



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

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA ACTIVA EN
LA BANDA DE 28 GHZ PARA LA TECNOLOGIA 5G**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORA:

VIVIANA MICAELA GUANGA CUADRADO

Riobamba – Ecuador

2024



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

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA ACTIVA EN
LA BANDA DE 28 GHZ PARA LA TECNOLOGIA 5G**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORA: VIVIANA MICAELA GUANGA CUADRADO

DIRECTOR: ING. HUGO OSWALDO MORENO AVILES, PHD.

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, **Viviana Micaela Guanga Cuadrado**

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, Viviana Micaela Guanga Cuadrado, 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 autora 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, 01 de mayo de 2024

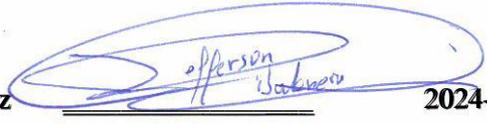
A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized loops and the name 'VIVIANA GUANGA' written in capital letters.

Viviana Micaela Guanga Cuadrado

060404033-7

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRONICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA ACTIVA EN LA BANDA DE 28 GHZ PARA LA TECNOLOGIA 5G**, realizado por la señorita: **VIVIANA MICAELA GUANGA CUADRADO**, 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.

	FIRMA	FECHA
Ing. Pedro Severo Infante Moreira PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2024-05-01
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2024-05-01
Ing. Jefferson Alexander Ribadeneira Ramírez ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2024-05-01

DEDICATORIA

Con profunda gratitud y todo mi amor, esta tesis le dedico a mis queridos padres Vicente Guanga y Manuela Cuadrado, que me han enseñado el valor del esfuerzo, perseverancia y amor incondicional. A mis hermanas Paola y Mónica, cómplices inseparables y pilar fundamental de mi vida. A ellos, que han sacrificado tanto, brindándome la fuerza para perseguir mis sueños y la sabiduría para superar cada obstáculo. Y especialmente le dedico esta tesis a mi sobrino Gareth, en tus ojos veo el reflejo del futuro, un recordatorio constante de que cada esfuerzo hoy sembrado florecerá en un mañana lleno de promesas y posibilidades. Este logro es tanto vuestro como mío, una celebración de nuestro viaje compartido, tejido con hilos de amor, sacrificio y alegría. Gracias por creer en mí, por vuestra paciencia infinita y por enseñarme el verdadero significado de la resiliencia y el amor.

Viviana

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme con unos padres y hermanas tan maravillosos, que han sido mi inspiración y mi apoyo a lo largo de esta travesía académica. Vuestra dedicación inquebrantable, amor infinito y sacrificio desinteresado han sido la fuerza motriz detrás de cada logro que he alcanzado. Cada desafío superado, ha sido posible gracias a vuestra guía sabia y vuestro apoyo constante. También quiero extender mi gratitud al Ing. Hugo Moreno, por su compromiso con mi crecimiento académico y profesional, por las lecciones aprendidas y los consejos compartidos. A mis amigos y compañeros de carrera, que han sido parte de mi vida, y han dejado una huella duradera, en especial a Jhonnatan y Sebastián, gracias por compartir este viaje conmigo, por ser una parte importante en mi vida, a través de los desafíos y triunfos, hemos crecido juntos y hemos creado recuerdos que atesoraré para siempre. Este logro no es solo mío; es el resultado del amor, y el apoyo inquebrantable de todos ustedes, agradezco este logro a cada persona que ha dejado una huella imborrable en mi corazón y ha contribuido a mi éxito en este viaje llamado educación.

Viviana

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
RESUMEN.....	xv
SUMMARY / ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.1.1 <i>Antecedentes</i>	2
1.1.2 <i>Formulación del Problema</i>	3
1.2 Justificación	3
1.2.1 <i>Justificación Teórica</i>	3
1.2.2 <i>Justificación Aplicativa</i>	4
1.2.3 <i>Objetivo General</i>	5
1.2.4 <i>Objetivos Específicos</i>	5
CAPÍTULO II	6
2. MARCO TEORICO	6
2.1 Redes de Quinta Generación	6
2.1.1 <i>Aspectos de la Tecnología 5G</i>	6
2.1.2 <i>Requerimientos Tecnológicos para 5G</i>	7
2.1.3 <i>Espectro 5G</i>	7
2.1.4 <i>Rango de Frecuencias para 5G</i>	8

2.2	Parámetros Fundamentales de las Antenas	9
2.2.1	<i>Intensidad de Radiación</i>	9
2.2.2	<i>Patrón de Radiación</i>	10
2.2.3	<i>Ancho de Banda</i>	11
2.2.4	<i>Ganancia</i>	11
2.3	Antenas 5G	12
2.3.1	<i>Tipos de Antenas 5G</i>	12
2.3.1.1	<i>Antenas pasivas</i>	12
2.3.1.2	<i>Antena en fase</i>	12
2.3.1.3	<i>Antenas activas</i>	13
2.3.2	<i>Antenas Bow-Tie</i>	13
2.3.2.1	<i>Estructura de las Antenas Bow – Tie</i>	13
2.4	Amplificadores	14
2.4.1	<i>Amplificadores de Alta Potencia</i>	14
2.4.2	<i>Amplificadores de Bajo Ruido</i>	15
2.5	Software HFSS (High-Frequency Structure Simulator)	15
2.6	Equipos de mediciones para antenas 5G	16
2.6.1	<i>Generador de señales Anritsu MG3690C</i>	16
2.6.2	<i>Network Analyzer Keysight E5071C</i>	16
2.6.3	<i>Analizador de Espectros Anritsu MS2724C</i>	17
2.6.4	<i>Circuito Elevador de Frecuencias</i>	18
CAPÍTULO III		20
3.	MARCO METODOLÓGICO	20
3.1	Introducción	20
3.2	Definición parámetros de diseño de la Antena Bow-Tie	21
3.2.1	<i>Sustrato ROGERS</i>	21
3.2.1.1	<i>ROGER RT/Duroid 4003C</i>	21

3.2.1.2	<i>ROGERS CERAMIC LAMINATE 4003</i>	22
3.2.2	<i>Diseño Elipses</i>	22
3.2.3	<i>Diseño Transformador Cuarto de Onda</i>	26
3.2.4	<i>Diseño de la Línea de transmisión de 50 ohm</i>	27
3.2.5	<i>Antena definitiva en fase de desarrollo</i>	29
3.3	Simulación	30
3.3.1	<i>ROGER RT/4003C</i>	31
3.3.2	<i>ROGERS CERAMIC LAMINATE 4003</i>	31
3.4	Diseño de Amplificador	32
3.4.1	<i>Esquema circuito</i>	32
3.4.2	<i>Dispositivos electrónicos que se emplearán</i>	33
3.4.2.1	<i>Amplificador PMA3-313GLN+</i>	33
3.4.2.2	<i>Resistores de película gruesa - SMD 18 ohm</i>	34
3.4.2.3	<i>Capacitores de 5pF y 0.1uF</i>	34
3.5	Diseño del Circuito Elevador de Frecuencia e Reductor de Frecuencia	35
3.5.1	<i>Esquema del Circuito Elevador de Frecuencia e Reductor de Frecuencia</i>	35
3.5.2	<i>Dispositivos electrónicos que se emplearán</i>	38
3.5.2.1	<i>HMC509LP5- Osciladores VCO 7.8 - 8.8 GHz</i>	38
3.5.2.2	<i>Mezclador doble equilibrado- MDB-54H+</i>	39
3.5.2.3	<i>Filtro pasa bajo - LFCN-2852+</i>	40
3.6	Diseño Placa PCB del amplificador y elevador de frecuencia	40
3.6.1	<i>Creación pistas para ensamblado final</i>	40
3.6.2	<i>Diseño Final placas PBC</i>	41
3.7	Implementación	42
3.7.1	<i>Implementación esquema final</i>	42
3.7.2	<i>Implementación Antena</i>	46
CAPÍTULO IV		48

4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	48
4.1	Analisis y Resultados Prueba 1.....	48
4.1.1	<i>Esquema del Escenario</i>	48
4.1.2	<i>Resultados Prueba 1</i>	49
4.2	Analisis y Resultados Prueba 2.....	52
4.2.1	<i>Esquema del Escenario</i>	52
4.2.2	<i>Resultados Prueba 4.....</i>	52
	CAPÍTULO V.....	55
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
5.1	CONCLUSIONES	55
5.2	RECOMENDACIONES	57

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Características del ROGER RT/4003C	22
Tabla 3-2: Características ROGERS CERAMIC LAMINATE 4003	22
Tabla 3-3 : Dimensiones Teóricas y Optimizadas de las elipses	25
Tabla 3-4: Dimensiones Teóricas y Optimizadas de la Antena Final	30

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Banda de Frecuencia para 28 GHz.....	9
Ilustración 2-2: Diagrama del patron de radiación	11
Ilustración 2-3: Estructura antena Bow-tie.....	13
Ilustración 2-4: Estructura esquemática de una antena Bow-Tie	14
Ilustración 2-5: Logo HFSS	15
Ilustración 2-6: Generador de señales Anritsu MG390C	16
Ilustración 2-7: Network Analyzer Keysight E5071C	17
Ilustración 2-8: Analizador de Espectro Anritsu MS2724C.....	17
Ilustración 3-1: Diagrama del Sistema Radiante	20
Ilustración 3-2: Diseño Elipse a 28 GHz.....	24
Ilustración 3-3: Diseño Elipse a 28 GHz.....	25
Ilustración 3-4: Diseño Transformador cuarto de onda.....	27
Ilustración 3-5: Diseño Línea de Transmisión 50 Ohm.....	29
Ilustración 3-6: Prototipo Antena Bow-Tie.....	29
Ilustración 3-7: Diseño final de la antena en 2D y 3D en el software de diseño de antenas	30
Ilustración 3-8: Resultado del Coeficiente de reflexión (S11) con la utilización del sustrato RT /Duroid 4003C para el diseño de la antena Bow-tie.....	31
Ilustración 3-9: Coeficiente de reflexión (S11) con la utilización del sustrato Rogers Ceramic Laminate 4003 para el diseño de la antena Bow-tie.....	32
Ilustración 3-10: Diagrama propuesto por el fabricante.....	33
Ilustración 3-11: Amplificador PMA3-313GLN+.....	33
Ilustración 3-12: Resistencias de 18 Ohm.....	34
Ilustración 3-13: Capacitores Cerámicos	34
Ilustración 3-14: Esquema del elevador de frecuencia en el transmisor	35
Ilustración 3-15: Esquema del reductor de Frecuencia para el receptor.....	36
Ilustración 3-16: Esquema Final del elevador de frecuencia para el transmisor	37
Ilustración 3-17: Esquema Final del reductor de frecuencia para el receptor	38
Ilustración 3-18: Esquema del HMC509LP5- Osciladores VCO 7.8 - 8.8 GHz.....	39
Ilustración 3-19: Esquema del Mezclador doble MDB-54H+	39
Ilustración 3-20: Filtro pasa bajo – LFCN-2852+.....	40
Ilustración 3-21: Placa PCB del circuito elevador de frecuencia para el transmisor.....	41
Ilustración 3-22: Placa PCB del circuito reductor de frecuencia para el receptor.....	42
Ilustración 3-23: Placas Implementadas en el sustrato FR4.....	43
Ilustración 3-24: Proceso de soldado, utilizando una lupa de aumento de las placas PCB	43

Ilustración 3-25: Placas implementadas del circuito elevador de frecuencia y el circuito reductor de frecuencia para el receptor.....	44
Ilustración 3-26: Implementación del circuito elevador de frecuencia	45
Ilustración 3-27: Implementación del circuito reductor de frecuencia.....	45
Ilustración 3-28: Materiales para la implementación de la Antena Bow-tie	46
Ilustración 3-29: Proceso de la implementación de la Antena Bow-tie, mediante la técnica del planchado	47
Ilustración 3-30: Implementación final de las Antenas Bow-tie	47
Ilustración 4-1: Esquema del primer escenario para la medición del parámetro S11 de la antena Bow-tie una vez implementada	48
Ilustración 4-2: Verificación del funcionamiento de la Antena bow-tie en el VNA	49
Ilustración 4-3: Resultados obtenidos del parámetro S11 en el software de diseño de la antena bow-tie	50
Ilustración 4-4: Resultados obtenidos de la antena bow-tie del parámetro S11 en el Analizador de Redes Vectoriales (VNA).....	50
Ilustración 4-5: Resultados obtenidos del Simulador vs los resultados obtenidos por el VNA, del parámetro S11, de la antena bow-tie, implementada y simulada	51
Ilustración 4-6: Esquema del cuarto escenario para la medición del patrón radiación en función de la potencia, de la antena Bow-tie en la banda de 28GHz	52
Ilustración 4-7: Utilización del generador de señales, analizador de Espectros MS2724C y fuente de poder para las mediciones de la antena Bow-tie en la banda de 28GHz	53
Ilustración 4-8: Resultado del patrón radiación en función de la potencia, de la antena Bow-tie en la banda de 28 GHz, mediante el software de diseño	53
Ilustración 4-9: Resultado del patrón radiación en función de la potencia, de la antena Bow-tie en la banda de 28GHz, mediante el analizador de Espectros MS2724C.....	54

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: DATASHEET MONOLITHIC AMPLIFIER PMA3-313GLN+

ANEXO B: DATASHEET CAPACITOR 5 pF

ANEXO C: DATASHEET CAPACITOR 0.1uF

ANEXO D: HMC509LP5- OSCILADORES VCO 7.8 - 8.8 GHZ

ANEXO E: MEZCLADOR DOBLE EQUILIBRADO- MDB-54H+

ANEXO F: FILTRO PASA BAJO - LFCN-2852+

ANEXO G: GENERADOR DE SEÑALES MG3690C.

ANEXO H: SOLDADURA DE PUERTOS PARA LAS ANTENAS.

ANEXO I: PRUEBA FUNCIONAMIENTO DE LAS ANTENAS EN EL VNA.

ANEXO J: PRUEBAS DE PATRON DE RADICACION

ANEXO K: ESCENARIOS ARMADOS PARA LAS RESPECTIVAS PRUEBAS.

RESUMEN

En Ecuador, la ausencia de antenas adaptadas a 28 GHz limita significativamente el despliegue y la plena utilización de los beneficios de la red 5G. Esta banda es fundamental para soportar aplicaciones de alta velocidad, baja latencia y gran capacidad de conexión, características clave del 5G. Por lo tanto, el objetivo del presente Trabajo de Titulación aborda el diseño e implementación de una antena activa para la tecnología 5G, en la banda de 28 GHz. La metodología incluye el diseño de una antena Bow-tie modificada mediante elipses, un transformador Cuarto de Onda y una línea de transmisión de 50 ohmios útiles para la adaptación de impedancias, y la implementación mediante el sustrato ROGER RT/4003C debido a su respuesta en frecuencia y su rendimiento confiable en diferentes condiciones ambientales. Para las mediciones en la banda de 28 GHz, se utilizó el generador de señales Anritsu-MG3690C que trabajan hasta 20 GHz, un circuito elevador de frecuencia capaz de incrementar la frecuencia a 28 GHz enviando la señal desde la antena transmisora pasando el espacio hacia la antena receptora, y un circuito reductor de frecuencia este reduce la frecuencia a 20 GHz, y con esto realizar las mediciones mediante el analizador de espectros Anritsu-MS2724C. Mediante esta metodología, se obtiene un patrón de radiación directivo a un ángulo de 0° con una potencia de -60 dB, y en la parte posterior con 3 lóbulos secundarios, con una potencia de -64 dB, en función de la potencia. La elaboración de la antena bow-tie activa modificada mediante elipses resuelve la necesidad crítica de una cobertura precisa y eficiente, garantizando una entrega rápida de datos en aplicaciones de alta velocidad, además reduce latencia y maximiza el rendimiento del sistema 5G, ofreciendo una conectividad sólida en entornos urbanos densos y áreas de alta demanda de datos.

Palabras clave: <BANDA 28GHZ> <ANTENAS ACTIVAS> <ANTENA BOW-TIE>
<PATRÓN DE RADIACIÓN> <ELEVADOR DE FRECUENCIA>.

0402-DBRA-UPT-2024



SUMMARY

In Ecuador, the lack of antennas adapted to 28 GHz significantly limits the deployment and usefulness of the benefits of 5G network technology. This frequency band is crucial for supporting high-speed applications, low latency, and large connection capacities, which are key characteristics of 5G. Therefore, the objective of this thesis Work addresses the design and implementation of an active antenna for 5G technology in the 28 GHz band. The methodology includes the design of a modified Bow-tie antenna using ellipses, a Quarter-Wave Transformer, and a 50-ohm transmission line useful for impedance matching, and the implementation using the ROGER RT/4003C substrate due to its frequency response and reliable performance under various environmental conditions. For measurements in the 28 GHz band, the Anritsu-MG3690C signal generator, which operates up to 20 GHz, along with a frequency upconverter capable of increasing the frequency to 28 GHz by sending the signal from the transmitting antenna through space to the receiving antenna, and a frequency downconverter that reduces the frequency to 20 GHz, allowing measurements using the Anritsu-MS2724C spectrum analyzer. Through this methodology, a directive radiation pattern at a 0° angle with a power of -60 dB is obtained, and at the rear, with three secondary lobes, with a power of -64 dB, in terms of power. The development of the modified elliptical bow-tie active antenna resolves the critical need for precise and efficient coverage, ensuring rapid data delivery in high-speed applications, reducing latency, and maximizing the performance of the 5G system, thus offering solid connectivity in densely populated urban environments and areas with high data demand.

KEYWORDS: <BANDA 28GHZ> <ACTIVE ANTENNAS> <BOW-TIE ANTENNA>
<RADIATION PATTERN> <FREQUENCY UP-CONVERTER>.


Lic. Maritza Larrea Mg.
0603370784

INTRODUCCIÓN

La tecnología 5G se está expandiendo globalmente a un ritmo acelerado, con la disponibilidad comercial aproximadamente a 70 países en el 2022, según un informe de la Asociación Global de Proveedores Móviles. Algunos pronósticos recientes sugieren que se podría superar los mil millones de usuarios para el 2022, alcanzando esta cifra en solo 3,5 años desde su lanzamiento, en comparación con los 4 años de la tecnología 4G y los 12 años de la tecnología 3G (PASQUALLI, 2022). Este avance en las comunicaciones requiere una implementación a gran escala para que su funcionamiento sea más eficaz, dado las grandes innovaciones que se presentan en las comunicaciones, como la tecnología 5G.

Para introducir esta nueva tecnología es necesario desarrollar nuevos dispositivos capaces de operar con los estándares que operarán los sistemas de comunicación de última generación para el desarrollo de esta tecnología. En el desarrollo de esta nueva tecnología, es en el que la antena cobra mucha importancia, ya que es un dispositivo capaz de operar a una alta frecuencia de trabajo, un ancho de banda y una ganancia, ya que es un elemento importante para la emisión y recepción de información (SALAZAR RAMÍREZ, 2017).

Por tal motivo, en este trabajo se analiza, diseña e implementa una antena activa tipo Bow-Tie en la banda de 28 GHz para la tecnología 5G debido a que posee una banda ancha es decir cubre una amplia gama de frecuencias. Esta banda representa una ventaja para dispositivos portátiles, por el tamaño de las antenas. Con la implementación de las antenas activas se aumenta la eficiencia y la calidad de los sistemas inalámbricos, este tipo de antenas consiste en la integración total de un elemento radiante y un elemento activo, de manera que se reducen las pérdidas entre ellos. El elemento radiante cumple una doble función, ya que sirve de impedancia de o de impedancia de fuente al elemento activo (CASTRO GALÁN, 2014).

En resumen, esta tesis busca contribuir, al avance en el diseño e implementación de antenas activas para la tecnología 5G, mediante análisis e implementación prácticas, proporcionando una solución innovadora, y eficiente, para la demanda actual que presenta las comunicaciones, para la conectividad inalámbricas en frecuencias milimétricas y de banda ancha.

CAPÍTULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Antecedentes

En los últimos años, la tecnología 5G se ha extendido rápidamente por todo el mundo. Las tecnologías móviles de quinta generación estuvieron disponibles comercialmente en unos 70 países aproximadamente desde junio del 2022, frente a 38 países a mediados de 2020, según un informe publicado por la Asociación Mundial de Proveedores de Móviles (GSA). La mayoría de las predicciones apuntaban a que la tecnología 5G podría alcanzar los mil millones de usuarios en 2022, sólo 3,5 años después de su entrada en el mercado, frente a los cuatro años de la 4G y los 12 años de la 3G (PASQUALLI, 2022).

Una implementación importante en la banda de los 28 GHz para la tecnología 5G, fue el diseño e implementación de un parche Microstrip circular a la frecuencia de 28 GHz y 45 GHz, este parche fue implementado en Rogers Sustrato RT5880 con una constante dieléctrica de 2,2 y una tangente de pérdida ($\tan \delta$) de 0,0013, con un ancho de banda es de 1 GHz (SOHAIL, 2019). En el año 2017, la Universidad Central de Cuba “MARTA ABREU” se diseñó una antena parche con insert feed, para una frecuencia de 28 GHz, con una directividad de 18,10 dBi, una ganancia de 16,57 dB y un ancho de banda de 1 GHz (REICINIO PRIETO, 2017).

En el Ecuador en el 2022, se planteó el diseño de una antena plana alimentada con una línea microstrip en las bandas milimétricas para 5G utilizando el software simulador CST Studio Suite, a una frecuencia de 45 GHz, la estructura fue diseñada sobre un sustrato de constante dieléctrica de 2,2 (CISNEROS QUISHPE, 2022).

Con estos antecedentes, se puede decir que en nuestro país aún no existe la implementación de antenas de 28 GHz para la tecnología 5G, lo que se busca con este diseño e implementación es poder mejorar las características de estas antenas como su ganancia y ancho de banda a dicha frecuencia, para que se puedan adaptar a la tecnología 5G, para las aplicaciones como es el caso de: realidad virtual, comunicación de ciudades inteligentes, servicios médicos y militares a distancia, etc.

1.1.2 Formulación del Problema

¿Como diseñar e implementar una antena activa en la banda de los 28Ghz para la tecnología 5G?

1.2 Justificación

1.2.1 Justificación Teórica

En el ámbito de las telecomunicaciones, actualmente se observa una sucesión constante de avances y novedades en intervalos breves de tiempo. Este acontecimiento aparece con la aparición de la tecnología de comunicación denominada 5G. Dado su carácter innovador, aparece la necesidad de diseñar e implementar a gran escala esta tecnología para garantizar su funcionamiento óptimo (FUENTES FERNÁNDEZ, 2020).

La implementación de esta innovadora tecnología demanda la creación de dispositivos avanzados capaces de operar con los estándares que regirán los sistemas de comunicación de última generación vinculados a dicha tecnología. En este proceso de desarrollo, la antena adquiere una relevancia significativa, al desempeñar un papel importante como dispositivo operativo a elevadas frecuencias, con un amplio ancho de banda y una ganancia significativa, aspectos fundamentales para la eficiente transmisión y recepción de información. (FUENTES FERNÁNDEZ, 2020)

Por este motivo, en el presente estudio se llevará a cabo el diseño e implementación de una antena tipo Bow-Tie modificada destinada a operar en la banda de frecuencia de 28 GHz. Esta antena, en particular se caracteriza por su ancho de banda considerable, abarcando una extensa gama de frecuencias. La banda de 28 GHz ha sido previamente empleada en aplicaciones de sistemas punto a punto y punto multipunto, donde se dispone de componentes como amplificadores y dispositivos receptores o transmisores comerciales adaptados a dicha frecuencia (MADINA BELTRÁN, 2019).

La longitud de onda para la frecuencia de 28 GHz es de 10.71 mm, lo que significa una importante reducción en las dimensiones de las antenas, lo que especialmente significa una ventaja de dispositivos portátiles. Sin embargo, es importante señalar que las pérdidas por propagación de las señales en el rango de ondas milimétricas son notablemente superiores en comparación con las de las señales de microondas, constituyendo así una desventaja significativa (MADINA BELTRÁN, 2019 pág. 3).

La implementación de antenas activas contribuye significativamente a incrementar la eficiencia y la calidad de los sistemas inalámbricos. Este tipo de antenas consiste en la integración de un elemento radiante y un elemento activo, lo cual conlleva a la disminución de las pérdidas entre ambos componentes. El elemento radiante cumple una doble función al desempeñarse como impedancia de carga o como impedancia de fuente para el elemento activo. Simultáneamente, actúa como interfaz entre la propagación en el medio guiado y el espacio libre. La ventaja principal de las antenas activas radica en la reducción de las pérdidas entre el radiador y el amplificador (CASTRO GALÁN pág. 35).

1.2.2 Justificación Aplicativa

Para llevar a cabo el diseño e implementación de una antena activa en la banda de 28 GHz, uno de los objetivos fundamentales es la selección de un material de alta calidad con propiedades óptimas para operar en frecuencias altas. En el proceso de diseño del proyecto, se aplicarán conocimientos especializados relacionados con las diversas tipologías de antenas, métodos de alimentación y consideraciones de diseño. Al aplicar estos conocimientos en la simulación, se establecerán los parámetros de la antena para que su ancho de banda se adapte a las necesidades específicas de la tecnología.

Para el diseño de la antena activa, se incorporará un amplificador, el cual actuará como elemento activo en el sistema radiante. Este diseño contribuirá a incrementar la ganancia de la antena. La creación de este diseño se llevará a cabo con la asistencia de un software de simulación, facilitando el desarrollo del proyecto y permitiendo el análisis de los parámetros resultantes mediante simulaciones

Para la implementación de la antena activa en la frecuencia de 28 GHz, se requiere la construcción del dispositivo mediante la utilización de materiales dieléctricos adecuados para altas frecuencias, como el Rogers RO-4003C. Este proceso incluye la simulación y la implementación, junto con la incorporación de un amplificador para lograr la configuración deseada de una antena activa.

Este diseño cumple a la necesidad de la introducción de la tecnología de comunicación 5G. Este proceso de desarrollo se llevará a cabo utilizando un software especializado de simulación.

1.2.3 Objetivo General

Diseñar e implementar una antena activa en la banda de los 28 GHz para la tecnología 5G

1.2.4 Objetivos Específicos

- Realizar el estudio sobre las antenas activas, su importancia y su funcionamiento.
- Diseñar una antena activa a 28 GHz que logre satisfacer las características de ancho de banda y ganancia.
- Realizar las mediciones del patrón de radiación, ancho de banda y comparar los resultados obtenidos con los simulados.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO

2.1 Redes de Quinta Generación

La tecnología de quinta generación (5G) se presenta como una innovación emergente que incorpora servicios evolutivos. Esta tecnología está destinada a proporcionar velocidades de datos muy elevadas, una latencia notablemente baja, una capacidad ampliada y una calidad de servicio mejorada. En comparación con su predecesora, 4G, la tecnología 5G exhibe una velocidad superior, ofreciendo velocidades de datos máximas de hasta 20 Gbps y velocidades promedio que superan los 100 Mbps (DEY, 2021).

La tecnología 5G facilita la transmisión de datos a velocidades elevadas, posibilitando el funcionamiento fluido de dispositivos inteligentes conectados a través de dispositivos móviles, tabletas o dispositivos inteligentes. En el contexto del Internet de las cosas (IoT), 5G promueve la interconexión de un mayor número de dispositivos, ofreciendo la ventaja de conectar múltiples dispositivos sin interrupciones ni problemas de conectividad (HARDESTY, 2023).

2.1.1 Aspectos de la Tecnología 5G

La tecnología 5G soportará comunicaciones eficientes tanto en redes de área local (LAN) de baja potencia como en redes de amplia área (WAN), considerando los parámetros apropiados de latencia y velocidad. Este avance permitirá a los operadores del mercado ofrecer soluciones adaptadas a aplicaciones con requerimientos de bajo ancho de banda y baja potencia. Según las proyecciones de Ericsson, se estima que aproximadamente 150 millones de dispositivos se conectarán a la red 5G en un lapso de menos de 12 meses desde su lanzamiento. Se requerirá la asignación de un nuevo espectro en el rango de 6 a 300 GHz, lo cual implica una inversión en infraestructura para su implementación (GENALTO, 2016).

La 5G no se limita a ser simplemente otro conjunto de tecnologías que exigen extensas actualizaciones en los equipos. Su enfoque se basa en aprovechar la madurez alcanzada por los sistemas de telecomunicaciones. La 5G incorporará versiones mejoradas de tecnologías como el acceso radioeléctrico y la nube, entre otras, además de introducir nuevas tecnologías complementarias. Esto permitirá respaldar un mayor número de dispositivos con mayor diversidad y requisitos operativos distintos.

Consideraciones cruciales, como la seguridad, el mantenimiento a largo plazo y el costo, también desempeñarán un papel importante en la implementación de la 5G. Además, la necesidad de proporcionar conectividad a los próximos mil millones de suscriptores se presenta como un factor esencial en la orientación del desarrollo de esta tecnología futura (SPARKS, 2014).

2.1.2 Requerimientos Tecnológicos para 5G

En la 5G, uno de los principales focos de mejora se centra en parámetros clave de rendimiento, destacando la tasa de datos (Data Rate), ya que el crecimiento del tráfico móvil constituye la característica primordial concebida para las redes 5G. Cada evolución en la tecnología móvil ha logrado potenciar el rendimiento del sistema mediante la incorporación de bandas de frecuencias adicionales, típicamente de mayor frecuencia, y mayores anchos de banda de transmisión. Esto permite aumentar tanto la capacidad de tráfico como las tasas de datos (QIAO, 2015 pág. 6).

Un parámetro crucial es la latencia, aunque las latencias de ida y vuelta de la 4G actual se sitúan en el orden de los 15 ms, suficientes para las demandas de la mayoría de las aplicaciones actuales, se prevé que la 5G deberá lograr una latencia de aproximadamente 1 ms para satisfacer las exigencias de nuevas aplicaciones emergentes, especialmente en juegos en línea para diversos dispositivos inalámbricos. Esto representa un orden de magnitud significativamente menor que el de la 4G (SPARKS, 2014).

Otros objetivos destacados comprenden lograr una cobertura y disponibilidad cercanas al 100%, así como reducciones notables del consumo de energía en el orden del 90% y una disminución del consumo de batería de los dispositivos de usuarios (AGIWAL, 2016).

2.1.3 Espectro 5G

Un componente esencial para el logro del éxito de la tecnología 5G radica en la asignación del espectro y su regulación. La gestión adecuada de este espectro debe garantizar una disponibilidad oportuna y permitir que la tecnología en desarrollo pueda satisfacer la creciente demanda de servicios por parte de consumidores e industrias. Conforme al estándar 3GPP, que abarca las redes 5G, el primer conjunto de redes y dispositivos implementados a nivel global se clasifica como No Autónomo (NSA), indicando que las redes 5G deben ser compatibles con las redes 4G ya existentes.

En este contexto, los dispositivos terminales diseñados para 5G se conectarán con frecuencias habilitadas para esta red, optimizando así la transferencia de datos. No obstante, continuarán utilizando la red 4G para operaciones que no requieran grandes volúmenes de transferencia de datos (AGIWAL, 2020).

Bandas de 1 a 6 GHz. - Su importancia radica en ofrecer una cobertura más extensa y ampliar la experiencia de banda ancha móvil 5G a áreas extensas y a lugares de difícil acceso. Además, son cruciales en el despliegue temprano de 5G debido a su equilibrada combinación de amplia cobertura y capacidad sustancial (ARIZACA CUSICUNA, 2021).

Bandas por encima a 6 GHz. - Estas podrán ser usadas para lograr mejorar la capacidad y brindar velocidades de datos extremadamente altos, esto para ciertas aplicaciones de 5G. Actualmente, la atención se centra en frecuencias superiores a los 24 GHz, lo que ha generado un notable interés en los grupos de investigación en el área, comúnmente conocida como onda milimétrica (mmWave). Es relevante destacar que cada país cuenta con una canalización y regulación distintas, lo que representa un desafío técnico significativo en el diseño de equipos terminales para garantizar el mejor rendimiento y confiabilidad frente a posibles combinaciones de frecuencias (ARIZACA CUSICUNA, 2021 págs. 7-8).

2.1.4 Rango de Frecuencias para 5G

Las frecuencias milimétricas, conocidas como "mmWave", desempeñarán un papel crucial en el avance de las comunicaciones inalámbricas con la implementación de la tecnología 5G. La importancia radica en las frecuencias de 26 GHz y 28 GHz, las cuales serán fundamentales para el despliegue completo de la quinta generación de tecnologías móviles debido a su amplio espectro, facilitando así la transmisión eficiente de datos, según señaló la entidad 5G Américas (LUCAS, 2021).

En la Ilustración 2-1, se muestra el rango completo entre 24.25 GHz y 29.5 GHz, estos rangos de frecuencias garantizan requisitos importantes para la transmisión de datos como velocidad, latencia, confidencialidad y capacidad para la tecnología 5G.

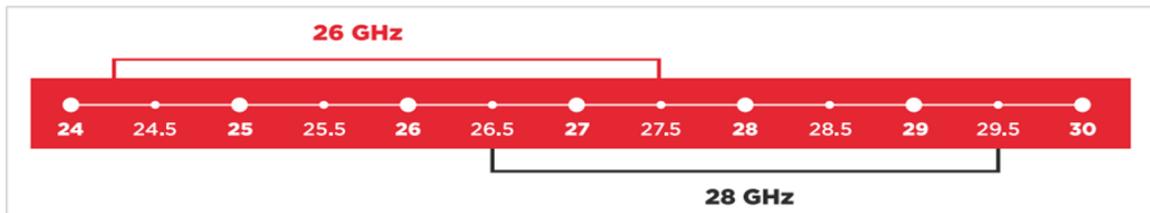


Ilustración 2-1: Banda de Frecuencia para 28 GHz

Fuente: (GSMA Association, 2018).

2.2 Parámetros Fundamentales de las Antenas

Una antena constituye un componente esencial dentro de un sistema de comunicación, el cual permite radiar energía de una forma eficiente, dicha energía es en forma de ondas electromagnéticas en el espacio libre. Tanto una antena transmisora como una receptora comparten propiedades similares, por lo que la antena en vez de emitir, esta podrá recibir la radiación que va a ser guiada hasta el receptor y ser convertida en energía eléctrica. Las antenas pueden recibir las ondas electromagnéticas de la misma forma que las transmiten por lo que el patrón de radiación será el mismo en cualquiera de los dos casos. Esta característica es posible por las propiedades del canal de radio (MURILLO FUENTES, 2014 págs. 35-36)

La formulación teórica de la Teoría de Antenas se origina en los avances matemáticos propuestos por James Clerk Maxwell en 1873, los cuales fueron corroborados por los experimentos de Heinrich Hertz en 1887. Estas ecuaciones establecen relaciones fundamentales entre los campos eléctricos y magnéticos, vinculándolos con las corrientes y cargas que los crean. Asimismo, la contribución de los primeros sistemas de radiocomunicaciones desarrollados por Guglielmo Marconi en 1897 también influyó significativamente en esta teoría (GUALDA FERNÁNDEZ, 2019 pág. 15).

2.2.1 Intensidad de Radiación

Cada antena tiene la capacidad de irradiar una cantidad específica de energía en direcciones particulares del espacio, esta característica se denomina comúnmente como intensidad de radiación. Esta propiedad se puede definir como la potencia emitida por unidad de ángulo sólido en una dirección específica (BALANIS, 2005 pág. 40).

En la ecuación 2-1, se observa la expresión de la intensidad de radiación de forma matemática.

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2-1)$$

Donde:

U = Intensidad de radiación (W/unidad ángulo solido)

W_{rad} = Densidad de radiación (W/m²)

r^2 = Distancia desde la antena

2.2.2 Patrón de Radiación

El diagrama de radiación de una antena, también conocido como patrón de radiación, constituye una representación gráfica que ilustra las características de radiación de la antena. Estas propiedades incluyen la densidad de flujo de potencia, la directividad, la intensidad de campo y la polarización o fase, todo ello en función de las coordenadas espaciales, es decir, ángulo y distancia. El patrón de radiación proporciona información detallada sobre los valores normalizados de campo y potencia en relación con sus valores máximos, y esta evaluación se realiza en la región de campo lejano o "Far-field" (BALANIS, 2005 págs. 34-35).

Cuando expresamos la intensidad de campo en términos de radiación, se genera el diagrama de intensidad de campo; por otro lado, si la radiación se expresa en función de la potencia, se obtiene un diagrama de potencia. Por lo tanto, la representación gráfica del diagrama de radiación de campo se asemeja al diagrama de potencia, ya que ambos contienen la misma información, dado que la densidad de potencia guarda una relación directamente proporcional con el cuadrado del módulo del campo eléctrico (ORTEGA CHÁVEZ, 2019 pág. 11).

Como se muestra en la ilustración 2-2, los diagramas de radiación pueden ser graficadas de forma bidimensional y tridimensional, en el diagrama bidimensional el patrón de radiación puede ser expresado en coordenadas polares o coordenadas cartesianas. El diagrama en coordenadas polares proporciona información sobre la distribución de energía en diferentes direcciones del espacio ya que en el diagrama el ángulo representa la dirección espacial y el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiante mientras que en coordenadas cartesianas permite visualizar detalles de antenas altamente direccionales ya que en su diagrama el ángulo está representado en el eje de las abscisas y el campo en el eje de las ordenadas.

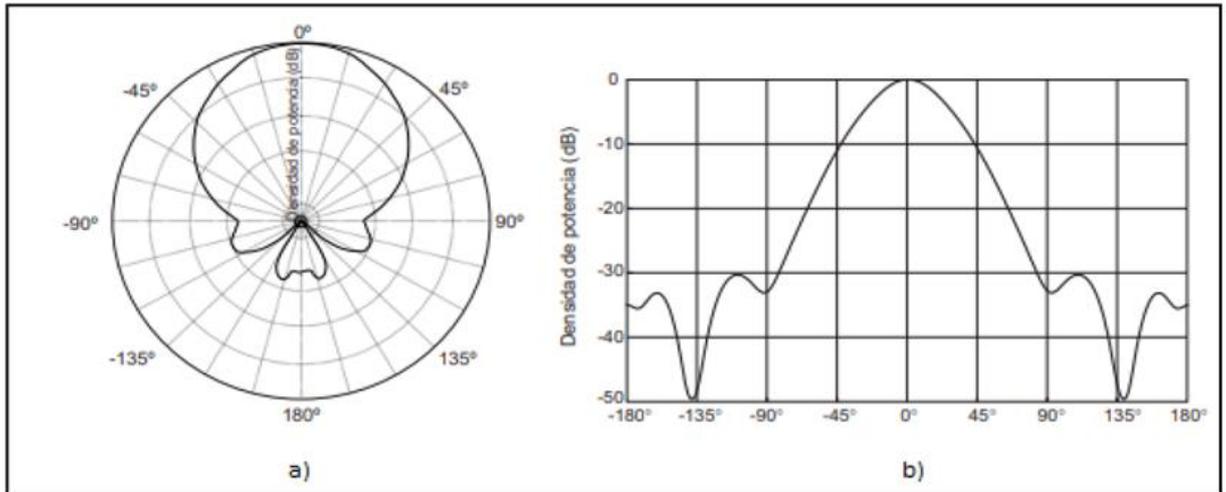


Ilustración 2-2: Diagrama del patrón de radiación

Fuente: (GSMA Association, 2018).

2.2.3 Ancho de Banda

El ancho de banda de una antena es definido como “el rango de frecuencias dentro de las cuales el rendimiento de la antena, con respecto a alguna característica, se ajusta a un estándar específico”. Se puede considerar que el ancho de banda es el rango de frecuencias, alrededor de una frecuencia central (generalmente la frecuencia de resonancia), donde las características de la antena (como la impedancia de entrada, el patrón, la polarización, la ganancia, la eficiencia, etc.) están dentro de un valor aceptable.

Para antenas de banda ancha, el ancho de banda es usualmente expresado como una razón de las frecuencias máximas y mínimas de las frecuencias aceptables de operación. Para antenas de banda estrecha, el ancho de banda es expresado como un porcentaje de la diferencia de frecuencia (superior menos inferior) sobre la frecuencia central del ancho de banda. Generalmente para antenas, el ancho de banda es medido considerando las pérdidas por retorno ($|S_{11}|$) a -10 dB (OLAN NUÑEZ, 2019 págs. 39-40).

2.2.4 Ganancia

La ganancia de una antena se define como la relación entre la intensidad de potencia radiada en una dirección particular y la intensidad de potencia radiada por una antena isotrópica. En este contexto, la intensidad de radiación de una antena isotrópica se establece como la potencia de entrada de la antena dividida por 4π . En la ecuación 2-2 se define la ecuación de la ganancia de una antena (PÉREZ, 2007 pág. 326).

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (2-2)$$

Donde:

G = Ganancia

U = Intensidad de radiación (W/Unidad de ángulo solido)

P_{in} = Potencia de entrada (W)

2.3 Antenas 5G

La creciente demanda de dispositivos inteligentes y servicios emergentes ha generado un aumento exponencial en el tráfico de datos inalámbricos. Ante esta realidad, la implementación del sistema de comunicaciones móviles conocido como 5G es algo importante. Este sistema se distingue por sus características clave, que incluyen un rendimiento elevado, baja latencia, mayor eficiencia espectral, un amplio ancho de banda y la utilización de la banda milimétrica. Sin embargo, para superar los desafíos derivados de las atenuaciones causadas por lluvias, la absorción atmosférica y las limitaciones de penetración a través de estructuras como edificios, se requieren esquemas con alta eficiencia espectral, los cuales solo son factibles mediante el empleo de antenas transmisoras-receptoras de alta ganancia (ARIZACA CUSICUNA, 2021 pág. 8).

2.3.1 Tipos de Antenas 5G

Existen distintos tipos de antenas adecuadas para la aplicación de 5G, tanto para estaciones base como para terminales de usuario. Existen 3 principales tipos de antenas:

2.3.1.1 Antenas pasivas

Estas antenas generan haces orientados controlados por un número finito de puertos, cuyo rango de exploración está determinado por la cantidad y el ancho de los haces. Pueden basarse en reflectores, lentes o circuitos formadores de haces.

2.3.1.2 Antena en fase

Estos dispositivos generan haces dinámicos para el escaneo electrónico mediante el uso de desfases para cada elemento radiante. Estas matrices pueden ser activas o pasivas.

2.3.1.3 Antenas activas

Capaces de llevar a cabo la formación de haces mediante el uso de chips de procesamiento de señales digitales, logrando un barrido electrónico más suave en comparación con las dos categorías anteriores (HONG, 2017).

2.3.2 Antenas Bow-Tie

Las antenas de tipo Bow-Tie pertenecen a la categoría de antenas de apertura, caracterizadas por tener una apertura radiante con la forma de una pajarita, de ahí su denominación (LÓPEZ HERNÁNDEZ, 2021).

La antena Bow-Tie es una antena plana, semejante a una antena bicónica finita. La antena Bow-Tie se va a comportar de manera similar a un dipolo, por su semejanza geométrica, sobre todo para ángulos de apertura pequeños. Además, representa un ancho de banda mayor que de un dipolo convencional (MARTIN, 2015 pág. 2). En la ilustración 2-3, se muestra ejemplos de antenas Bow-Tie:

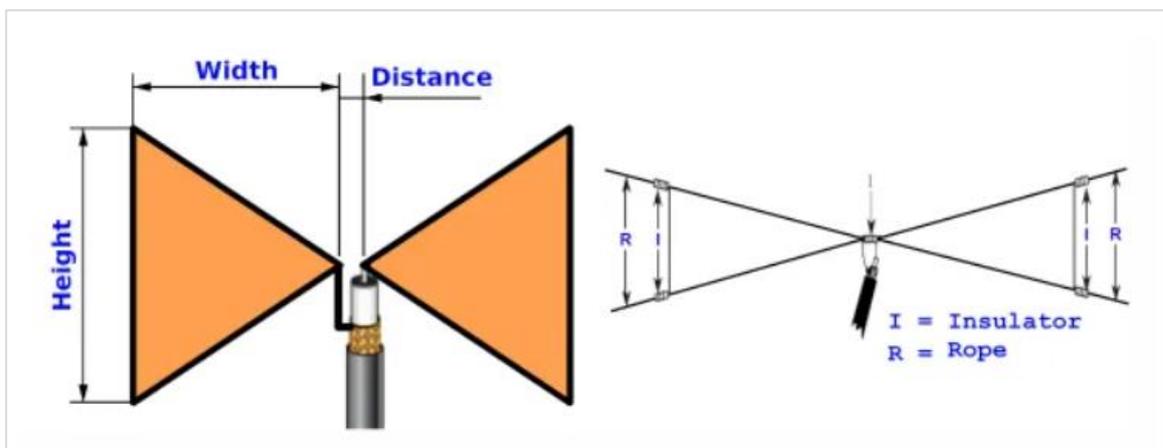


Ilustración 2-3: Estructura antena Bow-tie

Fuente: (DI MARÍA, 2020).

2.3.2.1 Estructura de las Antenas Bow – Tie

Algunas de las variables clave que distinguen a la antena Bow-Tie son L (brazo), α , L (carga), R (carga) y $Z(0)$, las cuales pueden variar en el diseño y la optimización de la antena. En la ilustración 2-4, se visualiza la estructura esquemática de una antena que consiste en dos triángulos simétricos de cable eléctrico conectados por un cable de alimentación, siendo este último un conductor eléctrico (DI MARÍA, 2020).

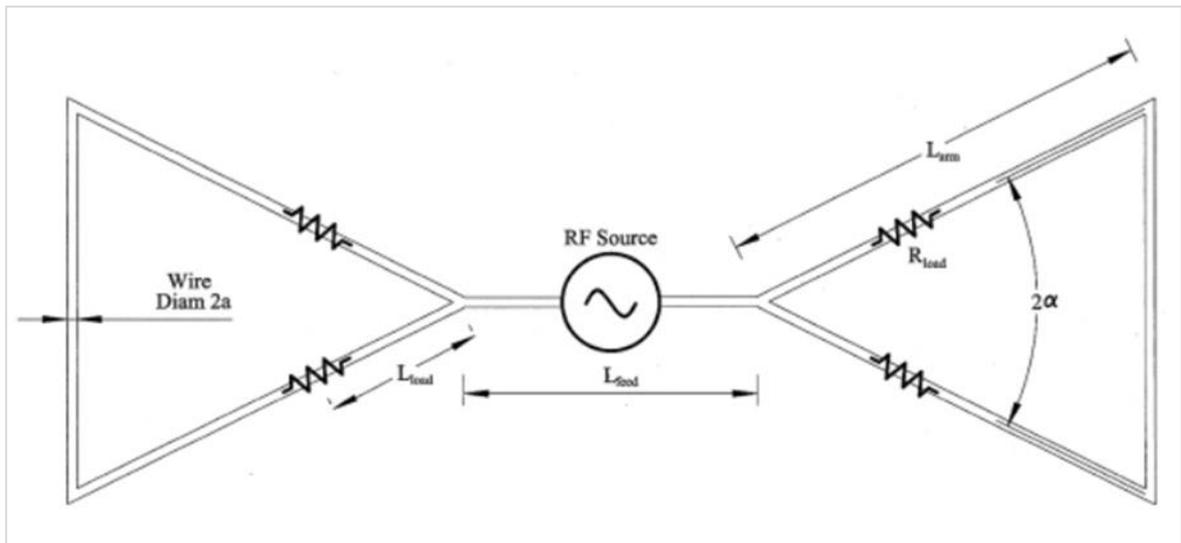


Ilustración 2-4: Estructura esquemática de una antena Bow-Tie

Fuente: (DI MARÍA, 2020).

2.4 Amplificadores

Un amplificador representa un componente electrónico empleado con el propósito de incrementar la amplitud de la tensión, corriente o potencia de una señal de entrada. Su función radica en fortalecer una señal o forma de onda eléctrica débil, reproduciendo una forma de onda similar, pero de mayor intensidad en la salida, gracias al empleo de una fuente de alimentación externa (ELECTRONICA LUGO, 2023 pág. 1).

2.4.1 Amplificadores de Alta Potencia

El amplificador de alta potencia (HPA), también conocido como amplificador de potencia, desempeña una función esencial al proporcionar la potencia necesaria para la señal de radiofrecuencia (RF) transmitida. Su tarea principal consiste en combinar la señal entrante de la antena con su ganancia, resultando en la generación de la potencia equivalente isotrópica radiada (ELECTRONICA LUGO, 2023).

Su propósito fundamental es elevar la potencia de dicha señal a un nivel apropiado para gestionar las cargas en dispositivos de salida, como parlantes, auriculares, transmisores de RF, entre otros. A diferencia de los amplificadores de voltaje o corriente, el amplificador de potencia está específicamente diseñado para impulsar directamente las cargas y se utiliza como el último componente en un circuito amplificador (ELECTRONICA LUGO, 2023).

Adicionalmente, estos amplificadores posibilitan el aumento de la señal de RF para mejorar la calidad de la comunicación entre antenas, especialmente en condiciones atmosféricas adversas o áreas con obstrucciones. Además, contribuyen a compensar la atenuación de la señal que puede ocurrir durante la transmisión (ELECTRONICA LUGO, 2023 pág. 1).

2.4.2 Amplificadores de Bajo Ruido

El propósito fundamental en el diseño de un amplificador de bajo ruido es la minimización del ruido añadido y la distorsión, al mismo tiempo que se incrementa la amplitud de la señal. Además, busca elevar la sensibilidad del sistema completo de recepción. Los amplificadores exhiben características que delimitan su desempeño y limitaciones dentro de una banda de frecuencia específica. Estas características pueden ser analizadas en función de diversos parámetros, variando según la aplicación específica a la que se orienta el amplificador (MORALES MARTINEZ, 2014 pág. 21).

2.5 Software HFSS (High-Frequency Structure Simulator)

Ansys HFSS como se muestra en la ilustración 2-5, es un software tridimensional de simulación electromagnética, destinado a la creación y simulación de productos electrónicos de alta frecuencia, tales como antenas, conjuntos de antenas, componentes de RF o microondas, interconexiones de alta velocidad, filtros, conectores, paquetes de circuitos integrados y placas de circuito impreso (ANSYS HFSS, 2023).

El software Ansys HFSS es utilizado principalmente para el diseño de dispositivos electrónicos de alta frecuencia y velocidad presentes en sistemas de comunicaciones, sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), satélites y productos de la Internet de las cosas (IoT) (ANSYS HFSS, 2023 pág. 1).



Ilustración 2-5: Logo HFSS

Fuente: (ANSYS HFSS, 2023).

2.6 Equipos de mediciones para antenas 5G

2.6.1 *Generador de señales Anritsu MG3690C.*

El equipo electrónico conocido como Generador de Señales Anritsu MG3690C, es un equipo encargado de la generación de señales de banda ancha, abarcando frecuencias que se extienden por las denominadas bandas HF, VHF y UHF. Este dispositivo cuenta con una interfaz de usuario intuitiva y ofrece una salida de señal a través de un cable coaxial (ANRITSU, 2023 págs. 3-5).

La Ilustración 2-6, presenta una representación del Generador de Señales, a continuación, se muestra algunas características importantes de este equipo, además en el ANEXO G, se muestra las especificaciones técnicas.

- Modulación de pulso mejorada.
- Rápida velocidad de conmutación.
- Modulación análoga completa.



Ilustración 2-6: Generador de señales Anritsu MG390C

Fuente: (ANRITSU, 2023).

2.6.2 *Network Analyzer Keysight E5071C*

Un analizador vectorial de redes (Vector Network Analyzer – VNA) es utilizado en la ingeniería de comunicaciones y radiofrecuencia para la medición de los parámetros de dispersión (parámetros S), es decir, ondas de reflexión y transmisión en función de la frecuencia en los puertos eléctricos de un componente de microondas. Los VNA son utilizados en el área del desarrollo y como medio de verificación en la producción de componentes (KEYSIGHT, 2023).



Ilustración 2-7: Network Analyzer Keysight E5071C

Fuente: (KEYSIGHT, 2023)

2.6.3 *Analizador de Espectros Anritsu MS2724C*

El analizador de espectro de Anritsu es un dispositivo electrónico cuya función principal radica en visualizar en pantalla los componentes del espectro utilizados en un rango de frecuencias específico, permitiendo la medición de ondas eléctricas, ópticas y acústicas. Su interfaz se compone de un eje de coordenadas que representa la potencia de señal en dB y el eje de las abscisas que indica la frecuencia. La Ilustración 2-8, muestra el Analizador de Espectros, (TAKAHASHI, 2023).



Ilustración 2-8: Analizador de Espectro Anritsu MS2724C

Fuente: (TAKAHASHI, 2023)

A continuación, se detallan las características principales proporcionadas por el fabricante:

- Rango de frecuencias: 9 KHz a 20 GHz.
- Resolución de ancho de banda de 1 Hz a 10 MHz.
- Sensibilidad de 20 dB debido a los preamplificadores de banda ancha.

2.6.4 *Circuito Elevador de Frecuencias*

Un circuito elevador de frecuencia es un dispositivo electrónico que se utiliza para aumentar la frecuencia de una señal eléctrica. Este dispositivo es comúnmente utilizado en sistemas de comunicaciones, transmisión de datos, electrónica de potencia y otras aplicaciones donde es necesario aumentar la frecuencia de una señal (ARROW, 2023).

Este aumento de frecuencia puede lograrse mediante técnicas como la modulación de frecuencia, la multiplicación de frecuencia o el uso de osciladores controlados por voltaje, entre otros métodos. El objetivo principal es obtener una señal de salida con una frecuencia mayor que la señal de entrada, manteniendo la forma de onda y otras características importantes de la señal original (ARROW, 2023).

Es el conjunto de dispositivos electrónicos que tienen como función generar una señal de salida que es un producto armónico de la frecuencia de entrada. Estos dispositivos en la mayoría son utilizados para convertir señales de RF a bandas de microondas o milimétricas para su transmisión. Todo esto es posible debido al uso de dispositivos no lineales que tienen la función de distorsionar la señal de entrada con la finalidad de destacar un producto armónico particular (ARROW, 2023).

Los circuitos elevadores de frecuencia pueden tener una variedad de componentes dependiendo de la aplicación específica y la frecuencia de operación. Aquí hay una descripción general de algunos de los componentes comunes y cómo funcionan:

- **Oscilador local:** Este componente genera una señal de alta frecuencia que se utilizará para mezclarla con la señal de entrada y producir la señal de salida deseada. El oscilador local puede ser un oscilador de cristal, un oscilador controlado por voltaje (VCO) u otro tipo de oscilador dependiendo de los requisitos de frecuencia y estabilidad (TORO ROSALES, 2015 pág. 35).
- **Mezclador:** El mezclador es un dispositivo que combina la señal de entrada con la señal del oscilador local para producir una señal de salida con una frecuencia más alta. Esto se logra multiplicando o mezclando las dos señales juntas. Los mezcladores pueden ser de diferentes tipos, como mezcladores balanceados o no balanceados, dependiendo de la aplicación y la frecuencia de operación (SORIA SALAZAR, 2015 pág. 12).

- Amplificador de potencia: En algunas aplicaciones, como la transmisión de señales, puede ser necesario amplificar la señal de salida para aumentar su potencia y asegurar una transmisión eficaz a través del medio de comunicación (SORIA SALAZAR, 2015 pág. 13).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Introducción

El trabajo de Titulación se fundamentó en un análisis detallado de la tecnología 5G con el objetivo de diseñar un sistema radiante que opere en la banda de los 28 GHz, mediante el uso de antenas activas de tipo Bow-Tie. Este diseño fue creado utilizando un software especializado para diseñar antenas, asegurando un ajuste preciso mediante un transformador lambda cuartos y una línea de transmisión de 50Ω , para garantizar el ancho de banda requerido. Durante la fase de simulación, se utilizaron técnicas de optimización y simulación para afinar los parámetros geométricos de las elipses que forman la antena Bow-Tie, así como un amplificador de bajo ruido. Esto se realizó con el fin de mejorar el desempeño del sistema de transmisión, considerando las frecuencias particulares de operación relacionadas con la tecnología 5G.

Se llevaron a cabo simulaciones para evaluar el rendimiento de la antena, como el patrón de radiación, el ancho de banda y las frecuencias de operación. Posteriormente, se realizaron ajustes y optimizaciones necesarios en el diseño de la antena, el transformador lambda cuartos y una línea de transmisión de 50Ω , junto con la adquisición y ensamblado del amplificador de bajo ruido, todo ello ajustado a las frecuencias deseadas.

Como paso final, se llevará a cabo una validación experimental para comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con mediciones prácticas. La Ilustración 3-1, muestra el elemento radiante, final en este proceso de diseño y optimización.

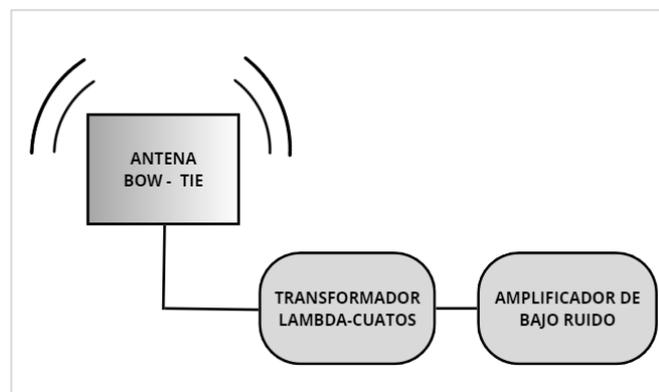


Ilustración 3-1: Diagrama del Sistema Radiante

Realizado por: Guanga, V.,2023.

3.2 Definición parámetros de diseño de la Antena Bow-Tie

En esta sección, se presentarán detalladamente todos los procedimientos llevados a cabo en la creación de la antena Bow-Tie modificada. Esto abarcará los diversos cálculos y ajustes realizados con el objetivo de lograr una respuesta en frecuencia mejorada y un mayor ancho de banda.

3.2.1 Sustrato ROGERS

El sustrato Rogers RT es uno de los materiales más utilizados para alta frecuencia, este sustrato es conocido por su constante dieléctrica excepcional, tangente de baja pérdida, y alta conductividad térmica ofrecen una variedad (MOKO TECHNOLOGY, 2023).

El material de Rogers se elige debido a su alta capacidad de rendimiento en altas frecuencias y una menor susceptibilidad a las interferencias electromagnéticas. A pesar de su mayor costo en comparación con otros materiales, Los PCB de Rogers ofrecen numerosas ventajas, entre ellas:

- Excelente rendimiento de alta frecuencia con baja pérdida dieléctrica
- Fabricación de PCB de baja electricidad
- Control de impedancia mejorado
- Baja absorción de humedad y expansión térmica
- Alta compatibilidad y facilidad de fabricación (MOKO TECHNOLOGY, 2023).

Para el diseño de la antena Bow-Tie modificada, se utilizará el software de simulación HFSS, en el cual se simulará utilizando dos tipos de sustrato Rogers, con diferentes características, pero con la misma ventaja que es trabajar para altas frecuencias. Para la implementación se elegirá el Rogers que tenga una mejor respuesta frecuencia y ancho de banda analizada con la simulación de los dos materiales. A continuación, se describe los dos tipos de sustratos utilizados para la simulación de la antena con sus características:

3.2.1.1 ROGER RT/Duroid 4003C

En la tabla 3-1 se muestra los parámetros del sustrato con sus respectivos valores, los cuales se utilizarán en la simulación.

Tabla 3-1: Características del ROGER RT/4003C

ROGER RT/Duroid 4003 C	PARÁMETRO	VALOR
	Constante Dieléctrica	3,38
	Altura	0,81 mm
	Tangente de pérdida	0,0027

Fuente: (Rogers Corporation)

Realizado por: Guanga, V.,2023.

3.2.1.2 ROGERS CERAMIC LAMINATE 4003

En la tabla 3-2 se muestra los parámetros del sustrato con sus respectivos valores, los cuales se utilizarán en la simulación.

Tabla 3-2: Características ROGERS CERAMIC LAMINATE 4003

ROGER RT/LAMINATE 4003	PARÁMETRO	VALOR
	Constante Dieléctrica	3,4
	Altura	0,254 mm
	Tangente de pérdida	0,002

Fuente: (Rogers Corporation).

Realizado por: Guanga, V.,2023.

3.2.2 Diseño Elipses

Se detallan los procedimientos de cálculo requeridos para establecer las dimensiones de la Antena Bow-Tie, teniendo en cuenta que se utilizó como referencia para los cálculos los parámetros del sustrato ROGER RT/Duroid 4003C, mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones.

En la Ecuación (3-1), se obtiene el valor de la longitud de onda, el cual será el valor principal para poder determinar los demás parámetros para las dimensiones de la antena:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3-1)$$

$$\lambda = \frac{3 * 10^8}{(28 * 10^9)}$$

$$\lambda = 10.7143 \text{ mm}$$

Donde:

λ = Longitud de Onda

C= Velocidad de la luz

f= Frecuencia de operación

Para el diseño de la antena Bow -Tie se determina la forma geométrica base de las elipses, determinando dos principales parámetros:

- El eje mayor de una elipse es el eje más largo que conecta los dos extremos opuestos de la elipse que define su principal dimensión, es representada con la mitad de la longitud de onda de la frecuencia de operación.
- El eje menor de una elipse es la línea más corta que conecta dos puntos opuestos a lo largo de la elipse y que es perpendicular al eje mayor, los dos ejes pasan por el centro de la elipse.

El eje mayor va a hacer referencia al largo de elipse y el eje menor va a hacer referencia al ancho de la elipse, como se muestra en la Ilustración 3-2.

En la ecuación 3-2, se muestra el cálculo del eje mayor para la frecuencia de trabajo:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\lambda}{2\pi} & (3-2) \\ a &= \frac{10.7143 \text{ mm}}{2\pi} \\ a &= 1.70523 \text{ mm} \end{aligned}$$

Donde:

a = Eje mayor de la elipse

En la ecuación 3-3, se muestra el cálculo del eje menor:

$$\begin{aligned} b &= \frac{\lambda*d}{4\pi} & (3-3) \\ b &= \frac{10.7143 \text{ mm}(0.4)}{4\pi} \\ b &= 0.3001 \text{ mm} \end{aligned}$$

Donde:

b = Eje menor de la elipse

d = Constante de Geometría (Ajusta las dimensiones de la antena Bow - Tie para lograr un rendimiento deseado en términos de ancho de banda, impedancia, y características de radiación)

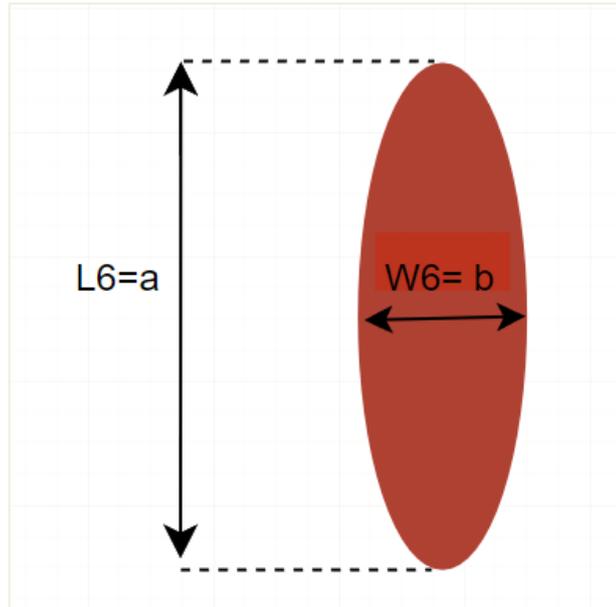


Ilustración 3-2: Diseño Elipse a 28 GHz

Realizado por: Guanga, V.,2023.

La inclusión de múltiples elipses con variados tamaños o frecuencias de resonancia en el diseño de antenas Bow-Tie se implementa con el propósito de ampliar significativamente el ancho de banda disponible. Esta estrategia permite que la antena sea capaz de operar eficientemente en un rango más extenso de frecuencias. La variación en el tamaño o la frecuencia de resonancia de las elipses proporciona flexibilidad y adaptabilidad, contribuyendo así a optimizar el rendimiento de la antena en diversas bandas de frecuencia.

Utilizar seis elipses permite optimizar la ganancia de la antena en la banda de 28 GHz, tomando en cuenta que es una antena simétrica. Además, ajustar las dimensiones de cada elipse va a contribuir a maximizar la eficiencia y la capacidad de recepción/transmisión en esa frecuencia específica. Cada elipse tendrá una variación en su eje mayor de 0.1645 mm partiendo de la elipse diseñada a 28 GHz.

Como se muestra en la Ilustración 3-3, se puede observar el diseño de la antena Bow-Tie modificada, partiendo con sus elipses, aquí se muestra el diseño que será implementado en un software de diseño de antenas, con cada una de las dimensiones y variaciones antes realizadas, se debe tener en cuenta que, para la optimización de la antena en el software, se realizó cambios en las dimensiones de las elipses calculadas teóricamente, dichas optimizaciones se detallan en la Tabla 3-3.

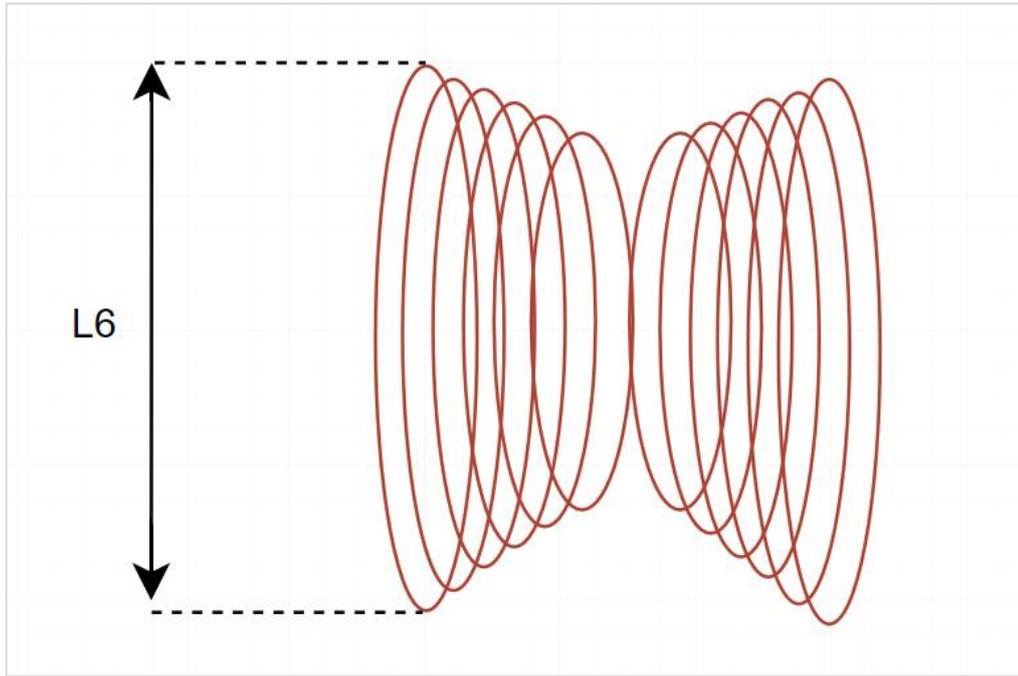


Ilustración 3-3: Diseño Elipse a 28 GHz

Realizado por: Guanga, V.,2024.

Tabla 3-3 : Dimensiones Teóricas y Optimizadas de las elipses

ELEMENTO	PARAMETRO	DIMENSIONES	
		TEORICAS	Roger RT/Duroid 4003C
Elipses	AL	0,1645 mm	0,180 mm
	L6	1,705 mm	1,975 mm
	W6	0,3001mm	0,2098 mm
	L5	1,545 mm	1,790 mm
	W5	0,3001mm	0,2073 mm
	L4	1,385 mm	1,610 mm
	W4	0,3001mm	0,2048 mm
	L3	1,225 mm	1,430 mm
	W3	0,3001mm	0,2023 mm
	L2	1,065 mm	1,250 mm
	W2	0,3001mm	0,1998 mm
	L1	0,905 mm	1,070 mm
	W1	0,3001mm	0,1973 mm

Realizado por: Viviana Guanga.,2023

3.2.3 Diseño Transformador Cuarto de Onda

En esta sección, se pretende lograr el acoplamiento de la antena bow-Tie, mediante un transformador cuarto de onda (acoplador $\lambda/4$), como se puede observar en la Ilustración 3-4, en el cual se busca adaptar las impedancias y mejorar la eficiencia de la transmisión, lo que reduce las reflexiones de señal, y minimiza las pérdidas de potencia. El transformador cuarto de onda contribuye a mantener una respuesta de impedancia relativamente constante a lo largo de un rango más amplio de frecuencias, lo que es beneficioso para aplicaciones que operan en múltiples frecuencias o en un rango amplio ideal para antenas Bow -Tie, en la ecuación (3-5) y ecuación (3-6) se detalla como encontrar las dimensiones del transformador cuarto de onda los cuales se fundamentan en las fórmulas derivadas del libro "Microwave Engineering" de David M. Pozar. Los cálculos se basaron en el artículo (PATANVARIYA, 2020 pág. 46), los cuales describen las medidas del transformador cuarto de onda.

$$Z_{real} = 471.226 \Omega$$

$$A_{Ant} = \frac{Z_{real}}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r}\right)}$$

$$A_{Ant} = \frac{471.226}{60} \sqrt{\frac{3,38 + 1}{2} + \frac{3,38 - 1}{3,38 + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{3,38}\right)}$$

$$A_{Ant} = 11.7646$$

$$\frac{w}{d} = \frac{8e^{(A_{Ant})}}{e^{(2A_{Ant})} - 2} \quad (3-4)$$

$$\frac{w}{d} = \frac{8e^{(11,7646)}}{e^{2(11,7646)} - 2}$$

$$\frac{w}{d} = 62,1998 \text{ mm}$$

$$w = 62,1998 \text{ mm}(d)$$

$$w = (62,1998 \text{ mm})(0.254 \text{ mm})$$

$$wq = w = 0.158 \text{ mm}$$

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

$$\epsilon_e = \frac{3.38 + 1}{2} + \frac{3.38 - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12\left(\frac{0.254 \text{ mm}}{0.158 \text{ mm}}\right)}}$$

$$\epsilon_e = 2.19$$

$$L = \frac{c}{(f)\sqrt{\epsilon_e}} \quad (3-5)$$

$$L = \frac{3 * 10^8}{(28 * 10^9)\sqrt{2.19}}$$

$$L_q = L = 7.240 \text{ mm}$$

$$L_q = \frac{L}{4} = 1,810 \text{ mm}$$

Donde:

w = Ancho del transformador Cuarto de Onda

L = Largo del transformador Cuarto de Onda

ϵ_r = Constante Dieléctrica

d = distancia del sustrato (mm)

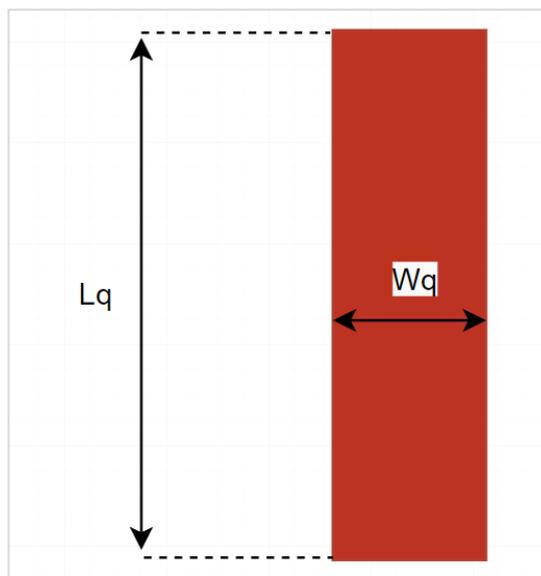


Ilustración 3-4: Diseño Transformador cuarto de onda

Realizado por: Guanga, V.,2023.

3.2.4 Diseño de la Línea de transmisión de 50 ohm

En la presente sección, con el propósito de lograr la conexión adecuada para la Antena Bow Tie previamente mencionada, se implementa una línea de transmisión que presenta una impedancia de 50 ohmios, como se muestra en la Ilustración 3-5. A continuación, en la ecuación (3-5) y ecuación (3-6), se detallan los cálculos esenciales para establecer las dimensiones de esta línea, los cuales se fundamentan en las fórmulas derivadas del libro "Microwave Engineering" de David

M. Pozar. Los cálculos se basaron en el artículo (PATANVARIYA, 2020 pág. 46), los cuales describen las medidas de la línea de transmisión de 50 Ω.

$$Z_{Ant} = 50\Omega$$

$$A_{Ant} = \frac{Z_{Ant}}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r}\right)$$

$$A_{Ant} = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{3,38 + 1}{2} + \frac{3,38 - 1}{3,38 + 1}} \left(0,23 + \frac{0,11}{3,38}\right)$$

$$A_{Ant} = 1.4085$$

$$\frac{w}{d} < 2;$$

$$\frac{w}{d} = \frac{8e^{(A_{Ant})}}{e^{(2A_{Ant})} - 2} \quad (3-5)$$

$$\frac{w}{d} = \frac{8e^{(1,4085)}}{e^{2(1,4085)} - 2}$$

$$\frac{w}{d} = 2,3155 \text{ mm}$$

$$w = 2,3155 \text{ mm}(d)$$

$$w = (2,3155 \text{ mm})(0.254 \text{ mm})$$

$$w = W50 = 0.5881 \text{ mm}$$

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

$$\epsilon_e = \frac{3,38 + 1}{2} + \frac{3,38 - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12\left(\frac{0,254 \text{ mm}}{0,5881 \text{ mm}}\right)}}$$

$$\epsilon_e = 2.9686$$

$$L_{50} = \frac{c}{(f)\sqrt{\epsilon_e}} \quad (3-6)$$

$$L_{50} = \frac{3 * 10^8}{(28 * 10^9)\sqrt{2.9686}}$$

$$L_{50} = 6.148 \text{ mm}$$

Donde:

w = Ancho de la línea de transmisión

L = Largo de la línea de transmisión

ϵ_r = Constante Dieléctrica

d = distancia del sustrato (mm)

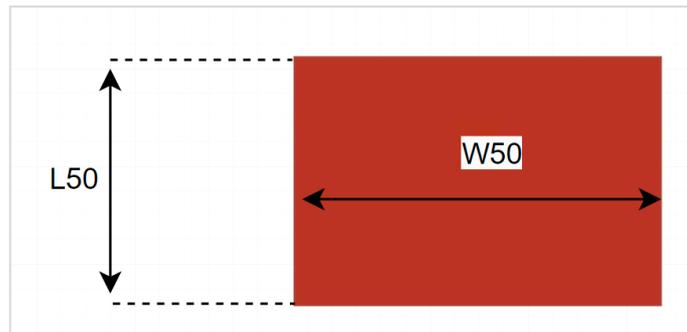


Ilustración 3-5: Diseño Línea de Transmisión 50 Ohm

Realizado por: Guanga, V.,2023.

3.2.5 Antena definitiva en fase de desarrollo

En la presente sección, se describe la integración de todas las secciones de diseño previamente examinadas en detalle. Este proceso permite avanzar de manera coherente con la configuración de la antena propuesta, llevando a cabo cálculos matemáticos precisos. Como se puede observar en la Ilustración 3-6, es el diseño final, el cual será implementado en un software especializado para el diseño de antenas. Cada una de las dimensiones previamente establecidas se encuentra detallada en dicho diseño.

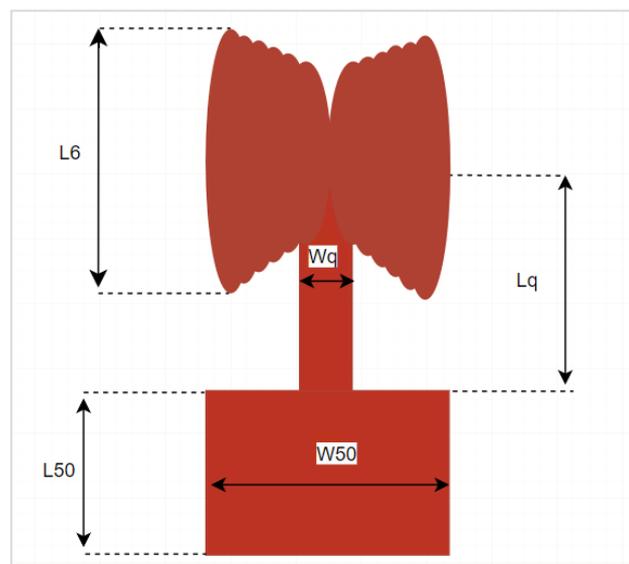


Ilustración 3-6: Prototipo Antena Bow-Tie

Realizado por: Guanga, V.,2023.

3.3 Simulación

Para la simulación de la antena Bow-Tie modificada, se consideraron diversos sustratos con sus características correspondientes, como se detalla en las Tablas 3-1 y 3-2. Estos sustratos afectaron algunas de las dimensiones, según se presenta en la Tabla 3-3 y Tabla 3-4, ya que las variaciones dependen del espesor y las permitividades. La elección del material óptimo para la implementación se basará en la variación de estas permitividades y los resultados que se muestren en las respectivas simulaciones.

Tabla 3-4: Dimensiones Teóricas y Optimizadas de la Antena Final

ELEMENTO	PARAMETRO	DIMENSIONES		
		TEORICAS	Roger Ceramic Laminate 4003	Roger RT/Duroid 4003C
Acoplador	Lq	1,810 mm	2,849 mm	2,955 mm
	Wq	0,158 mm	0,789 mm	0,59 mm
Línea Tx	L50	0,5881 mm	1,283 mm	1,358 mm
	W50	6,148 mm	5,655 mm	5,288 mm

Realizado por: Guanga, V., 2023.

El diseño final de la antena consta de las siguientes capas, dieléctrico, señal y tierra, dicho diseño se observa en modelado 2D y 3D como se observa en la Ilustración 3-7.

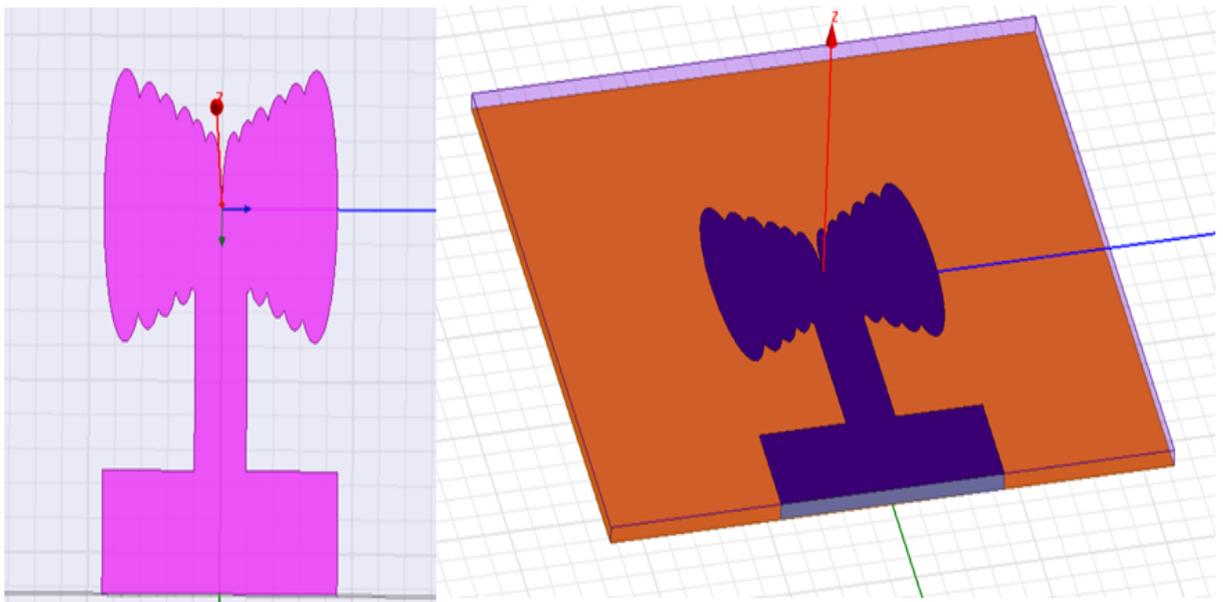


Ilustración 3-7: Diseño final de la antena en 2D y 3D en el software de diseño de antenas

Realizado por: Guanga, V., 2023.

3.3.1 ROGER RT/4003C

En la primera simulación que se realizó, se utilizó los parámetros del sustrato de la tabla 3-2, mediante el software para el diseño de antena, en la ilustración 3-8, se muestra los resultados obtenidos como el parámetro S11, ancho de banda y frecuencias de operación de la antena diseñada. En la tabla 3-3, se hallan los resultados estos resultados de la simulación.

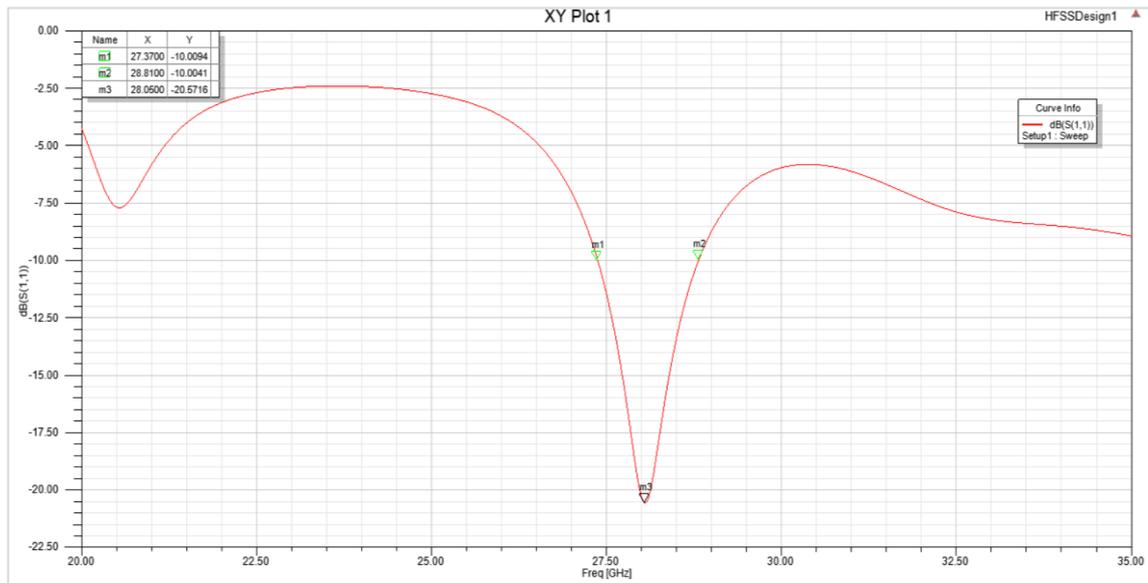


Ilustración 3-8: Resultado del Coeficiente de reflexión (S11) con la utilización del sustrato RT/Duroid 4003C para el diseño de la antena Bow-tie

Realizado por: Guanga, V.,2023.

Con el análisis del coeficiente de transmisión (S21), se observó que la respuesta en frecuencia muestra un ancho de banda de 1.44 GHz. Este análisis nos proporciona información valiosa sobre la capacidad de la antena para transmitir señales eficientemente en una gama específica de frecuencias. El ancho de banda de 1.44 GHz obtenido mediante la simulación con el sustrato RT/Duroid con permitividad 3.38, evidencia la versatilidad y la capacidad de la antena para funcionar efectivamente en un rango significativo de frecuencias, lo cual es fundamental para su aplicación en diferentes entornos y condiciones de comunicación.

3.3.2 ROGERS CERAMIC LAMINATE 4003

En la Segunda simulación que se realizó, se utilizó los parámetros del sustrato de la tabla 3-1, mediante el software para el diseño de antena, en la Ilustración 3-9, se muestra los resultados obtenidos como el parámetro S11, ancho de banda y frecuencias de operación de la antena diseñada.

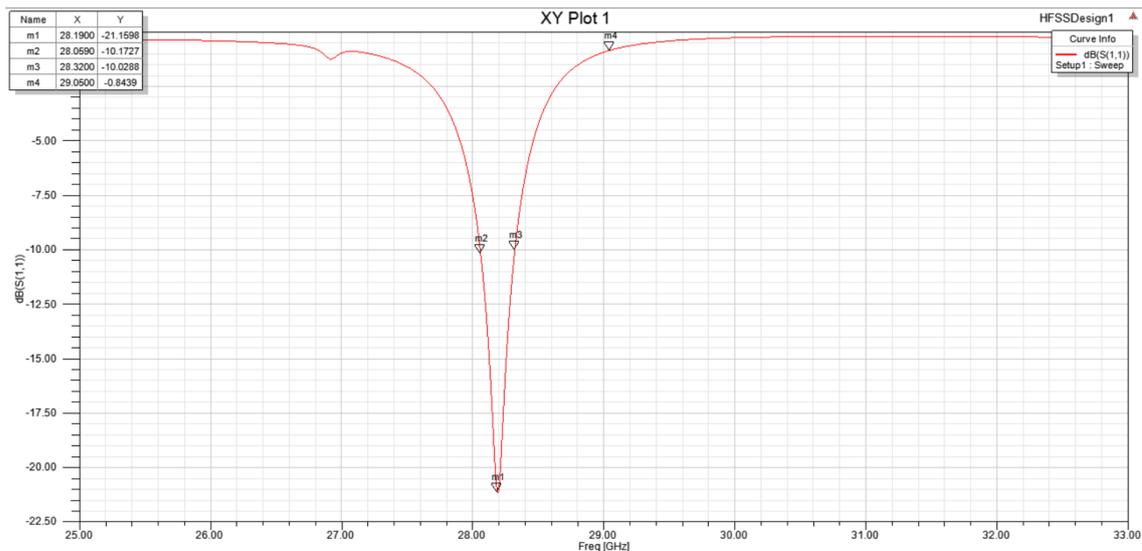


Ilustración 3-9: Coeficiente de reflexión (S11) con la utilización del sustrato Rogers Ceramic Lamine 4003 para el diseño de la antena Bow-tie

Realizado por: Guanga, V.,2023.

Con el resultado de la segunda simulación, sobre el análisis del coeficiente de transmisión (S21), se pudo constatar que la respuesta en frecuencia exhibe un ancho de banda de 261 MHz. Esta observación representa una disminución apreciable en el ancho de banda en relación con el análisis previo de la ilustración 3-8. La identificación de esta reducción en el ancho de banda es de gran importancia, ya que resalta la capacidad de la antena Bow-Tie para abarcar una gama específica de frecuencias. Un amplio ancho de banda en una antena Bow-Tie es esencial debido a que posibilita la transmisión y recepción eficientes de señales en diversas frecuencias de operación.

3.4 Diseño de Amplificador

En esta sección, se detalla todos los procedimientos ejecutados para construir el amplificador de bajo ruido. Asimismo, se proporcionarán los cálculos necesarios para la configuración de las líneas de transmisión de RF-IN y RF-OUT, las cuales será implementado utilizando el material FR4 con una permitividad relativa de 4,4 y una altura de 1,53 mm. Es esencial subrayar que los dispositivos son adquiridos comercialmente y el montaje se lleva a cabo siguiendo las recomendaciones del fabricante.

3.4.1 Esquema circuito

En la Ilustración 3-10, se presenta el esquema del circuito amplificador que se desarrollará, teniendo en cuenta las sugerencias del fabricante en el Anexo A.

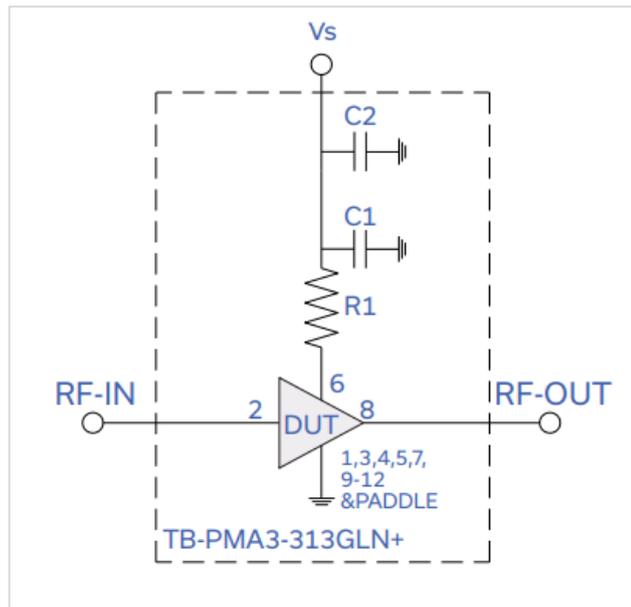


Ilustración 3-10: Diagrama propuesto por el fabricante

Fuente: (Mouser Electronics, 2017).

3.4.2 Dispositivos electrónicos que se emplearán

3.4.2.1 Amplificador PMA3-313GLN+

La Ilustración 3-11, muestra el dispositivo amplificador, detallando las principales especificaciones las cuales son:

- Frecuencia de trabajo, de 26.5 a 31 GHz.
- Voltaje de alimentación de 4V
- Factor de ruido, 2,6 dB
- Otras especificaciones (Anexo A) (Mouser Electronics, 2017 pág. 1)

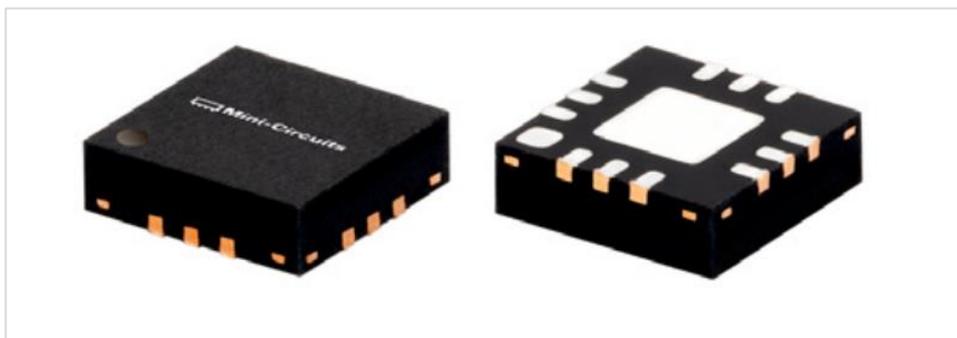


Ilustración 3-11: Amplificador PMA3-313GLN+

Fuente: (Mouser Electronics, 2017).

3.4.2.2 Resistores de película gruesa - SMD 18 ohm

Son un tipo de resistencia que proporciona ciertas propiedades eléctricas y térmicas que son útiles en diversas aplicaciones, como se muestra en la Ilustración 3-12, desempeñan diversos roles, como establecer niveles de referencia, dividir voltajes, o limitar corrientes. Las principales especificaciones son:

- Resistencia de 18 Ohm.
- Régimen de voltaje 140 V
Altura de 0.45 mm
- Longitud de 1.6 mm (KOA SPEER ELECTRONICS, INC, 2023).

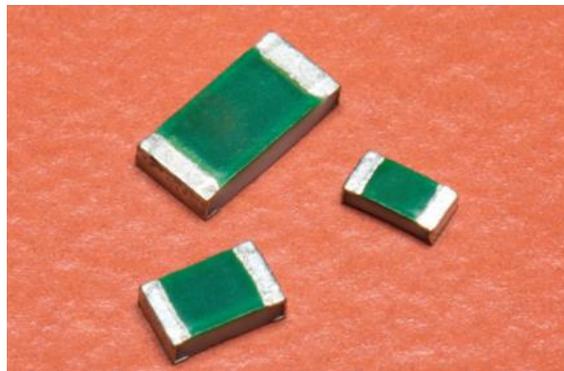


Ilustración 3-12: Resistencias de 18 Ohm

Fuente: (Mouser Electronics, 2023).

3.4.2.3 Capacitores de 5pF y 0.1uF

Los capacitores cerámicos son ampliamente empleados en circuitos electrónicos, especialmente cuando se busca un tamaño físico reducido y una capacidad significativa de almacenamiento de carga. Su función principal en los circuitos electrónicos consiste en almacenar y liberar energía eléctrica (Electronica Online, 2023). La Figura 3-13, presenta el capacitor cerámico que será utilizado, mientras que las especificaciones de estos capacitores se detallan en los Anexos B y Anexo C.



Ilustración 3-13: Capacitores Cerámicos

Fuente: (KOA SPEER ELECTRONICS, INC, 2023).

3.5 Diseño del Circuito Elevador de Frecuencia e Reductor de Frecuencia

En esta sección, se mostrará detalladamente todos los procedimientos llevados a cabo para ensamblar un circuito elevador de frecuencia y un circuito reductor de frecuencia. El un circuito elevador de frecuencia y un circuito reductor de frecuencia fueron fabricados para facilitar las mediciones requeridas una vez implementar la antena Bow-Tie. Además, se incluye los cálculos necesarios para la línea de transmisión para los puertos de entrada y salida del sistema, las cuales se diseñarán utilizando material FR4 con una permitividad relativa de 4,4 y una altura de 1,53 mm. Es fundamental destacar que los dispositivos se adquieren comercialmente y el ensamblaje se realiza siguiendo las recomendaciones del fabricante. En las siguientes Ilustraciones se presentan los diagramas de los circuitos que serán desarrollados.

3.5.1 Esquema del Circuito Elevador de Frecuencia y Reductor de Frecuencia

En la Ilustración 3-14, se muestra el diseño del circuito elevador de frecuencia que incluye un oscilador y un mezclador. Estos componentes tienen la función de combinar dos señales: la señal original emitida por el generador de señales y otra señal generada por el oscilador. Este esquema tiene como función incrementar la frecuencia de la señal original proveniente del generador de señales.

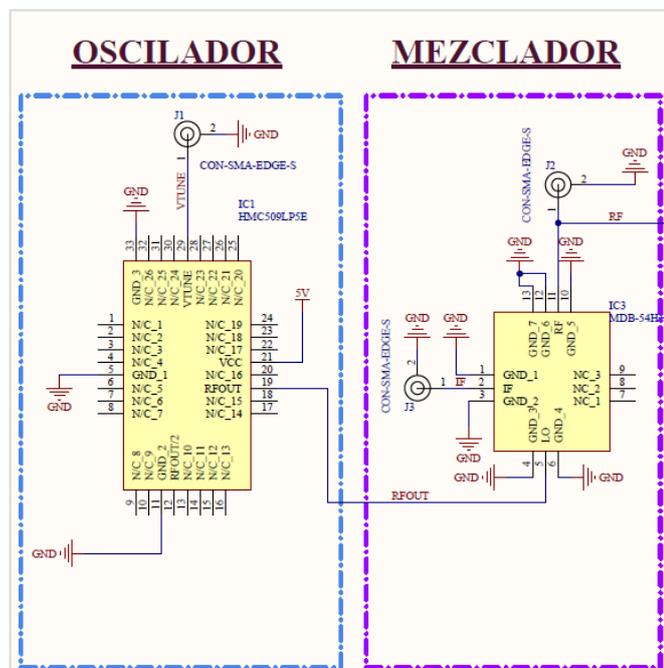


Ilustración 3-14: Esquema del elevador de frecuencia en el transmisor

Realizado por: Guanga, V.,2024

En la Ilustración 3-15, se muestra el diseño del circuito reductor de Frecuencia, que incluye un oscilador, mezclador y filtro pasa bajo, eliminando el ruido no deseado y obteniendo así la señal deseada. Este esquema tiene como función restaurar la señal a la frecuencia original, proveniente del generador de señales.

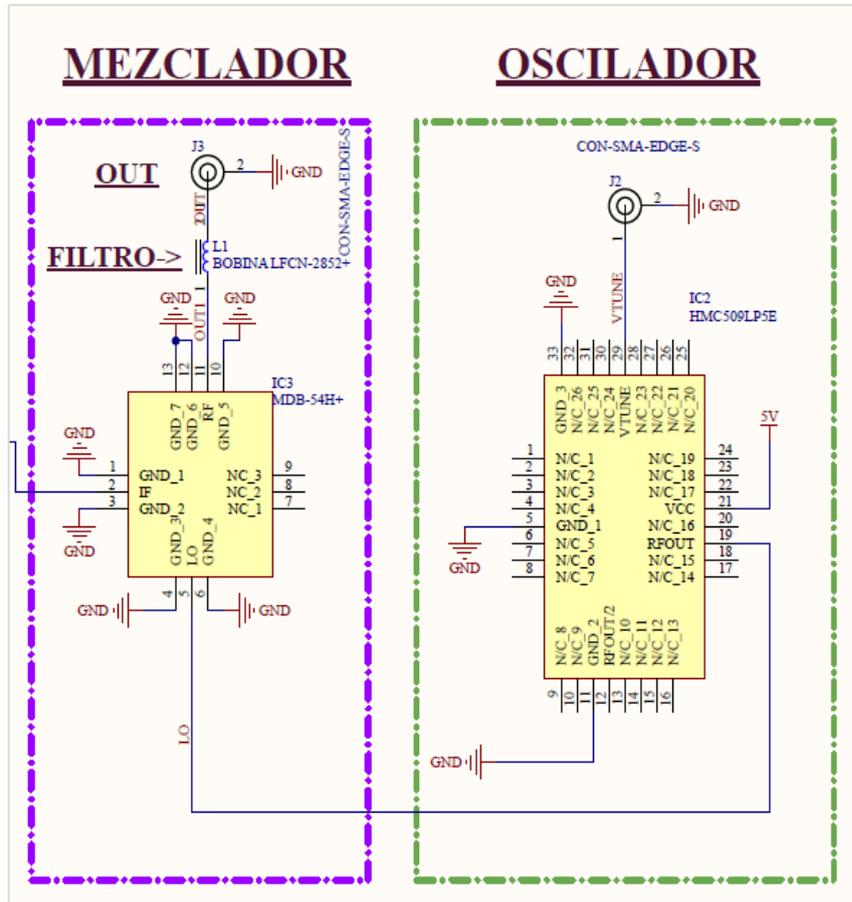


Ilustración 3-15: Esquema del reductor de Frecuencia para el receptor
Realizado por: Guanga, V.,2024.

En la Ilustración 3-16, se detalla el esquema final del circuito elevador de frecuencia, para su posterior implementación. El esquema final de un elevador de frecuencia para la etapa de transmisión, consta de un Oscilador HMC509LP5/509LP5E, la cual entra por el puerto IF, el cual se encarga de genera una señal en frecuencia de 7.8 GHz - 8.8 GHz, la respuesta en frecuencia variara dependiendo del voltaje VTUNE que inyectemos al circuito, con respecto a la frecuencia que se desee obtener, el VTUNE=4 V, para que el oscilador dé una respuesta en frecuencia de 8 GHz, dicha señal va al mezclador MDB-54H+, la cual se combina con la señal de referencia proveniente del Generador de señales Anritsu MG3690C, dicha señal se conecta al oscilador por el puerto LO.

La salida del mezclador es el puerto RF, el cual es la suma de las frecuencias de entrada, esta ingresa a un amplificador PMA3-313GLN+ mediante el puerto RF-IN, el cual es el encargado de aumentar su amplitud en respuesta, mejorando así la eficiencia de la señal, la señal resultante se representa por el puerto RF-OUT. Este circuito tiene dos salidas: una es la señal combinada generada por el mezclador, cuya frecuencia es la suma de las señales originales, representada por el puerto RF del mezclador y la otra salida es la señal amplificada final, representada por el puerto RF-OUT del amplificador.

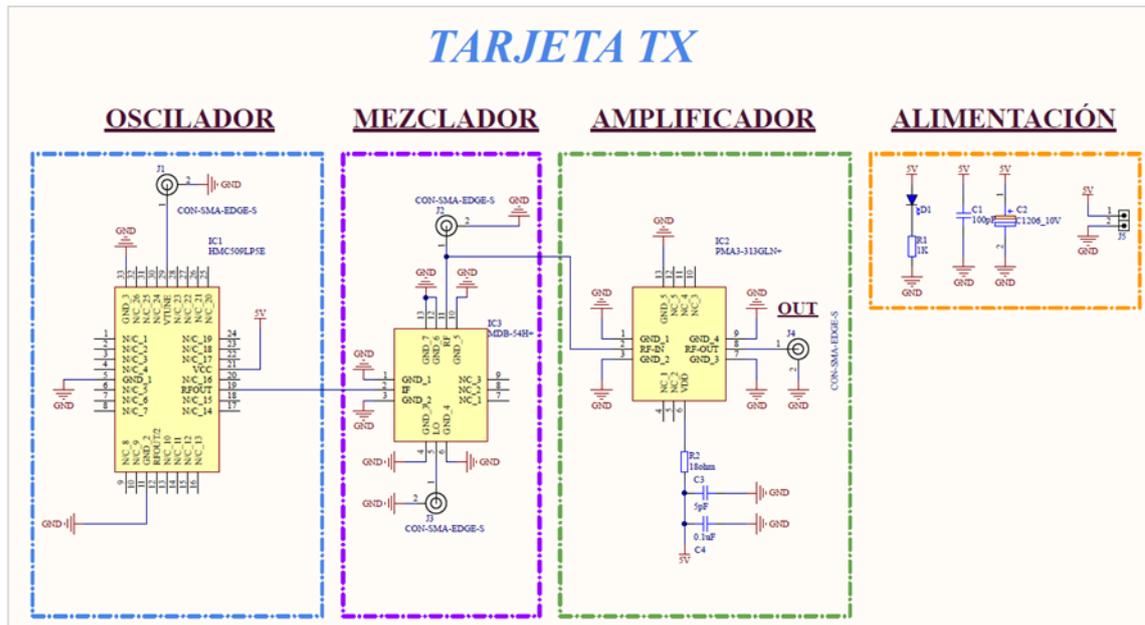


Ilustración 3-16: Esquema Final del elevador de frecuencia para el transmisor

Realizado por: Guanga, V., 2024

En la Ilustración 3-17, se detalla el esquema final circuito reductor de frecuencia, para su posterior implementación. El receptor consta de los mismos componentes que el elevador de frecuencia para el transmisor. La antena capta la señal entrante enviada por el Transmisor, conectada al puerto PF-IN, esta señal amplificada inicialmente por un Amplificador de bajo ruido PMA3-313GLN+, para aumentar su amplitud y mejorar la relación señal-ruido.

Posteriormente, la señal amplificada se dirige al mezclador MDB-54H+, mediante el puerto LO, donde se lleva a cabo el proceso de mezcla. En esta etapa, la señal de la antena se combina con la señal generada por el oscilador HMC509LP5/509LP5E, mediante el puerto IF. El resultado de esta mezcla es la suma y la diferencia de las frecuencias de entrada.

Después del mezclador, la señal pasa a través de un filtro. Este filtro tiene la función de seleccionar la frecuencia deseada y eliminar posibles componentes no deseados de la señal, como ruido o interferencias. Esta etapa de filtrado es esencial para mejorar la calidad de la señal y garantizar que solo las frecuencias de interés pasen al siguiente paso del proceso de recepción. La salida del filtro es el puerto de salida final, este se envía luego al Analizador de Espectros Anritsu MS2724C, donde se realiza la detección y análisis final de la señal.

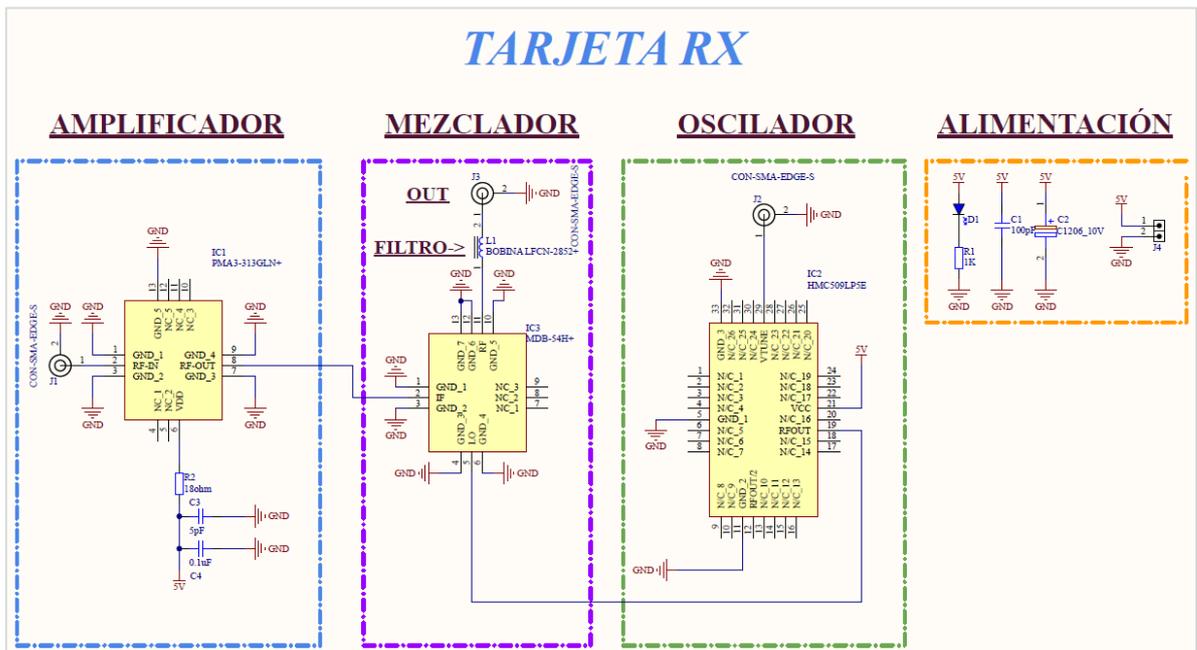


Ilustración 3-17: Esquema Final del reductor de frecuencia para el receptor

Realizado por: Guanga, V.,2024

3.5.2 Dispositivos electrónicos que se emplearán

3.5.2.1 HMC509LP5- Osciladores VCO 7.8 - 8.8 GHz

La Ilustración 3-18, muestra el esquema del Oscilador, y además los pines que caracteriza dicho dispositivo mencionado. En el Anexo D se muestra las especificaciones de este oscilador el cual trabaja a frecuencia de 7.8-8.8 GHz. Sus principales especificaciones son:

- Frecuencia de 7.8 GHz a 8.8 GHz.
- Temperatura -40 °C a +85 °C.
- Régimen corriente, 270mA.
- Voltaje 4.75 V a 5.25 V (MOUSER ELECTRONICS, 2022 pág. 1).

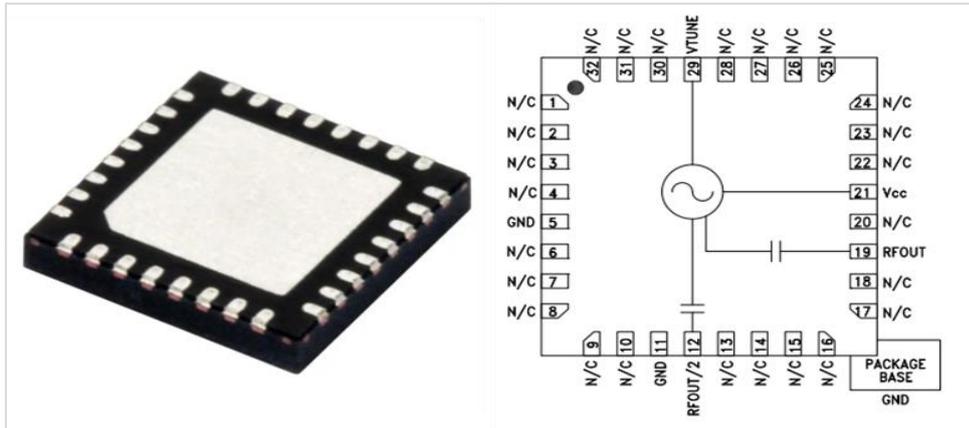


Ilustración 3-18: Esquema del HMC509LP5- Osciladores VCO 7.8 - 8.8 GHz

Fuente: (MOUSER ELECTRONICS, 2022).

3.5.2.2 Mezclador doble equilibrado- MDB-54H+

La Ilustración 3-19, muestra el esquema del Mezclador, los pines que caracteriza dicho dispositivo mencionado, además las características principales que presentan este dispositivo son las siguiente:

- Frecuencia RF de 20 GHz a 50 GHz.
- Temperatura -40 °C a +85 °C.
- Frecuencia LO de 20 GHz a 50 GHz.
- Frecuencia IF de DC a 20 GHz (MINI-CIRCUITS, 2023).
- Especificaciones Adicionales (Anexo E).

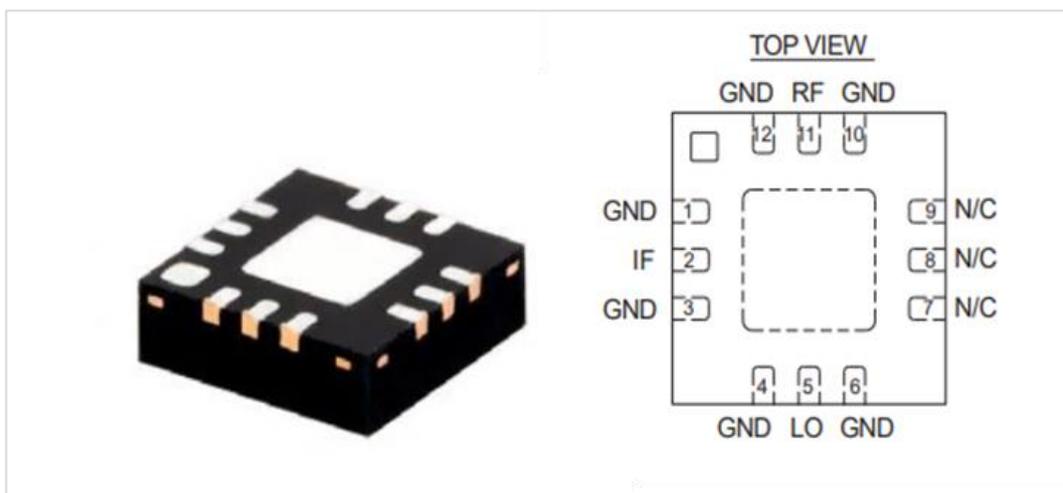


Ilustración 3-19: Esquema del Mezclador doble MDB-54H+

Fuente: (MINI-CIRCUITS, 2023).

3.5.2.3 Filtro pasa bajo - LFCN-2852+

La Ilustración 3-20, muestra el Filtro pasa bajo, utilizado para el desarrollo de las placas elevadoras de frecuencia, además las características principales que presentan el filtro pasa bajo son las siguiente:

- Banda de frecuencia de DC a 28.5 GHz.
- Impedancia de 50 Ohm.
- Temperatura -55 °C a +125 °C (MINI-CIRCUIT, 2023).
- Especificaciones Adicionales (Anexo F)



Ilustración 3-20: Filtro pasa bajo – LFCN-2852+

Fuente: (MINI-CIRCUITS, 2023).

3.6 Diseño Placa PCB del amplificador y elevador de frecuencia

3.6.1 Creación pistas para ensablado final

$$Z_{Amp} = 50\Omega$$

$$A_{Amp} = \frac{Z_{Amp}}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r}\right)}$$

$$A_{Amp} = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4,2 + 1}{2} + \frac{4,2 - 1}{4,2 + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{4,2}\right)}$$

$$A_{Amp} = 1.501$$

$$\frac{w}{d} > 2;$$

$$B = \frac{377\pi}{2(Z_{Amp})\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$B = \frac{377\pi}{2(50)\sqrt{4,4}}$$

$$B = 9.667$$

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \right]$$

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} \left[9.667 - 1 - \ln((2 * 9.667) - 1) + \frac{4,2 - 1}{2 * 4,2} \left(\ln(9.667 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{4,4} \right) \right]$$

$$\frac{w}{d} = 4.007$$

$$w = (4.007)(0,6 \text{ mm}) = 2,4042 \text{ mm}$$

3.6.2 Diseño Final placas PBC

Según los cálculos detallados previamente, se concluye que se requiere un ancho de línea de 2,3498 mm para lograr el acoplamiento deseado a 50 Ω. La Ilustración 3-21, presenta el diseño definitivo de la placa transmisora, que fue creado mediante un software de diseño de circuitos impresos en placas PCB, como se mencionó anteriormente contiene los elementos especificados en la ilustración 3-14, mencionada anteriormente.

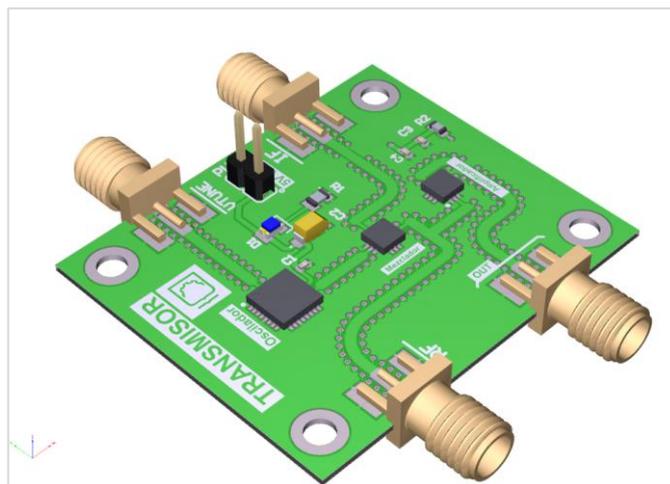


Ilustración 3-21: Placa PCB del circuito elevador de frecuencia para el transmisor

Realizado por: Guanga, V., 2024.

En la Ilustración 3-19, se presenta el diseño de la placa receptora, que fue creado mediante un software profesional de diseño de circuitos impresos en placas PCB. Es importante destacar que este diseño incorpora los componentes específicos detallados en la Ilustración 3-22, previamente mencionada para contextualizar el proceso.

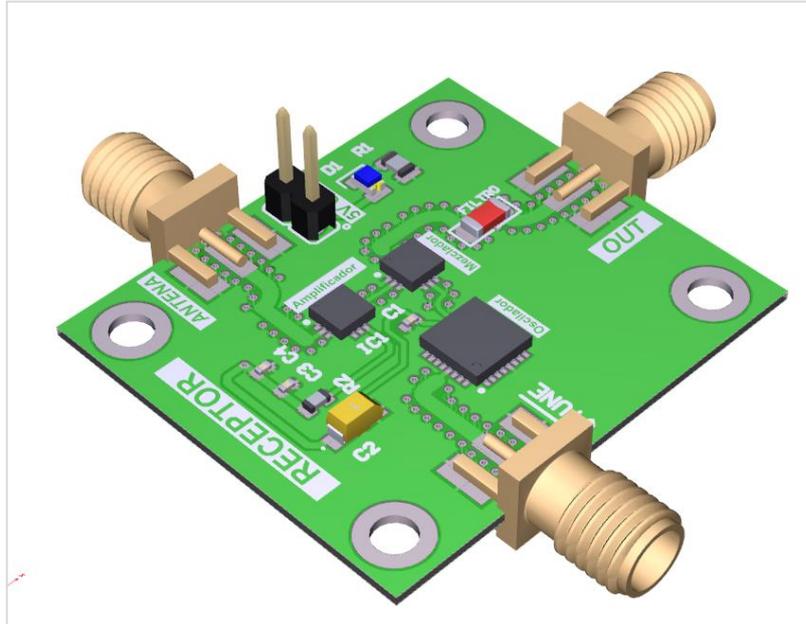


Ilustración 3-22: Placa PCB del circuito reductor de frecuencia para el receptor

Realizado por: Guanga, V.,2024.

3.7 Implementación

En esta sección, se detallan los procedimientos necesarios para llevar a cabo el ensamblaje completo tanto de la antena diseñada, como el elevador de frecuencia para la transmisión y recepción. Cada uno de estos procesos ha sido cuidadosamente elaborado para asegurar la máxima precisión en cuanto a dimensiones y posicionamiento, garantizando así la coherencia entre los cálculos teóricos, las simulaciones y la aplicación práctica.

3.7.1 Implementación esquema final

Una vez completado el diseño de las placas, se enviaron los archivos de fabricación a JLCPCB. Esta empresa utiliza tecnología de vanguardia para fabricar placas de circuito PCB impreso con una precisión excepcional. El proceso de fabricación incluye la aplicación de capas de material conductor sobre un sustrato aislante. Como se puede observar en la ilustración 3-23, las placas fueron impresas en el material FR4.

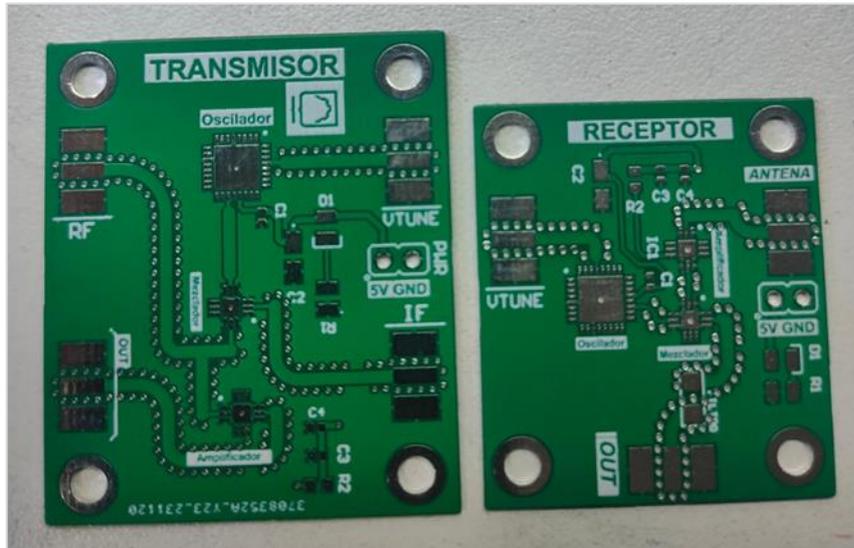


Ilustración 3-23: Placas Implementadas en el sustrato FR4

Realizado por: Guanga, V.,2024.

En la ilustración 3-24, se observa el procedimiento para la soldadura de los componentes adquiridos en la placa diseñada, junto con un enfoque ampliado a través de una lupa. Este enfoque ampliado permite visualizar los chips y demás elementos como capacitores, mencionados desde la sección 3.4.2.1., mencionados anteriormente.



Ilustración 3-24: Proceso de soldado, utilizando una lupa de aumento de las placas PCB

Realizado por: Guanga, V.,2024.

A continuación, en la Figura 3-25, se muestra el diseño definitivo tanto de la placa transmisora y como de la placa receptora, conforme a lo expuesto en los apartados 3.5.1 y 3.5.2 del presente trabajo. En este diseño final, se ha llevado a cabo la soldadura de todos los pines empleados en la configuración, garantizando así la integridad y funcionalidad óptima de los circuitos.

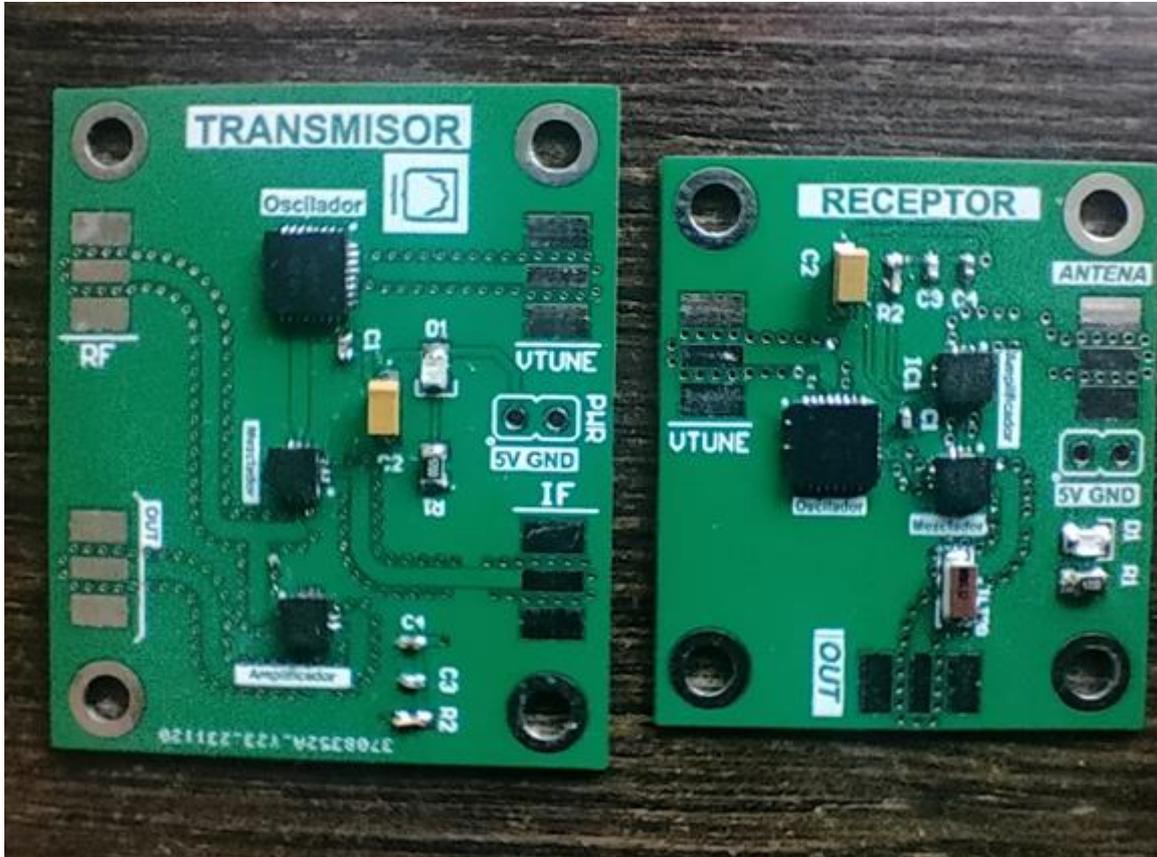


Ilustración 3-25: Placas implementadas del circuito elevador de frecuencia y el circuito reductor de frecuencia para el receptor

Realizado por: Guanga, V.,2024

Para culminar este proceso de montaje, en las Ilustración 3-26 e Ilustración 3-27, se muestra el ensamblaje completo de las placas, resaltando la pre-soldadura de los puertos de alimentación de corriente. Esta previsión se realiza con el objetivo de simplificar y agilizar el suministro de energía a las placas, garantizando así un rendimiento óptimo del oscilador descrito en la sección 3.5. Es fundamental recalcar que los detalles adicionales relativos a este procedimiento específico han sido exhaustivamente documentados en los Anexos correspondientes, proporcionando una guía detallada para cualquier consulta adicional.

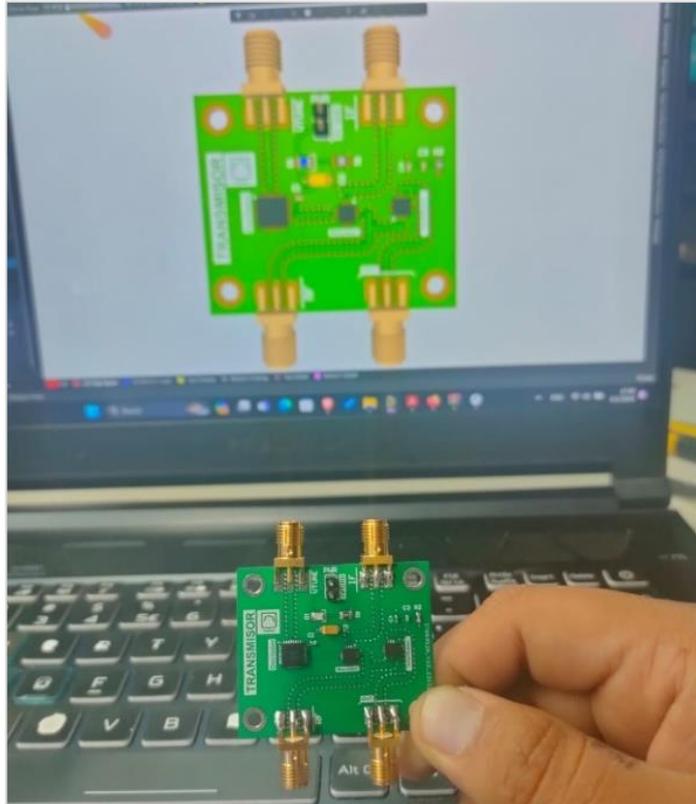


Ilustración 3-26: Implementación del circuito elevador de frecuencia
Realizado por: Guanga, V.,2024

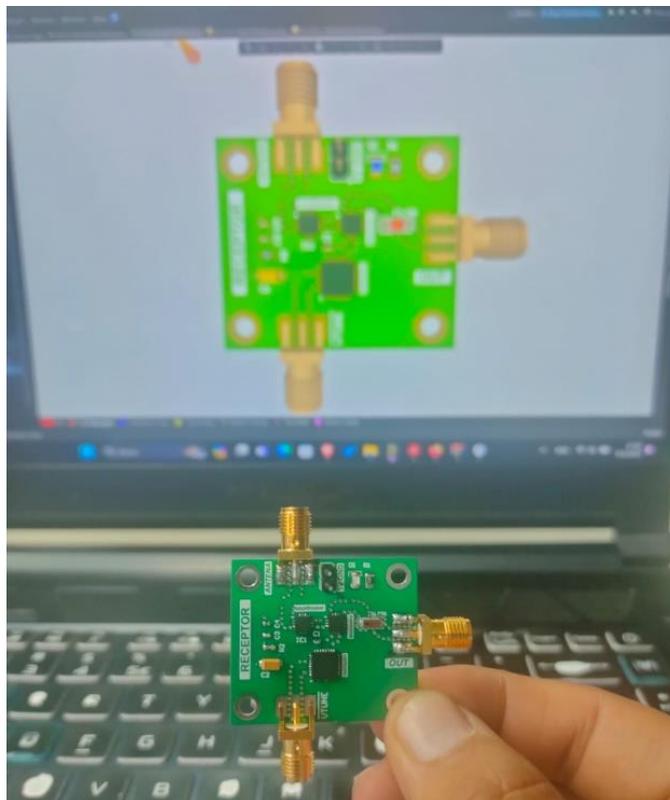


Ilustración 3-27: Implementación del circuito reductor de frecuencia
Realizado por: Guanga, V.,2024.

3.7.2 Implementación Antena

En la Ilustración 3-28, se muestra la impresión de la antena en papel termo adherible, los puertos que van a ser colocados en cada antena y el material ROGER RT/4003C, conocido por sus propiedades dieléctricas excepcionales que optimizan el rendimiento de la antena. Además, se aprecia la impresión de la antena cuidadosamente realizada en papel termo adherible, destacando la precisión en la reproducción del diseño, además los conectores SMA hembra a 50 Ω , asegurando así una conexión precisa y eficiente en la configuración final del sistema.

En la ilustración 3-29, se presentan las antenas tras haber sido sometidas al procedimiento de eliminación del exceso de cobre mediante el tratamiento con Ácido Cloruro Férrico, tal como se detalló exhaustivamente en la sección 3.2.5. del presente informe técnico. Es importante destacar que, en este punto del proceso de fabricación, las antenas aún no han sido unidas con los conectores SMA hembra a 50 Ω , lo que constituye la siguiente fase en el ensamblaje y la configuración meticulosa de estas antenas para su integración final en el sistema.



Ilustración 3-28: Materiales para la implementación de la Antena Bow-tie

Realizado por: Guanga, V.,2024.

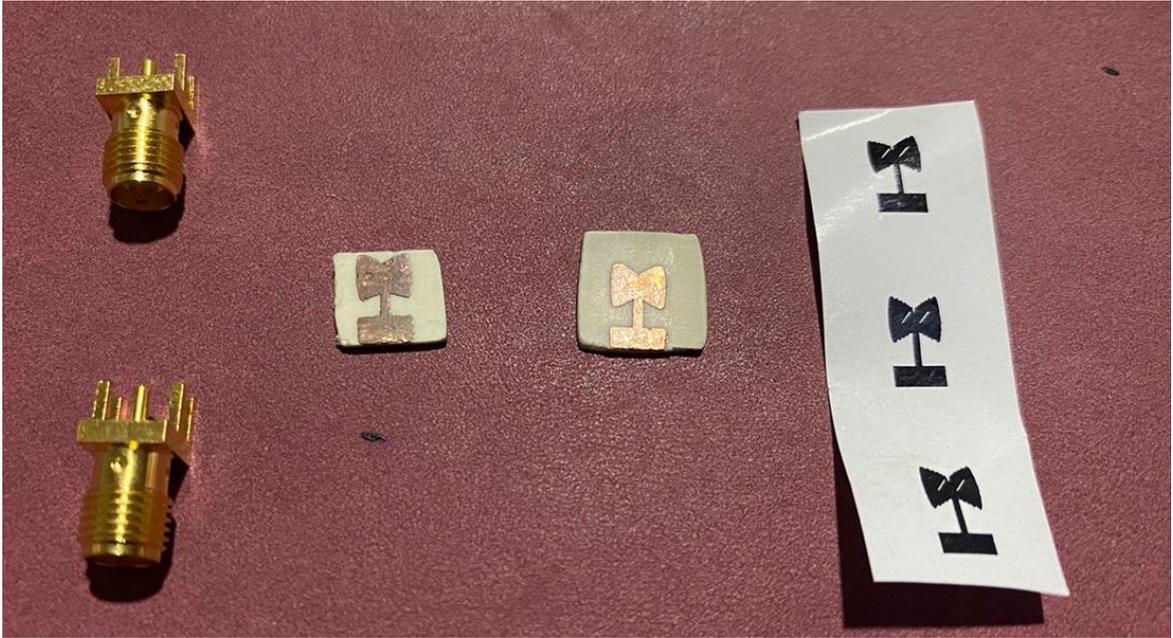


Ilustración 3-29: Proceso de la implementación de la Antena Bow-tie, mediante la técnica del planchado

Realizado por: Guanga, V.,2024

Finalmente, en la ilustración 3-30, se muestran las antenas definitivas luego de completar el detallado procedimiento de eliminación del cobre sobrante. Cada antena ha sido meticulosamente equipada con conectores SMA hembra a 50 Ω . Este paso fundamental del proceso de fabricación no solo garantiza la calidad y el correcto funcionamiento de las antenas.



Ilustración 3-30: Implementación final de las Antenas Bow-tie

Realizado por: Guanga, V.,2024.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La evaluación del rendimiento de la antena activa para la tecnología 5G se llevó a cabo mediante la revisión de los resultados. Se tomo en cuenta los resultados de la simulación para poder su comparación con los resultados de las mediciones realizadas en el laboratorio de microondas de la facultad de informática y electrónica, utilizando los equipos mencionados anteriormente. A continuación, se detallaron diferentes pruebas realizadas, y su posterior análisis de dichos resultados.

4.1 Analisis y Resultados Prueba 1

4.1.1 Esquema del Escenario

Para el primer escenario, se encuentra la antena conectada al analizador de redes vectoriales, mediante un adaptador coaxial SMA, tal como se muestra en la Ilustración 4.1, esta configuración facilita la evaluación de las características de la antena, analizando el parámetro S11 y respuesta de frecuencia.

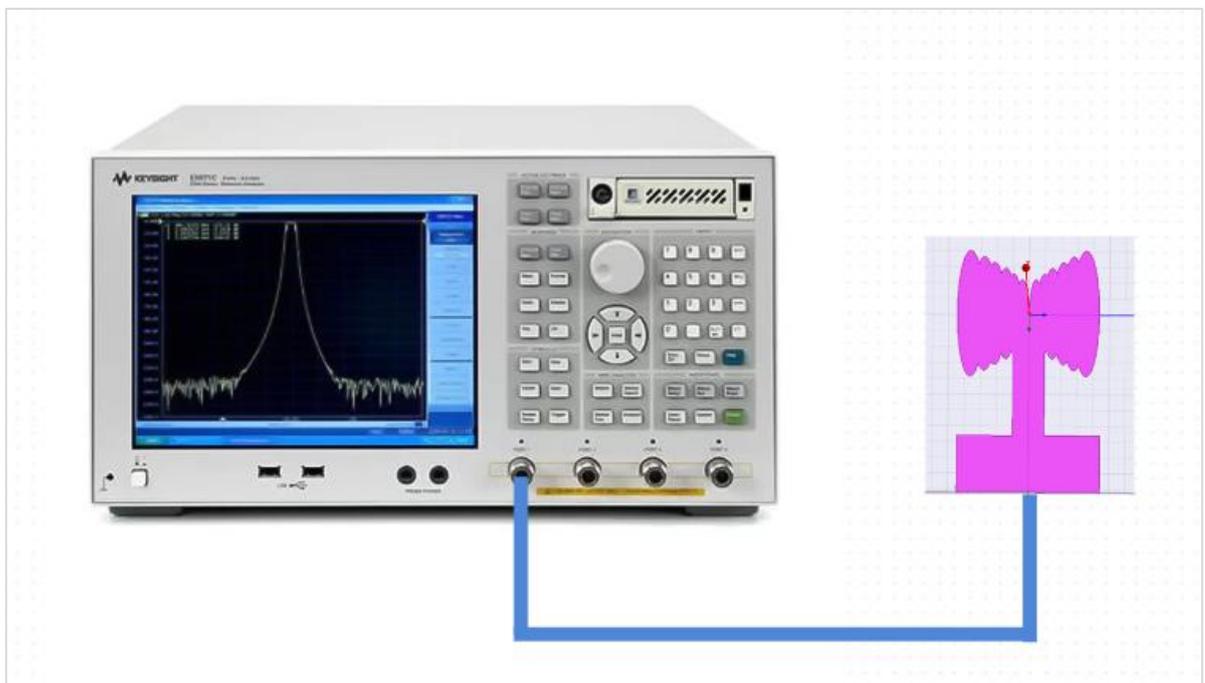


Ilustración 4-1: Esquema del primer escenario para la medición del parámetro S11 de la antena Bow-tie una vez implementada

Realizado por: Guanga, V.,2024.

4.1.2 Resultados Prueba 1

En esta sección, se presenta el escenario 1, en el cual la antena Bow-Tie se encuentra conectada al analizador de redes vectoriales (VNA) con el propósito de medir y caracterizar dispositivos como antenas. Se centra en la evaluación del parámetro S11 de la antena, el cual proporciona información sobre la eficiencia de la antena a diferentes frecuencias.

Se realiza una verificación y análisis de las frecuencias adicionales en las que la antena está operando, con lo cual se demostró que la antena está en total funcionamiento y tiene el mismo comportamiento, que la simulación anteriormente simulada, en el rango de los 10 GHz hasta los 20GHz. En la Ilustración 4-2, representa la implementación del escenario planteado. Es esencial tener en cuenta que el Analizador de Red de Vector tiene como rango máximo de análisis 20 GHz.



Ilustración 4-2: Verificación del funcionamiento de la Antena bow-tie en el VNA

Realizado por: Guanga, V.,2024.

En la Ilustración 4-3, se muestran los resultados obtenidos mediante el software de diseño de antenas, donde se analiza el parámetro S11, el ancho de banda y las frecuencias de operación de la antena diseñada, el análisis de la simulación fue realizado desde los 10 GHz hasta los 30 GHz.

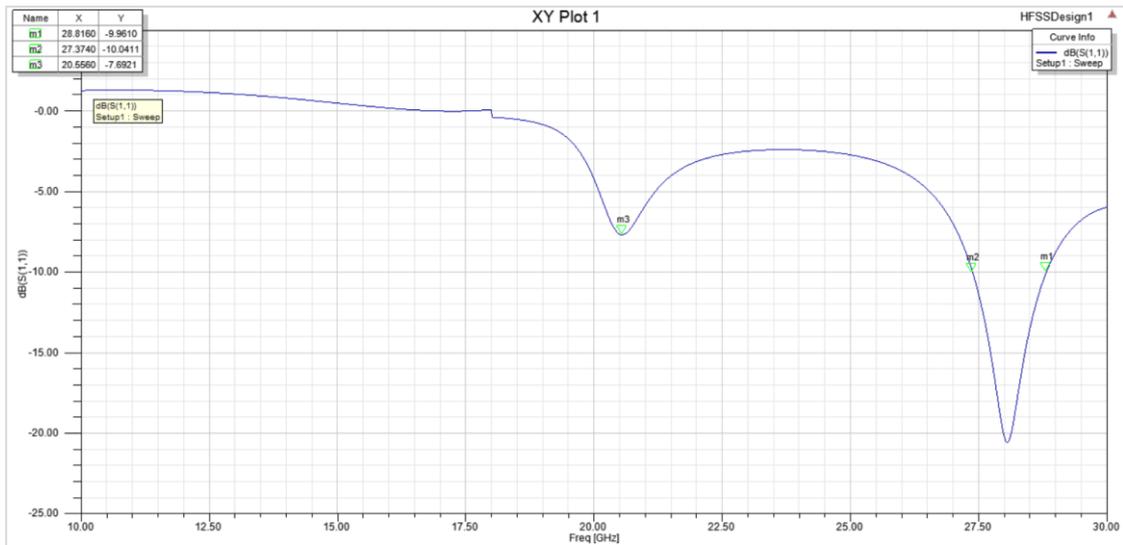


Ilustración 4-3: Resultados obtenidos del parámetro S11 en el software de diseño de la antena bow-tie

Realizado por: Guanga, V.,2024.

En la Ilustración 4-4, se presentan los resultados obtenidos utilizando el analizador de redes vectoriales (VNA), analizado en el rango de frecuencia de los 10 GHz hasta los 20 GHz, tomando en cuenta que el VNA tiene como rango máximo de medición 20 GHz.

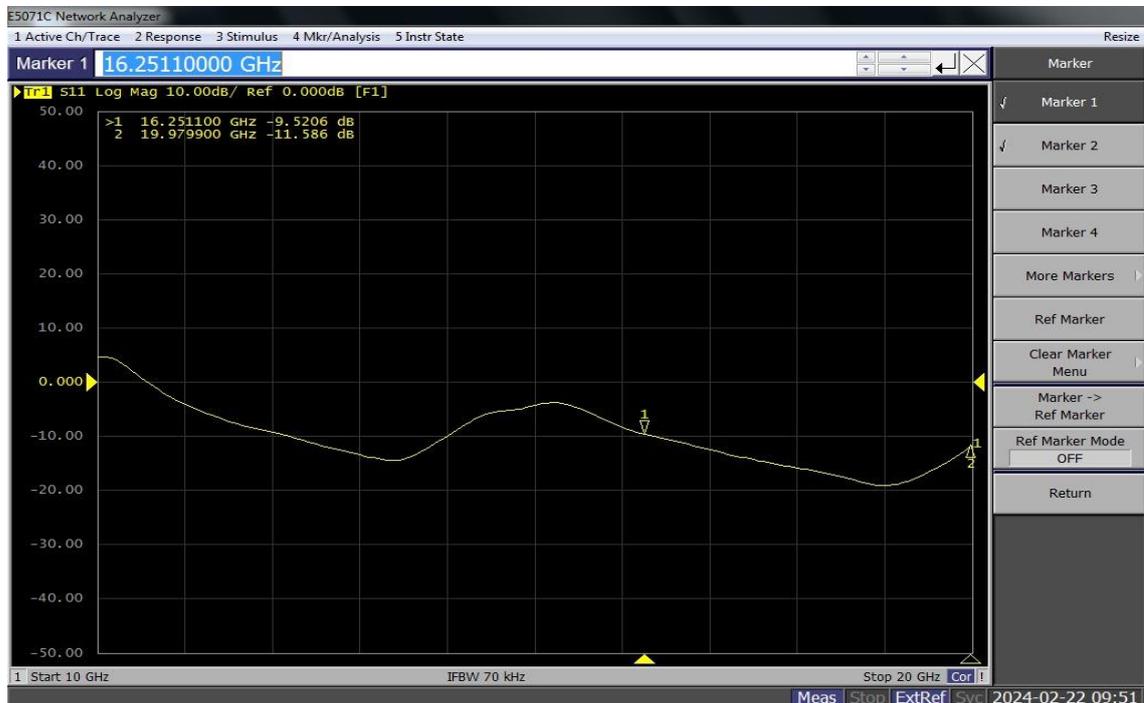


Ilustración 4-4: Resultados obtenidos de la antena bow-tie del parámetro S11 en el Analizador de Redes Vectoriales (VNA)

Realizado por: Guanga, V.,2024.

En la Ilustración 4-5, se tiene la comparación del coeficiente de reflexión de la antenna simulada vs el coeficiente de reflexión la antenna implementada, analizada en el rango de 10 GHz - 21 GHz. El coeficiente de reflexión de la antenna implementada está representado por la figura de color roja, y el coeficiente de reflexión de la antenna simulada está representada por la figura de color azul.

Como se observa la antenna simulada presenta una respuesta en frecuencia por encima de los -10 dB, desde los 18 GHz a 21 GHz, pero en la implementación muestra una respuesta más significativa del parámetro S11 en estas frecuencias, con esto se determinó que la antenna funciona en la banda de 18 GHz y 19GHz, con esto se permitió realizar mediciones a estas frecuencias para comprobar el funcionamiento de la antenna.

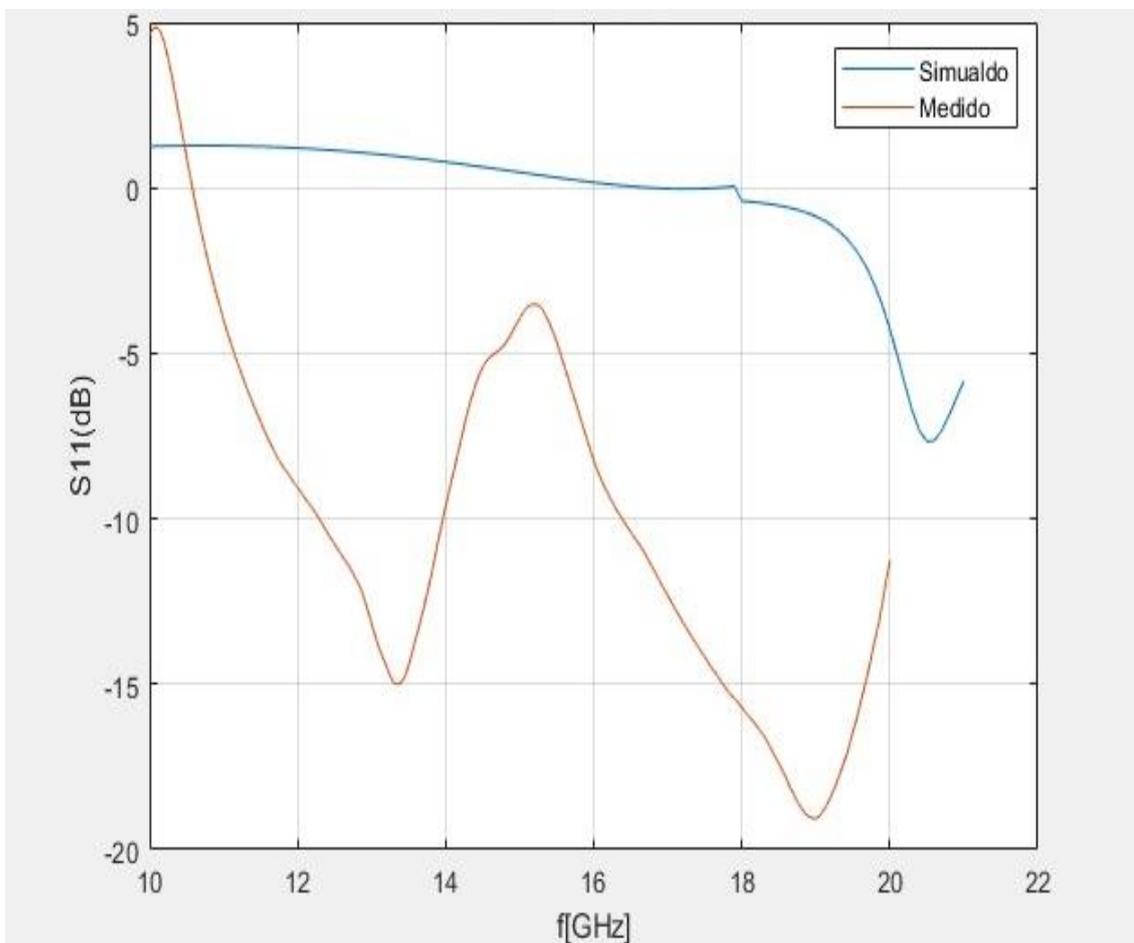


Ilustración 4-5: Resultados obtenidos del Simulador vs los resultados obtenidos por el VNA, del parámetro S11, de la antenna bow-tie, implementada y simulada

Realizado por: Guanga, V.,2024.

4.2 Análisis y Resultados Prueba 2

4.2.1 Esquema del Escenario

En el segundo escenario, se detalla el sistema transmisor el cual está compuesto por un generador de señales, el circuito elevador de frecuencia mencionada en la sección 2.6.2 y la antena transmisora. Por otro lado, en el sistema receptor incluye la antena receptora, el circuito reductor de frecuencia descrita en la sección 2.6.2, conectadas mediante un cable coaxial al Analizador de Espectros MS2724C, como se muestra en la Ilustración 4-13.

El cual con esta medición se busca poder evaluar el comportamiento de la antena, en función del patrón de radiación con respecto a la potencia que emite la antena transmisora hacia la antena receptora, dicha medición evaluando la potencia cada 5 grados de la posición de la antena receptora respecto a la transmisora.

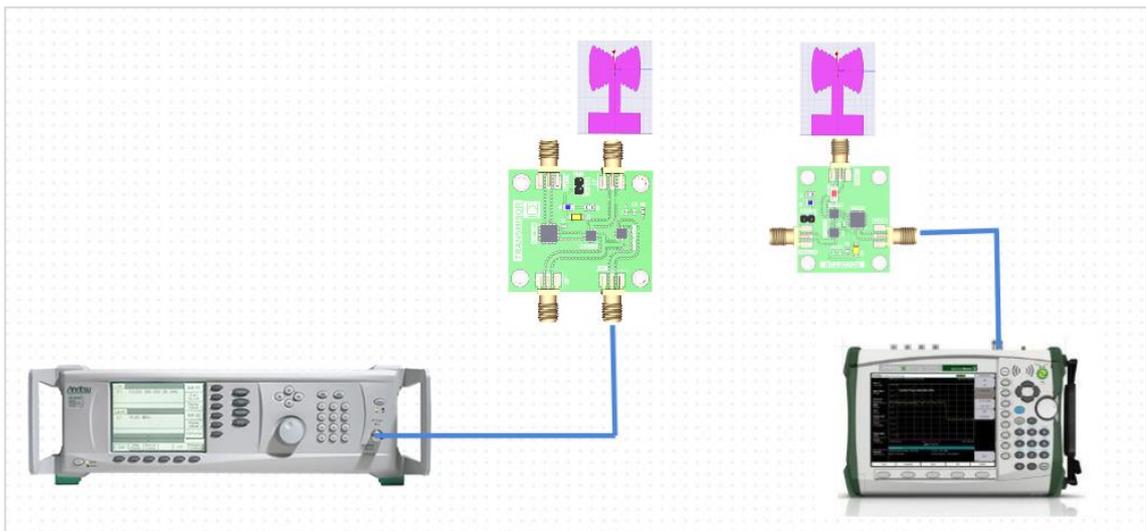


Ilustración 4-6: Esquema del escenario para la medición del patrón radiación en función de la potencia, de la antena Bow-tie en la banda de 28GHz

Realizado por: Guanga, V.,2024.

4.2.2 Resultados Prueba 4

La Ilustración 4-7, se muestra el cuarto escenario, respectivamente montado la medición de patrón de radiación, a 20 GHz, entre la antena transmisora y la antena receptora.



Ilustración 4-7: Utilización del generador de señales, analizador de Espectros y fuente de poder variable para las mediciones de la antena Bow-tie a 28GHz

Realizado por: Guanga, V.,2024.

En la Ilustración 4-8, se presenta el patrón de radiación obtenido por el software para el diseño de antenas para la frecuencia de 28 GHz. El cual muestra la representación gráfica de como la antena recibe o emite energía en diferentes direcciones en el espacio, dicho patrón está influenciado por diversos factores, como el diseño de la antena, la frecuencia de operación. En esta ilustración, se observó que se tiene un lóbulo principal, a 0 grados con un valor máximo de 25 dB.

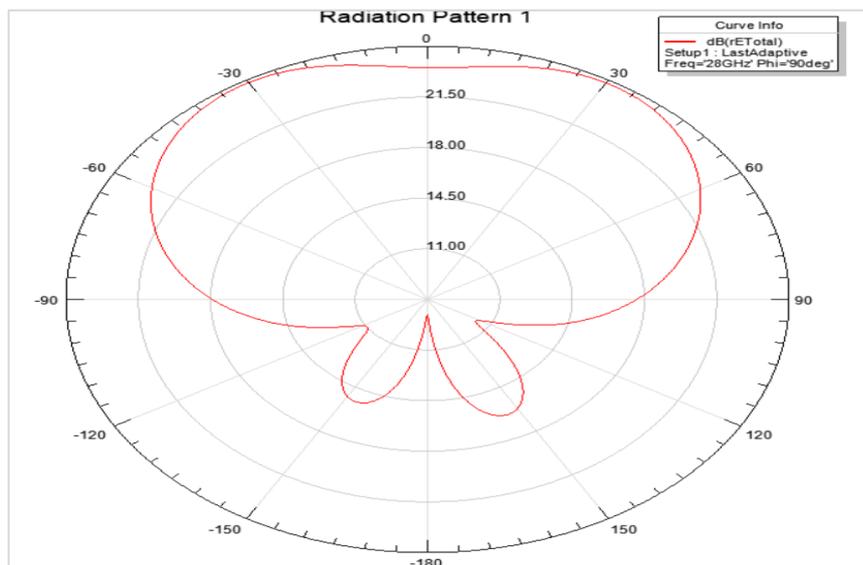


Ilustración 4-8: Resultado de la simulación del patrón radiación en función de la potencia, de la Antena Bow-tie en la banda de 28 GHz

Realizado por: Guanga, V.,2024.

En la Ilustración 4-9, se muestra el resultado del patrón de radiación obtenido, con el escenario planteado anteriormente, y de la antena implementada, a una frecuencia de 20 GHz, que es una de las frecuencias en las que trabaja la antena como se mencionó en la sección 4.1.2, a una distancia de 10 cm entre antenas, se obtiene un lóbulo principal directivo a un Angulo de 0 grados con una potencia máxima de -60 dB, y en la parte posterior cuenta con 3 lóbulos secundarios, con una potencia máxima de -64 dB.

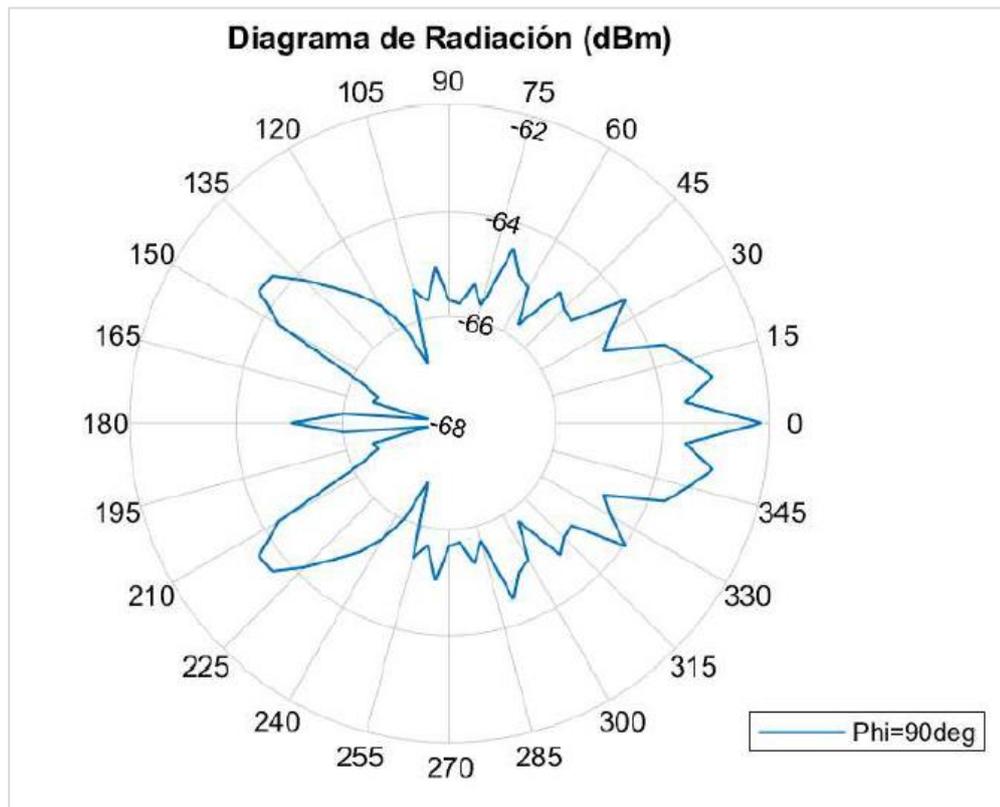


Ilustración 4-9: Resultado del patrón radiación en función de la potencia, de la antena Bow-tie en la banda de 28GHz, mediante el analizador de Espectros

Realizado por: Guanga, V.,2024.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al concluir este proyecto de Titulación, se han derivado conclusiones de gran relevancia y se han identificado recomendaciones sustanciales, las cuales se exponen detalladamente a continuación:

5.1 CONCLUSIONES

- El manejo del software para diseñar antenas facilitó el proceso de implementación de la antena activa en la banda de los 28 GHz para la tecnología 5G requerida, haciendo uso del sustrato ROGER RT/4003C, dicho sustrato brinda un mejor rendimiento en altas frecuencias y una menor susceptibilidad a las interferencias electromagnéticas, el cual permite una transmisión más efectiva de la señal. Logrando con esto, tener una similitud considerable con las pruebas realizadas en el analizador de redes vectoriales Network Analyzer Keysight E5071C, hasta el rango de frecuencia de 20 GHz, permitido por este modelo de analizador.
- Para efectuar las mediciones en la banda de 28 GHz, se aprovecharon los recursos del laboratorio de microondas, los cuales tienen una capacidad de trabajo que abarca hasta los 20 GHz. Además, se desarrolló un circuito de elevación de frecuencia específicamente diseñado para elevar la frecuencia a 28 GHz en el transmisor. Para garantizar una operación fluida en este rango deseado, se implementó también un circuito de reducción de frecuencia en el receptor, con el propósito de ajustar la señal a 20 GHz. Este enfoque estratégico permitió realizar mediciones precisas en la banda objetivo, facilitando así el avance de la investigación con resultados significativos y confiables.
- Para el análisis en la banda de 28 GHz, el generador de señales envía la señal a 20 GHz, esta ingresa al elevador de frecuencia que cuenta con un oscilador de 8 GHz y un mezclador, el cual teóricamente genera una señal de la suma y la diferencia de estas dos señales, es decir a 28 GHz y 12 GHz, en el cual el oscilador trabaja a frecuencias de 20 GHz a 50 GHz, eliminando así la frecuencia de 12 GHz, transmitiendo únicamente la señal de 28 GHz, esta señal pasa por un amplificador, el cual aumenta la potencia de la señal que se envía desde la antena transmisora, esta señal es transmitida por el espacio hacia el receptor, donde la antena transmisora capta la señal a 28 GHz, esta señal ingresa al circuito reductor de frecuencia el cual pasa por un mezclador de 8GHz ,disminuyendo

así la frecuencia a 20 GHz, donde esta señal ingresa al Analizador de espectro y con ello se obtuvo el patrón de radiación en función de la potencia, de la antena Bow-tie en la banda deseada, teniendo como resultado un patrón de radiación directivo.

- La antena Bow-tie modificada brinda un patrón de radiación directivo a un ángulo de 0° con una potencia de -60 dB, y en la parte posterior con 3 lóbulos secundarios, con una potencia de -64 dB, en función de la potencia. La elaboración de la antena bow-tie activa modificada mediante elipses resuelve la necesidad crítica de una cobertura precisa y eficiente, garantizando una entrega rápida de datos en aplicaciones de alta velocidad, además reducir latencia y maximiza el rendimiento del sistema 5G, ofreciendo una conectividad sólida en entornos urbanos densos y áreas de alta demanda de datos.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, para futuras pruebas se implemente una antena activa en la banda de 28 GHz para la tecnología de 5G utilizando el sustrato Rogers Ceramic Laminate 4003, con la finalidad de realizar pruebas comparativas del rendimiento de la misma, con respecto a los resultados obtenidos con la antena implementada en el sustrato Roger RT/4003C, que fue realizada en este trabajo de titulación.
- Se recomienda que, para futuras pruebas se realice el análisis también de la antena bow-tie en la banda de 28 GHz, sin la utilización de un amplificador de bajo ruido, con la finalidad de comparar del rendimiento de esta, con respecto a los resultados obtenidos con la antena implementada en el sustrato Roger RT/4003C, que fue realizada en este trabajo de titulación.
- Se sugiere realizar una calibración adecuada de cada uno de los equipos utilizados, como el Generador de Señales Anritsu MG3690C, el Analizador de Espectros Anritsu MS2724C y el analizador de redes vectoriales Network Analyzer Keysight E5071C. Antes de realizar las pruebas y mediciones, esto garantizará una toma de datos precisos en los diferentes escenarios. Así mismo, es importante asegurarse de que las placas transmisoras y receptoras estén correctamente polarizadas y alimentadas con el voltaje adecuado para su funcionamiento óptimo.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AGIWAL, Mamta & KWON, Hyecheon.** "Una encuesta sobre la conectividad dual 4G-5G: el camino hacia la implementación de 5G". *IEEE ACCESS* [en línea], 2020, vol. 9. págs.16195 - 16198.[Consulta: 14 noviembre de 2023]. ISSN 2169-3536 . Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9328255>.
2. **AGIWAL, Mamta & Roy, Abhishek.** "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey". *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS* [en línea], 2016, vol. 18, págs.1620 - 1623. [Consulta: 14 noviembre 2023]. ISSN 1553-877X. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7414384>.
3. **ANRITSU.** *RF/Microwave Signal Generators*. [en línea]. Japón: 2023. [Consulta: 1 diciembre 2023]. Disponible en: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/datasheet/11410-00515AA.pdf>.
4. **Ansys HFSS.** Simulador de campo electromagnético 3D para RF y diseño inalámbrico. [blog].Estados Unidos: 2023. [Consulta: 15 Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.
5. **ARIZACA CUSICUNA, Dennis Noel.** Diseño de antenas de banda de frecuencia milimétrica para sistemas de comunicación 5G. [En línea] . (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universitat Politècnica de València. Valencia-España. 2021. págs.12-37. 2021. [Consulta:2023-11-12]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174418/Arizaca%20-%20Diseno%20de%20antenas%20%20en%20banda%20de%20frecuencias%20milimetricas%20para%20sistemas%20de%20comunicaciones....pdf?sequence=1>.
6. **ARROW.** *Multiplificadores*. [en línea]. [Consulta: 30 Noviembre 2023].Disponible en: <https://www.arrow.com/es-mx/categories/rf-and-microwave/rf-modules/rf-multipliers>.
7. **BALANIS, Constantine.** *Teoría de Antenas: Análisis y Diseño* [en línea]. 3° ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2005. [Consulta: 01 diciembre 2023]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=v1PSZ48DnuEC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.

8. **CASTRO GALÁN, David.** Aplicación de Metamateriales Para El Desarrollo De Antenas Activas Autodiplexadas. [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Doctoral). Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Teoría de la señal y comunicaciones. Leganés. 2014. págs. 35-37. [Consulta: 2023-11-25]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/20075>.
9. **CASTRO GALÁN, David.** Aplicación de Metamateriales Para El Desarrollo De Antenas Activas Autodiplexadas. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Doctoral). Universidad Carlos III de Madrid. Leganés-España. 2014. págs. 40-45. [Consulta: 2023-11-03]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/20075>.
10. **CISNEROS QUISHPE, Sheyla Estefania.** Diseño y simulación de una antena plana alimentada con una línea microstrip en la banda de ondas milimétricas para 5G. [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Tercer Nivel). Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ingeniería, Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones. Riobamba-Ecuador. 2022. págs.41-43. [Consulta: 2023-11-01]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/9667/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n%20Cisneros%20Quishpe%20Sheyla%20Estefania.pdf>.
11. **DEY, Shuvashis & D CHANDRA KARMAKAR, Nemai.** "Design and Experimental Analysis of a Novel Compact and Flexible Super Wide Band Antenna for 5G". *IEEE ACCESS* [en línea], 2021, (Australia), vol. 9, págs.46700 - 46705. [Consulta: 13 noviembre 2023]. ISSN 2169-3536. Disponible en: https://researchmgt.monash.edu/ws/portalfiles/portal/336941885/336377696_oa.pdf.
12. **DI MARÍA, Giovanni.** *Antena tipo pajarita ranurada.* [en línea]. Estados Unidos: EE-Web, 2020. [Consulta: 15 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.eeweb.com/slotted-bowtie-antenna/>.
13. **ELECTRONICA LUGO.** *¿Qué es un amplificador de potencia ? Tipos, Clases Y Aplicaciones.* [en línea]. España: 2023. [Consulta: 16 noviembre 2023]. Disponible en: <https://electronicalugo.com/amplificador-de-potencia/>.
14. **FUENTES FERNÁNDEZ, Estefanía.** Antena multifrecuencia para 5G. [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Tercer Nivel). Universidad Carlos III de Madrid. Leganés-España. 2020. págs.50-65. [Consulta: 2023-11-05]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/31668>.

15. **GENALTO**. *Presentación de las redes 5G*. [en línea]. Francia: 2016. [Consulta: 13 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/gemalto/tel-5G-networks-QandA-es.pdf>.

16. **GSMA Association**. *Espectro 5GHz - 26GHz y 28 GHz*. [en línea]. Londres - Reino Unido: 2018. [Consulta: 15 Diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2018/02/Espectro-5G-26-GHz-y-28-GHz.pdf>.

17. **GUALDA FERNÁNDEZ, Nerea**. Antenas para dispositivos móviles 5G e IoT. [En línea] . (Trabajo de Titulación) (Mastrería). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia-España. 2019. págs.15-19. [Consulta: 2023-11-10.] Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/124636/Gualda%20-%20Antenas%20para%20dispositivos%20m%C3%B3viles%205G%20e%20IoT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

18. **HARDESTY, George**. *Selección de Protocolo Inalámbrico para IoT y Características de Bandas de Frecuencia*. [blog]. Estados Unidos: Data-Alliance, 2023. [Consulta: 13 Noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.data-alliance.net/blog/iot-internet-of-things-wireless-protocols-and-their-frequency-bands/>.

19. **HONG, Wei**. "Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications". *IEEE XPLORE* [en línea], 2017, (Estados Unidos), vol.65, págs.3-5. [Consulta: 15 noviembre 2023]. ISSN 0018-926X. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7942144/authors#authors>.

20. **KEYSIGHT**. *Keysight E5071C ENA*. [en línea]. California - Estados Unidos: 2023. [Consulta: 10 diciembre 2023]. Disponible en: https://nscainc.com/wp-content/uploads/2017/05/Keysight_E5071C_ENA_Network_Analyzer_brochure.pdf.

21. **KOA SPEER ELECTRONICS, INC**. *KOA Speer SG73G1JTTD18R0C*. [en línea]. Estados Unidos: 2023. [Consulta: 03 enero 2023]. Disponible en: <https://www.koaspeer.com/pdfs/SG73G.pdf>.

22. **LÓPEZ HERNÁNDEZ, Javier**. Diseño de antena de lente con alimentador bow-tie y polarización circular para aplicaciones 5G de muy alta velocidad. [En línea]. (Título de Titulación) (Tercer Nivel). Universidad Autónoma de Madrid. Madrid-España. 2021. págs.3-8. [Consulta:2023-11-15] . Disponible en:

https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/698394/lopez_hernandez_javier_tfg.pdf?sequence=1.

23. **LUCAS, Nicolás.** Bandas milimétricas, en fase de estudio en América Latina [en línea]. México: 2021. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.economista.com.mx/empresas/Bandas-milimetricas-en-fase-de-estudio-en-America-Latina-20210201-0045.html>.

24. **MADINA BELTRÁN, Ernesto.** Desarrollo de antenas miniatura UWB con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5G. [En línea] . (Trabajo de Titulación) (Maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California. 2019. págs.8-32. 2019. [Consulta: 2023-11-08]. Disponible en: https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2995/1/tesis_Medina%20Beltran%20Ernesto_17_sep_2019.pdf.

25. **MARTIN, Ernesto & DAZA, Roberto.** Antena Bowtie sintonizada a 2.4GHz. [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Tercer Nivel). Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y Telecomunicación. España. 2015. págs.1-3. [Consulta:2023-11-16]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/267953122/BowTie>.

26. **MINI-CIRCUIT.** *Low Pass Filter*. [en línea]. Estados Unidos: 2023. [Consulta: 06 enero 2024]. Disponible en: https://www.mouser.ec/datasheet/2/1030/LFCN_2852_2b-2321258.pdf.

27. **MINI-CIRCUITS.** *Double Balanced Mixer*. [en línea] . Estados - Unidos: 2023 . [Consulta: 06 enero 2024]. Disponible en: https://www.mouser.ec/datasheet/2/1030/MDB_54H_2b-2399670.pdf.

28. **Mini-Circuits.** *SMT Low Noise Amplifier*. [en línea] . 2017. [Consulta: 10 julio 2023]. Disponible en: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=PMA2-183LN%2B>.

29. **MOKO TECHNOLOGY.** *¿Qué es la PCB de Rogers?* . [en línea]. China: 2023. [Consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.mokotechnology.com/es/what-is-rogers-pcb/>.

30. **MORALES MARTINEZ, Wilder Yesid.** Diseño de un amplificador de bajo ruido a una frecuencia de 3 GHz. [En línea] . (Trabajo de Titulación) (Tercer Nivel). Universidad Nacional

Abierta y a distancia UNAD. Garagoa-Boyacá. 2014. págs.19-27. [Consulta: 16 noviembre 2023]. Disponible en : <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/2453/1048846597.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Un%20amplificador%20de%20bajo%20ruido,del%20sistema%20completo%20de%20recepci%C3%B3n.>

31. **MOUSER ELECTRONICS.** *Analog Devices HMC509LP5.* [en línea]. Estados Unidos: 2022. [Consulta: 05 enero 2024]. Disponible en: <https://www.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/HMC509LP5?qs=pceeu5JH%2FH9U365DugisAQ%3D%3D>.

32. **MOUSER ELECTRONICS.** *Monolithic Amplifier- PMA3-313GLN+.* [en línea] .[Consulta: 02 enero 2024]. Disponible en: https://www.mouser.ec/datasheet/2/1030/PMA3_313GLN_2b-2853690.pdf.

33. **MURILLO FUENTES, Juan José.** *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación* [en línea]. 2°ed. España: Pearson Educación, 2014. [Consulta: 10 noviembre 2023]. Disponible en: <https://personal.us.es/murillo/docente/Libros/FundRadiacionyRadiocom.pdf>.

34. **OLAN NUÑEZ, Karen Nallely.** Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas. [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Tonantzintla-México. 2019. págs.33-39. [Consulta: 2023-11-15]. Disponible en: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1793/1/OlanNKN.pdf>.

35. **ORTEGA CHÁVEZ, Kevin Liroy.** Implementación de un sistema de caracterización del patrón de radiación de antenas en las bandas L, S, Y C a través de un módulo DAQ. [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Tercer Nivel). Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y Redes. 2019. págs.57-67. [Consulta: 2023-11-15]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/11025/1/98T00245.pdf>.

36. **PATANVARIYA, Deven G & CHATTERJEE, Anirban.** " A Compact Bow-tie Shaped Wide-band Microstrip Patch Antenna for Future 5G Communication Networks". [en línea], 2020, (India), págs. 40-47. 2020. [Consulta: 10 de Noviembre de 2023]. Disponible en: https://www.radioeng.cz/fulltexts/2021/21_01_0040_0047.pdf.

37. **PASQUALLI, Marina.** *El despliegue de la 5G en el mundo.* [en línea]. Hamburgo: Statista, 2022. [Consulta: 15 octubre 2023]. Disponible en: <https://es.statista.com/grafico/23241/nivel-de-desarrollo-de-la-tecnologia-5g-en-el-mundo/>.

38. **PÉREZ, Constantino.** *Sistemas de Telecomunicación* [en línea]. Santander-España: Paraninfo, 2007. [Consulta: 16 noviembre 2023]. Disponible en: https://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH10ST_Web.pdf.

39. **QIAO, Jian.** Facilitando la Comunicación de Onda Milimétrica para Redes Celulares 5G: Perspectiva de la Capa MAC. [En línea] . (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad de Waterloo. Ontario-Canadá. 2015. págs.6-10. 2015. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en:https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/9243/QIAO_JIAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

40. **REICINIO PRIETO, Carlos Rafael.** Implementación de arreglos de antenas multibanda para la Quinta Generación Móvil. [En línea] .(Trabajo de Titulación)(Diplomado). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Santa Clara-Cuba. 2017. págs.39-44. [Consulta: 2023-11-01]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/server/api/core/bitstreams/43d5d112-88f9-4b79-9c78-06e9e5696cc8/content>.

41. **ROGERS CORPORATION.** *Rogers Corporation. Rogers Corporation.* [En línea]. [Consulta: 25 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates>.

42. **SALAZAR RAMÍREZ, Jorge Alberto.** Diseño y construcción de una antena para su aplicación en 5G. [En línea] . (Trabajo de Titulación) (Maestría). Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México. 2017. págs. 23-25. [Consulta 2023-11-15]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/486235819/DISENO-Y-CONSTRUCCION-DE-UNA-ANTENA-PARA-SU-APLICACION-EN-5G-pdf>.

43. **SOHAIL, Amir & WITJAKSONO, Gunawan.** Conjunto de antenas de parche circular con ranura elíptica y comportamiento de banda dual para futuras redes de comunicación móvil 5G. [En línea] . (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad de Ingeniería y tecnología Peshawar. Khyber Pakhtunkhwa-Pakistán. 2019. págs. 135-136. [Consulta: 2023-11-01]. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/332464482_Elliptical_Slot_Circular_Patch_Antenna_Array_with_Dual_Band_Behaviour_for_Future_5G_Mobile_Communication_Networks.

44. **SORIA SALAZAR, Juan David.** Transmisor y receptor de frecuencia modulada didáctico para uso en los laboratorios de la FISEI. [En línea] .(Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones. Ambato-Ecuador. 2015. págs. 10-13. [Consulta: 2023-11-01]. Disponible en: https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8596/1/Tesis_t954ec.pdf.

45. **SPARKS, Charlotte.** " 5G: What is it? More than just improved performance and greater flexibility, the next generation is a shift in mindset ". ERICSSON [en línea] , 2014 , (New York) , vol. 1 , págs. 4-6. 2014. [Consulta: 14 noviembre 2023]. Disponible en: <https://docplayer.net/85385-5g-what-is-it-more-than-just-improved-performance-and-greater-flexibility-the-next-generation-is-a-shift-in-mindset.html>.

46. **TAKAHASHI, Atsushi.** *Anritsu Advancing beyond.* [en línea]. Estados Unidos: 2023. [Consulta: 16 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms2720t>.

47. **TORO ROSALES, William J.** Oscilador controlado para aplicaciones de radar. [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad del Norte. Barranquilla-Atlántico. 2015. págs. 34-37. [Consulta: 2023-10-29]. Disponible en: <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/8639#page=1>.

ANEXOS

ANEXO A: DATASHEET MONOLITHIC AMPLIFIER PMA3-313GLN+



HIGH GAIN, LOW NOISE

Monolithic Amplifier PMA3-313GLN+

ELECTRICAL SPECIFICATIONS¹ AT 25°C, V_S=4V AND R₁=18Ω, UNLESS NOTED OTHERWISE

Parameter	Condition (GHz)	V _S =4.0V			Units
		Min.	Typ.	Max.	
Frequency Range		26.5		31	GHz
Noise Figure	26.5		1.6		dB
	27.5		1.7		
	30		1.8		
	31		1.8		
Gain	26.5	17.0	21.4	25.1	dB
	27.5	16.1	20.7	23.9	
	30	14.5	20.1	23.9	
	31		19.4	—	
Input Return Loss	26.5		10		dB
	27.5		9		
	30		12		
	31		13		
Output Return Loss	26.5		7		dB
	27.5		8		
	30		12		
	31		10		
Output Power @ 1 dB compression	26.5		12.0		dBm
	27.5		12.0		
	30		12.2		
	31		12.3		
Output IP3	26.5		21.5		dBm
	27.5		21.6		
	30		21.5		
	31		21.6		
Supply Voltage (V _S)		3.75	4.0	4.25	V
Device Operating Current (I _{DD})			78	112	mA
Device Current Variation vs. Temperature ²			-50		μA/°C
Device Current Variation vs. Voltage			0.02		mA/mV
Thermal Resistance, junction-to-ground lead			106		°C/W

1. Measured on Mini-Circuits Characterization test board YB-PMA3-313GLN+ with thru-line loss being deducted. See Characterization Test Circuit (Fig. 1)

2. Device Current Variation vs. Temperature = (Current at 85°C - Current at -45°C)/130°C

MAXIMUM RATINGS³

Parameter	Ratings
Operating Temperature (ground lead)	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-65°C to 150°C
Junction Temperature	146°C
Total Power Dissipation	0.65W
Input Power (CW), V _S =4V	+23 dBm (5 minutes max.) +13 dBm (continuous)
DC Voltage at Port 2 & 8	2V
DC Voltage (V _S)	6V

3. Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

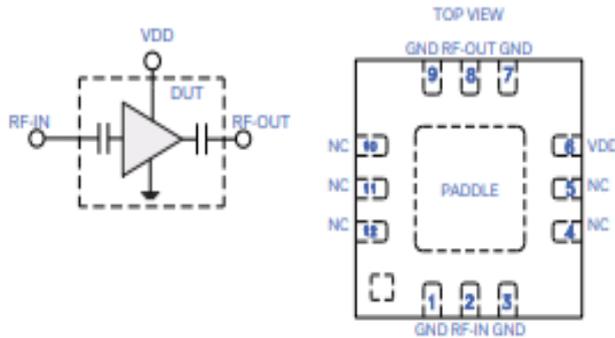




HIGH GAIN, LOW NOISE

Monolithic Amplifier PMA3-313GLN+

SIMPLIFIED SCHEMATIC AND PAD DESCRIPTION



Function	Pad Number	Description (See Application Circuit, Fig. 1)
RF-IN	2	RF Input Pad. Connects to RF input
RF-OUT	8	RF Output Pad. Connects to RF output
VDD	6	DC Power Supply Pad. Connects to Voltage Source V_s via R1
Ground	1, 3, 7, 9 & Paddle	Connects to ground
No Connection	4, 5, 10, 11 & 12	Not used internally. Connected to ground on test board

RECOMMENDED APPLICATION AND CHARACTERIZATION TEST CIRCUIT

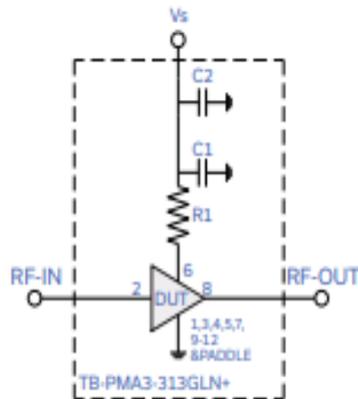


Fig 1. Application and Characterization Circuit

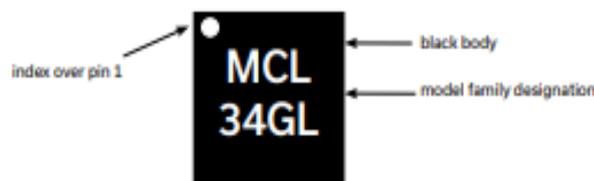
Note: This block diagram is used for characterization. (DUT is soldered on Mini-Circuits Characterization test board TB-PMA3-313GLN+) Gain, Return loss, Output power at 1dB compression (P1 dB), output IP3 (OIP3) and noise figure measured using Agilent's N5245A microwave network analyzer.

Conditions:

1. Gain and Return loss: $P_{in} = -25\text{dBm}$
2. Output IP3 (OIP3): Two tones, spaced 1 MHz apart, -5dBm/tone at output.

Component	Size	Value	Part Number	Manufacturer
R1	0603	18 Ohm	SG73G1/JTTD18R0C	KOA
C1	0402	5 pF	GJM1555C1H5R0CB01D	Murata
C2	0402	0.1 uF	GRM155R71C104KA88D	Murata

PRODUCT MARKING



Marking may contain other features or characters for internal lot control



ANEXO B: DATASHEET CAPACITOR 5 pF

Especificaciones ^		
Atributo del producto	Valor de atributo	Seleccionar atributo
Fabricante:	KEMET	<input type="checkbox"/>
Categoría de producto:	Capacitores cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT	
RoHS:	 Detalles	
Capacitancia:	5 pF	<input type="checkbox"/>
Régimen de voltaje de CC:	6.3 VDC	<input type="checkbox"/>
Dieléctrico:	C0G (NP0)	<input type="checkbox"/>
Tolerancia:	0.1 pF	<input type="checkbox"/>
Código de caja (pulg.):	0201	<input type="checkbox"/>
Código de caja (mm):	0603	<input type="checkbox"/>
Altura:	0.3 mm	<input type="checkbox"/>
Temperatura de trabajo mínima:	- 55 C	<input type="checkbox"/>
Temperatura de trabajo máxima:	+ 125 C	<input type="checkbox"/>
Producto:	RF Microwave / High Q	<input type="checkbox"/>
Estilo de terminación:	SMD/SMT	<input type="checkbox"/>
Terminación:	Standard	<input type="checkbox"/>
Serie:	CBR	<input type="checkbox"/>
Empaquetado:	Reel	<input type="checkbox"/>
Empaquetado:	Cut Tape	<input type="checkbox"/>
Empaquetado:	MouseReel	<input type="checkbox"/>
Marca:	KEMET	
Clase:	Class 1	
Longitud:	0.6 mm	
Paquete / Cubierta:	0201 (0603 metric)	
Tipo de producto:	Ceramic Capacitors	
Cantidad de empaque de fábrica:	15000	
Subcategoría:	Capacitors	
Tipo:	Surface Mount Multilayer Ceramic Capacitor	
Régimen de voltaje de CA:	-	
Ancho:	0.3 mm	

ANEXO C: DATASHEET CAPACITOR 0.1uF

Especificaciones ^		
Atributo del producto	Valor de atributo	Seleccionar atributo
Fabricante:	TAIYO YUDEN	<input type="checkbox"/>
Categoría de producto:	Capacitores cerámicos de capas múltiples (MLCC) - SMD/SMT	
RoHS:	 Detalles	
Capacitancia:	0.1 uF	<input type="checkbox"/>
Régimen de voltaje de CC:	6.3 VDC	<input type="checkbox"/>
Dieléctrico:	X7T	<input type="checkbox"/>
Tolerancia:	10 %	<input type="checkbox"/>
Código de caja (pulg.):	0201	<input type="checkbox"/>
Código de caja (mm):	0603	<input type="checkbox"/>
Altura:	0.3 mm	<input type="checkbox"/>
Temperatura de trabajo mínima:	- 55 C	<input type="checkbox"/>
Temperatura de trabajo máxima:	+ 125 C	<input type="checkbox"/>
Producto:	Automotive MLCCs	<input type="checkbox"/>
Estilo de terminación:	SMD/SMT	<input type="checkbox"/>
Terminación:	Standard	<input type="checkbox"/>
Calificación:	AEC-Q200	<input type="checkbox"/>
Serie:	MAAS	<input type="checkbox"/>
Marca:	TAIYO YUDEN	
Capacitancia (nF):	100 nF	
Capacitancia (pF):	100000 pF	
Diámetro:	-	
Longitud:	0.6 mm	
Tipo de producto:	Ceramic Capacitors	
Cantidad de empaque de fábrica:	15000	
Subcategoría:	Capacitors	
Ancho:	0.3 mm	



v04.0811

HMC509LP5 / 509LP5E

MMIC VCO w/ HALF FREQUENCY OUTPUT 7.8 - 8.8 GHz



Typical Applications

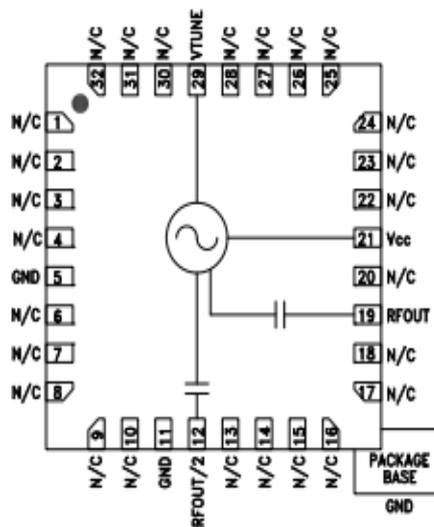
Low noise MMIC VCO w/Half Frequency, for:

- VSAT Radio
- Point to Point/Multi-Point Radio
- Test Equipment & Industrial Controls
- Military End-Use

Features

- Dual Output: $F_o = 7.8 - 8.8 \text{ GHz}$
 $F_o/2 = 3.9 - 4.4 \text{ GHz}$
- Pout: +13 dBm
- Phase Noise: -115 dBc/Hz @100 kHz Typ.
- No External Resonator Needed
- 32 Lead 5x5mm SMT Package: 25mm²

Functional Diagram



General Description

The HMC509LP5 & HMC509LP5E are GaAs InGaP Heterojunction Bipolar Transistor (HBT) MMIC VCOs. The HMC509LP5 & HMC509LP5E integrate resonators, negative resistance devices, varactor diodes and feature a half frequency output. The VCO's phase noise performance is excellent over temperature, shock, and process due to the oscillator's monolithic structure. Power output is +13 dBm typical from a +5V supply. The voltage controlled oscillator is packaged in a leadless QFN 5x5 mm surface mount package, and requires no external matching components.

8

VCOS WITH Fo/2 OUTPUT - SMT

Electrical Specifications, $T_A = +25^\circ \text{ C}$, $V_{CC} = +5V$

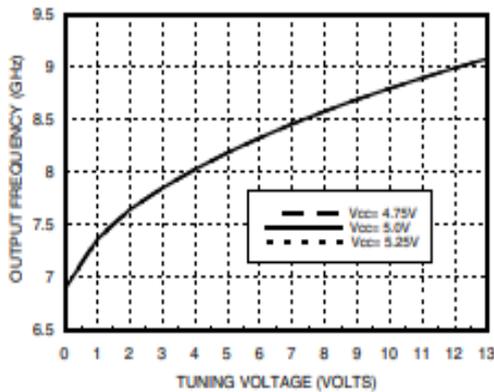
Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
Frequency Range	F_o	7.8 - 8.8		GHz
	$F_o/2$	3.9 - 4.4		GHz
Power Output	RFOUT	+10	+15	dBm
	RFOUT/2	+5	+10	dBm
SSB Phase Noise @ 100 kHz Offset, $V_{tune} = +5V$ @ RFOUT		-115		dBc/Hz
Tune Voltage	V_{tune}	2	13	V
Supply Current (Icc) ($V_{CC} = +5.0V$)		200	270	mA
Tune Port Leakage Current ($V_{tune} = 13V$)			10	μA
Output Return Loss		2		dB
Harmonics/Subharmonics	1/2	35		dBc
	2nd	10		dBc
	3rd	32		dBc
Pulling (into a 2.0:1 VSWR)		5		MHz pp
Pushing @ $V_{tune} = 5V$		10		MHz/V
Frequency Drift Rate		0.9		MHz/ $^\circ C$



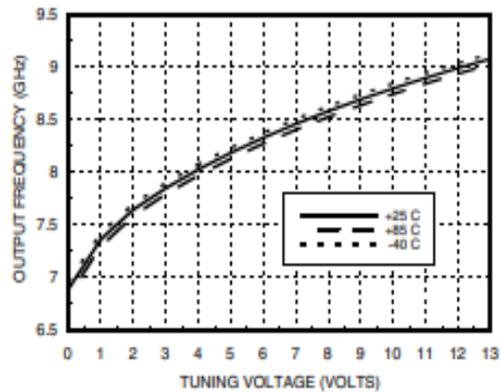
HMC509LP5 / 509LP5E

MMIC VCO w/ HALF FREQUENCY OUTPUT 7.8 - 8.8 GHz

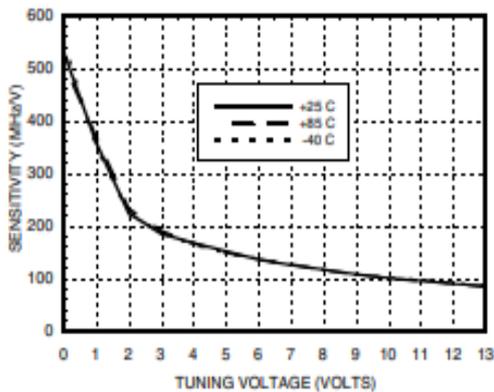
Frequency vs. Tuning Voltage, T= 25°C



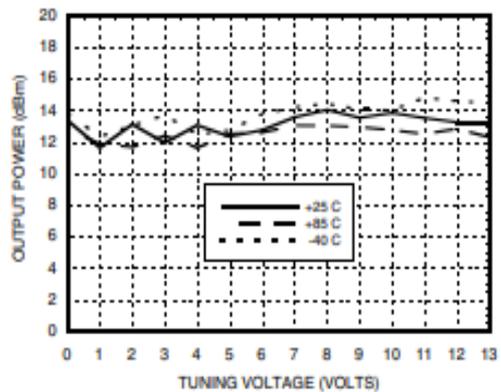
Frequency vs. Tuning Voltage, Vcc= +5V



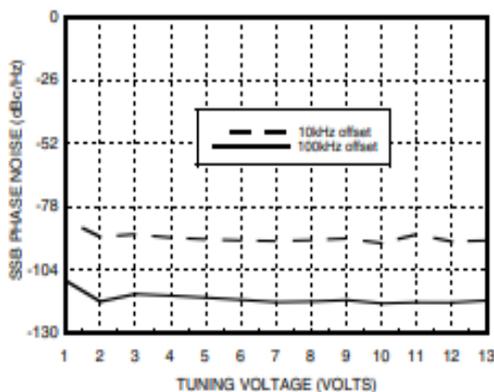
Sensitivity vs. Tuning Voltage, Vcc= +5V



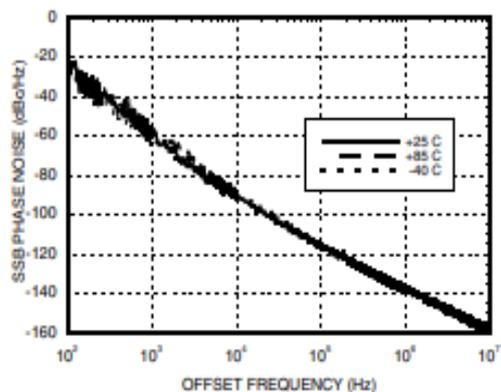
Output Power vs. Tuning Voltage, Vcc= +5V



SSB Phase Noise vs. Tuning Voltage

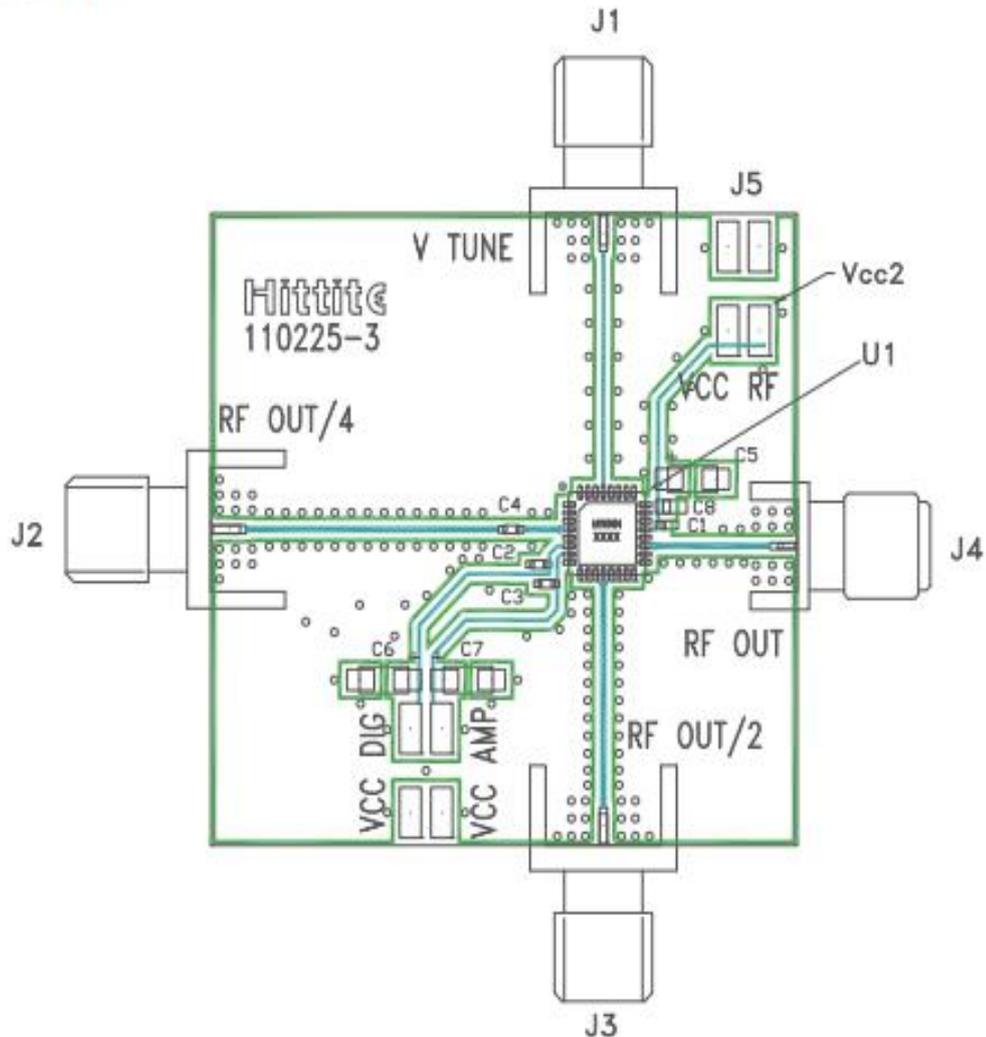


SSB Phase Noise @ Vtune = +5V





Evaluation PCB



List of Materials for Evaluation PCB 110227 [1]

Item	Description
J1 - J4	PCB Mount SMA RF Connector
J5	2 mm DC Header
C1 - C3	100 pF Capacitor, 0402 Pkg.
C4	1,000 pF Capacitor, 0402 Pkg.
C5 - C7	2.2 μ F Tantalum Capacitor
U1	HMC509LP5(E) VCO
PCB [2]	110225 Eval Board

[1] Reference this number when ordering complete evaluation PCB

[2] Circuit Board Material: Arlon 25FR

The circuit board used in the application should use RF circuit design techniques. Signal lines should have 50 Ohm impedance while the package ground leads and backside ground paddle should be connected directly to the ground plane similar to that shown. A sufficient number of via holes should be used to connect the top and bottom ground planes. The evaluation circuit board shown is available from Hittite upon request.

ANEXO E: MEZCLADOR DOBLE EQUILIBRADO- MDB-54H+



MMIC SURFACE MOUNT WIDEBAND

Double Balanced Mixer

MDB-54H+

ELECTRICAL SPECIFICATIONS¹ AT 25°C, UNLESS NOTED

Parameter	Condition (GHz)	Min.	Typ.	Max.	Units
RF Frequency Range	-	20	-	50	GHz
LO Frequency Range	-	20	-	50	GHz
IF Frequency Range	-	DC	-	20	GHz
LO Power	-	14	+15	16	dBm
Conversion Loss (at IF=2 GHz)	20	-	9.8	12	dB
	30	-	10.2	12	
	40	-	12.6	-	
	50	-	13	-	
LO-RF Isolation	20	25	36	-	dB
	30	25	42	-	
	40	-	40	-	
	50	-	45	-	
LO-IF Isolation	20	20	34	-	dB
	30	20	44	-	
	40	-	31	-	
	50	-	30	-	
RF-IF Isolation	20	20	30	-	dB
	30	20	34	-	
	40	-	24	-	
	50	-	26	-	
Pin at 1dB Compression	20-50	-	10	-	dBm
Input IP3	20-50	-	20	-	dBm

1. Measured on Mini-Circuits Characterization test board TB-MDB-54H+. See Characterization Test Circuit Figure 1A-1F

MAXIMUM RATINGS²

Parameter	Ratings
Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-65°C to 150°C
RF Power	21 dBm
LO Power	21 dBm
IF Current	30 mA

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





MMIC SURFACE MOUNT WIDEBAND

Double Balanced Mixer

MDB-54H+

ELECTRICAL SPECIFICATIONS¹ AT 25°C, UNLESS NOTED

Parameter	Condition (GHz)	Min.	Typ.	Max.	Units
RF Frequency Range	-	20	-	50	GHz
LO Frequency Range	-	20	-	50	GHz
IF Frequency Range	-	DC	-	20	GHz
LO Power	-	14	+15	16	dBm
Conversion Loss (at IF=2 GHz)	20	-	9.8	12	dB
	30	-	10.2	12	
	40	-	12.6	-	
	50	-	13	-	
LO-RF Isolation	20	25	36	-	dB
	30	25	42	-	
	40	-	40	-	
	50	-	45	-	
LO-IF Isolation	20	20	34	-	dB
	30	20	44	-	
	40	-	31	-	
	50	-	30	-	
RF-IF Isolation	20	20	30	-	dB
	30	20	34	-	
	40	-	24	-	
	50	-	26	-	
Pin at 1dB Compression	20-50	-	10	-	dBm
Input IP3	20-50	-	20	-	dBm

1. Measured on Mini-Circuits Characterization test board TB-MDB-54H+. See Characterization Test Circuit Figure 1A-1F

MAXIMUM RATINGS²

Parameter	Ratings
Operating Temperature	-40°C to 85°C
Storage Temperature	-65°C to 150°C
RF Power	21 dBm
LO Power	21 dBm
IF Current	30 mA

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



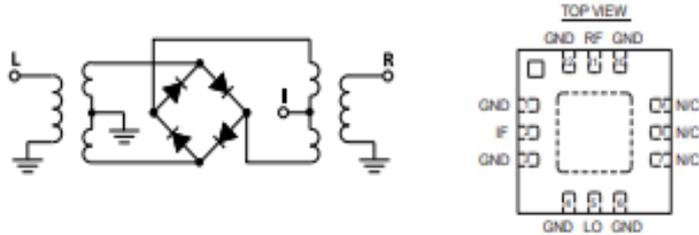


MMIC SURFACE MOUNT WIDEBAND

Double Balanced Mixer

MDB-54H+

SIMPLIFIED SCHEMATIC AND BONDING PAD DESCRIPTION



PAD CONNECTIONS

Function	Pad Number	Description
RF	11	RF port
LO	5	LO port
IF	2	IF port
GND	1,3,4,6,10,12 & Paddle	Connects to Ground Pads at Die Level. Grounded on PCB.
NC	7,8 & 9	Not Connected, Grounded on PCB

PRODUCT MARKING



ANEXO F: FILTRO PASA BAJO - LFCN-2852+

Especificaciones ^		
Atributo del producto	Valor de atributo	Seleccionar atributo
Fabricante:	Mini-Circuits	<input type="checkbox"/>
Categoría de producto:	Acondicionamiento de señales	
RoHS:	 Detalles	
Tipo de producto:	Signal Conditioning	<input type="checkbox"/>
Producto:	Low Pass Filters - LPF	<input type="checkbox"/>
Banda de frecuencias:	DC to 28500 MHz	<input type="checkbox"/>
Impedancia:	50 Ohms	<input type="checkbox"/>
Estilo de terminación:	SMD/SMT	<input type="checkbox"/>
Paquete / Cubierta:	1206 (3216 metric)	<input type="checkbox"/>
Temperatura de trabajo mínima:	- 55 C	<input type="checkbox"/>
Temperatura de trabajo máxima:	+ 125 C	<input type="checkbox"/>
Serie:	LFCN	<input type="checkbox"/>
Empaquetado:	Reel	<input type="checkbox"/>
Empaquetado:	Cut Tape	<input type="checkbox"/>
Empaquetado:	MouseReel	<input type="checkbox"/>
Marca:	Mini-Circuits	
Pérdida por inserción:	1.9 dB	
Montaje:	SMD/SMT	
Cantidad de empaque de fábrica:	3000	
Subcategoría:	Filters	

ANEXO G: GENERADOR DE SEÑALES MG3690C.

Technical Data Sheet

Anritsu Advancing beyond

RF/Microwave Signal Generators

MG3690C
10 MHz to 70 GHz/500 GHz
MG3695C, MG3697C



Signal Generator

General Specifications

Frequency Coverage		
Model/Option No.	Frequency Coverage ^a	Output Connector
MG3695C	2 GHz to 50 GHz	1.85 mm V(f)
MG3697C	2 GHz to 67 GHz ^b	1.85 mm V(f)
Option 4	8 MHz to 2.2 GHz ^c	Model No. Dependent
Option 5	8 MHz to 2 GHz ^c	Model No. Dependent

a. For frequency coverage beyond 70 GHz, utilize millimeter-wave multiplier 2000-2087-R through 2000-2098-R series (see page 2-18).

b. Operational to 70 GHz

c. All specifications apply \geq 10 MHz

Options 4 and 5 Frequency extension down to 8 MHz

Two options are available to extend the 2 GHz low end frequency limit of the base models down to 8 MHz. Option 4 uses a digital down-converter (DDC) with successive divide-by-two circuitry. It offers the best phase noise performance of the two choices, at the expense of some analog performance < 500 MHz. In that range, analog sweep mode is not available, and pulse modulation performance is specified as typical. In addition, frequency and phase modulation mod index is scaled by the division ratio of each band of the DDC. Option 5 maintains all analog performance by using a heterodyne mixing down-converter, but does not improve phase noise performance.

CW Mode

Accuracy	Same as internal or external 10 MHz time base
Internal Time Base Stability	With aging: $< 2 \times 10^{-9}/\text{day}$ ($< 5 \times 10^{-10}/\text{day}$ with Option 16) With temperature: $< 2 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}$ over 0°C to 55°C ($< 2 \times 10^{-10}/^{\circ}\text{C}$ with Option 16)
Resolution	0.01 Hz
Internal Time Base Calibration	The internal time base can be calibrated via the System Cal menu to match an external reference (10 MHz \pm 50 Hz).
zExternal 10 MHz Reference Input	Accepts external 10 MHz \pm 50 Hz (typical) 0 dBm to +20 dBm time base signal Automatically disconnects the internal high-stability time-base option (if installed) Rear panel BNC (50 Ω impedance) Selectable bandwidth for best phase noise immunity or best phase tracking performance
10 MHz Reference Output	1 V _{p-p} into 50 Ω , AC coupled Rear panel BNC (50 Ω impedance)
Phase Offset	Adjustable in 0.1 degree steps
Electronic Frequency Control (EFC)	-4 V to +4 V input range 0.2 ppm/V typical sensitivity (0.08 ppm/V typical for Option 3x) \leq 250 Hz modulation bandwidth Rear panel BNC (high impedance)

Phase-Locked Step Sweep Mode

Sweep Width	Independently selected, 0.01 Hz to full range Every frequency step in sweep range is phase-locked.
Accuracy	Same as internal or external 10 MHz time base
Resolution (Minimum Step Size)	0.01 Hz
Linear/Log Sweep	User-selectable linear or log sweep In log sweep, step size logarithmically increases with frequency.
Steps	User-selectable number of steps or the step size
Number of Steps	Variable from 1 to 10,000
Step Size	0.01 Hz to the full frequency range of the instrument If the step size does not divide into the selected frequency range, the last step is truncated.
Dwell Time Per Step	Variable from 1 ms to 99 s
Fixed Rate Sweep	Variable from 30 ms to 99 s

Analog Sweep Mode (Option 6)

Sweep Width	Independently selected from 1 MHz to full frequency range For units with Option 4 (Digital Down Converter), the start frequency during analog sweep is limited to \geq 2.2 GHz for stop frequencies > 20 GHz. For stop frequencies \leq 20 GHz, the start frequency is limited to \geq 500 MHz. A range error will be displayed if any of these analog sweep start/stop limits are exceeded.
Accuracy	The lesser of \pm 30 MHz or \pm 2 MHz +0.25 % of sweep width for Sweep Speeds of \leq 50 MHz/ms (typical)
Sweep Time Range	30 ms to 99 s

Alternate Sweep Mode

Sweeps alternately in step sweep between any two sweep ranges. Each sweep range may be associated with a power level.

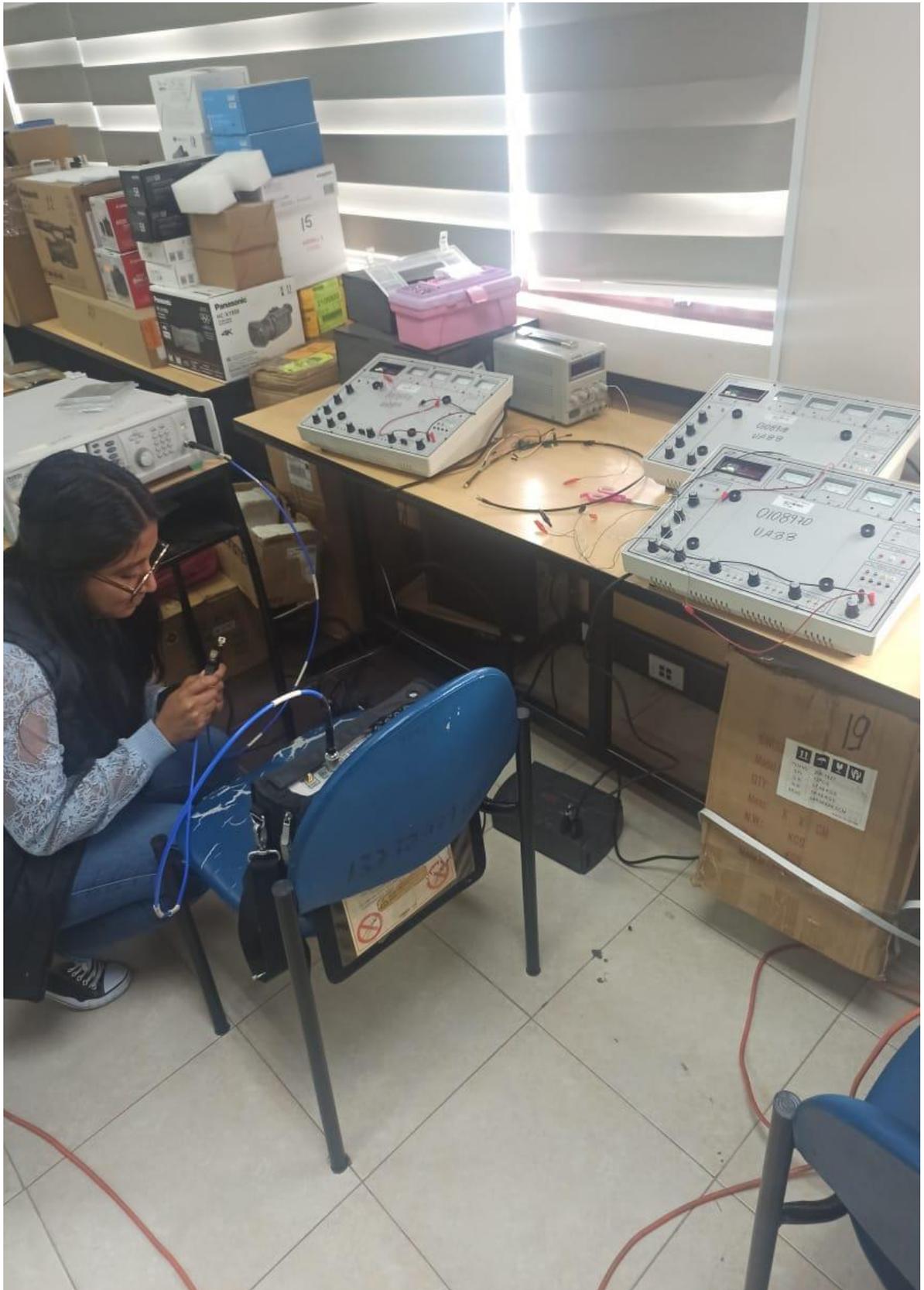
ANEXO H: SOLDADURA DE PUERTOS PARA LAS ANTENAS.



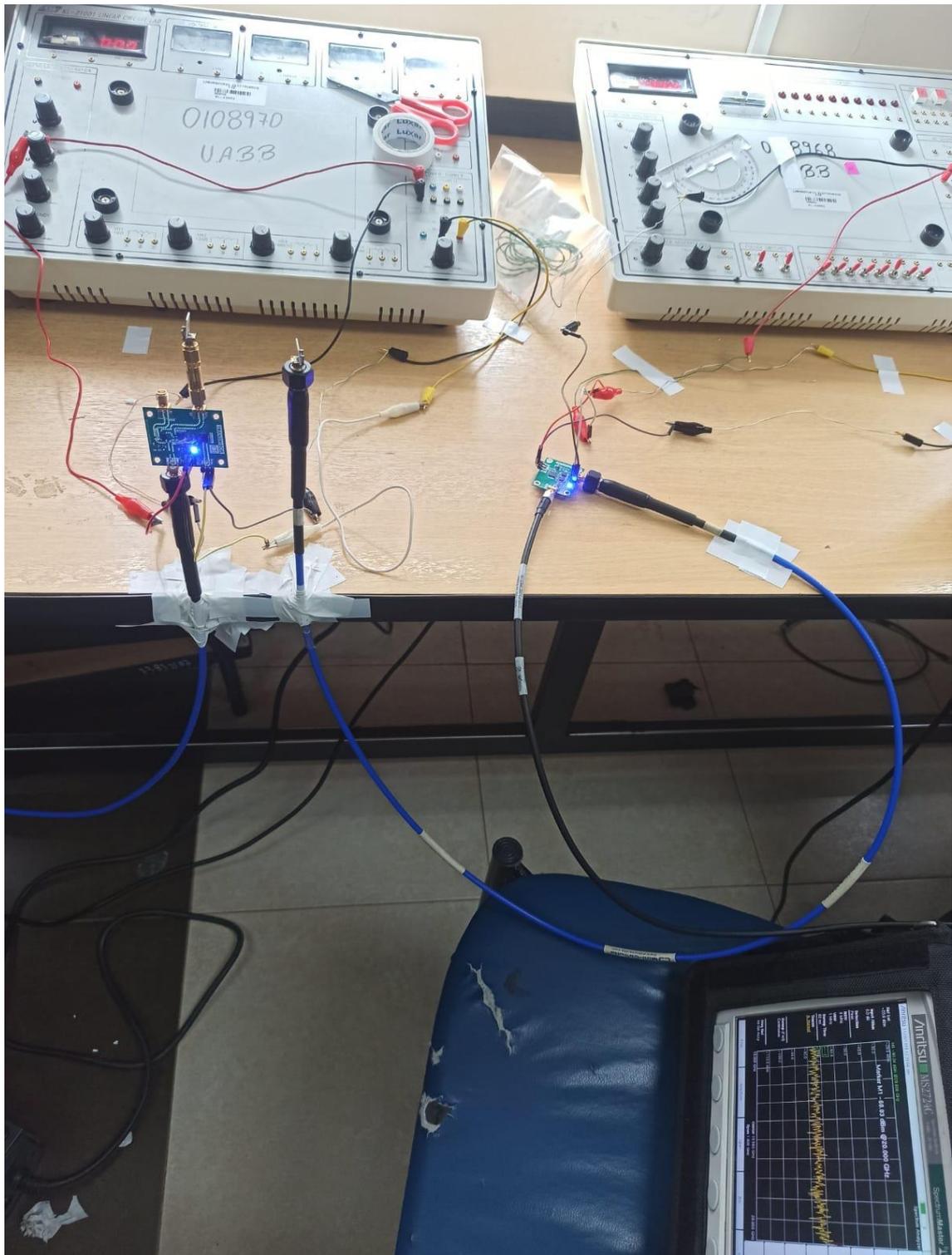
ANEXO I: PRUEBA FUNCIONAMIENTO DE LAS ANTENAS EN EL VNA.



ANEXO J: PRUEBAS DE PATRON DE RADICACION



ANEXO K: ESCENARIOS ARMADOS PARA LAS RESPECTIVAS PRUEBAS.





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Fecha de entrega: 01 /05 /2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR

Nombres – Apellidos: Viviana Micaela Guanga Cuadrado

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: Informática y Electrónica

Carrera: Telecomunicaciones

Título a optar: Ingeniera en Telecomunicaciones

Hugo Oswaldo Moreno Avilés
Director del Trabajo de Titulación

Jefferson Alexander Ribadencira Ramírez
Asesor del Trabajo de Titulación