

Todos los componentes están conectados entre sí mediante líneas de transmisión de 50 ohmios. Se utilizó cable coaxial que cumple con los requisitos del sistema para mantener una impedancia de entrada y salida de 50  $\Omega$ , ya que la mayoría de los equipos de la institución operan en esta impedancia.

### 2.4 Diseño del sistema de amplificación con el módulo PHA-1H+

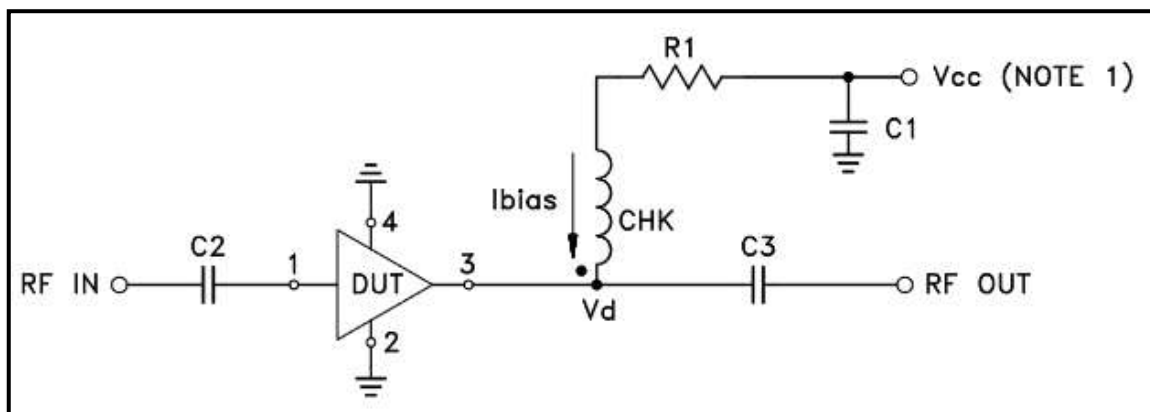
Para la construcción del amplificador de potencia se revisó cuidadosamente el circuito y los pines del módulo de amplificación como se muestra en la figura 2-3.



**Ilustración 2-3:** Esquema simplificado y descripción de pines del módulo PHA-1H+

Fuente: Mini-Circuits, 2016

Para garantizar el adecuado funcionamiento del circuito integrado, es necesario que interactúe de manera coordinada con diversos componentes pasivos, tales como condensadores, resistencias y bobinas. Estos elementos se adquirieron junto con los circuitos integrados para su posterior ensamblaje. La figura 2-4 ilustra el esquema del circuito recomendado por Mini-circuits para el módulo de amplificación.

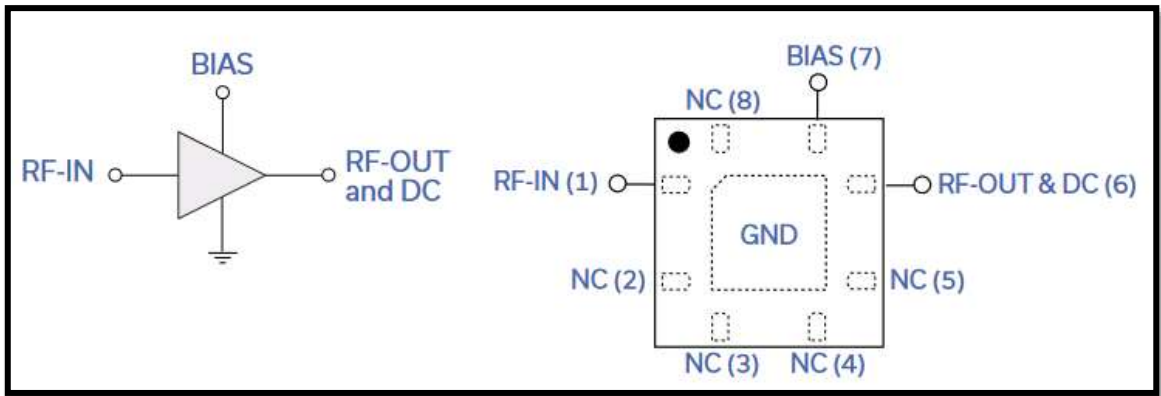


**Ilustración 2-4:** Circuito esquemático amplificador PHA-1H+

Fuente: Mini-Circuits, 2016

## 2.5 Diseño del sistema de amplificación con el módulo PMA-5451+

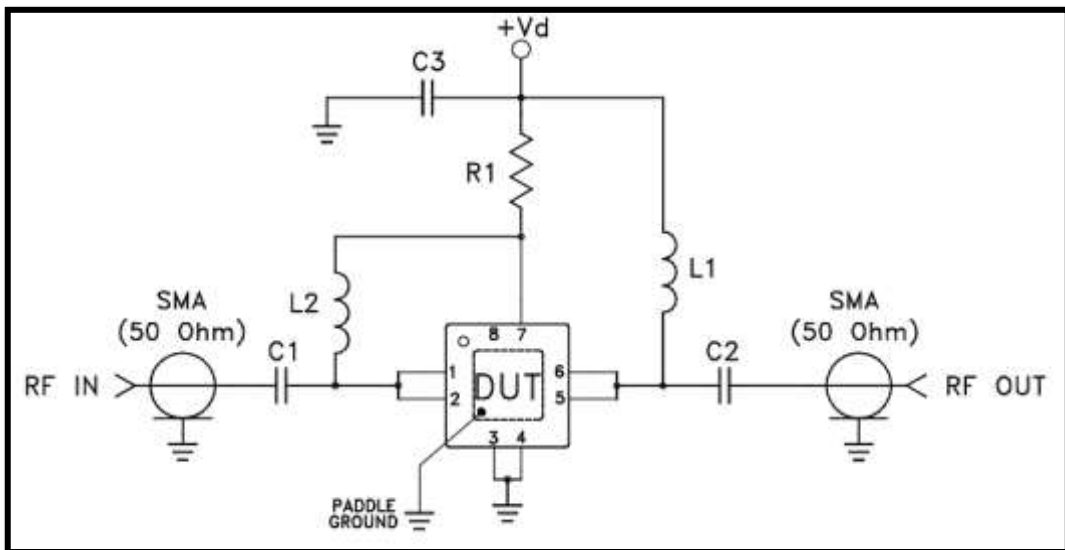
Al igual para el sistema de amplificación con el módulo PMA-5441+ se realizó una revisión del esquema del integrado, así como la de sus pines para su correcta implementación.



**Ilustración 2-5:** Esquema simplificado y descripción de los PADS del módulo PMA-5451+

Fuente: Mini-Circuits, 2017

El fabricante de este circuito integrado también proporciona un esquema recomendado para la realización del amplificador como se muestra en la figura 2-6.



**Ilustración 2-6:** Circuito esquemático amplificador PMA-5451+

Fuente: Mini-Circuits, 2017

## 2.6 Diseño Electrónico

El diseño electrónico se realizó en el software Altium Designer el cual es un software de diseño electrónico para el desarrollo de placas de circuitos impreso PCB y sistemas electrónicos. Con la ayuda de este software se realizó el diseño esquemático del circuito, así como el diseño PCB con sus respectivas pistas para cada amplificador.

### 2.6.1 Diseño esquemático

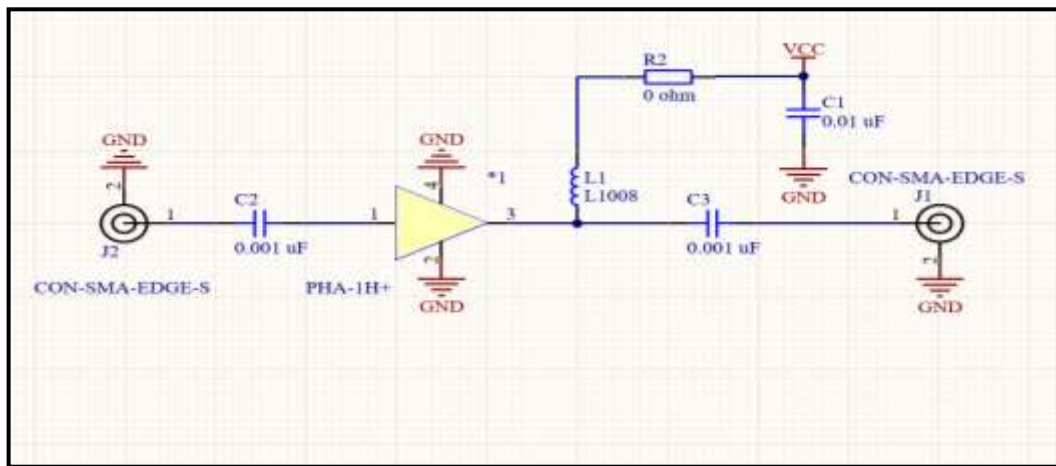
Para empezar el diseño esquemático de los amplificadores se escogieron los materiales con los cuales se iba construir los amplificadores, de acuerdo con las características y recomendaciones para los módulos PHA-1H+ y PMA-5451+ que se vieron en el apartado 2-4 y 2-5 respectivamente. En la tabla 2-1 se observan con detalle los componentes exactos de cada amplificador.

**Tabla 2-1:** Descripción de los elementos utilizados en la implementación de los amplificadores

Componentes	Amplificador modulo PHA-1H+	Amplificador modulo PMA-5451+
Resistencias	1206 SMD 0 $\Omega$ ohm	1206 SMD 1.5k $\Omega$ ohm
Capacitores	SMD 1206 0.01 $\mu$ F SMD 1206 0.001 $\mu$ F	SMD 1206 0.01 $\mu$ F SMD 1206 0.001 $\mu$ F
Inductores	TCCH-80+ RF CHOKE	TCCH-80+ RF CHOKE Power Inductor 390 nH
Conectores	Conectores SMA	Conectores SMA

Realizado por: Luis M., 2023

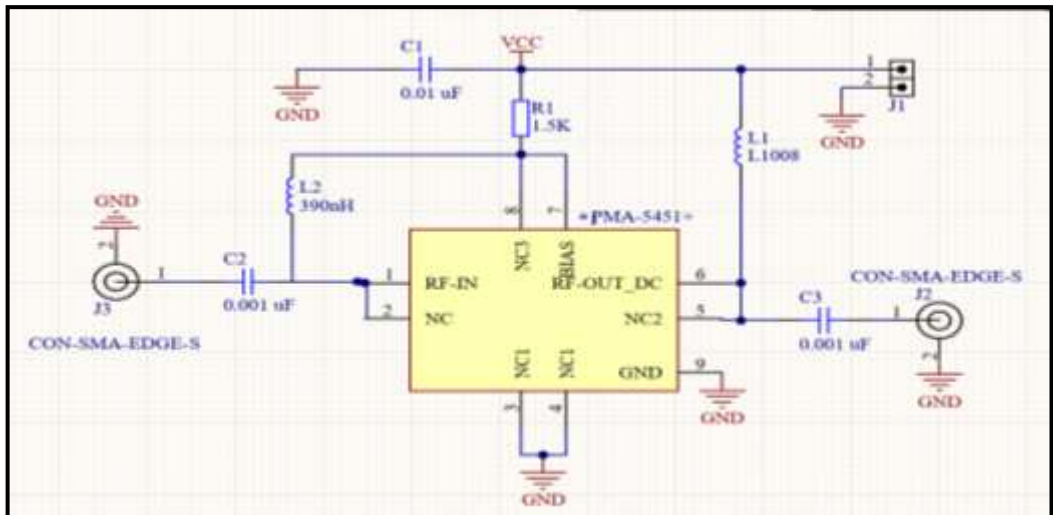
En el diseño esquemático se empezó colocando los componentes ya seleccionados para cada amplificador, el esquema utilizado fue el de la figura 2-4 y 2-5 para el amplificador PHA-1H+ y PMA-5451+ respectivamente.



**Ilustración 2-7:** Diseño esquemático para el amplificador PHA-1H+ en Altium Designer

Realizado por: Luis M., 2023





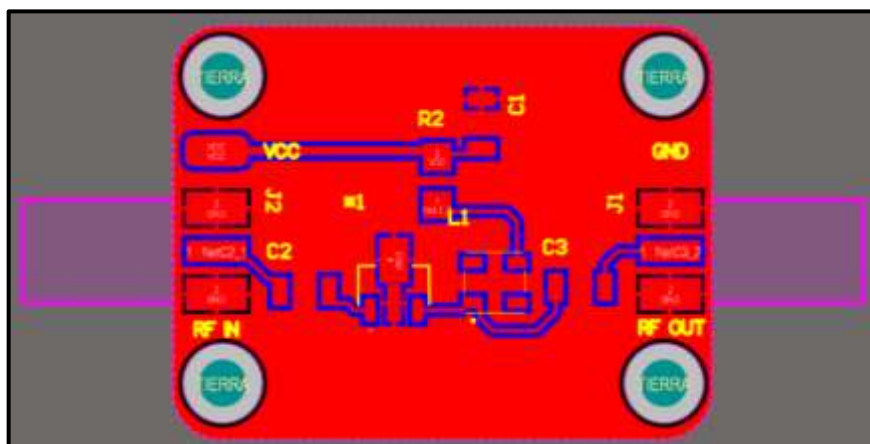
**Ilustración 2-8:** Diseño esquemático para el amplificador PMA-5451+ en Altium Designer

Realizado por: Luis M., 2023

El esquema final se muestra en la ilustración 2-7 y 2-8 para cada amplificador, y se verifica que cumpla con todas las especificaciones y que cada componente, así como los pines de los módulos estén conectados correctamente.

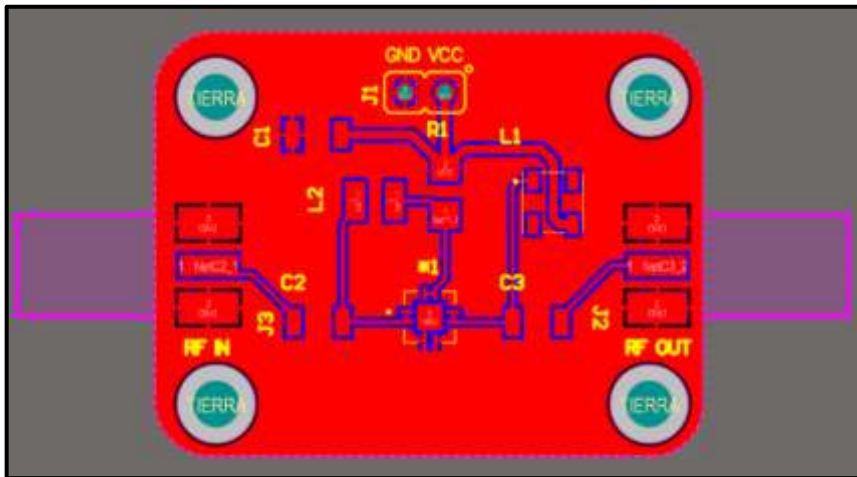
### 2.6.2 Diseño en la placa de circuito

En el diseño PCB en primer lugar se comprobaron que todos los componentes estén correctamente conectados en el esquemático. Para comenzar el diseño en la placa de circuito se importó el esquemático y se realizó el diseño de cada componente con sus respectivas dimensiones y diseño 3D para luego exportarlos y colocarlos en la placa. En la ilustración 2-9 se observa el diseño PCB en 2D de los amplificadores PHA-1H+ y PMA-5451+ respectivamente, se colocan los componentes ya creados en la placa.



**Ilustración 2-9:** Diseño en la PCB del amplificador PHA-1H+

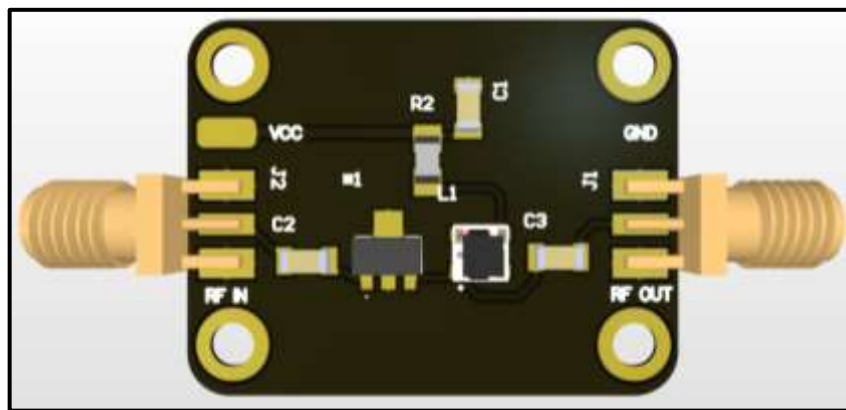
Realizado por: Luis M., 2023



**Ilustración 2-10:** Diseño en la PCB del amplificador PMA-5451+

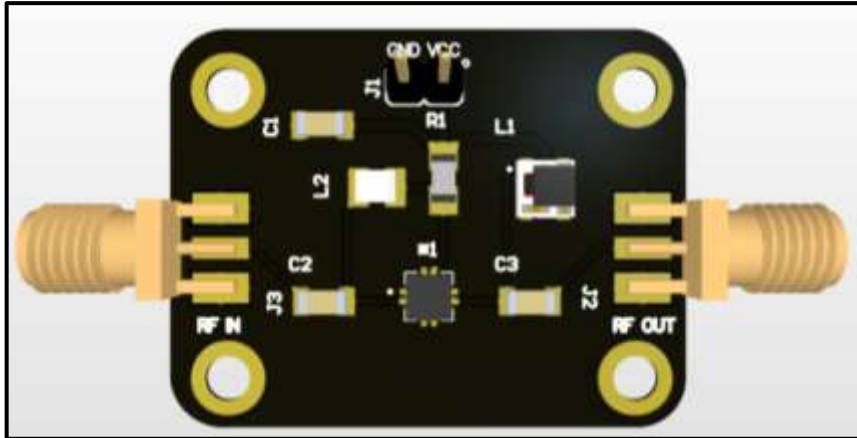
Realizado por: Luis M., 2023

Luego de colocar todos los componentes en la placa se procedio a realizar la edicion en la vista 3-D para acomodar los componentes y optimizar la disposición de los mismos para minimizar las interferencias electromagnéticas y garantizar una adecuada disipación del calor dando como resultado las ilustracuines 2-11 y 2-12.



**Ilustración 2-11:** Diseño en PCB del amplificador PHA-1H+ en vista 3-D

Realizado por: Luis M., 2023



**Ilustración 2-12:** Diseño en PCB del amplificador PMA-5451+ en vista 3-D

**Realizado por:** Luis M., 2023

En esta etapa final del proceso de diseño de la PCB, se llevó a cabo un ruteado manual de las pistas con el objetivo de alcanzar una optimización adicional en el diseño. Este enfoque meticuloso permitió minimizar las interferencias electromagnéticas, reducir la resistencia y capacitancia parasitarias, y mejorar significativamente el rendimiento global del circuito.

Posteriormente, se procedió a verificar la conformidad de la PCB con las reglas de diseño establecidas, utilizando la herramienta Altium Designer. Mediante esta verificación exhaustiva, se aseguró que todas las conexiones cumplieran con las restricciones de enrutamiento predefinidas, garantizando una correcta disposición de las señales y evitando potenciales cortocircuitos.

## **CAPÍTULO III**

### **3. MARCO DE RESULTADOS**

#### **3.1 Introducción**

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos tras completar las etapas de diseño e implementación de cada uno de los amplificadores. La fase de implementación implicó una cuidadosa soldadura de los componentes pasivos y conectores de entrada y salida en los módulos de amplificación.

Una vez se aseguró la preparación adecuada de todos los dispositivos, se procedió a verificar individualmente el desempeño de los amplificadores. Para este propósito, se utilizaron equipos especializados, donde un generador de funciones que actuó como transmisor, creando señales de prueba en diferentes frecuencias, y el analizador de espectros asumió el rol de receptor.

Los siguientes apartados detallan los resultados obtenidos en cada uno de los circuitos implementados y la evaluación de su rendimiento a través de las pruebas experimentales. Se analizarán las características clave de cada dispositivo, como su ganancia, ancho de banda, eficiencia y linealidad, con el fin de verificar si cumplen con los requisitos establecidos previamente en la fase de diseño.

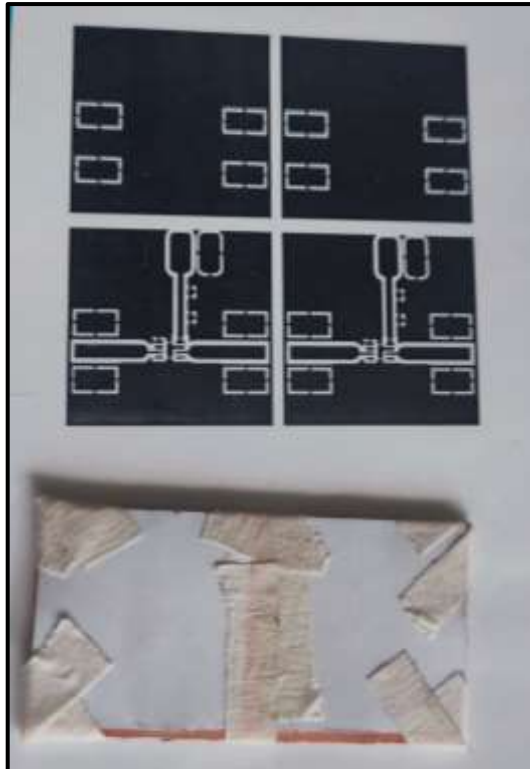
Este capítulo proporcionará una visión integral de los logros alcanzados en el proceso de implementación y permitirá una comprensión detallada de cómo cada circuito responde bajo condiciones específicas de prueba. Los resultados obtenidos servirán como base para las conclusiones finales y las recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en el diseño de amplificadores de potencia en la banda de frecuencia de 0.05 GHz a 6 GHz con tecnología MMIC.

#### **3.2 Implementación de los amplificadores de potencia MMIC**

Se llevó a cabo la implementación de los dos amplificadores siguiendo el diseño de la placa de circuito desarrollado en el software. Para este tipo de circuitos de altas frecuencias, la placa recomendada es el material Rogers. Sin embargo, debido a las restricciones de stock en el país, ambos amplificadores se implementaron utilizando el material FR-4, el cual también es compatible con las frecuencias de trabajo para las que se diseñó los amplificadores.

### 3.2.1 Implementación del amplificador PHA-1H+ y PMA-5451+

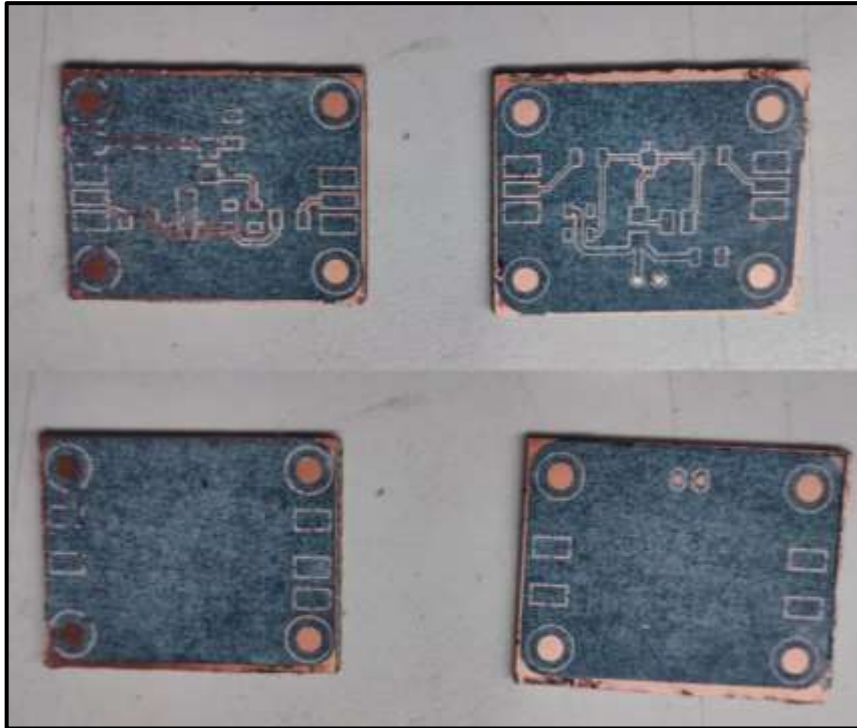
La realización del amplificador se inició con la exportación de los archivos en formato PDF tanto de la capa de superior como la capa inferior del diseño en PCB. Una vez exportado los archivos de cada amplificador se imprime en un papel especial llamado couche el cual es más delgado al papel normal y conveniente para imprimir este tipo de circuitos.



**Ilustración 3-1:** Construcción de los amplificadores

**Realizado por:** Luis M., 2023

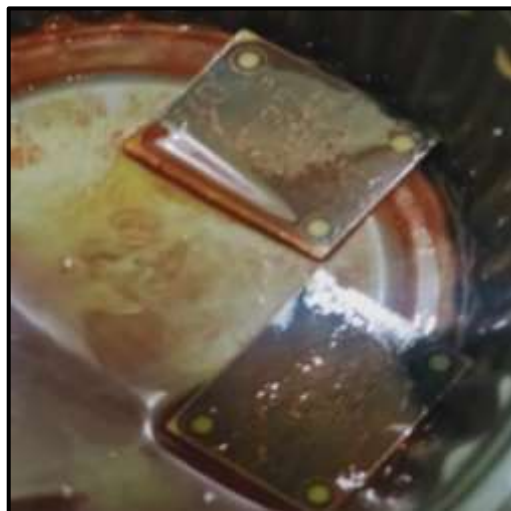
Una vez que el proceso de limpieza del cobre ha concluido, se avanza a la fase de planchado. En esta etapa, se procede a alinear meticulosamente el papel que contiene la impresión con la superficie del PCB. Para asegurar la correcta fijación del papel, se recurre al uso de cinta adhesiva en la parte posterior. Es de especial importancia garantizar que el diseño se oriente de manera que las pistas queden en contacto con el cobre. Esto permitirá que, durante la aplicación de calor, la tinta contenida en el papel se funda y se transfiera eficazmente a la superficie de cobre.



**Ilustración 3-2:** Planchado de las pistas en los circuitos

**Realizado por:** Luis M., 2023

Una vez completada la fase de planchado, el papel quedará adherido al circuito, tal como se evidencia en la figura 3-2. Este papel se retiró sumergiendo las placas de los amplificadores en agua durante unos minutos. Tras este proceso, las placas quedaron únicamente con la tinta impresa. Posteriormente, se procedió a introducir dichas placas en un baño de ácido. La función de este ácido consistió en eliminar las áreas que no estaban cubiertas por el tóner, es decir, el espaciado de las pistas y los componentes de los amplificadores.



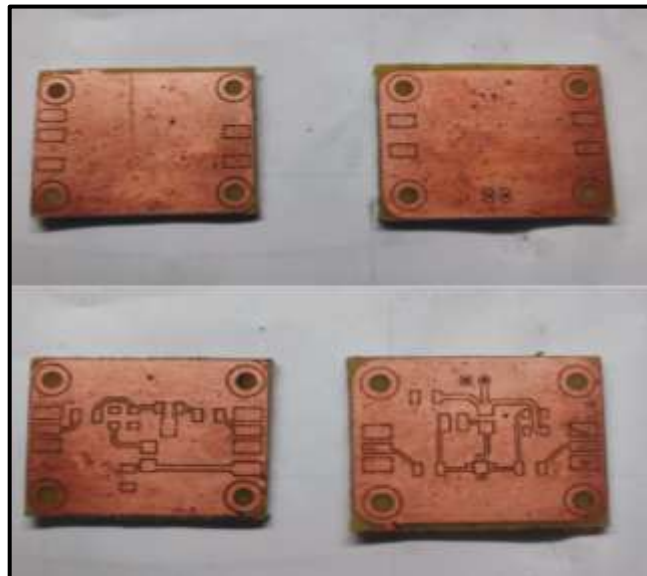
**Ilustración 3-3:** Eliminación del cobre sobrante de la placa

**Realizado por:** Luis M., 2023

Tras obtener las placas como en la ilustración 3-4, se procedió a la última fase del proceso, que implicó la soldadura de los componentes. Este paso se inició con la fijación de la placa, seguida

de la colocación de un microscopio para lograr una visualización óptima de los componentes y las delicadas líneas de pistas, dada su reducida dimensión. Luego, se ajustó con precisión la lente del microscopio para garantizar una visibilidad adecuada de las pistas y los pads de los componentes. Adicionalmente, se aplicó un fundente (flux) en cada pad, cuyo propósito es elevar la temperatura del estaño y lograr una soldadura más efectiva.

De manera sistemática, pequeñas cantidades de fundente se depositaron en las ubicaciones correspondientes a cada componente, seguido de la aplicación de estaño en los mencionados puntos. Este proceso se repitió de forma consistente en cada pad de los componentes.



**Ilustración 3-4:** Placa de los amplificadores luego de pasar por el ácido

**Realizado por:** Luis M., 2023

La figura 3-5 ilustra el procedimiento de colocación de los componentes en sus respectivas posiciones, en estricta conformidad con los esquemas diseñados para cada amplificador. Una vez asegurada la fijación de los componentes en sus ubicaciones designadas, se empleó una pistola de calor en lugar del cautín tradicional. Esta pistola de calor, al alcanzar aproximadamente los 450° grados Celsius, provoca la fusión del estaño. Este proceso resultante asegura la adhesión de los componentes a la placa FR-4, logrando una conexión sólida y duradera.

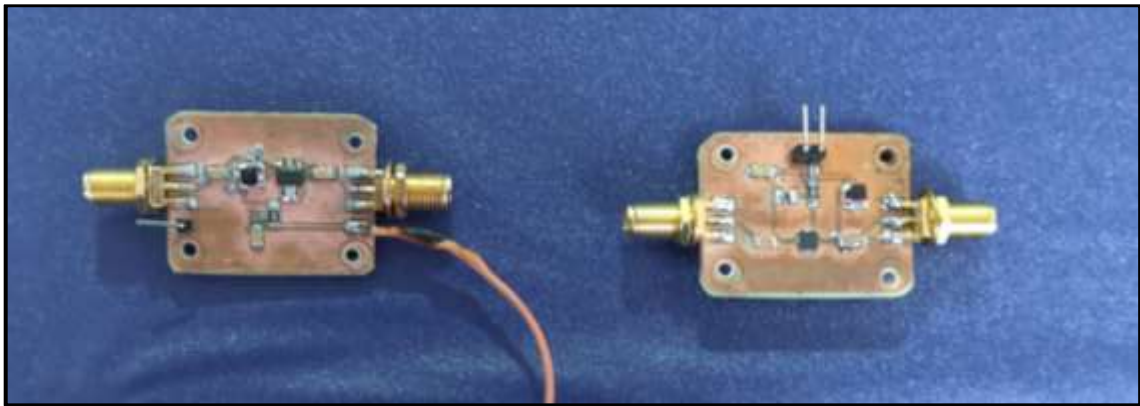




**Ilustración 3-5:** Colocación de los componentes en cada placa

**Realizado por:** Luis M., 2023

Una vez que los componentes han sido soldados en las placas de cada amplificador, se procede a una revisión exhaustiva para confirmar que ningún componente haya experimentado desplazamiento alguno. En este punto, se efectúa la soldadura de los conectores SMA empleando cautín y estaño. Como último paso, se realiza una minuciosa verificación en busca de posibles cortocircuitos en los amplificadores y se lleva a cabo una evaluación completa del funcionamiento general para garantizar su adecuado desempeño.



**Ilustración 3-6:** Amplificador PHA-1H+ y PMA-5451+

**Realizado por:** Luis M., 2023

El resultado definitivo de la implementación de los amplificadores se encuentra exhibido en la ilustración 3-6. En esta representación gráfica, se presenta en primer lugar la placa correspondiente al amplificador PHA-1H+, mientras que en el sector derecho se visualiza el amplificador PMA-5451+. Ambos amplificadores se encuentran equipados con sus respectivos conectores SMA, así como las conexiones de puesta a tierra y de alimentación VCC, que han sido debidamente establecidas.



### 3.3 Mediciones de los amplificadores

Para dar inicio al procedimiento de medición de los amplificadores, se procedió en primera instancia a llevar a cabo pruebas en diversas frecuencias utilizando una señal generada internamente, excluyendo la influencia de los propios amplificadores. El objetivo fundamental de estas pruebas preliminares consistió en construir una tabla que sistematizara las potencias recibidas en relación a las distintas frecuencias. Esta tabla desempeñó un papel crucial al proporcionar un punto de referencia esencial para la subsiguiente comparación con las mediciones efectuadas en cada uno de los amplificadores.

La realización de las mediciones en los amplificadores se llevó a cabo empleando un conjunto diverso de herramientas fundamentales. En primer lugar, se hizo uso de un generador de señales que cumplió la función de transmisor, generando señales en las frecuencias pertinentes. Además, se incorporó un conector SMA hembra-hembra en reemplazo de los propios amplificadores. Este conector fue utilizado con el propósito de simular las pérdidas inherentes a los cables, imitando así las condiciones reales del sistema. Como última instancia, se utilizó un analizador de espectros, una herramienta precisa para observar la potencia recibida, expresada en unidades de dBm, lo que permitió un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos.



**Ilustración 3-7:** Pruebas de recepción sin los amplificadores

**Realizado por:** Luis M., 2023

La figura 3-7 ilustra la configuración en la que el generador de señales se enlaza con el analizador de espectros a través de un conector SMA hembra-hembra. Mediante esta disposición, se procedió a iniciar el proceso de ejecución de pruebas. Esta configuración proporcionó el entorno adecuado

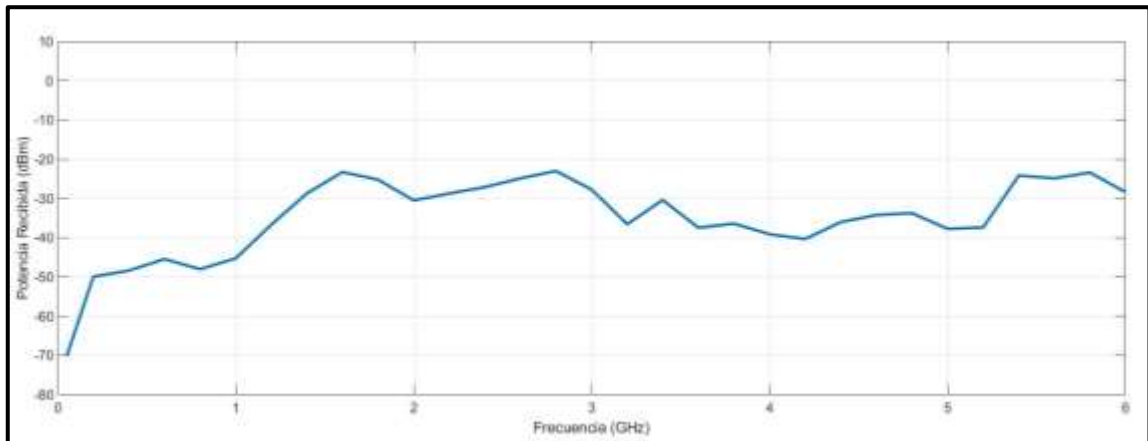
para llevar a cabo un análisis exhaustivo de las características de rendimiento de los amplificadores en el rango de frecuencias especificado.

**Tabla 3-1:** Potencias recibidas sin amplificadores

Frecuencia (GHz)	Potencia Recibida (dBm)
0.05	-70.21
0.2	-49.96
0.4	-48.4
0.6	-45.49
0.8	-48.05
1	-45.29
1.2	-36.71
1.4	-28.76
1.6	-23.31
1.8	-25.24
2	-30.52
2.2	-28.77
2.4	-27.14
2.6	-24.91
2.8	-23.03
3	-27.77
3.2	-36.57
3.4	-30.42
3.6	-37.49
3.8	-36.43
4	-39.16
4.2	-40.36
4.4	-36.07
4.6	-34.25
4.8	-33.77
5	-37.76
5.2	-37.43
5.4	-24.19
5.6	-24.91
5.8	-23.44
6	-28.39

Realizado por: Luis M., 2023

Los registros de las potencias recibidas, expresadas en unidades de dBm, fueron consolidados en la Tabla 3-1. Estos datos fueron obtenidos a diversas frecuencias, abarcando el intervalo desde 0.05 GHz hasta los 6 GHz. Como producto de este análisis, se generó la Gráfica 3-7. Esta representación gráfica ilustra la correlación entre la frecuencia y la potencia recibida, proporcionando una visualización más clara de esta relación.



**Ilustración 3-8:** Grafica de potencias recibidas en función de la frecuencia sin amplificadores

Realizado por: Luis M., 2023

### 3.3.1 Mediciones del amplificador PHA-1H+

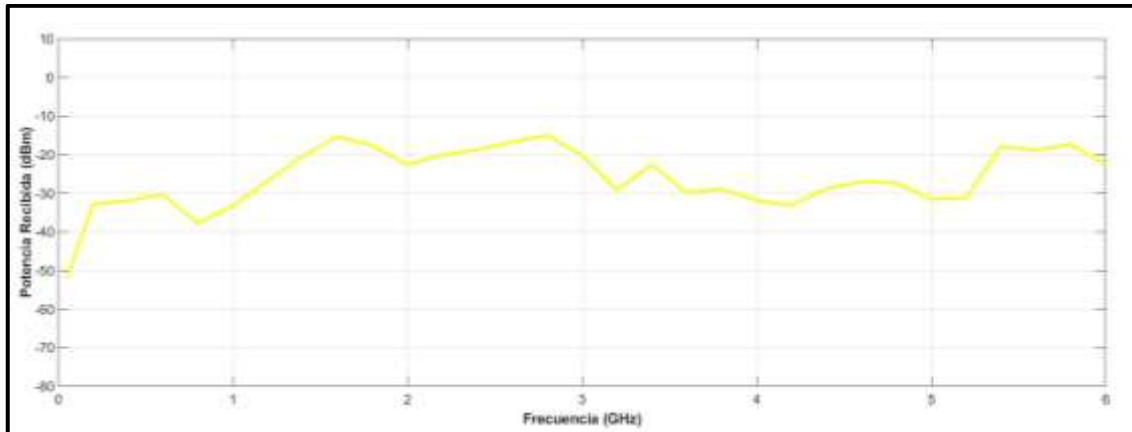
Para iniciar las pruebas del amplificador, se estableció la conexión inicial conectando el generador de señales a la entrada designada como "RF IN" en el amplificador. De manera análoga, se conectó el analizador de espectros a la salida designada como "RF OUT". Para asegurar el funcionamiento adecuado del amplificador, se proporcionó la alimentación requerida de 5V.



**Ilustración 3-9:** Conexión y toma de medidas del amplificador PHA-1H+

Realizado por: Luis M., 2023

Tras establecer estas conexiones, se procedió a la ejecución de las pruebas generando señales en diversas frecuencias. Este proceso abarcó un rango desde 0.05 GHz hasta 6 GHz. El propósito de estas pruebas fue validar la ganancia real del amplificador, cotejando los resultados con los datos recogidos en la tabla 3-1. Este enfoque permitió comprender en qué medida el amplificador estaba amplificando eficazmente las señales a través de su rango de frecuencia.



**Ilustración 3-10:** Grafica de potencias recibidas en función de la frecuencia del amplificador PHA-1H+

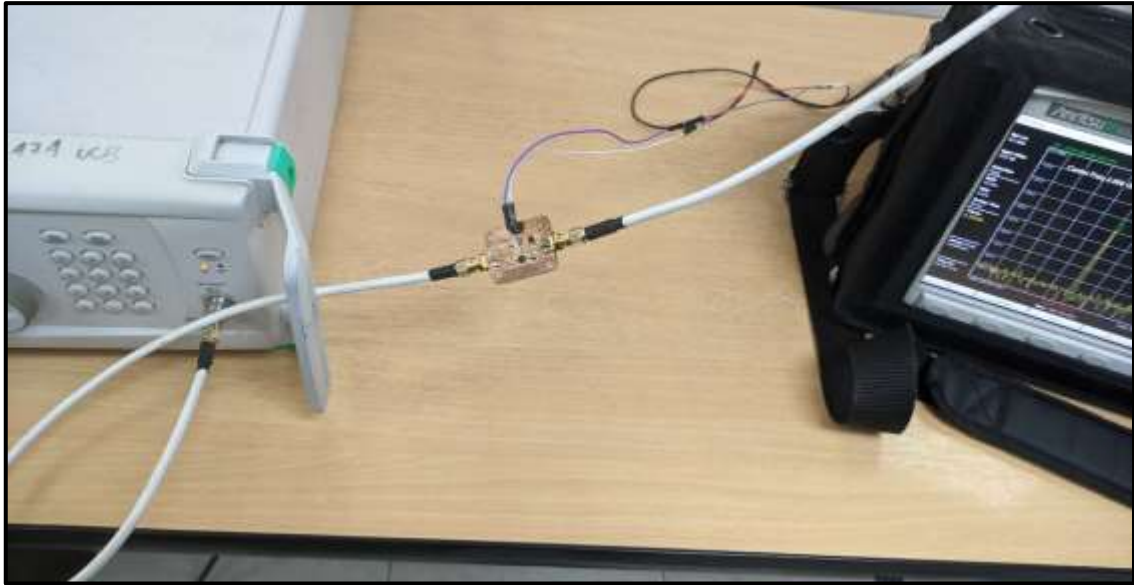
**Realizado por:** Luis M., 2023

Tal como se puede apreciar en la ilustración 3-8, emerge un patrón distintivo de incremento en la potencia recibida en concordancia con el aumento de la frecuencia, marcando una tendencia ascendente constante. A medida que la frecuencia experimenta un aumento, la potencia recibida también incrementa de manera coherente, con notables picos en torno a los 1.6 GHz, 2.8 GHz y 5.4 GHz. Estas frecuencias podrían indicar puntos de resonancia o de rendimiento óptimo del amplificador, donde su capacidad de amplificación es más destacada.

A frecuencias muy bajas, como 0.05 GHz y 0.2 GHz, se registran potencias recibidas relativamente bajas, a partir de 1.4 GHz, la potencia recibida aumenta significativamente, alcanzando valores máximos alrededor de 1.6 GHz y 2.8 GHz.

### 3.3.2 Mediciones del amplificador PMA-5451+

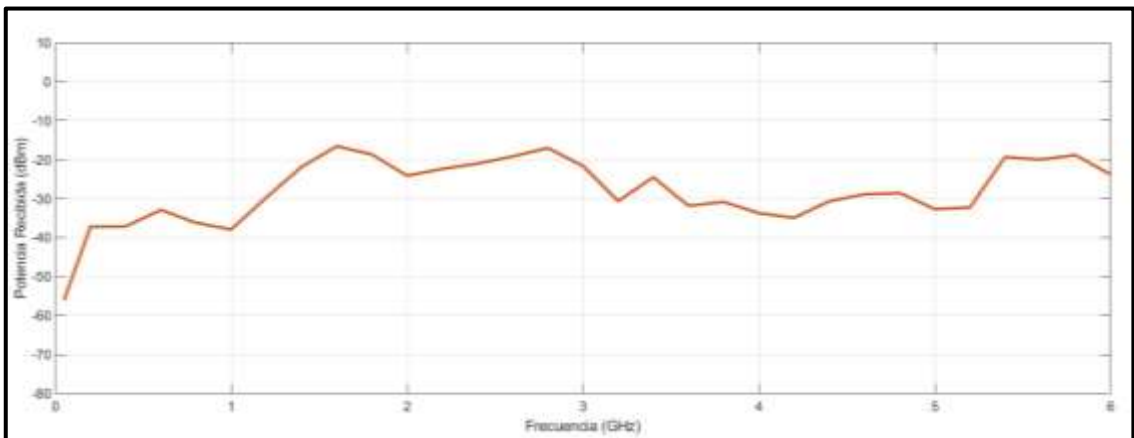
Del mismo modo, en relación con el amplificador PMA-5451+, se implementó un proceso similar conectando tanto el generador de señales como el analizador de espectro al dispositivo en cuestión. Se dieron inicio a las pruebas siguiendo una metodología análoga a la empleada en el caso del otro amplificador.



**Ilustración 3-11:** Conexión y toma de medidas del amplificador PMA-5451+

**Realizado por:** Luis M., 2023

La disposición de la conexión se llevó a cabo de acuerdo a lo evidenciado en la ilustración 3-11, en la cual se aprecia la vinculación entre el generador de señales y el analizador de espectros. Es pertinente señalar que la alimentación del amplificador PMA-5451+ difiere en este aspecto respecto al amplificador PHA-1H+, requiriendo una alimentación de 3 voltios para su funcionamiento.



**Ilustración 3-12:** Grafica de potencias recibidas en función de la frecuencia del amplificador PMA--5451+

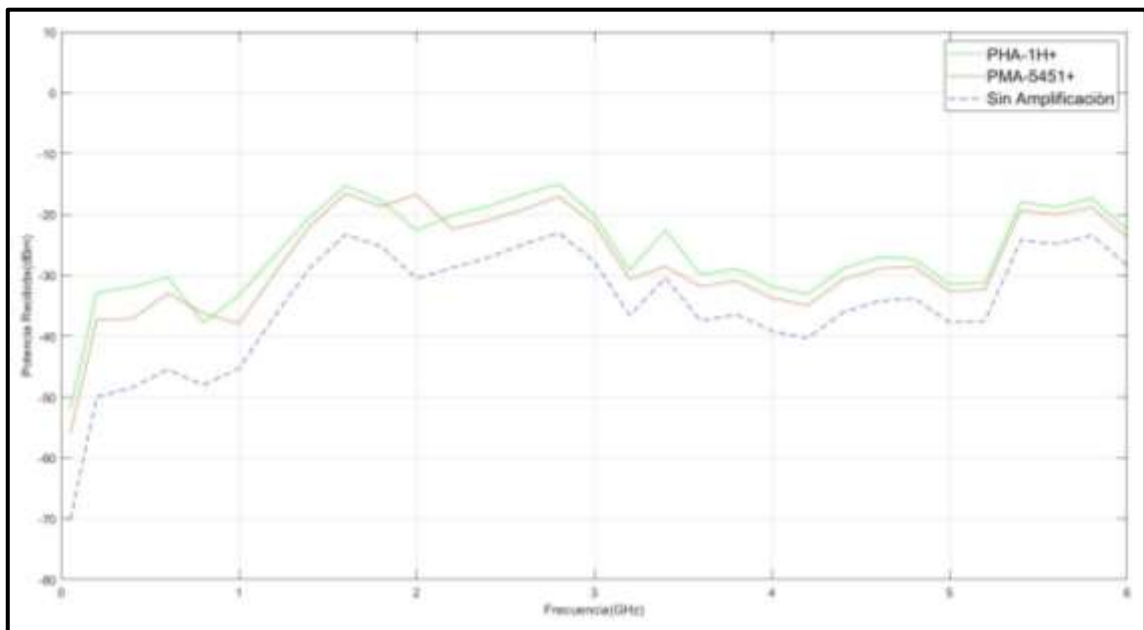
**Realizado por:** Luis M., 2023

La Ilustración 3-12 presenta los resultados obtenidos del análisis de este amplificador. Los datos muestran un aumento gradual y consistente en la potencia recibida al incrementar la frecuencia, resaltando un desempeño eficaz en el intervalo aproximado de 1.6 GHz a 2.8 GHz. Además, se identifican picos notorios en ciertas frecuencias, como 1.6 GHz, 2.8 GHz, y 5.4 GHz, lo que

sugiere puntos de resonancia o máxima ganancia en estos valores. A partir de alrededor de 3 GHz, se aprecia un descenso gradual en la potencia recibida.

### 3.3.3 Comparación de las potencias recibidas

Con los datos de las potencias recibidas en relación con la frecuencia, tanto con los módulos amplificadores como sin amplificación, se llevó a cabo una comparación de estas tres señales, como se ilustra en la Figura 3-13.



**Ilustración 3-13:** Potencias recibidas sin amplificación, con el módulo PHA-1H+ y PMA-5451+

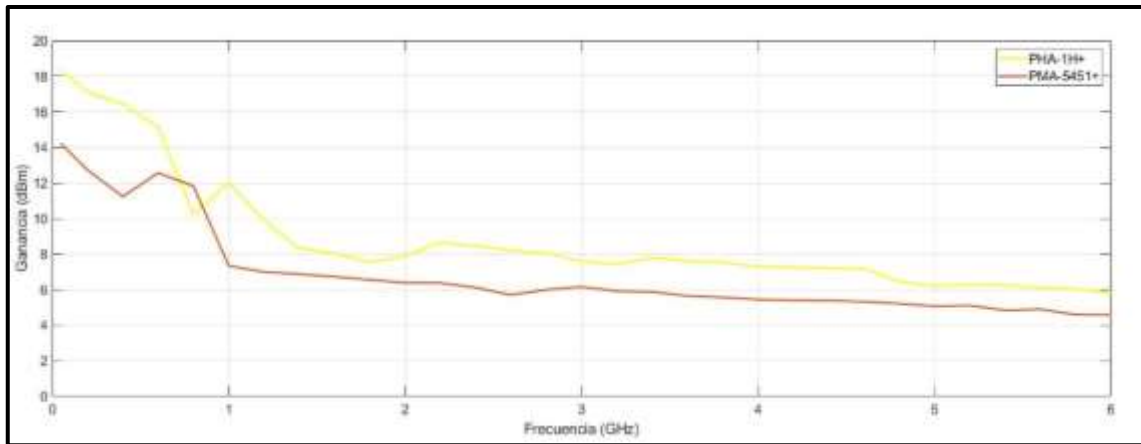
**Realizado por:** Luis M., 2023

Como se evidencia en la Ilustración 3-13, la potencia recibida sin amplificación es inferior a las potencias obtenidas con los módulos amplificadores, conforme a las expectativas. El comportamiento del amplificador PHA-1H+ es ligeramente superior al del amplificador PMA-5451+, alcanzando potencias de hasta -15,01 dBm. En contraste, el amplificador PMA-5451+ exhibe un rendimiento destacado, alcanzando una potencia máxima de -17,04 dBm.

### 3.3.4 Ganancia de los amplificadores

La representación gráfica que ilustra la variación de la ganancia de los amplificadores con respecto a la frecuencia se encuentra exhibida en la ilustración 3-14. En este contexto, la ganancia refleja la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada de los amplificadores en

cuestión. Es decir, esta representación visual proporciona una estimación de cuánto amplifica cada amplificador una señal en relación a la señal original de entrada.



**Ilustración 3-14:** Ganancia del amplificador PHA-1h+ y PMA--5451+ en función de la frecuencia

**Realizado por:** Luis M., 2023

En líneas generales, se observa una disminución en la ganancia de ambos amplificadores a medida que la frecuencia se incrementa. Esta tendencia es común en una variedad de amplificadores y se relaciona con las particularidades del diseño y las limitaciones intrínsecas de los componentes empleados. En determinadas frecuencias, el amplificador PHA-1H+ exhibe una mayor ganancia en comparación con el PMA-5451+, mientras que en otras frecuencias, la situación se invierte.

En frecuencias cercanas a 1 GHz, el PMA-5451+ muestra una caída significativa en la ganancia, mientras que el PHA-1H+ se mantiene más constante. Esto podría ser importante al seleccionar el amplificador adecuado para aplicaciones en ese rango de frecuencia. Aunque los valores de ganancia varían, en general ambos amplificadores parecen ser más adecuados para frecuencias más bajas (por debajo de 2 GHz) en términos de mantener una ganancia relativamente alta.

## CONCLUSIONES

Al evaluar el rendimiento de ambos amplificadores en el rango de frecuencia de 1 GHz a 6 GHz, se observa una ganancia lineal en ambas unidades. El amplificador PHA-1H+ presenta una ganancia promedio de 7,58 dBm, mientras que el amplificador PMA-5451+ alcanza una ganancia promedio de 8 dBm. Estos resultados indican que ambos amplificadores son efectivos para amplificar señales en esta banda de frecuencia, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren una amplificación constante y lineal en este rango.

Se ha observado que, si bien las dos configuraciones de amplificadores demuestran ganancias considerables, existe una relación inversa entre la ganancia y la frecuencia en ambas implementaciones. Esto se ilustra con los amplificadores PHA-1H+ y PMA-5451+, donde, al comparar las frecuencias iniciales y finales de 0.05 GHz y 6 GHz, se evidencia una disminución en la ganancia. En la frecuencia inicial, el amplificador PHA-1H+ exhibe una ganancia de 18,31 dBm, mientras que el PMA-5451+ tiene una ganancia de 14,2 dBm. Sin embargo, en la frecuencia final de 6 GHz, ambas ganancias disminuyen a 5,81 dBm para el PHA-1H+ y 4,57 dBm para el PMA-5451+.

Después de analizar detenidamente las técnicas de diseño basadas en circuitos MMIC para amplificadores de potencia y con unas ganancias máximas de 18,31 dBm por parte del amplificador PHA-1H+ y 14,2 dBm con el amplificador PMA-5451+ se ha podido confirmar que ofrecen ventajas significativas, como la integración compacta de componentes, un rendimiento superior a altas frecuencias y una menor pérdida de señal.

La implementación exitosa del proyecto se destaca por su eficiencia económica, con un costo total de 68 dólares para ambos amplificadores. Esta inversión es notablemente más baja que la de amplificadores profesionales en el mercado, que suelen superar los 100 dólares. Este enfoque económico refuerza la relevancia y accesibilidad de la propuesta, estableciendo estos amplificadores como una alternativa asequible y funcional para aplicaciones en la banda de frecuencia especificada.



Si bien los resultados no alcanzaron las ganancias óptimas especificadas en las hojas de datos de los circuitos integrados de los amplificadores, esto se atribuye a la elección del material del PCB. En lugar de utilizar Rogers, se optó por el FR-4 debido a limitaciones de disponibilidad. El FR-4 posee una constante dieléctrica más alta en comparación con el Rogers, lo que puede dar lugar a pérdidas de señal superiores y a una menor eficiencia de amplificación.

## **RECOMENDACIONES**

En el proceso de diseño de los amplificadores, resulta imperativo considerar la elección del material, como en nuestro caso particular, donde empleamos Fr-4 en lugar del recomendado Rogers. En estos casos, es esencial tener en cuenta que este cambio de material conlleva ajustes necesarios en el ancho de las pistas, debido a las modificaciones en el acoplamiento de impedancias.

Es fundamental considerar que los amplificadores poseen un límite de voltaje que pueden tolerar. Por lo tanto, es necesario consultar en los datasheet correspondientes de cada módulo con el fin de evitar cualquier posibilidad de daño a los amplificadores monolíticos.

Al llevar a cabo el diseño en la placa de circuito utilizando el software Altium Designer, es de suma importancia ejercer un alto grado de precisión en la modelación de cada componente. Esta meticulosidad ejercida en el modelado tendrá un impacto directo en el desempeño operativo de los amplificadores.

## BIBLIOGRAFÍA

**BALANIS, Constantine A.** *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 2016. págs. 5-6.

**POOLE, Clive; DARWAZEH, Izzat.** *Microwave Active Circuit Analysis and Design*. Academic Press, 2015. págs. 52,53.

**COLLIN, Robert.** *Foundations for Microwave Engineering*. Wiley-IEEE Press, 2001. págs. 1-715.

**CRIPPS, Steve.** *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. 2006. págs. 45-106.

**DETRATTI, Marco.** *Analysis and design techniques for GaAs MMIC circuits for space applications*. 2014. pág. 1.

**FIALLOS, Dario.** *DISEÑO E IMPLMETACION DE AMPLIFICADOR DE ALTA Frecuencia en la banda K con tecnología MMIC para el laboratiro de comunicaciones de la ESPOCH*. Riobamba : ESPOCH, 2017.

**GREBENNIKOV, Andrei.** *RF and Microwave Transistor Oscillator Design*. Wiley, 2007. págs. 391-851.

**KAZIMIERCZUK, Marian.** *RF Power Amplifier*. Wiley, 2014. págs. 65-67.

**Mini-Circuits.** LOW NOISE Monolithic Amplifier PMA-5451+. *Mini Circuits - Global Leader of RF and Microwave Components*. [En línea] 19 de 10 de 2017. [Citado el: 22 de 07 de 2023.] <https://www.minicircuits.com/pdfs/PMA-5451+.pdf>.

**Mini-Circuits.** Monolithic Amplifier PHA-1H+. *Mini Circuits - Global Leader of RF and Microwave Components*. [En línea] 16 de 03 de 2016. [Citado el: 16 de 07 de 2023.] <https://www.minicircuits.com/pdfs/PHA-1H+.pdf>.

**BOŽANIĆ, Mladen; & SINHA, Saurabh.** *Power Amplifiers for the S-, C-, X- and Ku-bands: An EDA Perspective*. Springer International Publishing, 2016. págs. 2-73.

- POZAR, David M.** *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2011. págs. 1-550.
- Ramesh Garg, Inder Bahl, Maurizio Bozzi.** *Microstrip Lines and Slotlines*. Artech House, 2013. págs. 1-189.
- Razavi, Behzad.** *RF Microelectronics*. Prentice Hall, 2011. págs. 475-757.
- Rumpf, Raymond C.** *Improved Formulation of Scattering Matrices for Semi-Analytical Methods That Is Consistent with Convention*. Progress In Electromagnetics Research B, 2011.
- SAJEDIN, Maryam, et al.** *Ultra-Compact mm-Wave Monolithic IC Doherty Power Amplifier for Mobile Handsets*. Electronics, 2021. págs. 1-2.
- Sih-Han Li, et al. 2018.** *Design of a compact GaN MMIC Doherty power amplifier and system level analysis with X-parameters for 5G communications*. Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018. págs. 5676-5684.
- TINJACÁ SOLER, Jonathan Javier.** *DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR DOHERTY CON ETAPA DE PRE-AMPLIFICACION PARA APLICACIONES WiMAX*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2015. pág. 39.
- WONG, Kin-Lu.** *Planar Antennas for Wireless Communications*. Wiley-Interscience, 2003.
- YUK, Kelvin; BRANNER, G.** *Future directions for GaN in 5G and satellite communications*. IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2017. págs. 803-804.



# ANEXOS

## ANEXO A: Hoja de datos del amplificador PHA-1H+



Mini-Circuits

ULTRA HIGH DYNAMIC RANGE

# Monolithic Amplifier

50Ω 0.05 to 6GHz

## PHA-1H+

**THE BIG DEAL**

- Ultra High IP3
- High Pout, P1dB 22 dBm typ. at 2 GHz, 5V
- Low noise figure, 2.2 dB @2 GHz, 5V
- Usable to 4.0V
- Broadband High Dynamic Range without External Matching Components
- May be used as a replacement to WJ AH1<sup>2,3</sup>
- Suitable for low phase noise applications

**APPLICATIONS**

- Base station infrastructure
- Portable Wireless
- CATV & DBS
- MMDS & Wireless LAN
- LTE

**PRODUCT OVERVIEW**

PHA-1H+ (RoHS compliant) is an advanced wideband amplifier fabricated using E-PHEMT technology and offers extremely high dynamic range over a broad frequency range and with low noise figure. In addition, the PHA-1H+, unlike competitive models, has good input and output return loss over a broad frequency range without the need for external matching components and has demonstrated excellent reliability. It has repeatable performance from lot to lot and is enclosed in a SOT-89 package for very good thermal performance.

**KEY FEATURES**

Feature	Advantages
Broad Band: 0.05 to 6.0 GHz	Broadband covering primary wireless communications bands: Cellular, PCS, LTE, WiMAX
Extremely High IP3 Versus DC power Consumption 40.4 dBm typical at 2.4 GHz	The PHA-1H+ matches industry leading IP3 performance relative to device size and power consumption. The combination of the design and E-PHEMT Structure provides enhanced linearity over a broad frequency range as evidenced in the IP3 being typically 20 dB above the P 1dB point. This feature makes this amplifier ideal for use in: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Driver amplifiers for complex waveform up converter paths</li> <li>• Drivers in linearized transmit systems</li> <li>• Secondary amplifiers in ultra High Dynamic range receivers</li> </ul>
No External Matching Components Required	Unlike competing products, Mini-Circuits PHA-1H+ provides input and Output Return Loss of 10-23 dB up to 4 GHz without the need for any external matching components
Low Noise Figure: 2.6dB typ. up to 4 GHz 3.4dB typ. up to 6 GHz	A unique feature of the PHA-1H+ which separates this design from all competitors is the low noise figure performance in combination with the high dynamic range.
Low Junction Temperature Tj=115°C at 85°C lead temperature and 135°C at 105°C lead temperature	Results in excellent reliability.
Low additive phase noise, typically -164 dBc/Hz @10 kHz offset	Ideal for low phase noise synthesizer applications



Generic photo used for illustration purposes only  
CASE STYLE: DF782

+RoHS Compliant

The "+RoHS" identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications.

a. Suitability for model replacement within a particular system must be determined by and is solely the responsibility of the customer based on, among other things, electrical performance criteria, stimulus conditions, application, compatibility with other components and environmental conditions and stresses.

b. The WJ AH1 part number is used for identification and comparison purposes only.



www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. C  
ECO-052286  
PHA-1H+  
TUSIG-CP  
211527

PAGE 1 OF 3



Mini-Circuits

ULTRA HIGH DYNAMIC RANGE

# Monolithic Amplifier

PHA-1H+

## ELECTRICAL SPECIFICATIONS AT 25°C, UNLESS NOTED

Parameter	Condition (GHz)	Vd=5.0V <sup>1</sup>			Units
		Min.	Typ.	Max.	
Frequency range		0.05		6.0	GHz
Gain	0.05	15.9	17.7	19.5	dB
	0.8	14.3	15.9	17.5	
	2.0	—	13.8	—	
	3.0	—	12.1	—	
	4.0	9.8	10.9	12.0	
	6.0	—	9.6	—	
Input return loss	0.05	—	11.9	—	dB
	0.8	13.0	18.2	—	
	2.0	—	12.5	—	
	3.0	—	10.8	—	
	4.0	—	10.3	—	
	6.0	—	8.1	—	
Output return loss	0.05	—	14.2	—	dB
	0.8	13.0	22.9	—	
	2.0	—	19.7	—	
	3.0	—	17.1	—	
	4.0	—	15.5	—	
	6.0	—	13.7	—	
Reverse isolation	2.0	—	19.6	—	dB
Output power @1 dB compression	0.05	20.0	22.1	—	dBm
	0.8	20.0	21.8	—	
	2.0	20.0	22.6	—	
	3.0	—	22.2	—	
	4.0	—	22.5	—	
	6.0	—	22.0	—	
Output IP3	0.05	—	39.6	—	dBm
	0.8	38.0	40.6	—	
	2.0	—	40.4	—	
	3.0	—	40.8	—	
	4.0	—	41.4	—	
	6.0	—	41.0	—	
Noise figure	0.5	—	1.7	—	dB
	1.0	—	1.8	—	
	2.0	—	2.2	—	
	3.0	—	2.4	—	
	4.0	—	2.6	—	
	6.0	—	3.4	—	
Additive Phase Noise	2 GHz, 10 KHz offset	—	-164.1	—	dBc/Hz
Device operating voltage		4.8	5.0	5.2	V
Device operating current		—	132	165	mA
Device current variation vs. temperature <sup>2</sup>		—	101	—	µA/°C
Device current variation vs voltage		—	0.057	—	mA/mV
Thermal resistance, junction-to-ground lead at 88°C		—	36.1	—	°C/W

1. Measured on Mini-Circuits characterization test board TB-313. See characterization test circuit (Fig. 1)  
 2. |Current at 85°C - Current at -45°C|/130





Mini-Circuits

ULTRA HIGH DYNAMIC RANGE

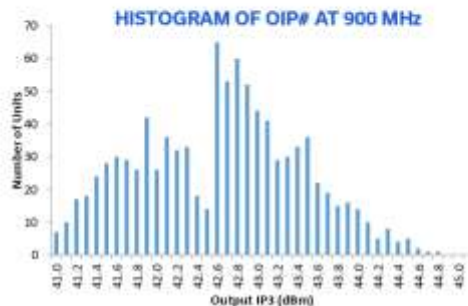
# Monolithic Amplifier

## PHA-1H+

### MAXIMUM RATINGS<sup>3</sup>

Parameter	Ratings
Operating temperature (ground lead)	-40°C to 105°C
Storage temperature	-65°C to 150°C
Operating current at 5V	210 mA
Power dissipation	1 W
Input power (CW)	24 dBm
DC voltage on Pin 3	6 V

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded. Electrical maximum ratings are not intended for continuous normal operation.



### SIMPLIFIED SCHEMATIC AND PIN DESCRIPTION



Function	Pin Number	Description
RF IN	1	RF input pin. This pin requires the use of an external DC blocking capacitor chosen for the frequency of operation.
RF-OUT and DC-IN	3	RF output and bias pin. DC voltage is present on this pin; therefore a DC blocking capacitor is necessary for proper operation. An RF choke is needed to feed DC bias without loss of RF signal due to the bias connection, as shown in "Recommended Application Circuit", Fig. 2
GND	2,4	Connections to ground. Use via holes as shown in "Suggested Layout for PCB Design" to reduce ground path inductance for best performance.

a. Suitability for model replacement within a particular system must be determined by and is solely the responsibility of the customer based on, among other things, electrical performance criteria, stimulus conditions, application, compatibility with other components and environmental conditions and stresses.  
b. The WJ AH1 part number is used for identification and comparison purposes only.

### CHARACTERIZATION TEST CIRCUIT

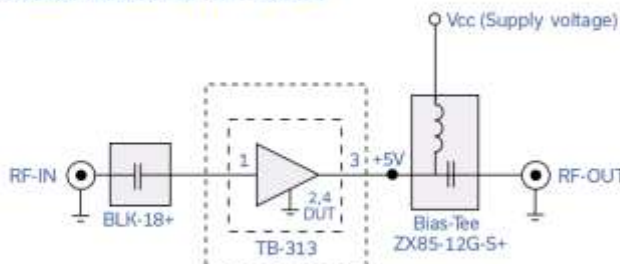



Fig.1. Block Diagram of Test Circuit used for characterization. (DUT soldered on Mini-Circuits Characterization test board TB-313)

Gain, Return loss, Output power at 1dB compression (P1 dB), output IP3 (OIP3) and noise figure measured using Agilent's N5242A PNA-X microwave network analyzer.

Conditions:  
1. Gain and Return loss: Pin- -25dBm  
2. Output IP3 (OIP3): Two tones, spaced 1 MHz apart, 5 dBm/1tone at output.



## ANEXO B: Hoja de datos del amplificador PMA-5451+



Mini-Circuits

LOW NOISE, HIGH IP3

# Monolithic Amplifier

50Ω    0.05 to 6 GHz

## PMA-5451+

**THE BIG DEAL**

- Single Positive Supply Voltage, 3V, Id=30mA
- Ultra Low Noise Figure, 0.6 dB typ. at 0.5GHz
- High IP3, +29 dBm typ. 1GHz
- Gain, 19dB typ. at 1 GHz
- Output Power, up to +17dBm typ.
- Micro-miniature size, 3mm x 3mm
- Aqueous washable

**APPLICATIONS**

- Cellular
- ISM
- GSM
- WCDMA
- LTE
- WiMAX
- WLAN
- UHF and HIPERLAN


**PRODUCT OVERVIEW**

Mini-Circuits PMA-5451+ is a E-PHEMT\* based Ultra-Low Noise MMIC Amplifier operating from 50 MHz to 6 GHz with a unique combination of low noise and high IP3 making this amplifier ideal for sensitive receiver applications. This design operates on a single +3V supply at only 30mA and is internally matched to 50 Ohms.

**KEY FEATURES**

Feature	Advantages
Ultra Low Noise, 0.6 dB	Outstanding Noise Figure, measured in a 50 Ohm environment without any external matching
High IP3, +29 dBm	Combining Low Noise and High IP3 makes this MMIC amplifier ideal for Low Noise Receiver Front End (RFE) because it gives the user advantages at both ends of the dynamic range: sensitivity & two-tone spur-free dynamic range
Low Current, 30mA	At only 30mA, the PMA-5451+ is ideal for remote applications with limited available power or densely packed applications where thermal management is critical
Broad Band	Operating over a broadband the PMA-5451+ covers the primary wireless communications bands: Cellular, PCS, LTE, WiMAX
Internally Matched	No external matching elements required to achieve the advertised noise and output power over the full band
MCLP Package	Low Inductance, repeatable transitions, excellent thermal pad
Max Input Power, +20dBm	Ruggedized design operates up to input powers of +20dBm without the need of an external limiter
High Reliability	Low, small signal operating current of 30 mA nominal maintains junction temperatures typically below 100°C at 85°C ground lead temperature


\*Enhancement mode Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor.



Generic photo used for illustration purposes only

**CASE STYLE: DQ849**

+RoHS Compliant  
The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications



www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

REV. C  
ECC-012311  
PMA-5451+  
THRU-CP  
210517

PAGE 1 OF 1





Mini-Circuits

LOW NOISE, HIGH IP3

# Monolithic Amplifier

## PMA-5451+

### ELECTRICAL SPECIFICATIONS<sup>(1)</sup> AT 25°C, Z0=50Ω, (REFER TO CHARACTERIZATION CIRCUIT, FIG. 1)

Parameter	Condition (GHz)	Min.	Typ.	Max.	Units
Frequency Range		0.05		6.0	GHz
DC Voltage (V <sub>b</sub> )			3.0		V
DC Current (I <sub>b</sub> ) <sup>(6)</sup>		20	30	40	mA
DC Current (I <sub>bmax</sub> )			1.6		mA
Noise Figure	0.05		1.3	1.3	dB
	0.5		0.6		
	1.0		0.8		
	2.0		1.0		
	3.0		1.3		
	4.0		1.5		
	5.0		2.0		
Gain	0.05	12.3	24.2	15.1	dB
	0.5		22.1		
	1.0		18.6		
	2.0		13.7		
	3.0		10.6		
	4.0		8.5		
	5.0		6.7		
Input Return Loss	0.05-0.5		8.8		dB
	0.5-6		6.5		
Output Return Loss	0.05-0.1		14.0		dB
	0.1-6		19.0		
Output Power @ 1 dB compression <sup>(7)</sup>	0.05		27.3		dB
	0.5		27.9		
	1.0		29.0		
	2.0		30.8		
	3.0		31.4		
	4.0		30.8		
	5.0		31.8		
6.0		32.2			
DC Current Variation vs. Temperature <sup>(8)</sup>			-0.030		mA/°C
Thermal Resistance			128		°C/W

### MAXIMUM RATINGS<sup>(4)</sup>

Parameter	Ratings
Operating Temperature <sup>(5)</sup>	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Channel Temperature	150°C
DC Voltage <sup>(6)(9)</sup>	5V
Power Dissipation	500mW
DC Current <sup>(6)(9)</sup>	80mA
Bias Current <sup>(6)(9)</sup>	10mA
Input Power <sup>(7)</sup>	+20dBm

<sup>5</sup> Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded. Electrical maximum ratings are not intended for continuous normal operation.

(1) Measured on Mini-Circuits Characterization test board TB-502+ See Characterization Test Circuit (Fig. 1)

(2) P1dB specified with external current limiting of 40mA. Capable of higher P1dB at higher current (see Fig. 2)

(3) Current at 85°C - Current at -45°C/1.30

(4) Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

These maximum ratings are not intended for continuous normal operation.

(5) Defined with reference to ground pad temperature.

(6) Specified DC current consumption is under small signal conditions.

Current will increase with input RF Power. To maintain maximum current consumption, external DC current limiting circuits are required on Vd line.

(7) Maximum input power is specified based upon external Vd current limiting of 60mA. Maximum input power will degrade without external current limiting.

\* Enhancement mode Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor.





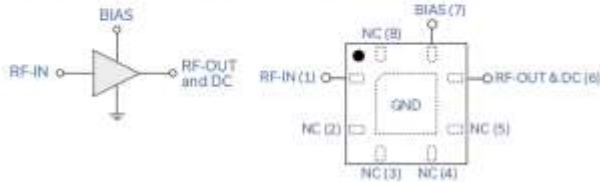
LOW NOISE, HIGH IP3

# Monolithic Amplifier

PMA-5451+

Mini-Circuits

## SIMPLIFIED SCHEMATIC AND PAD DESCRIPTION



Function	Pad Number	Description (See Figure 2)
RF-IN	1	RF input pad
RF-OUT & DC	6	RF output pad (connected to RF-OUT via blocking external cap C2, and Supply voltage Vs via RF Choke L1)
BIAS	7	Bias pad (connected to Vs via Rbias)
GND	pad in center of bottom	Connected to ground
NOT USED	2,3,4,5,8	No internal connection; recommended use: per PCB Layout PL-299

## CHARACTERIZATION TEST CIRCUIT

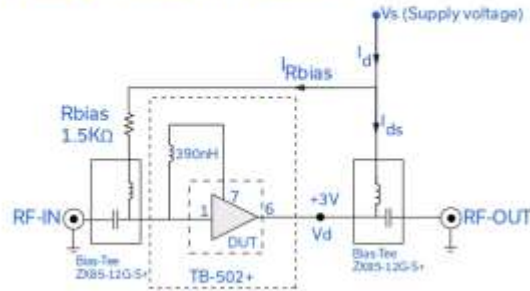


Fig 1. Block Diagram of Test Circuit used for characterization. (DUT soldered on Mini-Circuits Characterization Test Board TB-502+) Gain, Output power at 1dB compression (P1dB), Output IP3 (OIP3) and Noise Figure measured using Agilent's N5242A PNA-X Microwave network analyzer.

Conditions:

1. Gain: Pin=-25 dBm
2. Output IP3 (OIP3): Two tones, spaced 1 MHz apart, 5 dBm/tone at output.
3. Vs adjusted for 3V at device (Vd), compensating loss of bias tee.

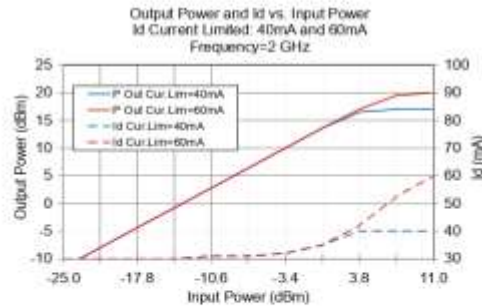
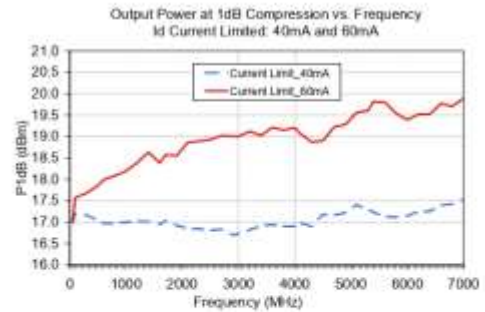


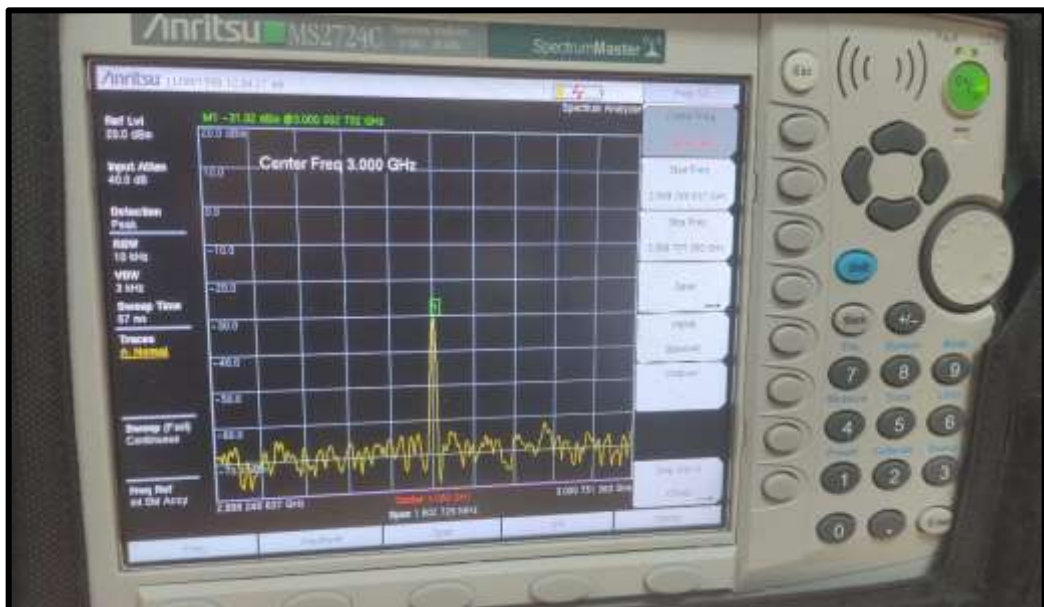
Fig 2. Output Power and Id vs. Input Power and Frequency. Performance measured on Mini-Circuits Characterization test board TB-502+. See Characterization Test Circuit (Fig. 1). Measurements performed with current (Id) limited as noted.



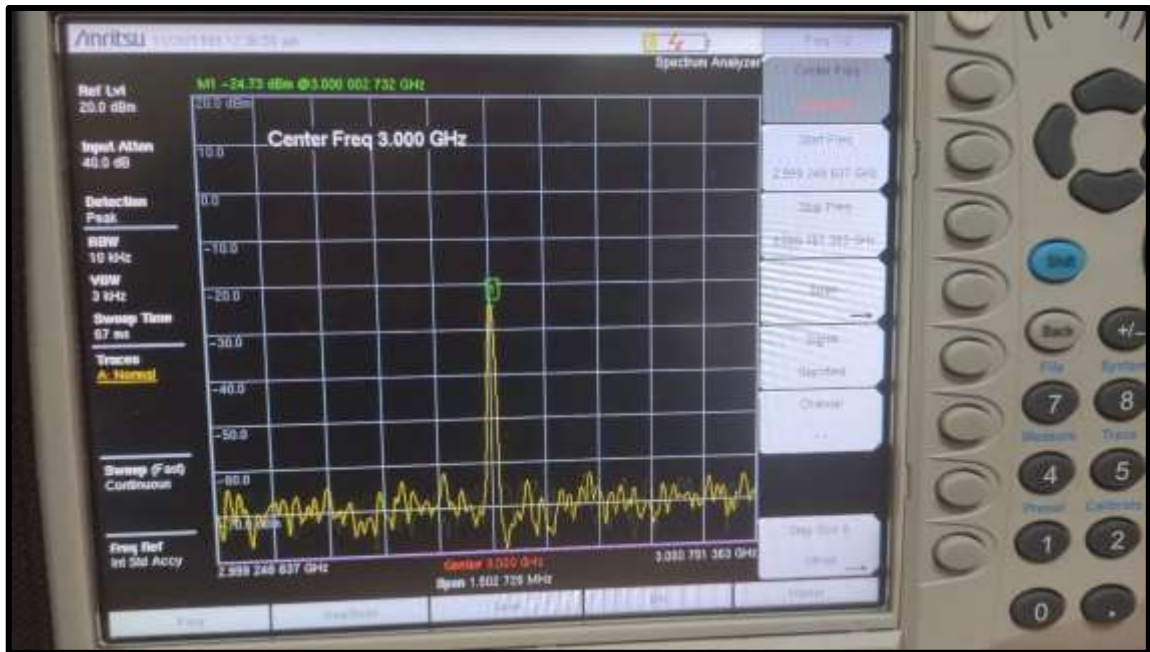
## ANEXO C: Transmisión de la señal



## ANEXO D: Recepción de la señal antes de ser amplificada



ANEXO E: Recepción de la señal luego de ser amplificada



**ANEXO F:** Potencias recibidas del amplificador PHA-1H+

Frecuencia (GHz)	Potencia Recibida (dBm)
0,05	-51,9
0,2	-32,85
0,4	-31,96
0,6	-30,34
0,8	-37,8
1	-33,28
1,2	-26,82
1,4	-20,43
1,6	-15,29
1,8	-17,69
2	-22,64
2,2	-20,11
2,4	-18,69
2,6	-16,7
2,8	-15,01
3	-20,18
3,2	-29,15
3,4	-22,63
3,6	-29,88
3,8	-28,91
4	-31,88
4,2	-33,11
4,4	-28,87
4,6	-27,07
4,8	-27,32
5	-31,54
5,2	-31,17
5,4	-17,94
5,6	-18,82
5,8	-17,39
6	-22,58

**ANEXO G: Potencias recibidas del amplificador PMA-5451+**

<b>Frecuencia (GHz)</b>	<b>Potencia Recibida (dBm)</b>
0,05	-56,01
0,2	-37,23
0,4	-37,17
0,6	-32,92
0,8	-36,23
1	-37,95
1,2	-29,72
1,4	-21,89
1,6	-16,59
1,8	-18,69
2	-24,14
2,2	-22,4
2,4	-21,03
2,6	-19,21
2,8	-17,04
3	-21,62
3,2	-30,66
3,4	-24,55
3,6	-31,85
3,8	-30,87
4	-33,72
4,2	-34,96
4,4	-30,69
4,6	-28,93
4,8	-28,56
5	-32,69
5,2	-32,32
5,4	-19,36
5,6	-20,02
5,8	-18,85
6	-23,82

**ANEXO H:** Resultados de ganancias del amplificador PHA-1H+

Frecuencia (GHz)	Ganancia (dBm)
0,05	18,31
0,2	17,11
0,4	16,44
0,6	15,15
0,8	10,25
1	12,01
1,2	9,89
1,4	8,33
1,6	8,02
1,8	7,55
2	7,88
2,2	8,66
2,4	8,45
2,6	8,21
2,8	8,03
3	7,59
3,2	7,42
3,4	7,79
3,6	7,61
3,8	7,52
4	7,28
4,2	7,25
4,4	7,2
4,6	7,18
4,8	6,45
5	6,22
5,2	6,26
5,4	6,25
5,6	6,09
5,8	6,05
6	5,81

**ANEXO I:** Resultados de ganancias del amplificador PMA-5451+

Frecuencia (GHz)	Ganancia (dBm)
0,05	14,2
0,2	12,73
0,4	11,23
0,6	12,57
0,8	11,82
1	7,34
1,2	6,99
1,4	6,87
1,6	6,72
1,8	6,55
2	6,38
2,2	6,37
2,4	6,11
2,6	5,7
2,8	5,99
3	6,15
3,2	5,91
3,4	5,87
3,6	5,64
3,8	5,56
4	5,44
4,2	5,4
4,4	5,38
4,6	5,32
4,8	5,21
5	5,07
5,2	5,11
5,4	4,83
5,6	4,89
5,8	4,59
6	4,57





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL  
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS  
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 10/ 10 / 2023

<b>INFORMACIÓN DE LOS AUTORES</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Luis Daniel Mariño Gómez
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Facultad de Informática y Electrónica
<b>Carrera:</b> Telecomunicaciones
<b>Título a optar:</b> Ingeniero en Electrónica en Telecomunicaciones y Redes
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Fernanda Arévalo M. 