



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO DE UNA ANTENA CON TECNOLOGÍA DE SUPERFICIES
INTELIGENTES REFLECTANTES (RIS) PARA REDES INALÁMBRICAS
EN LA BANDA DE 2.4 GHz”**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en
Telecomunicaciones**

Autor:

Muso Maisanche, Jenniffer Maite

Tutor:

PhD. Daniel Antonio Santillán Haro.

Riobamba, Ecuador. 2023

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Jennifer Maite Muso Maisanche**, con cédula de ciudadanía **0803091594**, autora del trabajo de investigación titulado: **Diseño de una antena con tecnología de superficies inteligentes reflectantes (RIS) para redes inalámbricas en la banda de 2.4 GHz**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas 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 de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a los 20 días del mes de diciembre del 2023.



Jennifer Maite Muso Maisanche
C.I: 0803091594



ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 24 días del mes de octubre del 2023, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **Jennifer Maite Muso Maisanche** con CC: **0803091594**, 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 de una antena con tecnología de superficies inteligentes reflectantes (RIS) para redes inalámbricas en la banda de 2.4 GHz”**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



PhD. Daniel Antonio Santillán Haro.

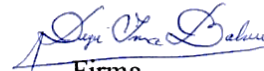
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“DISEÑO DE UNA ANTENA CON TECNOLOGÍA DE SUPERFICIES INTELIGENTES REFLECTANTES (RIS) PARA REDES INALAMBRICAS EN LA BANDA DE 2.4 GHz”**, presentado por **JENNIFFER MAITE MUSO MAISANCHE** con cédula de identidad **0803091594**, bajo la tutoría del **PhD. DANIEL ANTONIO SANTILLÁN HARO**; 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.

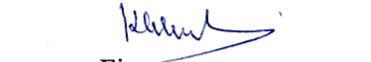
De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 20 días de diciembre de 2023.

Presidente del Tribunal de Grado
Mgs. Deysi Vilma Inca Balseca



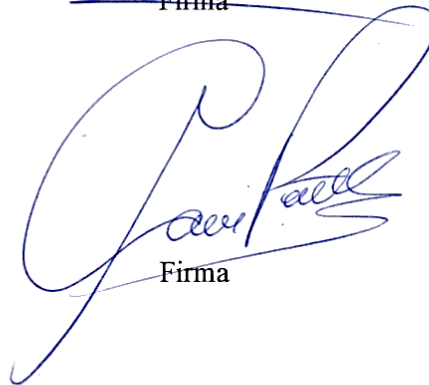
Firma

Miembro del Tribunal de Grado
Klever Hernán Torres Rodríguez, Mgs.



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda



Firma



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-08.15
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **Jennifer Maite Muso Maisanche** con CC: **0803091594**, estudiante de la Carrera **Ingeniería en Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"DISEÑO DE UNA ANTENA CON TECNOLOGÍA DE SUPERFICIES INTELIGENTES REFLECTANTES (RIS) PARA REDES INALAMBRICAS EN LA BANDA DE 2.4 GHz"**, cumple con el **5%**, 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, 12 de diciembre del 2023



PhD. Daniel Antonio Santillán Haro
TUTOR

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres y a mis abuelos que fueron quienes han estado apoyándome desde el inicio, en especial a mi madre y a mi abuela, gracias por estar para mí incondicionalmente y jamás dejarme sola.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis padres quienes desde que comencé en la carrera confiaron en mí y creyeron que era capaz de lograr mi meta. También quiero agradecer a cada miembro de mi familia que con sus consejos me alentaban a seguir adelante y no rendirme.

Quiero agradecer a mi tutor que estuvo siempre predispuesto ayudarme en todo lo que necesitara, apoyándome y guiándome en cada paso que lograba.

A cada uno de los maestros que fueron parte de mi proceso y formación durante toda la carrera, gracias a cada una de sus enseñanzas.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
ACTA FAVORABLE	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS.	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I.....	18
1.1 INTRODUCCIÓN.....	18
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.3 JUSTIFICACIÓN	19
1.4 OBJETIVOS	20
1.4.1 General.....	20
1.4.2 Específicos.....	20
CAPÍTULO II.....	21
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	21
2.2 MARCO TEÓRICO.....	22
2.2.1 Superficies Inteligentes Reflectantes (RIS).....	22
2.2.2 RIS Pasivo.	24
2.2.3 RIS Activo.	24
2.2.4 Diodo PIN.....	25
2.2.5 Alimentación de las RIS.	25
2.2.6 Condiciones de contorno periódicas.....	28
2.3 Parámetros de una antena.....	28
2.3.1 Diagrama de radiación.....	29
2.3.2 Ganancia.	29

2.3.3	Directividad.....	29
2.3.4	Ancho de Banda.....	29
2.3.5	Parámetros S.....	30
CAPÍTULO III		31
3.1	METODOLOGÍA.....	31
3.1.1	Tipo de Investigación.....	31
3.1.2	Métodos y técnicas de investigación.....	31
3.1.3	Procedimiento.....	31
3.1.4	Técnica de recolección de datos	32
3.1.5	Población de estudio y tamaño de muestra.....	32
3.1.6	Variables de operación.....	33
3.2	Diseño.....	33
3.2.1	Diseño de antena RIS.....	34
3.2.2	Diseño de la antena RIS de 2 bits de 8x8 elementos a 2.4 GHz.....	47
3.2.3	Diseño de la antena RIS de 2 bits de 8x8 elementos a 5 GHz.....	47
4.1	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	49
4.1.1	Análisis e Interpretación de los datos.....	49
4.1.2	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5GHz con un ángulo de giro de 0°... 49	
4.1.3	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 5°.. 50	
4.1.4	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 10°. 52	
4.1.5	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 15°. 54	
4.1.6	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 20°. 56	
4.1.7	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5GHz con un ángulo de giro de 30°. 58	
4.1.8	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 35°. 60	
4.1.9	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5GHz con un ángulo de giro de 45°. 62	
4.1.10	Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 50°. 64	
4.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	67
4.2.1	PRUEBA DE HIPOTESIS	67
CAPÍTULO V.....		77

5.1	CONCLUSIONES	77
5.2	RECOMENDACIONES	77
	BIBLIOGRAFÍA	78
	ANEXOS	81

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Variable independiente.....	33
Tabla 2. Variables Dependientes.....	33
Tabla 3. Características del material FR4 elegido para el diseño.....	35
Tabla 4. Dimensiones del parche cuadrado.....	35
Tabla 5. Dimensiones de la celda unitaria a 2.4 GHz considerando el largo (Ls) y el ancho (Ws).....	36
Tabla 6. Estados de los diodos para cada una de las configuraciones.....	38
Tabla 7. Valores de cada uno de los componentes de la estructura RIS.....	38
Tabla 8. Estado de los diodos PIN según sus valores de configuración.....	39
Tabla 9. Resultados finales de celda unitaria simulada.....	43
Tabla 10. Dimensiones del parche cuadrado para la frecuencia de 5GHz y el valor de su longitud de onda.....	43
Tabla 11. Resultados finales de la celda unitaria a 5 GHz.....	44
Tabla 12. Dimensiones de la antena tipo horn piramidal para 2.4 GHz.....	45
Tabla 13. Prueba U de Mann-Whitney para la variable directividad.....	68
Tabla 14. Prueba U de Mann-Whitney para la variable ganancia.....	68
Tabla 15. Prueba U de Mann-Whitney para la variable parámetro S11.....	69
Tabla 16. Prueba U de Mann-Whitney para la variable ancho de banda.....	70
Tabla 17. Estudio descriptivo de la directividad para 2,4 y 5 GHz.....	70
Tabla 18. Estudio descriptivo de la ganancia para 2,4 y 5 GHz.....	71
Tabla 19. Estudio descriptivo del parámetro S11 para 2,4 y 5 GHz.....	72
Tabla 20. Estudio descriptivo del ancho de banda para 2,4 y 5 GHz.....	73
Tabla 21. Dimensiones de la antena tipo horn piramidal para 5 GHz.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de comunicación inalámbrica asistido por RIS [23].....	23
Figura 2. (a) Arquitectura de una RIS pasiva vs (b) Arquitectura de una RIS activa [20]..	24
Figura 3. Diagrama de un diodo PIN [26]	25
Figura 4. Diagrama representativo de una guía de onda rectangular [27].....	26
Figura 5. a) Antena horn plano E, b) Antena horn plano h, c) Antena horn piramidal [28].	27
Figura 6. Configuración de las condiciones de contorno periódicas en CST Studio.	28
Figura 7. Diagrama de bloques que describe el proceso del proyecto de investigación.	32
Figura 8. Modelo de una antena parche cuadrada, denotando las medidas internas del parche cuadrado.....	35
Figura 9. Dimensiones del sustrato y de la antena parche cuadrada.	36
Figura 11. Vista detallada de la estructura con slots.	37
Figura 12. Plano cargado por ranuras. a) Parte Frontal. b) Parte trasera.	37
Figura 13. a) Conf1. b) Conf2. c) Conf3. d) Conf 4.....	39
Figura 14. a) Estructura de la RIS completa, con tamaño $\lambda/2$. b) Separación entre elementos.	40
Figura 15. Configuración de la celda unitaria mediante las condiciones de frontera periódicas.....	40
Figura 16. Configuración de los modos del puerto floquet en CST.....	41
Figura 17. Puerto Floquet configurado en la celda unitaria.	41
Figura 18. Parámetros S obtenidos de las 4 configuraciones de la celda unitaria.	42
Figura 19. Resultados de fase obtenidos de las 4 configuraciones de la celda unitaria.	42
Figura 20. Grafica de Fase desenvuelta para todas las configuraciones de la celda unitaria.	42
Figura 21. Estructura completa de la antena RIS a la frecuencia de 5 GHz.....	44
Figura 22 Respuesta en magnitud de la antena RIS a 5GHz.	44
Figura 24. Simulación del alimentador de la antena RIS usando CST. a) Antena horn piramidal parte frontal. B) Antena horn piramidal parte trasera.	45
Figura 25. Coeficiente de reflexión de la antena tipo horn piramidal para 2.4 GHz.....	46
Figura 26. Representación diagrama de radiación en 3D de la antena tipo horn piramidal.46	
Figura 28. Vista de perspectiva y vista frontal de la Antena RIS activa de 8x8 celdas unitarias a 2.4 GHz.....	47

Figura 29. Vista de perspectiva y vista frontal de la Antena RIS activa de 8x8 celdas unitarias a 5 GHz.....	48
Figura 30. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 0°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 0°.....	49
Figura 31. Simulación del coeficiente de reflexión de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 0°.....	50
Figura 32. Simulación del coeficiente de reflexión de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 0°.....	50
Figura 33. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 5°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 5°.....	51
Figura 34. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 5°.....	51
Figura 35. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 5°.....	51
Figura 36. Simulación del coeficiente de reflexión de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 5°.....	52
Figura 37. Simulación del coeficiente de reflexión de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 5°.....	52
.....	52
Figura 38. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 10°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 10°.....	53
Figura 39. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 10°.....	53
Figura 40. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 10°.....	53
Figura 41. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 10°.....	54
Figura 42. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 10°.....	54
Figura 43. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 15°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 15°.....	55
Figura 44. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 15°.....	55
Figura 45. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 15°.....	56
Figura 46. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 20°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 20°.....	56
Figura 47. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 20°.....	57
Figura 48. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 20°.....	57

Figura 49. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 20°	57
Figura 50. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 20°	58
Figura 51. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 30° , b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 30°	58
Figura 52. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 30°	59
Figura 53. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 30°	59
Figura 54. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 30°	59
Figura 55. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 30°	60
Figura 56. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 35° , b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 35°	60
Figura 57. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 35°	61
Figura 58. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 35°	61
Figura 60. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 35°	62
Figura 61. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 45° , b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 45°	62
Figura 62. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 45°	63
Figura 63. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 45°	63
Figura 64. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 45°	64
Figura 65. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 45°	64
Figura 66. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 45° , b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 45°	64
Figura 67. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 50°	65
Figura 68. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 50°	65
Figura 69. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 50°	66
Figura 70. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 50°	66
Figura 71. Diagramas polares de todos los ángulos de giro analizados a 2.4 GHz.	66
Figura 72. Diagramas polares de todos los ángulos de giro analizados a 5 GHz.	67

Figura 84. Parametro S11 de la antena horn piramidal a 5 GHz.	89
Figura 85. Diagrama de radiacion en 3D de una antena horn piramidal a 5 GHz.....	89
Figura 86. Diagrama polar de la antena horn piramidal en el plano H perteneciente a Phi=0	90
Figura 87. Diagrama polar de la antena horn piramidal en el plano E perteneciente a Phi=90	90

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo realizar el diseño de una antena con tecnología de superficies inteligentes reflectantes (RIS), que trabaje en la banda S de frecuencias, específicamente a la frecuencia de 2.4 GHz y, por lo tanto, que pueda ser utilizada en las comunicaciones inalámbricas. El diseño de la antena RIS está compuesta por una antena parche en la parte frontal, el plano con ranuras en la parte central y el plano de tierra en la parte posterior. En la parte central la RIS consta de diodos positivos intrínsecos negativos (PIN), los cuales dependiendo de su configuración permitirán obtener un desfase de 0° , 90° y 180° entre las configuraciones propuestas.

El comportamiento de la antena RIS en su celda unitaria se analizó utilizando el método de condiciones de frontera periódicas y el puerto Floquet a través del software electromagnético CST Studio Suite, excitando el modo de reflexión (Zmax) para observar el comportamiento de la celda unitaria ante una onda incidente. Para la alimentación de la matriz conformada por N números de elementos reflectantes, se empleó una antena de bocina piramidal, esta última fue diseñada para operar a una frecuencia central de 2.4 GHz.

Para analizar el funcionamiento de la antena RIS se compara su comportamiento tanto a 2.4 GHz como a 5 GHz. Tras realizar las simulaciones pertinentes y evaluar los resultados, se observó que el modelo de antena propuesto presentó valores satisfactorios en sus parámetros de ganancia, directividad y ancho de banda para las dos frecuencias, esto sobre un arreglo de 64 elementos de celdas unitarias, es decir una antena RIS de 8 x 8 elementos reflectantes.

Palabras claves: RIS; Celdas unitarias; Elementos reflectantes, Puerto Floquet; Frecuencia.

ABSTRACT

The present research aims to design an antenna with reflective smart surface (RIS) technology, working in the S-band frequency, specifically at the frequency of 2.4 GHz, and, therefore, can be used in wireless communications. The RIS antenna design consists of a patch antenna on the front side, the slotted plane on the central part, and the ground plane on the back. In the central part, the RIS consists of positive intrinsic negative diodes (PIN), which, according to their configuration, will allow an offset of 0° , 90° , and 180° between the proposed configurations. The behavior of the RIS antenna in its unit cell was analyzed using the periodic boundary conditions method and the Floquet port through the electromagnetic software CST Studio Suite, exciting the reflection mode (Z_{max}) to observe the behavior of the unit cell before an incident wave. A pyramidal horn antenna was used to feed the array consisting of N numbers of reflecting elements; the latter was designed to operate at a center frequency of 2.4 GHz. In order to analyze the performance of the RIS antenna, its behavior at both 2.4 GHz and 5 GHz is compared. After performing the relevant simulations and evaluating the results, it was observed that the proposed antenna model presented satisfactory values in its gain, directivity, and bandwidth parameters for the two frequencies; this on an array of 64 elements of unitary waves, that is a RIS antenna of 8 x 8 reflecting elements.

Keywords: RIS; Unit cells; Reflecting elements; Floquet port; Frequency.



Reviewed by:
Lic. Jenny Freire Rivera
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0604235036

CAPÍTULO I.

1.1 INTRODUCCIÓN.

El interés de los usuarios por conocer los últimos avances tecnológicos en cuanto a redes de comunicaciones crece día tras día, más aún cuando se trata de comunicaciones inalámbricas [1], pues debido a ellas se han podido establecer comunicaciones desde una estación base [2] a otra mediante ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio libre [3]. Es por eso que para mejorar las características de las comunicaciones inalámbricas ha surgido una nueva tecnología que permite obtener una mejor cobertura, bajo consumo de energía, mayor velocidad de transferencia de datos, bajas interferencias y su implementación es de bajo costo, esta tecnología son las superficies inteligentes reflectantes (RIS) [3].

Las RIS además de ofrecer todos los beneficios ya mencionados, se presenta como una solución al problema que mantiene hasta el día de hoy las comunicaciones inalámbricas, el cual aparece cuando se envía la señal desde la estación base hacia el usuario final, pero esta se ve interrumpida por obstáculos presentes en el trayecto [4] [5], a esta problemática se la conoce como pérdida de línea de vista [6]. Al implementar las RIS dentro de las comunicaciones inalámbricas permitiría lograr que todos los usuarios puedan obtener la recepción de la señal en los puntos ciegos donde se encuentren, todo esto es posible ya que las RIS posee en su estructura elementos reflectantes pasivos de bajo costo que garantizan sin problemas el espectro y la eficiencia energética de la señal [7].

Realizar el estudio del estado del arte sobre las RIS permitirá obtener la información necesaria para poder realizar el diseño respectivo de una antena implementando esta tecnología a la banda de frecuencia deseada la cual es de 2.4 GHz, se escogió diseñar en esta banda de frecuencia ya que se consideró una de las más óptimas para demostrar el funcionamiento principal de las RIS. Una herramienta a utilizar para llevar a cabo la simulación de la antena mencionada en el apartado anterior es el simulador electromagnético CST Studio [8], el cual gracias a todas las características y funciones que contiene permitirá estudiar más a fondo el comportamiento de esta tecnología.

Como ya se mencionó las RIS son una nueva tecnología que se ha venido estudiando e investigando para su implementación en varias de las aplicaciones de las telecomunicaciones, es por esto que para corroborar la eficacia de este proyecto de investigación se realizará al final del diseño la recolección de datos de las variables que tienen significancia en el funcionamiento de la antena y se las comparara con los resultados obtenidos de investigaciones ya realizadas bajo el mismo campo de estudio. El proyecto de investigación presentado aportara para inspirar y contribuir en futuras investigaciones dado que del mismo se proporcionarán resultados numéricos para validar la eficacia de las RIS en algunas aplicaciones inalámbricas típicas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La implementación de nuevas tecnologías que se acoplen a las generaciones de redes presentes y futuras que mejoren la cobertura, la velocidad de transferencia de datos, las interferencias y ofrezcan costos reducidos es importante. Esta tecnología se la denomina superficies inteligentes reflectantes (RIS), la cual se ha presentado como una solución a los problemas mencionados anteriormente, lo que caracteriza a esta tecnología es que puede mantener la conectividad entre una estación base y el usuario cuando esta comunicación se encuentra interrumpida por obstáculos que obstruyan el trayecto de la señal o en otras palabras cuando no hay línea de vista (NLOS) [9], además de que cuenta con elementos pasivos que reducen los costos de implementación mejorando además la cobertura para los usuarios [9].

El tamaño de una antena influye mucho en las características que ella proporcione, estas pueden ser frecuencia de operación, ganancia, directividad y eficiencia. En las RIS su tamaño depende de la cantidad de elementos reflectantes que la conformen, este número de elementos reflectantes incide mucho en el comportamiento del ángulo de reflexión que proporcione la antena además de controlar la fase del radio reflejado y la ganancia [5].

Las antenas RIS pueden ser configuradas para trabajar en un distinto rango de frecuencias, estas frecuencias pueden estar en el rango de las ondas milimétricas las cuales se encuentran desde 30 a 300 GHz, pero también pueden trabajar a frecuencias de 2.4 GHz la cual está dentro del rango de frecuencias de la banda ISM (Industria, Ciencia y Medicina por sus siglas en inglés), esta frecuencia abarca tecnologías como Wifi, Bluetooth y ZigBee [10].

El trabajo de investigación que se propone busca diseñar y estudiar el comportamiento de una antena RIS que trabaje en la frecuencia de 2.4 GHz, además se busca analizar en esta frecuencia el comportamiento de parámetros como el ancho de banda, ganancia, adaptación de la antena, patrón de radiación, acoplamiento, eficiencia, entre otros, también se pretende cumplir con todos los objetivos planteados para este proyecto de investigación.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Cuando entre un usuario y una estación base aparecen obstáculos en la línea de vista se producen tanto pérdida de señal como disminución de cobertura, por esta razón es necesario el estudio y diseño de una tecnología que permita solventar las problemáticas mencionadas, esta tecnología son las superficies inteligentes reflectantes (RIS), las cuales gracias a su estructura permiten que el usuario antes afectado por obstáculos pueda recibir sin problemas la señal transmitida desde la estación base.

Por otro lado, permiten contribuir en mejorar las características generales de una antena como la ganancia, directividad y ancho de haz, lo que se pretende con esta tecnología es

convertir una antena directiva con un único haz a una antena que contenga múltiples haces permitiendo proporcionar mejor señal para el usuario, y esculpir la cobertura para un mejor alcance y calidad de la red.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General

- Diseñar una antena a través de simulación con tecnología RIS para redes inalámbricas en la banda de 2.4 GHz.

1.4.2 Específicos

- Realizar un estudio del estado del arte de la tecnología RIS en frecuencias medias de 2.4 GHz.
- Efectuar la simulación del diseño de antena en el simulador electromagnético CST y analizar parámetros importantes como la ganancia, ancho de banda y ángulo de reflexión de la antena.
- Validar los resultados obtenidos en este proyecto de investigación para su aporte en futuras investigaciones.
- Comparar los resultados obtenidos en la banda de frecuencia de 2.4 GHz con los resultados obtenidos en otra banda de frecuencia.

CAPÍTULO II.

2.1 ESTADO DEL ARTE

Las telecomunicaciones son una pieza clave para la conectividad y comunicaciones de todas las personas alrededor del mundo, permanecer conectados e interactuar con los demás es una actividad muy importante hoy en día, es por eso que las antenas cumplen un papel fundamental en la comunicación de las personas. Las antenas son elementos que permiten el envío y recepción de una señal de manera inalámbrica a largas distancias, su papel es muy indispensable para transmisiones de tipo celular, radio, televisión, satelital, etc.

Actualmente las comunicaciones inalámbricas sufren atentados de seguridad al momento de darse la transmisión de datos desde la estación base al usuario o desde una antena transmisora a una antena receptora, por estas causas surgió una nueva tecnología capaz de disminuir el robo de información al momento de darse la transmisión, esta tecnología son las superficies inteligentes reflectantes (RIS) [9].

Para realizar un diseño óptimo de una antena con tecnología RIS, que es el objetivo principal de este proyecto de investigación, resulta de gran utilidad la revisión de trabajos previos relacionados con el tema, como es el caso que se presenta en [3], donde se plantea un modelo de una arquitectura de las RIS, la cual está conformada por un amplificador de ganancia única y además por una variable para amplificación de reflexión, esta arquitectura permite reducir y combatir las pérdidas por rutas multiplicativas, eliminando de forma significativa los problemas relacionados con el doble desvanecimiento en RIS.

En [5] se describe a las RIS dentro de las comunicaciones inalámbricas como la tecnología que permite manipular características de dispersión, reflexión y refracción de ondas de radio, logrando así controlar el frente de onda como la fase, la amplitud, frecuencia y la polarización de las señales. Por otro lado, en [11] se realizó el estudio de las RIS en pequeña y gran escala para mejorar la seguridad en la capa física en los sistemas de comunicaciones inalámbricas, la cual se dio mediante la utilización de técnicas de descenso coordinado en bloque (BCD) y el algoritmo de minorizar y maximizar (MM), el presente trabajo logró demostrar y comprobar que las RIS a gran escala es mucho más eficiente, ya que aumenta la tasa de seguridad y mejora la eficiencia.

El autor en [9] menciona algunas de las aplicaciones en donde puede ser implementada las RIS, primero se la presenta como una solución al problema de obstáculos entre la estación base y el usuario, otra aplicación es mejorar la seguridad en la capa física en donde las RIS se despliegan en las cercanías del intruso cancelando la señal proveniente de la estación base y reduciendo así la fuga de información, por otro lado, el uso de esta tecnología permite las comunicaciones masivas de dispositivo a dispositivo a través de mitigación de interferencias,

además el autor destaca el uso de las RIS para las transferencias de información y energía denominado (SWIPT) en redes de internet de las cosas (IoT).

El comportamiento de las RIS en interiores y exteriores experimentados en [12] se presenta como una tecnología prometedora, aquí se estudia el rendimiento de las RIS sin existir una ruta directa entre el transmisor y el receptor en entornos de propagación. Los resultados obtenidos resultaron favorables para las RIS, ya que tuvo la capacidad de suprimir el efecto de las rutas bloqueadas aumentando el número de elementos reflectantes que lo componen.

En [5] se detalla que el tamaño correspondiente a las RIS depende principalmente del número de elementos reflectantes que la conformen, también se menciona que estos elementos son capaces de ajustar el ángulo de reflexión siguiendo los principios de la ley de Snell y permite controlar la fase del radio reflejado. Además, en [9] el autor menciona que con el despliegue de los elementos reflectantes se mejoraría la eficiencia de las redes inalámbricas, con lo cual se obtienen ganancias altas.

El autor en [13] estudia las principales funcionalidades de los elementos pasivos reflectantes o también llamados metamateriales, estos elementos permiten acoplar los cambios de fase debido a que son ajustables, con esta característica se puede lograr una comunicación óptima. Por otro lado, en [14] los autores mencionan que los elementos reflectantes deben ir sobre una placa de circuito impreso, la cual para que genere un haz reflejado debe someterse a optimizaciones de acuerdo a los requerimientos del sistema.

Con la ayuda de las RIS se puede manipular y mejorar la puntería del haz de una antena si este se encuentra desviado, los autores en [15] propusieron un modelo de dos antenas de media lente simétrica separadas por dos láminas de RIS opuestas, el cual además de mejorar el direccionamiento del haz, también permite mejorar el aislamiento de las antenas transceptoras de polarización dual de alta ganancia orientada a un sistema de radar mono estático compacto.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Superficies Inteligentes Reflectantes (RIS)

Las superficies inteligentes reflectantes (RIS) o también llamadas superficies inteligentes reconfigurables son metasuperficies [16] que permiten controlar de forma inteligente los canales inalámbricos, buscando mejorar el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas [17]. Una RIS está conformada por una cantidad N de elementos de antenas pasivos o activos los cuales siguen la ley general de Snell [18], estos elementos tienen la capacidad de introducir un cambio de fase en la señal incidente, logrando así que la señal se refleje de

manera deseada para reconfigurar las propiedades de propagación del entorno inalámbrico [19] [20].

Las superficies RIS han sido ampliamente estudiadas en la banda de ondas milimétricas (mmWave/THz), donde se presentan como una solución potencial para el desafío crítico de la cobertura, al reflejar inteligentemente las señales inalámbricas en la dirección del receptor. Por otra parte, en bandas inferiores a 6 GHz, los sistemas RIS pueden ser utilizados para mejorar las características de propagación y aumentar las ganancias de multiplexación espacial[21].

Una de las aplicaciones en donde han sido utilizadas las RIS es en el tema de la seguridad en la capa física, específicamente lo que hace una antena RIS es suprimir las señales que se propagan hacia los espías, creando zonas de interferencia alrededor de los usuarios sospechosos, logrando así modificar el canal de manera adecuada y proporcionar seguridad de capa física en redes inalámbricas [21][22].

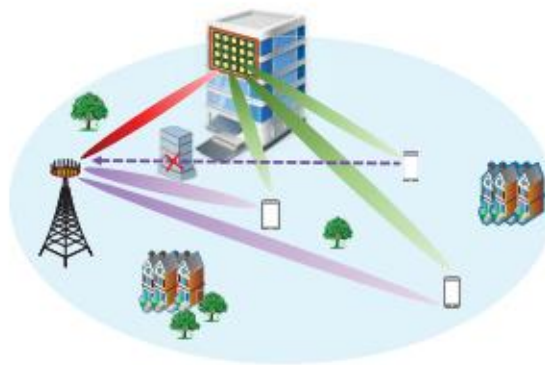


Figura 1. Sistema de comunicación inalámbrica asistido por RIS [23].

En la Figura 1 se puede notar la implementación de una antena RIS en un lugar estratégico, permitiendo que la señal transmitida pueda llegar a usuarios que anteriormente han sido bloqueados por algún obstáculo, logrando así que la señal alcance y cubra a la mayoría de usuarios que sea posible.

Una RIS además de ser reflectante también puede ser transmisivo, a este tipo de RIS se la conoce como superficies inteligentes transmisivas (T-RIS), esta RIS tiene el comportamiento similar al de una lente o al de una superficie selectiva en frecuencia, aquí se manipula el campo de incidencia de las señales desplazándola en fase con el fin de volverla a irradiar para tomar control de la refracción de todas las ondas planas que incidan en este tipo de RIS [24].

Cabe recalcar que esta tecnología puede ser implementada tanto en entornos interiores como en entornos exteriores. Lo que las caracteriza es que tienen la capacidad de cambiar la fase de una señal de manera independiente y absorben su energía lo que hace que las señales reflejadas se aumenten o disminuyan en una transmisión inalámbrica [25].

2.2.2 RIS Pasivo.

El RIS pasivo ha sido objeto de investigación en la mayoría de los trabajos realizados sobre las superficies reflectantes en la actualidad. Básicamente, una RIS pasiva contiene un gran número de elementos pasivos, donde cada uno de ellos puede reflejar la señal incidente con un cambio de fase controlable. En términos generales, cada uno de los elementos RIS pasivo están compuestos de un parche reflectante con un circuito de impedancia ajustable para cambio de fase. Gracias al modo de funcionamiento pasivo de este tipo de RIS al no integrar elementos activos de radio frecuencia (RF) en su estructura, este no consume energía de corriente continua y el ruido térmico introducido suele ser insignificante [20].

2.2.3 RIS Activo.

En muchas investigaciones realizadas sobre este tema atribuyen el comportamiento de la RIS como solo pasiva, esto debido a que este tipo de RIS puede cambiar la fase de las señales reflejadas sin contener elementos activos de radiofrecuencia (RF), sin embargo, esta atribución no es exacta. Pues a diferencia del RIS pasivo que refleja la señal pasivamente sin amplificación, el RIS activo puede reflejar la señal incidente con amplificación esto ayudado de amplificadores de tipo reflexión integrados en los elementos reflectantes [20].

Una característica de las RIS activas es que integran en su estructura elementos activos como diodos positivos intrínsecos negativos (PIN), diodos varactor, interruptores, RF-MEMS, los cuales permitirán controlar características como la fase logrando cambiarla y direccionarla al punto final deseado [24].

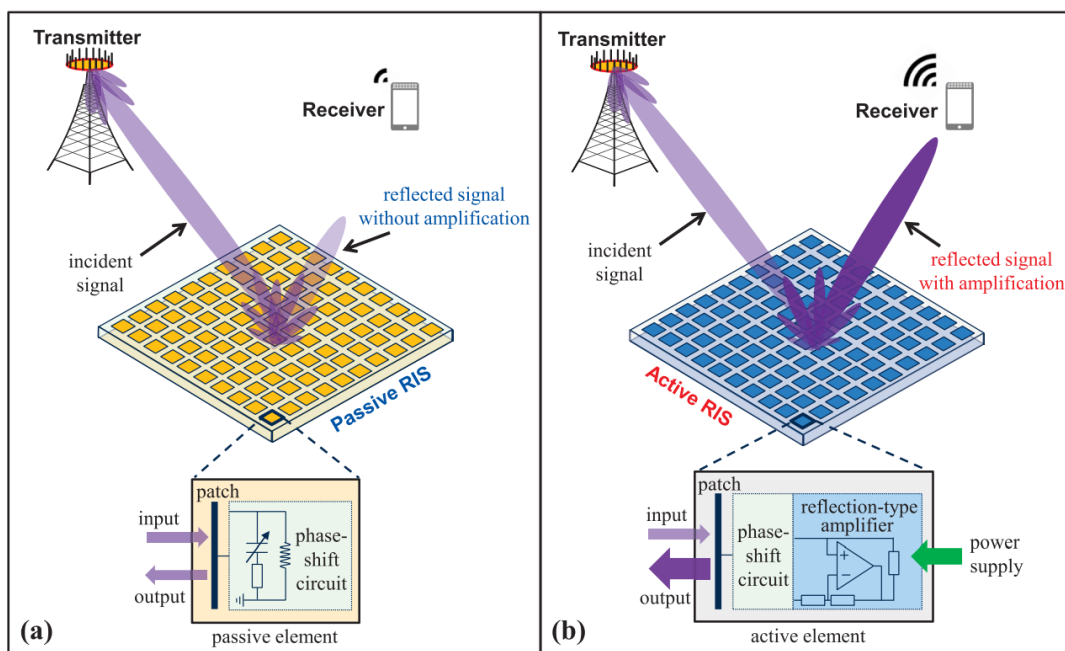


Figura 2. (a) Arquitectura de una RIS pasiva vs (b) Arquitectura de una RIS activa [20].

En la Figura 2 se puede apreciar el funcionamiento de una RIS pasiva vs una RIS activa, en la RIS pasiva la señal incidente que sale del transmisor a la RIS se refleja a la dirección del usuario, pero no se amplifica, en cambio en la RIS activa la señal incidente que sale del transmisor a la RIS y de la RIS al usuario se refleja pero también se amplifica, esto con la ayuda de un amplificador colocado dentro de la estructura de la celda unitaria.

2.2.4 Diodo PIN.

Un diodo positivo intrínseco negativo (PIN) es un diodo semiconductor conformado por tres regiones, la primera región es de tipo P y la segunda de tipo N, estas dos regiones están separadas por una tercera región intrínseca de mayor resistividad, su diagrama equivalente se lo puede observar a través de la Figura 3. Su utilización ha sido muy requerida para ser implementados en desfases y como conmutadores para señales de microondas. A diferencia de los diodos convencionales, los diodos PIN son elegidos por su respuesta satisfactoria en la conmutación de señales de microondas [26].

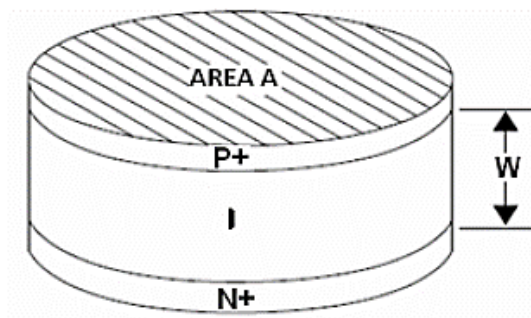


Figura 3. Diagrama de un diodo PIN [26]

2.2.5 Alimentación de las RIS.

2.2.5.1 Antena de bocina.

Para el funcionamiento de una antena de bocina es muy necesario diseñar no solo la antena de bocina sino también la guía de onda con la cual se estará trabajando, configurando su frecuencia de corte, las dimensiones de la guía y el modo que se propagará dentro de ella. Existen guías de onda rectangulares y circulares, para este caso del alimentador de la RIS se utilizará una guía de onda rectangular en la cual se propagará el modo fundamental transversal eléctrico TE_{10} .

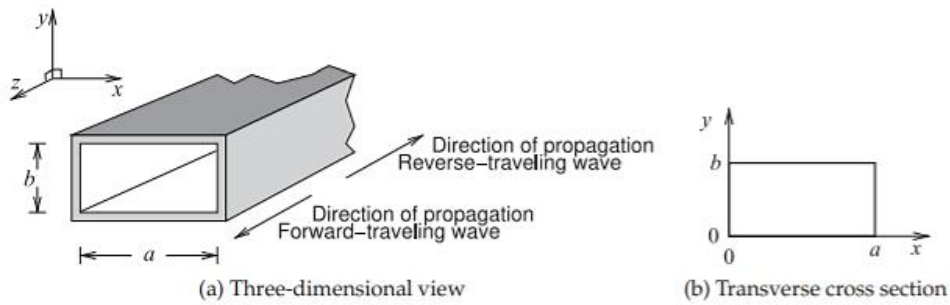


Figura 4. Diagrama representativo de una guía de onda rectangular [27].

En la Figura 4 se puede observar el diagrama que representa a una guía de onda rectangular, de forma general una guía de onda es una estructura capaz de conducir por ella ondas electromagnéticas, así una guía de onda rectangular obedece a este concepto manteniendo una forma rectangular con dimensiones a y b en el eje x e y respectivamente [27]. Las pérdidas de una guía de onda son inferiores a las de las líneas de transmisión Tx, mientras que su capacidad de transmisión de potencia es mayor que las líneas coaxiales.

$$f_c = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1)$$

Las fórmulas generales para calcular el ancho y el largo de una guía de onda son la ecuación 2 y ecuación 3.

$$a \geq 2b \quad (2)$$

$$b = \frac{a}{2} \quad (3)$$

Donde:

- f_c : es la frecuencia de corte de la guía de onda.
- c : es igual al valor de la velocidad de la luz.
- ϵ : es la permitividad eléctrica.
- μ : es la permeabilidad magnética.
- a : es el ancho de la guía de onda.
- b : es el largo de la guía de onda.

La antena tipo horn piramidal es una de las tres variantes de antena horn con las que se trabaja, aunque la horn piramidal es comúnmente la más usada. Mientras la horn plano E y H mantienen fija una de sus dimensiones en un eje y se abren por el otro, la horn piramidal se abre por el eje x e y . La Figura 5 permite observar la forma de una antena horn piramidal.

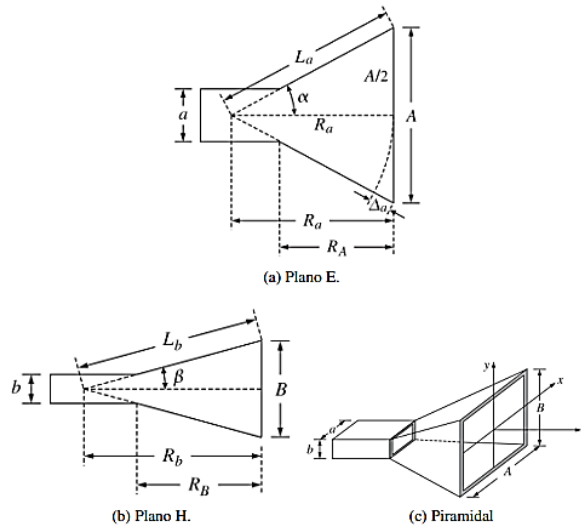


Figura 5. a) Antena horn plano E, b) Antena horn plano h, c) Antena horn piramidal [28].

Para realizar el diseño de una antena horn piramidal es fundamental calcular y cumplir con algunas condiciones.

- Elegir la frecuencia de operación (f)
- Calcular la longitud de onda de operación (λ).
- Encontrar el valor de x mediante la técnica iterativa.
- Encontrar los valores de le y lh .
- Calcular las dimensiones de la bocina (A) y (B).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

Donde:

c: es el valor de la velocidad de la luz.

f: es el valor de la frecuencia de trabajo.

$$\left(\sqrt{2x} - \frac{b}{\lambda}\right)^2 (2x - 1) = \left(\frac{G}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{G^2}{8\pi^3} \frac{1}{x} - 1\right) \quad (5)$$

$$le = x * \lambda \quad (6)$$

$$le \approx le1 \quad (7)$$

$$\frac{lh}{\lambda} = \frac{G^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{x}\right) \quad (8)$$

$$lh \approx lh1 \quad (9)$$

$$A = \sqrt{3\lambda le} \quad (10)$$

$$B = \sqrt{2\lambda lh} \quad (11)$$

La estructura de la apertura de la horn piramidal es una extensión de las paredes de una guía de onda rectangular, su forma se asimila a la de un megáfono. La alimentación de este tipo de antenas se da por media de una guía de onda conectada a la apertura [28].

2.2.6 Condiciones de contorno periódicas

Las condiciones de contorno periódicas son utilizadas para poder simular una celda unitaria perteneciente a un sistema grande de antenas, esta herramienta es aplicable solamente para simulaciones en el dominio de frecuencia [8]. El simulador CST Microwave Studio permite realizar el análisis de esta herramienta junto con la utilización del puerto Floquet configurando cara parámetro para el correcto funcionamiento de una celda unitaria, tal como se observa en la Figura 6.

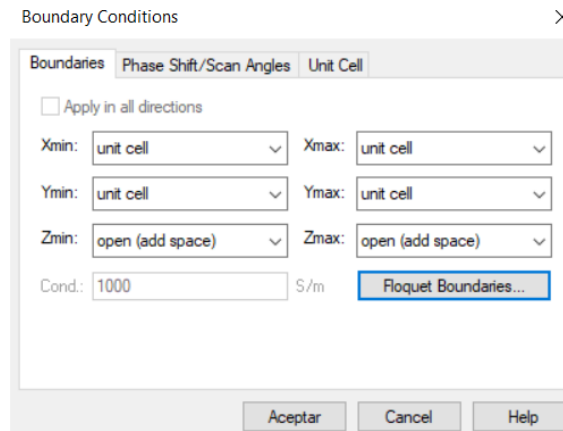


Figura 6. Configuración de las condiciones de contorno periódicas en CST Studio.

2.3 Parámetros de una antena.

Cuando se diseña una antena se puede analizar su comportamiento a través de diferentes parámetros que arroja el estudio de la misma, valores como la ganancia y directividad por ejemplo son claves para entender el comportamiento de las antenas en las telecomunicaciones [29].

2.3.1 Diagrama de radiación.

El diagrama de radiación es un tipo de gráfico que permite estudiar las características de radiación de una antena diseñada, esto en función de la dirección [30]. Este diagrama entrega información de suma importancia acerca del lóbulo principal y secundarios de la antena, permitiendo ver comportamientos como la directividad, ganancia etc.

2.3.2 Ganancia.

La ganancia es el parámetro que indica que tan fuerte una antena irradia energía en una dirección determinada [31]. Para entender qué tan fuerte está irradiando la antena se expresa la ganancia en dBi, siendo “i” el sufijo de isotrópica, así pues, la intensidad de la señal radiada de una antena será comparada con la intensidad de la señal radiada por una antena teórica isotrópica [30].

2.3.3 Directividad.

Cuando se realiza el diseño de un tipo de antena se busca que esta irradie hacia ciertas direcciones de forma óptima, en comparación con una antena isotrópica teórica que irradia hacia todas direcciones. La directividad es justamente la capacidad de una antena de poder recibir o irradiar energía hacia cierta dirección [30].

2.3.4 Ancho de Banda.

El ancho de banda puede ser definido como un intervalo de frecuencias dentro del cual la antena funciona de forma satisfactoria o cumpliendo determinadas características que se buscan en el diseño de la misma [30]. El ancho de banda puede ser expresado como porcentaje a través de la siguiente fórmula. Este porcentaje será con respecto a la frecuencia central de funcionamiento de la antena.

$$AB [\%] = 100 * \left(\frac{f_H - f_L}{f_0} \right) \quad (12)$$

Donde:

- f_H es la frecuencia más alta de la banda.
- f_L es la frecuencia más baja de la banda.
- f_0 es la frecuencia central.

2.3.5 Parámetros S.

Los parámetros de dispersión (scattering o simplemente parámetros S), sirven para estudiar un dispositivo de 1 o más puertos, estos parámetros permiten analizar el comportamiento eléctrico de una estructura a través de puertos. Son usados por lo general para analizar estructuras que trabajan en radio frecuencia (RF) y microondas [32]. También los parámetros S son los coeficientes de reflexión y transmisión entre la onda incidente y la reflejada de una antena. Son en total 4 parámetros los cuales se detallan a continuación:

- S11, también conocido como “coeficiente de reflexión de puerto de entrada” permite estudiar la cantidad de potencia reflejada en comparación con la potencia aplicada en el puerto 1.
- S12, también conocido como “coeficiente de transmisión inversa” permite estudiar la potencia recibida en el puerto 1 en comparación con la potencia enviada por el puerto 2.
- S21, también conocido como “coeficiente de transmisión directa” permite estudiar la potencia que se recibe en el puerto 2 en comparación con la potencia enviada por el puerto 1.
- S22, también conocido como “coeficiente de reflexión del puerto de salida” permite estudiar la potencia reflejada en el puerto 2 en comparación con la potencia que se envía del puerto 2.

CAPÍTULO III

3.1 METODOLOGÍA.

3.1.1 Tipo de Investigación.

La investigación que se utilizara en este proyecto de investigación es la de tipo exploratoria debido a que es utilizada cuando no se cuenta con un estudio suficiente que aborde muchas de las áreas que conlleva este proyecto de investigación. Es por esto que con la investigación exploratoria se permitirá realizar nuevos estudios sobre la antena con tecnología RIS en la frecuencia de 2.4 GHz, encontrar los procedimientos adecuados para llevar a cabo este proyecto y posteriormente obtener resultados validos que aporten a futuras investigaciones.

3.1.2 Métodos y técnicas de investigación.

Se utilizará el método experimental ya que permitirá realizar la observación y manipulación de variables que afecten directamente al comportamiento de la antena, es decir que se estudiara los resultados de las variables dependientes al ir modificando la variable independiente. El trabajo de investigación utilizará el método explicativo, en el cual se estudiará todo lo relacionado con las antenas RIS, tanto sus características y su manera de funcionamiento. También se aplicará el método analítico, este método permitirá estudiar el comportamiento de la antena a través del análisis de los elementos más básicos que componen la estructura, y aquellas variables que al sufrir modificaciones provocarían cambios en los resultados.

3.1.3 Procedimiento.

El diseño de este proyecto de investigación se realizará en el software de simulación electromagnético CST Studio Microwave, con el cual se podrá medir y analizar variables como ganancia, directividad, coeficiente de reflexión y ancho de banda para la frecuencia de 2.4 GHz. En la Figura 7 se muestra el diagrama de bloques que contiene el paso a paso del desarrollo del proyecto de titulación.

Como primer punto se realizará el análisis y estudio del estado del arte de antenas con tecnología RIS, considerandos sus características y aplicaciones dentro de las comunicaciones inalámbricas. Luego se procesará toda la información investigada para analizar y escoger los métodos de diseño que conlleva una antena con tecnología RIS. Una vez escogido el método de diseño se procederá a realizar el respectivo diseño de la antena,

con el fin de comprobar su correcto funcionamiento y posteriormente realizar un análisis de comparación entre la frecuencia propuesta y una frecuencia en distinta banda.

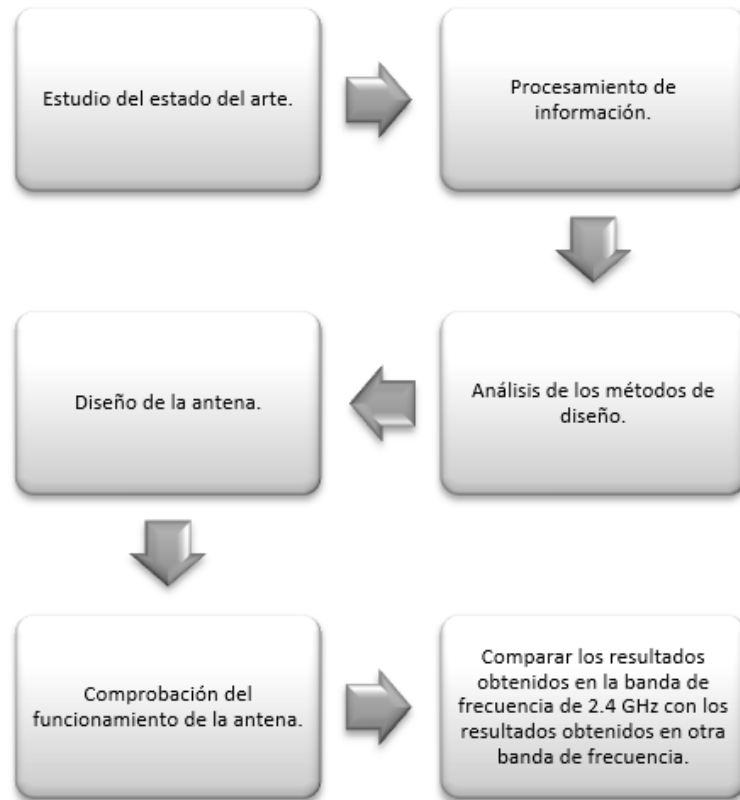


Figura 7. Diagrama de bloques que describe el proceso del proyecto de investigación.

3.1.4 Técnica de recolección de datos

Se utilizará la técnica de recolección de datos en la búsqueda de comparar los resultados obtenidos a través de las diferentes simulaciones, permitiendo analizar los mismos y reajustar los parámetros de la antena con el fin de lograr un diseño final óptimo, todos estos resultados podrán ser estudiados mediante el simulador CST Studio.

3.1.5 Población de estudio y tamaño de muestra.

3.1.5.1 Población.

La población estará compuesta por los datos obtenidos de ancho de banda, ganancia, parámetros S, directividad y diagrama de radiación.

3.1.5.2 Muestra.

La muestra estará compuesta por la recolección de datos aleatorios de la población definida anteriormente.

3.1.6 Variables de operación.

3.1.6.1 Variable independiente.

Tabla 1. Variable independiente.

Variable Independiente	Concepto	Indicadores	Instrumento
Frecuencia de operación.	Frecuencias en la que trabaja una antena.	Frecuencias medias 2.4 GHz.	Software CST Studio suite.

3.1.6.2 Variable dependiente.

Tabla 2. Variables Dependientes.

Variable dependiente	Concepto	Indicadores	Instrumento
Parámetros de la Antena.	Parámetros que demuestran cómo funciona y opera una antena.	Ancho de banda. Ganancia. Parámetros S. Diagrama de radiación.	Software CST Studio suite.

3.2 Diseño.

En esta sección se presenta el proceso llevado a cabo para el diseño de una antena con tecnología RIS, la cual estará trabajando a la frecuencia de 2.4 GHz.

3.2.1 Diseño de antena RIS.

El diseño de la antena RIS de este proyecto de investigación estará basado en estudios previos realizados con esta tecnología, específicamente del estudio realizado en [33], aquí muestra el funcionamiento de una antena RIS de 2 bits que implementa diodos en su estructura y demás elementos como inductores y capacitores, estos últimos utilizados con el fin de darle continuidad a la corriente que se distribuye por la antena, dando como resultado diferencias de fase de entre 90 y 180 grados entre las diferentes configuraciones que proponen.

Para el presente proyecto de investigación se propondrá un nuevo diseño de antena con tecnología RIS activa que sigue la misma línea de investigación que en [33], utilizando otro tipo de material, diferentes dimensiones de estructura y acoplando el nuevo diseño a la frecuencia de trabajo propuesta. Se decidió trabajar a la frecuencia de 2.4 GHz ya que esta se encuentra dentro de las frecuencias que comprende las comunicaciones inalámbricas, además a modo de comparar el desempeño de la antena presente se realizara el diseño de la misma antena, pero para la frecuencia de 5 GHz, esto con el objetivo de ver el comportamiento del nuevo diseño de antena RIS en ambas frecuencias de redes inalámbricas.

Este diseño tendrá en su estructura diodos PIN considerados elementos activos, los cuales mediante sus estados de encendido (ON) y apagado (OFF) permitirán realizar los cambios de fase respectivos en la antena RIS, es decir, cuando el diodo esta polarizado de forma directa permitirá el paso de corriente y se establecerá el estado en ON. Por otro lado, cuando el diodo esta polarizado de forma inversa se comportará como un circuito abierto no dejando pasar la corriente, estableciendo el estado en OFF.

La estructura de la antena estará conformada por una antena parche cuadrada en la parte frontal la cual se encargará de recibir e irradiar la energía, un plano cargado con ranuras en la parte central, el cual permitirá controlar los estados de fase a través de los diodos PIN que se integraran en la estructura, y un plano de tierra en la parte trasera, el cual se encargará de suprimir la radiación trasera e irradiarla al plano de ranura.

La antena RIS de este proyecto de investigación es denominada una RIS de 2 bits, esta RIS idealmente proporcionara 4 estados de fase de 90°. Con la ayuda de los elementos activos se puede lograr este objetivo, combinando adecuadamente sus estados para cada configuración.

3.2.1.1 Material de diseño.

Para la antena parche y el plano cargado con ranuras se eligió el material FR4, las características generales de este material se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3. Características del material FR4 elegido para el diseño.

Parámetros	Valor
Constante Dieléctrica (ϵ_r)	4.5
Espesor del sustrato (h)	1.5 mm
Tangente de pérdida (δ)	0.019
Espesor del cobre (t)	0.035

3.2.1.2 Diseño de la antena Parche cuadrada.

Para realizar el diseño completo de una antena RIS de este tipo es necesario primero realizar el diseño de una antena de parche cuadrada a la frecuencia de 2.4 GHz, el cálculo de las dimensiones del parche se lo realiza a través de las ecuaciones 13 y 14:

$$Wp = \frac{\lambda}{2\sqrt{0.5(\epsilon_r + 1)}} \quad (12)$$

$$Lp = Wp \quad (14)$$

Donde:

- λ es la longitud de onda de trabajo.
- f es la frecuencia de resonancia.
- Wp es el ancho del parche.
- Lp es el largo de parche.

Cabe recalcar que W y L son iguales ya que se trata de un parche cuadrado.

Tabla 4. Dimensiones del parche cuadrado.

Parámetros del Parche	Valores (mm)
Longitud de onda calculada (λ)	125
Ancho del parche calculado (Wp)	38
Largo del parche calculado (Lp)	38
Ancho de línea de alimentación (Wa)	2.77

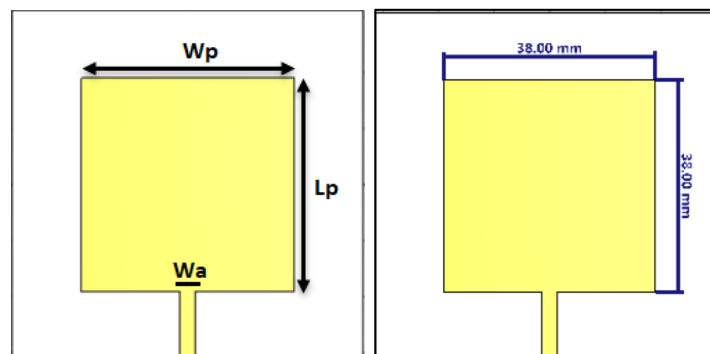


Figura 8. Modelo de una antena parche cuadrada, denotando las medidas internas del parche cuadrado.

En la Figura 8 se puede apreciar la antena parche simulada en el software CST Studio, colocando los valores de W_p y L_p calculados. Como se puede observar, el valor W_a equivale al ancho de la línea de alimentación, este valor se lo calcula utilizando la herramienta de CST llamada “Impedance calculation” (Ver figura 10 en anexos), el cual da un resultado de anchura correspondiente de 2.77 mm para conseguir una impedancia de 50 ohm.

En el ámbito de las superficies RIS el tamaño de una celda unitaria depende mucho del valor de longitud de onda que se obtenga a la frecuencia de trabajo elegida, realizando los cálculos respectivos se obtiene un valor de 0.125 m para la frecuencia de 2.4 GHz, lo que equivale a 125 mm. Conociendo este dato se logra deducir que el tamaño óptimo para la celda unitaria de este proyecto sea de $\lambda/2$ ($\lambda_{2.4GHz}/2$) o 0.5λ , esto con el fin de que la señal logre propagarse por toda la estructura sin necesidad de ocupar más espacio entre celdas unitarias. Tomando en cuenta lo indicado en el párrafo anterior las dimensiones del sustrato para la antena se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5. Dimensiones de la celda unitaria a 2.4 GHz considerando el largo (Ls) y el ancho (Ws).

Variables de operación	Medidas en mm
$\lambda/2$	62.5 mm
Ws	62.5 mm
Ls	62.5 mm

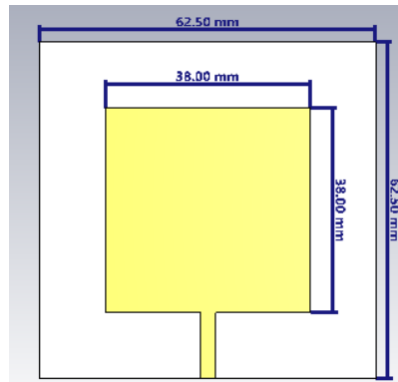


Figura 9. Dimensiones del sustrato y de la antena parche cuadrada.

En la Figura 9 se muestra la antena parche ya estructurada.

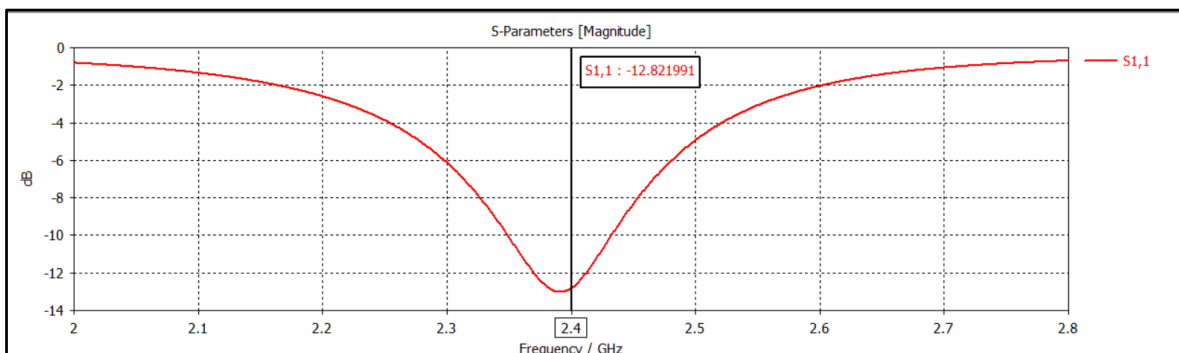


Figura 10. Parámetro S11 de la antena parche cuadrada.

El parámetro S_{11} de la antena parche se puede apreciar en la Figura 10, aquí se puede comprobar que la antena parche cuadrada esta resonando a la frecuencia de 2.4 GHz dando una respuesta en magnitud de -12.82 dB, lo que comprueba que la antena está funcionando correctamente.

3.2.1.3 Diseño de celda unitaria con tecnología RIS a 2.4 GHz.

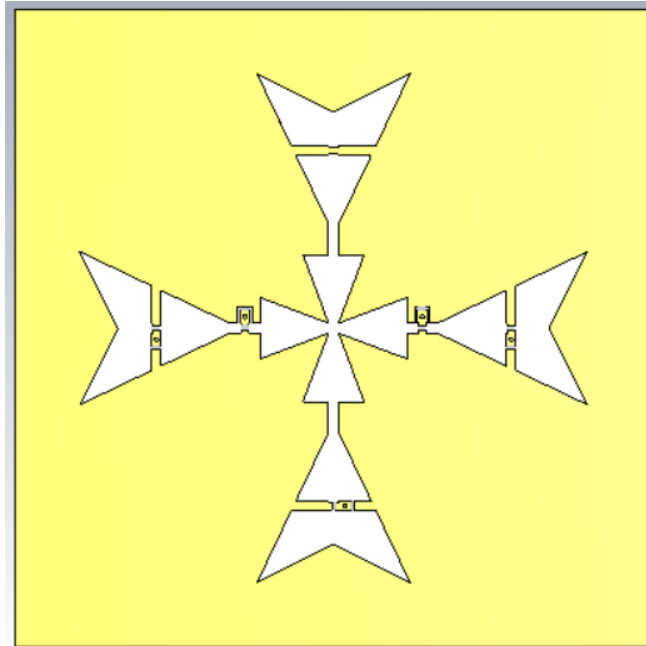


Figura 11. Vista detallada de la estructura con slots.

En la Figura 11 se muestra el diseño de la estructura cargada con ranuras, esta tiene un diseño basado en la famosa cruz de malta, en el medio de la estructura se puede apreciar una cruz de malta de tipo ensanchada y para los slots se empleó una cruz de malta normal.

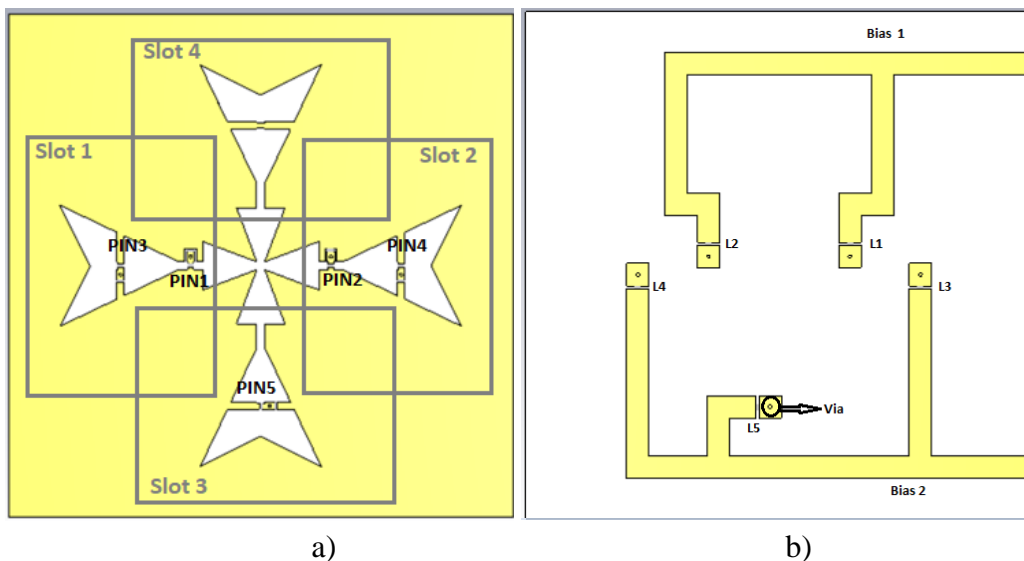


Figura 12. Plano cargado por ranuras. a) Parte Frontal. b) Parte trasera.

En la Figura 12(a) se muestra cómo está conformada la estructura RIS, el diseño está dividido en 4 slots, en donde tres de los cuatro slots están unidos por diodos PIN y contienen capacitores en su estructura. El cuarto slot está conectado directamente a los demás, a este se lo incluyo por experimentación y periodicidad del elemento.

Por otro lado, en la Figura 12(b) se puede notar el circuito alimentador diseñado para cada celda unitaria, en donde se introducen inductores en las bias de alimentación, esto con el fin de asegurar la continuidad de la corriente en donde estos sean implementados y para limitar la fuga de RF cuando el voltaje pase por las bias DC 1 y 2 respectivamente. El voltaje que viene de las bias de polarización pasa a la parte superior de la estructura a través de unas pequeñas vías que son perforadas a través del sustrato, estas vías permiten que la corriente fluya normalmente hacia el plano cargado con ranuras.

Tabla 6. Estados de los diodos para cada una de las configuraciones.

Configuraciones	PIN1	PIN2	PIN3	PIN4	PIN5
1	ON	OFF	ON	ON	ON
2	OFF	ON	ON	ON	ON
3	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
4	OFF	ON	OFF	OFF	OFF

Lo que se quiere lograr empleando elementos activos en la estructura es una diferencia de fase de entre 90° y 180° , en la tabla 6 se muestran los estados ON y OFF de cada PIN para las 4 configuraciones a estudiar.

3.2.1.4 Configuración de los diodos PIN.

Para este diseño de RIS se decidió trabajar con el diodo PIN SMP1340-040LF [34] el cual presenta características optimas a voltajes bajos. Para el estado encendido (ON) de los diodos se necesita una resistencia de 0.8Ω y un inductor de 780pH , estos dos elementos se los configura en serie. Para el estado apagado (OFF) de los diodos se necesita una resistencia de 10Ω , un inductor de 780pH y un capacitor de 202fF , todos estos configurados en paralelo. El voltaje recomendado para las bias de polarización del plano cargado por ranuras de acuerdo con el datasheet del diodo es de 0.9 y -0.9 V respectivamente, los elementos que componen a la estructura se los puede apreciar a través de la Tabla 7.

Tabla 7. Valores de cada uno de los componentes de la estructura RIS.

Elementos que componen la RIS	Valores
Inductores (L1, L2, L3, L4, L5)	750pH
Capacitores (C1, C2, C3, C4, C5)	202fF
Resistencia 1 (PIN ON)	0.8Ω
Resistencia 2 (PIN OFF)	10Ω
Voltaje DC directo e inverso.	0.9V y -0.9V

Siguiendo la lógica de configuración de [33], el estado de los diodos PIN encendido (ON) y apagado (OFF) se denotan en la Tabla 8:

Tabla 8. Estado de los diodos PIN según sus valores de configuración.

Estados del diodo.	R	L	C
Encendido	0.8 Ω	780pH	-----
Apagado	10 Ω	780pH	202fF

En la Figura 13 se muestra las respectivas configuraciones de los diodos a través del esquemático en el software CST, esta herramienta proporciona elementos como capacitores, inductores y resistencias que permiten simular el comportamiento de un diodo a través de su circuito equivalente, en este caso RL en serie para el estado ON y RLC en paralelo para el estado OFF. También proporciona fuentes de voltajes en DC las cuales permitirán enviar a través de los puertos discretos 6 y 7 los respectivos voltajes de polarización a la bias de 0.9 y -0.9 respectivamente.

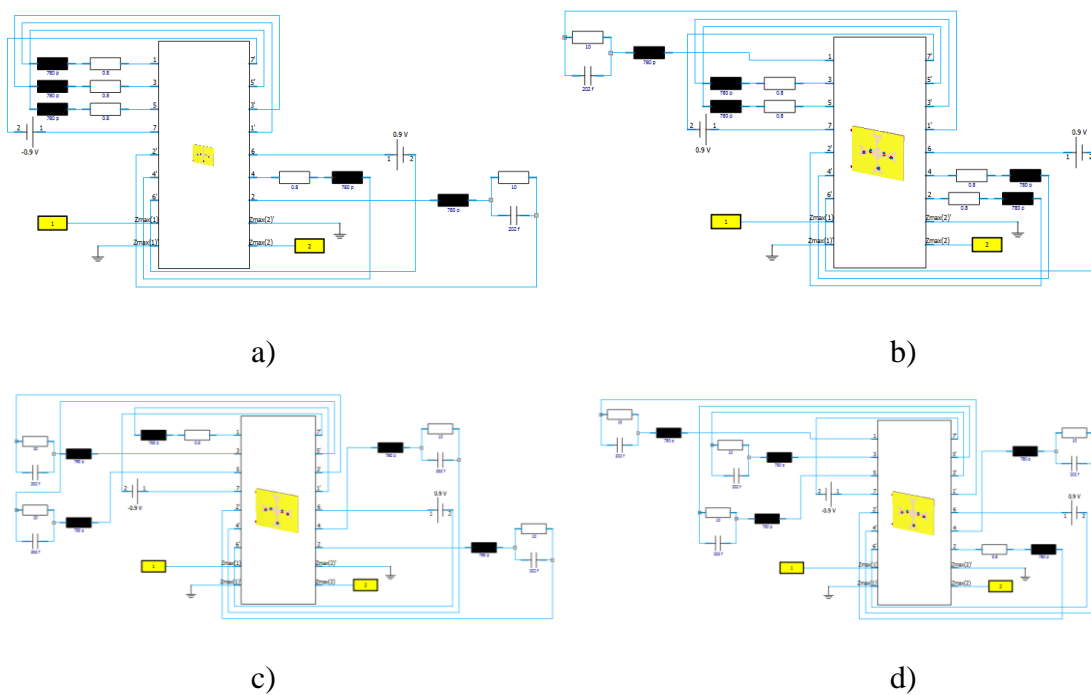


Figura 13. a) Conf1. b) Conf2. c) Conf3. d) Conf 4.

En la Figura 14 a) se presenta la antena con tecnología RIS completamente estructurada, cada una de las partes de la antena mide 0.5λ . La antena parche cuadrada se encuentra ubicada en la parte frontal a una distancia de 6 mm por encima del plano cargado por ranuras, mientras que el plano de tierra de material de aluminio se encuentra en la parte trasera a 12 mm por debajo del plano cargado por ranuras, todo esto se puede apreciar en la Figura 14 b).

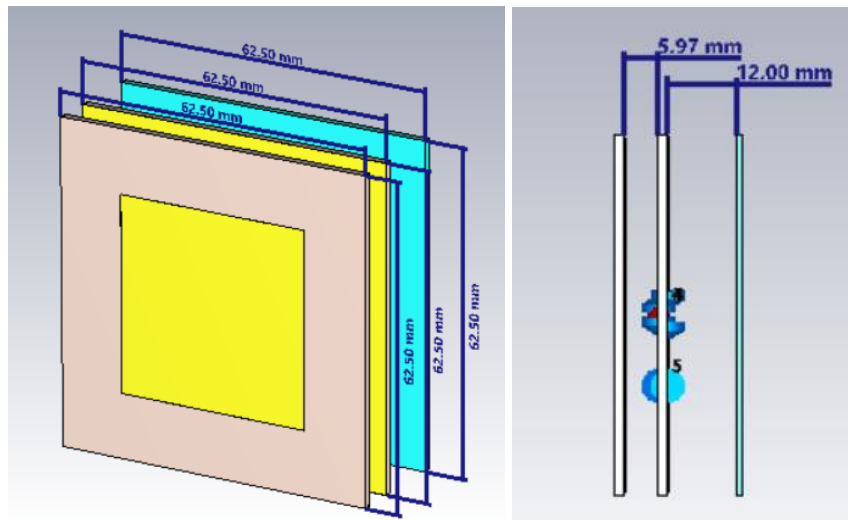


Figura 14. a) Estructura de la RIS completa, con tamaño $\lambda/2$. b) Separación entre elementos.

Para realizar el análisis de la celda unitaria se necesitó de un método denominado condiciones de contorno periódicas, esta herramienta consiste en simular la estructura de la celda unitaria asimilando su comportamiento dentro de una agrupación de antenas.

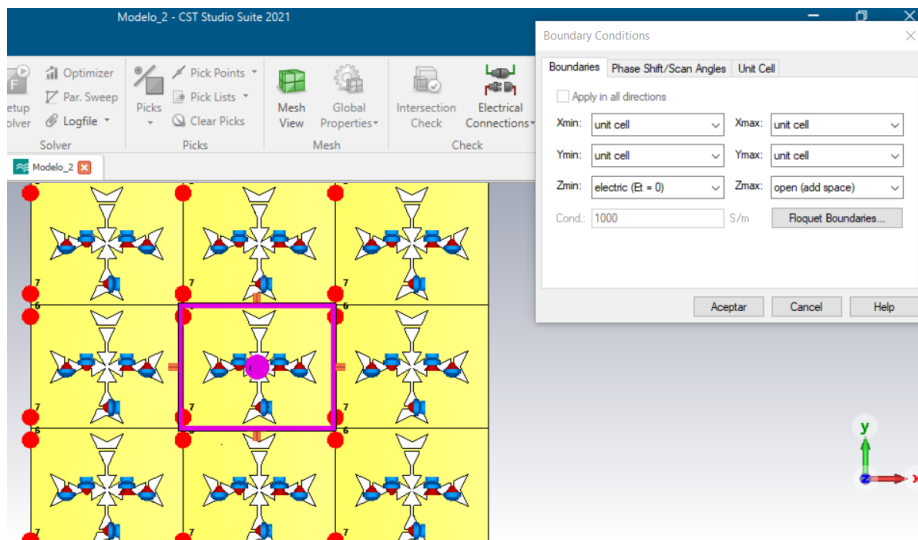


Figura 15. Configuración de la celda unitaria mediante las condiciones de frontera periódicas.

En la Figura 15 se presenta la configuración de la celda unitaria mediante la herramienta “Boundary Conditions” que contiene CST, aquí se configuran los ejes Xmin, Xmax, Ymin y Ymax como “unit cell”, mientras que el eje Zmin se lo configura en “Electric=0”, esto debido a que no se necesitara el estudio de la onda en este puerto. Por otro lado, el puerto Zmax se lo configura como “open (add space)” ya que desde este puerto se necesitará observar el comportamiento de la onda al momento que incide en la RIS.

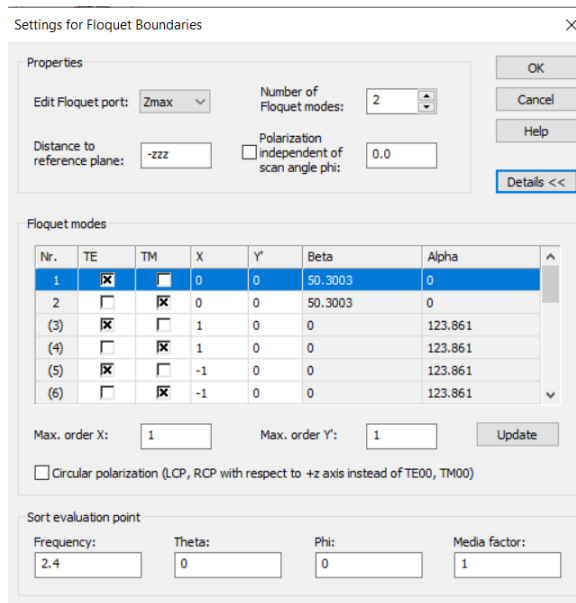


Figura 16. Configuración de los modos del puerto floquet en CST.

En la Figura 16 se puede notar la configuración que se realiza en el puerto Floquet habilitando dos modos para el puerto Zmax, para lograr un análisis más amplio en la estructura. Por otro lado, se configurará la distancia al plano de referencia en un valor de “-zzz” que equivale a $\lambda_{2.4\text{GHz}}/4$, está la distancia es la más óptima para ver el comportamiento de la onda en la antena. En la Figura 17 se puede ver el puerto Floquet junto a la celda unitaria.

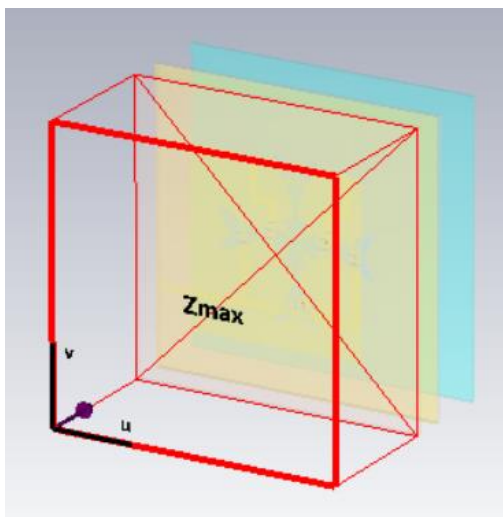


Figura 17. Puerto Floquet configurado en la celda unitaria.

Una vez configurado todos los parámetros se simula toda la estructura utilizando la herramienta de parámetros del solucionador de dominio de frecuencia (Frequency Domain Solver).

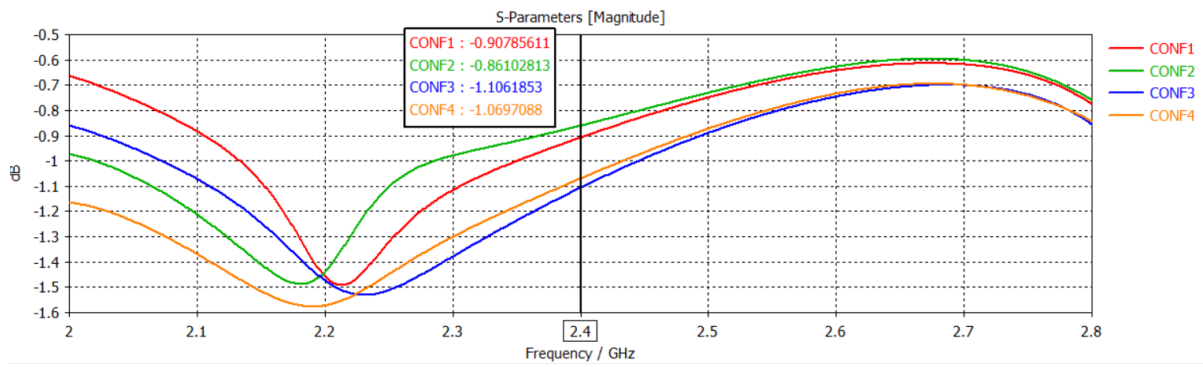


Figura 18. Parámetros S obtenidos de las 4 configuraciones de la celda unitaria.

Los resultados obtenidos para la celda unitaria a 2.4 GHz se observan en la Figura 18, se puede deducir que para las cuatro configuraciones las pérdidas en magnitud son inferiores a -1.1 dB, lo cual se sigue manteniendo incluso con mejores resultados hasta los 2.8 GHz. También se puede notar que la respuesta en magnitud de las configuraciones 1 y 2 resultaron tener un comportamiento similar, de igual forma ocurre con las configuraciones 3 y 4.

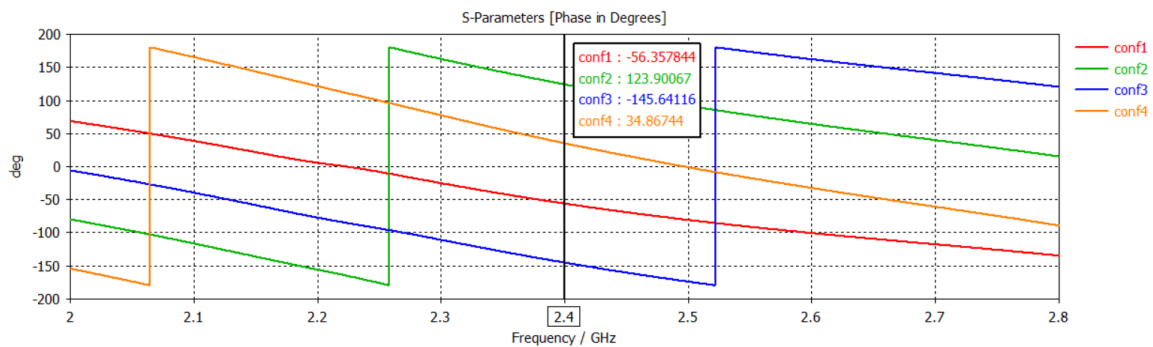


Figura 19. Resultados de fase obtenidos de las 4 configuraciones de la celda unitaria.

De acuerdo con la Figura 19 y Figura 20 los resultados de fase obtenidos de las 4 configuraciones exhiben con claridad una resolución de fase de 2 bits, esto quiere decir que se obtuvo un cambio de fase de 90° entre cada una de las configuraciones lo que es muy satisfactorio para esta investigación, por otro lado, se puede notar que también existe un cambio de fase de 180° entre las configuraciones 1 y 2, también entre las configuraciones 3 y 4.

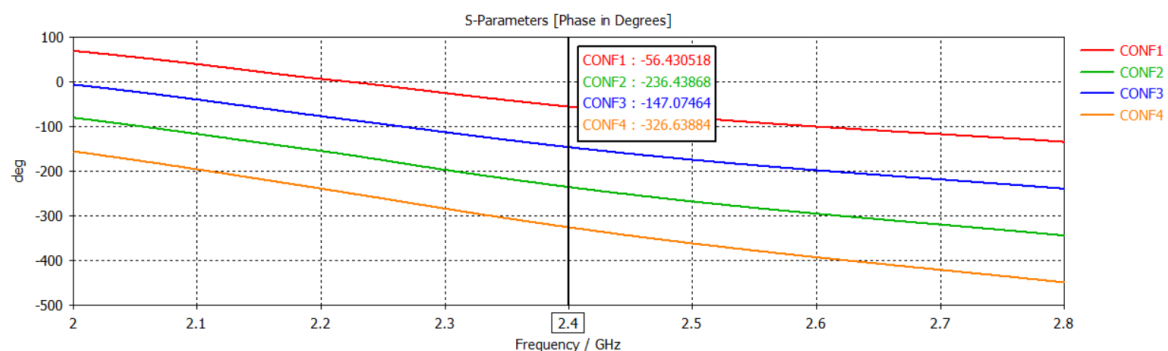


Figura 20. Grafica de Fase desenvuelta para todas las configuraciones de la celda unitaria.

Debido al mecanismo de inversión de corrientes dado por cómo fueron configurados los diodos en cada una de las configuraciones, las respuestas de magnitud de las configuraciones 1 y 2 como la 3 y 4 son similares, también el cambio de fase entre ellas fue de 180° aproximadamente. Con estos resultados de simulación se muestra con éxito el cambio de fase electrónico en esta RIS de 2 bits solo con el uso de diodos PIN, sin la necesidad de utilizar desfasadores en la estructura.

Tabla 9. Resultados finales de celda unitaria simulada.

Configuración	Respuesta en magnitud (dB)	Fase
1	-0.90	-56.43
2	-0.86	-236.43
3	-1.10	-147.07
4	-1.06	-326.63

3.2.1.5 Diseño de celda unitaria con tecnología RIS a 5 GHz.

Una vez obtenido los resultados de la celda unitaria de la antena RIS a 2.4 GHz, se realizará el mismo procedimiento de diseño para la frecuencia de 5 GHz perteneciente a la banda X utilizando los mismos materiales y elementos en la estructura, con el fin de comparar los resultados obtenidos bajo el mismo modelo de diseño. Se realizó el cálculo respectivo de longitud de onda y las dimensiones de la antena parche cuadrada como de la estructura para la frecuencia de 5 GHz, dando como resultado los valores expresados en la Tabla 10.

Tabla 10. Dimensiones del parche cuadrado para la frecuencia de 5GHz y el valor de su longitud de onda.

Parámetros del Parche	Valores (mm)
Longitud de onda calculada (λ)	60 mm
Ancho del parche calculado (W_p)	18 mm
Largo del parche calculado (L_p)	18 mm

En la Figura 21 se puede apreciar la celda unitaria de la antena RIS con dimensiones de 30 mm x 30 mm, esto considerando que para la periodicidad del elemento el tamaño de la celda debe ser igual a $\lambda_{5GHz}/2$ de su lambda total.

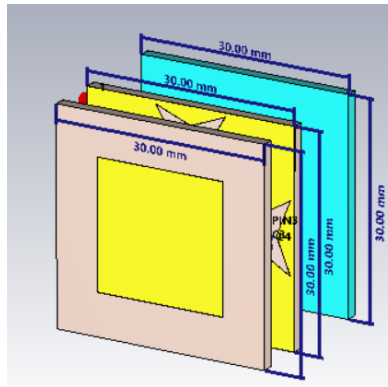


Figura 21. Estructura completa de la antena RIS a la frecuencia de 5 GHz.

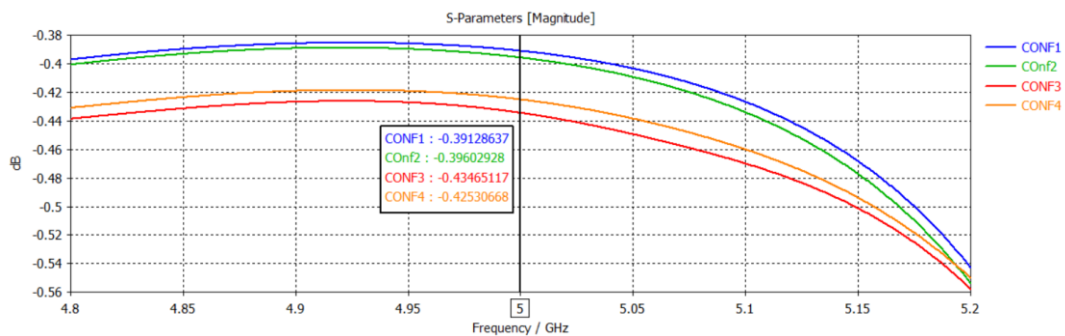


Figura 22 Respuesta en magnitud de la antena RIS a 5GHz.

Los resultados obtenidos en la Figura 22 denotan una respuesta en magnitud con pérdidas que no superan los -0.44 dB específicamente a la frecuencia de 5 GHz para las 4 configuraciones. Por otro lado, en la Figura 23 se observa la diferencia de fase obtenida para cada configuración, dando como resultado un desfase de 90 grados entre cada una de ellas, pero obteniendo un desfase de 180 grados entre las configuraciones (1-2) y (3-4).

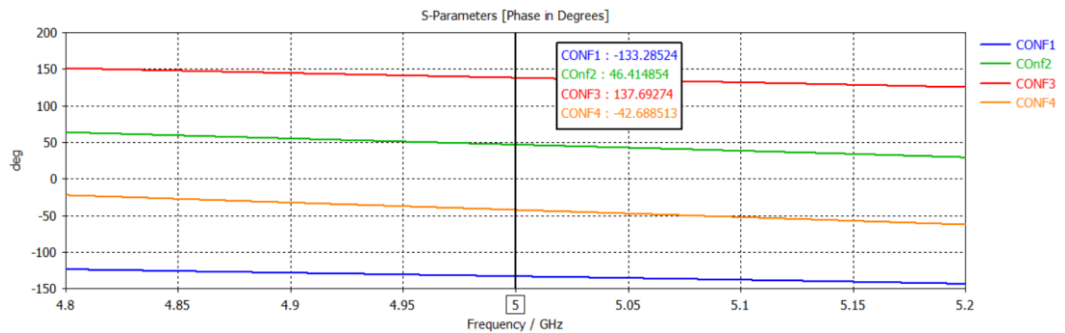


Figura 23. Valores de fase obtenidos a 5 GHz.

Tabla 11. Resultados finales de la celda unitaria a 5 GHz.

Configuración	Respuesta en magnitud (dB)	Fase
1	-0.39	-133.28
2	-0.39	46.41
3	-0.43	137.69
4	-0.42	-42.68

Realizando una comparación entre los resultados obtenidos para la frecuencia de 2.4 GHz con los obtenidos para la frecuencia de 5 GHz se puede notar que existe una mejoría en la respuesta en magnitud obtenidos en la frecuencia de 5GHz, ya que presenta menos pérdidas que las obtenidas en 2.4 GHz. Por otro lado, los valores de fase obtenidos en ambas frecuencias son resultados óptimos logrando en cada una de ellas desfases entre configuraciones de 90 grados y desfases aproximados de 180.

3.2.1.6 Diseño del alimentador para la antena RIS.

3.2.1.6.1 Diseño de antena de bocina piramidal.

Se realizará el diseño de una antena de bocina tipo piramidal, la cual funcionará como alimentador de la antena RIS propuesta. La antena horn será diseñada para que funcione a la frecuencia de 2.4 GHz, la guía de onda escogida es la WR-430 perteneciente a la banda de frecuencias R de guías de onda. El respectivo proceso de diseño de la antena bocina funcionando para 2.4GHz se lo puede encontrar en la parte de Anexos.

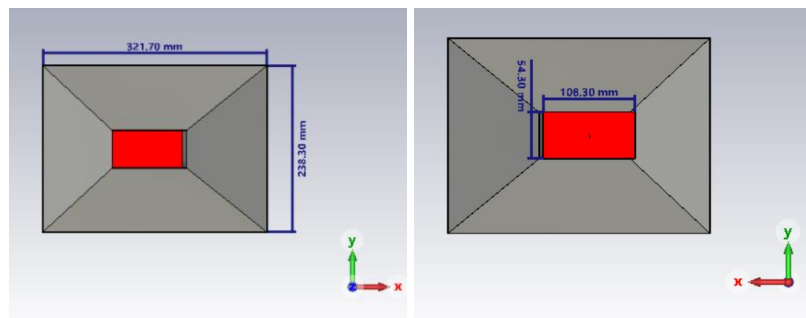


Figura 24. Simulación del alimentador de la antena RIS usando CST. a) Antena horn piramidal parte frontal. B) Antena horn piramidal parte trasera.

La simulación de la antena de bocina piramidal en el software CST se puede observar en la Figura 24, en la parte frontal se visualiza las dimensiones de la apertura tanto en el plano E como en el plano H, por otro lado, en la parte trasera se observa las dimensiones de la guía de onda rectangular. Las dimensiones para el diseño de una antena tipo horn piramidal se presenta la Tabla 12:

Tabla 12. Dimensiones de la antena tipo horn piramidal para 2.4 GHz.

Ancho de la guía de onda (a)	10.86 mm
Alto de la guía de onda (b)	5.46 mm
Longitud total de la guía de onda (L)	114.6 mm
Valor de le	227.3 mm
Valor de lh	276 mm
Apertura en el plano E (B)	238.3 mm
Apertura en el plano H (A)	321.7 mm
Valor de le_2 y lh_2	149 mm

En la Figura 25 se puede observar el correcto funcionamiento de la antena horn piramidal obteniendo un acoplamiento de -20.25 dB a 2.4 GHz.

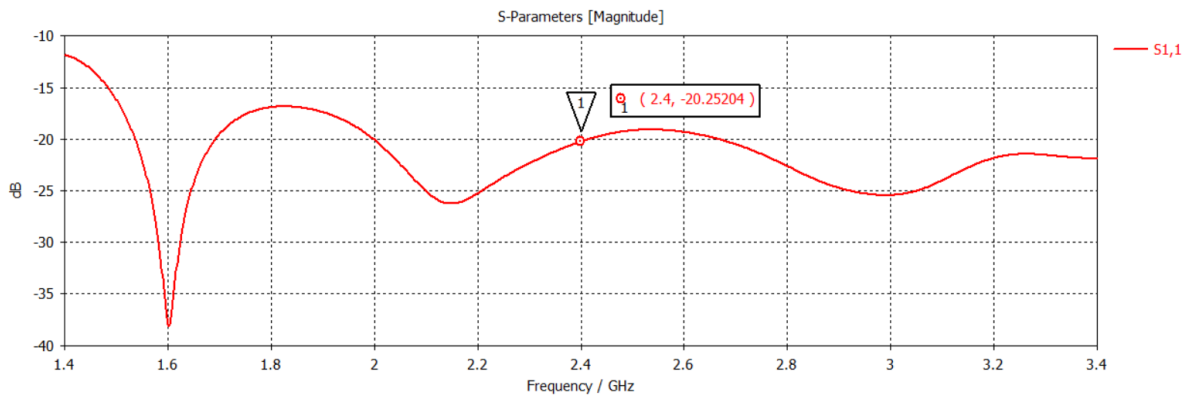


Figura 25. Coeficiente de reflexión de la antena tipo horn piramidal para 2.4 GHz.

En la Figura 26 se denota el diagrama de radiación en 3D de la antena horn propuesta. El diagrama de radiación muestra un comportamiento directivo de la antena logrando obtener 15 dBi de directividad y 15 dBi de ganancia. En la Figura 27 se aprecia el diagrama polar de la antena horn.

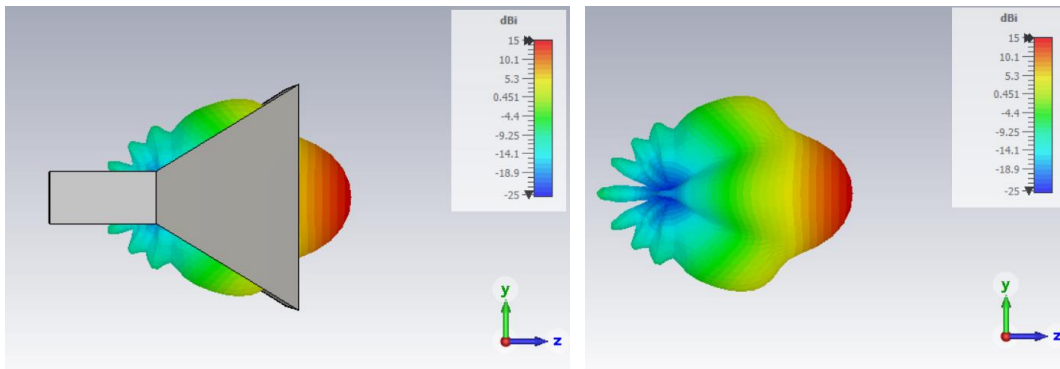


Figura 26. Representación diagrama de radiación en 3D de la antena tipo horn piramidal.

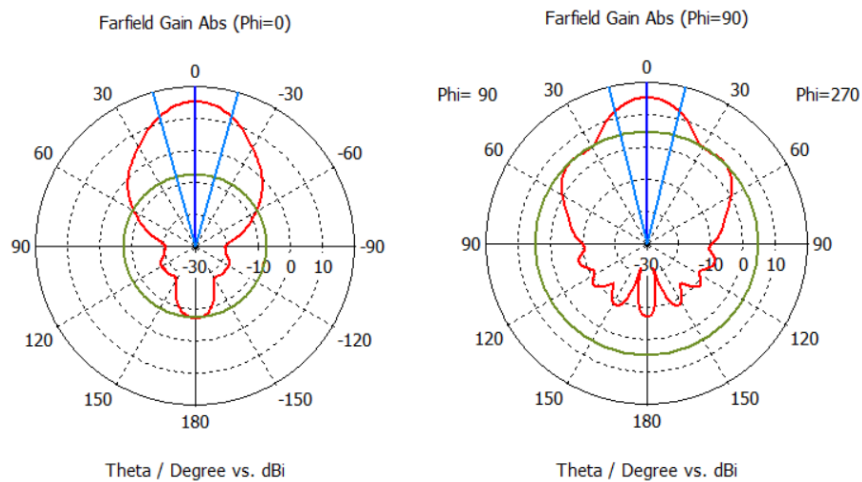


Figura 27. Diagrama de radiación polar de la antena horn piramidal en: a) Phi=0; b) Phi=90.

El diseño de la antena horn para 5 GHz se lo encontrara en la parte de anexos.

3.2.2 Diseño de la antena RIS de 2 bits de 8x8 elementos a 2.4 GHz.

Para el diseño de la antena RIS con $N \times N$ números de elementos reflectantes, primero se consideró realizar el estudio con una antena RIS de 16x16 conformada por 256 elementos, debido a que el tamaño de la antena RIS de este tipo era muy grande y abarcaba más de 1000 elementos activos en su estructura el computador no soporto la simulación de una antena RIS de este tipo debido al tamaño de la RAM, cabe recalcar que el tamaño de la memoria RAM del equipo utilizado es de 32 Gb.

Después de varias pruebas tratando de disminuir el número de elementos reflectantes se llegó a la cantidad exacta de elementos a la cual rendiría el computador, dando como resultado una antena RIS de 8x8 equivalente a 64 números de celdas unitarias. En la Figura 28 se puede observar la antena RIS propuesta a la frecuencia de 2.4 GHz, en donde a una distancia de 900 mm desde el centro de la RIS se encuentra la antena alimentadora Horn tipo piramidal.

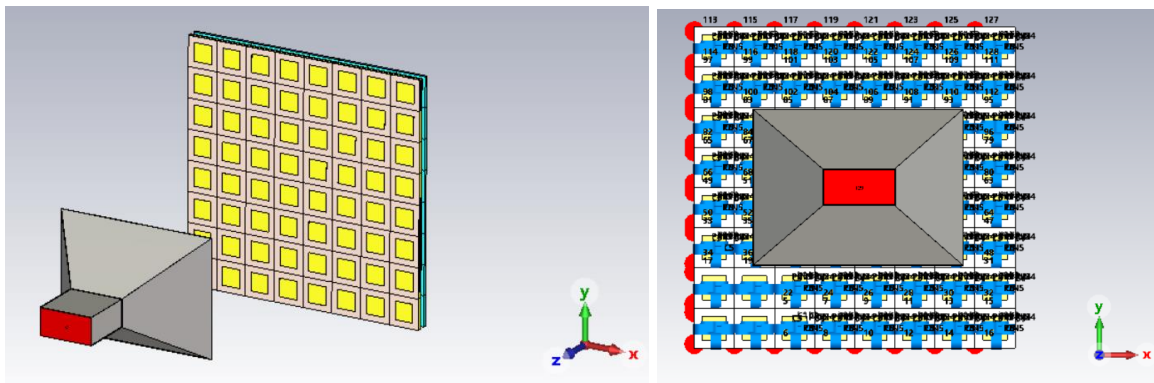


Figura 28. Vista de perspectiva y vista frontal de la Antena RIS activa de 8x8 celdas unitarias a 2.4 GHz.

Se eligió trabajar con la configuración 1 de las 4 configuraciones propuestas debido al optimo comportamiento que se presentó en esta configuración en la celda unitaria. Para analizar el comportamiento de la antena se decidió girar la RIS a diferentes ángulos, manteniendo el alimentador estático. Los ángulos propuestos para girar la antena serán de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 35°, 45° y 50°. La distancia de 900 mm de la antena bocina a la antena RIS fue elegido a modo de experimentación.

3.2.3 Diseño de la antena RIS de 2 bits de 8x8 elementos a 5 GHz.

En la Figura 29 se presenta la antena RIS a la frecuencia de 5 GHz, aquí la antena de bocina se ubica también a una distancia desde el centro de la antena RIS de 900 mm. El objetivo de diseñar a esta frecuencia fue para poder realizar la respectiva comparación del

comportamiento de la antena a 2.4 GHz y a 5 GHz, este comportamiento se lo analizara a través de parámetros como ganancia, directividad, coeficiente de reflexión, diagrama de radiación y ancho de banda.

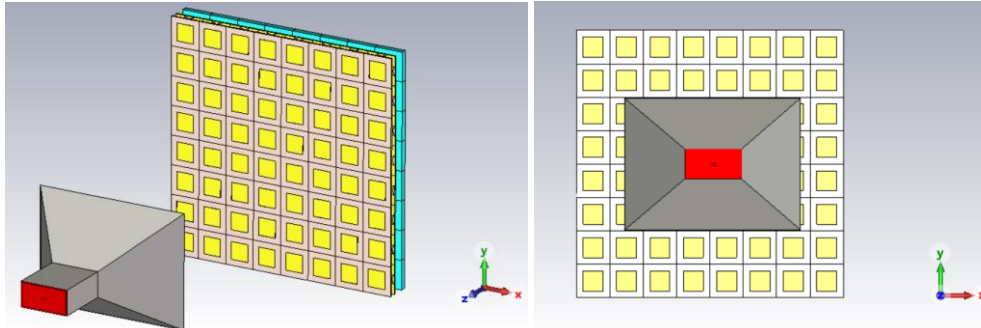


Figura 29. Vista de perspectiva y vista frontal de la Antena RIS activa de 8x8 celdas unitarias a 5 GHz.

CAPÍTULO IV.

4.1 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.1 Análisis e Interpretación de los datos.

Una vez realizado el diseño para una antena con tecnología RIS tanto para la frecuencia de 2.4 GHz como para la frecuencia de 5GHz, se procederá a realizar el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones a través del software electromagnético CST Studio.

4.1.2 Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5GHz con un ángulo de giro de 0°.

El comportamiento de la antena RIS para este primer ángulo se lo puede observar mediante el diagrama de radiación polar presentado en la Figura 30, para la frecuencia de 2.4 GHz se obtiene una ganancia de 15 dBi y una directividad de 16.3 dBi. Mientras que para la frecuencia de 5 GHz se obtiene una ganancia de 17.2 dBi y una directividad de 17.4 dBi. La dirección del lóbulo principal para 2.4 GHz es de 5 grados, obteniendo un ancho de haz de 12.7 grados y un nivel de lóbulo lateral de -5.6 dB. Por otro lado, para 5 GHz se obtiene una dirección del lóbulo principal de 0 grados, con un ancho de haz de 12.7 grados y un nivel de lóbulo principal a secundario de -8 dB.

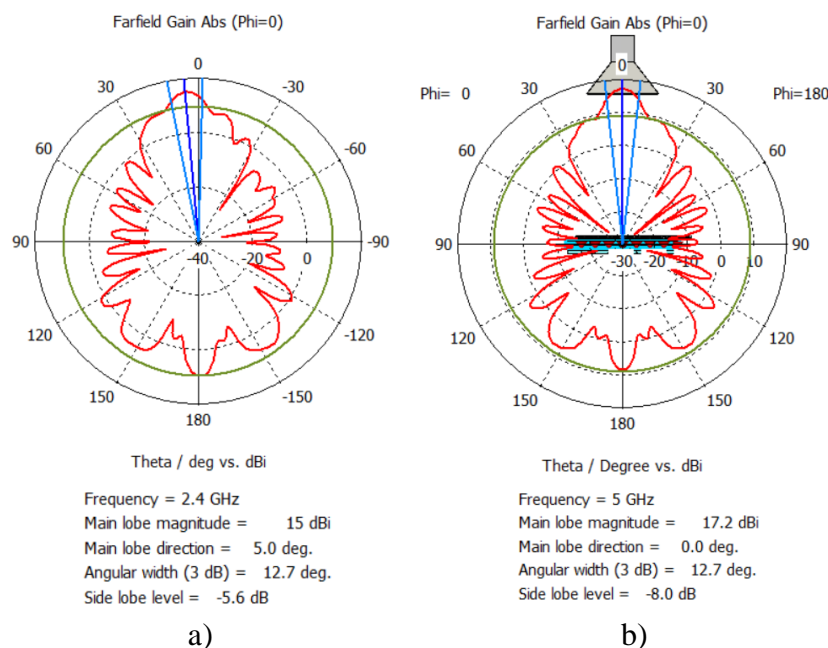


Figura 30. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 0°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 0°.

Los parámetros S_{11} para la frecuencia de 2.4 GHz se muestran en la Figura 31, en donde se puede notar que la antenna cumple con una adaptación óptima de ($S_{11} < -10$ dB) dentro del rango de frecuencias analizado. Específicamente en la frecuencia central de 2.4 GHz la antenna muestra un acoplamiento de -14.23 dB, obteniendo un ancho de banda del 16.66%. Para la frecuencia de 5 GHz se observa los resultados obtenidos en la Figura 32, en esta frecuencia el acoplamiento es de -11.87 dB, siendo este resultado un acoplamiento muy bajo ya que su valor esta cercano a los -10 dB, además se obtuvo un ancho de banda del 20% debido a que la antenna funciona dentro del rango de frecuencias analizado.

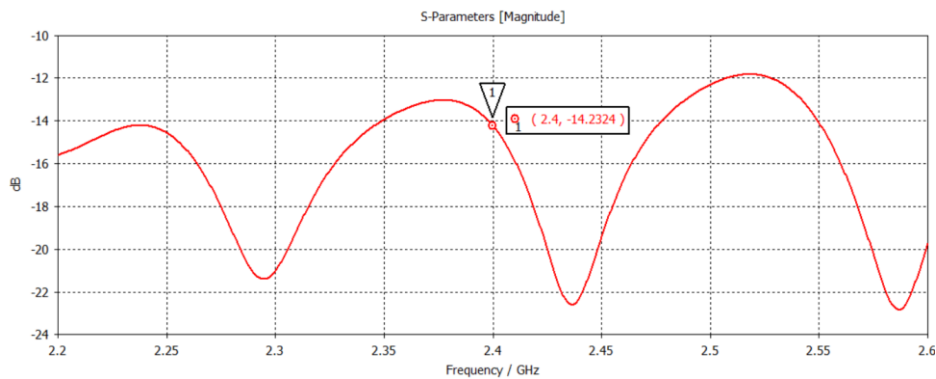


Figura 31. Simulación del coeficiente de reflexión de la antenna RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 0° .

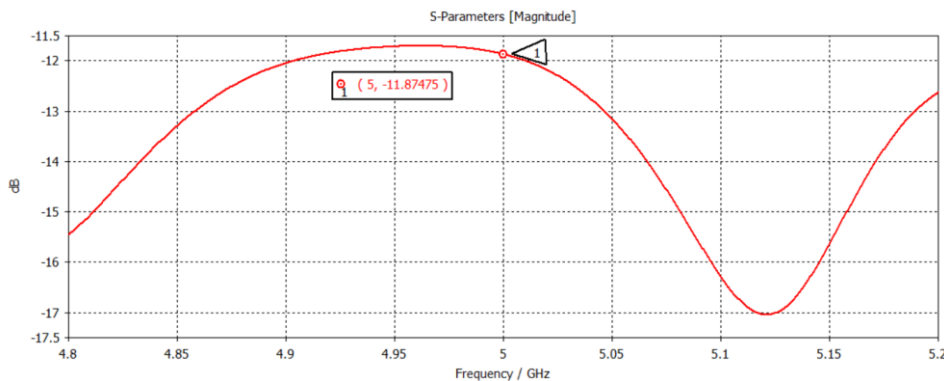


Figura 32. Simulación del coeficiente de reflexión de la antenna RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 0° .

4.1.3 Análisis de la antenna RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 5° .

El comportamiento de la antenna RIS para un ángulo de giro de 5° se lo puede observar mediante el diagrama de radiación polar presentado en la Figura 33, para la frecuencia de 2.4 GHz se obtiene una ganancia de 15.4 dBi y una directividad de 16.7 dBi. Mientras que para la frecuencia de 5 GHz se obtiene una ganancia de 16.9 dBi y una directividad de 17.2 dBi. La dirección del lóbulo principal para 2.4 GHz es de 8 grados, obteniendo un ancho de haz de 13.3, con un nivel de lóbulo principal a secundario de -6.2 dB. Por otro lado, para 5 GHz se obtiene una dirección del lóbulo principal de 8 grados, con un ancho de haz de 13.6

grados y un nivel de lóbulo principal a secundario de -8 dB. En los dos casos de análisis la señal incidente se refleja con un ángulo de dirección de 8°.

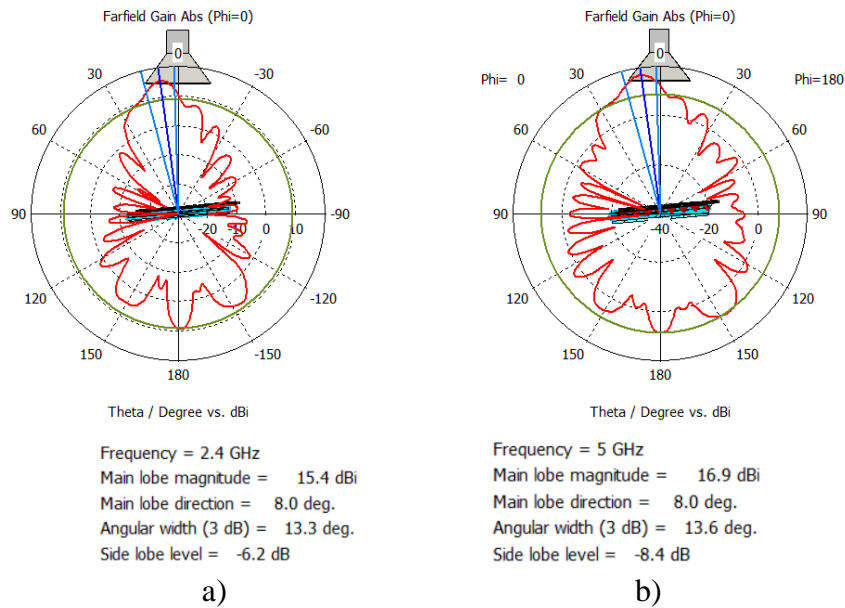


Figura 33. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 5°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 5°.

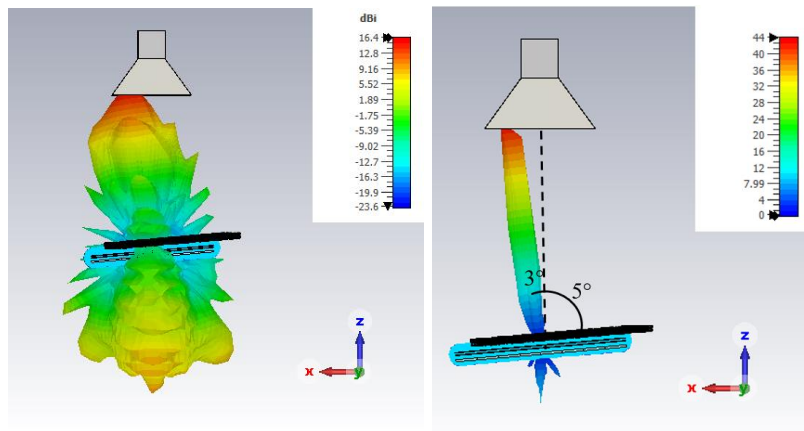


Figura 34. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 5°.

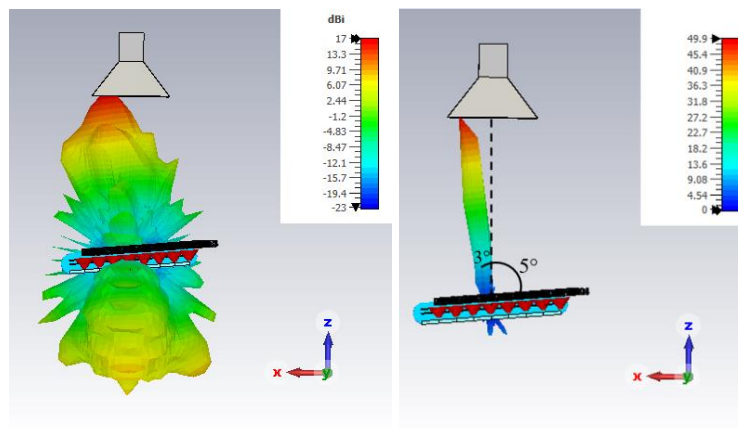


Figura 35. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 5°.

En la Figura 34 se presenta el diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz, aquí la señal que incide en la antena RIS no se refleja en su totalidad debido a que un porcentaje de ella se consume en la parte trasera, este efecto puede deberse al tamaño de la antena ya que si esta contara con más celdas unitarias este factor de consumo se reduciría. En la Figura 35 se visualiza el diagrama de radiación en 3D a 5 GHz, aquí se tiene el mismo comportamiento obtenido en 2.4 GHz.

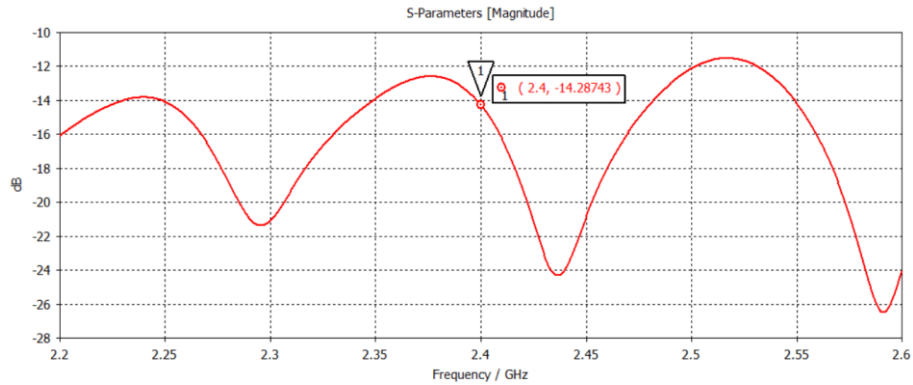


Figura 36. Simulación del coeficiente de reflexión de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 5°.

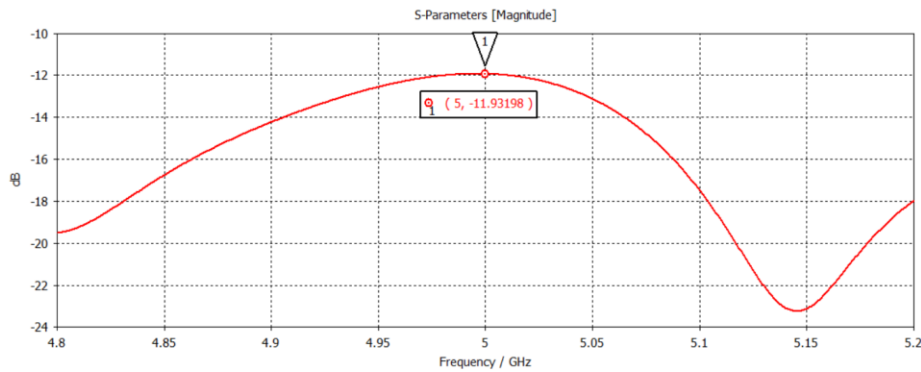


Figura 37. Simulación del coeficiente de reflexión de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 5°.

Los valores de acoplamiento obtenidos para 2.4 GHz y 5 GHz se pueden visualizar en la Figura 36 y Figura 37, estos valores son muy similares a los obtenidos para un ángulo de giro de 0°. Para la frecuencia de 2.4 GHz la antena obtuvo un acoplamiento de -14.28 dB, mientras que para 5 GHz la antena RIS obtuvo un acoplamiento de -11.93 dB.

4.1.4 Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 10°.

En la Figura 38 a) se muestra el diagrama de radiación polar a 2.4 GHz, aquí la dirección de la onda incidente al reflejarse toma un ángulo de 18°. Además, se logra obtener una ganancia de 14.7 dBi y una directividad de 15.8 dBi. El diagrama de radiación polar a 5 GHz se observa en la Figura 38 b), aquí se visualiza un ángulo de dirección del haz principal reflejado de 18°, logrando obtener una ganancia de 16.7 dBi y una directividad de 16.9 dBi.

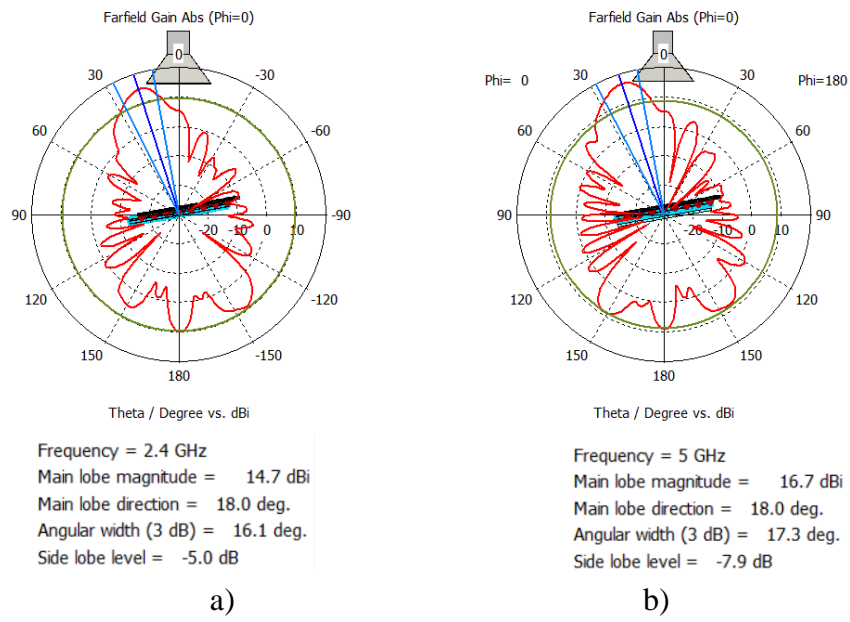


Figura 38. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 10°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 10°.

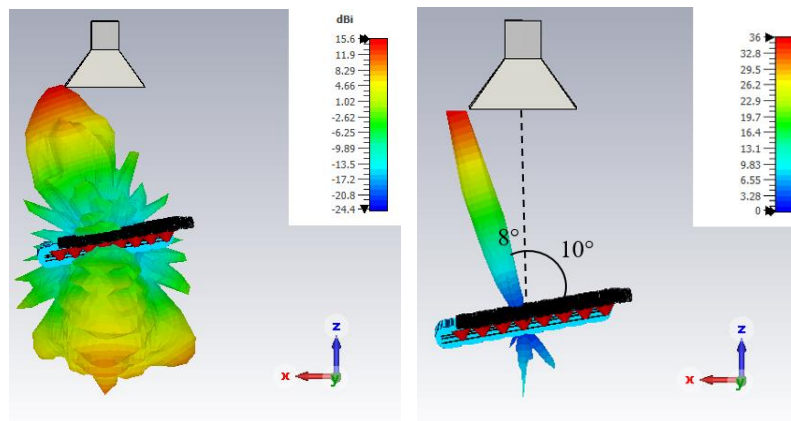


Figura 39. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 10°.

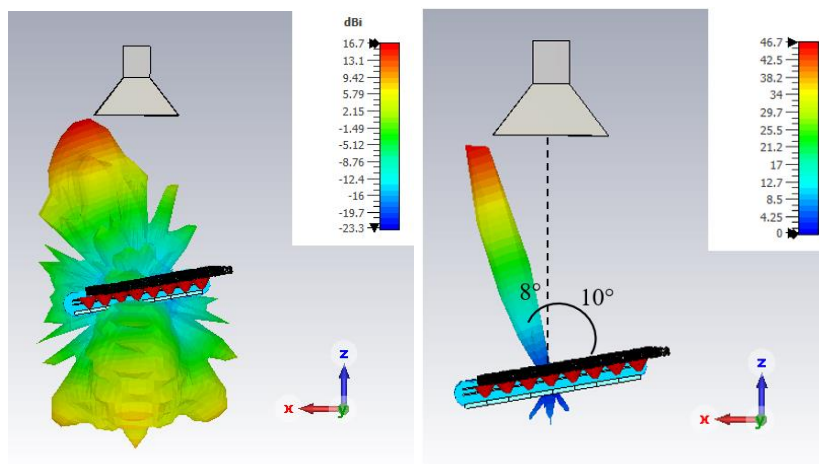


Figura 40. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 10°.

El diagrama de radiación en 3D para 2.4 GHz se lo puede visualizar en la Figura 39, en donde analizando su comportamiento aún se ve un consumo de señal en la parte trasera de la RIS, como ya se mencionó antes se cree que esto sucede debido al tamaño de la antena RIS. El diagrama de radiación en 3D para 5 GHz se lo puede visualizar en la Figura 40, en donde muestra el mismo comportamiento de la señal que incide en la RIS. En ambas frecuencias se logra una desviación en la dirección del haz principal de 18 grados.

Los valores de acoplamiento obtenidos para un ángulo de giro de 10° a 2.4 GHz y a 5 GHz se pueden visualizar en la Figura 41 y Figura 42 respectivamente. Para la frecuencia de 2.4 GHz se obtuvo un acoplamiento de -14.44 dB, mientras que para 5 GHz se obtuvo un acoplamiento de -13.70 dB.

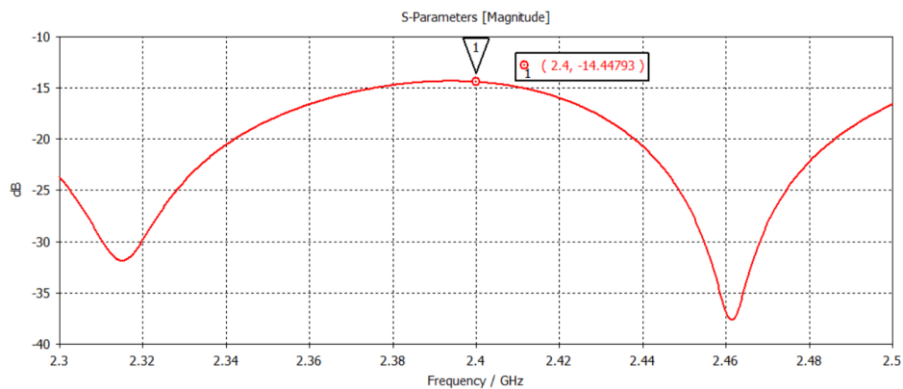


Figura 41. Simulación del parámetro S₁₁ de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 10° .

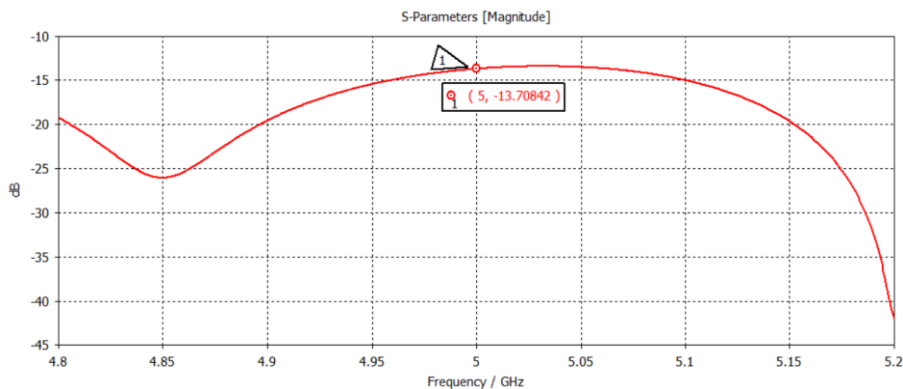


Figura 42. Simulación del parámetro S₁₁ de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 10° .

4.1.5 Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 15° .

En la Figura 43 a) se presenta el diagrama de radiación polar a 2.4 GHz, la dirección que toma la onda incidente al reflejarse es la de un ángulo de 29° . Además, se logra obtener una ganancia de 16.1 dBi y una directividad de 16.7 dBi. El diagrama de radiación polar a 5 GHz

se visualiza en la Figura 43 b), aquí el ángulo de dirección del haz principal reflejado toma un valor de 30°, logrando obtener una ganancia de 16.2 dBi y una directividad de 16.6 dBi.

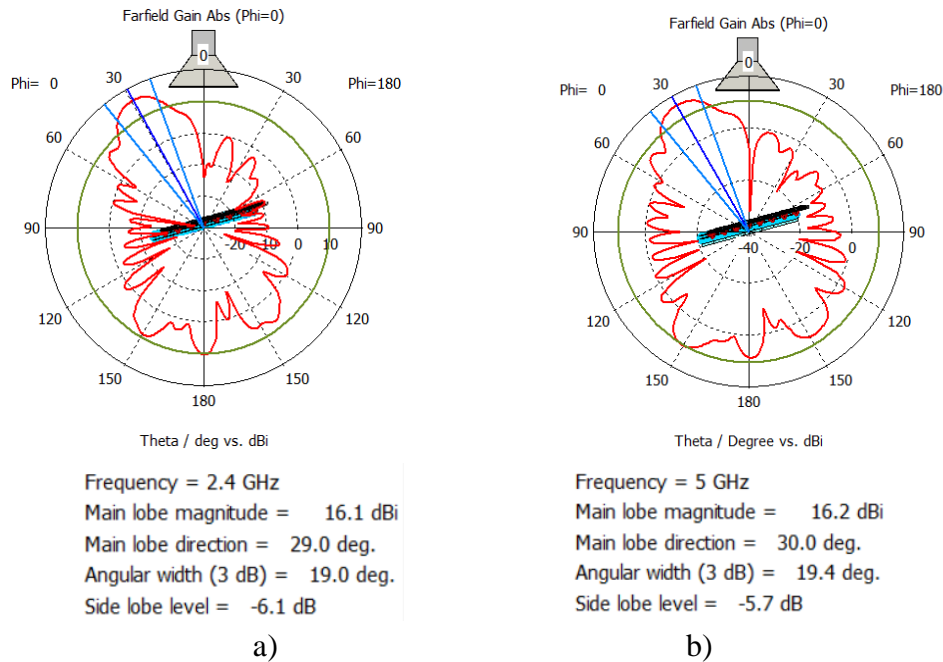


Figura 43. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 15°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 15°.

Los valores de acoplamiento obtenidos para un ángulo de giro de 10° a 2.4 GHz y a 5 GHz se pueden visualizar en la Figura 44 y Figura 45 respectivamente. Para la frecuencia de 2.4 GHz se obtuvo una adaptación de -17.46 dB, en donde además se observa dos picos de acoplamiento en las frecuencias de 2.35 GHz con -48.17 dB y en 2.51 GHz con -30.6 dB, mientras que para 5 GHz se obtuvo una adaptación de -13.70 dB, además también presenta un pico máximo de acoplamiento en 4.91 GHz de -40.14 dB.

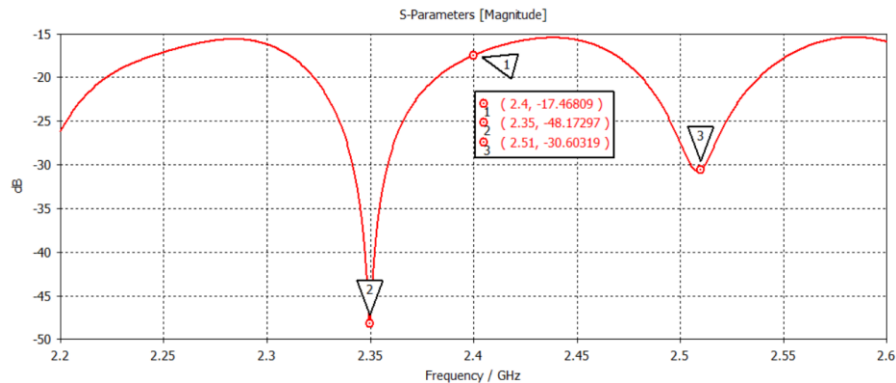


Figura 44. Simulación del parámetro S₁₁ de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 15°.

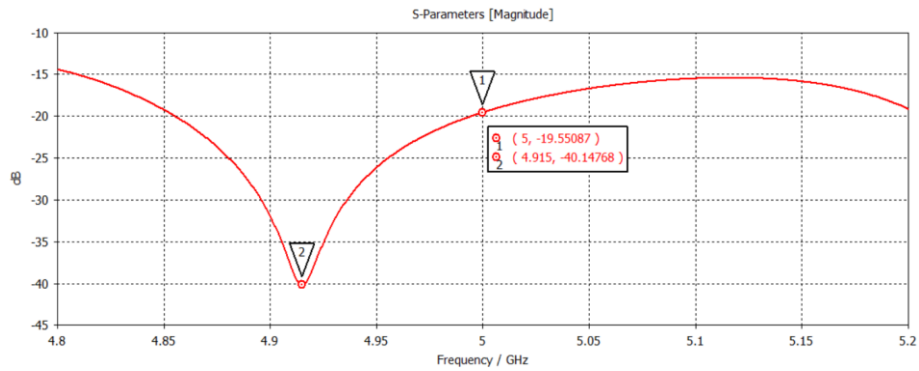


Figura 45. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 15° .

4.1.6 Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 20° .

El diagrama de radiación polar para un ángulo de giro de 20° se presenta en la Figura 46 a), en donde se aprecia dirección del lóbulo principal con un ángulo de 40° , obteniendo una directividad de 16.3 dBi y una ganancia de 15.2 dBi. El diagrama de radiación polar para la frecuencia de 5 GHz se visualiza en la Figura 46 b), en donde el ángulo de dirección del haz principal reflejado toma un valor de 40° , logrando obtener una ganancia de 17 dBi y una directividad de 17.3 dBi.

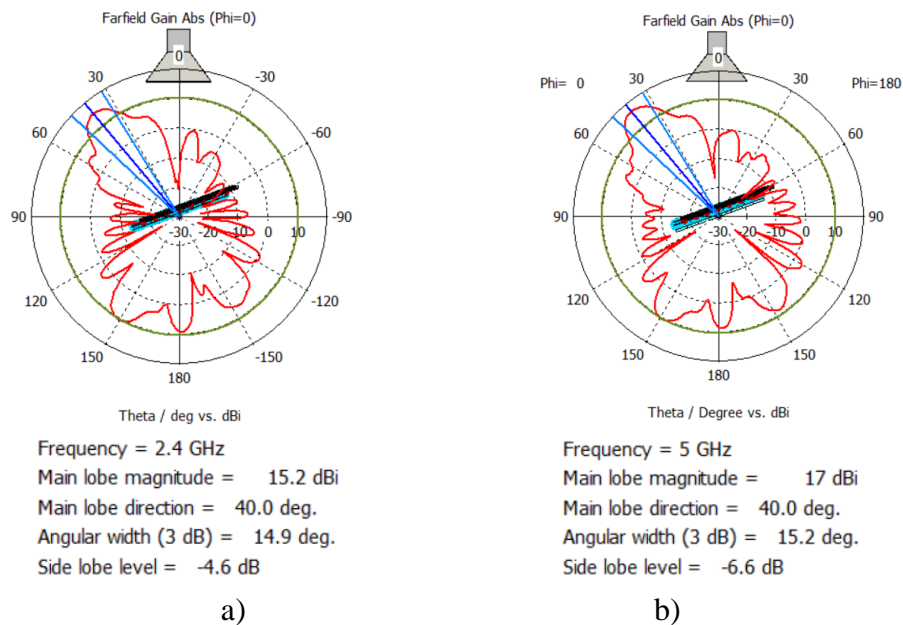


Figura 46. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 20° , b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 20° .

El diagrama de radiación en 3D para un ángulo de giro de 20° tanto para 2.4 GHz como para 5 GHz se pueden apreciar en la Figura 47 y Figura 48 respectivamente. Para ambas frecuencias se forma un haz con un ángulo de dirección de 40° , además se sigue manteniendo el comportamiento de la señal en la antena RIS para ambas frecuencias.

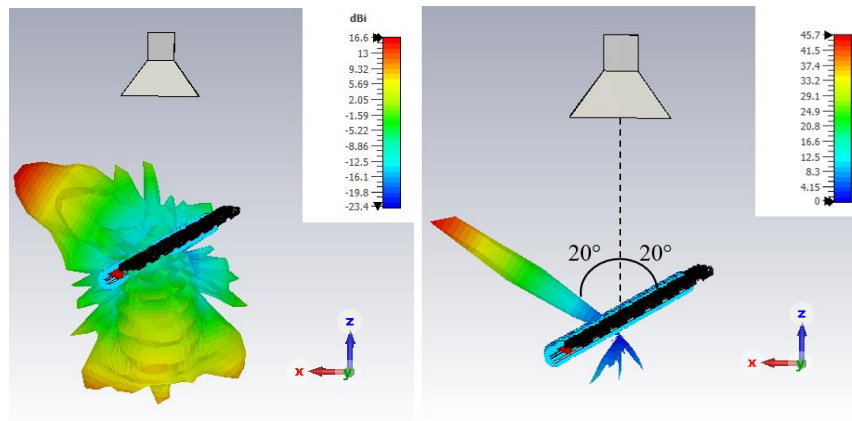


Figura 47. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 20°.

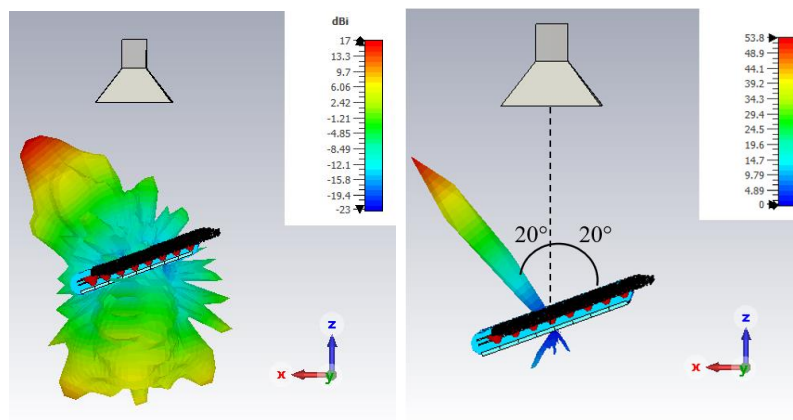


Figura 48. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 20°.

El comportamiento de la antena RIS para el análisis del parámetro S_{11} dio como resultado una adaptación de -22.21 dB a la frecuencia de 2.4 GHz, también la antena muestra una buena adaptación con valores de $S_{11} < -18$ dB en el rango de frecuencias estudiado de 2.3 a 2.5 GHz, todo este comportamiento se lo puede observar a través de la Figura 49. Para la frecuencia de 5 GHz en la Figura 50 se muestra el acoplamiento máximo se da exactamente en la frecuencia central de trabajo logrando un valor de adaptación de -26.24 dB.

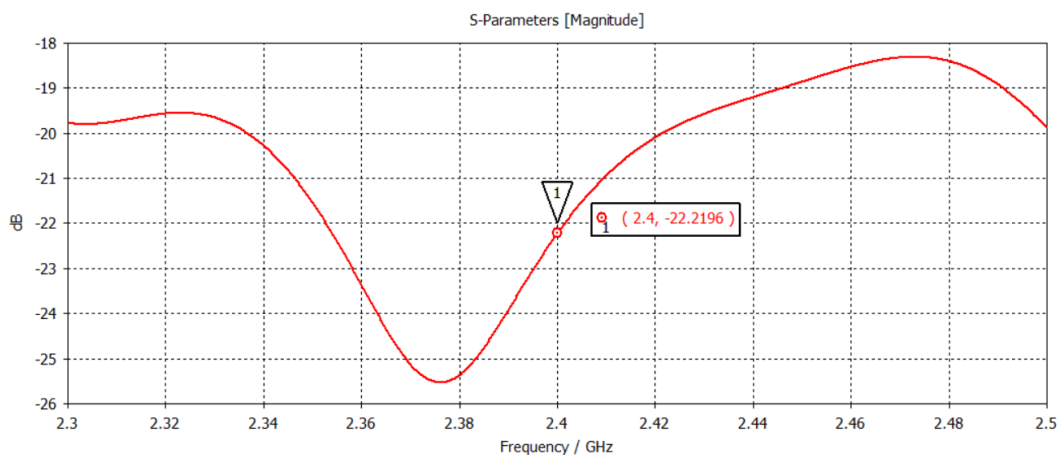


Figura 49. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 20°.

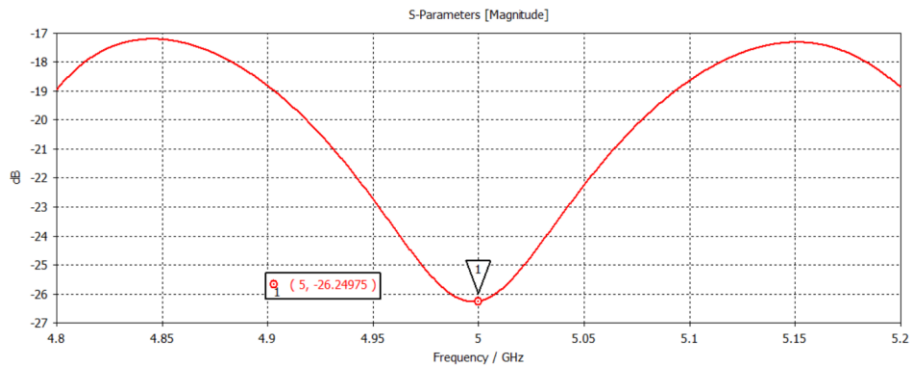


Figura 50. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 20° .

4.1.7 Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5GHz con un ángulo de giro de 30° .

El diagrama de radiación polar para un ángulo de giro de 30° a 2.4 GHz se presenta en la Figura 51 a), en donde se aprecia un ángulo de dirección del lóbulo principal de 58° , obteniendo una directividad de 16.6 dBi y una ganancia de 15.5 dBi. El diagrama de radiación polar para la frecuencia de 5 GHz se visualiza en la Figura 51 b), en donde el ángulo de dirección del haz principal reflejado toma un valor de 58° , logrando obtener una ganancia de 16.5 dBi y una directividad de 16.8 dBi.

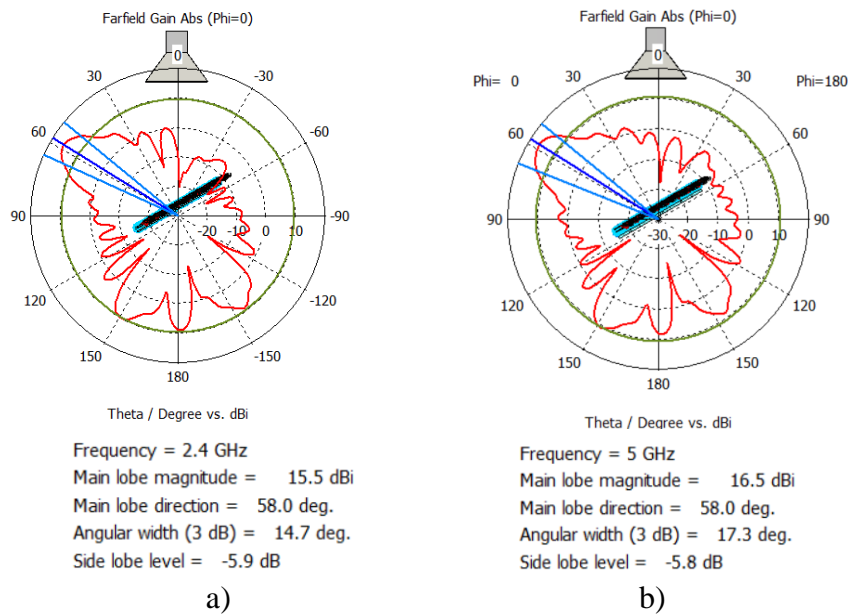


Figura 51. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 30° , b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 30° .

El diagrama de radiación en 3D para un ángulo de giro de 30° para 2.4 GHz y 5 GHz se visualiza en las Figura 52 y Figura 53 respectivamente. Para ambas frecuencias se forma un haz con un ángulo de dirección de 58° , cabe mencionar que se sigue manteniendo el comportamiento de la señal al momento que incide en la antena RIS para ambas frecuencias.

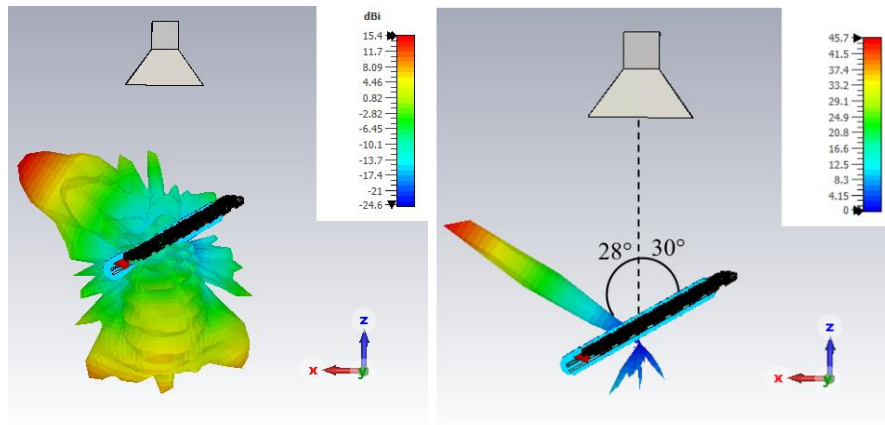


Figura 52. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 30°.

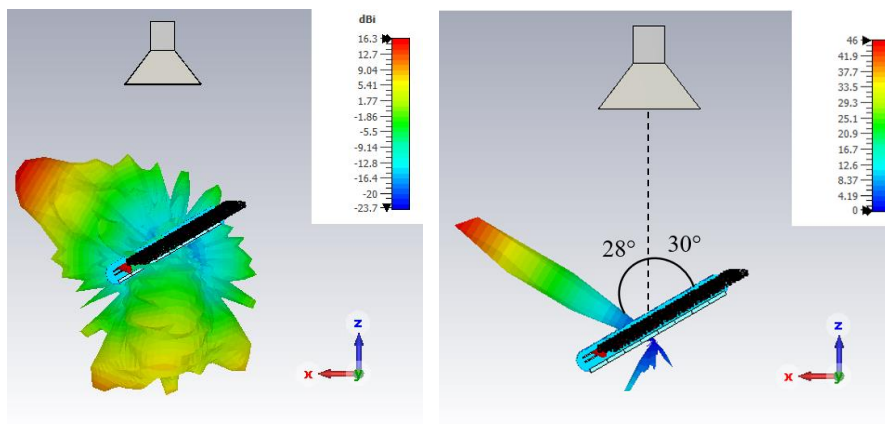


Figura 53. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 30°.

La adaptación de la antena RIS para un ángulo de giro de 30° da como resultado un valor de -21 dB, logrando tener un comportamiento favorable ya que la antena a la frecuencia de trabajo de 2.4 GHz muestra un acoplamiento óptimo, como se muestra en la Figura 54. Para la frecuencia de 5 GHz a través de la Figura 55 se observa que el valor de acoplamiento es de -19.59 dB. Se puede decir que para ambos casos de frecuencias la antena se comporta con una adaptación menor a -19 dB.

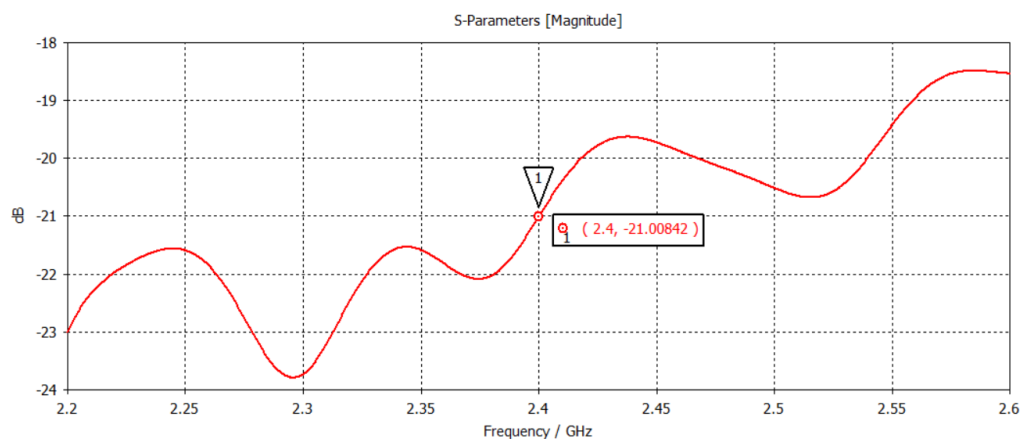


Figura 54. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 30°.

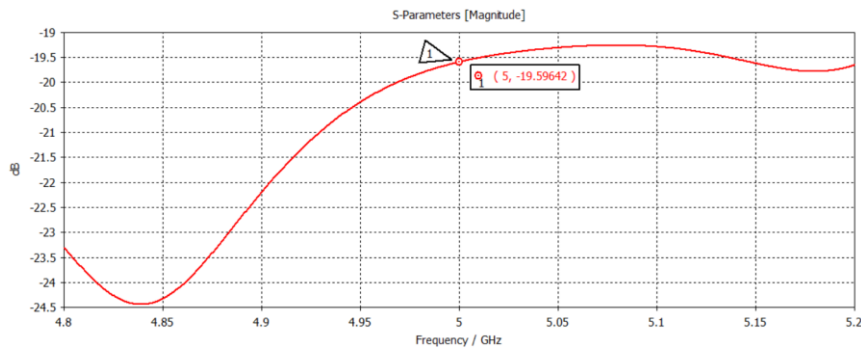


Figura 55. Simulación del parámetro S_{11} de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 30° .

4.1.8 Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 35° .

En la Figura 56 a) a través del diagrama de radiación polar se observa el comportamiento de una antena RIS a un ángulo de giro de 35° para 2.4 GHz, donde se obtuvo una ganancia de 14.7 dBi y una directividad de 15.9 dBi, logrando una dirección del haz principal de 68° . La dirección del haz principal se desvía a un ángulo de 68° . Por otro lado, el comportamiento del diagrama polar para la frecuencia de 5 GHz se lo puede visualizar en la Figura 56 b), dando como resultado un valor de ganancia de 16.2 dBi y una directividad de 16.5 dBi, logrando tener una dirección del haz principal de 69° .

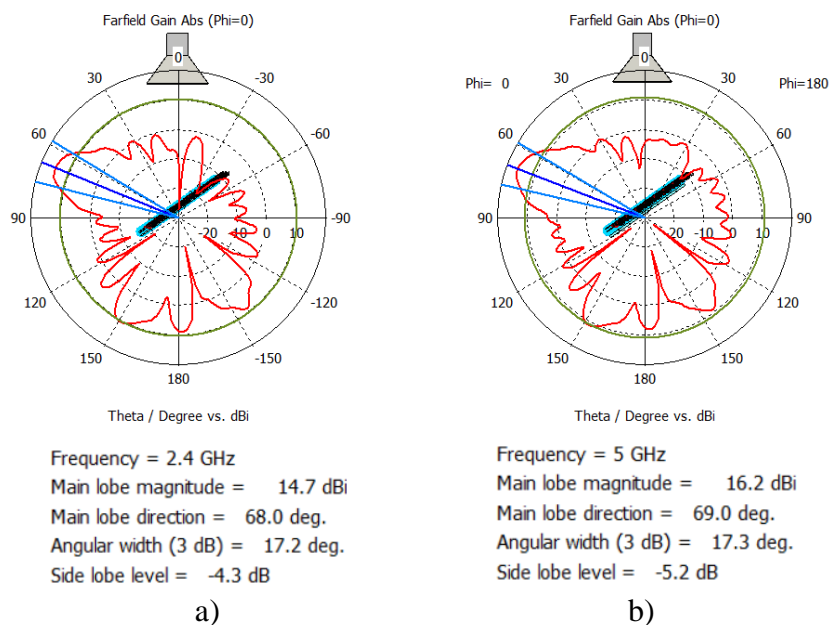


Figura 56. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 35° , b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 35° .

El diagrama de radiación en 3D muestra el comportamiento de la señal a incidir en la antena y reflejarse en dirección frontal a 88° para 2.4 GHz (ver Figura 57) y 89° para 5 GHz (ver Figura 58), los ángulos de dirección del haz principal son muy parecidos pero sigue

quedando parte de la señal en la parte trasera de la RIS haciendo que para este caso de estudio a 35° se forme un segundo haz de pequeño tamaño al momento de reflejarse la señal para ambos casos de frecuencia.

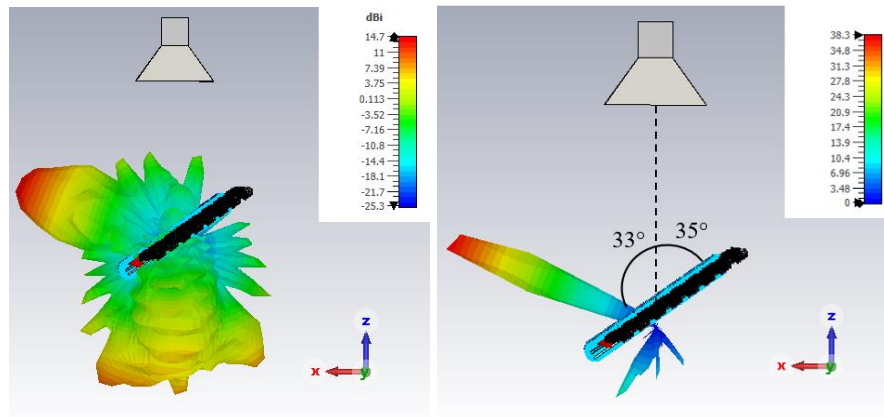


Figura 57. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 35° .

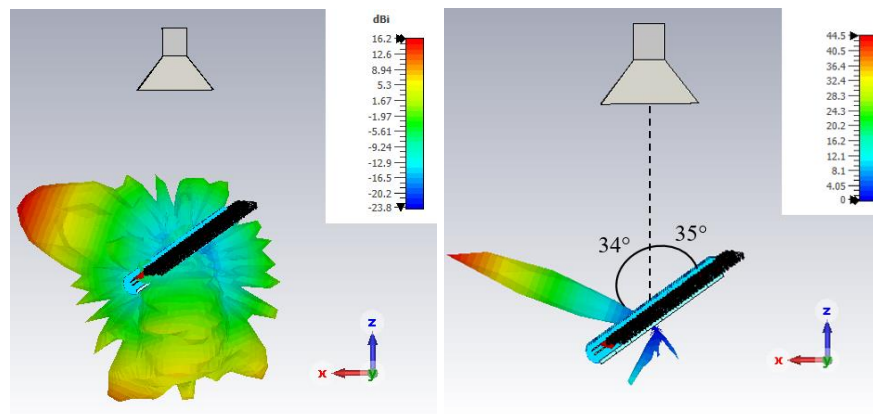


Figura 58. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 35° .

El parámetro S_{11} para 2.4 GHz dio como resultado -22.74 dB, llegando a deducir que para un ángulo de giro de 35 grados la antena funciona correctamente, además dentro del rango de frecuencias estudiado el parámetro S_{11} muestra valores menores que -18 dB obteniendo un ancho de banda del 16.16%, los parámetros de adaptación a este ángulo de giro se los puede verificar en la Figura 59.

Mientras que para 5 GHz se obtuvo un acoplamiento de -23.23 dB logrando el pico máximo de adaptación en esta frecuencia y un ancho de banda del 20% debido a que en el rango de frecuencias estudiado para este ángulo de giro los valores de acoplamiento resultaron ser menores que -17 dB. Este comportamiento se puede observar a través de la Figura 60.

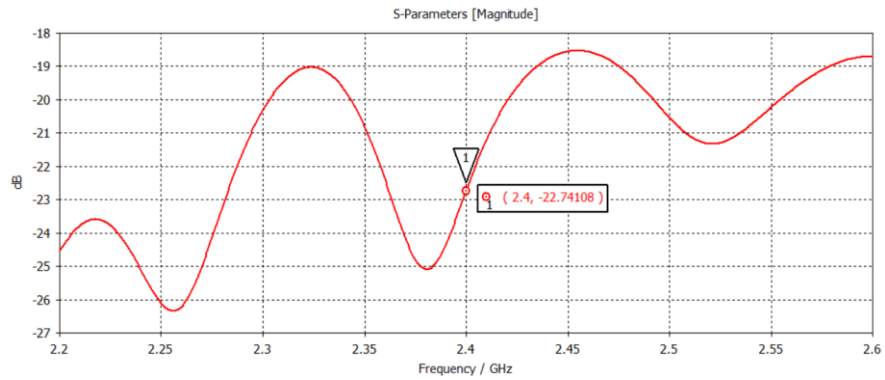


Figura 59. Simulación del parámetro S11 de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 35°.

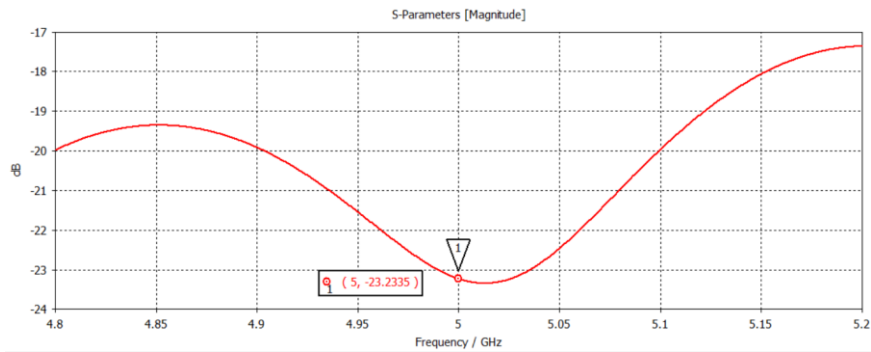


Figura 60. Simulación del parámetro S11 de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 35°.

4.1.9 Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5GHz con un ángulo de giro de 45°.

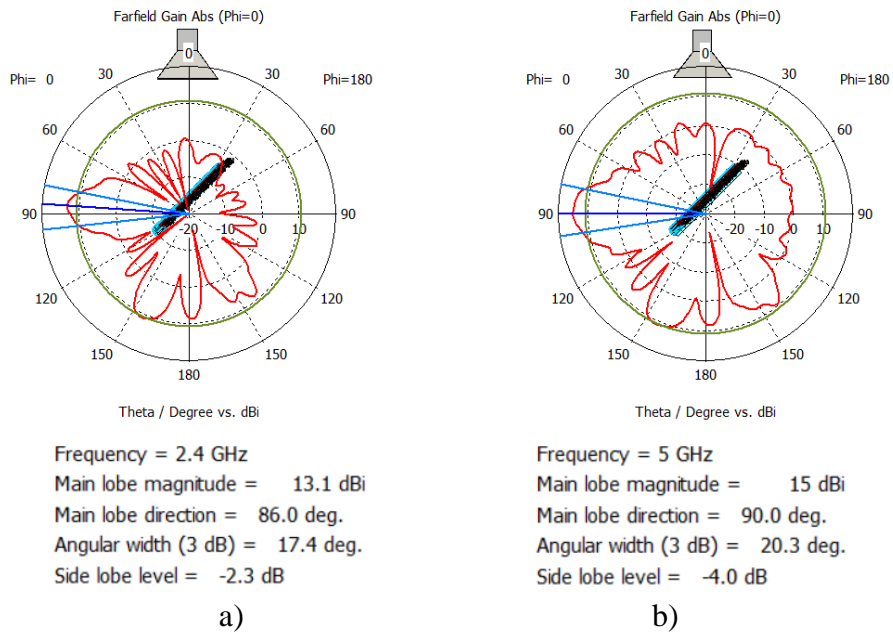


Figura 61. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 45°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 45°.

Mediante el diagrama de radiación polar de la Figura 61 a) se observa el comportamiento de la antena RIS a un ángulo de giro de 45° , obteniendo una ganancia de 13.1 dBi y una directividad de 14.8 dBi, teniendo la dirección del haz principal a un ángulo de 86° , con un ancho de haz de 17.4 grados. Para la frecuencia de 5 GHz el diagrama polar puede ser visto en Figura 61 b) aquí la señal se refleja con dirección a un ángulo de 90° consiguiendo una ganancia de 15 dBi y un valor de directividad de 15.2 dBi. Para este ángulo de giro de 45° en ambas frecuencias se puede notar la formación de lóbulos secundarios en la parte trasera de la onda incidente, teniendo un punto radiante en la dirección de 90° pero formándose otro punto radiante a una dirección de 156° (Ver Figura 62 y Figura 63).

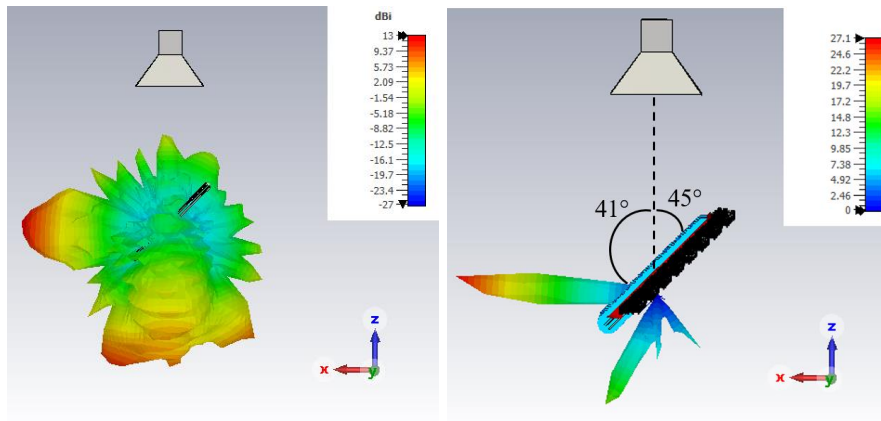


Figura 62. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 45° .

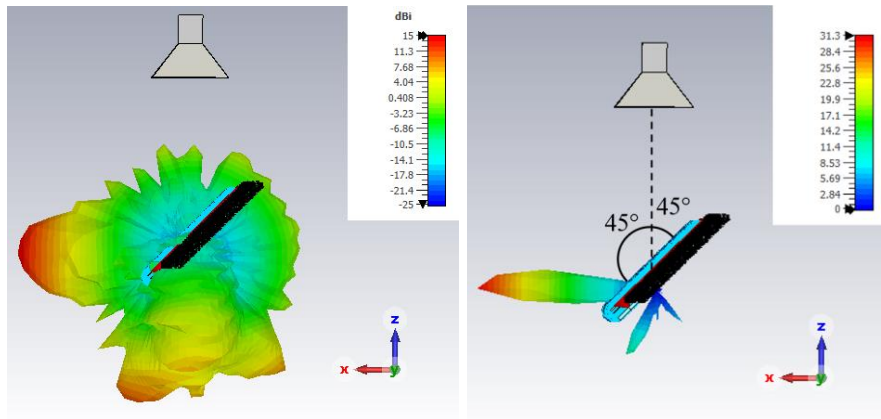


Figura 63. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 45° .

El acoplamiento para la frecuencia de 2.4 GHz tendió a disminuir en comparación con el ángulo de giro anterior logrando obtener una adaptación de -18.99 dB, se mantiene el ancho de banda de 16.66% debido a que en el rango de frecuencias estudiado los valores de acoplamiento son menores a -18 dB. Para 5 GHz se obtiene un acoplamiento de -18.74 dB, un resultado similar al de 2.4 GHz, aquí se obtiene un ancho de banda del 20% ya que dentro del rango de frecuencias estudiado el acoplamiento es menor a -18 dB. Para entender bien este análisis revisar la Figura 64 y Figura 65.

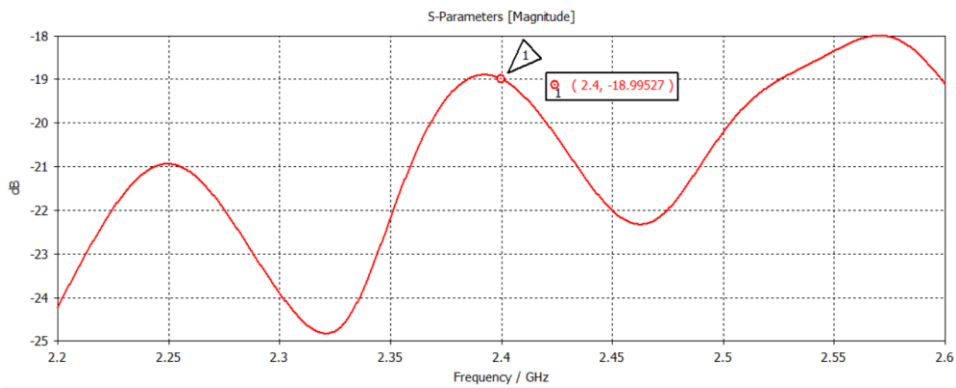


Figura 64. Simulación del parámetro S11 de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 45°.

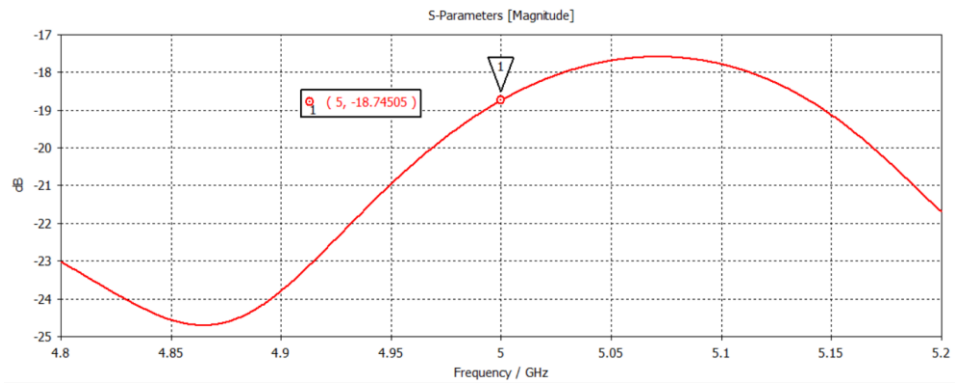


Figura 65. Simulación del parámetro S11 de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 45°.

4.1.10 Análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5 GHz con un ángulo de giro de 50°.

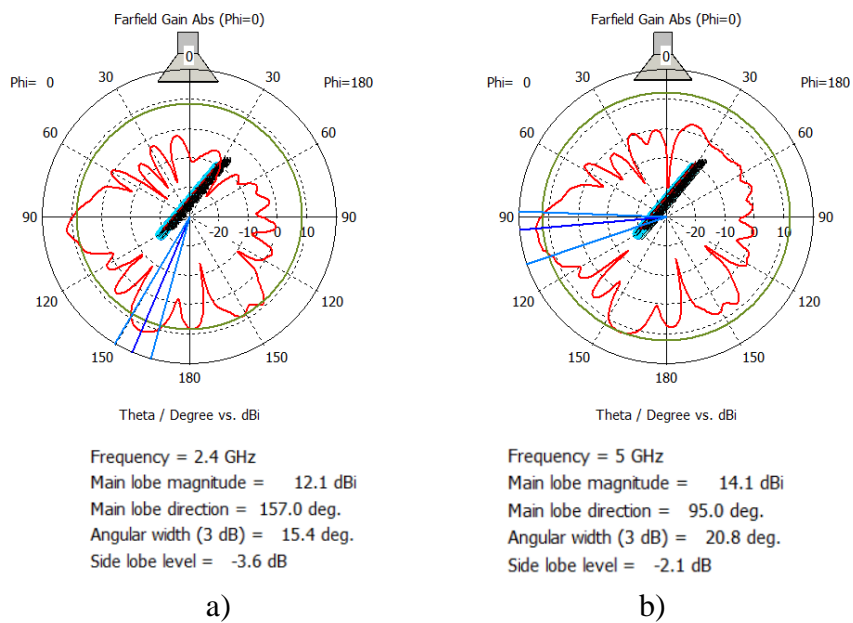


Figura 66. a) Diagrama de radiación polar a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 45°, b) Diagrama de radiación polar a 5 GHz para un ángulo de giro de 45°.

El comportamiento de la antena RIS a un ángulo de giro de 50° no es el más óptimo, debido a que la señal a este ángulo para la frecuencia de 2.4 GHz empieza a traspasar no logrando que la señal se refleje, mediante la Figura 66 a) se puede ver el diagrama polar de la RIS a esta frecuencia, además los valores de ganancia y directividad tienden a disminuir perdiendo 2.99 dB de ganancia dando como resultado un valor de 12.1 dB y una directividad de 13.5 perdiendo 1.5 dB. La dirección del haz principal apunta a un ángulo de 157° , obteniendo un ancho de haz de 15.4 grados.

En la Figura 66 b) se visualiza el diagrama polar de la antena a 5 GHz, aquí la señal aun logra reflejarse con una dirección de haz de 95° , presentando una ganancia de 14.1 dBi y una directividad de 14.4 dBi, también se nota la formación de lóbulos secundarios en la señal. Este comportamiento se lo puede apreciar de una mejor manera en la Figura 67 y Figura 68.

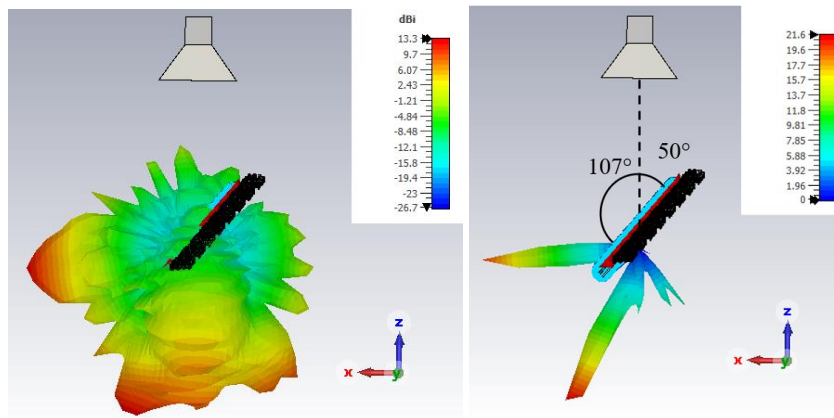


Figura 67. Diagrama de radiación en 3D a 2.4 GHz para un ángulo de giro de 50° .

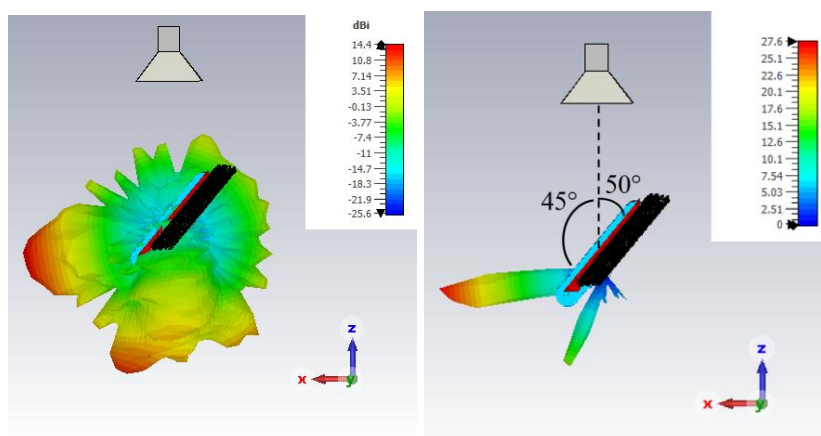


Figura 68. Diagrama de radiación en 3D a 5 GHz para un ángulo de giro de 50° .

El acoplamiento para la frecuencia de 2.4 GHz tendió a aumentar en comparación con el ángulo de giro anterior logrando obtener una adaptación de -23.43 dB, se mantiene el ancho de banda de 16.66% debido a que en el rango de frecuencias estudiado los valores de acoplamiento son menores a -17 dB. Para 5 GHz se obtiene un acoplamiento de -21.12 dB,

un resultado similar al de 2.4 GHz, aquí se obtiene un ancho de banda del 20% ya que dentro del rango de frecuencias estudiado el acoplamiento es menor a -17 dB. Para entender bien este análisis revisar la Figura 69 y Figura 70.

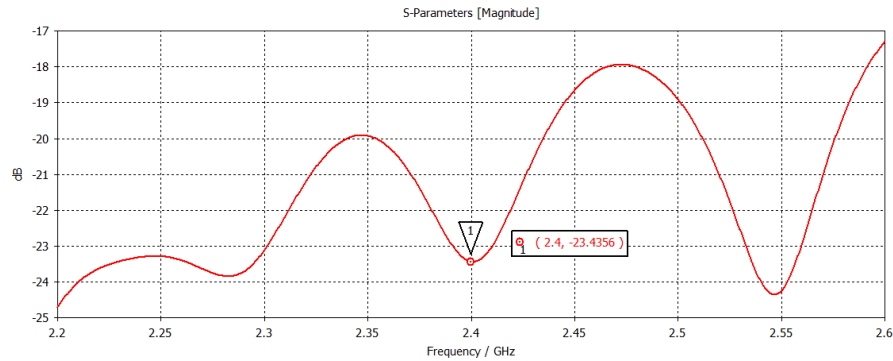


Figura 69. Simulación del parámetro S11 de la antena RIS a 2.4 GHz con ángulo de giro de 50°.

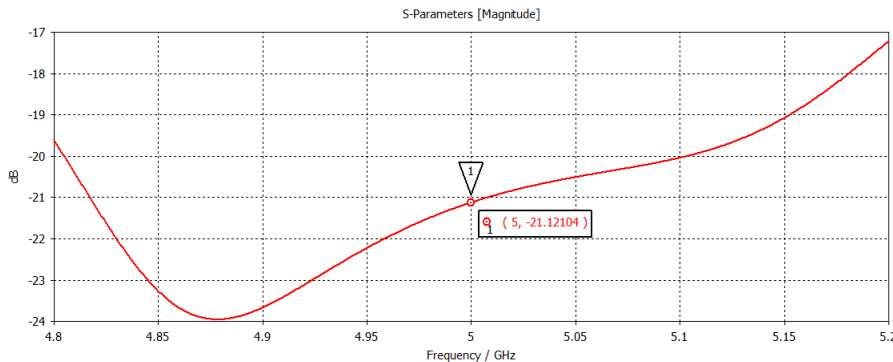


Figura 70. Simulación del parámetro S11 de la antena RIS a 5 GHz con ángulo de giro de 50°.

En la Figura 71 y Figura 72 se presenta los diagramas polares a los ángulos de giro propuestos para el análisis de la antena RIS a 2.4 GHz y 5GHz, se puede deducir de estas graficas que mientras iba aumentando el ángulo de giro de 0° a 50°, los valores de directividad y ganancia iban disminuyendo. La señal se refleja de manera óptima hasta el ángulo de 35°. A partir del ángulo de giro de 45° la señal presenta un comportamiento diferente, aquí la señal se refleja, pero también traspasa una porción de ella, este comportamiento se lo puede notar más en el ángulo de giro de 50° para ambas frecuencias.

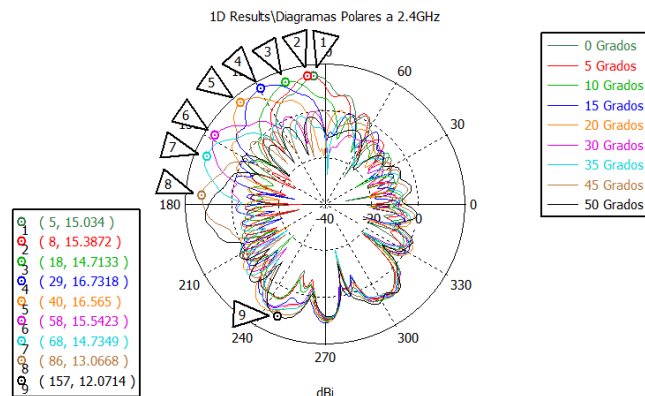


Figura 71. Diagramas polares de todos los ángulos de giro analizados a 2.4 GHz.

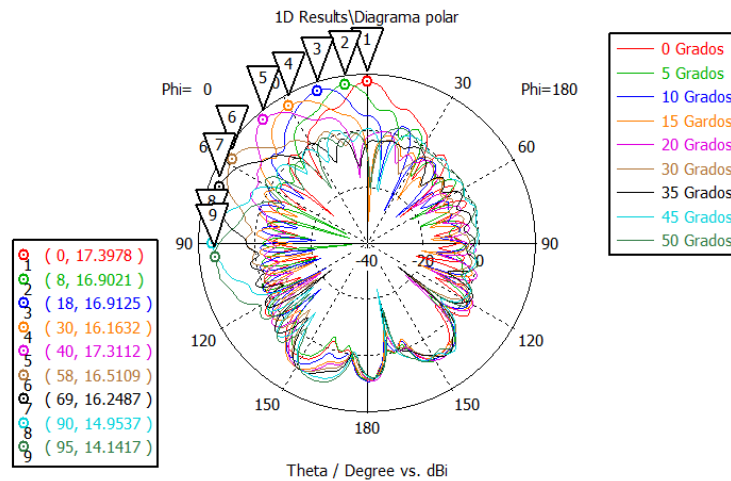


Figura 72. Diagramas polares de todos los ángulos de giro analizados a 5 GHz.

4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

4.2.1 PRUEBA DE HIPOTESIS

Para el desarrollo del análisis estadístico de los datos obtenidos en este proyecto de investigación, se eligió realizar un estudio estadístico no paramétrico, esto debido a la cantidad de datos con los que se cuenta, de igual forma, por este motivo se decide trabajar con la mediana en todas las variables para llevar a cabo las pruebas de hipótesis.

4.2.1.1 Variable Directividad

4.2.1.1.1 Hipótesis Nula

$$H_0: \text{Med}_{2.4\text{GHz}} = \text{Med}_{5\text{GHz}}$$

Las medianas de la directividad para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz son significativamente iguales.

4.2.1.1.2 Hipótesis Alternativa

$$H_1: \text{Med}_{2.4\text{GHz}} \neq \text{Med}_{5\text{GHz}}$$

Las medianas de la directividad para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz no son significativamente iguales.

Tabla 13. Prueba U de Mann-Whitney para la variable directividad.

Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
La distribución de Directividad es la misma entre categorías de Frecuencia_De_Operación.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	0,063	Conserve la hipótesis nula.

En la Tabla 13 dado que se tiene $p\text{-valor} = 0,063 > 0,05$ se conserva la hipótesis nula, es decir, las medianas de la directividad para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz son significativamente iguales. Por lo que se interpreta que para ambos casos de frecuencia la antena RIS presenta la misma directividad.

4.2.1.2 Variable Ganancia.

4.2.1.2.1 Hipótesis Nula

$$H_0: \text{Med}_{2,4\text{GHz}} = \text{Med}_{5\text{GHz}}$$

Las medianas de la ganancia para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz son significativamente iguales.

4.2.1.2.2 Hipótesis Alternativa

$$H_1: \text{Med}_{2,4\text{GHz}} \neq \text{Med}_{5\text{GHz}}$$

Las medianas de la ganancia para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz no son significativamente iguales.

Tabla 14. Prueba U de Mann-Whitney para la variable ganancia.

Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
La distribución de Ganancia es la misma entre categorías de Frecuencia_De_Operación.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	0,008	Rechace la hipótesis nula.

Con la ayuda de la Tabla 14 donde se tiene un $p\text{-valor} = 0,008 < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula, es decir, las medianas de la ganancia para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz no son significativamente iguales. A través de la Tabla 18 se puede comprobar lo antes mencionado, pues se aprecia que la antena presenta una ganancia menor en 2,4 GHz en comparación con 5GHz.

4.2.1.3 Variable Parámetro S11

4.2.1.3.1 Hipótesis Nula

$$H_0: \text{Med}_{2.4\text{GHz}} = \text{Med}_{5\text{GHz}}$$

Las medianas del parámetro S11 para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz son significativamente iguales.

4.2.1.3.2 Hipótesis Alternativa

$$H_1: \text{Med}_{2.4\text{GHz}} \neq \text{Med}_{5\text{GHz}}$$

Las medianas del parámetro S11 para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz no son significativamente iguales.

Tabla 15. Prueba U de Mann-Whitney para la variable parámetro S11.

Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
La distribución del Parámetro_S11 es la misma entre categorías de Frecuencia_De_Operación.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	0,863	Conserve la hipótesis nula.

Para el caso del parámetro S11, se observa que en la Tabla 15 se tiene un p-valor = 0,863 > 0.05, por lo tanto, se conserva la hipótesis nula, las medianas del parámetro S11 para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz son significativamente iguales. Lo que refleja que para ambos casos la antena RIS sí presenta acoplamiento.

4.2.1.4 Variable Ancho de banda.

4.2.1.4.1 Hipótesis Nula

$$H_0: \text{Med}_{2.4\text{GHz}} = \text{Med}_{5\text{GHz}}$$

Las medianas del ancho de banda para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz son significativamente iguales.

4.2.1.4.2 Hipótesis Alternativa

$$H_1: \text{Med}_{2.4\text{GHz}} \neq \text{Med}_{5\text{GHz}}$$

Las medianas del ancho de banda para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz no son significativamente iguales.

Tabla 16. Prueba U de Mann-Whitney para la variable ancho de banda.

Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
La distribución de Ancho_De_Banda es la misma entre categorías de Frecuencia_De_Operación.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	,000	Rechace la hipótesis nula.

En la Tabla 16 dado que se tiene $p\text{-valor}=0 < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, las medianas del ancho de banda para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz no son significativamente iguales. A través de la Tabla.20 se puede apreciar que para la frecuencia de 5 GHz se tiene un mayor ancho de banda que para 2,4 GHz.

Tabla 17. Estudio descriptivo de la directividad para 2,4 y 5 GHz.

	Frecuencia_De_Operación	Estadístico	
Directividad	2,4GHz	Media	15,7678
		Mediana	16,1000
		Mínimo	13,50
		Máximo	16,72
	5GHz	Media	16,4778
		Mediana	16,8000
		Mínimo	14,40
		Máximo	17,40

En la Tabla 17 se observa que la mediana de la directividad para la frecuencia de 2,4 GHz es muy similar a la mediana de 5 GHz, lo cual sustenta lo concluido en la prueba de hipótesis. Sin embargo, también se puede apreciar que se tiene una directividad máxima de 17,40 dBi para 5 GHz, mientras que para 2,4 GHz se obtiene una directividad máxima de 16,72 dBi.

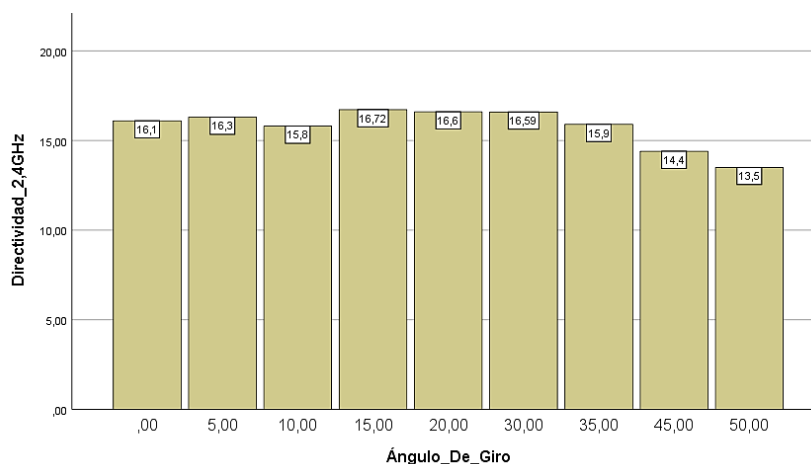


Figura 73. Valores de directividad según el ángulo de giro para la frecuencia de 2,4 GHz.

La Figura 73 muestra que la antena RIS presenta una mayor directividad entre 15° y 30° grados para la frecuencia de 2,4 GHz, además se observa que a partir de 35° grados el valor de directividad tiende a disminuir mucho más. Por otro lado, para la frecuencia de 5 GHz la Figura 74 indica valores de directividad más similares entre los diferentes ángulos, sin embargo, se mantiene la tendencia de la directividad en disminuir a partir de 35° grados.

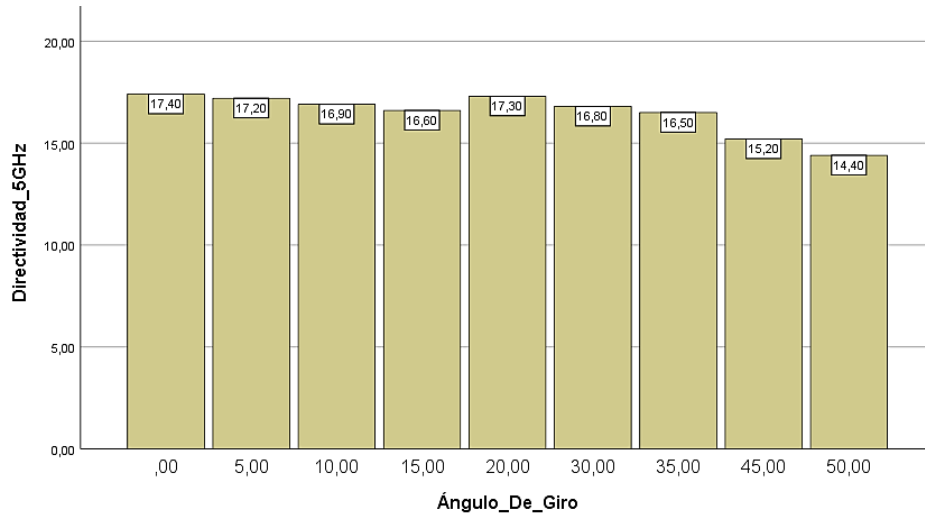


Figura 74. Valores de directividad según el ángulo de giro para la frecuencia de 5 GHz.

La Tabla 18 muestra la mediana de la ganancia para 2,4 GHz y 5 GHz, el parámetro de ganancia para la frecuencia de 5 GHz es mayor que para 2,4 GHz, obteniendo una ganancia máxima de 17,15 dBi para 5 GHz, mientras que para 2,4 GHz se obtiene 16,09 dBi.

Tabla 18. Estudio descriptivo de la ganancia para 2,4 y 5 GHz.

	Frecuencia_De_Operación		Estadístico
Ganancia	2,4GHz	Media	14,6944
		Mediana	15,0000
		Mínimo	12,10
		Máximo	16,09
	5GHz	Media	16,1944
		Mediana	16,5000
		Mínimo	14,10
		Máximo	17,15

La Figura 75 y Figura 76 indican que la antena RIS presenta un comportamiento similar en su parámetro de ganancia en comparación con su directividad, pues para ambas frecuencias la ganancia varía a través de los diferentes ángulos de giro, pero disminuye mucho más a partir de los 35° grados.

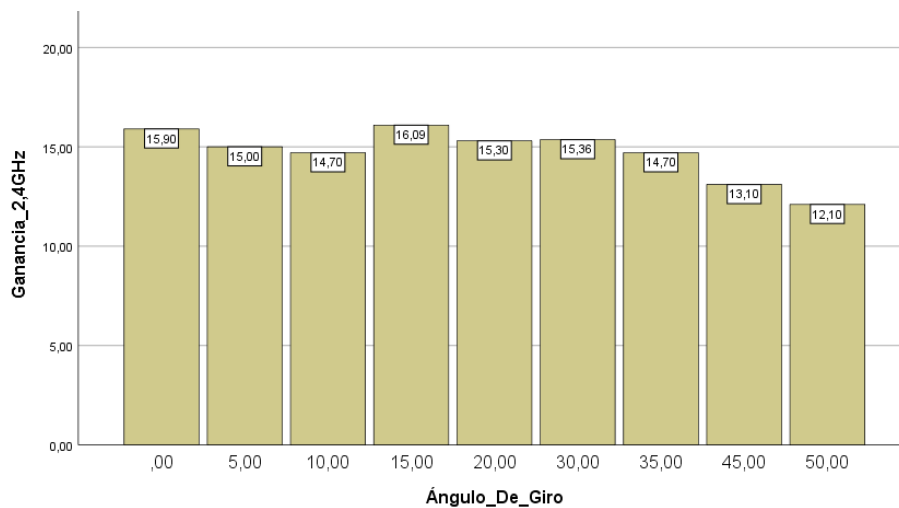


Figura 75. Valores de ganancia según el ángulo de giro para la frecuencia de 2,4 GHz.

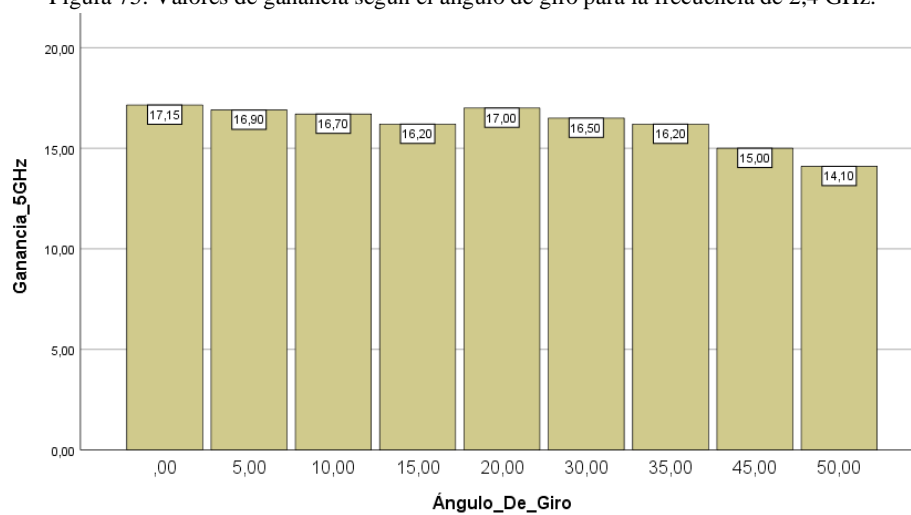


Figura 76. Valores de ganancia según el ángulo de giro para la frecuencia de 5 GHz.

Tabla 19. Estudio descriptivo del parámetro S11 para 2,4 y 5 GHz.

Parámetro_S11	Frecuencia_De_Operación		Estadístico
	Parámetro_S11	2,4GHz	Media
Mediana			-18,9900
Mínimo			-23,43
Máximo			-12,30
5GHz		Media	-18,4422
		Mediana	-19,5500
		Mínimo	-26,24
		Máximo	-11,87

Para el parámetro S11 que indica el acoplamiento en la antena RIS, la Tabla 19 muestra que la mediana de este parámetro para 2,4 GHz es menor que la mediana para 5 GHz, sin embargo, en ambos casos se tienen valores superiores a los -18.00 dB, lo cual indica que para ambas frecuencias la antena si presenta un acoplamiento bueno.

La Figura 77 muestra que la antena RIS presenta mayor acoplamiento con forme aumenta el ángulo de giro para la frecuencia de 2,4 GHz, es así que en 0° grados se tiene -12,30 dB, mientras que, para 50° grados se tiene -23,43 dB.

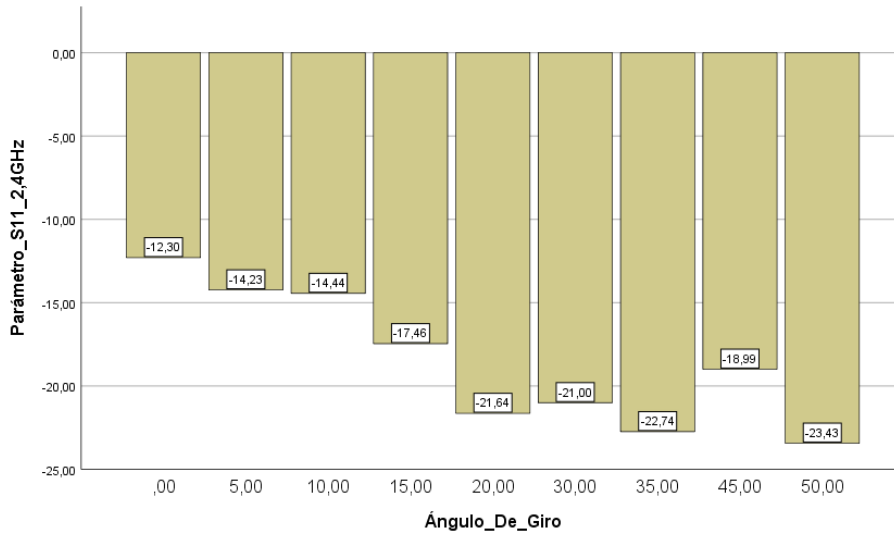


Figura 77. Parámetro S11 según el ángulo de giro para la frecuencia de 2,4 GHz.

La Figura 78 indica que para la frecuencia de 5GHz para ángulos menores a 20° grados existe menos acoplamiento que para ángulos superiores, donde el acoplamiento es mayor pero no creciente linealmente en todos los casos donde aumenta el ángulo.

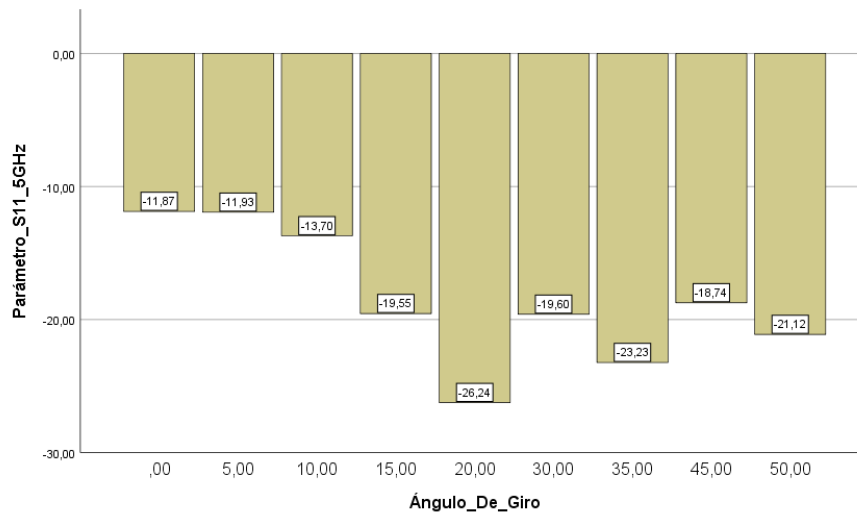


Figura 78. Parámetro S11 según el ángulo de giro para la frecuencia de 5 GHz.

La Tabla 20 muestra la mediana del ancho de banda para 2,4 GHz y 5 GHz, se observa que la antena RIS posee mayor ancho de banda para la frecuencia de 5 GHz, obteniendo un valor máximo del 20%, mientras que, para 2,4 GHz se tiene 16,66%.

Tabla 20. Estudio descriptivo del ancho de banda para 2,4 y 5 GHz.

	Frecuencia_De_Operación		Estadístico
Ancho_De_Banda	2,4GHz	Media	15,7344
		Mediana	16,6600

		Mínimo	8,33
		Máximo	16,66
	5GHz	Media	20,0000
		Mediana	20,0000
		Mínimo	20,00
		Máximo	20,00

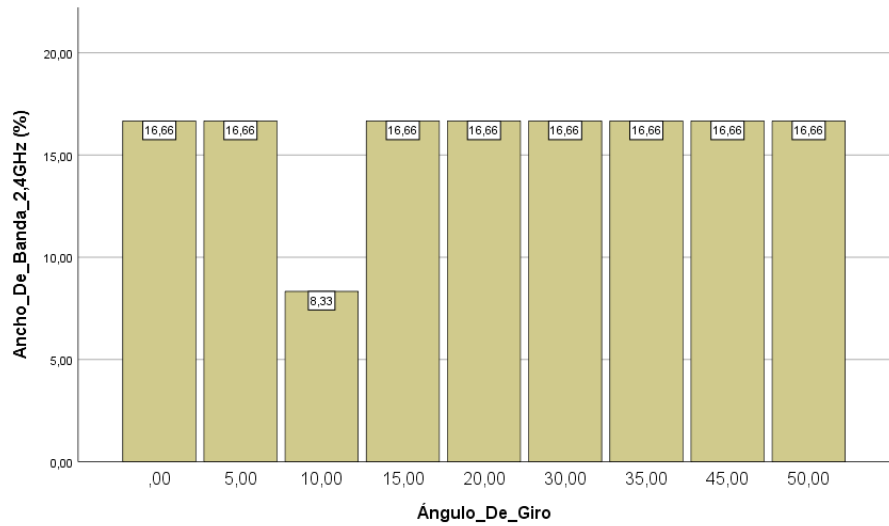


Figura 79. Ancho de banda según el ángulo de giro para la frecuencia de 2,4 GHz.

En La Figura 79 se puede apreciar que la antena RIS para la frecuencia de 2,4 GHz cuenta con un ancho de banda de 16,66 % en todos los casos para los ángulos de giro simulados, a excepción del ángulo de 10 grados donde el ancho de banda disminuye a 8,33 %. Por otro lado, el ancho de banda para la frecuencia de 5GHz es constante a través de los diferentes ángulos, obteniendo un ancho de banda del 20%, esto se puede apreciar en la Figura 80.

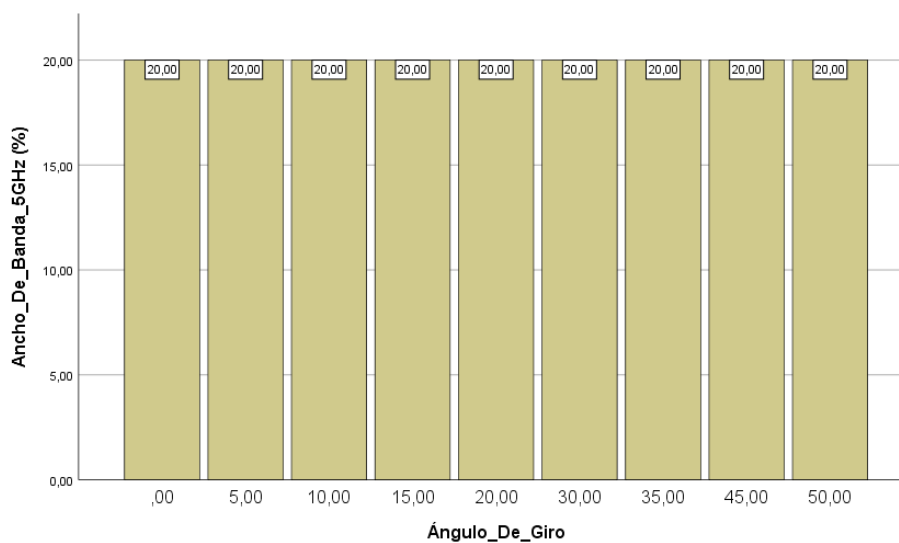


Figura 80. Ancho de banda según el ángulo de giro para la frecuencia de 5 GHz.

Finalmente, para observar la dispersión de los datos se obtienen los diagramas de cajas de los diferentes parámetros antes vistos para las frecuencias de 2,4 GHz y 5GHz. Para el parámetro de directividad a través de la Figura 81 se puede apreciar que, para 2,4 GHz aparecen dos valores extraños, correspondientes al dato número 8 y 9 del set de datos, los cuales son 14,40 y 13,50 dBi respectivamente, el resto de valores de directividad se encuentran entre aproximadamente el rango de 15,80 y 16,60 dBi. Para la directividad en el caso de 5 GHz se tiene valores extraños de 15,20 y 14,40 dBi, mientras que los demás valores se encuentran entre 16,50 y 17,40 dBi.

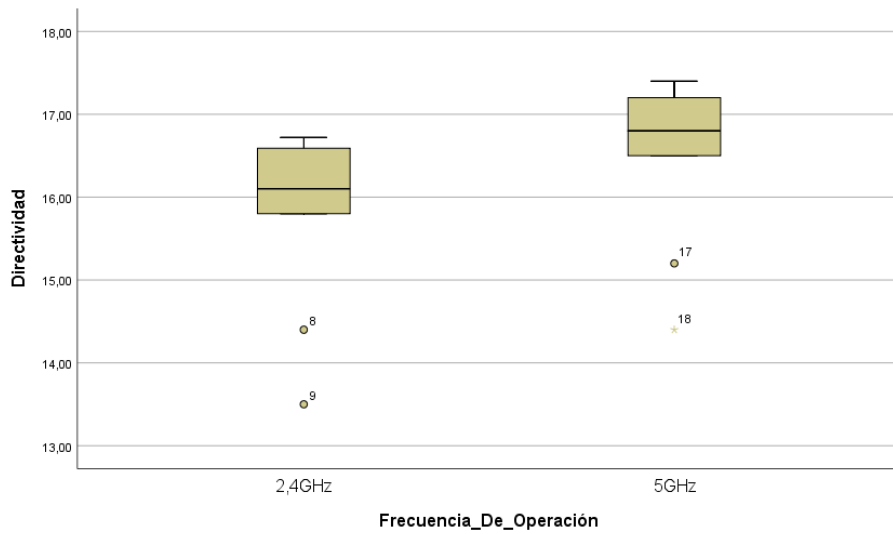


Figura 81. Diagrama de cajas de la directividad para las frecuencias de 2,4 y 5 GHz.

Para el caso de la ganancia en la frecuencia de 2,4 GHz se tiene que los datos están en el rango de 15,80 y 16,72 dBi aproximadamente, apareciendo valores de 14,40 y 13,50 dBi como valores extraños. Para la frecuencia de 5 GHz se tiene que los datos están entre 16,60 y 17,40 dBi, teniendo valores extraños de 15,20 y 14,40 dBi, lo antes mencionado se puede visualizar en la Figura 82.

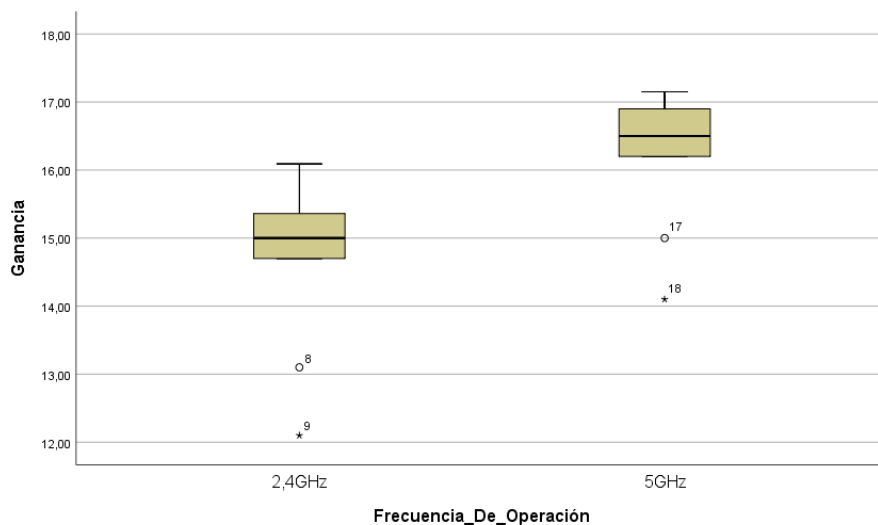


Figura 82. Diagrama de cajas de la ganancia para las frecuencias de 2,4 y 5 GHz.

Para el parámetro S_{11} en la Figura 83 no se tienen valores extraños, ya que todos los valores para la frecuencia de 2,4 GHz están mayormente concentrados entre -12,30 y 23,43 dB. Mientras que, para el caso de 5 GHz, los valores están entre -11,87 y -26,24 dB.

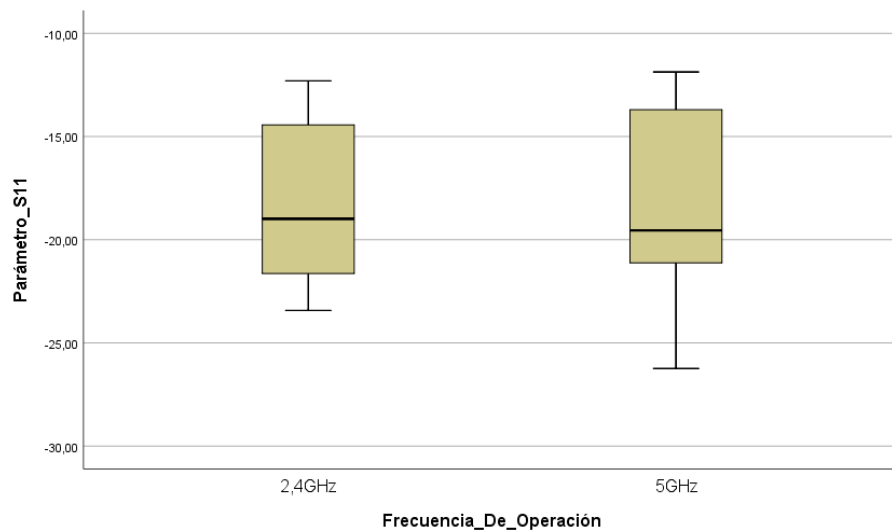


Figura 83. Diagrama de cajas del parámetro S_{11} para las frecuencias de 2,4 y 5 GHz.

CAPÍTULO V.

5.1 CONCLUSIONES

En el presente proyecto de investigación se ha realizado el respectivo estudio y análisis de una antena con tecnología RIS para las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz, las cuales trabajan en condiciones óptimas en sus respectivas bandas de frecuencias. El comportamiento de la antena RIS se experimentó girando la estructura de forma lateral a diferentes ángulos de giro desde 0° a 50°, este análisis se lo realizó en ambas frecuencias de donde se obtuvieron valores de acoplamiento muy favorables tanto para 2.4 GHz como para 5 GHz. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- El parámetro de la ganancia para la antena RIS de 2.4 GHz llegó a alcanzar un valor máximo de 16.09 dBi a un ángulo de giro de 15°, este resultado es factible para una RIS de este tamaño ya que se considera que con una matriz con mayor número de celdas unitarias se obtendría un mejor resultado. Por otro lado, para la frecuencia de 5GHz se llegó a obtener un valor máximo de 17.15 dBi en un ángulo de 0°. Analizando el comportamiento de la antena en este parámetro se puede deducir que la antena RIS en cuanto a ganancia muestra un mejor comportamiento a la frecuencia de 5 GHz.
- En cuanto al parámetro de directividad para la frecuencia de 2.4 GHz se obtuvo un valor máximo de 16.72 dBi para un ángulo de giro de 15 grados, mientras que para la frecuencia de 5 GHz se obtuvo un valor de 17.4 dBi para un ángulo de 0 grados. En este parámetro la frecuencia de 5 GHz muestra un mejor desempeño.
- Para el estudio del parámetro S_{11} en la frecuencia de 2.4 GHz se obtuvieron valores de acoplamiento ($S_{11} < -12$ dB) en el rango de estudio de 2.2 a 2.6 GHz. Por otro lado, para la frecuencia de 5 GHz los valores de adaptación dentro del rango de frecuencias estudiados fueron ($S_{11} < -11$ dB). Es decir que los resultados fueron muy favorables para ambos casos teniendo valores de adaptación menores a los -11 dB. En el estudio de este parámetro se demuestra que ambas antenas cumplen con un comportamiento de adaptación favorable llegando a tener un desempeño similar en ambas frecuencias.
- En el estudio del parámetro de ancho de banda que se obtuvo un 16.66% para 2.4 GHz y 20% para 5 GHz, este ancho de banda dependió mucho del rango de frecuencias que fue estudiado para cada antena.

5.2 RECOMENDACIONES

- En este proyecto para futuras investigaciones se ha llegado a considerar que para que haya un incremento tanto de ganancia como de directividad se realice el estudio bajo el mismo diseño propuesto en esta investigación con un número de elementos de celdas unitarias mayor, idealmente que se parta de un arreglo de 16 x16, ya que se prevé que bajo estas condiciones los valores de ganancia y directividad mostrarían un incremento y mejor comportamiento. También se recomienda analizar los datos obtenidos con el software de simulación FEKO.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. M. Arboleda, M. Bastidas, J. F. Gomez, and L. M. Ramirez, “COMUNICACIONES INALAMBRICAS,” *ICESI*, vol. 52, Apr. 2010.
- [2] I. Bernal, “Comunicaciones Inalámbricas,” *ResearchGate*, May 2007.
- [3] R. A. Tasci, F. Kilinc, E. Basar, and G. C. Alexandropoulos, “A New RIS Architecture With a Single Power Amplifier: Energy Efficiency and Error Performance Analysis,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 44804–44815, Apr. 2022.
- [4] D. Pérez, O. Fresnedo, J. P. González, and L. Castedo, “Intelligent reflective surfaces for wireless networks: An overview of applications, approached issues, and open problems,” *Electronics (Basel)*, vol. 10, no. 19, Oct. 2021.
- [5] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753–116773, Oct. 2019.
- [6] E. Puppo and P. Marzano, “Line-of-sight communication on terrain models”.
- [7] Z. Yang and Y. Zhang, “Optimal SWIPT in RIS-Aided MIMO Networks,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 112552–112560, Jul. 2021.
- [8] CST AG, “CST STUDIO SUITE® 2016,” 2016.
- [9] Q. Wu and R. Zhang, “Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 106–112, Jan. 2020.
- [10] ITU, “Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones,” Aug. 2015. [Online]. Available: <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>
- [11] X. Yu, Y. Xu, and R. Schober, “Enabling Secure Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces,” in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Waikoloa, HI, USA: IEEE, Sep. 2019, pp. 1–6.
- [12] I. Yildirim, A. Uyrus, and E. Basar, “Modeling and Analysis of Reconfigurable Intelligent Surfaces for Indoor and Outdoor Applications in Future Wireless Networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 2, pp. 1290–1301, Feb. 2021.
- [13] R. Alghamdi *et al.*, “Intelligent Surfaces for 6G Wireless Networks: A Survey of Optimization and Performance Analysis Techniques,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 202795–202818, 2020.
- [14] J. A. Encinar and E. Martinez de Rioja, “ANÁLISIS Y DISEÑO DE SUPERFICIES REFLECTORAS INTELIGENTES (RIS) PARA MEJORAR LA COBERTURA EN REDES 5G DE ONDAS MILIMÉTRICAS,” <https://ssr.upm.es/2022/07/11/analisis-diseno-superfices-reflectoras-inteligentes-mejora-cobertura5g/>.
- [15] Y. Su and Z. N. Chen, “Isolation improvement and beam manipulation of dual-polarized RIS-halved lens antennas for compact transceiver systems,” *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 67, no. 9, pp. 5877–5884, Sep. 2019.

- [16] G. M. Moreno, S. Perez-Walton, and F. López, “Metasuperficies en el diseño de antenas: una introducción,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 32, no. 2, pp. 145–170, Dec. 2022.
- [17] Ö. Özdoğan, E. Björnson, and E. G. Larsson, “USING INTELLIGENT REFLECTING SURFACES FOR RANK IMPROVEMENT IN MIMO COMMUNICATIONS,” in *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Barcelona, Spain: IEEE, May 2020, pp. 9160–9164.
- [18] N. Yu *et al.*, “Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction Downloaded from,” *Science (1979)*, vol. 334, pp. 333–337, Oct. 2011.
- [19] S. Shen, B. Clerckx, and R. Murch, “Modeling and Architecture Design of Reconfigurable Intelligent Surfaces Using Scattering Parameter Network Analysis,” *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 21, no. 2, pp. 1229–1243, Feb. 2022.
- [20] Z. Zhang *et al.*, “Active RIS vs. Passive RIS: Which Will Prevail in 6G?,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 3, pp. 1707–1725, Mar. 2023.
- [21] G. C. Trichopoulos *et al.*, “Design and Evaluation of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Real-World Environment,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 462–474, 2022.
- [22] F. Ch. Okogbaa *et al.*, “Design and Application of Intelligent Reflecting Surface (IRS) for Beyond 5G Wireless Networks: A Review,” *Sensors*, vol. 22, no. 7. MDPI, Apr. 01, 2022.
- [23] X. Wei, D. Shen, and L. Dai, “Channel Estimation for RIS Assisted Wireless Communications - Part I: Fundamentals, Solutions, and Future Opportunities,” *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 5, pp. 1398–1402, May 2021.
- [24] J. Ayala Romero, A. García, L. Roda Sánchez, and J. San Martin Gomez, “SORUS Validación y optimización conjunta de RIS y vRANs Versión 01 Versión 02,” Madrid, May 2023.
- [25] T. Hou, Y. Liu, Z. Song, X. Sun, and Y. Chen, “MIMO-NOMA Networks Relying on Reconfigurable Intelligent Surface: A Signal Cancellation-Based Design,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 11, pp. 6932–6944, Nov. 2020.
- [26] A. I. Hinojosa, C. Leon Vega, and G. Leija Hernández, “Análisis Numérico de Pérdidas de Inserción de Conmutadores Diseñados con Diodos p-i-n,” 2009.
- [27] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Jhon Wiley and Sons, 2012.
- [28] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*. Piscataway, New Jersey, 2016. [Online]. Available: www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa
- [29] J. M. Huidobro, “Antenas de telecomunicaciones,” *ACTA*, 2013.
- [30] J. R. R. J. M. R. C. L. J. R. S. B. B. M. F. B. A. Cardama Aznar, *Antennas*, 2nd ed. Catalunya: Universitat Politecnica de Catalunya, 2004.
- [31] D. J. Granda Jaramillo and G. L. Quishpe Rea, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP PARA RECEPCIÓN EN LA BANDA X COMPARABLE A LA GANANCIA DE UNA

- ANTENA PARABÓLICA,” *Electrica y Electronica*, Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2013.
- [32] J. A. García Muñoz, “DISEÑO DE ANTENA DE PARCHE MONOPULSO A 2.45 GHZ,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA, Cartagena, 2018.
- [33] L. Dai *et al.*, “Reconfigurable Intelligent Surface-Based Wireless Communications: Antenna Design, Prototyping, and Experimental Results,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45913–45923, 2020.
- [34] SKYWORKS, “SMP1340 Series: Fast Switching-Speed, Low-Capacitance, Plastic-Packaged PIN Diodes,” Sep. 2019. [Online]. Available: www.skyworksinc.com

ANEXOS

Diseño de una antena horn Piramidal para 2.4 GHz.

Para realizar el diseño de una antena tipo horn piramidal primero se debe diseñar una guía de onda que trabaje a la frecuencia de 2.4 GHz. La guía de onda es rectangular y se escogió la banda R de frecuencias debido a que la frecuencia de interés está dentro del rango de frecuencias que comprende esta banda, que va de 1.70 GHz a 2.60 GHz. Para este proceso se hace uso de las ecuaciones 1, 2 y 3. El modo de propagación en la guía de onda será el modo transversal eléctrico TE₁₀. La frecuencia de corte es 1.38 GHz.

$$f_c = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$1.38 \times 10^9 = \frac{3 \times 10^8}{2\pi\sqrt{(1)(1)}} \sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{0\pi}{b}\right)^2}$$

$$1.38 \times 10^9 = \frac{3 \times 10^8}{2\pi\sqrt{1}} \sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2}$$

$$1.38 \times 10^9 = 47.74 \times 10^6 \sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2}$$

$$\frac{1.38 \times 10^9}{47.74 \times 10^6} = \sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2}$$

$$\left(\frac{1.38 \times 10^9}{47.74 \times 10^6}\right)^2 = \left(\sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2}\right)^2$$

$$835.59 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2$$

$$835.59 = \frac{\pi^2}{a^2}$$

$$a = \sqrt{\frac{\pi^2}{835.59}} = 0.1089 \text{ m} \approx 108.6 \text{ mm}$$

$$a \geq 2b$$

$$b = \frac{a}{2}$$

$$b = 0.5434 \text{ m} \approx 54.34 \text{ mm}$$

Una vez encontrada las dimensiones de la guía de onda rectangular se procede a encontrar la longitud de onda de la guía a través de la siguiente ecuación.

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{B_{10}}$$

Ahora para encontrar la longitud de onda de una guía de onda se calculará primero su constante de fase mediante la siguiente formula:

$$B_{10} = \sqrt{K^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}$$

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon} \approx k = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon}$$

$$k = \frac{2\pi(2.4 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \sqrt{1} = 50.26 \text{ rad/m}$$

$$B_{10} = \sqrt{\frac{(50.26)^2 \text{ rad}}{m} - \left(\frac{\pi}{0.1086 \text{ m}}\right)^2}$$

$$B_{10} = 41.10$$

Una vez encontrada la constante de fase se procederá a calcular la longitud de onda de una guía de onda.

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{41.10} = 0.1528 \text{ m} \approx 15.28 \text{ cm}$$

A continuación, se puede calcular la longitud total de la guía de onda con la siguiente ecuación:

$$L = 0.75\lambda_g$$

$$L = 0.75(15.28) = 11.46 \text{ cm} \approx 114.6 \text{ mm}$$

Una vez encontrada las dimensiones de la guía de onda rectangular a utilizar se realizará el respectivo diseño de la antena horn tipo piramidal para la frecuencia de 2.4 GHz, la cual tendrá el comportamiento de un alimentador para una antena con tecnología RIS.

- $G = 15 \text{ dB} \approx 31.62$
- $a = 10.86 \text{ cm}$
- $b = 5.43 \text{ cm}$

Primero se procederá a encontrar los valores de le y lh mediante las siguientes ecuaciones:

$$le = x * \lambda$$

$$\frac{lh}{\lambda} = \frac{G^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{x}\right)$$

Para poder llegar a un resultado con las ecuaciones anteriores primero se deberá encontrar el valor de x resolviendo la igualdad que se muestra en la siguiente expresión la cual mediante una técnica iterativa.

$$\left(\sqrt{2x} - \frac{b}{\lambda}\right)^2 (2x - 1) = \left(\frac{G}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x}}} - \frac{a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{G^2}{8\pi^3} \frac{1}{x} - 1\right)$$

El valor de x se lo encuentra utilizando el código “Calculo.py” haciendo uso de la herramienta python, en donde se implementó la ecuación que satisface la igualdad y los valores de ancho y largo de la guía de onda a utilizar, también la ganancia a la que se requiere para la antena horn tipo piramidal. Obteniendo como resultado un valor de $x = 1.8185$.

$$le = x * \lambda$$

$$le = 1.8185 * 12.5 = 22.73 \text{ cm}$$

$$\frac{lh}{\lambda} = \frac{G^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{x}\right)$$

$$lh = \frac{31.62^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{1.8185}\right) * 12.5 = 27.60 \text{ cm}$$

Con los valores de le y lh se podrá encontrar los valores de apertura de A para el plano H y B para el plano E.

$$A = \sqrt{3\lambda lh}$$

$$A = \sqrt{3(12.5)(27.60)} = 32.17 \text{ cm}$$

$$B = \sqrt{2\lambda le}$$

$$B = \sqrt{2(12.5)(22.73)} = 23.83 \text{ cm}$$

Una vez encontrado los valores de A y B se procede a calcular le_2 y lh_2 . Cabe recalcar que para que la antena horn tipo piramidal sea físicamente realizable estos dos valores deben ser iguales.

$$le_2 = (B - b) \left(\left(\frac{le}{B}\right)^2 * \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$le_2 = (23.83 - 5.43) \left(\left(\frac{22.73}{23.83} \right)^2 * \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} = 14.9 \text{ cm}$$

$$lh_2 = (A - a) \left(\left(\frac{lh}{A} \right)^2 * \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$lh_2 = (32.17 - 10.86) \left(\left(\frac{27.60}{32.17} \right)^2 * \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} = 14.9 \text{ cm}$$

Dado que los resultados obtenidos de le_2 y lh_2 son iguales se puede deducir que los parámetros de diseño seleccionados para la antena tipo horn piramidal son correctos. Para el cálculo de los ángulos de apertura de la bocina para el plano E y el plano H se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\Psi_e = \text{tang}^{-1} \left(\frac{\frac{B}{2}}{le} \right)$$

$$\Psi_e = \text{tang}^{-1} \left(\frac{\frac{23.83}{2}}{22.73} \right) = 27.66^\circ$$

$$\Psi_h = \text{tang}^{-1} \left(\frac{\frac{A}{2}}{lh} \right)$$

$$\Psi_h = \text{tang}^{-1} \left(\frac{\frac{32.17}{2}}{27.60} \right) = 30.23^\circ$$

El valor de la variable x que permite resolver el proceso de cálculo para encontrar las dimensiones de la apertura de la antena horn piramidal se resuelve mediante el siguiente código utilizando la herramienta Python.

```
import math

G=10**(15/10)
a= 10.86
b= 5.43
l= (3*(10**8))/(2.4*(10**9))*100
pi= math.pi
x= 0.0001
```

$$q = (((\text{math.sqrt}(2*x) - b/l)**2)*(2*x - 1))*1000$$

$$w = (((((G/(2*pi))*(\text{math.sqrt}(3/(2*pi))))*(1/\text{math.sqrt}(x)))) \\ (a/l)**2)*(((G**2)/(6*pi*pi*pi*x))-1))*1000$$

```
while int(q)!=int(w):
    x=x+0.0001
    q=(((math.sqrt(2*x) - b/l)**2)*(2*x - 1))*1000
    w=((((G/(2*pi))*(\text{math.sqrt}(3/(2*pi))))*(1/\text{math.sqrt}(x)))-
(a/l)**2)*(((G**2)/(6*pi*pi*pi*x))-1))*1000
    #print(x)
print(x)
```

Diseño de una antena horn Piramidal para 5 GHz.

Se realiza el mismo proceso de diseño para calcular las dimensiones de una antena horn tipo piramidal para la frecuencia de 5 GHz. La guía de onda a utilizar para este diseño es WR-187 perteneciente a la banda G de frecuencias de guía de onda, teniendo como frecuencia de corte 3.156 GHz y el rango de frecuencias de esta guía de onda va desde 3.95 GHz a 5.85 GHz. El modo de propagación en la guía de onda será el modo transversal eléctrico TE₁₀.

Aplicando las mismas ecuaciones utilizadas para el proceso anterior se tienen los siguientes valores de las dimensiones.

$$fc = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

$$3.156 \times 10^9 = \frac{3 \times 10^8}{2\pi\sqrt{(1)(1)}} \sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{0\pi}{b}\right)^2}$$

$$3.156 \times 10^9 = \frac{3 \times 10^8}{2\pi\sqrt{1}} \sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2}$$

$$3.156 \times 10^9 = 47.74 \times 10^6 \sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2}$$

$$\frac{3.156 \times 10^9}{47.74 \times 10^6} = \sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2}$$

$$\left(\frac{3.156 \times 10^9}{47.74 \times 10^6}\right)^2 = \left(\sqrt{\left(\frac{1\pi}{a}\right)^2}\right)^2$$

$$4370.27 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2$$

$$4370.27 = \frac{\pi^2}{a^2}$$

$$a = \sqrt{\frac{\pi^2}{4370.27}} = 0.0475 \text{ m} \approx 47.5 \text{ mm}$$

$$a \geq 2b$$

$$b = \frac{a}{2}$$

$$b = 0.02375 \text{ m} \approx 23.75 \text{ mm}$$

Una vez encontrada las dimensiones de la guía de onda rectangular se procede a encontrar la longitud de onda de la guía a través de la siguiente ecuación.

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{B_{10}}$$

Ahora para encontrar la longitud de onda de una guía de onda se calculará primero su constante de fase mediante la siguiente formula:

$$B_{10} = \sqrt{K^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}$$

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon} \approx k = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon}$$

$$k = \frac{2\pi(5 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \sqrt{1} = 104.71 \text{ rad/m}$$

$$B_{10} = \sqrt{\frac{(104.71)^2 \text{ rad}}{\text{m}} - \left(\frac{\pi}{0.0475 \text{ m}}\right)^2}$$

$$B_{10} = 81.17$$

Una vez encontrada la constante de fase se procederá a calcular la longitud de onda de una guía de onda.

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{81.17} = 0.0774 \text{ m} \approx 7.74 \text{ cm}$$

A continuación, se puede calcular la longitud total de la guía de onda con la siguiente ecuación:

$$L = 0.75\lambda_g$$

$$L = 0.75(7.74) = 5.805 \text{ cm} \approx 58.05 \text{ mm}$$

Una vez encontrada las dimensiones de la guía de onda rectangular a utilizar se realizará el respectivo diseño de la antena horn tipo piramidal para la frecuencia de 5 GHz, la cual tendrá el comportamiento de un alimentador para una antena con tecnología RIS.

- $G = 15 \text{ dB} \approx 31.62$
- $a = 4.75 \text{ cm}$
- $b = 2.375 \text{ cm}$

Primero se procederá a encontrar los valores de le y lh mediante las siguientes ecuaciones:

$$le = x * \lambda$$

$$\frac{lh}{\lambda} = \frac{G^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{x}\right)$$

Para poder llegar a un resultado con las ecuaciones anteriores primero se deberá encontrar el valor de x resolviendo la igualdad que se muestra en la siguiente expresión la cual mediante una técnica iterativa.

$$\left(\sqrt{2x} - \frac{b}{\lambda}\right)^2 (2x - 1) = \left(\frac{G}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x}}} - \frac{a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{G^2}{8\pi^3} \frac{1}{x} - 1\right)$$

El valor de x se lo encuentra utilizando el código “Calculo.py” haciendo uso de la herramienta python, en donde se implementó la ecuación que satisface la igualdad y los valores de ancho y largo de la guía de onda a utilizar, también la ganancia a la que se requiere para la antena horn tipo piramidal. Obteniendo como resultado un valor de $x = 1.8304$.

$$le = x * \lambda$$

$$le = 1.8304 * 6 = 10.98 \text{ cm}$$

$$\frac{lh}{\lambda} = \frac{G^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{x}\right)$$

$$lh = \frac{31.62^2}{8\pi^3} \left(\frac{1}{1.8304}\right) * 6 = 13.21 \text{ cm}$$

Con los valores de le y lh se podrá encontrar los valores de apertura de A para el plano H y B para el plano E.

$$A = \sqrt{3\lambda lh}$$

$$A = \sqrt{3(6)(13.21)} = 15.42 \text{ cm}$$

$$B = \sqrt{2\lambda le}$$

$$B = \sqrt{2(6)(10.98)} = 11.47 \text{ cm}$$

Una vez encontrado los valores de A y B se procede a calcular le_2 y lh_2 . Cabe recalcar que para que la antena horn tipo piramidal sea físicamente realizable estos dos valores deben ser iguales.

$$le_2 = (B - b) \left(\left(\frac{le}{B} \right)^2 * \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$le_2 = (11.47 - 2.375) \left(\left(\frac{10.98}{11.47} \right)^2 * \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} = 7.42 \text{ cm}$$

$$lh_2 = (A - a) \left(\left(\frac{lh}{A} \right)^2 * \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$lh_2 = (15.42 - 4.75) \left(\left(\frac{13.21}{15.42} \right)^2 * \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} = 7.42 \text{ cm}$$

Dado que los resultados obtenidos de le_2 y lh_2 son iguales se puede deducir que los parámetros de diseño seleccionados para la antena tipo horn piramidal son correctos. Para el cálculo de los ángulos de apertura de la bocina para el plano E y el plano H se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\Psi_e = \text{tang}^{-1} \left(\frac{\frac{B}{2}}{le} \right)$$

$$\Psi_e = \text{tang}^{-1} \left(\frac{\frac{11.47}{2}}{10.98} \right) = 27.57^\circ$$

$$\Psi_h = \text{tang}^{-1} \left(\frac{\frac{A}{2}}{lh} \right)$$

$$\Psi_h = \text{tang}^{-1} \left(\frac{\frac{15.42}{2}}{13.21} \right) = 30.26^\circ$$

El valor de x para la frecuencia de 5 GHz, teniendo en cuenta las dimensiones de la guía de onda y el valor de la ganancia deseada, se lo obtuvo mediante el código llamada "Calculo.py" utilizando la herramienta de Python para ejecutar el código mencionado.

Las dimensiones para el diseño de una antena tipo horn piramidal se presenta en la tabla 21:

Tabla 21. Dimensiones de la antena tipo horn piramidal para 5 GHz.

Ancho de la guía de onda (a)	47.5 mm
Alto de la guía de onda (b)	23.75 mm
Longitud total de la guía de onda (L)	58.05 mm
Valor de le	109.8 mm
Valor de lh	132.1 mm
Apertura en el plano E (B)	114.7 mm
Apertura en el plano H (A)	154.2 mm
Valor de le_2 y lh_2	70 mm

Para corroborar el funcionamiento de la antena se procedió a implementar las dimensiones en el software de simulación CST Studio del cual se obtuvo no solo el parámetro de coeficiente de reflexión (S11) sino también valores como la ganancia y la directividad. En la figura 84 se puede observar el correcto funcionamiento de la antena horn piramidal obteniendo un acoplamiento de -19.78 dB a 5 GHz.

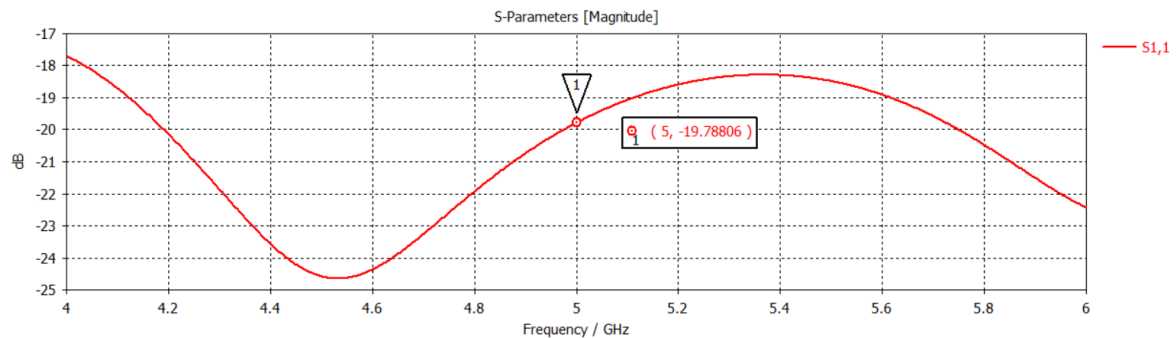


Figura 84. Parametro S11 de la antena horn piramidal a 5 GHz.

En Figura 85 se puede observar el diagrama de radiación en 3D de la antena horn propuesta. El diagrama de radiación muestra un comportamiento directivo de la antena logrando obtener 14.9 dBi de directividad y 14.8 dBi de ganancia.

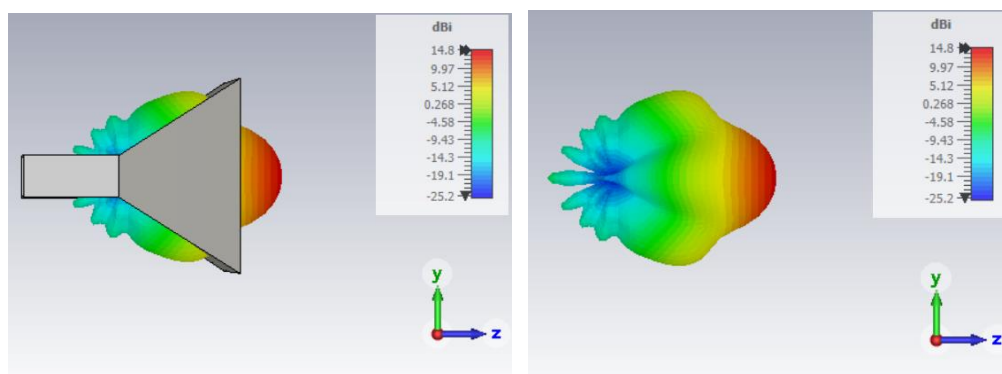


Figura 85. Diagrama de radiacion en 3D de una antena horn piramidal a 5 GHz.

En la Figura 86 se puede apreciar el diagrama polar de la antena horn piramidal en el plano H perteneciente a $\Phi=0$, en donde se puede observar un ancho de haz resultante de 32 grados, un nivel de lóbulo lateral de -22.6 dB y una dirección del lóbulo principal de 0° .

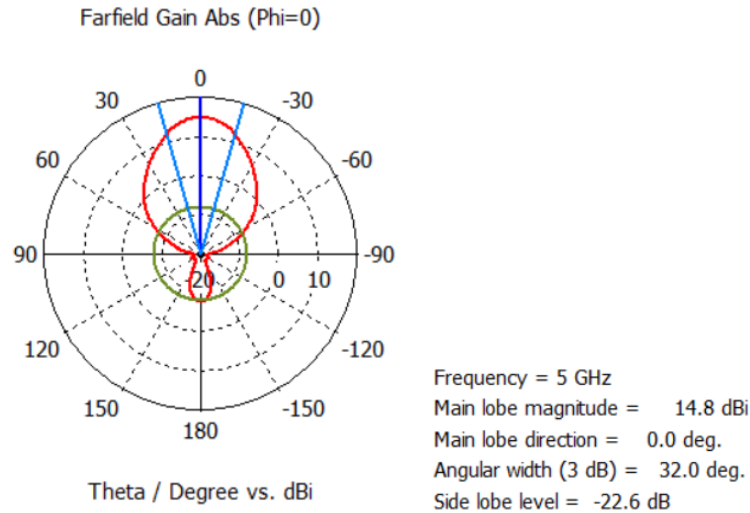


Figura 86. Diagrama polar de la antena horn piramidal en el plano H perteneciente a $\Phi=0$

En la siguiente Figura 87 se puede apreciar el diagrama polar de la antena horn piramidal en el plano E perteneciente a $\Phi=90$, en donde se puede observar un ancho de haz resultante de 28.8 grados, un nivel de lóbulo lateral de -10.5 dB y una dirección del lóbulo principal de 0° .

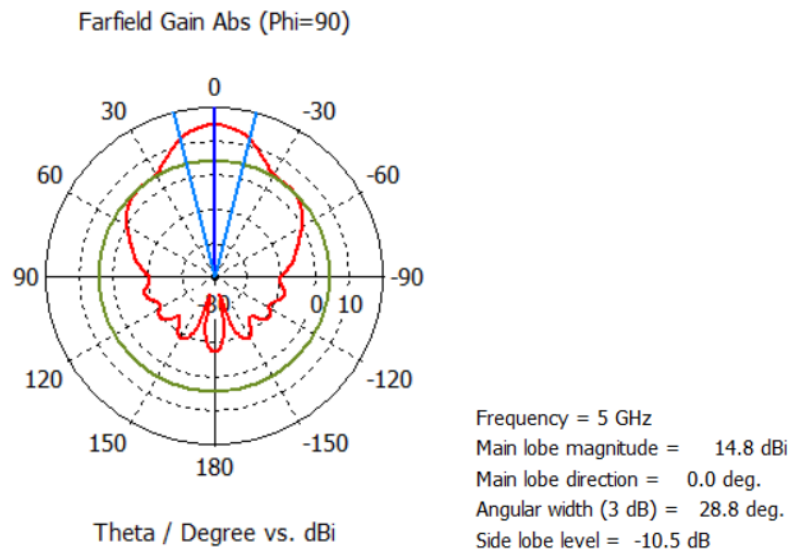


Figura 87. Diagrama polar de la antena horn piramidal en el plano E perteneciente a $\Phi=90$