



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA AGRUPACIÓN LINEAL DE
ANTENAS DE 2-6 GHZ CON ELEMENTOS T ASIMÉTRICOS PARA
CONTROLAR EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN**

**Proyecto de investigación previo a la obtención del título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

Autor:

Arcos Tuapanta, José Sebastián

Tutor:

Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda

Riobamba, Ecuador. 2023

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, José Sebastián Arcos Tuapanta, con cédula de ciudadanía 060490185-0, autor del trabajo de investigación titulado: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA AGRUPACIÓN LINEAL DE ANTENAS DE 2-6 GHZ CON ELEMENTOS T ASIMÉTRICOS PARA CONTROLAR EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto a los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 3 de mayo de 2023



José Sebastián Arcos Tuapanta

C.I:060490185-0



ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los **19** días del mes de **ABRIL** de **2023**, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **JOSÉ SEBASTIÁN ARCOS TUAPANTA** con CC: **060490185-0**, de la carrera **INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado **"DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA AGRUPACIÓN LINEAL DE ANTENAS DE 2-6 GHZ CON ELEMENTOS T ASIMÉTRICOS PARA CONTROLAR EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN"**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



CARLOS RAMIRO
PENAFIEL OJEDA

PhD. Carlos Peñafiel Ojeda

TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA AGRUPACIÓN LINEAL DE ANTENAS DE 2-6 GHZ CON ELEMENTOS T ASIMÉTRICOS PARA CONTROLAR EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN**, presentado por **José Sebastián Arcos Tuapanta** con cedula de identidad 060490185-0, bajo la tutoría del Dr. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 03 de mayo de 2023.

PhD. Leonardo Rentería

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

FIRMA

PhD. Daniel Santillán Haro

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

FIRMA

Dr. Klever Hernán Torres Rodríguez

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

FIRMA



CERTIFICACIÓN

Que, **Arcos Tuapanta José Sebastián** con CC: **060490185-0**, estudiante de la Carrera **Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA AGRUPACIÓN LINEAL DE ANTENAS DE 2-6 GHZ CON ELEMENTOS T ASIMÉTRICOS PARA CONTROLAR EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN"** cumple con el **9 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 20 de abril de 2023



ENCARGADO DEL DEPARTAMENTO DE P&D
CARLOS RAMIRO
PENAFIEL OJEDA

PhD. Carlos Peñafiel Ojeda
TUTOR(A)

DEDICATORIA

Dedicado a mí querida familia que siempre me alentó a seguir adelante, en especial a mí madre, quien siempre ha estado a un lado de mí guiándome y apoyándome en todos los aspectos.

AGRADECIMIENTO

A mi familia, especialmente a mi madre María Adelaida y mi abuelito Luis Asdrubal, por formarme como ser humano y haber cultivado en mí el deseo de prepararme y afrontar retos que me permitan ser mejor persona.

A mi tutor de tesis, por su paciencia, amistad y ser un gran guía, compartiendo sus experiencias y consejos siempre de la mejor manera durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

A todos mis maestros que contribuyeron en mi formación académica, compartiendo su conocimiento y experiencia con una gran calidez humana.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	II
ACTA FAVORABLE	III
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	IV
CERTIFICACIÓN URKUND	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I	17
1.1. Planteamiento del Problema	17
1.2. Justificación	18
1.3. Objetivos	19
1.3.1. General	19
1.3.2. Específicos	19
CAPÍTULO II	20
2.1. Estado del Arte	20
2.2. Fundamentación Teórica	23
2.2.1. Antenas	23
2.2.2. Antenas de Microcinta	23
2.2.3. Agrupación de Antenas	24
2.2.4. Método de Alimentación	25
2.2.5. Parámetros de la Antena	26
2.2.6. Matriz de Butler	28
CAPÍTULO III	30

3.1. Metodología	30
3.1.1. Tipo de Investigación	30
3.1.2. Métodos de Investigación	30
3.1.3. Procedimiento	30
3.1.4. Fuentes de Información	31
3.1.5. Población y Muestra	32
3.1.5.1. Población	32
3.1.5.2. Muestra	32
3.1.6. Instrumentos de la Investigación	32
3.1.7. Operacionalización de las Variables	32
3.2. Diseño y Fabricación	33
3.2.1. Agrupación Lineal de Antenas con Elementos tipo T Asimétricos	33
CAPÍTULO IV	37
4.1. Resultados y Discusiones	37
4.2. Análisis de la agrupación lineal de antenas y la matriz simulada con la agrupación lineal de antenas y matriz fabricada	50
4.2.1. Prueba de normalidad de muestras	51
4.2.2. Prueba de Hipótesis	52
CAPÍTULO V	57
5.1. Conclusiones	57
5.2. Recomendaciones	58
BIBLIOGRAFÍA	64

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Ángulos de una matriz de Butler ideal	29
3.2. Operalización de las variables	32
3.3. Variables de dimensiones del diseño de una antena T asimétrica	34
3.4. Variables de las dimensiones del diseño de la agrupación de antenas	34
4.5. Coeficiente de reflexión de la agrupación a las principales frecuencias de la tecnología 5G	41
4.6. Parámetros S de los puertos de ingreso realizado en la simulación	44
4.7. Parámetros S de los puertos de salida realizado en la simulación como los medidos en el VNA. (a) Salidas en (dB), (b) Salida en Fase (grados)	46
4.8. Promedio de ángulos de cada puerto de la matriz (a) Método de simulación, (b) Método de medición	47
4.9. Directividad y Ganancia a la frecuencia de 2.4 GHz	49
4.10. Test de Normalidad (a) Puerto 1, (b) Puerto 2, (c) Puerto 3, (d) Puerto 4	51

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Antena de microcinta [1]	23
2.2. Alimentación por Microstrip [2]	25
2.3. Representación de impedancias [1] [2]	26
2.4. Representación gráfica del Steradian [1]	27
2.5. Diagrama de radiación tridimensional [3]	28
2.6. Acoplador híbrido de 90° [4]	29
2.7. Diseño de una matriz de butler de 4 x 4 [5]	29
3.8. Diagrama de bloques que describe el proyecto de investigación	31
3.9. Diseño de una antena T asimétrica (a) Vista frontal (b) Vista Posterior	33
3.10. Diseño de una agrupación lineal de antenas con elementos T asimétricos	34
3.11. Fabricación de la agrupación lineal de antenas con elementos T asimétricos (a) Preparación de la agrupación (b) Agrupación fabricada	35
3.12. Proceso de fabricación de la Matriz de Butler (a) Diseño en CST Studio Suite de la Matriz de Burler, (b) Matriz de Butler fabricada	36
4.13. Coeficiente de reflexión del elemento de referencia simulado y medido	37
4.14. Impedancia a la frecuencia de 2.83 GHz	38
4.15. Impedancia a la frecuencia de 4.40 GHz	39
4.16. Impedancia a la frecuencia de 5.55 GHz	39
4.17. Diagrama de radiación del elemento de referencia (a) Frecuencia de 2.83 GHz, (b) Frecuencia de 4.4 GHz, (c) Frecuencia de 5.55 GHz	40
4.18. Coeficiente de reflexión de la agrupación de antenas simulado y medido	40
4.19. Impedancias de la agrupación lineal a 2.4 GHz	41
4.20. Diagrama de radiación para la frecuencia de 2.4 GHz (a) Eje Y, (b) Eje Z	42
4.21. Diagrama de radiación para la frecuencia de 3.5 GHz (a) Eje Y, (b) Eje Z	43
4.22. Diagrama de radiación para la frecuencia de 5.2 GHz (a) Eje Y, (b) Eje Z	43
4.23. Medición de los parámetros S_{ii} en los puertos de ingreso realizado con el VNA.	44
4.24. Medición de los parámetros S_{nn} en las salidas de la matriz de Butler mediante el VNA, (a) Parámetros S de salida cuando el ingreso es por el puerto 1, (b) Parámetros S de salida cuando el ingreso es por el puerto 2, (c) Parámetros S de salida cuando el ingreso es por el puerto 3, (d) Parámetros S de salida cuando el ingreso es por el puerto 4	45
4.25. Parámetros S medidos con el analizador de redes vectoriales del trabajo conjun- to de los dispositivos (Puerto 1 línea roja, Puerto 2 línea verde, Puerto 3 línea azul, Puerto 4 línea rosada)	47
4.26. Diagrama de impedancia por combinación de puertos para la frecuencia 2.4 GHz del puerto 1	48

4.27. Diagrama de radiación en 3D por medición de parámetros S con el analizador de redes vectoriales (a) Puerto 1 (76.63°), (b) Puerto 2 (89.11°), (c) Puerto 3 (81.87°), (d) Puerto 4 (84.65°)	49
4.28. Diagramas de radiación en forma polar simulado con los parámetros S medidos con el analizador de redes vectoriales	50
4.29. Test de T-Student para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 1	53
4.30. Estadística de grupo para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 1	53
4.31. Test de T-Student para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 2	54
4.32. Estadística de grupo para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 2	54
4.33. Test de T-Student para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 3	54
4.34. Estadística de grupo para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 3	55
4.35. Test de T-Student para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 4	55
4.36. Estadística de grupo para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 4	56

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo general diseñar una agrupación lineal de antenas tipo parche con elementos T asimétricos, que se puede utilizar en diferentes aplicaciones dentro del rango de frecuencias de 2 a 6 GHz. Sin embargo, la antena propuesta en este proyecto de titulación estará enfocada a trabajar a los 2.4 GHz, entonces, para lograr generar diagramas de radiación en múltiples direcciones es necesario utilizar una red de alimentación que se conectará una agrupación de antenas. La red de alimentación será una matriz de Butler a 2.4 GHz de 4X4, es decir 4 entradas y 4 salidas. A través de un estudio exploratorio se diseñó las antenas T asimétricas, y usando el método adaptativo se logró determinar una configuración óptima para los dispositivos.

La agrupación lineal de antenas consta de 4 elementos, el elemento de referencia está compuesta por la parte frontal, una línea de transmisión con una impedancia característica de 50Ω , un parche cuadrado con un slot en forma de T asimétrico. Por otro lado, en la capa inferior se encuentra el plano de masa de forma rectangular con dos pequeños destajes en sus extremos para tener un mejor acoplamiento. La matriz de Butler consta de 4 acopladores híbridos de 90° en cuadratura a -3 dB, dos cruzadores y dos líneas de transmisión con desfases de 45° respectivamente. Los dos dispositivos han sido diseñados sobre un sustrato de fibra de vidrio FR4, que tiene una permitividad dieléctrica de $\epsilon = 4,3$ y una tangente de pérdidas $\tan(\delta) = 0,025$.

El diseño y análisis de los dispositivos han sido realizados mediante el software electromagnético CST Studio Suite, los resultados de la agrupación de antenas obtenidos a través de la simulación muestran una adaptación inferior a -10 dB en el rango de 2.2 GHz a 5.3 GHz. Por otro lado, la matriz de Butler cumple con los parámetros de reflexión inferiores a -15 dB, y los de transmisión alrededor de -6 dB con una variación en fase de -45° , 135° , -135° y 45° a la frecuencia de trabajo. En la simulación se puede apreciar que la antena propuesta genera una directividad promedio de 7.84 dBi en los cuatro puertos, con una variación en la dirección del diagrama de radiación de 0° , 60° , 120° y 180° en el eje axial.

Finalmente, la fabricación de los dispositivos ha sido realizadas mediante el método de corrosión, y la caracterización a través de un Analizador de Redes Vectoriales (VNA).

Palabras clave: Agrupación de antenas, antenas T asimétricas, matriz de Butler, Microstrip.

ABSTRACT

The present work aims to design a linear array of patch-type antennas with asymmetric T elements, which can be used in different applications within the frequency range of 2 to 6 GHz. However, the antenna proposed in this degree project will be focused on working at 2.4 GHz, so to generate radiation diagrams in multiple directions, a power network that will connect a group of antennas is necessary. The power network will be a 2.4 GHz 4X4 Butler matrix with four inputs and four outputs. Through an exploratory study, the asymmetric T antennas were designed. It was possible to determine an optimal configuration for the devices through the adaptive method. The linear array of antennas consists of 4 elements. The reference element comprises the front part, a transmission line with a characteristic impedance of 50Ω , and a square patch with an asymmetrical T-shaped slot. On the other hand, in the lower layer, there is a rectangular ground plane with two small cutouts at its ends to have a better coupling. The Butler matrix consists of 4 hybrid couplers of 90° in quadrature at -3 dB, two crossovers, and two transmission lines with offsets of 45° , respectively. The two devices have been designed on an FR4 glass fiber substrate with a dielectric permittivity of $\epsilon = 4.3$ and a loss $\tan(\delta) = 0.025$. The design and analysis of the devices have been carried out using the electromagnetic software CST Studio Suite. The results of the antenna grouping obtained through the simulation demonstrate an adaptation of less than -10 dB in the range from 2.2 GHz to 5.3 GHz. On the other hand, the Butler matrix complies with the reflection parameters below -15 dB and the transmission parameters around -6 dB with a phase variation of -45° , 135° , -135° , and 45° at the operating frequency. In the simulation, it can be seen that the proposed antenna generates an average directivity of 7.84 dBi in the four ports, with a variation in the direction of the radiation diagram of 0° , 60° , 120° and 180° in the axial axis. Finally, the manufacturing of the devices has been carried out using the corrosion method and the characterization through a Vector Network Analyzer (VNA).

Keywords: Antenna array, Asymmetric T antennas, Butler array, Microstrip.



Reviewed by:

Mgs. Lorena Solís Viteri
ENGLISH PROFESSOR
c.c. 0603356783

INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años, las comunicaciones inalámbricas han tenido una evolución y crecimiento en forma exponencial, pasando desde la primera hasta la cuarta generación (1G y 4G) respectivamente, cada una de estas se distinguió por mejorar prestaciones como su velocidad de transmisión y ancho de banda con respecto a su antecesor [6–8]. Sin embargo, a pesar de los avances logrados, actualmente existe la necesidad de atender la demanda, al mismo tiempo integrar servicios como telefonía, SMS, dispositivos como relojes inteligentes, realidad virtual, inteligencia artificial entre otros, una de las alternativas es la tecnología 5G, ya que tiene como objetivo beneficiar a la sociedad al brindar acceso sin restricciones a la información y la capacidad de compartir datos en cualquier momento y en cualquier lugar, donde los consumidores pueden disfrutar de velocidades ultrarrápidas confiables y eficientes. [6, 9].

Según la asociación global de proveedores móviles (GSA), En 2020, 101 operadores de redes móviles en todo el mundo implementaron servicios 5G en 44 países [10]. España es uno de los países más avanzados en el desarrollo del 5G, la idea principal es llegar a la madurez técnica y comercial, para explotar al máximo su potencial porque es más barato, más eficiente y totalmente conectado, todo ello para poder prestar servicios gracias a dispositivos electrónicos y su mayor disponibilidad, se espera que el aumento en la demanda de los consumidores aumente de 10 a 100 veces para 2030 [10–12].

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), el 2020, en América Latina, 5G tendrá un impacto positivo y aumentará la productividad, se destacará entre los favoritos; agricultura de precisión, producción inteligente de alimentos, logística inteligente, servicios de telemedicina [10]. Teniendo en cuenta el sector agrícola y el sector de procesamiento de alimentos (15 % del PIB de LAT), se espera que la productividad aumente en un 2,5 % [10]. Como resultado, 36 operadores han invertido en 5G en 20 países de América Central y América Latina (CALA), de los cuales 7 ya están en operación como lo es en Brasil, Puerto Rico, Surinam, Trinidad y Tobago, Uruguay y las Islas Vírgenes de EE. UU [6, 10]. Cada vez está más claro que la conectividad es uno de los componentes fundamentales de un mejor ecosistema digital [13].

La tecnología 5G es una evolución, no una revolución en comparación con las generaciones anteriores, por lo que se ha convertido en una necesidad para la sociedad, por lo que falta investigación relacionada con las antenas 5G, especialmente las antenas de baja frecuencia [9]. Por lo que en este trabajo de titulación se presenta, el diseño de una agrupación de antenas lineales utilizando elementos de Microstrip con un slot en forma de T asimétricos, acompañado de una matriz de la Butler, elemento pasivo de alimentación que ayuda a conseguir la variación de fa-

se [6, 14]. Es importante estudiar los fundamentos de las antenas para tener una idea general de sus características, y se menciona que deben ser confiables, de suficiente tamaño, peso, sencillas y versátiles [15].

El presente trabajo de titulación consta de cinco capítulos en los que se presenta en detalle cada parte de la investigación realizada. El primer capítulo presenta el problema de investigación y los objetivos a obtener. Luego, el segundo capítulo explora la tecnología del tema y la base teórica de la antena. Continuando, con la metodología y las estructuras de los dispositivos diseñados en el tercer capítulo. Después, en el cuarto capítulo se explica y se interpreta los resultados obtenidos, y finalmente en el quinto capítulo con las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

1.1 Planteamiento del Problema

En Ecuador, el uso y beneficios de la tecnología muestran una alta demanda de conectividad, pero al mismo tiempo, el nivel de adopción de tecnología y capacidad de innovación es muy bajo, lo que genera brechas en el aprovechamiento del potencial de 5G [10, 13, 16]. El estado ecuatoriano en el año 2021 comenzó con el despliegue de esta tecnología, ya que la Iniciativa Digital de Ecuador tiene como objetivo promover nuevas tecnologías como Internet de las Cosas (IoT) y BID Data [10, 17, 18].

Debido a esto, se debe estar preparado para diseñar dispositivos de transmisión como de recepción puesto que son elementos muy sensibles en los sistemas de comunicaciones. Uno de estos elementos son las antenas, donde el diseñar conlleva un desafío importante ya que depende casi por completo de la particularidad de la forma del dispositivo final, en donde el tamaño de estas se relacionan directamente con su frecuencia de operación, es decir, las grandes funcionan a bajas frecuencias y las pequeñas a frecuencias altas y eso significa que no pueden ser más grandes que las que existen actualmente por la saturación de espacios [19, 20].

Las antenas para aplicaciones 5G presentan varias limitantes en sus características tales como reducido ancho de banda, directividad limitada, etc [21, 22]. Por lo tanto, una forma de aumentar la ganancia de las antenas 5G es diseñar una agrupación lineal de antenas ubicadas sobre el plano de masa, considerando la relación entre el nivel de aislamiento de las antenas y la distancia entre ellas. Es bien sabido que un fuerte acoplamiento de antena a antena degrada el diagrama de radiación y, por lo tanto, reduce su eficacia, lo que da como resultado una degradación de la relación señal/ruido y una degradación de señal/ruido más ruido (El diagrama de radiación es la representación gráfica de las características de radiación de una antena a una distancia dada, dependiendo de las diferentes direcciones en el espacio) [1, 3, 23, 24]. En consecuencia, tener la capacidad de adaptarse a las condiciones más difíciles, al más alto nivel de necesidades, como ancho de banda amplio, más bandas de frecuencia para trabajar y buena protección contra interferencias.

Por lo tanto, este trabajo de estudio se focaliza en el diseño, desarrollo e integración de un modelo de antena que puede emplearse en diversas aplicaciones de la tecnología 5G de baja frecuencia, donde se mejore tanto su ancho de banda como directividad y pueda controlar su diagrama de radiación a través de una red de alimentación pasiva con una forma y tamaño adecuado. Así mismo se realiza un análisis fundamentado en el estudio de los parámetros físicos de la antena que muestra el comportamiento y funcionamiento de la misma como son los

parámetros S, el patrón de radiación y el acoplamiento.

1.2 Justificación

A medida que surgen nuevas tecnologías y redes de comunicación, como 5G e Internet de las cosas (IoT), se necesitan nuevos tipos de antenas y componentes pasivos, necesarios para tener una mejor conectividad, confiabilidad y procesamiento de datos en diversas áreas cotidianas en la vida de las personas y en el desarrollo industrial.

Por lo tanto, las agrupaciones de antenas para 5G de baja frecuencia surge ante la necesidad de proporcionar una cobertura adecuada para llegar con la señal a la mayor distancia posible, con una buena velocidad de transmisión y reduciendo las interferencias, donde las antenas Microstrip en forma de T son una opción eficaz y eficiente para aumentar la calidad de la transmisión de datos para satisfacer las aplicaciones existentes o futuras de tecnología 5G.

Sin embargo, hay poca investigación sobre este tipo de antenas para 5G de baja frecuencia, especialmente en las antenas asimétricas; el propósito de este trabajo es analizar y realizar un conjunto lineal de antenas que sea eficiente y que pueda operar en un ancho de banda amplio con la ventaja que se puede controlar el diagrama de radiación en cuatro distintos ángulos.

Esto servirá como base para futuras investigaciones que busquen no solo nuevos modelos de antenas sino también que sean capaz de controlar la radiación de energía.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Fabricar una agrupación lineal de antenas usando elementos Microstrip con forma T asimétricas de 2-6 GHz para controlar el diagrama de radiación.

1.3.2 Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de agrupación lineal de antenas para establecer las características de radiación.
- Implementar una agrupación lineal de antenas mediante características, parámetros S, directividad, ganancia y acoplamiento que garantice los requerimientos de diseño.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos a través del VNA y la simulación del dispositivo propuesto.

CAPÍTULO II

2.1 Estado del Arte

Estamos en la época donde las telecomunicaciones tienen una responsabilidad importante en la evolución de la tecnología con el fin de mejorar la transmisión de datos [13]. Debido a esto, las antenas han tomado un gran protagonismo este último tiempo para que trabajen a diversas frecuencias y que tengan un buen rendimiento [25].

Diversas antenas han sido diseñadas en la literatura para cumplir con estas condiciones, de las cuales podemos mencionar: una antena que tenga un parche con diseño elíptico puesto dentro una ranura elíptica pero que no utilicen el mismo centro en el plano de tierra, acompañado con un stub en paralelo a la línea de alimentación puede lograr un buen ancho de banda con una ganancia entre 2 y 5 dB [26]. En una antena monopolo con forma espiral de dos elementos, cada uno de estos están diseñados para una frecuencia diferente, la antena está excitada con una línea de microcinta y tiene un plano de tierra truncado con esto se tiene un buen ancho de banda y una ganancia máxima de 4.7 dB, y tiene una eficiencia mayor a 93 % en toda su banda de operación [27]. Fuentes en [28], propone dos estructuras a la frecuencia de 3.5 GHz, el primero cuenta con un parche y plano de masa con material PEC que tienen dimensiones de 6.6500 mm para el plano de masa y de 3.3200 mm para el parche, con una alimentación por un puerto discreto, obteniendo una ganancia de 7.34 dB y una directividad de 7.67 dBi, mientras que para la segunda estructura una agrupación de 2x2 separados a una distancia de $0.5\lambda_{3,5GHz}$ obteniendo una ganancia de 11.5 dB y una directividad de 11.6 dBi.

Las antenas multibanda tienen el potencial de transformar completamente el sistema, ya que se pueden usar para aplicaciones Wi-Fi, WiMax, Bluetooth y WLAN además de las 5G. Los autores [29], crearon una antena con longitud y el ancho del plano de tierra son 50 mm y 45 mm. La altura del sustrato como 1,6 mm. Las dimensiones del parche son 25 × 40 mm. La longitud de la ranura izquierda en el parche es de 14 mm y la longitud de la ranura derecha es de 7 mm. El ancho de la ranura es de 2 mm y la longitud total de la línea de alimentación es de 12 mm obteniendo resonancia en la frecuencia de 2.48 GHz con -22.9910 dB, en 5.55 con -13.7102 dB. En otro ejemplo, como muestra Gusnay en [30], tiene el mismo concepto de los autores [29] diferenciándose en la forma del parche y la forma de alimentación.

Otro tipo de servicio multibanda se obtiene mediante arreglos de antenas como muestra el autor Cisneros en [31], que diseñó una agrupación de 6 antenas en línea con una línea de alimentación común de 0.9456 mm de ancho y varias líneas que conectan los parches con la línea en común realizado en sustrato silicón obteniendo una adaptación inferior a -10 dB en algunas frecuencias

de la quinta generación. Varum en [32], tiene un concepto semejante al autor Cisneros [31], la diferencia es la forma del agrupamiento de las antenas, utiliza una de 4 x 4 resuena a 28 GHz pero controla el diagrama de radiación en -25° , -15° , 0° , 15° y 25° . Chavarria en [33], diseñó una agrupación lineal con dos parches de distinta frecuencia a 2.4 GHz y a 5.2 GHz adaptados para que, de acuerdo a la necesidad, pueda ser utilizada obteniendo un buen ancho de banda.

Un modelo que ha innovado estos últimos años son las antenas tipo T debido a las características antes descritas y que pueden ser miniaturizadas de forma más sencilla. Estas antenas utilizan diferentes elementos para tener su forma como tiras de metal conectadas a tierra, ranuras en forma de T, combinando tiras de metal con forma de T o utilizando formas como un brazo de metal en forma de L invertida conectado a tierra excita las bandas de baja frecuencia y dos brazos de metal cortos conectados al punto de alimentación para excitar las bandas de frecuencia media y alta [19, 34, 35]. Sin embargo, su ancho de banda se ve comprometido y más aún si se desea que se trabaje a bajas frecuencias (1 GHz a 6 GHz).

Sharawi en [36], propone una agrupación que resuelve estas limitantes. La antena se diseña con un par de ranuras radiantes utilizando el mismo centro estampados en el contorno del plano de tierra, mientras que en el lado opuesto se encuentran las líneas de alimentación, el sistema de alimentación está formado por un par de líneas de microcinta de 50Ω que se usan para alimentar al sistema MIMO 4G, y el sistema MIMO 5G es alimentado por dos divisores de potencia de 1×4 , con esto se puede obtener un ancho de banda considerable, una ganancia máxima de 5 dB y una eficiencia de radiación de 60%. Medina en [37], propone una agrupación con estas características, se diseñan por separado cada monopolo. Cada monopolo consiste de una línea con una longitud y un ancho diseñados a la frecuencia deseada y un plano de tierra que permita la máxima radiación. Para evitar que el plano de tierra degrade las propiedades de radiación se utilizar las líneas o brazos de la estructura como elementos puramente radiantes. Ambos elementos radiantes se alimentan por una línea de microcinta. Por otro lado, debido a que en el diseño individual de ambos monopolos las longitudes de los planos de tierra son distintas.

Así mismo uno de los elementos que tienen gran importancia en las telecomunicaciones son los dispositivos pasivos que ayudan a generar un control, entre los más comunes están la matriz de Blass y la matriz de Butler.

La diferencia entre estos tipos de matrices es como están constituidos. La matriz de Blass cuenta con una línea de alimentación, N elementos radiantes y M puertos de entrada que representan un crecimiento exponencial de los componentes, mientras que la matriz de Butler está constituido de 2^n puertos de entradas y 2^n puertos de salidas, con tres elementos principales; acopladores híbridos en cuadratura, crossovers y desfasadores [38]. Por consiguiente la matriz de Blass es complejo a la hora de fabricar con respecto a la matriz de Butler [38].

La Matriz de Butler de 4x4, tiene cuatro entradas y cuatro salidas con desfases de -45° , 135° , -135° y 45° . La principal diferencia entre los dispositivos es el tipo de sustrato en el que están diseñados, ya que son muy sensibles a la permitividad relativa de cada material. Para hacer una comparación se debe tener en cuenta los criterios de diseño, los S_{ii} de la entrada ≤ -10 dB y las demás entradas ≤ -15 dB, las salidas = -6 dB.

En la matriz de banda ancha diseñado en sustrato FR4, los S_{ii} están dentro del parámetro pero los coeficientes de transmisión no, y en las salidas se tiene valores desde los -7.24 dB en el parámetro S_{38} y en el parámetro $S_{51} = -9.69$ dB [39].

En otro caso se tiene las matrices con sustrato Rogers Ro4003c, es uno de los más comerciales ya que su permitividad relativa ayuda a la hora de diseñar, las matrices de Butler multicapa, este método es ideal para obtener un buen ancho de banda. Se presentan dos tipos con topología elíptica y con topología en rombo para sus conductores con resultados favorables en los parámetros solo con la diferencia que existen una pequeña variación en el posicionamiento de los haces [40,41].

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Antenas

Una antena se define como un componente de un sistema de comunicaciones que puede ser un transmisor o un receptor diseñado específicamente para transmitir o recibir ondas electromagnéticas [42,43].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por la frecuencia (f) y la longitud de onda (λ), donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre ($3 * 10^8 \frac{m}{s}$).

2.2.2 Antenas de Microcinta

Las estructuras de microcinta están hechas de un material aislante delgado y de baja pérdida llamado sustrato dieléctrico [44]. Está completamente cubierto con metal en un lado, llamado el plano de tierra, y parcialmente metalizado en el otro lado, donde se imprime el circuito o patrón de la antena. Los componentes pueden adherirse en el circuito ya sea montando elementos concentrados (resistores, inductores, capacitores, semiconductores, y dispositivos de ferrita) o realizándolos directamente dentro del circuito [45,46].

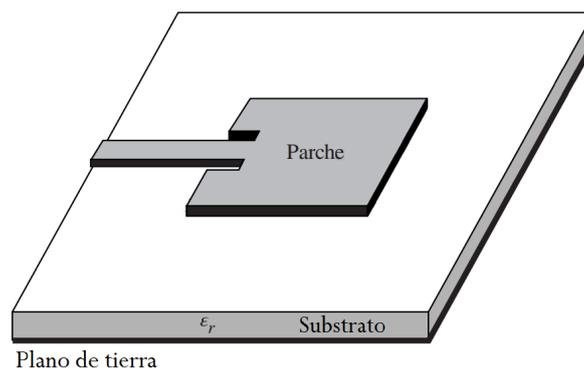


Figura. 2.1. Antena de microcinta [1]

Según el tipo y la aplicación, el parche puede tomar diferentes formas, este tipo de antena se usa mucho, el parche se asienta sobre una base con un plano de tierra debajo como se puede observar en la Fig.2.1.

Para realizar un diseño de antenas de microcinta se debe realizar cierto procedimiento.

- Seleccionar la frecuencia de operación (f_0)
- Calcular el ancho del parche (W), utilizando la constante dieléctrica del sustrato que estemos utilizando (ϵ_r) y el espesor de este (h).
- Calcular la constante dieléctrica efectiva
- Calcular la longitud (L)

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{w}\right)}} \right] \quad (2.2)$$

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0,824h \left(\frac{(\epsilon_{eff} + 3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \right) \quad (2.4)$$

2.2.3 Agrupación de Antenas

Consiste en combinar una cierta cantidad de elementos de antenas individuales para que actúen como una sola unidad de antena, mejorando así su rendimiento general e incluso logrando parámetros característicos que no se pueden lograr con una sola antena [47, 48]. Generalmente, un grupo de antenas se forma agrupando antenas del mismo tipo y modelo dispuestas en una determinada forma geométrica. Aunque no es estricto, se pueden agrupar diferentes tipos de antenas para lograr configuraciones más específicas u otro tipo de limitaciones como el diseño o factores económicos nos impiden usar un tipo de antena [15, 49].

Los agrupaciones de antenas más comunes son las Yugi-Uda, Apertura, Microstrip o de Microcinta y Guía de Onda Ranurada, vienen en una variedad de formas, dependiendo de la aplicación y la necesidad se debe usar la más apropiada.

El factor de agrupación se expresa de la siguiente manera:

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (2.5)$$

$FA(\psi)$ debe ser periódico con periodo de 2π , y los campos radiados resultan:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0 * FA(\psi) \quad (2.6)$$

2.2.4 Método de Alimentación

Al diseñar antenas, es importante conocer el método de alimentación correcto, porque sin una configuración de alimentación eficiente, no funcionarán correctamente, sin importar la precisión con la que se diseñen los elementos radiantes [2, 50]. Los métodos de alimentación de antenas parche más utilizados son: alimentación sin y con contacto.

La alimentación Microstrip es una alimentación por contacto como se muestra en la Fig. 2.2 [2]. Hay dos formas principales de alimentar una antena con una línea de Microstrip: conectando la línea directamente al borde de la antena y alimentando la línea de microcinta a través del inserto de la antena. Para una conexión directa al borde de la antena, cambiar la posición de la línea de microcinta en relación con el parche proporcionará una mayor o mejor adaptación de impedancia. En el caso de la alimentación con Microstrip por medio de inserciones, la profundidad del inserto determina la coincidencia de impedancia [2].

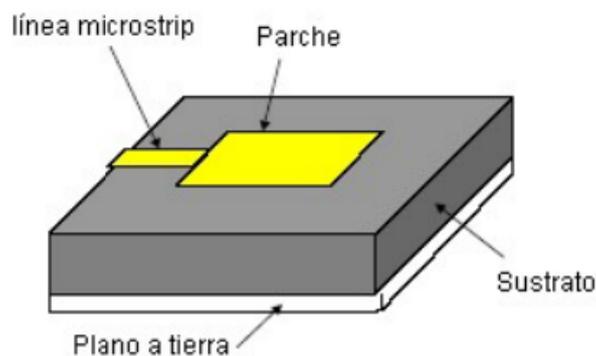


Figura. 2.2. Alimentación por Microstrip [2]

2.2.5 Parámetros de la Antena

La antena formará parte de un sistema más grande, por lo que es importante comprender los parámetros (es decir, los parámetros de transmisión y recepción) que permiten realizar pruebas de rendimiento para determinar si el diseño cumple con las especificaciones requeridas [51].

La antena estará conectada al transmisor e irradiará la máxima potencia posible con la mínima pérdida. Habitualmente, la antena se mantiene a cierta distancia del transmisor y se conecta a un cable o guía de ondas, que también participa en el emparejamiento por su resistencia, atenuación y longitud [52, 53]. El transmisor produce corrientes y campos que se pueden medir en puntos característicos de la antena. La impedancia de una antena (Z_a), se define como la relación entre el voltaje y la corriente en su entrada. La resistencia es a menudo compleja. La parte real se denomina resistencia de antena y la parte imaginaria, reactancia de antena [1, 2].

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (2.7)$$

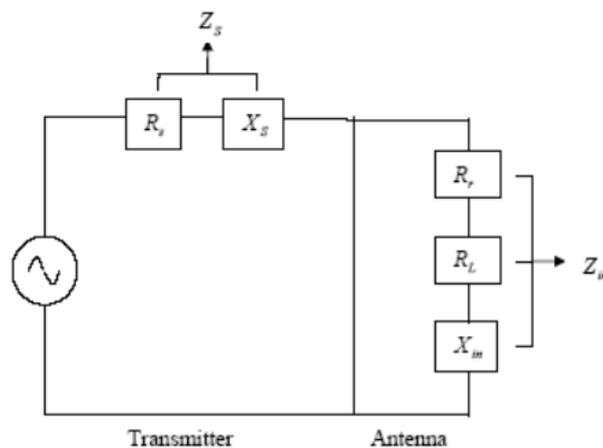


Figura. 2.3. Representación de impedancias [1] [2]

La Fig.2.3 demuestra que Z_{in} es la impedancia de la antena en los terminales; R_{in} es la resistencia de la antena en los terminales y X_{in} es la reactancia en los terminales de la antena.

Por lo tanto, es fácil concluir que la potencia entregada a la antena se convertirá en potencia radiada y disipada debido a las pérdidas. Debido a estas pérdidas, no se radia toda la potencia entregada a la antena. Por lo que, la eficiencia de la antena se define como la relación entre la potencia radiada y la potencia transmitida [1, 52].

$$Eficiencia = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (2.8)$$

La directividad es quizás el parámetro más importante al evaluar el diagrama de radiación de una antena. Está definida como la relación entre la máxima intensidad de radiación en el haz principal y la intensidad de radiación promedio sobre todo el espacio [54]. En otras palabras, cuanto más direccional, más nítido será el haz de radiación [52, 55].

$$D = \frac{\rho_{max}}{P_r/(4\pi r^2)} \quad (2.9)$$

La directividad y ganancia de una antena están directamente relacionadas. La diferencia entre los dos es que, en términos de ganancia, la que compara es la potencia entregada a la antena en lugar de la potencia radiada [1]. Por lo tanto, la pérdida de antena se tiene en cuenta en la ganancia. La ganancia y la directividad de la antena están relacionadas con la eficiencia de la antena [52, 53].

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.10)$$

Las antenas pueden radiar de manera diferente en cada región del espacio. Por lo tanto, es importante definir un sistema de coordenadas que nos permita determinar fácilmente las direcciones en el espacio tridimensional. La intensidad de radiación es el efecto de radiación (parte real) por unidad de ángulo sólido Ω en una dirección dada, y este parámetro no tiene nada que ver con la distancia de la antena transmisora [1].

$$U = r^2 S \quad (2.11)$$

Geoméricamente, el Steradian (S) es un ángulo sólido cuyo vértice está en el centro de una esfera de radio r , y cuya superficie esférica igual a la de un cuadrado con cada lado de la longitud r [1]. La interpretación del ángulo sólido se puede mirar en la Fig.2.4, al que es referido la intensidad de radiación.

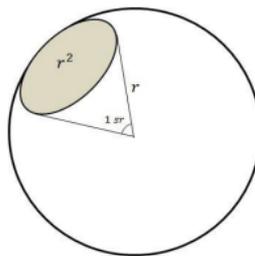


Figura. 2.4. Representación gráfica del Steradian [1]

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena, en función de las coordenadas en el espacio, a una distancia fija de la antena, normalmente en la región de campo lejano [1]. El ancho de haz a -3 dB, es la separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia es la mitad del máximo [24].

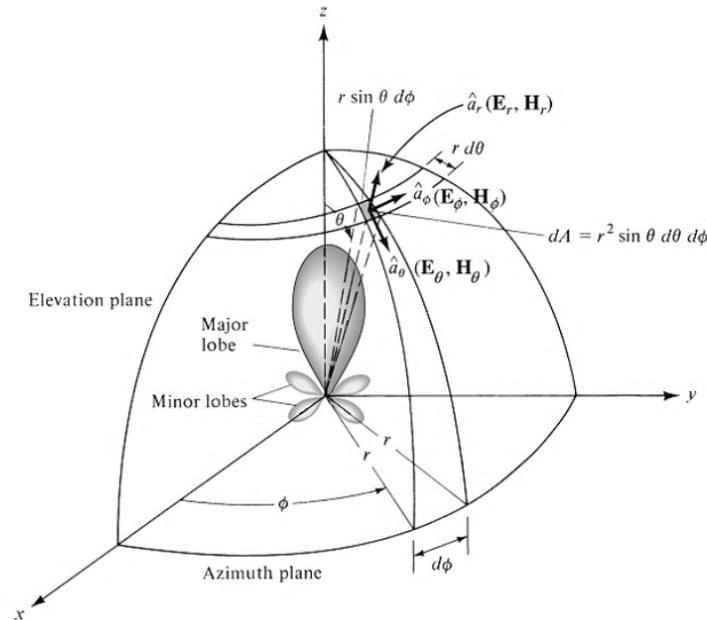


Figura. 2.5. Diagrama de radiación tridimensional [3]

Una representación del modelo de radiación 3D es la Fig.2.5, suele expresarse en coordenadas esféricas, expresando en función de sus variables angulares como lo son: θ y ϕ [3].

Las partes de un diagrama de radiación se pueden dividir en lóbulo primario, secundario, lateral y posterior. El primario contiene la dirección de máxima radiación. Un lóbulo menor puede ser cualquier lóbulo de menor amplitud excepto el lóbulo mayor. Los lóbulos laterales suelen ser los más grandes de los lóbulos pequeños, normalmente adyacentes al lóbulo principal. Cabe mencionar que los lóbulos pequeños suelen reflejar radiación en direcciones indeseadas. El lóbulo posterior es el lóbulo radiante, cuyo eje forma un ángulo de aproximadamente 180° con respecto al haz principal de la antena [56, 57].

2.2.6 Matriz de Butler

La matriz Butler es un dispositivo de efectos pasivos capaz de generar haces y consta de acopladores híbridos, cruzadores y desfasadores. Contiene n entradas y n salidas. La matriz de Butler recoge o transmite las señales de la agrupación de antena y les aplica un cambio de fase, lo que da como resultado $2n$ haces con una separación angular constante [4, 39].

El elemento principal de una Matriz de Butler es el acoplador híbrido de 90° a -3 dB (Fig. 2.6).

La energía que ingresa por la puerta 1 se reparte entre la 2 y la 3, quedando la puerta 4 aislada. La puerta 3 es la puerta acoplada. La relación entre las potencias incidente y acoplada es el nivel de acoplo y caracteriza el acoplador [38,58,59].

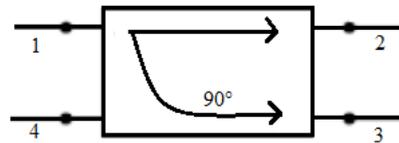


Figura. 2.6. Acoplador híbrido de 90° [4]

A partir de un acoplador híbrido de 90° a -3 dB, se diseñan las matrices de Butler, por lo general son dispositivos de 4 x 4 como muestra la Fig.2.7. Debiéndose cumplir los parámetros de diseño, los puertos de ingreso menores a -15 dB, salidas 6 dB con fases de 45° entre cada uno de sus puertos [60,61]. La Tabla 2.1 muestra los valores de una matriz de Butler 4 x 4 ideal.

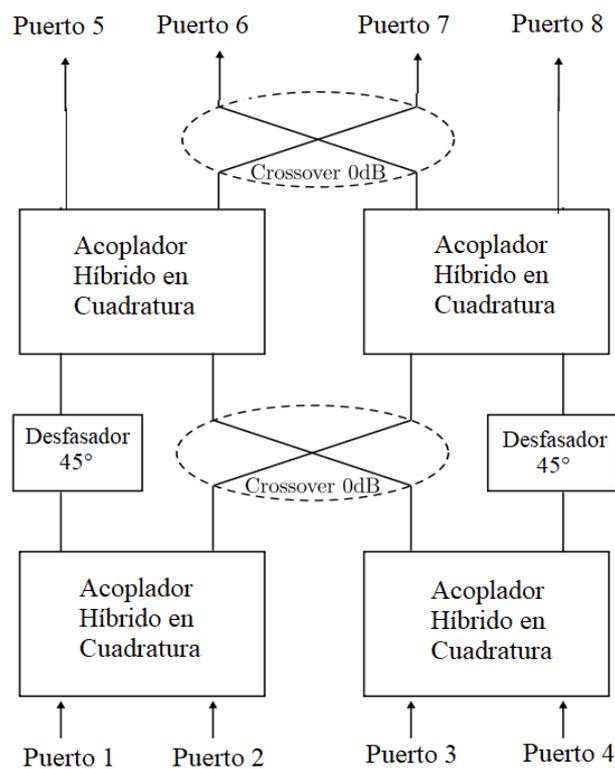


Figura. 2.7. Diseño de una matriz de butler de 4 x 4 [5]

	S6 - S5	S7 - S6	S8 - S7	SUMA	PROMEDIO
Puerto 1	-45°	-45°	-45°	-135°	-45°
Puerto 2	135°	135°	135°	405°	135°
Puerto 3	-135°	-135°	-135°	-405°	-135°
Puerto 4	45°	45°	45°	135°	45°

Tabla 2.1. Ángulos de una matriz de Butler ideal

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

3.1.1 Tipo de Investigación

En el presente estudio investigativo, se utiliza un método de exploración en el que se examinan las antenas con forma de T asimétricas. Posteriormente, se desarrollan una agrupación de antenas asimétricas en forma de T que opera en el rango de frecuencias de 2 GHz a 6 GHz, y finalmente se fabrica experimentalmente el diseño propuesto, en el cual se analizan los parámetros y características de la antena diseñada.

3.1.2 Métodos de Investigación

En este proyecto se aplican los métodos analíticos, descriptivos, deductivos y experimental para el diseño, simulación y fabricación de un modelo realizable de agrupación de antenas lineales.

3.1.3 Procedimiento

El diagrama de bloques que se presenta en la Fig. 3.8, se utilizó como base para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

La primera parte se centra en realizar un estudio general de las antenas asimétricas en forma de T y se estudia sus características y aplicaciones. La sección de análisis y selección examina los elementos de la antena T asimétrica y sus diversas configuraciones. Luego, se revisa los diseños existentes, las características, los materiales utilizados, la función, la frecuencia de trabajo, rendimiento y el tamaño de la antena.

Luego, la propuesta del diseño y optimización de la misma, donde se determina la frecuencia, tamaño y forma de la antena, diagrama de radiación y fuente de alimentación. Para las simulaciones, esto se realiza en el software CST Studio Suite, que dependiendo del resultado se procede a fabricar, caso contrario a optimizar valores y la configuración para obtener el mejor diseño.

En la fabricación, se implementa el diseño realizado en el simulador CST Studio Suite y mediante un analizador de redes vectoriales (VNA), se realizan las mediciones necesarias de los

dispositivos. El análisis de los resultados se realiza mediante software estadístico IBM SPSS Statistics que sirve de gran ayuda a tomar las decisiones correspondientes.

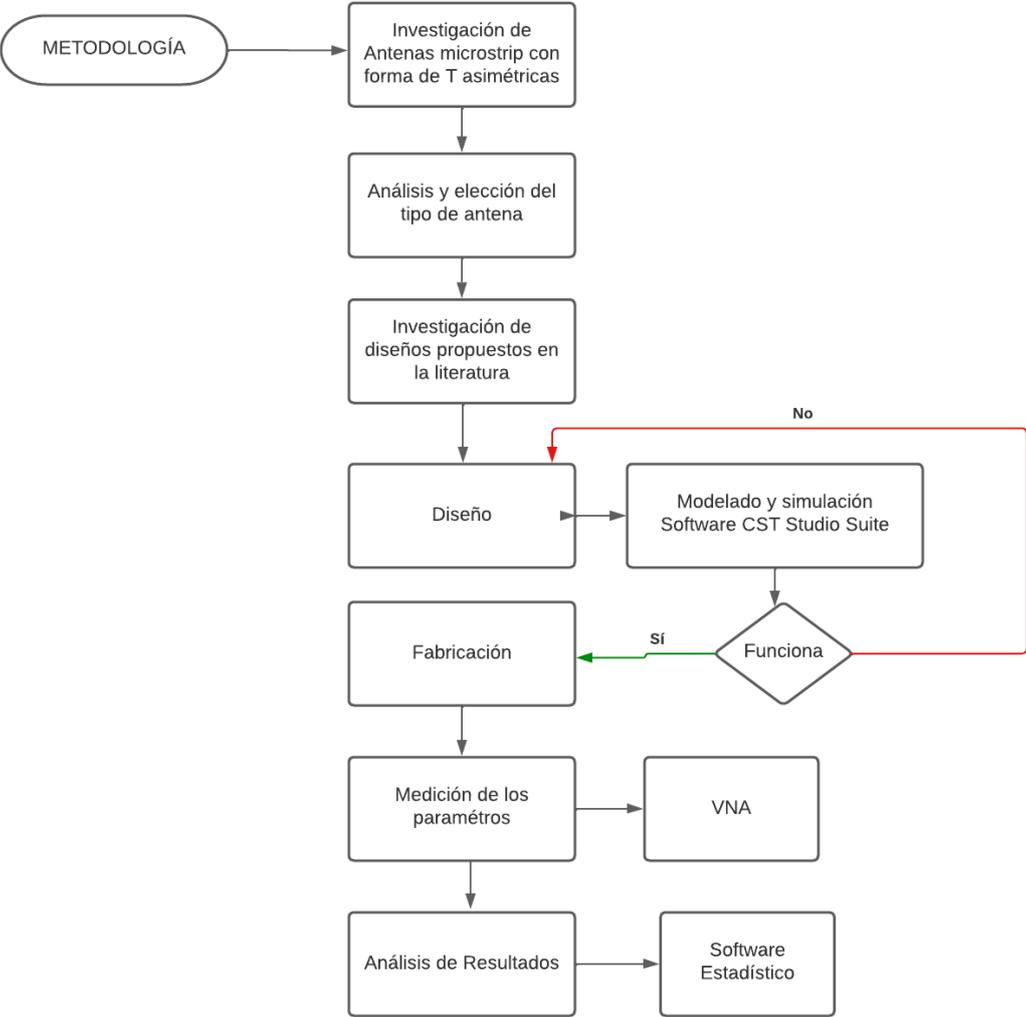


Figura. 3.8. Diagrama de bloques que describe el proyecto de investigación

3.1.4 Fuentes de Información

Con el fin de avalar la factibilidad del proyecto de investigación se realizó una revisión bibliográfica de varias sociedades y publicaciones científicas, IEEE Xplorer, revistas, tesis, sobre las antenas tipo T asimétricas.

3.1.5 Población y Muestra

3.1.5.1 Población

La población en estudio son todos los valores obtenidos de las simulaciones realizadas como son: parámetros S, directividad y ganancia. Para ésta finalidad se utilizó el software de simulación CST Studio Suite.

3.1.5.2 Muestra

La muestra se tomó al azar de la población anteriormente indicada, considerando el tamaño de la población con características de resultados exitosos en comparación con el tamaño de la población con características de resultados no exitosos.

3.1.6 Instrumentos de la Investigación

Las herramientas utilizadas para desarrollar este proyecto de tesis se dividen en dos categorías, cualitativos o cuantitativos. Cualitativos a través de la visualización de uno o más casos y recopilación cuantitativa de información publicada anteriormente, como investigaciones, revistas, libros e Internet.

3.1.7 Operacionalización de las Variables

VARIABLE	CONCEPTO	INDICADORES	TECNICAS E INSTRUMENTOS
INDEPENDIENTE			
Rango de frecuencia	Frecuencia de trabajo	Frecuencia: 2 a 6 GHz	VNA
DEPENDIENTE			
Parámetros de la agrupación de antena	Características y comportamiento de la antena	Parametros S Directividad Ganancia	CST Studio Suite VNA

Tabla 3.2. Operalización de las variables

3.2 Diseño y Fabricación

En este apartado se presenta el proceso de diseño y fabricación de la agrupación lineal de antenas con elementos T asimétricos que trabaja en el rango de 2 GHz a 6 GHz.

3.2.1 Agrupación Lineal de Antenas con Elementos tipo T Asimétricos

Se empieza diseñando el elemento de referencia (Fig. 3.9), una antena a la frecuencia de operación de 4 GHz y un $\lambda = 0.075\text{m}$, en FR4, este sustrato brinda una permitividad dieléctrica $\epsilon = 4.3$ y una tangente de pérdidas $\tan(\delta) = 0.025$, valores especificados en [62].

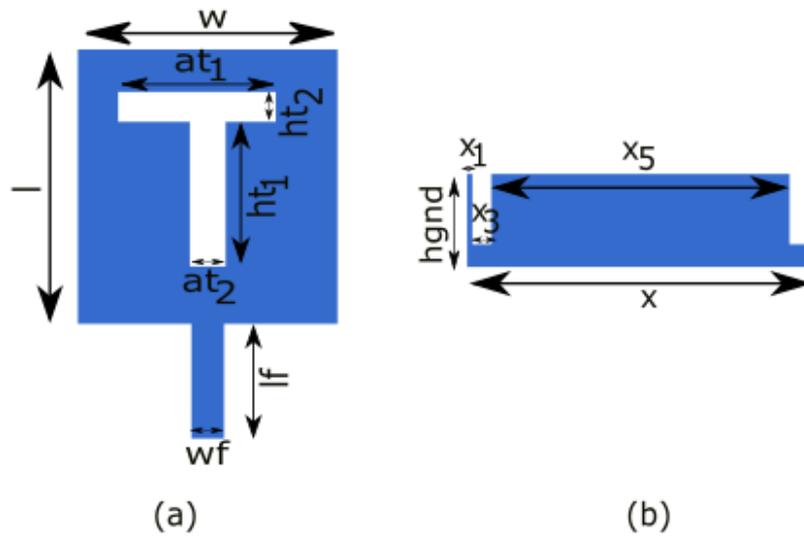


Figura. 3.9. Diseño de una antena T asimétrica (a) Vista frontal (b) Vista Posterior

Para calcular las dimensiones de cada parte que constituye el elemento de referencia, se utilizan las siguientes formulas:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{w}\right)}} \right] \quad (3.12)$$

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3.13)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0,824h \left(\frac{(\epsilon_{eff} + 3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \right) \quad (3.14)$$

Y los resultados están especificados en la Tabla 3.3, que muestra los valores de las variables utilizadas en el diseño de antena t asimétrica. La antena en la parte frontal tiene un parche Microstrip con un slot en forma de T asimétrica y por la parte posterior el plano de masa, rectangular con dos pequeños destajes en los extremos.

Antena									
Vista Frontal	Variable	y	l	lf	wf	ht ₁	ht ₂	at ₁	at ₂
	Valor (mm)	43.26	27.51	11.50	2.73	14.50	3	13.20	3
Vista Posterior	Variable	hgnd	x	x ₁	x ₃	x ₅	hgnd ₁		
	Valor (mm)	9.20	36.50	0.55	2	31.40	7		

Tabla 3.3. Variables de dimensiones del diseño de una antena T asimétrica

El diseño de la agrupación lineal de antenas (Fig. 3.10) consta de 4 antenas ubicadas linealmente, diseñada a la frecuencia central de 4 GHz, un $\lambda = 0.075\text{m}$, acoplado a 50Ω . La agrupación de antenas tiene un ancho de 180 mm X 43.76 mm de alto y un espesor de 1.5 mm, el factor de agrupación es de 45 mm (Tabla 3.4).

Para determinar el factor de agrupación se utilizó la formula:

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (3.15)$$

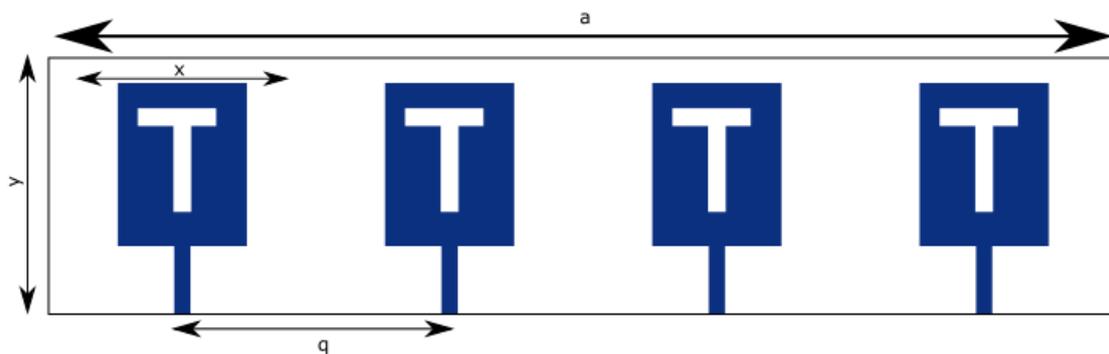
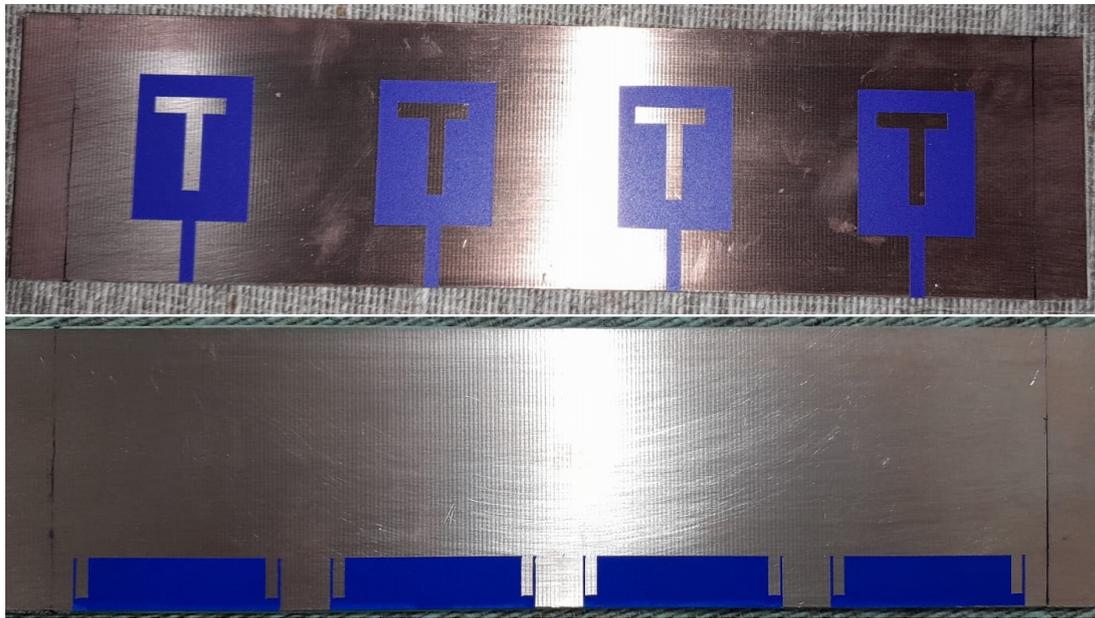


Figura. 3.10. Diseño de una agrupación lineal de antenas con elementos T asimétricos

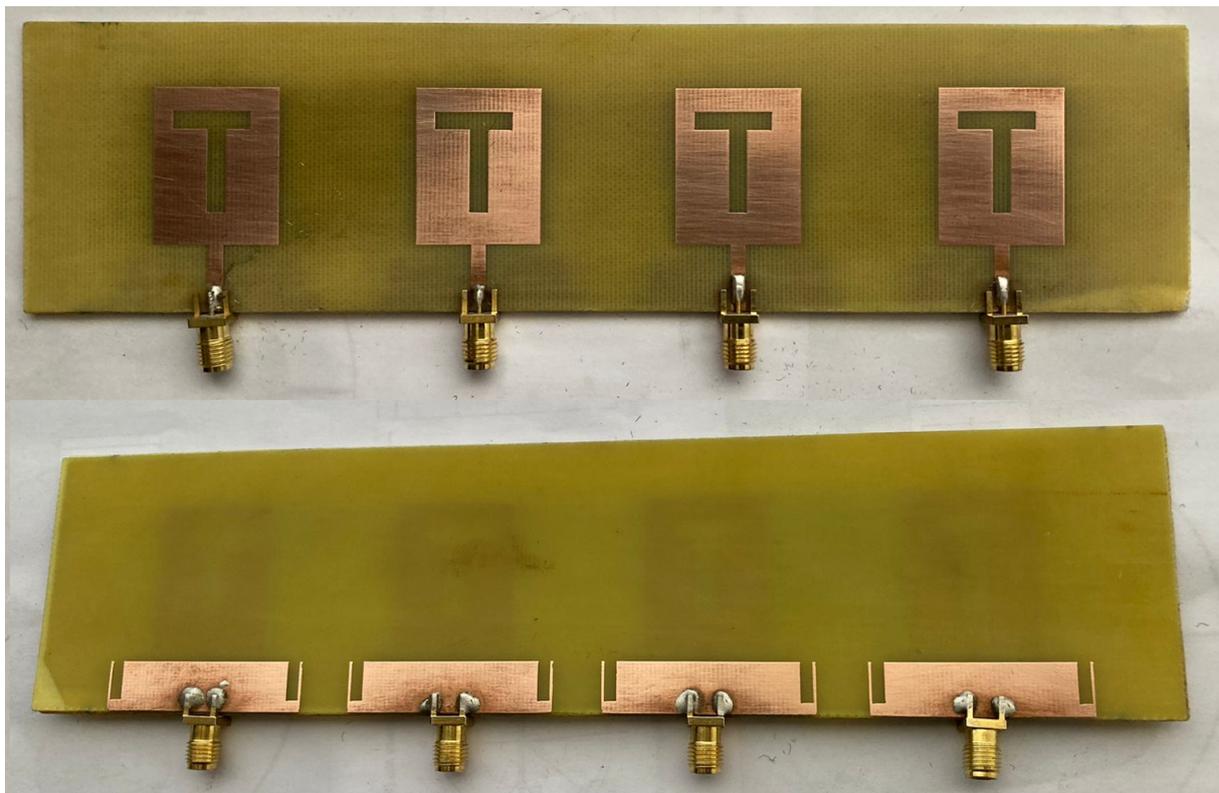
Agrupación				
Variable	a	y	x	q
Valor (mm)	180	43.26	36.50	45

Tabla 3.4. Variables de las dimensiones del diseño de la agrupación de antenas

Una vez obtenido el diseño de la agrupación se procede a la implementación del dispositivo el cual se lo realizó mediante el método de corrosión como muestra la Fig. 3.11(a), luego se suelda el conector SMA asimétrico y el resultado final se muestra en la Fig. 3.11(b).



(a)



(b)

Figura. 3.11. Fabricación de la agrupación lineal de antenas con elementos T asimétricos (a) Preparación de la agrupación (b) Agrupación fabricada

Además, se diseñó un alimentador pasivo para la agrupación de antenas como es la Matriz de

Butler, tiene como objetivo crear una variación de fase de las salidas como se muestra en la Tabla 2.1. En el cual se puede apreciar que, de acuerdo al puerto excitado, obtendrá la variación correspondiente.

La matriz de Butler diseñada tiene la estructura que se evidencia en la Fig. 2.7 la cual consta de 4 acopladores híbridos de 90° en cuadratura a -3 dB, dos líneas de transmisión de 45° respectivamente y dos cruzadores a la frecuencia de 2.4 GHz, primero se realiza el diseño del acoplador híbrido en cuadratura, ya que de éste depende asegurar la variación de 90° . Una vez comprobado, se procedió ya con el resto del diseño, acoplar los cruzadores y las líneas de transmisión con los desfases de 45° , cumpliendo con los parámetros de reflexión inferiores a -15 dB, y los de transmisión alrededor de -6 dB, con una variación en fase de -45° , 135° , -135° y 45° a la frecuencia de trabajo.

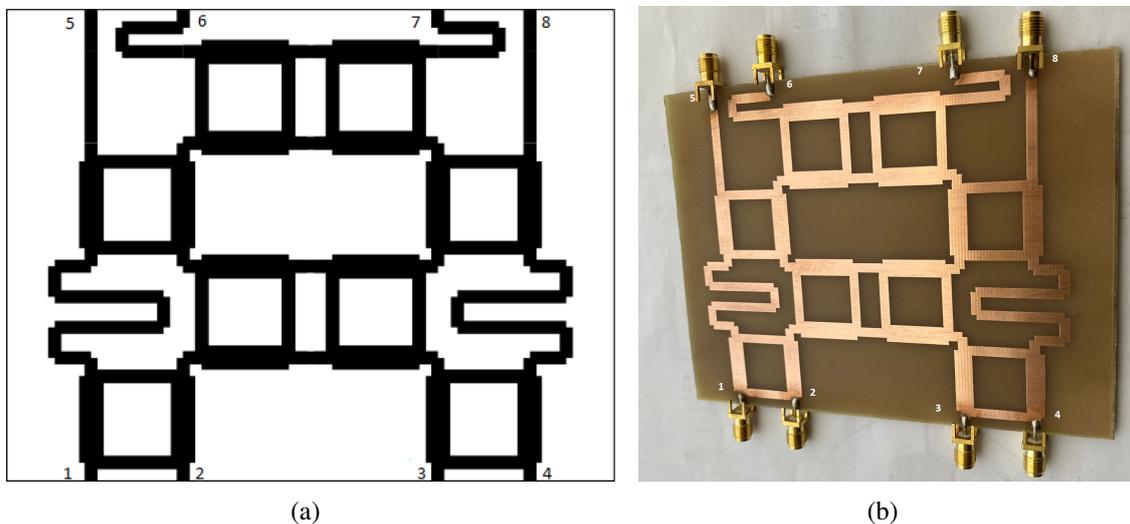


Figura. 3.12. Proceso de fabricación de la Matriz de Butler (a) Diseño en CST Studio Suite de la Matriz de Butler, (b) Matriz de Butler fabricada

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados y Discusiones

Para analizar el rendimiento de estos dispositivos se utilizó un analizador de redes vectoriales económico, que tiene una tasa de error mínima. El VNA es una herramienta útil para medir los parámetros S de los dispositivos implementados, lo que nos permitió comparar con los resultados obtenidos previamente en el software electromagnético CST Studio Suite, y poder validar el rendimiento de los elementos propuestos.

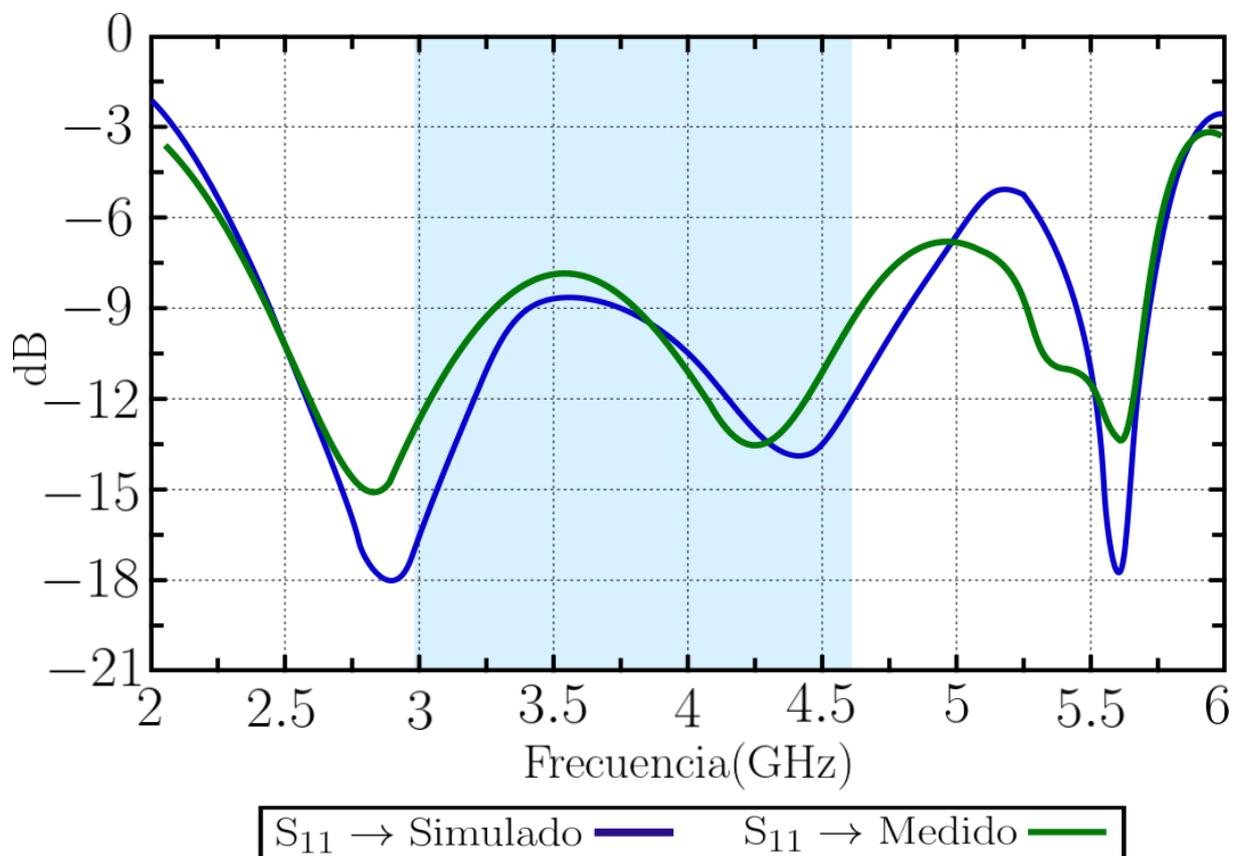


Figura. 4.13. Coeficiente de reflexión del elemento de referencia simulado y medido

Para asegurar el óptimo rendimiento de la antena, es necesario que presente una adaptación inferior a -10 dB, esto se refiere a la capacidad de la antena para transferir la máxima cantidad de energía de la fuente de señal a la carga. En ese sentido, se procedió a realizar una comprobación de la antena individual (Fig. 3.9). Se pudo constatar que en simulación tiene la adaptación es inferior a -10 dB en el rango de frecuencias de 2.4 a 3.45 GHz que representa un 24 % de BW, de 4.05 a 4.55 GHz con un 12.5 % de BW, y de 5.48 a 5.65 GHz con un 4.25 % de

BW. Mientras que en la medición tiene una adaptación inferior a -10 dB, desde 2.38 GHz a 3.1 GHz esto representa el 18 % de BW, de 3.9 GHz a 4.55 GHz con un 16 % de BW, y de 5.3 GHz a 5.67 GHz con un 9.25 % de BW, si bien la implementación se realizó a partir de la simulación, tiene pequeñas variaciones, unas de las causales para que suceda esto es el método de implementación, el VNA y factores externos que no podemos controlar. Sin embargo, indica que la antena está funcionando de manera eficiente, ya que la mayor parte de la energía se transfiere desde el transmisor hasta el receptor (Fig.4.13).

Analizando el gráfico de impedancia de la antena de referencia a las frecuencias de acoplamiento óptimo, en el primer caso es en la frecuencia 2,83 GHz, con una parte real de 50.87 Ω y una parte imaginaria de 13,45 j, lo que demuestra que funciona bien la antena a esa frecuencia como muestra la Fig. 4.14.

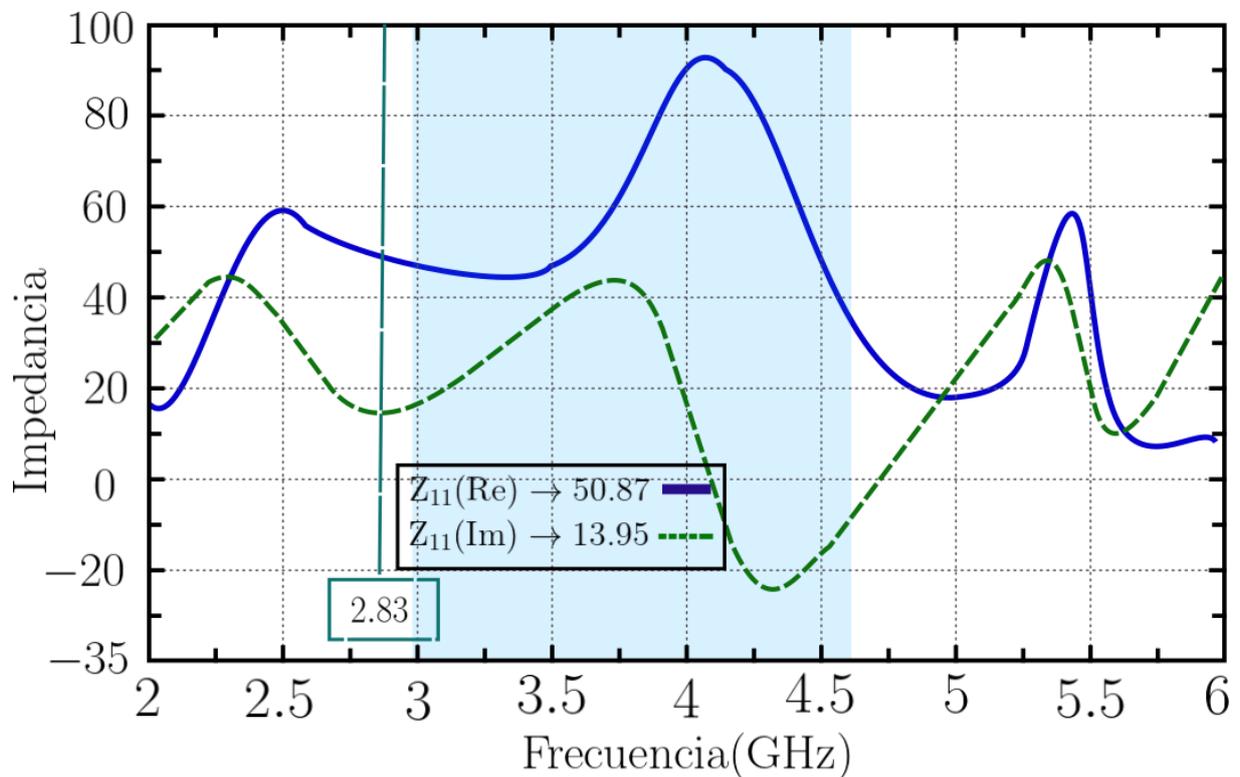


Figura. 4.14. Impedancia a la frecuencia de 2.83 GHz

En el segundo caso es en la frecuencia 4.40 GHz, con una parte real de 45.85 Ω y una parte imaginaria de -21.19 j, lo que demuestra que funciona bien la antena a esa frecuencia como muestra la Fig. 4.15.

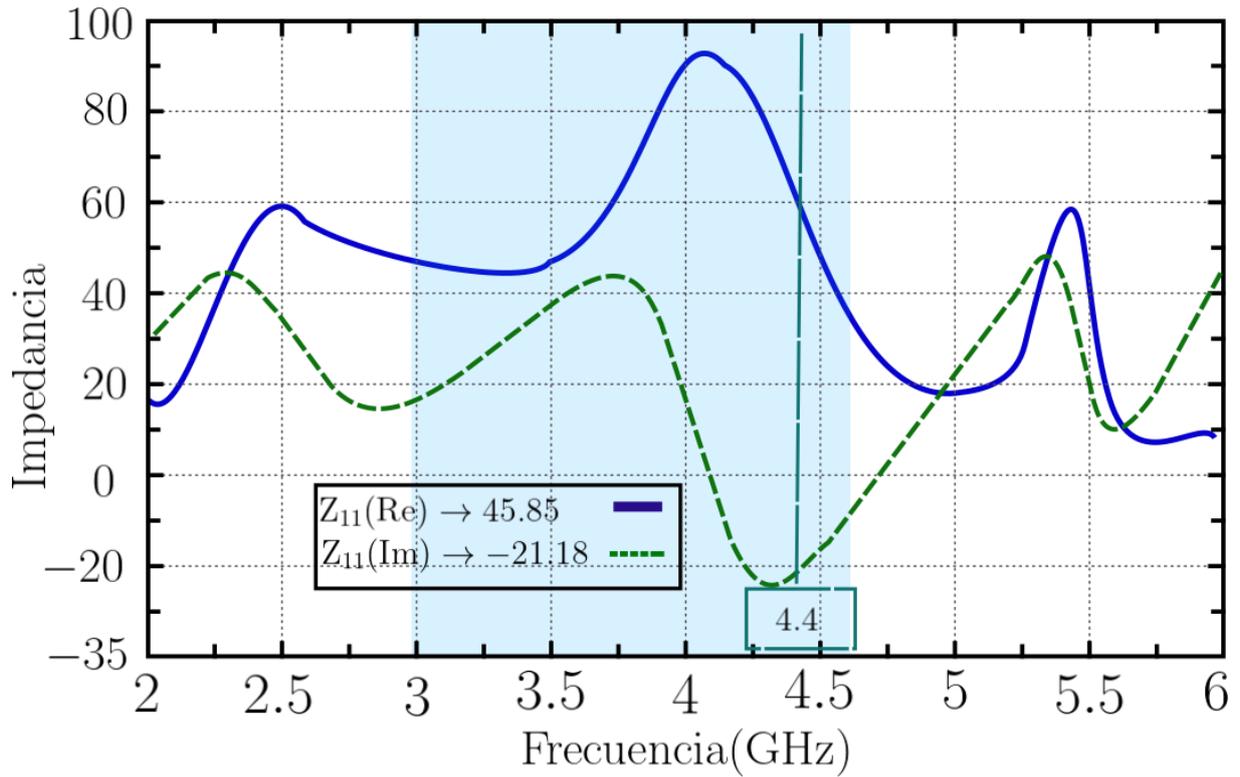


Figura. 4.15. Impedancia a la frecuencia de 4.40 GHz

En el tercer caso es en la frecuencia 5.55 GHz, con una parte real de 45.85 Ω y una parte imaginaria de -21.19 j, como muestra la Fig. 4.16.

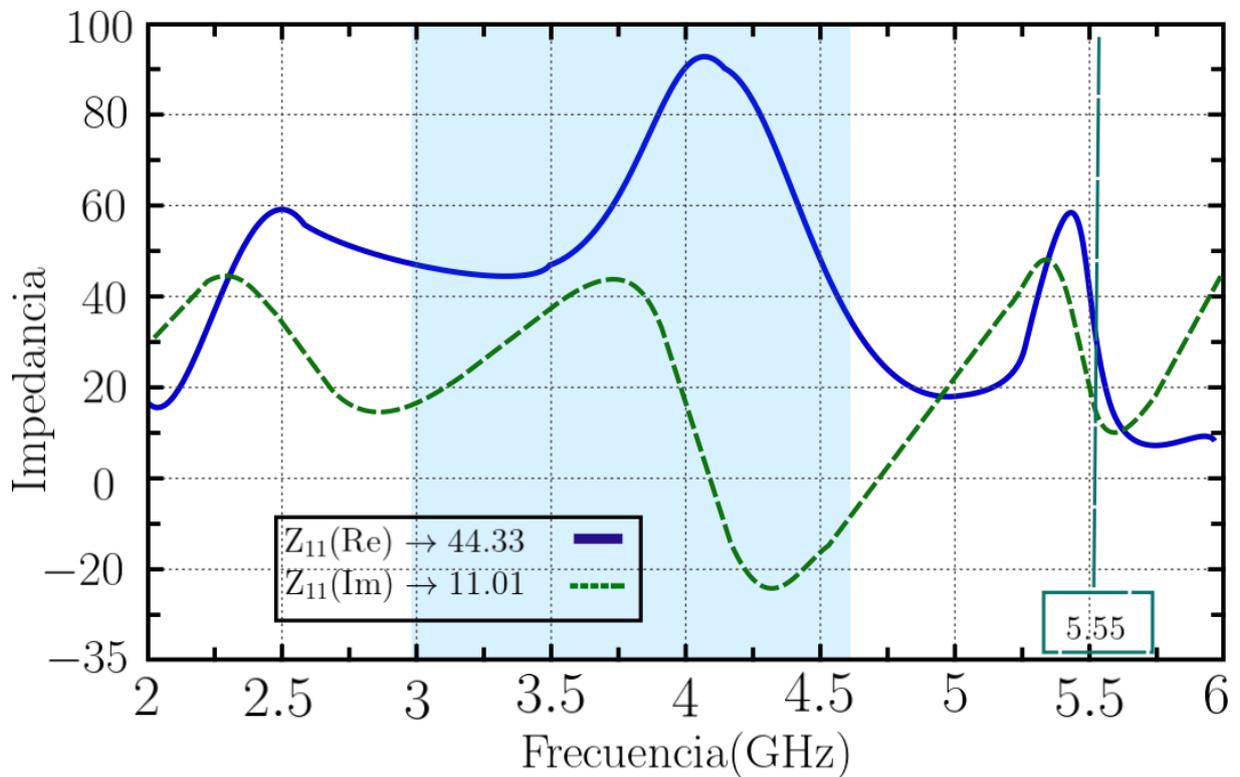


Figura. 4.16. Impedancia a la frecuencia de 5.55 GHz

Hay que recordar que la ganancia y la directividad de la antena son dos parámetros importantes que miden la capacidad de la antena para dirigir la energía de la señal en una dirección específica. Al analizar las tres frecuencias mencionadas anteriormente, la directividad a 2,83 GHz es de 1,82 dBi, la directividad a 4,4 GHz es de 2,74 dBi y la directividad a 5,55 GHz es de 3,13 dBi, como se muestra en la Fig. 4.17.

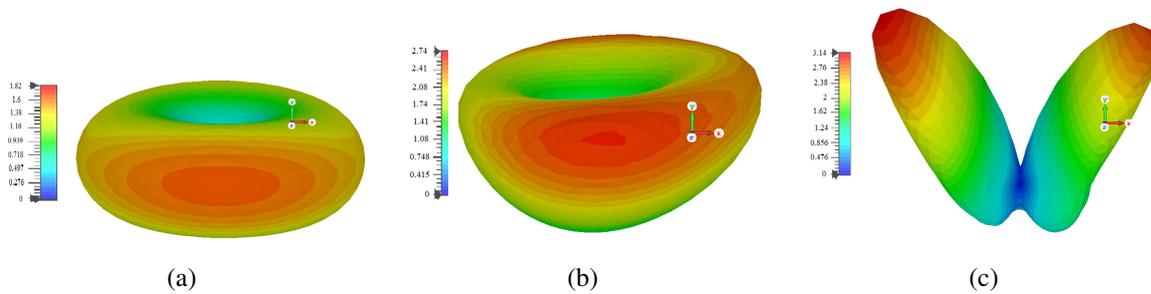


Figura. 4.17. Diagrama de radiación del elemento de referencia (a) Frecuencia de 2.83 GHz, (b) Frecuencia de 4.4 GHz, (c) Frecuencia de 5.55 GHz

A continuación, se comprueba el funcionamiento de la agrupación lineal de antenas, la cual debe garantizar su correcto funcionamiento en el rango de frecuencia de la tecnología 5G.

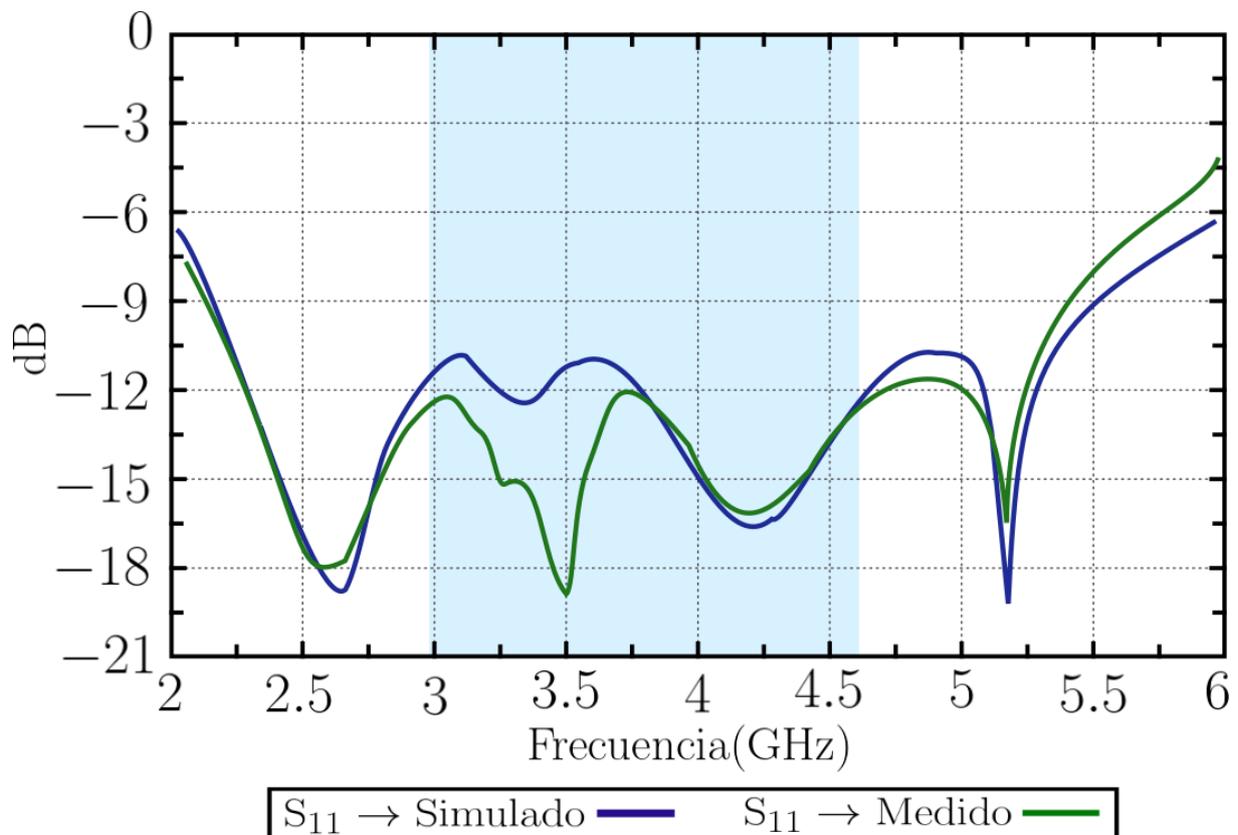


Figura. 4.18. Coeficiente de reflexión de la agrupación de antenas simulado y medido

Las bandas de baja frecuencia de la tecnología 5G son 2.4 GHz, 3.5 GHz y 5.2 GHz. Frecuencias en la que la agrupación cuenta con un coeficiente de reflexión S_{11} inferior a -10 dB (Fig. 4.18),

en la Tabla 4.5 resume los datos obtenidos en la simulación como medido con el analizador de redes vectoriales (VNA), por lo tanto se comprueba el funcionamiento de la agrupación.

Las diferencias aparentes en la Fig 4.18. pueden deberse a la implementación, la forma de medir en el analizador de redes vectoriales u otros factores como el ambiental. Sin embargo, el ancho de banda simulado y medido para esta agrupación es del 77,5 %.

Agrupación de 2 -6 Ghz			
Parametro	Frecuencia	Método	Método
	(Ghz)	Simulado (db)	Medido (db)
S11	2.2	-10	-10
	2.4	-15.045	-15.840
	3.5	-11.230	-18.810
	5.2	-19.832	-16.160
	5.3	-10	-10

Tabla 4.5. Coeficiente de reflexión de la agrupación a las principales frecuencias de la tecnología 5G

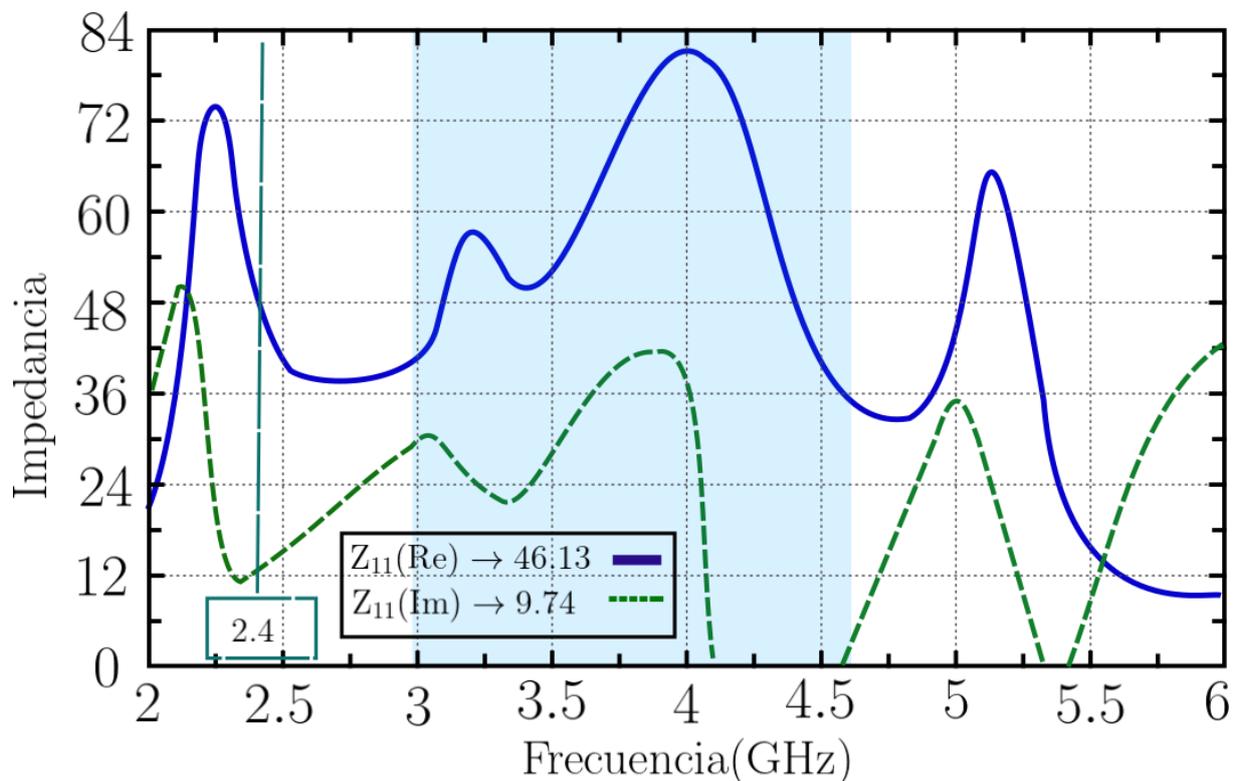


Figura. 4.19. Impedancias de la agrupación lineal a 2.4 GHz

Continuando con el análisis, es importante destacar que el acoplamiento de las líneas de alimentación también se evaluó en este estudio. Para ello, se analizó el gráfico de impedancias para la frecuencia de 2.4 GHz y se encontró que la línea de alimentación está acoplada ya que presenta

una impedancia de 46.14Ω en la parte real y $9.74 j$ en su componente imaginaria, tal como se puede observar en la Fig. 4.19.

Es importante mencionar que el acoplamiento de las líneas de alimentación es esencial para asegurar que la antena reciba la señal de manera adecuada y que la energía se transmita eficientemente desde el transmisor hasta la antena. En ese sentido, el hecho de que la línea de alimentación esté acoplada y presente una impedancia adecuada es un indicador de que la antena está funcionando correctamente y de que se está transmitiendo la máxima cantidad de energía desde el transmisor hacia la antena.

Para obtener el diagrama de radiación de la agrupación de antenas se simuló con la misma amplitud y la misma fase para las frecuencias de 2.4 GHz, 3.5 GHz y 5.2 GHz.

En cuanto al análisis de la antena, se registraron los siguientes resultados: en la frecuencia de 2.4 GHz, el diagrama de radiación muestra un lóbulo principal y dos lóbulos secundarios. La antena presenta una ganancia de 7.538 dB y una directividad de 7.74 dBi, como se puede observar en la Fig. 4.20.

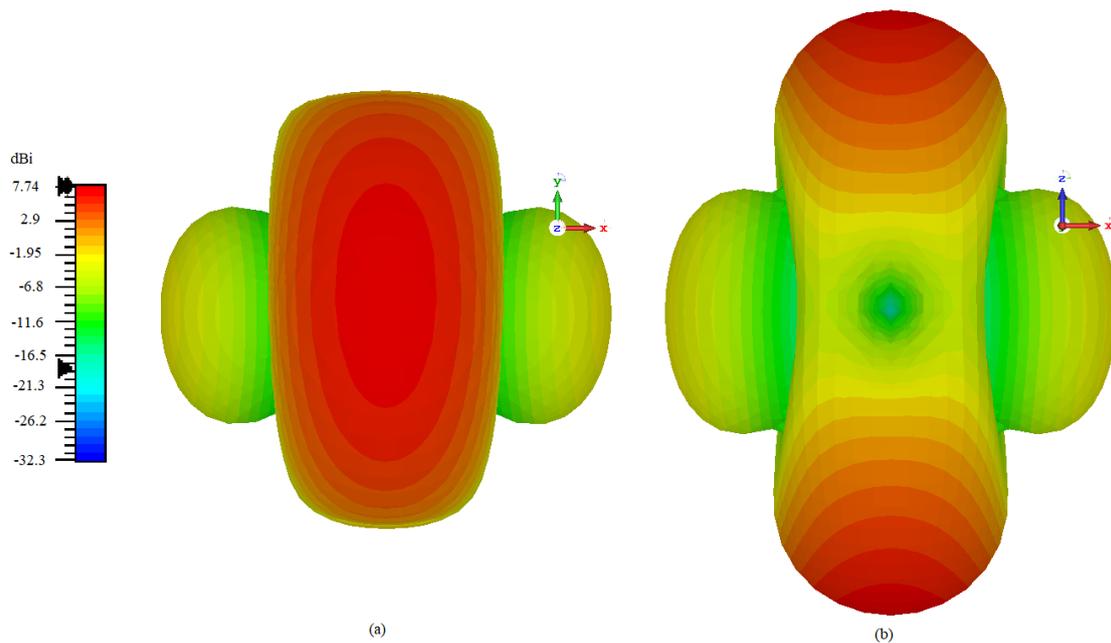


Figura. 4.20. Diagrama de radiación para la frecuencia de 2.4 GHz (a) Eje Y, (b) Eje Z

En la frecuencia de 3.5 GHz, el diagrama de radiación también presenta un lóbulo principal y dos lóbulos secundarios. En esta frecuencia, la antena presenta una ganancia de 9.794 dB y una directividad de 10.12 dBi, tal como se muestra en la Fig.4.21.

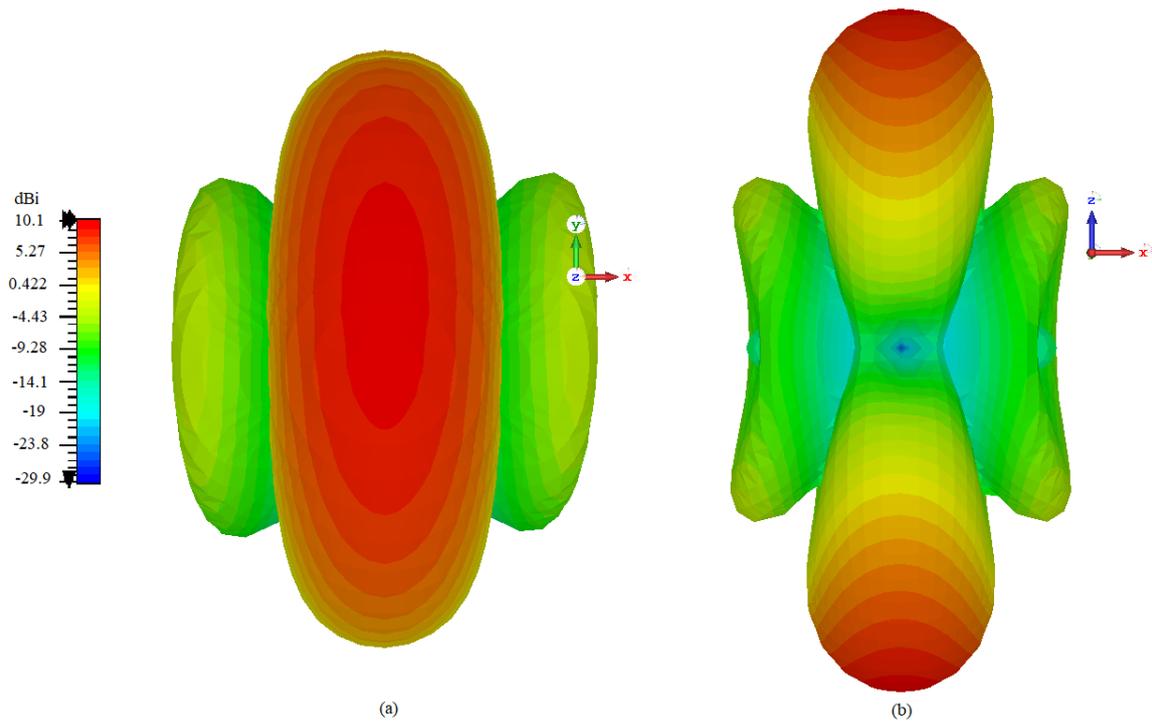


Figura. 4.21. Diagrama de radiación para la frecuencia de 3.5 GHz (a) Eje Y, (b) Eje Z

Mientras que para la frecuencia de 5.2 GHz el diagrama de radiación está compuesto por un lóbulo principal y tres lóbulos secundarios como se puede observar en la Fig.4.22, ofreciendo una directividad de 9.83 dBi y una ganancia de 6.009 dB. Los resultados obtenidos indican que es capaz de transmitir y recibir señales de manera eficiente en las frecuencias evaluadas.

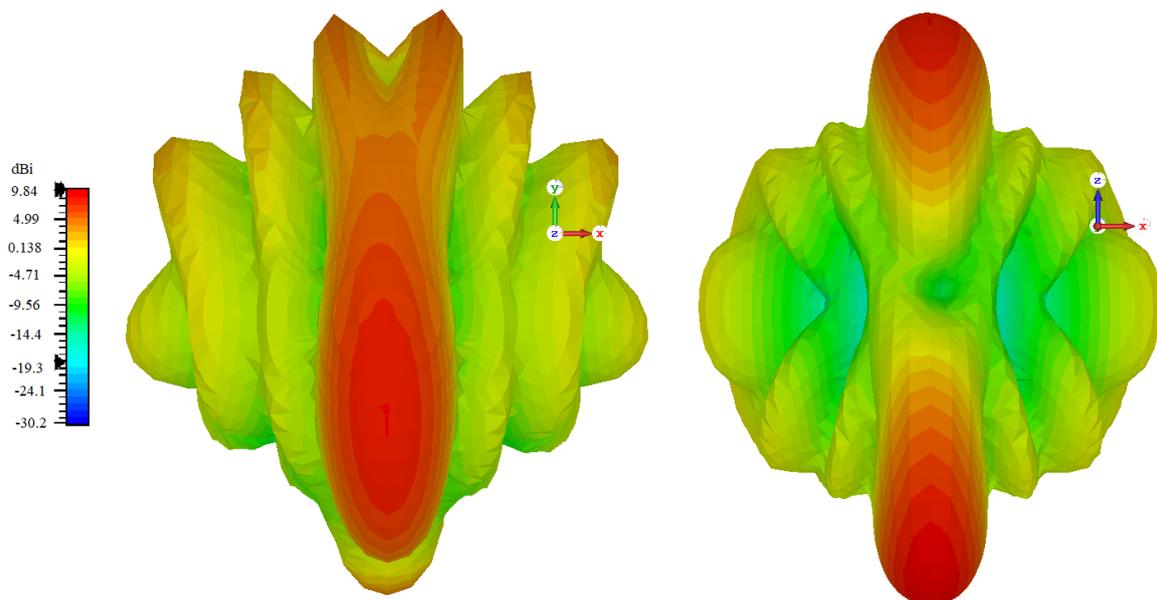


Figura. 4.22. Diagrama de radiación para la frecuencia de 5.2 GHz (a) Eje Y, (b) Eje Z

En la matriz de Butler se realizó tres comprobaciones que son: entradas, salidas y el desfase. Los puertos de ingresos de la matriz tienen que tener valores $S_{nn} \leq -15$ dB, para su correcto funcionamiento, valores que se pueden observar en la Tabla 4.6.

La forma de medir es acoplando los puertos que no se utilizan con cargas de 50Ω , esto permite que se pierda la energía, la medición se realizó un puerto a la vez obteniendo valores de: $S_{11} = -28.680$ dB, $S_{22} = -17.250$ dB, $S_{33} = -15.840$ dB, $S_{44} = -21.110$ dB. Valores que se asemejan a los que se obtuvieron en la simulación que se encuentran en la Tabla 4.6.

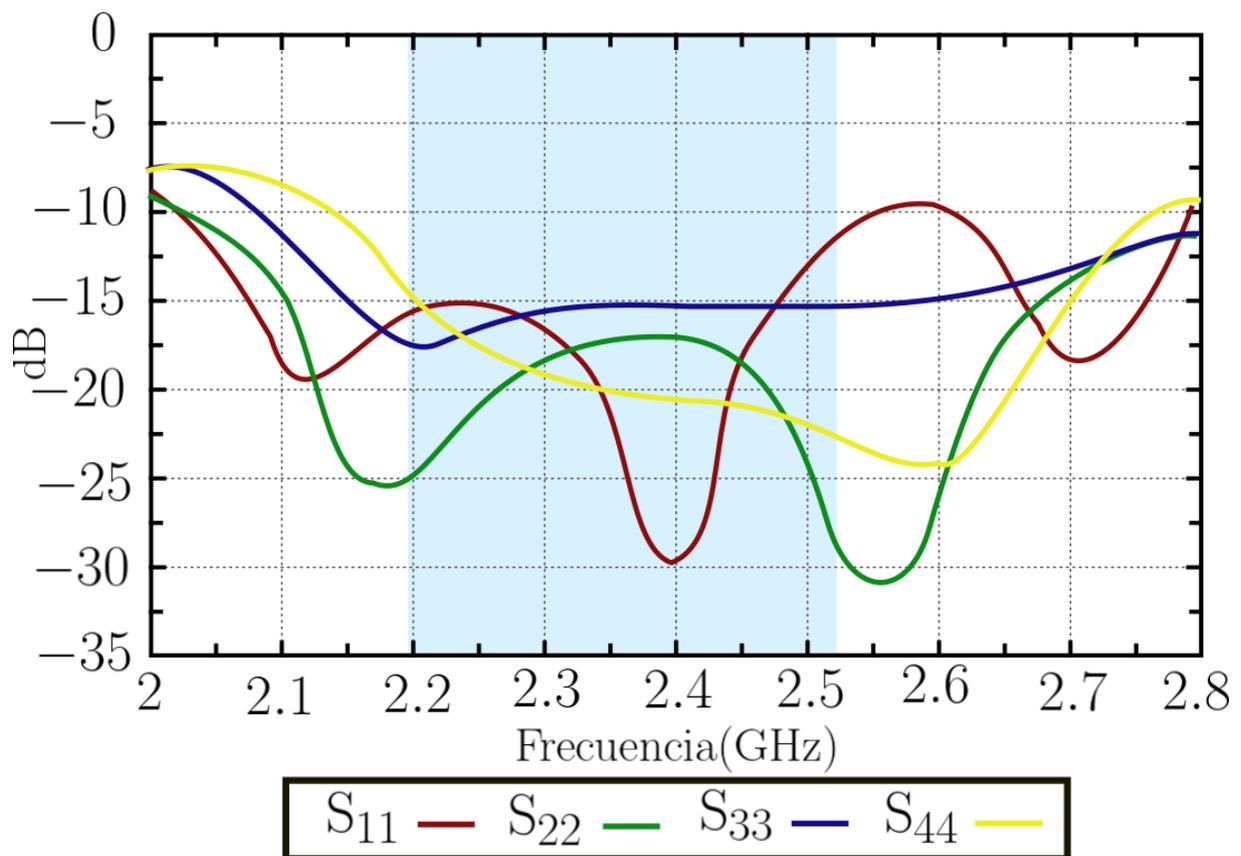


Figura. 4.23. Medición de los parámetros S_{ii} en los puertos de ingreso realizado con el VNA.

Entradas (dB)				
	S1	S2	S3	S4
S1	-32.406	-24.257	-27.933	-25.695
S2	-24.236	-17.314	-20.827	-27.880
S3	-27.880	-20.827	-17.314	-24.236
S4	-25.695	-27.933	-24.257	-32.406

Tabla 4.6. Parámetros S de los puertos de ingreso realizado en la simulación

Continuando con el proceso, para los puertos de salida el parámetro S establecido es de alrededor de los -6 dB, y la variación del ángulo depende del puerto excitado en el ingreso, por ejemplo, si ingresa por el puerto 1 la variación será de -45° .

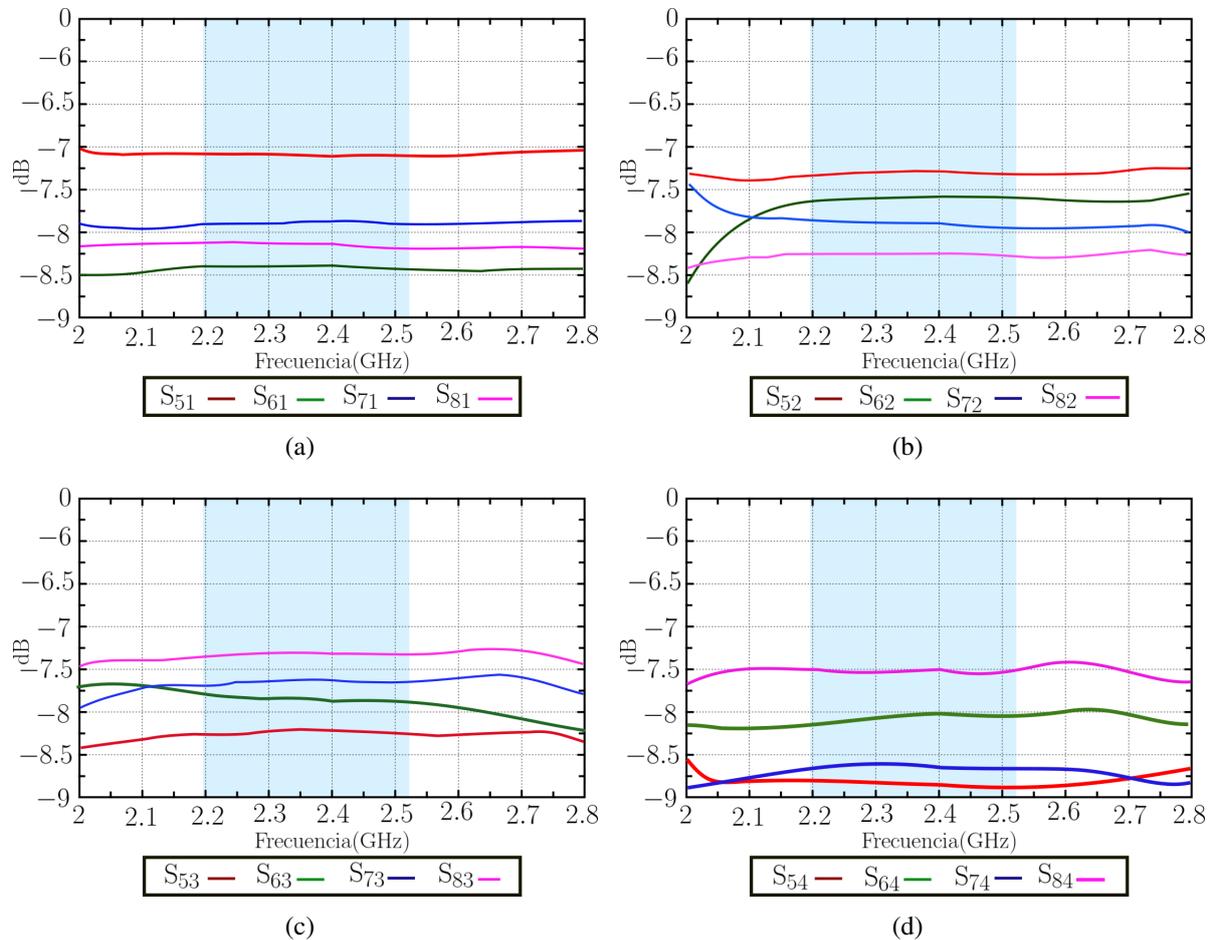


Figura. 4.24. Medición de los parámetros S_{nn} en las salidas de la matriz de Butler mediante el VNA, (a) Parámetros S de salida cuando el ingreso es por el puerto 1, (b) Parámetros S de salida cuando el ingreso es por el puerto 2, (c) Parámetros S de salida cuando el ingreso es por el puerto 3, (d) Parámetros S de salida cuando el ingreso es por el puerto 4

Los puertos de salida dependen del puerto de ingreso excitado, la Fig. 4.24 muestra cómo trabaja cada puerto de salida a la frecuencia de 2.4 GHz. En cada literal de la Fig. 4.24 tiene colores específicos para visualizar a que parámetro S corresponde; líneas de color rojo representa la salida por el puerto 5, verdes puerto 6, azules puerto 7 y rosadas puerto 8. Es decir en la Fig. 4.24(a) el parámetro de color rojo corresponde al $S_{51} = -7.189$ dB, estos valores obtenidos con el analizador de redes vectoriales (VNA) están especificados en la Tabla 4.7 (a), donde podemos comprobar que existe similitud con los datos obtenidos en la simulación.

(a) Salidas en (dB)			(b) Salida en Fase (grados)		
	Valor Simulado	Valor Medido		Valor Simulado	Valor Medido
S15	-8.255	-7.189	S15	4.155	-39.950
S25	-7.828	-7.396	S25	-93.205	-127.400
S35	-8.975	-8.225	S35	-44.615	-90.890
S45	-8.296	-8.805	S45	-134.311	-170.700
S16	-7.821	-8.432	S16	-44.602	-80.950
S26	-7.782	-7.604	S26	45.694	4.260
S36	-9.719	-7.811	S36	-174.437	152.700
S46	-8.972	-8.045	S46	-93.222	-125.100
S17	-8.972	-7.904	S17	-93.222	-133.100
S27	-9.719	-7.811	S27	-174.437	150.200
S37	-7.782	-7.604	S37	45.694	-4.455
S47	-7.821	-8.636	S47	-44.602	-82.890
S18	-8.296	-8.218	S18	-134.311	-173.500
S28	-8.975	-8.225	S28	-44.615	-85.340
S38	-7.828	-7.396	S38	-93.205	-133.600
S48	-8.255	-7.522	S48	4.155	-32.060

Tabla 4.7. Parámetros S de los puertos de salida realizado en la simulación como los medidos en el VNA. (a) Salidas en (dB), (b) Salida en Fase (grados)

Otro parámetro importante para los puertos de salida es la variación de fase de cada puerto. Aunque los datos simulados y medidos tienen valores diferentes como muestra la Tabla 4.7 (b), por ejemplo, S_{15} tiene un ángulo de 4.155° en el simulador y el medido con el analizador de redes vectoriales tiene un ángulo de -39.950° , lo importante es que los ángulos formen la matriz de la Tabla 2.1.

Usando los datos simulados y medidos (Tabla 4.7(b)), se evidencia que existe la variación deseada en ambos casos de -45° , 135° , -135° y 45° (Tabla 4.8), con un error \pm de 1 grado con respecto a la Tabla 2.1. Una vez que se han verificado los tres parámetros de la matriz de Butler, se puede asegurar que el dispositivo está funcionando correctamente para realizar su función de alimentación a la agrupación de antenas.

Método de simulación					
	S6 - S5	S7 - S6	S8 - S7	SUMA	PROMEDIO
Puerto 1	-48.757	-48.620	-41.089	-138.466	-44.935
Puerto 2	138.899	139.869	129.822	408.590	135.517
Puerto 3	-129.822	-139.869	-138.899	-408.590	-135.517
Puerto 4	41.089	48.620	48.757	138.466	44.967

(a)

Método de medición					
	S6 - S5	S7 - S6	S8 - S7	SUMA	PROMEDIO
Puerto 1	-41.000	-52.150	-40.400	-133.550	-44.517
Puerto 2	131.660	145.940	124.460	402.060	134.020
Puerto 3	-116.410	-157.155	-129.145	-402.710	-134.237
Puerto 4	45.600	42.210	50.830	138.640	46.213

(b)

Tabla 4.8. Promedio de ángulos de cada puerto de la matriz (a) Método de simulación, (b) Método de medición

Después de haber probado los dispositivos individualmente, se les unió con cables de 90 cm los dos dispositivos, para verificar el comportamiento del trabajo en conjunto.

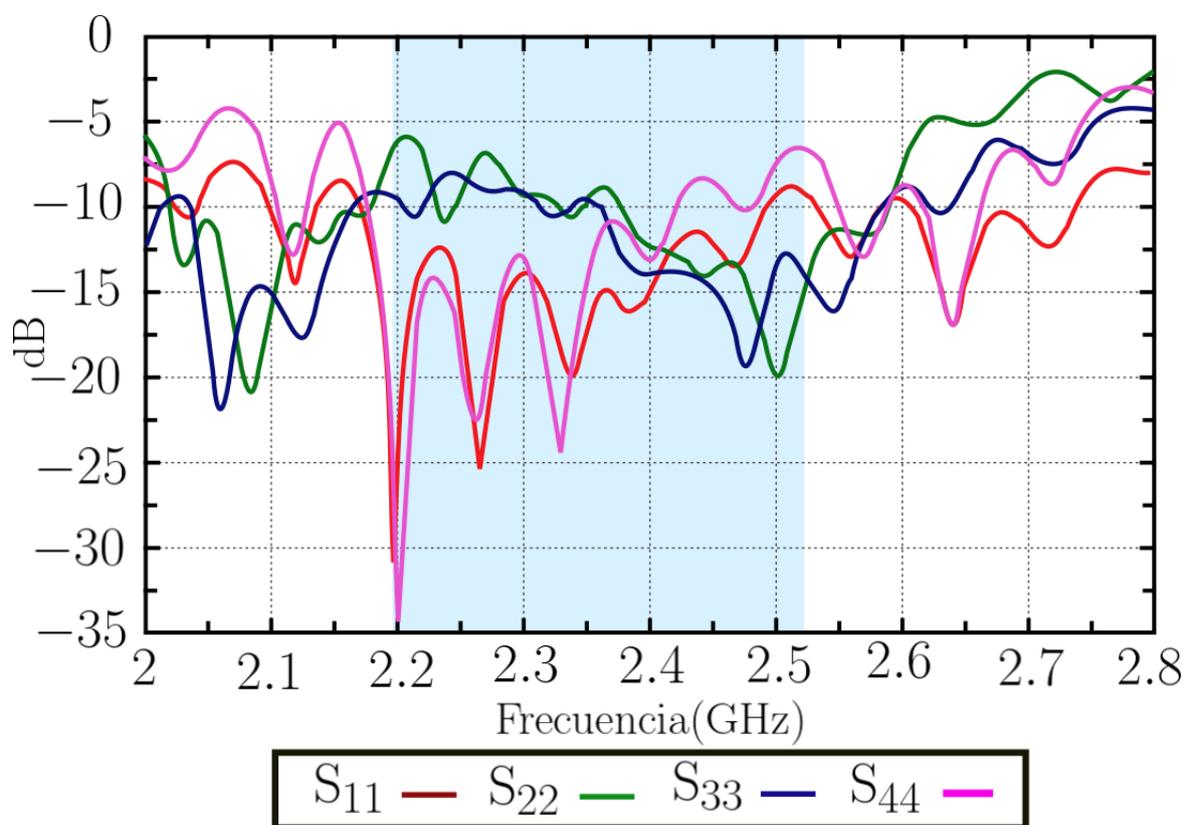


Figura. 4.25. Parámetros S medidos con el analizador de redes vectoriales del trabajo conjunto de los dispositivos (Puerto 1 línea roja, Puerto 2 línea verde, Puerto 3 línea azul, Puerto 4 línea rosada)

En la unión de los dos dispositivos, la frecuencia de trabajo es 2.4 GHz, de acuerdo al puerto excitado en la matriz se obtiene el parámetro S correspondiente como podemos observar en la Fig. 4.25. Recalcando que los puertos que no se utilicen deben estar acoplados con una carga de 50Ω para evitar fuga de energía. Cuando la excitación se da por el puerto 1 se tiene -15.84 dB, cuando se lo hace por el puerto 2 se obtiene -12.72 dB, por el puerto 3 es -14.28 dB y el puerto 4 un valor de -13.84 dB.

Para determinar el diagrama de impedancia para la frecuencia de 2.4 GHz a la que opera los dispositivos, se hace a través de la combinación de puertos, por ejemplo, si se alimenta por el puerto 1, su parte real es de 53.59Ω y la parte imaginaria de $5.70 j$ como se puede observar en la FIG. 4.26, entonces la antena funciona perfectamente en la frecuencia mencionada.

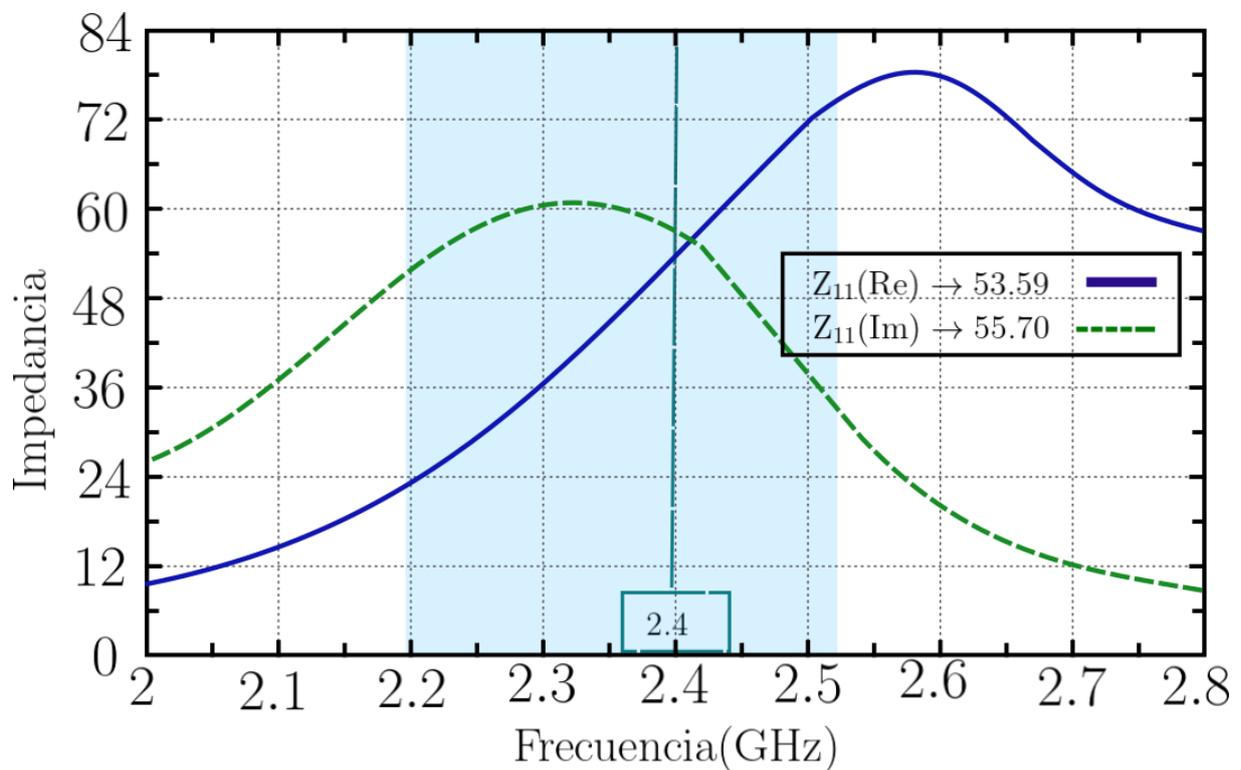


Figura. 4.26. Diagrama de impedancia por combinación de puertos para la frecuencia 2.4 GHz del puerto 1

La directividad y ganancia son características esenciales en la unión de estos dispositivos la cual se detalla en la Tabla 4.9 para cada puerto excitado.

De acuerdo a la Tabla 4.9, los valores de directividad y ganancia de los dos métodos son similares. Al alimentar la matriz por cada puerto tiene diferentes valores debido al control en grados que proporciona está, por ejemplo a -45° se tiene una directividad de 7.118 dBi con una ganancia de 6.941 dB y para 45° un valor de 7.238 dBi en su directividad con una ganancia de 7.018 dB.

Matriz y Agrupación de antenas en 2.4 GHz			
Parámetro	Puerto	Simulado	Simulado con valores medidos VNA
Directividad (dbi)	1	7.201	7.118
	2	9.011	9.037
	3	9.035	9.127
	4	7.208	7.238
Parámetro	Puerto	Simulado	Simulado con valores medidos VNA
Ganancia (db)	1	7.155	6.941
	2	8.563	8.584
	3	8.584	8.657
	4	9.965	7.018

Tabla 4.9. Directividad y Ganancia a la frecuencia de 2.4 GHz

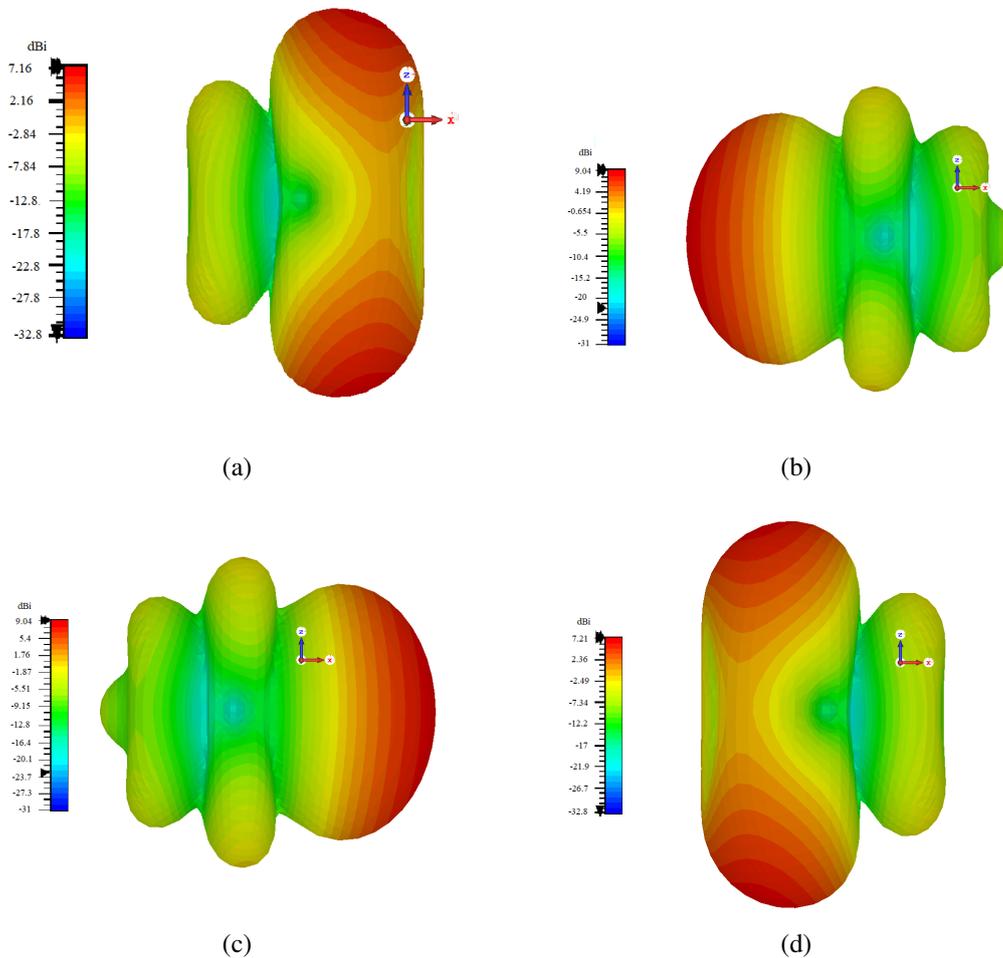


Figura. 4.27. Diagrama de radiación en 3D por medición de parámetros S con el analizador de redes vectoriales (a) Puerto 1 (76.63°), (b) Puerto 2 (89.11°), (c) Puerto 3 (81.87°), (d) Puerto 4 (84.65°)

Los datos obtenidos a través del trabajo conjunto de ambos dispositivos, medidos con el analizador de redes vectoriales, se ingresaron al software CST Studio Suite para realizar una comparación visual del diagrama de radiación con los resultados de la simulación. Debido a la falta de una cámara anecoica para visualizar el comportamiento del diagrama directamente, este proceso permitió confirmar el control del diagrama de radiación, como se muestra en la Fig. 4.27. En resumen, la evaluación de los datos a través del software proporcionó una verificación adicional del desempeño de la antena en las frecuencias analizadas. El diagrama de radiación en forma polar muestra que existe un control de 60° entre cada puerto, como se visualiza en la Fig. 4.28, el puerto 3 trabaja en 0° , el puerto 1 en 60° , puerto 4 en 120° y puerto 2 en 180° .

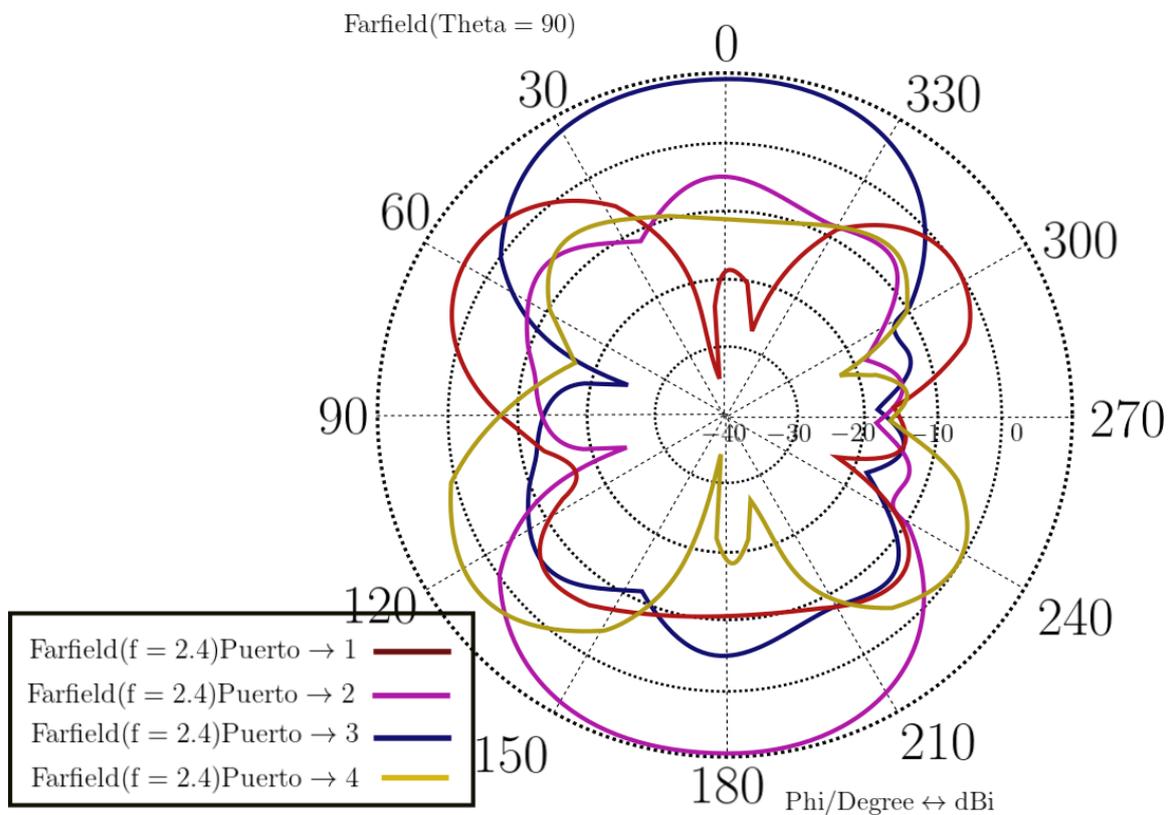


Figura. 4.28. Diagramas de radiación en forma polar simulado con los parámetros S medidos con el analizador de redes vectoriales

4.2 Análisis de la agrupación lineal de antenas y la matriz simulada con la agrupación lineal de antenas y matriz fabricada

A continuación, se presenta una estadística comparativa del coeficiente de reflexión, ganancia y directividad del trabajo en conjunto de la matriz de Butler con la agrupación lineal de antenas simulada con los resultados de los dispositivos implementados de acuerdo a los datos de la muestra de este caso de estudio.

4.2.1 Prueba de normalidad de muestras

Hipótesis:

H_0 = los datos siguen una distribución normal

H_a = los datos no siguen una distribución normal

Estadístico de las distribuciones:

Shapiro-Wilk si $n \leq 50$

Zona de rechazo:

Si p-valor < 0.05 , se rechaza H_0

Si p-valor ≥ 0.05 , se acepta H_0 y se rechaza H_a

Para las pruebas de normalidad se utilizó el software IBM SPSS Statistics. Puesto que el tamaño de muestra en cada caso es ≤ 50 , por tanto, se empleó el test de normalidad de Shapiro-Wilk.

Pruebas de normalidad				
	Método	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
C.R.(S11)	Medido	0,925	14	0,259
	Simulado	0,943	14	0,459
Directividad	Medido	0,894	14	0,093
	Simulado	0,908	14	0,147
Ganancia	Medido	0,898	14	0,105
	Simulado	0,924	14	0,252

(a)

Pruebas de normalidad				
	Método	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
C.R.(S22)	Medido	0,922	14	0,233
	Simulado	0,891	14	0,084
Directividad	Medido	0,946	14	0,500
	Simulado	0,916	14	0,191
Ganancia	Medido	0,914	14	0,180
	Simulado	0,930	14	0,310

(b)

Pruebas de normalidad				
	Método	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
C.R.(S33)	Medido	0,932	14	0,322
	Simulado	0,891	14	0,084
Directividad	Medido	0,913	14	0,174
	Simulado	0,918	14	0,205
Ganancia	Medido	0,917	14	0,199
	Simulado	0,917	14	0,196

(c)

Pruebas de normalidad				
	Método	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
C.R.(S44)	Medido	0,936	14	0,368
	Simulado	0,943	14	0,459
Directividad	Medido	0,897	14	0,103
	Simulado	0,911	14	0,160
Ganancia	Medido	0,914	14	0,180
	Simulado	0,952	14	0,584

(d)

Tabla 4.10. Test de Normalidad (a) Puerto 1, (b) Puerto 2, (c) Puerto 3, (d) Puerto 4

En la Tabla 4.10, se muestran los resultados de los test de normalidad aplicados para cada uno

de los parámetros de cada puerto. En coeficiente de reflexión, la directividad y la ganancia de cada puerto evidencia un valor P - valor >0.05 tanto para lo simulado como para lo medido, por lo tanto se acepta la hipótesis nula H_0 , los datos se distribuyen normalmente con un 95 % de confianza.

4.2.2 Prueba de Hipótesis

Comprobada la normalidad de los datos, se establece las pruebas de hipótesis que se aplica en cada parámetro de cada uno de los puertos.

Hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

Ho: La media poblacional del coeficiente de reflexión del método simulado es igual a la media poblacional del coeficiente de reflexión del método medido.

Ha: La media poblacional del coeficiente de reflexión del método simulado tiene diferencia significativamente a la media poblacional del coeficiente de reflexión del método medido.

Ho: la media poblacional de la directividad del método simulado es igual a la media poblacional de la directividad del método simulado con valores medidos en el vna.

Ha: la media poblacional de la directividad del método simulado tiene diferencia significativamente a la media poblacional de la directividad del método simulado con valores medidos en el vna.

Ho: la media poblacional de la ganancia del método simulado es igual a la media poblacional de la ganancia del método simulado con valores medidos en el vna.

Ha: la media poblacional de la ganancia del método simulado tiene diferencia significativamente a la media poblacional de la ganancia del método simulado con valores medidos en el vna.

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias					95% de intervalo de confianza de la diferencia	
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	Inferior	Superior
C.R(S11)	Se asumen varianzas iguales	14,052	,001	2,827	26	,009	1,548429	,547802	,422405	2,674452
	No se asumen varianzas iguales			2,827	15,359	,013	1,548429	,547802	,383190	2,713667
Directividad	Se asumen varianzas iguales	24,009	,000	-3,540	26	,002	-,240714	,067997	-,380484	-,100945
	No se asumen varianzas iguales			-3,540	13,145	,004	-,240714	,067997	-,387448	-,093980
Ganancia	Se asumen varianzas iguales	28,467	,000	-6,105	26	,000	-,477643	,078240	-,638467	-,316819
	No se asumen varianzas iguales			-6,105	13,332	,000	-,477643	,078240	-,646242	-,309044

Figura. 4.29. Test de T-Student para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 1

En la Fig. 4.29 se muestra los resultados del estadístico T-Student con un nivel de significancia del 0.05 a dos colas. Si suponemos que las varianzas son desconocidas tenemos unos P-Valor menores a 0.05 en los tres parámetros, por lo que se rechaza la H_0 y aceptamos la H_a , concluimos que las medias poblacionales del coeficiente de reflexión, la directividad y la ganancia no son iguales con un 95 % de confianza.

	Método	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
C.R(S11)	Simulado	14	-13,71214	1,961895	,524339
	Medido	14	-15,26057	,593456	,158608
Directividad	Simulado	14	6,87943	,253716	,067809
	Medido	14	7,12014	,018920	,005057
Ganancia	Simulado	14	6,44114	,290892	,077744
	Medido	14	6,91879	,032892	,008791

Figura. 4.30. Estadística de grupo para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 1

En la Fig. 4.30 se puede evidenciar los valores de las medias poblacionales de los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia correspondiente al puerto 1, obteniendo los mejores promedios poblacionales para el método medido en el dispositivo implementado.

Realizando un análisis similar para el puerto 2, la Fig. 4.31 muestra los resultados del estadístico T-Student con un nivel de significancia del 0.05 a dos colas. Si suponemos que las varianzas son desconocidas tenemos unos P-Valor mayores a 0.05 para los parámetros: coeficiente de reflexión y ganancia, por lo que acepta la H_0 y concluimos que las medias poblacionales del coeficiente de reflexión y la ganancia son iguales con un 95 % de confianza, mientras que para la directividad se obtiene un P-Valor de 0.036, por lo que se rechaza H_0 y se acepta la H_a , concluyendo que las medias poblacionales de la directividad no son iguales con un 95 % de confianza.

Prueba de muestras independientes											
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						95% de intervalo de confianza de la diferencia	
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	Inferior	Superior	
C.R (S22)	Se asumen varianzas iguales	18,936	,000	1,331	26	,195	,55643	,41811	-,30301	1,41586	
	No se asumen varianzas iguales			1,331	15,945	,202	,55643	,41811	-,33017	1,44303	
Directividad	Se asumen varianzas iguales	16,799	,000	-2,338	26	,027	-,226357	,096805	-,425343	-,027371	
	No se asumen varianzas iguales			-2,338	13,054	,036	-,226357	,096805	-,435404	-,017311	
Ganancia	Se asumen varianzas iguales	19,082	,000	-1,641	26	,113	-,168500	,102709	-,379622	,042622	
	No se asumen varianzas iguales			-1,641	13,035	,125	-,168500	,102709	-,390330	,053330	

Figura. 4.31. Test de T-Student para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 2

	Método	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
C.R (S22)	Simulado	14	-11,6414	1,48171	,39600
	Medido	14	-12,1979	,50194	,13415
Directividad	Simulado	14	8,82221	,361834	,096704
	Medido	14	9,04857	,016538	,004420
Ganancia	Simulado	14	8,41529	,384045	,102640
	Medido	14	8,58379	,014094	,003767

Figura. 4.32. Estadística de grupo para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 2

En la Fig. 4.32 se evidencia los valores de las medias poblacionales de los parámetros: coeficiente de reflexión tiene un valor de -12.19 dB, directividad 9.04 dBi y ganancia 8.58 dB, correspondientes al método medido en el dispositivo fabricado ya que es superior al método simulado.

Prueba de muestras independientes											
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						95% de intervalo de confianza de la diferencia	
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	Inferior	Superior	
C.R (S33)	Se asumen varianzas iguales	19,883	,000	1,393	26	,176	,580000	,416481	-,276090	1,436090	
	No se asumen varianzas iguales			1,393	15,728	,183	,580000	,416481	-,304145	1,464145	
Directividad	Se asumen varianzas iguales	17,942	,000	-3,146	26	,004	-,312071	,099205	-,515991	-,108152	
	No se asumen varianzas iguales			-3,146	13,042	,008	-,312071	,099205	-,526321	-,097822	
Ganancia	Se asumen varianzas iguales	24,668	,000	-2,424	26	,023	-,256214	,105704	-,473491	-,038937	
	No se asumen varianzas iguales			-2,424	13,023	,031	-,256214	,105704	-,484531	-,027897	

Figura. 4.33. Test de T-Student para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 3

Continuando el con el análisis similar para el puerto 3, la Fig. 4.33 muestra los resultados del estadístico T-Student con un nivel de significancia del 0.05 a dos colas. Si suponemos que las varianzas son desconocidas, se tiene un P-Valor mayor a 0.05 para el coeficiente de reflexión con un P-valor de 0.183, por lo que acepta la H_0 y concluimos que las medias poblacionales del coeficiente de reflexión son iguales con un 95 % de confianza, mientras que para la directividad y ganancia se tiene un P-Valor de 0.008 y 0.031 respectivamente, por lo que se rechaza H_0 y se acepta la H_a , concluyendo que las medias poblacionales de la directividad y ganancia no son iguales con un 95 % de confianza.

	Método	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
C.R (S33)	Simulado	14	-11,64143	1,481713	,396005
	Medido	14	-12,22143	,482619	,128985
Directividad	Simulado	14	8,80286	,370891	,099125
	Medido	14	9,11493	,014928	,003990
Ganancia	Simulado	14	8,38950	,395328	,105656
	Medido	14	8,64571	,011867	,003172

Figura. 4.34. Estadística de grupo para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 3

En la Fig. 4.34 se evidencia los valores de las medias poblacionales de cada uno de los parámetros, el método medido es mejor al simulado con promedios de -12.22 dB para el coeficiente de reflexión, la directividad de 9.11 dBi y la ganancia de 8.645 dB en el puerto 3.

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
C.R (S44)	Se asumen varianzas iguales	16,041	,000	-2,803	26	,009	-1,519286	,541975	-2,633331	-,405240
	No se asumen varianzas iguales			-2,803	14,770	,014	-1,519286	,541975	-2,676046	-,362526
Directividad	Se asumen varianzas iguales	25,905	,000	-4,497	26	,000	-,304071	,067617	-,443060	-,165083
	No se asumen varianzas iguales			-4,497	13,038	,001	-,304071	,067617	-,450105	-,158038
Ganancia	Se asumen varianzas iguales	25,800	,000	-2,112	26	,044	-,160857	,076181	-,317449	-,004266
	No se asumen varianzas iguales			-2,112	13,064	,055	-,160857	,076181	-,325354	,003640

Figura. 4.35. Test de T-Student para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 4

Por último, la Fig. 4.35 muestra los resultados del estadístico T-Student con un nivel de significancia del 0.05 a dos colas para el puerto 4. Si suponemos que las varianzas son desconocidas tenemos uno P-Valor mayor a 0.05 para el parámetro ganancia con un P-valor de 0.055, por lo que acepta la H_0 y concluimos que las medias poblacionales de la ganancia son iguales con un

95 % de confianza, mientras que para la directividad y el coeficiente de reflexión se tiene un P-Valor de 0.001 y 0.009 respectivamente, por lo que se rechaza H_0 y se acepta la H_a , concluyendo que las medias poblacionales de la directividad y el coeficiente de reflexión no son iguales con un 95 % de confianza.

	Método	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
C.R (S44)	Simulado	14	-13,71214	1,961895	,524339
	Medido	14	-12,19286	,513112	,137135
Directividad	Simulado	14	6,87764	,252813	,067567
	Medido	14	7,18171	,009715	,002596
Ganancia	Simulado	14	6,42293	,284693	,076087
	Medido	14	6,58379	,014094	,003767

Figura. 4.36. Estadística de grupo para los parámetros: coeficiente de reflexión, directividad y ganancia del puerto 4

En la Fig. 4.36 muestra las medias poblacionales para cada parámetro correspondientes al puerto 4, el coeficiente de reflexión tiene un valor de -13.71 dB en el método simulado que es mejor a la media del medido, mientras que en la directividad y ganancia es mejor en el método medido con 7.181 dBi y 6.58 dB respectivamente.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

Se ha diseñado e implementado una agrupación lineal de antenas Microstrip con forma de T asimétricas que consta de cuatro elementos, cada una de estas está compuesta por la parte frontal, una línea de transmisión con una impedancia característica de 50Ω , un parche cuadrado con un slot en forma de T asimétrico, por otro lado, en la parte posterior se encuentra el plano de masa de forma rectangular con dos pequeños destajes en sus extremos para tener un mejor acoplamiento.

Aunque se observan lóbulos secundarios en el diagrama de radiación de la antena, los resultados obtenidos indican que es capaz de transmitir y recibir señales de manera eficiente en las frecuencias evaluadas. Además, la antena presenta una directividad de 7.744 dBi en la frecuencia de 2.4 GHz, de 10.12 dBi en la frecuencia de 3.5 GHz y de 9.835 dBi en la frecuencia de 5.2 GHz, lo que sugiere una capacidad de enfoque en la dirección deseada. Por lo tanto, la antena podría ser una buena opción para aplicaciones de comunicaciones inalámbricas en estas frecuencias como wifi a 2GHz y 5GHz, sistemas de comunicaciones móviles 5G, sistemas de radar y algunos sistemas de comunicación inalámbrica a corta distancia.

La matriz de Butler cuenta con cuatro acopladores híbridos de 90° en cuadratura a -3 dB, dos cruzadores y dos líneas de transmisión con desfases de 45° cada una, cumpliendo con los parámetros de reflexión inferiores a -15 dB, y los de transmisión alrededor de -6 dB con una variación en fase de -45° , 135° , -135° y 45° en el eje axial, ideal para alimentar a la agrupación de antenas y que la misma pueda controlar el diagrama de radiación.

Los datos de coeficiente de reflexión, ganancia y directividad para los cuatro puertos se analizaron utilizando el software estadístico IBM SPSS Statistics. La conclusión fue que los dispositivos implementados mejoraron su desempeño debido a su fabricación y por ende la factibilidad del proyecto.

5.2 Recomendaciones

Realizar un estudio previo sobre las antenas tipo T asimétricas y las matrices de Butler que se encuentren en fuentes confiables para tener un punto de partida ideal de lo que se pretende hacer y que debemos hacer para lograr conseguir el mejor resultado.

Si bien la agrupación lineal de antenas y la matriz de Butler fueron creadas a partir de la simulación no compartieron tanta similitud en los parámetros; sobre todo en la matriz de Butler ya que inicialmente estaba diseñada en sustrato Rogers 4870, tenía excelentes características que se asemejaban a las ideales teóricamente, pero en la fabricación vario considerablemente.

Para diseñar matrices de Butler, el sustrato Rogers es más adecuado por la extensa variedad de las propiedades dieléctricas, alturas que estos poseen, por lo tanto, es aconsejable buscar un método de implementación ya que por el método de corrosión, no funciona al menos en el Ro5870 ya que después de haberlo realizado varió las propiedades dieléctricas.

A la hora de juntar los dos dispositivos, los cables que cumplen la función tienen que tener la misma longitud para que no exista variación de fase.

Bibliografía

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Desing*, 4th ed. John Wiley Sons, Inc. All rights reserved, 2016.
- [2] M. Vielma, “Introducción a las antenas,” *e-oss. astrónomos*. <<http://www.astrónomos.cl/conocimientos/avanzado/Presentacion-antenas.pdf>>. (1/10/2007), 2005.
- [3] J. J. Valle Reyes, “Diseño de un medidor de patrón de radiación para antenas microondas de bajo costo,” 2015.
- [4] G. Exposito Dominguez, J. M. Fernández González, M. Sierra Castañer, and P. Padilla de La Torre, “Matriz de butler de banda ancha en banda x para antenas reconfigurables,” 2011.
- [5] C. R. Penafiel-Ojeda¹², L. F. Carrera-Suárez, D. Verónica, M. B.-E. Navarro-Méndez, and M. Ferrando-Bataller, “Beamforming networks for antenna array, useful in wifi applications.”
- [6] E. M. Beltrán, “Desarrollo de antenas miniatura uwb con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5g,” *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México*, 2019.
- [7] D. Naranjo, D. Buenaño, and I. T. Mejía, “Evolución de la tecnología móvil. camino a 5g,” *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 2016.
- [8] F. J. Díaz, “La evolución de internet y las tecnologías móviles,” *Bit & Byte*, vol. 2, 2016.
- [9] S. Engobo, “Las nuevas tecnologías de radio para el despliegue de la 5g. principales requerimientos tecnológicos y dificultades de implementación,” Ph.D. dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería . . . , 2019.
- [10] J. S. Martín, “Impacto en la productividad por el uso de tecnologías 5g en ecuador,” 2020.
- [11] D. C. Hernández, “5g, una carrera por la hegemonía y el futuro con muchos beneficios,” *bie3: Boletín IEEE*, no. 19, pp. 734–759, 2020.
- [12] S. Ramírez Antonete, “La influencia de china en la implantación de la red 5g en españa,” 2021.

- [13] J. W. A. Morales, J. C. A. Morales, and B. C. Quiñónez, “La tecnología 5g en el ecuador. un análisis desde los requerimientos 5g,” *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, vol. 5, no. 2, pp. 805–822, 2020.
- [14] “Introducciones sobre acopladores microstrip y divisores de potencia,” in *Journal of Physics: Serie de conferencias*.
- [15] J. Martínez Manzano, “Análisis y diseño de un array de antenas en tecnología microstrip,” 2020.
- [16] D. C. Chávez Sánchez, “Estudio del espectro radioeléctrico para el servicio de acceso inalámbrico fijo (fwa) de la corporación nacional de telecomunicaciones del ecuador, proyectado en redes de quinta generación (5g),” B.S. thesis, 2020.
- [17] C. Sharma and N. K. Gondhi, “Communication protocol stack for constrained iot systems,” in *2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, 2018, pp. 1–6.
- [18] J. J. Camargo-Vega, J. F. Camargo-Ortega, and L. Joyanes-Aguilar, “Conociendo big data,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 24, no. 38, pp. 63–77, 2015.
- [19] Y.-R. Chen and W.-S. Chen, “Design of mimo wlan 2.4/5.2/5.8 and 5g sub-6 ghz antennas for laptop computer applications,” in *2020 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, 2020, pp. 1–2.
- [20] R. Jordá Cascant, “Diseño antenas ranuradas de bajo perfil para aplicaciones 5g/iot,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2021.
- [21] N. Gualda Fernández, “Antenas para dispositivos móviles 5g e iot,” 2019.
- [22] G. L. Agredo-Méndez, P. E. Jojoa-Gómez, and V. Almenar-Terré, “Sistemas mimo con un elevado número de antenas: clave para la 5g inalámbrica,” *Entramado*, vol. 11, no. 2, pp. 250–261, 2015.
- [23] S. G. José and P. R. Javier, “Consideraciones de diseño de acopladores de antena tipo t para estaciones de radiodifusión am.”
- [24] Á. C. Aznar, J. R. Robert, J. M. R. Casals, L. J. Roca, S. B. Boris, and M. F. Bataller, *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.

- [25] S. Soriano Gómez, “Diseño y fabricación de antenas monopolo sintonizables para aplicaciones de potencia en las bandas ism,” 2022.
- [26] M. M. M. Ali, O. Haraz, S. Alshebeili, and A.-R. Sebak, “Broadband printed slot antenna for the fifth generation (5g) mobile and wireless communications,” in *2016 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, 2016.
- [27] H. Ullah, F. A. Tahir, and M. U. Khan, “Dual-band planar spiral monopole antenna for 28/38 ghz frequency bands,” in *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2017.
- [28] E. Fuentes Fernández, “Antena multifrecuencia para 5g,” B.S. thesis, 2020.
- [29] U. Venkateshkumar, S. Kiruthiga, H. Mihitha, K. Maheswari, and M. Nithiyasri, “Multi-band patch antenna design for 5g applications,” in *2020 Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, 2020, pp. 528–534.
- [30] J. A. Gusñay Lema, “Diseño y construcción de una antena multibanda para las frecuencias de 2.4 y 5 ghz,” B.S. thesis, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo, 2016., 2016.
- [31] S. E. Cisneros Quishpe, “Diseño y simulación de una antena plana alimentada con una linea microstrip en la banda de ondas milimétricas para 5g,” B.S. thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, 2022.
- [32] T. Varum, A. Ramos, and J. N. Matos, “Planar microstrip series-fed array for 5g applications with beamforming capabilities,” in *2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G)*, 2018, pp. 1–3.
- [33] J. N. CHAVARRIA ESPINOSA *et al.*, “Diseño de una antena de doble banda para wlan.” 2009.
- [34] W.-S. Chen and Y.-L. Chang, “Small-size 5g c-band/wlan5.2/5.8ghz mimo antennas for laptop computer applications,” in *2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, 2018, pp. 1–2.
- [35] T.-W. Kang and K.-L. Wong, “Isolation improvement of wlan internal laptop computer antennas using dual-band strip resonator,” in *2009 Asia Pacific Microwave Conference*, 2009, pp. 2478–2481.
- [36] M. S. Sharawi and M. Ikram, “Slot-based connected antenna arrays for 5g mobile termi-

- nals,” in *2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2018, pp. 1–3.
- [37] M. B. Ernesto, “Desarrollo de antenas miniatura uwb con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5g,” 2019.
- [38] D.-G. Fang, *Antenna theory and microstrip antennas*. CRC Press, 2017.
- [39] A. Araujo, D. Pacheco, and D. Auquilla, “Diseño e implementación de una matriz de butler de 4x4 para formación de haces de una agrupación de antenas,” *Maskana*, vol. 8, pp. 353–364, 2017.
- [40] N. Chater, T. Mazri, M. Benbrahim, and A. Charkaoui, “Design, simulation and fabrication of a wideband steerable antenna array using rogers and fed by 4x4 butler matrix,” in *2021 15th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, 2021, pp. 25–28.
- [41] I. Messaoudene, H. Youssouf, M. Bilal, M. Belazzoug, and S. Aidel, “Performance improvement of multilayer butler matrix for uwb beamforming antenna,” in *2017 Seminar on Detection Systems Architectures and Technologies (DAT)*, 2017, pp. 1–4.
- [42] “Definiciones estándar de ieee de términos para antenas.”
- [43] J. M. Huidobro, “Antenas de telecomunicaciones,” *Revista digital de acta*, vol. 4, 2013.
- [44] J. M. González Arbesú, E. Úbeda Farré, and J. Romeu Robert, “Metamateriales en microondas y antenas,” *Buran*, no. 20, pp. 32–38, 2003.
- [45] J. F. Zürcher and F. E. Gardiol, *Broadband Patch Antennas*. Artech House, 1995. [Online]. Available: <http://infoscience.epfl.ch/record/96134>
- [46] A. Estévez Hidalgo and F. Marante Rizo, “Aumento del ancho de banda en antenas de microcintas a 2, 4 ghz con inserción de metamateriales,” *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 39, no. 1, pp. 1–15, 2018.
- [47] M. S. Pérez, “Agrupaciones de antenas,” *Madrid, ETSIT UPM*, vol. 7, 2015.
- [48] M. S. Castañer, “Agrupaciones de antenas.”
- [49] J. Martínez Manzano, “Análisis y diseño de un array de antenas en tecnología microstrip,” 2020.

- [50] M. Folgueiras, M. E. L. Martín, and J. A. R. González, “Técnicas de simplificación de redes de alimentación para el diseño de agrupaciones de antenas y cálculo dosimétrico de sar en animales pequeños mediante ftdt,” Ph.D. dissertation, Universidade de Santiago de Compostela, 2011.
- [51] E. Monachesi, A. M. Frenzel, G. Chaile, C. Agustín, and F. A. G. López, “Conceptos generales de antenas,” *Recuperado de: http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf*, 2011.
- [52] T. Cantabrana Martínez, “Caracterización del canal radioeléctrico en el interior de vagones de transporte en el sector ferroviario,” 2013.
- [53] L. E. Guanoluisa Quinga, “Implementación de sistemas de telecomunicaciones para las redes de datos de las empresas públicas y privadas del país,” B.S. thesis, QUITO/EPN/2012, 2012.
- [54] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.
- [55] J. López, I. Díaz, and A. Sevilla, “Introducción al análisis y diseño de antenas,” *Revista de la Escuela de Física*, vol. 2, no. 2, pp. 82–98, 2014.
- [56] C. A. Balanis, “Fundamental parameters and definitions for antennas,” *Modern Antenna Handbook*, pp. 1–56, 2008.
- [57] A. Albero Luna, “Desarrollo de una gui para la representación 2d y 3d del diagrama de radiación de antenas,” 2017.
- [58] B. Stec and M. Czyzewski, “Quadrature hybrid coupler with two broadside coupled microstrip-slot lines,” in *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, 2018, pp. 282–285.
- [59] M. Ferrando-Rocher, “Acoplador híbrido en cuadratura implementado en guía de ondas gap de medio modo,” 2023.
- [60] F. J. Velasco Solís, “Diseño, simulación e implementación de una matriz de butler 4×4 a una frecuencia de operación de 1, 2 ghz,” B.S. thesis, Quito, 2020., 2020.
- [61] P. Gupta, L. Malviya, and S. Charhate, “5g multi-element/port antenna design for wireless applications: a review,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 11, no. 9, pp. 918–938, 2019.

[62] C. Tulkoff, C. Hillman, and D. Solutions, “Reliable plated through via design and fabrication,” in *SMTA International*, 2013, pp. 1–8.