



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**IMPLEMENTACIÓN DE UNALENTE DE ALTA GANANCIA BASADA
EN ESTRUCTURAS METÁLICAS ILUMINADAS POR UNA GUÍA DE
ONDA CIRCULAR**

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

Autor:

Orozco Castillo Juan Pablo

Tutor:

Daniel Antonio Santillán Haro

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Orozco Castillo Juan Pablo**, con cédula de ciudadanía **060454773-7**, autor del trabajo de investigación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UNA LENTE DE ALTA GANANCIA BASADA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS ILUMINADAS POR UNA GUIA DE ONDA CIRCULAR**, 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 de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 11 de abril de 2024.



Juan Pablo Orozco Castillo

C.I: 060454773-7

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Daniel Antonio Santillán Haro** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UNA LENTE DE ALTA GANANCIA BASADA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS ILUMINADAS POR UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR**, bajo la autoría de **Juan Pablo Orozco Castillo**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 11 días del mes de abril de 2024



PhD. Daniel Santillán

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Implementación de una lente de alta ganancia basada en estructuras metálicas, iluminadas por una guía de onda circular**, presentado por **Juan Pablo Orozco Castillo**, con cédula de identidad número 060454773-7, bajo la tutoría de PhD. Daniel Santillán.; 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 el 15 de mayo de 2024.


PhD. Carlos Peñafiel
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

Handwritten signature of PhD. Carlos Peñafiel in blue ink, written over a horizontal line.

Mgs. José Jinez
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Handwritten signature of Mgs. José Jinez in blue ink, written over a horizontal line.

PhD. Antonio Meneses
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Handwritten signature of PhD. Antonio Meneses in blue ink, written over a horizontal line.



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **OROZCO CASTILLO JUAN PABLO** con CC: **0604547737**, estudiante de la Carrera **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de INGENIERIA; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **IMPLEMENTACIÓN DE UNA LENTE DE ALTA GANANCIA BASADA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS ILUMINADAS POR UNA GUÍA DE ONDA CIRCULAR**", cumple con el 5%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 25 de Abril de 2024



DANIEL ANTONIO
SANTILLAN HARO

PhD. Daniel Santillán
TUTOR

DEDICATORIA

A Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de mi vida,

A mis queridos padres, cuyo amor, sacrificio, paciencia y apoyo han sido el sostén en mis estudios, al inculcarme la mejor educación y valores. A mis hermanos que han sido testigos de mi crecimiento académico y que con su apoyo han sido el impulso para continuar. A mi hermano Ángel, que espero que este trabajo le dé inspiración para convertirse en un gran profesional, y a toda mi familia y amigos que han estado pendiente de mí.

También le dedico este trabajo a mi novia Génesis, quien ha sido mi apoyo incondicional en toda la carrera, su paciencia que ha tenido conmigo su humildad su generosidad conmigo sus consejos, amor y aliento me han motivado a seguir adelante, así como a sus padres, quienes me han brindado su confianza, respaldo y cariño.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme cumplir uno de mis sueños, por estar conmigo y ser un alivio en momentos difíciles.

Agradezco de todo corazón a mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han brindado. Su sacrificio se ha reflejado en mí, y deseo darles la felicidad que se merecen. A mis hermanos, quienes depositaron su confianza en mí y me han acompañado en este proceso, les estoy profundamente agradecido.

A mi tutor, quien me ha instruido con sus enseñanzas y me ha guiado para desarrollar mis habilidades y aumentar mis conocimientos, le expreso mi más sincero agradecimiento.

También quiero expresar mi gratitud a la Universidad, por brindarme una preparación académica de calidad, así como a mis docentes, cuyo compromiso y dedicación fueron fundamentales en mi formación.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos y compañeros, quienes han dejado un bonito recuerdo en mi corazón. Su apoyo y compañía han sido invaluable durante este viaje académico.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DE TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICACIÓN URKUND

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 15

CAPÍTULO I 17

- 1.1. Planteamiento del Problema 17
- 1.2. Justificación 18
- 1.3. Objetivos 19
 - 1.3.1. General 19
 - 1.3.2. Específicos 19

CAPÍTULO II 20

- 2.1. Estado del Arte 20
- 2.2. Fundamentación Teórica 21
 - 2.2.1. Principio de Funcionamiento de una Lente 21
 - 2.2.2. Lentes Metálicas 23
 - 2.2.3. Parámetros de las antenas lente 23
 - 2.2.3.1. Directividad 23
 - 2.2.3.2. Ganancia 24
 - 2.2.3.3. Eficiencia de una lente metálica 25
 - 2.2.4. Alimentadores para lentes 26
 - 2.2.4.1. Guía de Onda Rectangular 27

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| 2.2.4.2. | Guía de Onda Circular | 27 |
| 2.2.4.3. | Excitación de guía de onda por medio de sonda coaxial | 29 |
| 2.2.4.4. | Parámetros de antena guía de onda circular | 30 |
| 2.2.5. | Teoría de modos característicos TMC | 31 |
| 2.2.5.1. | Ángulo Característico | 32 |
| 2.2.5.2. | Significancia Modal | 32 |
| 2.2.6. | Bandas de frecuencia 2.4GHz y 5GHz | 33 |
| CAPÍTULO III | | 35 |
| 3.1. | Metodología | 35 |
| 3.1.1. | Tipo de Investigación | 35 |
| 3.1.2. | Métodos de Investigación | 35 |
| 3.1.3. | Técnica de investigación | 36 |
| 3.1.4. | Procedimiento | 36 |
| 3.1.5. | Población y muestra | 38 |
| 3.1.6. | Operacionalización de las variables | 38 |
| 3.1.6.1. | Variable Independiente | 38 |
| 3.1.6.2. | Variable Dependiente | 38 |
| 3.1.7. | Diseño de la antena propuesta | 38 |
| 3.1.8. | Lente anillo central con 12 anillos externos | 44 |
| 3.1.9. | Análisis del punto focal | 46 |
| 3.1.9.1. | Incidencia de Onda Plana | 46 |
| 3.1.10. | Análisis mediante la TMC | 48 |
| 3.1.10.1. | Anillo coplanar | 48 |
| 3.1.10.2. | Anillo Central | 52 |
| CAPÍTULO IV | | 55 |
| 4.1. | Resultados y Discusiones | 55 |
| 4.1.1. | Análisis e Interpretación de resultados | 55 |
| 4.1.1.1. | Análisis del alimentador con la lente | 55 |
| 4.1.2. | Eficiencia de la antena | 59 |
| 4.1.2.1. | Eficiencia a 2.4GHz | 59 |
| 4.1.2.2. | Eficiencia a 5GHz | 60 |
| 4.1.3. | Comparación entre el alimentador y la lente. | 61 |
| 4.1.3.1. | Análisis de adaptación de la lente en 2.4GHz y 5GHz | 62 |
| 4.1.3.2. | Análisis de la lente comparada con el alimentador en la banda de 2.4GHz | 64 |
| 4.1.3.3. | Análisis de la lente comparado con el alimentador en la banda de 5GHz | 68 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| CAPÍTULO V | 72 |
| 5.1. Conclusiones | 72 |
| 5.2. Recomendaciones | 73 |
| BIBLIOGRAFÍA | 77 |
| ANEXOS | 78 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| 2.1. Clasificación de las lentes [1] | 22 |
| 2.2. Valores de ρ_{nm} para los Modos TM y Valores de ρ'_{nm} para los Modos TE en la guía circular [2] | 29 |
| 3.3. Operacionalización de variables | 39 |
| 3.4. Dimensiones del Alimentador GCB. | 44 |
| 3.5. Dimensiones de la lente propuesta. | 46 |
| 3.6. Porcentaje de contribución de potencia de los modos en las bandas de 2.4 y 5 GHz tanto para el anillo y central y el coplanar | 54 |
| 4.7. Resultado tras aplicar el test t para una muestra a los datos de adaptación en la banda de 2.4GHz | 62 |
| 4.8. Resultado tras aplicar el test t para una muestra a los datos de adaptación en la banda de 5GHz | 63 |
| 4.9. Resultados del Test de Normalidad de Shapiro-Wilk para los Datos de Directividad del Alimentador | 64 |
| 4.10. Resultado del Test de Normalidad de Shapiro-Wilk para los Datos de Directividad de la Lente | 65 |
| 4.11. Resultado tras aplicar el test de no paramétrico de Wilconxon para muestras pareadas a los datos de directividad del alimentador y la lente | 65 |
| 4.12. Resultado del Test de Normalidad de Shapiro-Wilk para los Datos de la ganancia del alimentador en la banda de 2.4GHz | 66 |
| 4.13. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la ganancia de la lente en la banda de 2.4GHz | 67 |
| 4.14. Resultado tras aplicar el test no paramétrico de Wilconxon para muestras pareadas a los datos de la ganancia del alimentador | 67 |
| 4.15. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la directividad del alimentador en la banda de 5GHz. | 68 |
| 4.16. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la directividad de la lente en la banda de 5GHz. | 69 |
| 4.17. Resultado tras aplicar el test no paramétrico de Wilconxon para muestras pareadas a los datos de la directividad del alimentador en la banda de 5GHz | 69 |
| 4.18. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la ganancia del alimentador en la banda de 5GHz. | 70 |
| 4.19. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la ganancia de la lente en la banda de 5GHz. | 70 |
| 4.20. Resultado tras aplicar el test no paramétrico de Wilconxon para muestras pareadas a los datos de la ganancia del alimentador en la banda de 5GHz | 71 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| 2.1. Ejemplo de transformación de onda realizada por una lente [1] | 21 |
| 2.2. Comparación de funcionamiento entre una antena tipo lente dieléctrica (2.2(a)) y un reflector (2.2(b)) [3] | 22 |
| 2.3. Estructura y parámetros de una guía de onda circular [2]. | 28 |
| 2.4. Gráfico de las funciones de Bessel de orden 0 a 3 [2] | 29 |
| 2.5. Simulación del modo fundamental TE_{11} de la guía de onda circular con dimen- siones de diámetro interno de 40.5mm y longitud de 230 mm (a)vista frontal, (b)vista lateral | 30 |
| 2.6. Métodos de excitación para producir los modos TE ₁₀ , TE ₂₀ y TM ₁₁ en una guía rectangular [4]. | 30 |
| 2.7. Parámetros y forma de excitación de una antena guía de onda circular [5] | 31 |
| 2.8. Canales en la banda 2.4GHz [6] | 33 |
| 2.9. Canales en la banda de 5GHz [6] | 34 |
| 3.10. Diagrama de Proceso de la Metodología de Proyecto | 37 |
| 3.11. Estructura de la guía circular vista frontal(3.11(a)) y vista lateral (3.11(b)) | 39 |
| 3.12. Parámetro S ₁₁ simulado en CST del alimentador | 40 |
| 3.13. Diagrama de radiación en 3D, vista superior de la guía circular a la frecuencia de 2.4GHz (3.13(a)) y a 5GHz (3.13(b)) | 40 |
| 3.14. Simulación de la directividad de la guía circular en el rango de 2.2 a 2.6 GHz | 40 |
| 3.15. Simulación de la directividad de la guía circular en el rango de 4.8 a 5.2 GHz | 41 |
| 3.16. Estructura de la guía de onda circular junto con el cono truncado (GCB) | 41 |
| 3.17. Simulación del parámetro S ₁₁ de la antena GCB | 42 |
| 3.18. Diagrama de radiación en 3D, vista superior de la guía circular a la frecuencia de 2.4GHz(3.18(a)) y 5 GHz(3.18(b)) | 42 |
| 3.19. Simulación del campo lejano en coordenadas polares a 2.4GHz para $\Phi=0$ (3.19(a)) ; $\Phi=90$ (3.19(b)) | 43 |
| 3.20. Simulación del campo lejano en coordenadas polares a 5GHz para $\Phi=0$ (3.20(a)) y $\Phi=90$ (3.20(b)) | 43 |
| 3.21. Comparación de la directividad GC vs GCB en la banda de 2,4GHz | 43 |
| 3.22. Comparación de la directividad GC vs GCB en la banda de 5GHz | 44 |
| 3.23. Vista frontal del anillo 3.23(a) y Vista lateral 3.23(b) | 45 |
| 3.24. Dimensiones de la lente propuesta, anillo central 3.24(a) y anillo coplanar 3.24(b) | 45 |
| 3.25. Simulación de incidencia de onda plana a 2.4GHz | 46 |
| 3.26. Montaje del alimentador junto con la lente especificando la distancia focal | 47 |
| 3.27. Simulación de la directividad en función de la distancia focal en la banda de 2.4 GHz | 47 |

| | |
|--|----|
| 3.28. Simulación la directividad en función de la distancia focal en la banda de 5GHz | 48 |
| 3.29. Significancia Modal | 48 |
| 3.30. Distribución de corriente superficial modo J_1 3.30(a) y patrón de radiación 3.30(b) del anillo coplanar a 2 GHz | 49 |
| 3.31. Distribución de corriente superficial del modo J'_1 3.31(a) y patrón de radiación 3.31(b) del anillo coplanar a 2GHz | 49 |
| 3.32. Distribución de corriente superficial del modo J_1 3.32(a) y patrón de radiación 3.32(b) del anillo coplanar a 5GHz | 50 |
| 3.33. Distribución de corriente superficial del modo J'_1 3.33(a) y patrón de radiación 3.33(b) del anillo coplanar a 5GHz | 50 |
| 3.34. Distribución de corriente superficial del modo $J'_1 radial$ 3.34(a) y patrón de radiación 3.34(b) del anillo coplanar a 5GHz | 50 |
| 3.35. Contribución de potencia en % de cada modo a la potencia total radiada en el rango de 2 a 6 GHz | 51 |
| 3.36. Contribución de potencia de cada modo a la potencia total radiada en el rango de 2 a 6 GHz | 51 |
| 3.37. Significancia modal del anillo central | 52 |
| 3.38. Distribución de corriente superficial del modo J_I 3.38(a) y patrón de radiación 3.38(b) del anillo central a 5GHz | 52 |
| 3.39. Distribución de corriente superficial del modo J'_1 3.39(a) y patrón de radiación 3.39(b) del anillo central a 5GHz | 53 |
| 3.40. Distribución de corriente superficial del modo $J'_1 radial$ 3.40(a) y patrón de radiación 3.40(b) del anillo central a 5GHz | 53 |
| 3.41. Contribución de potencia en % de los modos en el anillo central en el rango de 2 a 6 GHz | 53 |
| 3.42. Contribución de potencia nominal de los modos en el anillo central en el rango de 2 a 6 GHz | 54 |
| 4.43. Simulación del parámetro S11 del alimentador 4.43(a) y de la lente 4.43(b)en la banda de 2.4GHz | 55 |
| 4.44. Simulación del parámetro S11 del alimentador 4.44(a) y de la lente 4.44(b) en la banda de 5GHz | 56 |
| 4.45. Simulación de la directividad del alimentador vs lente en la banda de 2.4GHz . | 56 |
| 4.46. Simulación de la directividad del alimentador vs lente en la banda de 5GHz . . | 57 |
| 4.47. Simulación del campo lejano en 3D a 2.4GHz 4.47(a) y 5GHz 4.47(b) | 57 |
| 4.48. Simulación del campo eléctrico a 2.4GHz 4.48(a) y 5GHz 4.48(b) | 57 |
| 4.49. Simulación del campo lejano a 2.4GHz para $\Phi=0$ 4.49(a) y para $\Phi=90$ 4.49(b) | 58 |
| 4.50. Simulación del campo lejano a 5GHz para $\Phi=0$ 4.50(a) y para $\Phi=90$ 4.50(b) | 58 |
| 4.51. Comparación del parámetro simulado vs medido de la lente en la banda de 2.4GHz 4.51(a) y para la banda de 5GHz 4.51(b) | 59 |

| | |
|---|----|
| 4.52. Modelado del campo eléctrico en una línea de longitud $L=520\text{mm}$ a una distancia $f = 250\text{mm}$ de la guía circular con bocina (GCB) a 2.4GHZ | 60 |
| 4.53. Eficiencia de iluminación η_{il} , de desbordamiento η_s y de apertura η_{ap} para la lente con anillo metálico de ancho 25mm y diámetro externo $D=520$ mm, ubicada a una distancia f de la guía circular con bocina a 2.4GHZ | 61 |
| 4.54. Modelado del campo eléctrico en una línea de longitud $L=520\text{mm}$ a una distancia $f = 250\text{mm}$ de la guía circular con bocina (GCB) a 5GHZ | 61 |
| 4.55. Eficiencia de iluminación η_{il} , de desbordamiento η_s y de apertura η_{ap} para la lente con anillo metálico de ancho 25mm y diámetro externo $D=520$ mm, ubicada a una distancia f de la guía circular con bocina a 5GHZ | 62 |
| 4.56. Comparación de la Adaptación entre 2.4GHZ y 5GHZ: Diagrama de Caja | 64 |
| 4.57. Diagrama de Caja, comparación de Directividad con y sin Lente en la banda de 2.4GHZ | 66 |
| 4.58. Comparación de la Ganancia del Alimentador con y sin Lente en la banda de 2.4 GHz: Diagrama de Caja | 68 |
| 4.59. Comparación de la directividad del alimentador con y sin Lente en la banda de 5GHz:Diagrama de caja | 70 |
| 4.60. Comparación de la ganancia del alimentador con y sin Lente en la banda de 5GHz: Diagrama de Caja | 71 |

RESUMEN

Este proyecto de investigación se centra en la implementación y el análisis de una lente metálica dual band, la misma que esta conformada de varios anillos de diferente diámetro. La antena propuesta se basa en resonadores de $\lambda/2$ y $\lambda/4$, así mismo se diseña el alimentador que es una guía de onda circular que cubre las dos bandas de interés.

Para alcanzar el objetivo principal de implementación de la lente metálica dual band que opere en las bandas de 2.4GHz y 5GHz, se utiliza el simulador electromagnético CST Studio Suite. Este software permite modelar y simular el comportamiento de la antena, además se hace uso de Altair Feko que brinda la oportunidad de emplear la teoría de modos característicos para examinar los modos de propagación y su contribución en potencia. Este enfoque permite ajustar el diseño para lograr el comportamiento deseado en las bandas de interés, considerando parámetros como la ganancia, directividad, eficiencia, coeficiente de reflexión y patrón de radiación. Además, se utiliza el método de incidencia de onda plana para encontrar el punto focal adecuado para colocar el alimentador respecto a la lente.

La lente propuesta se diseña en cobre de 0.65 mm de grosor y se coloca sobre foam que tiene una permitividad relativa de 1,053. La lente consta de un anillo central y 12 anillos coplanares alrededor repartidos de manera simétrica cada 30° respecto al anillo central. Para el alimentador se usa aluminio de 0.45 mm de grosor en toda su estructura, para el acoplamiento entre la lente y el alimentador se coloca un pequeño soporte en donde se atraviesa una varilla roscada de modo que fije la lente en el alimentador.

Los resultados obtenidos del simulador electromagnético CST Studio Suite evidencian que la lente propuesta cumple con los parámetros de funcionamiento previstos. Se observa una adaptación para ambas frecuencias que supera los -10 dB para el coeficiente de reflexión. Además, se registra un incremento de 2.48 dB en la directividad en la banda de 2.4 GHz, y un aumento de 2.56 dB en la banda de 5 GHz.

Palabras clave: modos característicos, lente metálica, coeficiente de reflexión, acoplamiento, permitividad relativa, dual band.

ABSTRACT

This research project focuses on implementing and analyzing a dual-band metallic lens composed of several rings of different diameters. The proposed antenna is based on $\lambda/2$ and $\lambda/4$ resonators, and a circular waveguide feeder covering the two bands of interest is designed. To achieve the main objective of implementing the dual-band metallic lens operating at 2.4 GHz and 5 GHz, the electromagnetic simulator CST Studio Suite is utilized. This software allows modeling and simulating the antenna behavior. Additionally, Altair Feko is used to employ the characteristic mode theory to examine the propagation modes and their power contribution. This approach facilitates adjusting the design to achieve the desired behavior in the target bands, considering parameters such as gain, directivity, efficiency, reflection coefficient, and radiation pattern. Moreover, the plane wave incidence method is used to find the appropriate focal point to place the feeder relative to the lens. The proposed lens is made of 0.65 mm thick copper and is placed on foam with a relative permittivity of 1.053. It consists of a central ring and 12 coplanar rings symmetrically distributed every 30 degrees around the central ring. For the feeder, 0.45 mm thick aluminum is used throughout its structure. A small support with a threaded rod is placed for coupling between the lens and the feeder to fix the lens onto the feeder. The results obtained from the CST Studio Suite electromagnetic simulator demonstrate that the proposed lens meets the expected operating parameters. An adaptation for both frequencies exceeding -10 dB for the reflection coefficient is observed. Additionally, an increase of 2.48 dB in directivity is recorded in the 2.4 GHz band, and a 2.56 dB increase is observed in the 5 GHz band.

Keywords: characteristic modes, metallic lens, reflection coefficient, coupling, relative permittivity, dual band.



Reviewed by:
Mg. Dario Javier Cutiopala Leon
ENGLISH PROFESSOR
c.c. 0604581066

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las comunicaciones inalámbricas han experimentado un desarrollo extenso debido a la creciente necesidad de conectividad entre puntos, ya sea en zonas urbanas o rurales. Además, diversas investigaciones indican una demanda cada vez mayor de servicios de banda ancha y multimedia [7, 8]. Paralelamente, el número de usuarios está en constante aumento, lo que impulsa el desarrollo de sistemas que requieran mayores capacidades de comunicación.

Una de las tecnologías inalámbricas más comunes es la tecnología WiFi, que opera en la frecuencia de 2,4 GHz pero que también se ha expandido a la banda de frecuencia de 5 GHz. Su principal función es proporcionar acceso a Internet mediante un equipo (enrutador o router) conectado a la red y equipado con una antena, para redistribuir esta señal de manera inalámbrica dentro de un radio determinado [9]. Los dispositivos receptores dentro del área de cobertura deben ser compatibles con la tecnología WiFi para poder acceder a Internet y establecer conexiones entre sí, formando así una red. La calidad de la conexión mejora a medida que los dispositivos se encuentran más cerca de la fuente de la señal [9].

Wifi es indispensable para las redes domésticas, la conexión pública a Internet, el apoyo al Internet de las cosas, área laboral, academia y más. De modo que Wifi debe ser accesible y que garantice una calidad de servicio eficiente. Dentro de este sentido el sector de las telecomunicaciones trabaja continuamente en realizar avances en diseño de antenas las cuales posean buenas características como alta ganancia y directividad [10].

En lo que concierne a Ecuador, de la población rural que conforma el 35.7 % de la población del país, tan solo el 16 % tiene acceso a internet [11], lo que supone que existen sectores en donde el servicio de internet no está disponible. Entorno a esto surgen algunas soluciones como es la fibra óptica [12] o radio enlaces siendo el último más rentable, sin embargo esta necesita de equipos que posean una alta ganancia y directividad [13].

En el mercado existe una variedad de antenas destinadas a brindar servicios de Wifi, ya sea direccionales, sectoriales u omnidireccionales que generalmente se usa las de tipo direccionales, aparte de esto hay diferentes tipos de antenas para wifi, como son antenas de tipo reflector parabólico [14], sistemas discretos de antenas (antenas planas) [15], guías de onda circular y helicoidal. Cada una posee características que varían en cuanto a su funcionamiento y su implementación.

En los últimos años se han llevado a cabo varios trabajos sobre el desarrollo de nuevas tecno-

logías en lo que concierne al diseño de antenas, existe una variedad de opciones para diseñar antenas directivas a frecuencias de microondas y milimétricas, dentro de las cuales se puede mencionar los reflectores [16], las agrupaciones de antenas tipo parche [17], los reflectarray [18, 19], ranuras [20], las lentes [21], entre otras.

Desde hace unos años, las lentes han tomado un gran interés por su facilidad de diseño y simplicidad, su funcionamiento se basa en la óptica geométrica que ha sido ampliamente investigada [3], donde ha sido aplicado a otros campos como es la medicina, radares y militar. Las lentes son dispositivos que se emplean para dirigir y concentrar la energía en un solo punto, en este contexto se pueden combinar con antenas de microondas con el fin de mejorar sus propiedades de radiación ya sea usando lentes dieléctricas o metálicas [22].

Las lentes metálicas tienen propiedades interesantes porque generalmente poseen bajas pérdidas y una gran directividad, que son los requisitos básicos que deben cumplir las antenas para los nuevos sistemas de comunicaciones. Además, las lentes proveen un resultado eficaz donde la conformación de haz, supresión de lóbulos secundarios y agilidad de haz pueden ser logradas simultáneamente desde un sistema compacto [16, 23].

CAPÍTULO I

1.1 Planteamiento del Problema

Con los años se ha desarrollado varias investigaciones sobre la aplicación de diferentes tecnologías en el diseño de antenas, en donde se presenta diferentes técnicas de guiado como microstrip, gapwaveguide y RGW que han sido estudiadas para la banda de frecuencias milimétricas y de microondas [16], en este sentido surgen las metasuperficies [24], que van de la mano con las lentes [25] en donde se usan materiales dieléctricos y metálicos [26].

En este contexto las lentes necesitan de alimentadores que las iluminen, un ejemplo de ello es una lente hemisférica dieléctrica la cual es iluminada por una bocina [27], mientras que otro tipo de alimentador es una antena vivaldi que ilumina a una lente dieléctrica [28].

Para analizar el funcionamiento de una lente se usa la óptica geométrica que es un método convencional, y lo que se plantea en esta investigación es usar la Teoría de Modos Característicos [17] que ha tomado relevancia en los últimos años para el diseño de antenas. Otro punto importante en cuanto a los trabajos relacionados a las lentes, la mayoría trabaja a frecuencias mayores a 10 GHz y solo poseen una única banda, por lo que se propone en este trabajo de investigación es tener una antena que trabaje a doble banda. En atención a esto una de las aplicaciones más comunes es Wifi que corresponde a la banda de 2.4GHz y la relativamente nueva que es de 5GHz.

Como se menciona anteriormente la lente demanda de un radiador o alimentador, el inconveniente surge ya que el costo de dichas antenas es elevado puesto que no se fabrica en el país y se tendría que importar, de modo que se busca una solución más económica y con materiales que existe en el mercado local.

Sumado a ello en el país no existe investigaciones relacionadas a las lentes de modo que este trabajo busca ser una propuesta viable en el desarrollo de lentes y sus futuras aplicaciones.

1.2 Justificación

En cuanto a las comunicaciones inalámbricas, las antenas cumplen un rol fundamental para enviar y recibir información. En virtud de esto, lo que se desea es incrementar su eficiencia, ganancia y directividad, por lo que las lentes se proyectan como una solución viable.

Las lentes tienen el mismo principio que los reflectores transformar frentes de onda esféricos en frente de onda planos a través de su apertura con el fin de mejorar la directividad, la cualidad que posee las lentes es que el alimentador se coloca tras la lente; por tanto, se evitan bloqueos en la apertura producidos por el alimentador y su soporte, sin necesidad de soluciones para compensarlos. Dicha característica de iluminar a la lente, de forma simétrica produce el beneficio de que las antenas con lentes pueden tener menos distorsión, polarización cruzada y mayor directividad [3]. Además, para el diseño de la lente metálica se pretende analizar las características de radiación de la estructura mediante los modos característicos, con el fin de optimizar y facilitar el diseño [21].

Dentro de este contexto se planea diseñar una guía de onda circular acoplada a una bocina de forma que aumente la directividad, para luego diseñar la lente metálica de doble banda basada en anillos de diferente diámetro.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Implementar una antena tipo lente de alta ganancia para las bandas de 2,4 y 5GHz basadas en estructuras metálicas iluminadas por una guía de onda circular.

1.3.2 Específicos

- Realizar un estudio del estado del arte sobre las lentes.
- Diseñar la guía de onda circular que iluminara la lente metálica.
- Simular y analizar diferentes estructuras metálicas que conforman la lente bajo la teoría de modos característicos.
- Analizar de manera paramétrica los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en términos de ganancia, directividad, eficiencia, ancho de banda, frecuencia de operación y diagrama de radiación para su posterior implementación.

CAPÍTULO II

2.1 Estado del Arte

Durante los últimos años, el diseño de las lentes ha tomado una gran relevancia, puesto que al mejorar las características de una antena alimentadora en cuanto a directividad y ganancia, las hace atractivas para diferentes aplicaciones. Los alimentadores que comúnmente se usan son antenas tipo bocina, guías de onda o antenas parche. En este sentido, se estudio una antena guía de onda circular que al interior se incluye una estructura tipo helicoidal; la antena opera en la banda de 2,4 GHz [5]. Sin embargo, dicha antena trabaja en una sola banda, es por ello que en otro estudio se propone una antena multihaz que trabaja en 28 y 31 GHz respectivamente, además utiliza una lente metálica que mejora la ganancia y alcanza un valor de 14 dBi; no obstante, usa tres alimentadores que comparten una apertura, lo que provoca que su diseño sea de gran tamaño [29].

En este contexto, si bien las lentes aumentan la ganancia de una antena tradicional se pueden emplear diferentes materiales para su construcción como son los metamateriales. Un caso de ello es una lente tipo zonas de Fresnel multihaz, que trabaja en 23 GHz y alcanza una ganancia de 22 dBi [25], otro caso es una lente con metamaterial y otra dieléctrica ambas operan en el rango de 5.2 a 6.4 GHz y tienen una ganancia de entre 24 y 26 dBi respectivamente, en este caso el diseño de la lente se basa en celdas que conforman una matriz [30]. En torno a esto se propone una lente que trabaja en el rango de 81 a 86 GHz y que logra una ganancia de 26 dBi [31]. Por otra parte se presenta una lente doble banda haciendo uso de una metasuperficie la misma que opera a las frecuencias de 10 y 10,4 GHz teniendo una ganancia de 16 y 12, 8 dBi respectivamente [24].

Desde esta perspectiva al emplear materiales dieléctricos y combinarlos con metales, se puede variar el valor del índice del gradiente como propone en [32], el autor diseña tres tipos de lente que difieren en su forma, las mismas trabajan a 44GHz y tienen una ganancia de 30 dBi. No obstante, las lentes mencionadas anteriormente su análisis se basa en la óptica geométrica que es el método tradicional, lo que se propone en este trabajo es usar la Teoría de Modos Característicos (TMC) para analizar la lente, un ejemplo es el estudio de una antena tipo patch de doble banda [17], ahora si este análisis se emplea en el diseño de lentes se puede mencionar a [33] que muestra una lente formada por un conjunto de anillos metálicos, que mediante la TMC se lleva a cabo un proceso de optimización manteniendo un tamaño compacto, dicha lente trabaja en el rango de 3 a 7 GHz y de 10 a 14 GHz alcanzando una ganancia de 11 dBi. En este contexto se diseña una lente usando TMC que opera en la banda de 2,4 GHz alcanzando una ganancia de 15.8 dBi [34].

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Principio de Funcionamiento de una Lente

Como se muestra en la Figura 2.1, la lente electromagnética es una estructura tridimensional que por medio de ella se transforma un frente de onda esférico o cilíndrico, producido por una fuente puntual o primaria en un frente de onda plano con el fin de enfocar la energía en un punto [3].

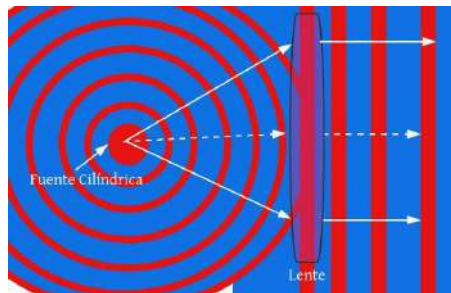


Figura. 2.1. Ejemplo de transformación de onda realizada por una lente [1]

El funcionamiento de las lentes se fundamenta en la óptica geométrica en la cual se analiza el principio de igualdad de caminos ópticos de los rayos y la ley de Snell, con esto se observa las propiedades electromagnéticas, de modo que se obtenga el óptimo diseño de la lente [16].

La lente se monta sobre una antena de tal forma que influye en el funcionamiento, esta puede cambiar las propiedades de radiación como la distribución de campo, modelar la amplitud del haz de salida y mejorar las características de propias de la antena como la directividad, esto dependerá del material y la geometría [1].

Las lentes pueden considerarse equivalentes a los reflectores en cierto sentido, aunque difieren en su principio de operación. Mientras que los reflectores se basan en la reflexión de ondas electromagnéticas, las lentes operan según el principio de la refracción. La Figura 2.2 ilustra este proceso: los rayos paralelos de una onda plana incidente se refractan en la superficie de la lente, convergiendo hacia un punto focal común. Este principio, conocido como el principio de Fermat, garantiza que todos los rayos lleguen al foco en fase, a pesar de tener longitudes físicas diferentes. Este efecto se logra mediante la compensación de las velocidades de fase más lentas ($v = c/n$) en diferentes regiones de la lente [1,3].

En la literatura existe varios tipos de lentes de acuerdo con el material del cual están construidos o través de su forma geométrica. Si se parte por el material se distingue materiales homogéneos o inhomogéneos [21]. Con relación a esto se puede encontrar lentes metálicas y dieléctricas,

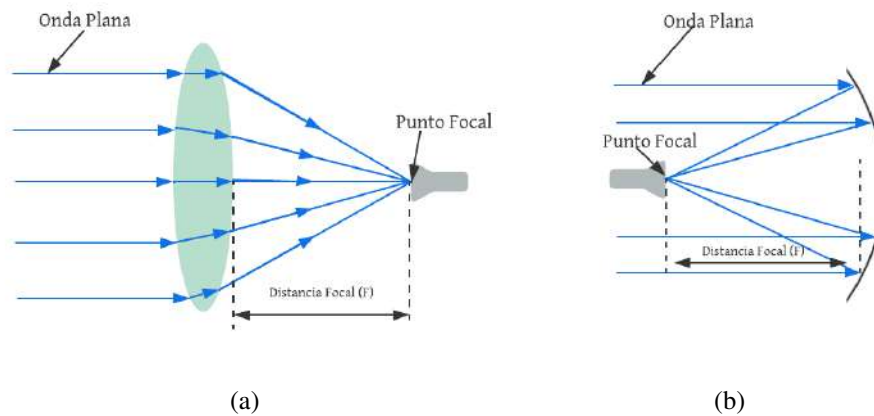


Figura. 2.2. Comparación de funcionamiento entre una antena tipo lente dieléctrica (2.2(a)) y un reflector (2.2(b)) [3]

en donde su diferencia radica en el índice de refracción [23], además las lentes dieléctricas presenta inconvenientes como las pérdidas en el dieléctrico, las pérdidas por reflexión en las discontinuidades y el peso.

Existe varias referencias sobre lentes dieléctricas [32], estas investigaciones descritas exponen inconvenientes por el tamaño masivo que tienen, lo que causa una dificultad su implementación en sistemas reales. Como se menciona anteriormente se pueden clasificar de diferentes maneras, en este caso se organiza en base a tres características físicas, la posición de la alimentación respecto a la lente, índice de refracción y forma geométrica de la lente tal como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación de las lentes [1]

| Característica | Clasificación |
|--------------------------|-----------------------------|
| Posición de alimentación | Alimentación Separada |
| | Alimentación Integrada |
| Índice de refracción | Índice Homogéneo/Uniforme |
| | Índice Variable/No uniforme |
| Forma Geométrica | Canónica |
| | Con forma |

De acuerdo con la Tabla 2.1, la posición de la alimentación influye en la forma en que se excita la lente, distinguiéndose principalmente dos métodos. El primero, la alimentación separada, es la forma más común de alimentar una lente, donde un radiador se encuentra a una distancia de varias longitudes de onda respecto a la lente. La segunda opción es la alimentación integrada, caracterizada por tener el radiador en contacto directo con la lente o a una distancia menor que

la longitud de onda [22].

Otro aspecto a considerar es el material utilizado, que se clasifica en dos categorías. El primero es el índice homogéneo o uniforme, que se basa en un solo tipo de material dieléctrico y, por lo tanto, posee una sola superficie de refracción. El segundo es el índice variable, que consta de al menos dos materiales con distintas propiedades dieléctricas y múltiples superficies de refracción [3].

La forma geométrica de la lente juega un papel crucial según la aplicación y la frecuencia de trabajo. En este sentido, se distinguen dos tipos principales. La forma canónica se refiere a antenas formadas por lentes con formas de colimación convencionales, como hemisféricas, elípticas o hiperbólicas, entre otras. Por otro lado, la lente de forma se diferencia de las antenas canónicas al poseer una superficie de colimación optimizada que produce un patrón de radiación en una dirección específica [3].

2.2.2 Lentes Metálicas

Desde hace unos años, las lentes metálicas han tomado un gran interés, debido a los beneficios que brindan como es que se pueden conseguir altas ganancias en la antena y las pérdidas asociadas al dieléctrico pueden ser eliminadas [21]. Además, dichas lentes experimentan un aumento de la velocidad de fase, ya que poseen un índice de refracción que varía con la frecuencia, existe trabajos inmerso en ello y una de las tecnologías que se ha desarrollado es la lente de placa de zona Fresnel [35]. Adicionalmente se pueden diseñar lentes con metamateriales su característica radica en que su permitividad y permeabilidad pueden ser negativos, se han propuesto lentes de metamaterial ENZ (“Epsilon Near Zero”), similares a las lentes de [36] pero con las guías de ondas próximas al corte, a frecuencias alejadas de las de resonancia consiguiendo así menos pérdidas, entre otras ventajas que permiten los metamateriales ENZ [22].

2.2.3 Parámetros de las antenas lente

2.2.3.1 Directividad

El objetivo de una lente es enfocar la potencia radiada del alimentador en una dirección determinada de modo que cumpla con las especificaciones solicitadas de directividad. La directividad de una antena es definida como la relación entre la densidad de potencia radiada de la antena en una determinada dirección y la densidad de potencia de una antena isotrópica que radia en la misma dirección con la misma potencia que la antena de estudio [37].

La directividad de una antena (*Dir*) esta definida en la ecuación 2.1:

$$Dir(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_r/(4\pi r^2)} \quad (2.1)$$

Cuando la dirección no es especificada, se refiere a la dirección máxima de radiación y viene expresada como se indica en la ecuación 2.2:

$$Dir(\theta, \phi) = \frac{\rho_{max}}{P_r/(4\pi r^2)} \quad (2.2)$$

Una antena de lente puede clasificarse como una antena de apertura, lo que permite alcanzar la máxima directividad a partir de una apertura eléctricamente grande. Esta directividad máxima se define en la ecuación 2.3:

$$D_{apertura_{max}} = \frac{4\pi A_E}{\lambda^2} \quad (2.3)$$

donde A_E es el área captura efectiva de la Lente.

No obstante, de acuerdo con [37] el desbordamiento del campo de apertura es uno de los factores que reducen la directividad de una antena en su valor máximo posible, por ende se define la eficiencia de apertura como la relación entre la directividad real de una antena de apertura y la directividad máxima dada por la ecuación 2.3. Por tanto la directividad se puede describir mediante la ecuación 2.4:

$$D_{apertura_{max}} = \frac{4\pi A_E}{\lambda^2} \cdot \eta_{ap} \quad (2.4)$$

donde η_{ap} es la eficiencia de desbordamiento.

2.2.3.2 Ganancia

Con el fin de evitar el desvanecimiento de las señales de trayectos múltiples, es imprescindible concentrar la potencia radiada desde una antena, en una dirección dada. La relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección específica y la densidad de potencia de una antena isotrópica se denomina ganancia de antena (*G*) como se define en la ecuación 2.5. La ganancia y la directividad están relacionadas con la eficiencia, como se indica en [38]:

$$G = Dir \cdot \eta \quad (2.5)$$

2.2.3.3 Eficiencia de una lente metálica

Para evaluar la eficiencia de una lente plana, se consideran diferentes tipos de eficiencias según el tipo de pérdidas presentes. En consecuencia, la eficiencia total de una lente η_{ap} se calcula como el producto de diversos factores, según lo indica [21].

- La eficiencia de desbordamiento η_s se define como la relación entre la potencia radiada por la estructura y la potencia total. Si consideramos el diagrama de radiación del alimentador como un patrón de radiación simétrico, la eficiencia de desbordamiento puede expresarse en función del campo eléctrico incidente E_i y el ángulo θ_i , formado entre el punto central O y algún punto límite de la estructura de la lente D , como se indica en la ecuación 2.6:

$$\eta_s = \frac{\int_0^{\theta_i} |E_i(\theta)|^2 \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} |E_i(\theta)|^2 \sin(\theta) d\theta} \quad (2.6)$$

Al tomar la alimentación como un diagrama de radiación simétrico, el campo eléctrico incidente E_i se puede expresar como:

$$E_i = \cos(\theta)^n \quad (2.7)$$

Reemplazando la ecuación 2.7 en la ecuación 2.6 resulta:

$$\eta_s = \frac{\int_0^{\theta_i} |\cos(\theta)^n|^2 \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} |\cos(\theta)^n|^2 \sin(\theta) d\theta} \quad (2.8)$$

Si se resuelve las integrales del numerador y del denominador se tiene:

$$\int_0^{\theta_i} |\cos(\theta)^n|^2 \sin(\theta) d\theta = \frac{1}{2n+1} ((\cos(\theta_i))^{2n+1} - 1) \quad (2.9)$$

$$\int_0^{\pi/2} |\cos(\theta)^n|^2 \sin(\theta) d\theta = \frac{1}{2n+1} \quad (2.10)$$

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{D/2}{F}\right) \quad (2.11)$$

Al sustituir 2.9, 2.10 y 2.11, se obtiene la expresión:

$$\eta_s = 1 - \cos \left(\arctan \left(\frac{D/2}{F} \right) \right)^{2n+1} \quad (2.12)$$

De modo que se puede concluir entonces que la eficiencia de desbordamiento depende del diámetro total de la lente D y la distancia focal F.

- La eficiencia de iluminación (η_{il}), depende del área geométrica efectiva A_E . Por tanto, (η_{il}) se puede expresar mediante la ecuación 2.13:

$$\eta_{il} = \frac{1 \left| \int_{A_E} E_i(\theta) dS \right|^2}{A_E \int_{A_E} |E_i(\theta)|^2 dS} \quad (2.13)$$

A_E se puede aproximar a un círculo de diámetro D y se expresa la ecuación 2.13 en función de coordenadas polares, se obtiene la ecuación final siguiente:

$$\eta_{il} = \frac{(n-1) \left(-4F^2 + \left(1 + \frac{D^2}{4F^2} \right)^{-\frac{n}{2}} (D^2 + 4F^2) \right)^2}{\left(\left(\frac{D}{2} \right)^2 (n-2)^2 \right) \left(4F^2 + \left(1 + \frac{D^2}{4F^2} \right)^{-n} (D^2 + 4F^2) \right)} \quad (2.14)$$

donde D es el diámetro externo de la lente. F la distancia focal, n el exponente de la función coseno y η_{il} la eficiencia de iluminación.

Por consiguiente, al obtener las expresiones resultantes tanto para la eficiencia de desbordamiento (η_s) como para la eficiencia de iluminación (η_{il}), es factible determinar la eficiencia teórica de una lente metálica y confirmar que esta eficiencia está relacionada con la proporción entre la distancia focal (F) y el diámetro externo de la lente (D).

2.2.4 Alimentadores para lentes

En general el objetivo de la lente es enfocar la potencia radiada por el alimentador en una determinada dirección del espacio [21], los alimentadores son en esencia una antena de baja directividad que iluminan a la lente entre las principales antenas que se pueden utilizar están las bocinas, los dipolos, las antenas microstrip y las guías metálicas [38].

Las bocinas se emplean para agrandar las dimensiones eléctricas de una guía rectangular o circular, su deficiencia radica en que poseen un gran tamaño y no da mucha facilidad para integrar otras antenas, en consecuencia, se busca alternativas para disminuir el tamaño como es la utilización de la guía de onda abierta [5].

En este sentido las guías de onda metálicas son comúnmente usadas, brindan directividades moderadas, altas potencias con bajas pérdidas y trabajan a frecuencias de microondas y milimétricas sin embargo presentan un inconveniente de desadaptación en la boca de guía. Dentro de las guías metálicas esta la rectangular y circular, las cuales existen variedad en el mercado de acuerdo con el tamaño y frecuencias; el modo fundamental de la guía de onda rectangular es el TE_{10} y en la guía circular el modo fundamental es el TE_{11} [21].

Se pueden diseñar lentes con propiedades muy interesantes mejorando no sólo la adaptación, sino también por ejemplo su perfil, tamaño y forma lo que las podría hacer más fáciles de fabricar a ciertas frecuencias [21].

2.2.4.1 Guía de Onda Rectangular

Una guía de onda se refiere a un tubo de un material conductor ya sea rectangular, circular o elíptica en los cuales la energía se conduce a lo largo de la guía y es limitada en sus fronteras. Las paredes conductoras del tubo confinan la onda al interior por reflexión en la superficie donde el tubo puede estar vacío o relleno con un dieléctrico [2].

La guía de onda rectangular tiene una variedad de aplicaciones, aparte que fue uno de los primeros tipos de líneas de transmisión de señales de microondas. Posee varias ventajas como es su tamaño y su facilidad de operación de frecuencias que van desde 320 MHz(WR-2300) hasta los 1.1THz(WR-1) [16].

Las guías metálicas tienen varias ventajas como:

- Blindaje total de campo
- Pérdidas bajas de conductor
- Incremento en la capacidad de potencia
- Construcción más sencilla que el cable coaxial.

2.2.4.2 Guía de Onda Circular

El principio de funcionamiento de las guías de onda es independiente de la forma de la sección transversal, es decir que la guía de onda rectangular y circular funcionan de la misma manera salvo que en la guía circular los modos de transmisión se presentan en coordenadas cilíndricas [2].

Así mismo existen varias aplicaciones específicas para las guías de onda circular, como en radares y microondas terrestres. Dado que dicha guía son útiles para propagar ondas polarizadas tanto horizontalmente como verticalmente en la misma guía. En el mercado se encuentran guías que operan desde 820MHz hasta los 200GHz [39]. El parámetro que rige en la guía de onda es el radio interno a tal como se muestra en la Figura 2.3.

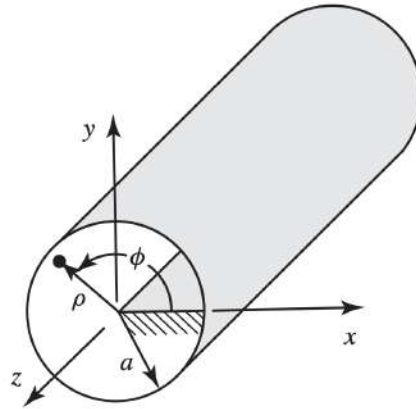


Figura. 2.3. Estructura y parámetros de una guía de onda circular [2].

Las guías de onda tienen la capacidad de propagar una variedad de modos, que incluyen los modos TE_{nm} y TM_{nm} , los cuales se caracterizan por las funciones de Bessel. Estos modos representan diversas configuraciones de campos eléctricos y magnéticos dentro de la guía de onda [2].

Las funciones de Bessel, que surgen de la solución de las ecuaciones de onda en coordenadas cilíndricas, describen la distribución espacial de estos campos para cada modo específico. La propagación de estos modos en la guía de onda depende de varios factores, como la frecuencia de la señal y las dimensiones de la guía de onda [2,4]. Para calcular la frecuencia de corte según el modo se tiene las ecuaciones 2.15 y 2.16 donde ρ_{nm} y ρ'_{nm} son las raíces de las funciones de Bessel y a es el radio de la guía.

Modos TM_{nm}

$$f_{c_{nm}} = \frac{\rho_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.15)$$

Modos TE_{nm}

$$f_{c_{nm}} = \frac{\rho'_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.16)$$

En la Figura 2.4, se ilustra las tres primeras funciones de Bessel de primera clase, estas funciones son oscilatorias y tiene una infinidad de raíces. En la Tabla 2.2 se muestra los valores ρ_{nm} para los modos TM, mientras que para los modos TE se presentan los valores ρ'_{nm} .

Tabla 2.2. Valores de ρ_{nm} para los Modos TM y Valores de ρ'_{nm} para los Modos TE en la guía circular [2]

| n | Modo TM | | | Modo TE | | |
|----------|----------------|-------------|-------------|----------------|--------------|--------------|
| | ρ_{n1} | ρ_{n2} | ρ_{n3} | ρ'_{n1} | ρ'_{n2} | ρ'_{n3} |
| 0 | 2.405 | 5.520 | 8.654 | 3.832 | 7.016 | 10.174 |
| 1 | 3.832 | 7.016 | 10.174 | 1.841 | 5.331 | 8.536 |
| 2 | 5.135 | 8.417 | 11.620 | 3.054 | 6.706 | 9.970 |

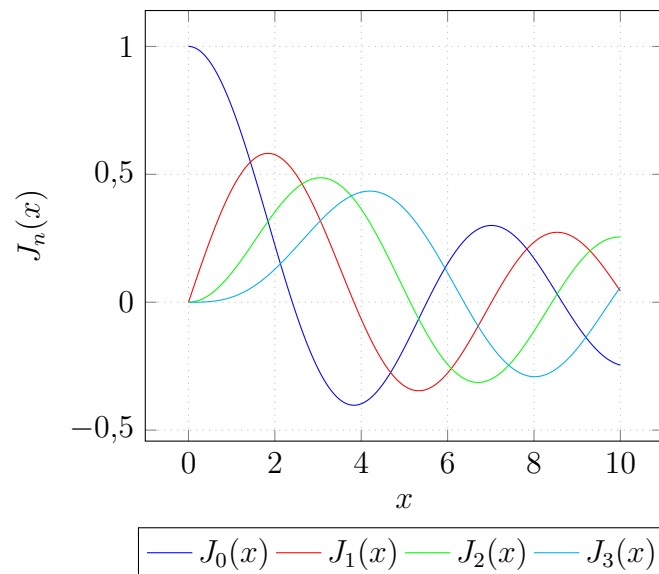


Figura. 2.4. Gráfico de las funciones de Bessel de orden 0 a 3 [2]

El modo fundamental que se propaga en la guía de onda circular es el modo TE_{11} , como se puede observar en la Figura 2.5, la cual es el resultado de la simulación. Esta figura presenta dos vistas: (a) vista frontal y (b) vista lateral de la guía de onda circular, la cual tiene un diámetro interno de 40.5 mm y una longitud de 230 mm.

2.2.4.3 Excitación de guía de onda por medio de sonda coaxial

Puesto que se ve a implementar este trabajo se necesita escoger la excitación adecuada para que funcione la guía de onda y además de ello, hacerla que trabaje a doble banda. Por lo que se emplea una sonda coaxial para lanzar el modo que se requiere. La sonda, al ser un cable coaxial con una terminal de circuito abierto, la introducimos en una guía de onda por una abertura, radiando el terminal de la sonda coaxial como si fuera una antena de transmisión o recepción, como se ilustra en la Figura 2.6 [37].

La posición de la sonda debe estar cerca del lugar donde el campo eléctrico del patrón de

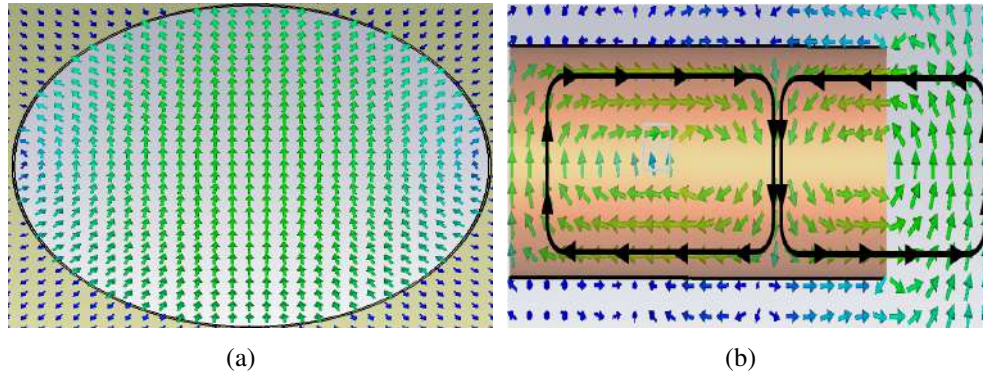


Figura. 2.5. Simulación del modo fundamental TE_{11} de la guía de onda circular con dimensiones de diámetro interno de 40.5mm y longitud de 230 mm (a)vista frontal, (b)vista lateral

propagación es máximo, pero puede variarse ligeramente para mejorar el acoplamiento de impedancias, dicha posición es a $\lambda/4$ a la frecuencia de diseño de modo que provoca que las ondas reflexionen en la pared inicial, se sumen constructivamente con las ondas radiadas por la sonda coaxial, en la dirección del eje z [4].

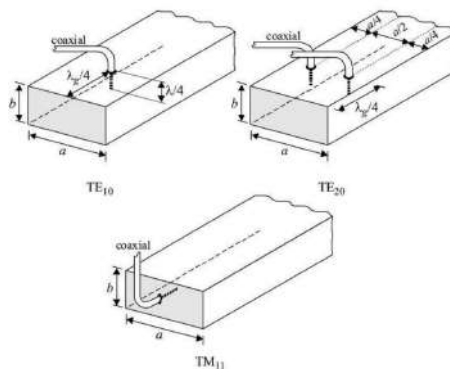


Figura. 2.6. Métodos de excitación para producir los modos TE_{10} , TE_{20} y TM_{11} en una guía rectangular [4].

2.2.4.4 Parámetros de antena guía de onda circular

Las antenas de guía de onda o de apertura son cavidades rectangulares o cilíndricas que emiten o transmiten ondas electromagnéticas a partir de una frecuencia de corte f_c [2]. Los parámetros clave de estas antenas, como la longitud y la posición de la sonda, se ilustran en la Figura 2.7.

Las guías de onda operan a partir de una frecuencia de corte f_c que marca el inicio de su funcionamiento para los modos TE y TM. El modo TE_{11} es el primero que se propaga en la guía circular y para calcular su f_c , se define la ecuación 2.17 donde c indica la velocidad de la luz y a es el radio de la guía [2].

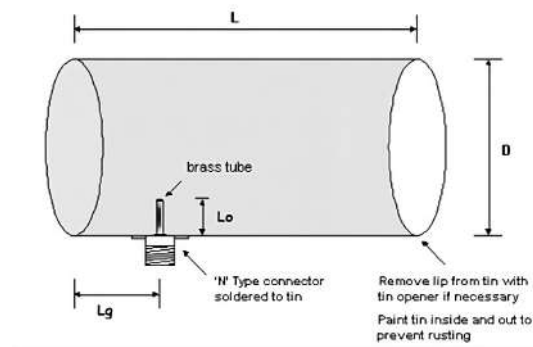


Figura. 2.7. Parámetros y forma de excitación de una antena guía de onda circular [5]

$$f_{c11} = \frac{1,841c}{2\pi a} \quad (2.17)$$

La longitud de la sonda coaxial en esencia es una antena monopolo y su longitud va a ser $\lambda/4$ a la frecuencia de diseño y se calcula con la ecuación 2.18.

$$L_0 = \frac{\lambda/4}{4} \quad (2.18)$$

Según se describe en [2, 5], la posición de la sonda se determina a partir de un extremo de la guía de onda. Desde ese punto, se calcula la longitud, que será un cuarto de longitud de onda de grupo (λ_g) definida en la ecuación 2.19. Una vez que se tiene dicho valor se divide para 4 como se muestra en la ecuación 2.20 y el resultado nos otorga la posición de la sonda.

$$\lambda_g = \frac{c}{\sqrt{f^2 - f_c^2}} \quad (2.19)$$

$$L_g = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.20)$$

2.2.5 Teoría de modos característicos TMC

El proceso de diseño de una antena puede tomar bastante tiempo, además de que se busca que la antena funcione de la mejor manera con los métodos tradicionales de diseño que no pueden ser tan efectivos. Hoy en día se usa simuladores electromagnéticos que proveen de alta capacidad de procesamiento sin embargo los diseñadores prestan poca atención a la física del problema de radiación.

Por el contrario, el enfoque de análisis y diseño de estructuras metálicas considerando la Teoría

de Modos Característicos(TMC) [40], que conduce a determinar las corrientes y campos modales en el cuerpo conductor relacionados con las resonancias naturales de la estructura, los cuales proporcionan una visión más amplia del comportamiento físico de radiación y facilitan el diseño de la antena, el análisis de TMC se realiza en el software Altair Feko [41]. De acuerdo con [21], describe la TMC considerando el estudio de los modos de corriente superficial en un anillo conductor para determinar el modo de excitación dentro del ancho de banda. Luego, formula una ecuación integral del campo eléctrico, partiendo de las ecuaciones de Maxwell y aplicando el método de los momentos para discretizar la ecuación integral en ecuaciones matriciales.

2.2.5.1 Ángulo Característico

Este parámetro señala la diferencia entre las fases de las corrientes y los campos característicos de una estructura resonante. Para describir los ángulos característicos se usa la ecuación 2.21 [21].

$$\alpha_n = 180^\circ - \tan^{-1}(\alpha_n) \quad (2.21)$$

Para interpretar el ángulo característico se tiene que cuando es igual a 180° esta en resonancia, de modo que se lo contempla como un buen radiador, así mismo el ancho de banda que radia en un modo se obtiene a partir de la pendiente en 180° de la curva que describe el ángulo según el eje de frecuencias [21].

Por otro lado el modo almacena energía cuando el ángulo característico se acerca a 90° o 270° , entonces el valor del ángulo característico nos indica si el modo asocia un almacenamiento de energía magnética de manera inductiva, si fuera el caso de $90^\circ < \alpha_n < 180^\circ$, caso contrario se almacena energía eléctrica de manera capacitiva si el caso fuera $180^\circ < \alpha_n < 270^\circ$ [21].

2.2.5.2 Significancia Modal

La significancia modal (MS_n) es una cualidad propia de cada modo y es independiente de cualquier fuente de excitación. La (MS_n) otorga una forma conveniente de calcular el ancho de banda de cada modo característico [21]. Matemáticamente se puede expresar como indica la ecuación 2.22:

$$MS_n = \left| \frac{1}{1 + j\lambda_n} \right| \quad (2.22)$$

Como se mencionó anteriormente, la significancia modal nos proporciona información sobre el modo característico de una antena, y cuando estos modos entran en resonancia, es importante tener un valor que indique la mayor contribución de radiación de dicho modo. Cuando este valor es igual a 1, se considera que es el valor máximo [21].

El ancho de banda de radiación de un modo puede definirse en función del ancho de la curva de significancia modal cerca del punto máximo.

Además de esto, el ancho de banda de radiación de un modo BW_n se define como el intervalo dentro del cual la potencia radiada por el modo no es inferior a la mitad de la potencia radiada en resonancia [21]. Por lo tanto, el ancho de banda modal BW_n puede expresarse como la relación de la diferencia de frecuencia (superior menos inferior) sobre la frecuencia de resonancia del modo, como se indica en la ecuación 2.23.

$$BW_n = \frac{f_U - f_L}{f_{res}} \quad (2.23)$$

2.2.6 Bandas de frecuencia 2.4GHz y 5GHz

En la banda de 2.4GHz, se han definido un total de 14 canales para facilitar la comunicación inalámbrica y evitar interferencias entre dispositivos. Cada canal tiene un ancho de banda de 22MHz y están separados por 5MHz, como se muestra en la Figura 2.8. Esta estructura de canales permite a múltiples dispositivos coexistir en la misma área sin causar interferencias significativas entre sí [9].

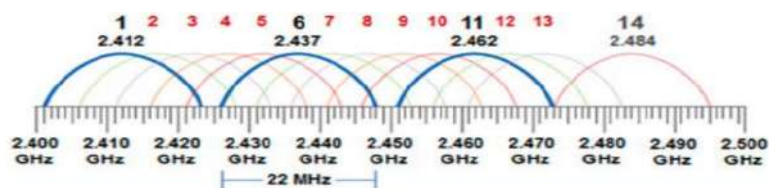


Figura. 2.8. Canales en la banda 2.4GHz [6]

En la banda de 5GHz, las potencias de transmisión varían según las regulaciones específicas de cada país y dependen de factores como el uso en interiores o exteriores, así como los mecanismos de control de interferencia [6]. Los canales de WiFi en esta banda están numerados del 36 al 165 y se dividen en bandas de 20MHz. Sin embargo, es importante tener en cuenta que hay superposición de canales, como se muestra en la Figura 2.9.

Uno de los estándares que define el uso de la banda de 5GHz es el 802.11ac, comúnmente conocido como WiFi. Introducido en 2013, el estándar se centra principalmente en la banda de



Figura. 2.9. Canales en la banda de 5GHz [6]

5GHz y ha sido diseñado para proporcionar velocidades de transferencia de datos más rápidas y un rendimiento mejorado en comparación con su predecesor, el 802.11n [42].

El estándar 802.11ac utiliza tecnologías avanzadas como MIMO (Multiple Input, Multiple Output) para mejorar la eficiencia y la velocidad de transmisión de datos. Estas tecnologías permiten que múltiples flujos de datos se transmitan simultáneamente, lo que resulta en una conexión más rápida y confiable para los usuarios [6] [43].

CAPÍTULO III

3.1 Metodología

La metodología que se usa en el presente trabajo de investigación, parte por conocimientos existentes que son esenciales para lograr los objetivos propuestos, en cuanto al diseño de la lente se fundamenta en modelos de referencia de autores que siguen la misma línea de investigación. La lente diseñada cumple con las características claves que son enfocar la potencia de un radiador y reducir las pérdidas de modo que aumente la directividad además de que opere en dos bandas de frecuencias que son 2.4GHz y 5GHz.

3.1.1 Tipo de Investigación

Investigación exploratoria

La investigación exploratoria es el primer paso para relacionarse con el tema, a través de la documentación y literatura bibliográfica que nos otorgaran y simplificaran las variables de estudio involucradas. En torno a esto se determina la mejor técnica para el diseño de la lente, los materiales que se usarán y la manera que se integra con antenas de menor directividad de modo que este tipo de investigación hace que se reduzca futuras líneas de investigación en base a sus resultados.

Investigación experimental

Puesto que se implementa este trabajo de investigación se necesita de la parte experimental, que consiste en relacionar las variables dependiente e independiente y aplicar un estudio estadístico que justifiquen los resultados obtenidos de modo que se demuestre el funcionamiento de la lente. Además estos resultados nos permiten interpretar de mejor manera el comportamiento de la lente y ver sus aplicaciones.

3.1.2 Métodos de Investigación

Método adaptativo

En el presente trabajo de investigación, se emplea el método adaptativo. Se inicia con el diseño del alimentador, que consiste en una guía de onda circular. Posteriormente, se lleva a cabo el

diseño de la lente, la cual se basa en anillos resonantes de diferentes diámetros. Finalmente, se aplica la TMC con el objetivo de analizar el comportamiento físico de la radiación y su contribución de potencia.

Método experimental

En relación al método experimental, se inicia el diseño de la lente utilizando un simulador electromagnético para obtener una aproximación de su comportamiento. El objetivo es que la lente opere en dos bandas de frecuencia, por lo que se varía el diámetro interno y el grosor de la misma. Una vez que se cumple con esta premisa, se procede con su implementación. Posteriormente, se lleva a cabo una validación para confirmar su funcionamiento en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

3.1.3 Técnica de investigación

Observación directa

La técnica de observación directa nos permite tener un registro sistemático de las variaciones y modificaciones que se realizan en el experimento, para posterior elegir el mejor resultado que cumpla con los objetivos.

Estudio bibliográfico

El estudio bibliográfico nos proporciona una base teórica sólida para la investigación a través de diversas fuentes tales como: artículos científicos, libros, repositorios de universidades y de otros tipos, de modo que nos facilite a contextualizar a problema.

3.1.4 Procedimiento

El desarrollo del presente trabajo de grado utiliza como base el diagrama que se representa en la Figura 3.10.

- La primera etapa se centra en el estudio general de los alimentadores, donde se analizan sus características y formas de optimización.
- En la fase de análisis y diseño de alimentadores, se emplean guías de onda comerciales como base, modelando y analizando su excitación para operar en las bandas de 2.4 y 5 GHz.

- Una vez diseñado el alimentador, se avanza a la siguiente fase, que implica el análisis y diseño de varias estructuras metálicas que formarán la lente. Se modelan diferentes anillos con variaciones en su diámetro interno para lograr la resonancia en doble banda. Luego, se aplica el método de incidencia de onda plana para encontrar el punto focal, como se explica en [21]. Posteriormente, se analiza el comportamiento de radiación de la estructura mediante la TMC.
- Una vez determinado el punto focal, la siguiente fase implica colocar el alimentador a la distancia focal calculada con respecto a la lente de modo que se transfiera la mayor potencia y tenga mínimas pérdidas y se logre aumentar la directividad, eficiencia, ganancia y el diagrama de radiación sea direccional.
- Luego de la simulación, se realiza un análisis paramétrico exhaustivo de los resultados con el fin de asegurar que el diseño cumple con los objetivos establecidos y es funcional. Además, se emplean métodos estadísticos para validar el diseño.
- Finalmente, se lleva a cabo la fabricación y caracterización tanto de la lente como del alimentador para verificar su funcionamiento.

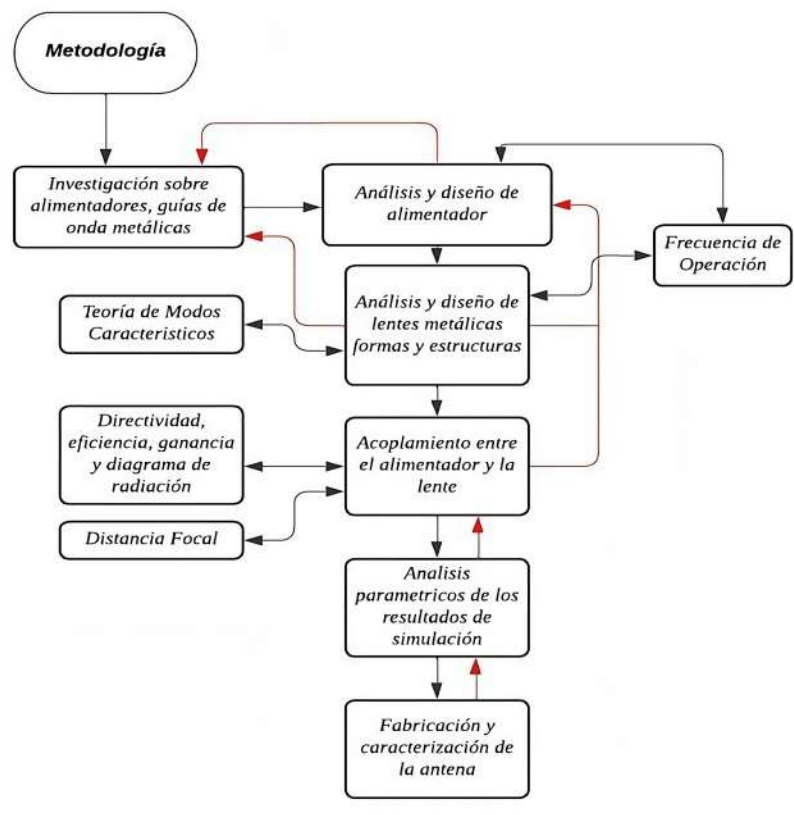


Figura. 3.10. Diagrama de Proceso de la Metodología de Proyecto

3.1.5 Población y muestra

Población

La población en este proyecto se define después de realizar todas las variaciones en las dimensiones de la lente. Una vez que se ha determinado el tamaño óptimo de la lente y se han logrado los resultados deseados en cuanto a directividad, ganancia y ancho de banda dentro de la simulación, se extraen los datos según los rangos de frecuencia para cada banda.

Muestra

La muestra se toma de la población anteriormente definida.

3.1.6 Operacionalización de las variables

3.1.6.1 Variable Independiente

- Rango de Frecuencias
- Parámetros de la estructura

3.1.6.2 Variable Dependiente

- Parámetros de Transmisión/Recepción

En la Tabla 3.3 se muestran las variables dependientes e independientes empleadas para el análisis del rendimiento de la antena propuesta.

3.1.7 Diseño de la antena propuesta

Para el diseño del alimentador se toma como referencia a [5] que es una guía de onda circular que en su interior tiene una estructura tipo helicoidal, dicho alimentador trabaja en la banda de 2.4 GHz, lo que se hace en este trabajo es modificarle para que opere también a 5GHz, esto se logra añadiéndole un cable de longitud $\lambda_{5GHz}/4$ a la sonda. La guía tiene un radio de 40.5mm y un espesor de 0.4mm el material que se usa es aluminio en toda la estructura

Como se observa en la Figura 3.11 se muestra la estructura general de la antena dual, consta de

Tabla 3.3. Operacionalización de variables

| Variables | Concepto | Indicadores | Técnicas e Instrumentos |
|---|--|---|---------------------------------------|
| Independiente | | | |
| Rango de frecuencias | Frecuencias de operación de la antena | Frecuencias en la banda de 2.4 y 5GHz. | Software CST |
| Parámetros de estructura | Dimensiones de la estructura de la antena. | Será medida en milímetros (mm) | Software CST |
| Dependiente | | | |
| Parámetros de Transmisión /Recepción | Parámetros de grado de funcionalidad y operación de la antena. | Ancho de banda Ganancia Directividad Eficiencia Coeficiente de Reflexión. | Software CST Software FEKO VNA. |

la guía de onda, al interior una estructura tipo helicoidal y una bocina que conecta la guía. La estructura tipo helicoidal esta diseñada en base a 5GHz funcionando en modo axial y además la alimentación se da mediante un conector tipo N macho, al cual están soldados los cables que proporcionarán la doble frecuencia.

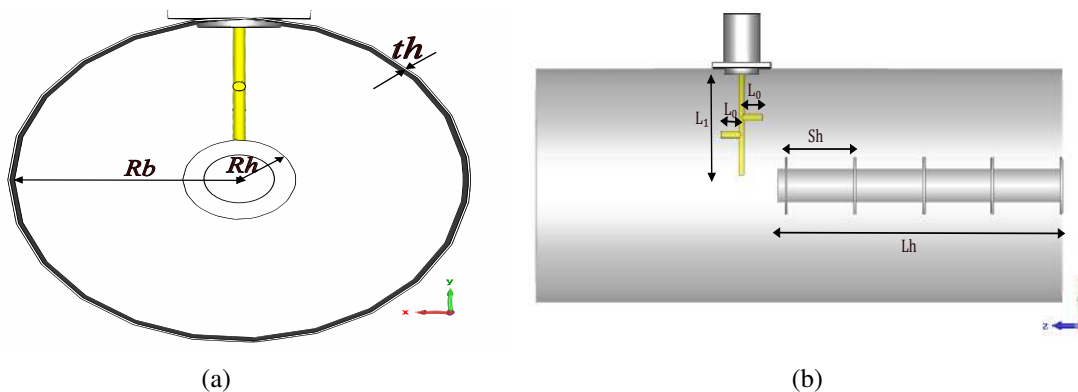


Figura. 3.11. Estructura de la guía circular vista frontal(3.11(a)) y vista lateral (3.11(b))

En la Figura 3.12 se muestra los resultados del parámetros S11 de la simulación del alimentador propuesto, en donde se nota que encuentra adaptado ($S_{11} < -10dB$) desde 2.19 a 2.56 GHz en la banda de 2.4GHz, mientras que en la otra banda esta adaptada desde 5.0 a 5.13GHz y de 5.16 a 5.30GHz. En la Figura 3.13(a) se observa el diagrama de radiación 3D simulado a la frecuencia de 2.4 GHz y se tiene una directividad 7.14 dB en cambio en la Figura 3.13(b) se tiene el diagrama de radiación a 5GHz alcanzando una directividad de 10.08 dB.

Ahora, al analizar el comportamiento de la directividad dentro de un rango de frecuencia específico, se observa en la Figura 3.14 los valores de directividad comprendidos entre 2.2 y 2.6 GHz para la banda de 2.4 GHz. Por otro lado, el comportamiento en otro rango, desde 4.8 hasta

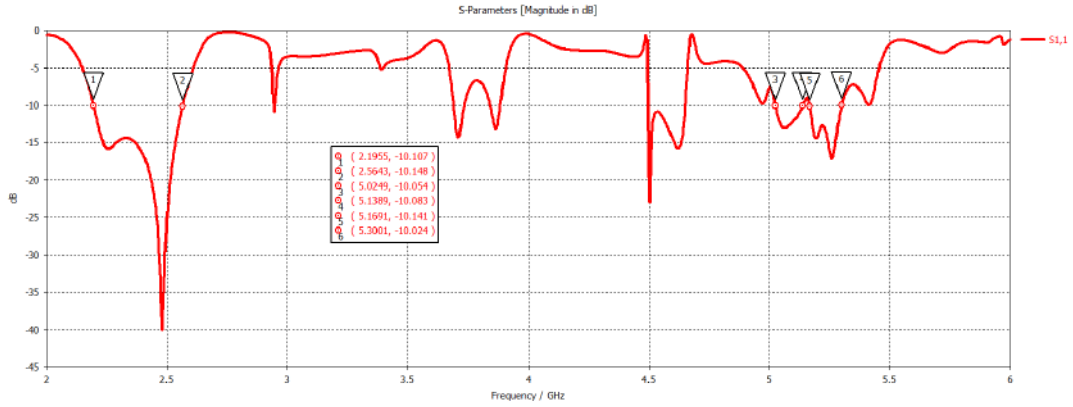


Figura. 3.12. Parámetro S11 simulado en CST del alimentador

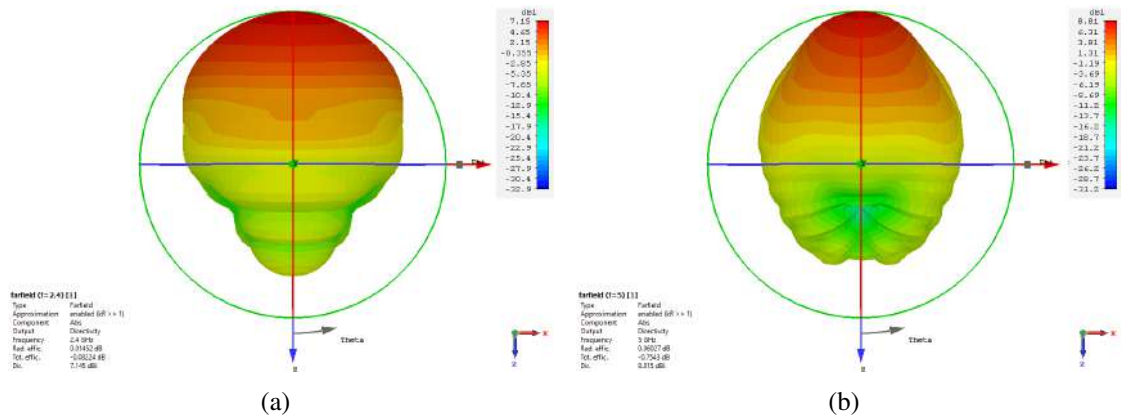


Figura. 3.13. Diagrama de radiación en 3D, vista superior de la guía circular a la frecuencia de 2.4GHz (3.13(a)) y a 5GHz (3.13(b))

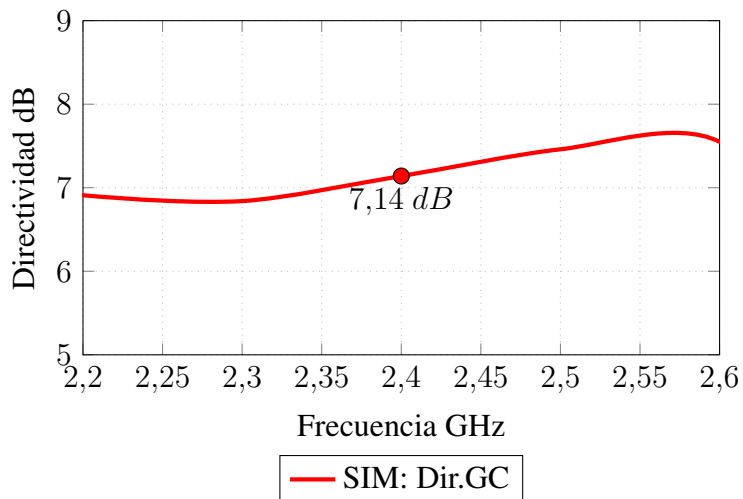


Figura. 3.14. Simulación de la directividad de la guía circular en el rango de 2.2 a 2.6 GHz

5.2 GHz, correspondiente a la banda de 5 GHz, se muestra en la Figura 3.15

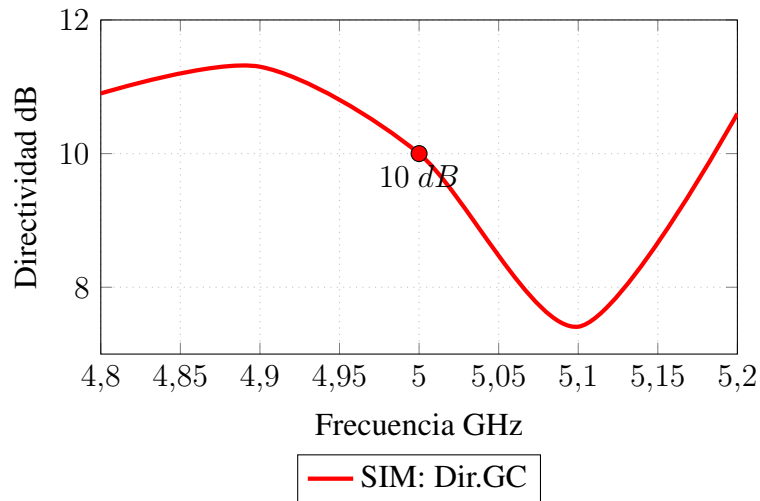


Figura. 3.15. Simulación de la directividad de la guía circular en el rango de 4.8 a 5.2 GHz

Si bien en este trabajo es diseñar una lente que eleve la directividad de una antena, se tiene que de alguna manera adecuar dicho alimentador, por lo que la guía debe aprovechar al máximo la lente sin embargo la guía tiene un problema típico tiene una desadaptación en la boca por lo que para corregir eso se coloca un cono truncado que le de el aspecto de una bocina, el radio de dicha bocina es de 109mm y se describe como **GCB** (Guía Circular con Bocina), al realizar esta modificación se tiene como objetivo elevar la directividad del alimentador y además de que la lente tenga un mejor soporte y acoplamiento en la fabricación.

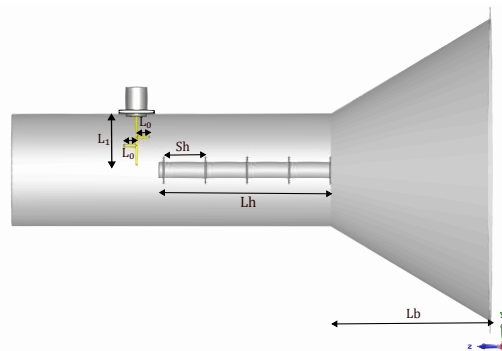


Figura. 3.16. Estructura de la guía de onda circular junto con el cono truncado (GCB)

En la Figura 3.16 se muestra la estructura completa del alimentador, en cuanto al parámetro S_{11} si lo comparamos con la **GC** (Guía Circular) se nota que tiene una mejor adaptación en la banda de 5 GHz que va desde 5,0 a 5,44 GHz como muestra la Figura 3.17

Por lo que el alimentador diseñado GCB funciona perfectamente en las dos frecuencias de interés, en la Figura 3.18(a) se muestra la simulación del campo lejano en 3D a 2.4GHz que tiene un valor de directividad de 13.63 dB y en la Figura 3.18(b) se muestra en torno a 5GHz que tiene un valor 15.69 dB en esta se observa que tiene un diagrama más direccional.

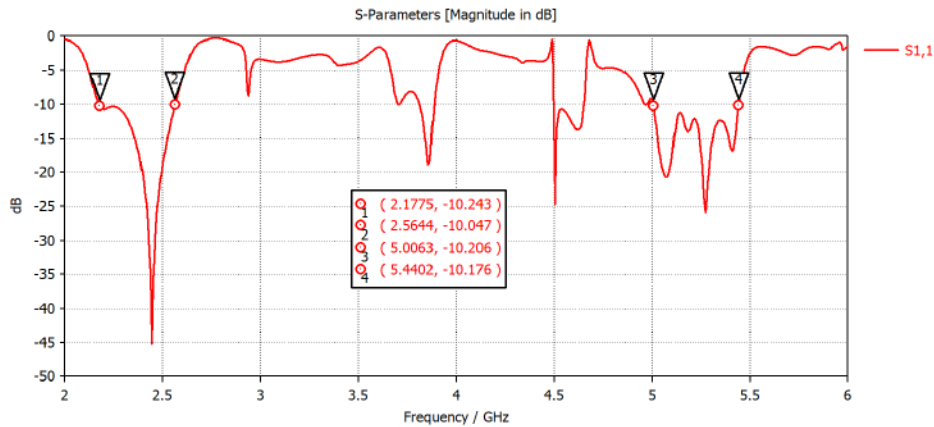


Figura. 3.17. Simulación del parámetro S11 de la antena GCB

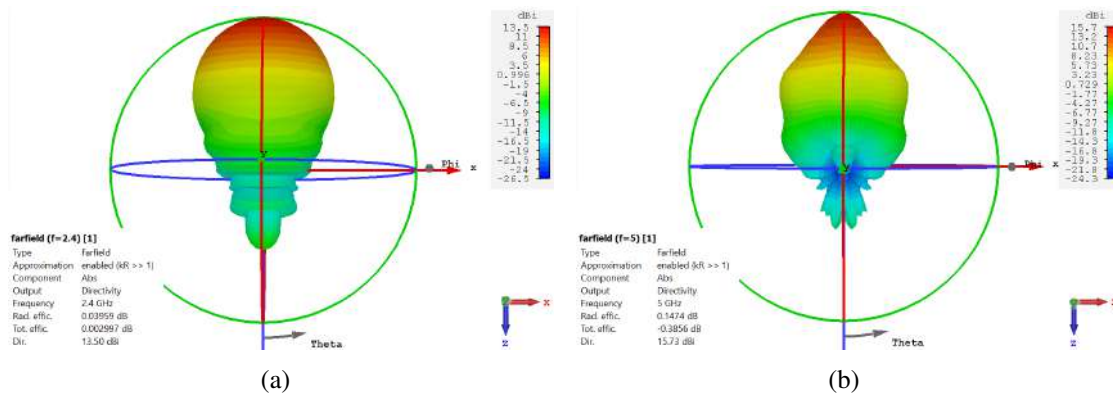


Figura. 3.18. Diagrama de radiación en 3D, vista superior de la guía circular a la frecuencia de 2.4GHz(3.18(a)) y 5 GHz(3.18(b))

En lo que respecta al diagrama de radiación en el plano de coordenadas polares a la frecuencia de 2.4 GHz, se puede observar en la Figura 3.19(a) el valor del nivel del lóbulo principal a secundario cuando el ángulo es igual a 0 en el plano E tiene un valor de -21.7dB y cuando el ángulo es igual a 90 en el plano H se tiene el mismo valor como muestra la Figura 3.19(b), de modo que se tiene una distribución uniforme del patrón de radiación en ambas direcciones.

Así mismo se analiza el diagrama de radiación en 5GHz, en la Figura 3.20(a) revela que el nivel de lóbulo principal a secundario alcanza -13.2 dB cuando el ángulo es 0 en el plano E, en cambio cuando el ángulo es 90 en el plano H, el valor es -22.2 como se muestra en la Figura 3.20(b). Estos valores nos dicen que hay una diferencia significativa en la distribución de energía radiada en esas direcciones.

Ahora se analiza la directividad del alimentador GCB con la GC para ello se muestra la Figura 3.21 en donde la banda de 2.4 GHz aumenta 6.06 dB respecto a la GC. Siguiendo el mismo análisis, se realiza un estudio en la banda de 5 GHz, como se muestra en la Figura 3.22, donde se observa un incremento de 5.51 dB. Cabe recalcar que la dimensión de la bocina tiene un límite,

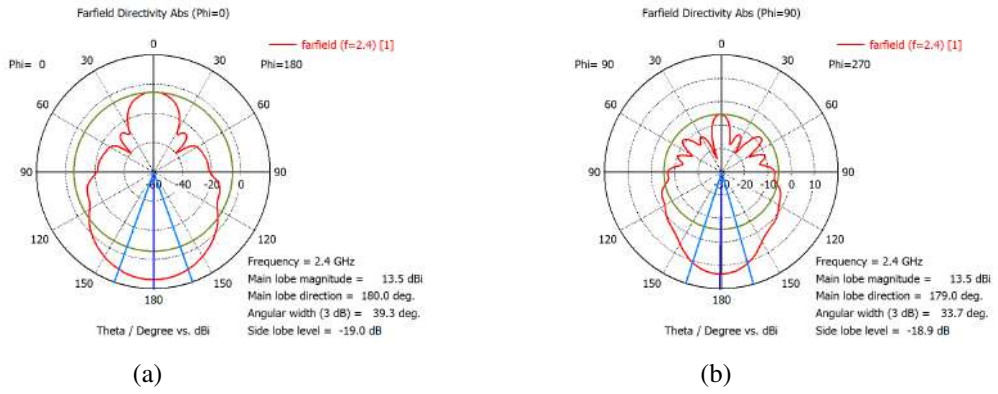


Figura. 3.19. Simulación del campo lejano en coordenadas polares a 2.4GHz para $\Phi=0$ (3.19(a)) ; $\Phi=90$ (3.19(b))

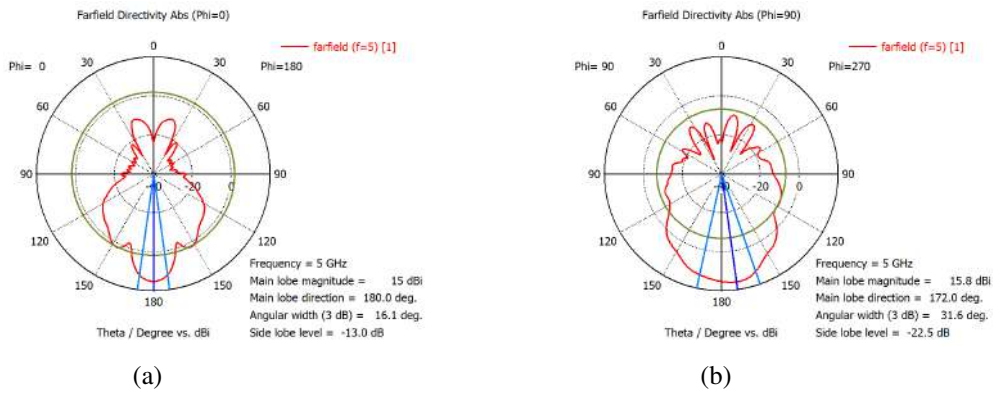


Figura. 3.20. Simulación del campo lejano en coordenadas polares a 5GHz para $\Phi=0$ (3.20(a)) y $\Phi=90$ (3.20(b))

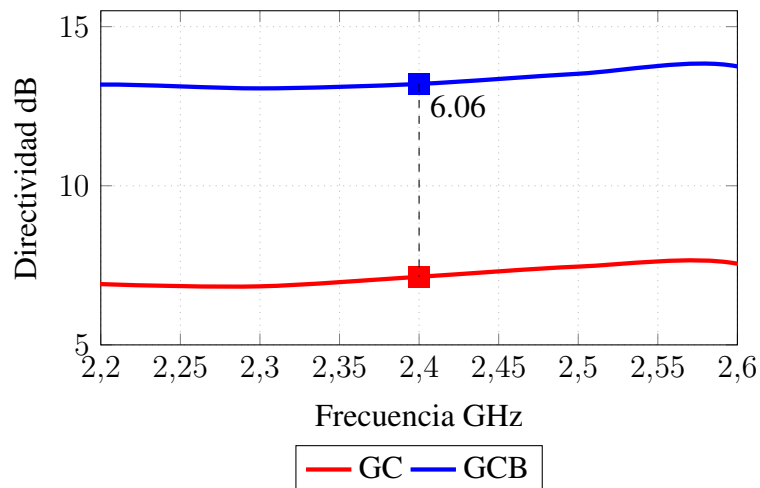


Figura. 3.21. Comparación de la directividad GC vs GCB en la banda de 2,4GHz

lo que se traduce en que habrá un punto en el que ya no se pueda elevar más la directividad. Esta es una de las limitaciones de la bocina; sin embargo, se planea superar esta limitación mediante

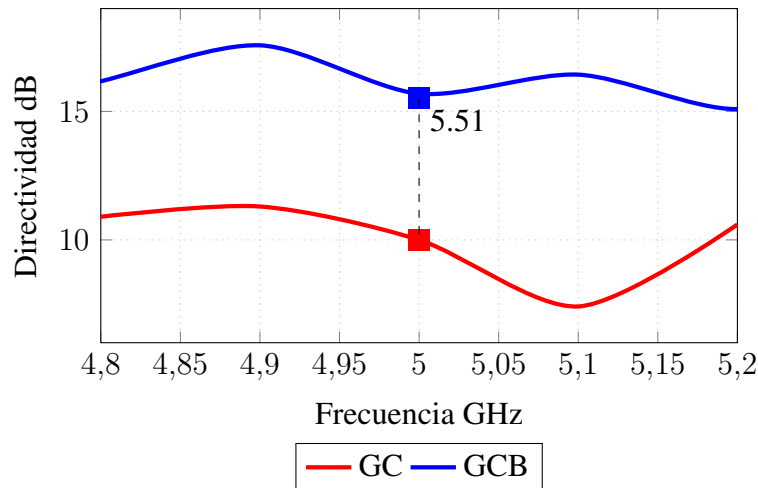


Figura. 3.22. Comparación de la directividad GC vs GCB en la banda de 5GHz

el uso de la lente.

Tabla 3.4. Dimensiones del Alimentador GCB.

| Dimensiones del Alimentador | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|------------|
| Variables | Valor (mm) | Variables | Valor (mm) |
| L_1 | 30 | L_0 | 9 |
| S_h | 30 | L_h | 124 |
| L_b | 115 | S_e | 15 |

3.1.8 Lente anillo central con 12 anillos externos

Para diseñar esta lente se parte del diseño [34] donde tiene un solo anillo que opera en la banda de 2,4 GHz, en sí es un anillo eléctricamente grande y su diámetro interno no supera los 6λ a la frecuencia de diseño. Se inicia con este anillo eléctricamente grande en virtud de que se planea colocar anillos de menor diámetro alrededor.

Como primer paso se define la frecuencia de diseño, no obstante como se pretende trabajar a doble banda se planea modelar varios anillos de diferente diámetro interno y de acuerdo con [21] se sabe que al variar el diámetro interno del anillo se puede modificar la frecuencia de resonancia de la estructura.

Para comenzar con el estudio se usa un anillo central que tiene las siguientes dimensiones: diámetro interno $Di_1 = 280mm$ ($4,6\lambda_{5GHz}$) ($2,24\lambda_{2,4GHz}$), ancho $Gr_1 = 25mm$ ($\lambda_{5GHz}/2$) ($\lambda_{2,4GHz}/4$) y espesor de $t_h = 0,65mm$, tal como se muestra en la Figura 3.23.

Puesto que el anillo central se diseño bajo la frecuencia de 5 GHz, ahora se debe colocar otro

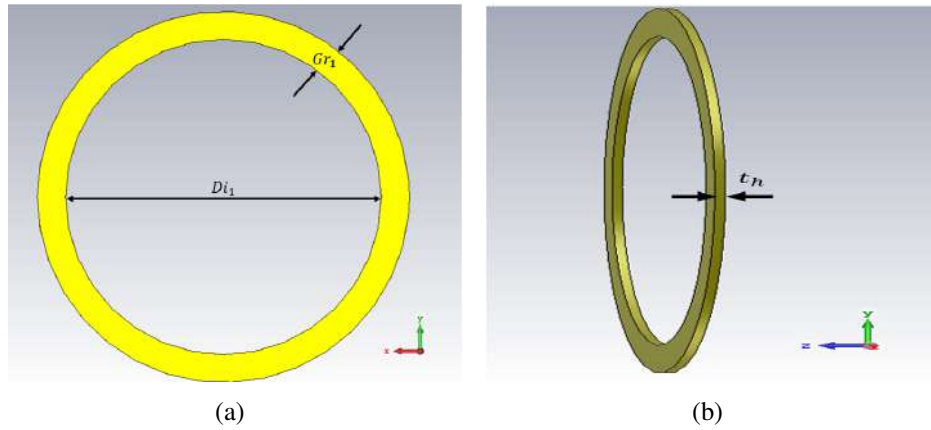


Figura. 3.23. Vista frontal del anillo 3.23(a) y Vista lateral 3.23(b)

anillo para que opere a 2,4 GHz, en relación a esto se modela 2 anillos coplanares mismo que su resonancia se basa en el perímetro de dichos anillos además que se tiene un mayor grado de libertad puesto que influye la separación de los anillos. Las dimensiones de los anillos

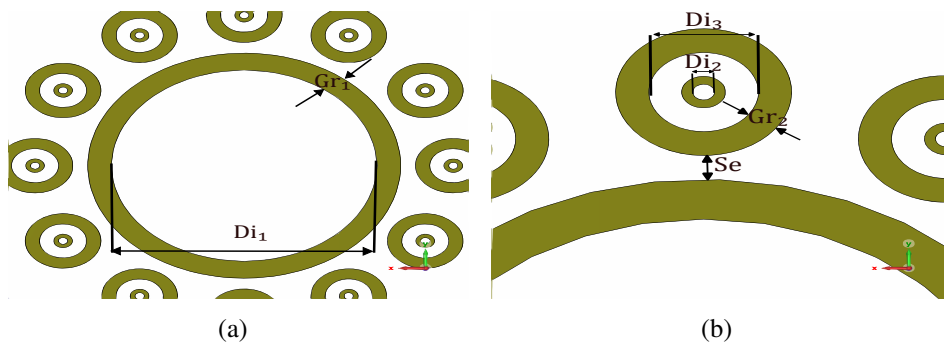


Figura. 3.24. Dimensiones de la lente propuesta, anillo central 3.24(a) y anillo coplanar 3.24(b)

son las siguientes: para el anillo interno, se tiene un diámetro interno de 10 mm. Con este valor, se calcula el perímetro, que aproximadamente es de 31 mm, equivalente a $(\lambda_{2,4GHz}/4)$ y $(\lambda_{5GHz}/2)$, y tiene un grosor de 5 mm.

Por otro lado, el anillo exterior tiene un diámetro interno de 25 mm, con un perímetro de aproximadamente 157 mm, equivalente a $(1,25\lambda_{2,4GHz})$ y $(2,51\lambda_{5GHz})$, y un grosor de 15 mm. La separación entre los anillos, que influye en la resonancia, es de 15 mm.

Se disponen un total de 12 anillos coplanares, cada uno separado por 15 mm del anillo central, estos anillos se distribuyen uniformemente, con una separación angular de 30° respecto al anillo central tal como se muestra en la Figura 3.24. Estos valores se han obtenido luego de realizar una optimización y escalamiento de frecuencia, sin embargo la funcionalidad de la lente se basa en resonadores a $\lambda/4$ y $\lambda/2$ en las dos frecuencias. El material que usa es cobre y tiene un espesor de 0,65 mm.

Tabla 3.5. Dimensiones de la lente propuesta.

| Dimensiones de la Lente | | | |
|-------------------------|------------|----------|------------|
| Variabes | Valor (mm) | Variabes | Valor (mm) |
| D_{i1} | 280 | D_{i2} | 10 |
| D_{i3} | 50 | G_{r1} | 25 |
| G_{r2} | 15 | S_e | 15 |

3.1.9 Análisis del punto focal

A continuación se realiza el análisis en donde se debe colocar la lente respecto al alimentador, para ello se usa el método incidencia de onda plana detallado en [21]. El método de incidencia de onda plana se basa en encontrar el punto focal, dicho punto es donde convergen los rayos de la onda electromagnética que se refleja en la lente. El punto focal se sitúa a una distancia focal (f) de la lente.

3.1.9.1 Incidencia de Onda Plana

Para encontrar el punto focal, tal como propone en [21] se hace un análisis de la lente en recepción, para esto el estudio consiste en iluminar la estructura por una fuente teórica de alimentación que emita una onda electromagnética plana, de modo que cuando esta onda incida sobre el cuerpo conductor, se produzca un fenómeno de difracción, por el cual el objeto vuelve a emitir parte de la energía interceptada, de tal forma que en una región más alejada de la estructura se encuentra una mayor concentración de energía (centro de fase esférico).

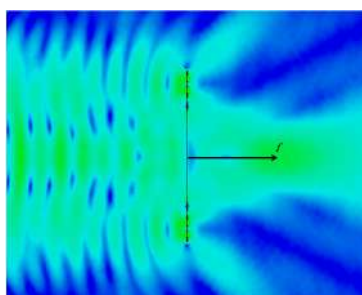


Figura. 3.25. Simulación de incidencia de onda plana a 2.4GHz

La simulación se muestra en la Figura 3.25 en donde la mayor concentración de energía se encuentra a 250 mm que este valor correspondería a la distancia focal. Para validar el valor de 250 mm obtenido en la incidencia de onda plana, se realizaron varias simulaciones modificando la distancia focal. En estas simulaciones, la lente se fue variando su posición respecto al alimentador, como se ilustra en la Figura 3.26.

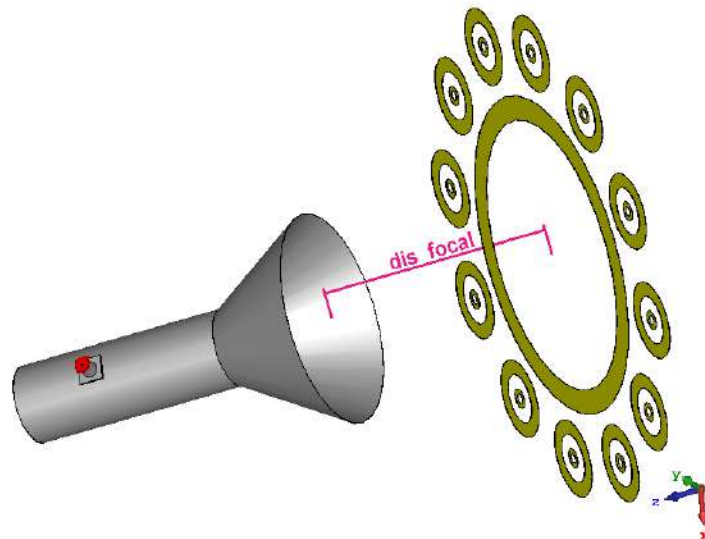


Figura. 3.26. Montaje del alimentador junto con la lente especificando la distancia focal

En la Figura 3.27 se tiene los valores de directividad según se ha modificado la distancia focal, en cuanto a la banda de 2,4 GHz se tiene un valor de directividad máxima de 16,1 dB a 250 mm, de la misma manera se realiza en la banda de 5 GHz en donde la directividad alcanza un valor máximo de 18,11 dB como se representa en la Figura 3.28.

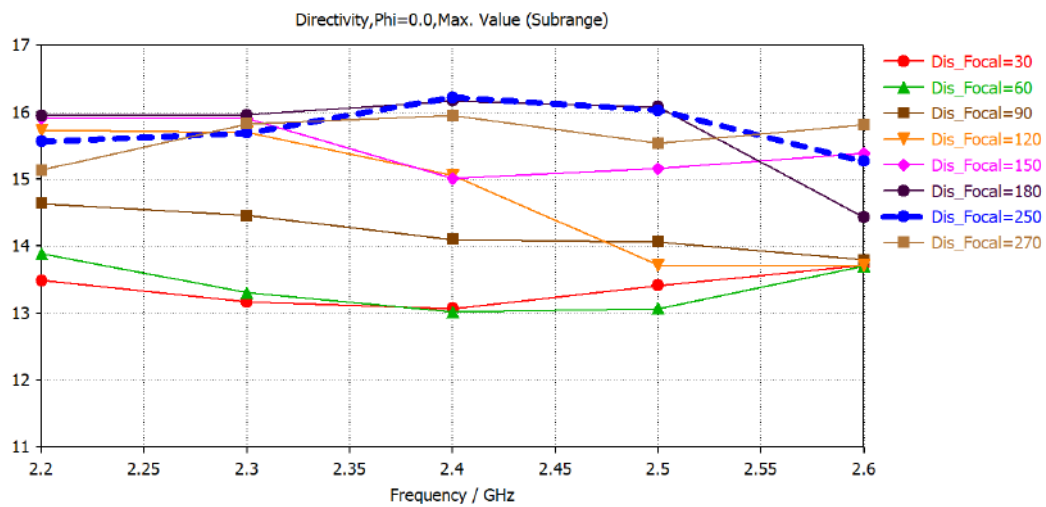


Figura. 3.27. Simulación de la directividad en función de la distancia focal en la banda de 2.4 GHz

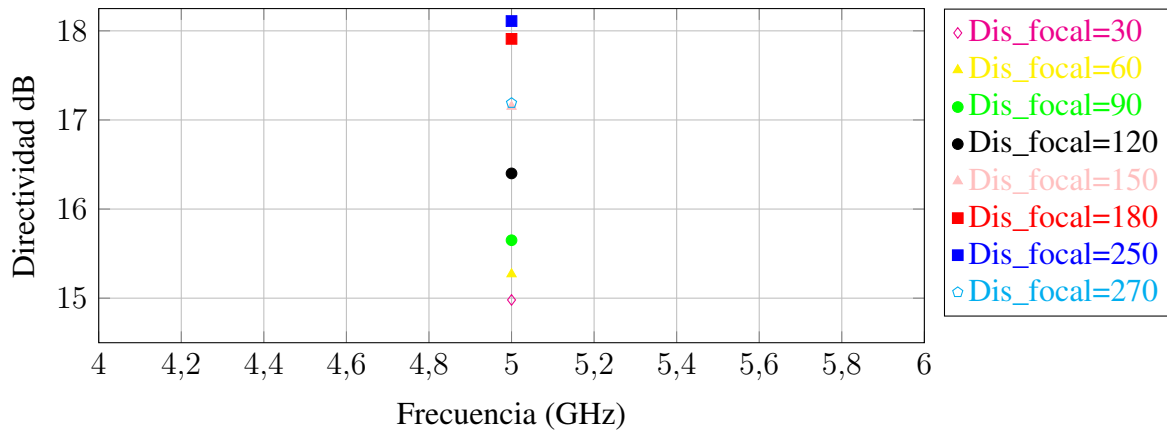


Figura. 3.28. Simulación la directividad en función de la distancia focal en la banda de 5GHz

3.1.10 Análisis mediante la TMC

En esta sección se analiza la estructura que conforma la lente metálica de modo que se examina de forma aislada cada elemento, es decir se parte con el estudio del anillo coplanar y luego el anillo central.

3.1.10.1 Anillo coplanar

Esta estructura consta de dos anillos. El anillo más pequeño tiene un radio de 5 mm, lo que le otorga un perímetro de 31 mm. Basándonos en esta medida, se estima que su resonancia se encuentra aproximadamente en 2 GHz. Por otro lado, el radio del anillo grande es de 25 mm, y su resonancia se produce a $\lambda/2$ que sería 5GHz.

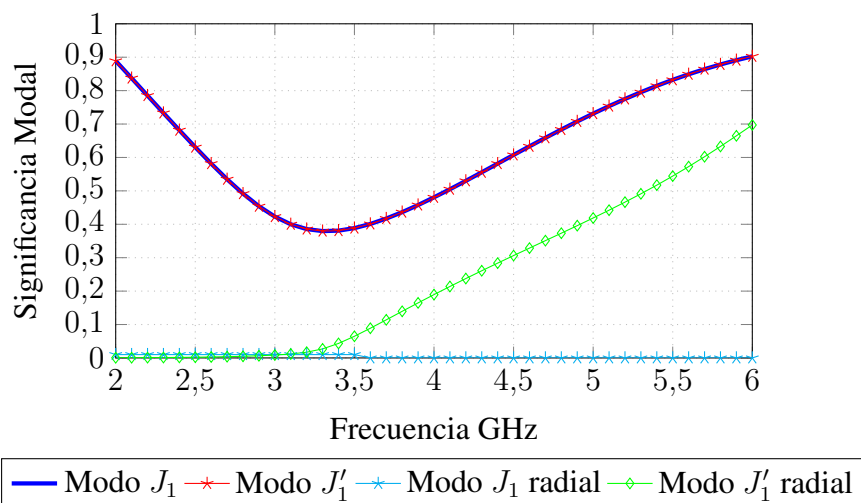


Figura. 3.29. Significancia Modal

En la Figura 3.29, se presentan los valores de significancia modal para los modos J_1 , J_1' ,

$J_1 radial$ y $J_1' radial$. Tanto el modo J_1 como su degenerado J_1' muestran significancia ($MSn \geq 0,7$) dentro del intervalo de frecuencias entre 2.0 GHz y 2.4 GHz, así como en el rango de 4.9 GHz a 6 GHz. Por otro lado, el modo $J_1' radial$ es significativo a 6 GHz. Es importante destacar que el modo degenerado $J_1 radial$ presenta un valor de cero en todo el rango pero se coloca con su par, su valor es nulo debido a que las dimensiones del anillo en sí no exhiben una resonancia natural a 2.4 GHz. En la Figura 3.30, se presenta la distribución de corrientes y el patrón de radiación asociados al modo J_1 , mientras que en la figura 3.31, se muestra su modo ortogonal J_1' . De acuerdo con la TMC los modos J_1 y J_1' están caracterizados por corrientes en la dirección vertical y horizontal, respectivamente. Estos modos presentan 2 nullos de corriente en $\phi = 90^\circ$ y $\phi = 0^\circ$ respectivamente.

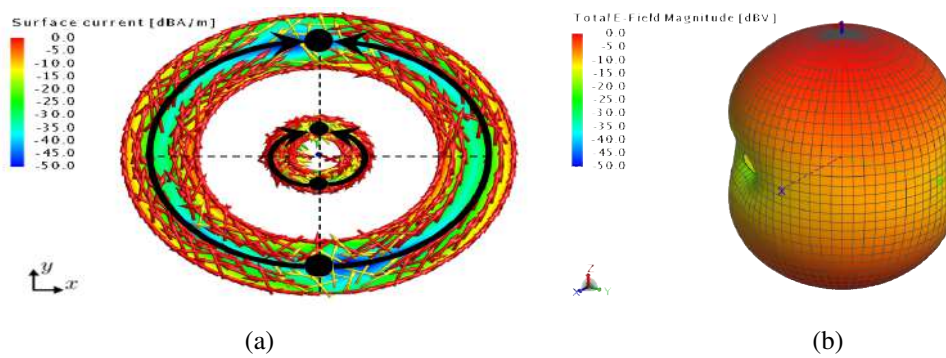


Figura. 3.30. Distribución de corriente superficial modo J_1 3.30(a) y patrón de radiación 3.30(b) del anillo coplanar a 2 GHz

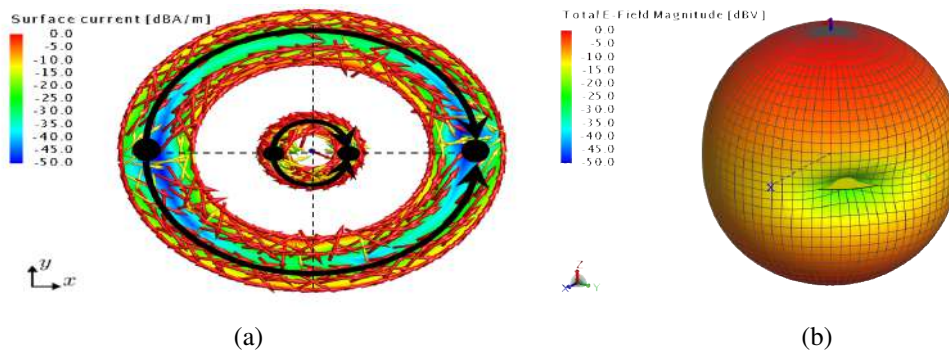


Figura. 3.31. Distribución de corriente superficial del modo J_1' 3.31(a) y patrón de radiación 3.31(b) del anillo coplanar a 2GHz

De la misma manera se analiza los modos J_1 y J_1' a 5 GHz tal como se muestra en las Figuras 3.32 y 3.33 cabe recalcar que al elevar la frecuencia el patrón de radiación cambia, a pesar que tenga la misma distribución de corrientes.

Por último se examina el modo $J_1' radial$ su característica es que sus corrientes van en sentido radial, tal como se muestra en la figura 3.34(a).

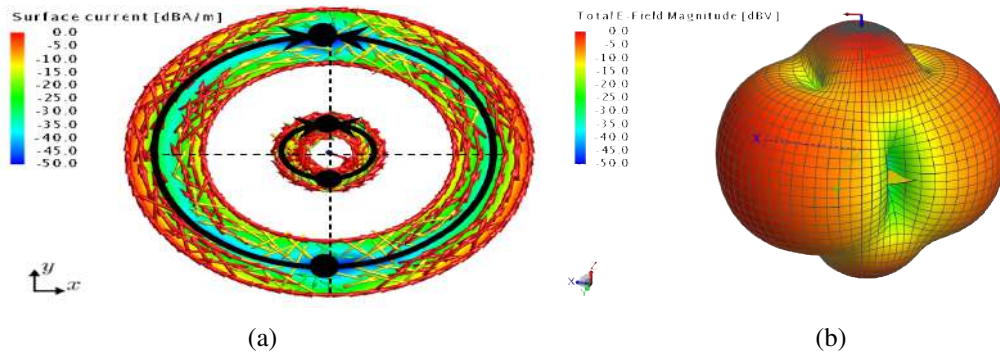


Figura. 3.32. Distribución de corriente superficial del modo J_1 3.32(a) y patrón de radiación 3.32(b) del anillo coplanar a 5GHz

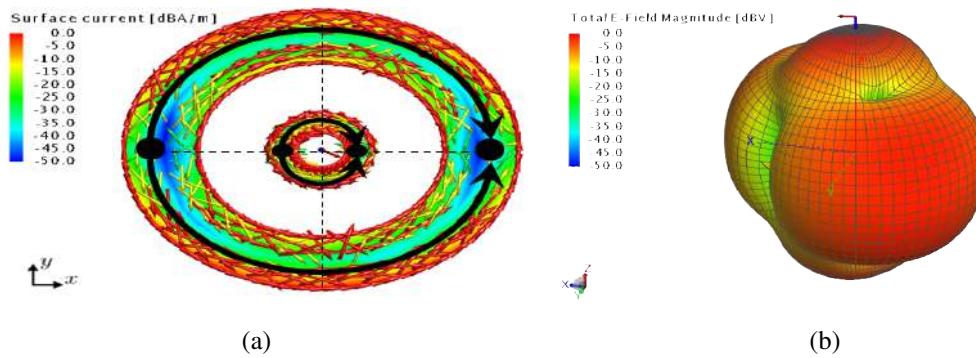


Figura. 3.33. Distribución de corriente superficial del modo J'_1 3.33(a) y patrón de radiación 3.33(b) del anillo coplanar a 5GHz

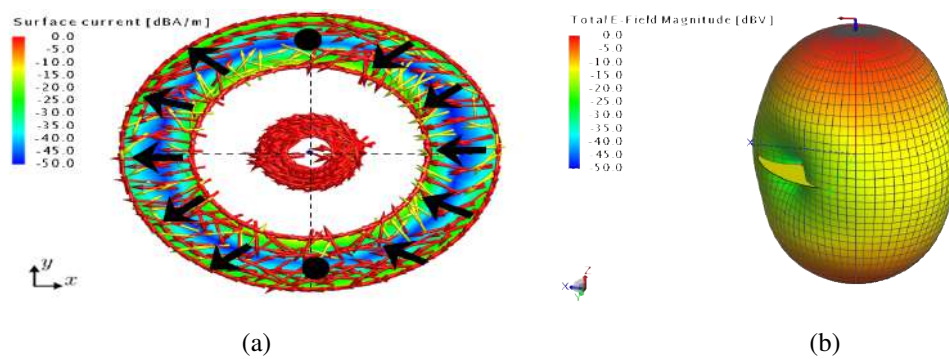


Figura. 3.34. Distribución de corriente superficial del modo J'_1 radial 3.34(a) y patrón de radiación 3.34(b) del anillo coplanar a 5GHz

Una vez que se examinó los modos, es necesario analizar la contribución de cada modo a la potencia total radiada. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 3.35 donde los valores se muestran en porcentaje, de ahí se puede deducir que los modos J_1 y J'_1 en la banda de 2,4GHz proporcionan un 69% y 37% de contribución a la potencia total radiada, respectivamente.

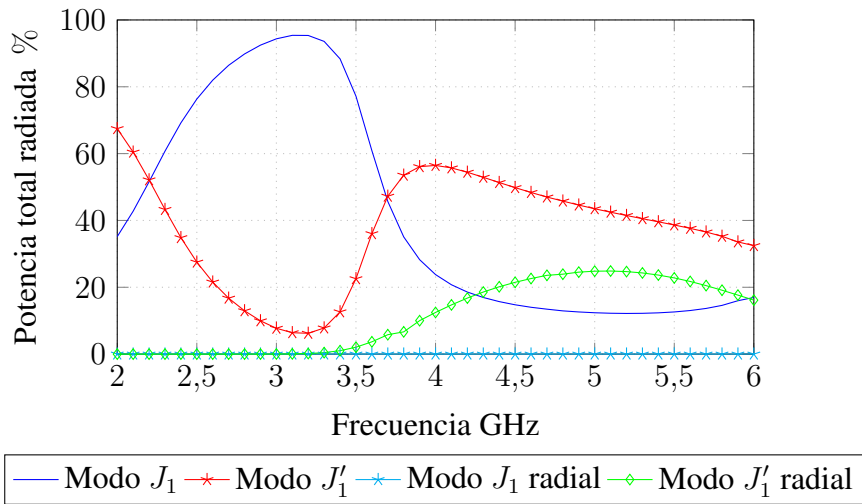


Figura. 3.35. Contribución de potencia en % de cada modo a la potencia total radiada en el rango de 2 a 6 GHz

En cambio para la banda de 5GHz los modos J_1 , J_1' y J_1' radial, contribuyen con 12.5 % 43.5 % y 24.8 % respectivamente. Por otra parte en la Figura 3.36 se muestra los resultados de la simulación respecto a la contribución de potencia nominal de cada modo.

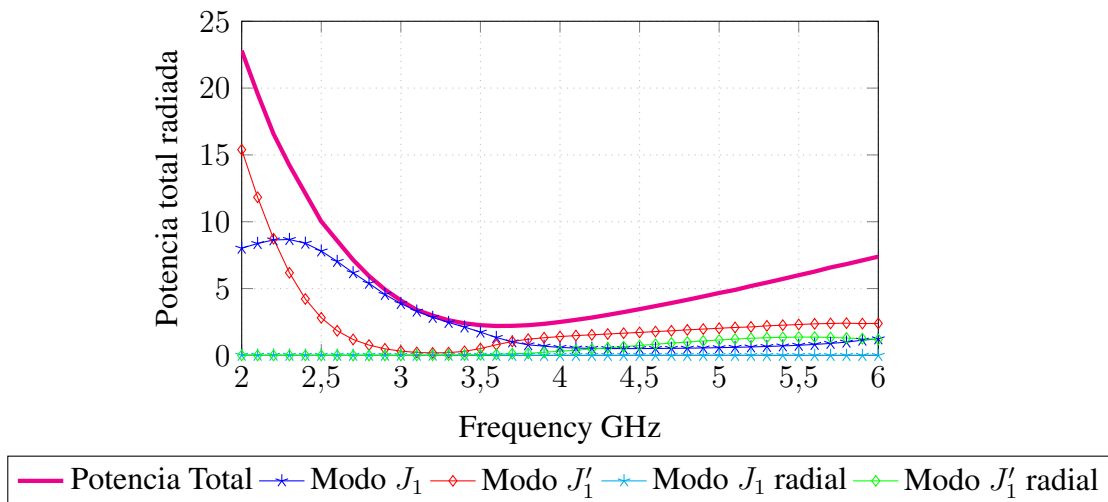


Figura. 3.36. Contribución de potencia de cada modo a la potencia total radiada en el rango de 2 a 6 GHz

3.1.10.2 Anillo Central

Para el análisis del anillo central, se examina en la banda de 5 GHz con el objetivo de identificar los modos que son excitados y evaluar su contribución de potencia respectiva. Además que este anillo es el que eleva la directividad en dicha banda de modo que se pretende observar su comportamiento.

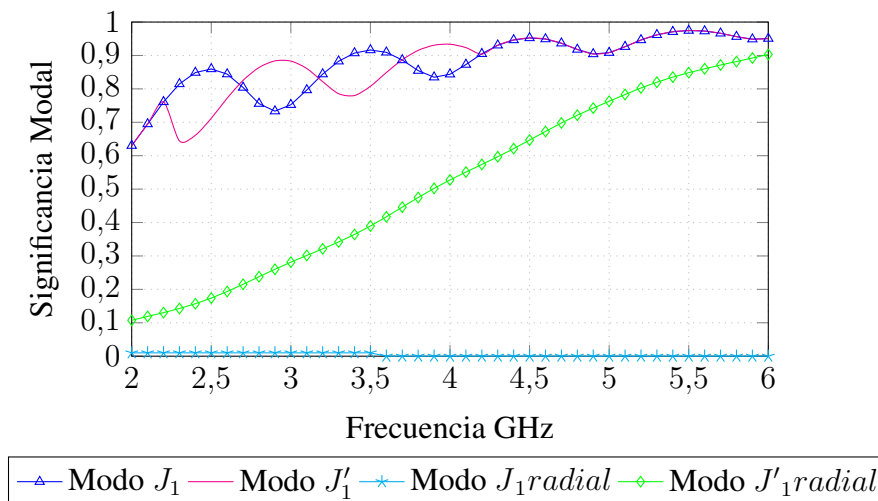


Figura. 3.37. Significancia modal del anillo central

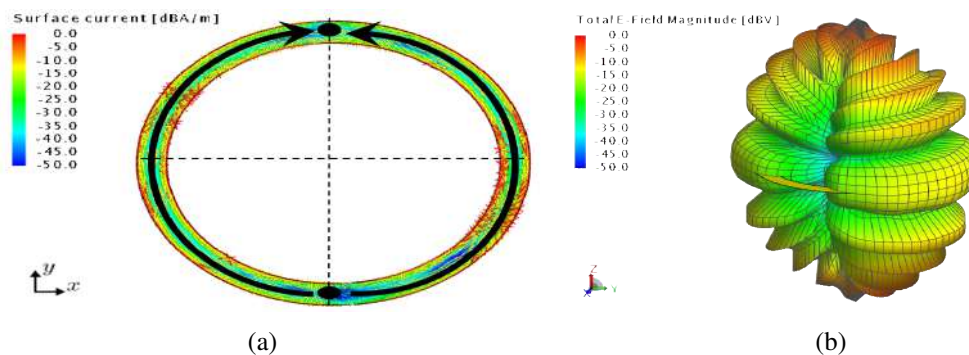


Figura. 3.38. Distribución de corriente superficial del modo J_1 3.38(a) y patrón de radiación 3.38(b) del anillo central a 5GHz

En la Figura 3.37, se presentan los valores de significancia modal para los modos J_1 , J'_1 , $J_1radial$, y $J'_1radial$. Tanto el modo J_1 como su degenerado J'_1 muestran significancia ($MSn \geq 0,7$) dentro del intervalo de frecuencias entre 2.2 GHz a 6 GHz. Por otro lado, el modo $J'_1radial$ es significativo desde 4.8 GHz mientras que su degenerado no es significativo en todo el rango.

En la Figura 3.38 se presenta la distribución de corriente superficial correspondiente al modo J_1 , junto con su patrón de radiación. Se destaca la diferencia con respecto al patrón de radiación del anillo coplanar a 5 GHz puesto que el anillo central es más grande. Del mismo modo, en la Figura 3.39 se ilustra el modo J'_1 , donde se observa una distribución de corrientes horizontal

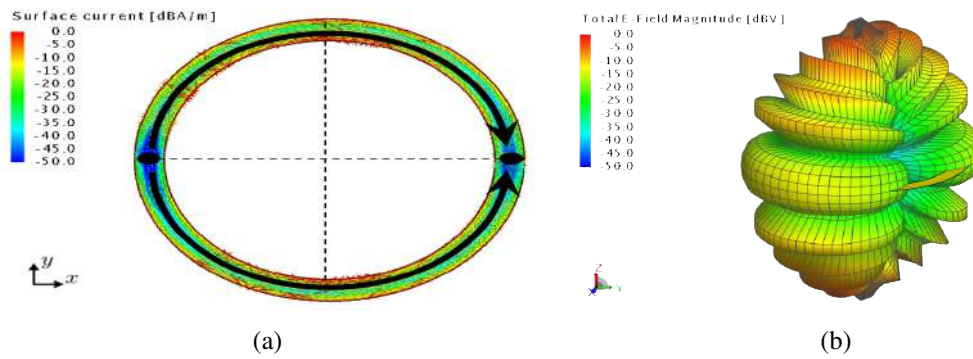


Figura. 3.39. Distribución de corriente superficial del modo J_1' 3.39(a) y patrón de radiación 3.39(b) del anillo central a 5GHz

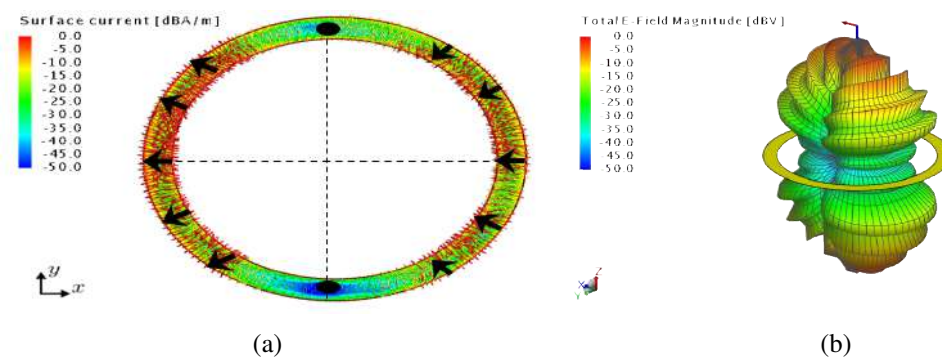


Figura. 3.40. Distribución de corriente superficial del modo J_1' radial 3.40(a) y patrón de radiación 3.40(b) del anillo central a 5GHz

debido a su degeneración. El otro modo que se examina es el J_1' radial, su distribución de corriente se concentra en los bordes, que tienen una orientación radial. Los nulos de la distribución se encuentran en los ángulos $\phi = 0^\circ$ y $\phi = 90^\circ$ tal como se muestra en la Figura 3.40.

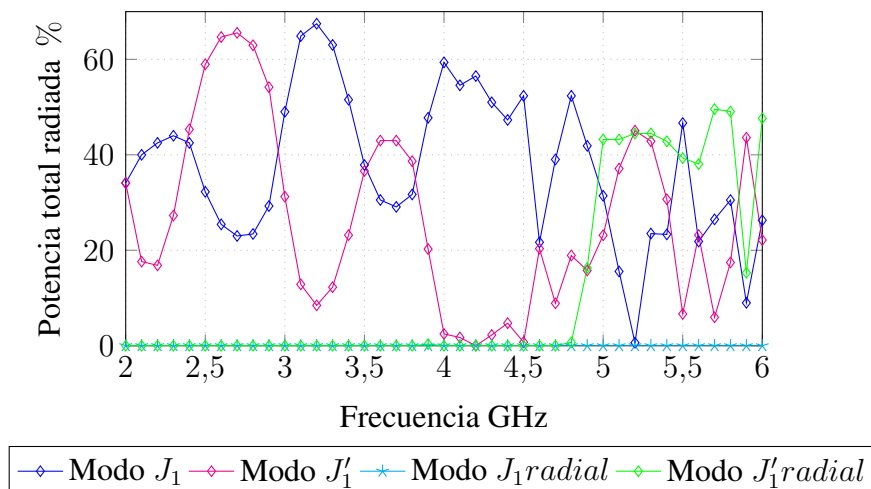


Figura. 3.41. Contribución de potencia en % de los modos en el anillo central en el rango de 2 a 6 GHz

Tabla 3.6. Porcentaje de contribución de potencia de los modos en las bandas de 2.4 y 5 GHz tanto para el anillo y central y el coplanar

| Modo | 2.4 GHz | 5 GHz | Anillo |
|--------------|---------|-------|----------|
| J_1 | 69 % | 11 % | Coplanar |
| J'_1 | 37 % | 41 % | Coplanar |
| $J'_1radial$ | 0 % | 22 % | Coplanar |
| J_1 | 41 % | 31 % | Central |
| J'_1 | 42 % | 22 % | Central |
| $J'_1radial$ | 0 % | 41 % | Central |
| $J_1radial$ | 0 % | 0 % | Ambos |

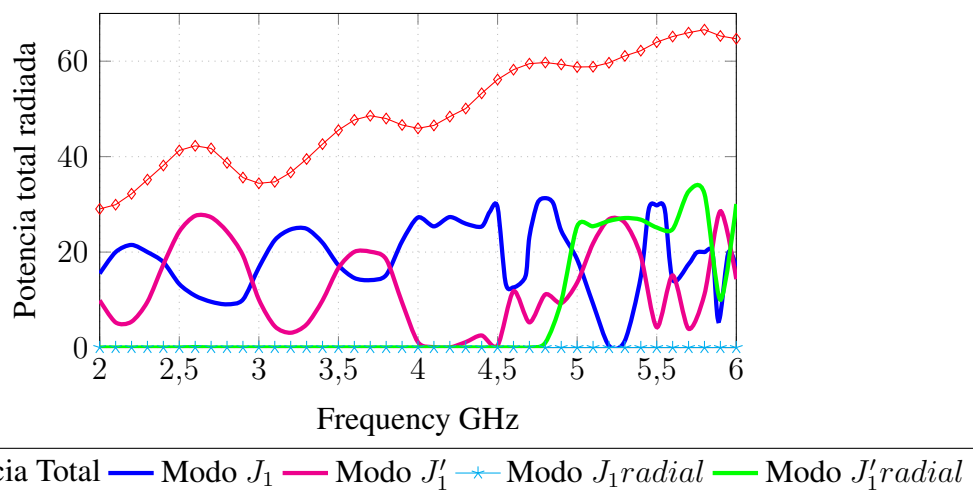


Figura. 3.42. Contribución de potencia nominal de los modos en el anillo central en el rango de 2 a 6 GHz

En la Figura 3.41, se muestra el porcentaje de contribución de los modos característicos del anillo central a la potencia radiada total. Se observa que en la banda de 2.4 GHz, los modos J_1 y J'_1 contribuyen con un 41 % y 42 % de potencia respectivamente. En la banda de 5 GHz, el modo que más contribuye es $J'_1radial$ con un 41 %, seguido por J_1 con un 31 %, mientras que J'_1 aporta un 22 %. Por otra parte, en la Figura 3.42 se presentan los resultados de la simulación sobre la contribución nominal de potencia de cada modo.

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados y Discusiones

4.1.1 Análisis e Interpretación de resultados

Una vez que se ha diseñado la antena, en este capítulo se trata sobre los resultados obtenidos de las simulaciones en cuanto a directividad, ganancia, ancho de banda, y frecuencia de operación, los mismos que se plasmaron en los objetivos del proyecto.

4.1.1.1 Análisis del alimentador con la lente

Luego que se ha diseñado la lente se procede a hacer un análisis de su funcionamiento, el mismo que será con alimentador y con la lente. Lo primero que se analiza es la adaptación en la Figura 4.43 se muestra que al colocar la lente no existe un cambio significativo, por lo que se tiene que en 2.4 GHz se encuentra bien adaptado y tiene un ancho de banda de aproximadamente de 310MHz.

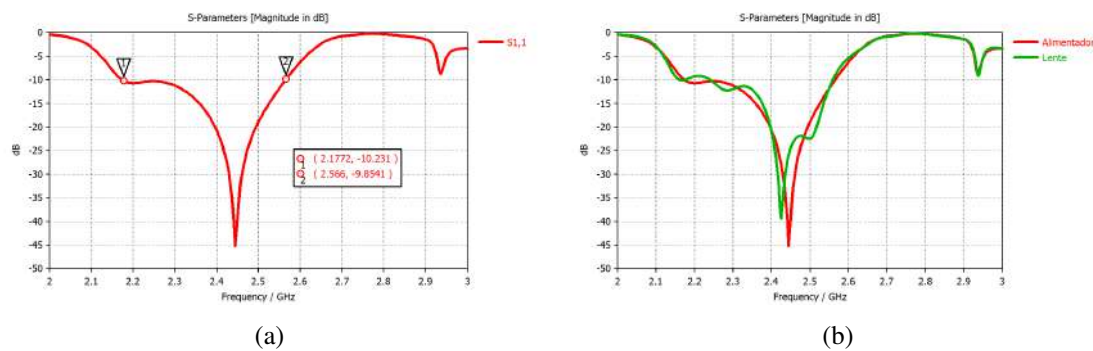


Figura. 4.43. Simulación del parámetro S11 del alimentador 4.43(a) y de la lente 4.43(b) en la banda de 2.4GHz

En cuanto a la banda de 5GHz se tiene un adaptación más pronunciada en el rango de 5.24 GHz a 5.33 GHz, no obstante hay adaptación en torno a la banda de 5GHz y tiene un ancho de banda total de 270 MHz tal como se muestra en la Figura 4.44.

En la Figura 4.45 se muestra la simulación de la máxima directividad obtenida del alimentador, en comparación con la máxima directividad una vez que se coloca la lente. Como se puede observar, la máxima directividad obtenida es de 16 dB a 2.4 GHz lo que corresponde a un incremento de 2.48 dB respecto al alimentador. Siguiendo el mismo análisis en la Figura 4.46

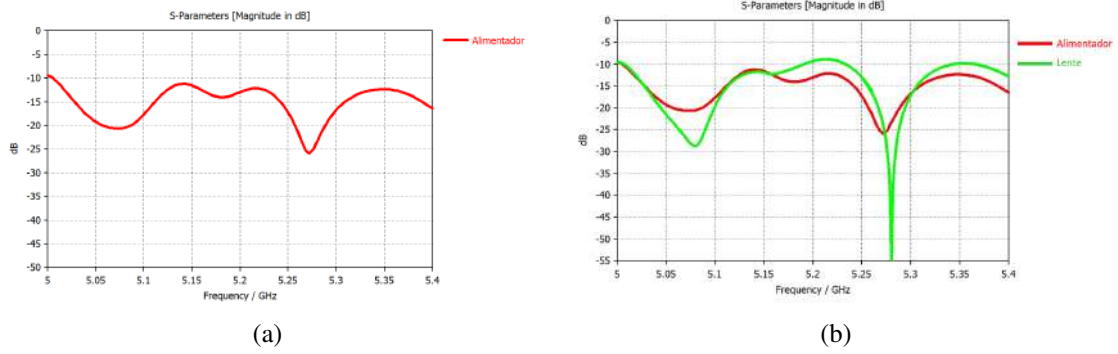


Figura. 4.44. Simulación del parámetro S11 del alimentador 4.44(a) y de la lente 4.44(b) en la banda de 5GHz

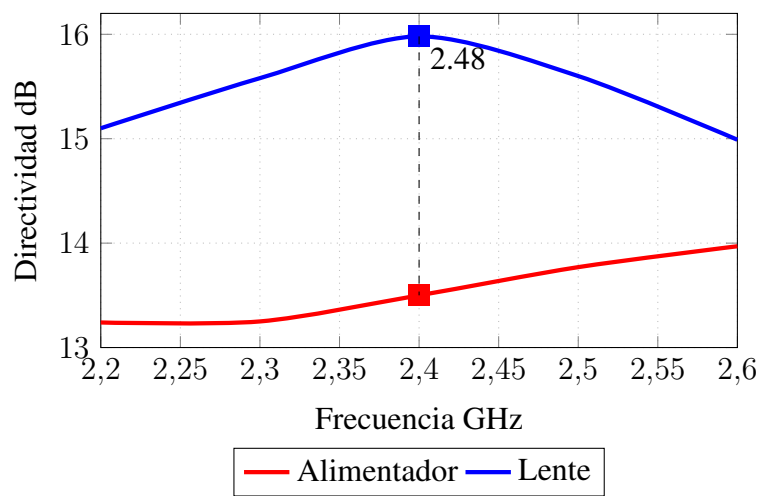


Figura. 4.45. Simulación de la directividad del alimentador vs lente en la banda de 2.4GHz

se muestra la simulación de la máxima directividad obtenida del alimentador, en comparación con la máxima directividad una vez que se coloca la lente. Como se puede observar, la máxima directividad obtenida es de 18.11 dB a 5 GHz lo que corresponde a un incremento de 2.56 dB respecto al alimentador.

En la Figura 4.47 se tiene la simulación de los campos lejanos a 2.4GHz y 5GHz en 3D cuando se coloca la lente al alimentador, tal como se observa para 2.4 GHz presenta un patrón de radiación direccional así mismo en 5 GHz se nota mayor concentración de energía. Estos resultados sugieren cambios significativos en la distribución de energía según la frecuencia.

En la Figura 4.48 se muestra la simulación del campo eléctrico en la banda de 2.4 GHz y 5 GHz respectivamente. Se nota como la lente transforma un onda de frente esférico en un frente de onda plano

En relación al resultado del diagrama de radiación en el plano de coordenadas polares, se mues-

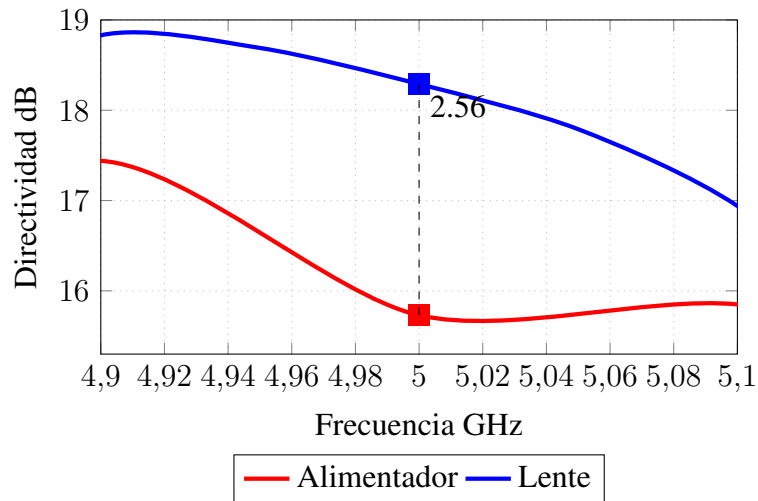


Figura. 4.46. Simulación de la directividad del alimentador vs lente en la banda de 5GHz

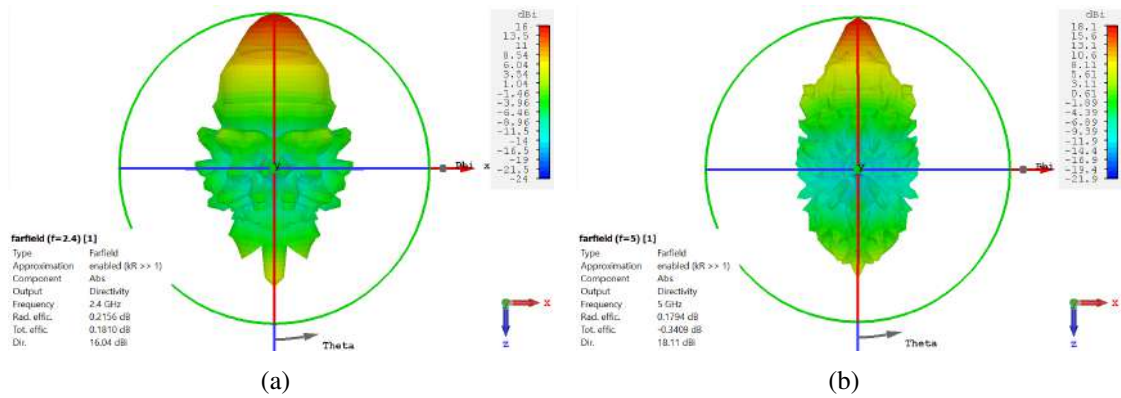


Figura. 4.47. Simulación del campo lejano en 3D a 2.4GHz 4.47(a) y 5GHz 4.47(b)

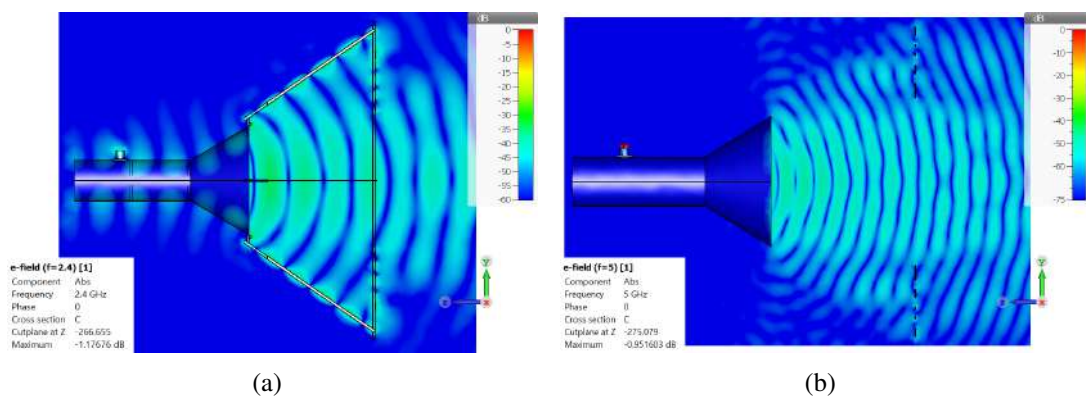


Figura. 4.48. Simulación del campo eléctrico a 2.4GHz 4.48(a) y 5GHz 4.48(b)

tra en la figura 4.49(a) la simulación del campo lejano a 2.4 GHz cuando $\Phi=0$ en el plano E, con un valor del nivel del lóbulo principal al secundario de -9.3 dB. De manera similar, en la figura 4.49(b) se presenta la simulación del campo lejano a 2.4 GHz cuando $\Phi=90$ en el plano H, con un valor del nivel del lóbulo principal al secundario de -6.9 dB.

Estos resultados indican que la presencia de la lente influye en la distribución de potencia, mientras que el alimentador sin la lente exhibía un diagrama de radiación más uniforme, la lente concentra la energía en una dirección específica. En este caso, los resultados sugieren que la lente metálica afecta principalmente la dirección angular $\Phi=0$, donde se observa una mayor diferencia de potencia entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario en comparación con $\Phi=90$.

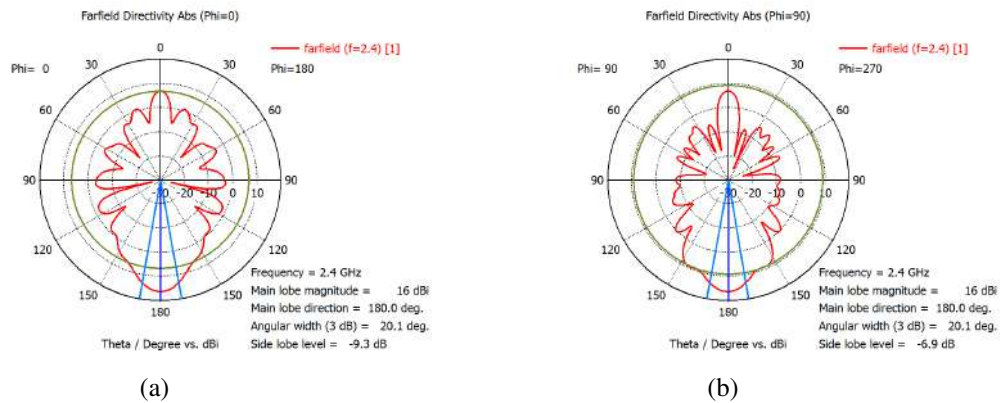


Figura. 4.49. Simulación del campo lejano a 2.4GHz para $\Phi=0$ 4.49(a) y para $\Phi=90$ 4.49(b)

De la misma manera que se analizó el diagrama de radiación a 2.4GHz, ahora se analiza en 5GHz, en la figura 4.50(a) se muestra la simulación del campo lejano a 5GHz cuando $\Phi=0$ presenta un valor de nivel de lóbulo principal a secundario de -11.1dB. En cambio cuando $\Phi=90$ se tiene un valor de -5.7dB tal como muestra la figura 4.50(b). Al igual que en 2.4GHz en 5GHz la presencia de la lente influye en la distribución de potencia de modo que focaliza la energía en una dirección.

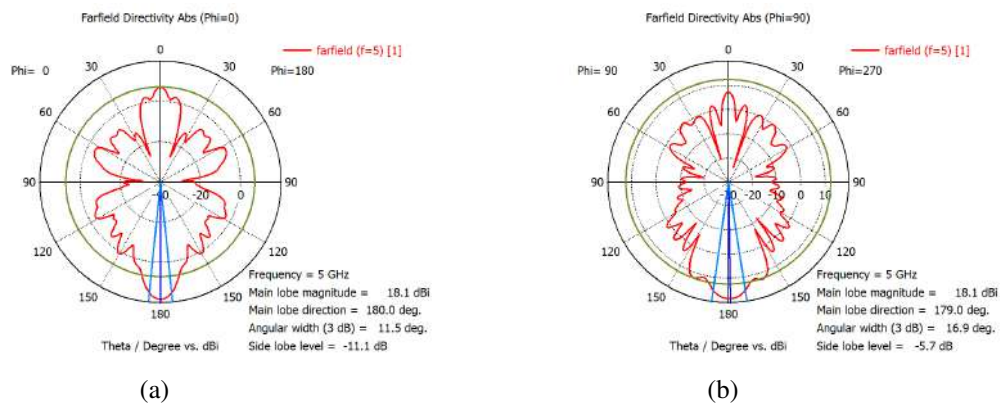


Figura. 4.50. Simulación del campo lejano a 5GHz para $\Phi=0$ 4.50(a) y para $\Phi=90$ 4.50(b)

Para validar el funcionamiento de la lente metálica, se realiza una medición utilizando el Analizador de Redes Vectorial (VNA). Durante esta medición, se evalúa el parámetro S11 en dos rangos de frecuencia. En la Figura 4.51 se muestra el resultado de esta medición, donde se

observa una buena concordancia entre los valores obtenidos experimentalmente y aquellos simulados previamente. Este hallazgo indica una validación satisfactoria del comportamiento de la lente metálica. Cabe señalar que la lente metálica se coloca sobre material FOAM que tiene un valor de $\epsilon_r \approx 1,035$ y para el soporte de la lente y el alimentador se coloca varilla roscada como se ilustra en los anexos.

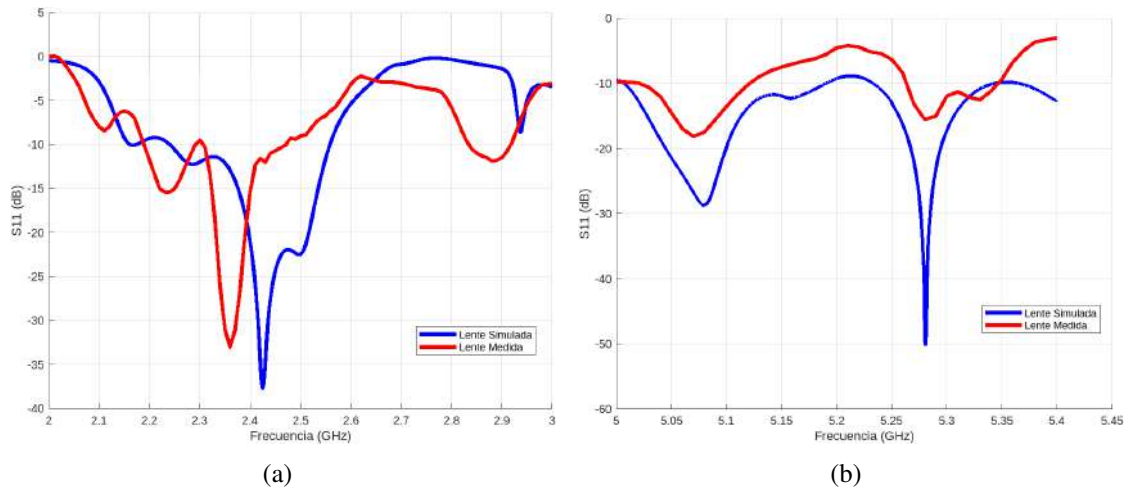


Figura. 4.51. Comparación del parámetro simulado vs medido de la lente en la banda de 2.4GHz 4.51(a) y para la banda de 5GHz4.51(b)

4.1.2 Eficiencia de la antena

En cuanto al diseño del alimentador, lo que se busca es conseguir una eficiencia elevada y un nivel bajo de polarización cruzada [21], como se definió anteriormente el alimentador es la guía de onda circular acoplada a una bocina (GCB), la misma que opera en dos bandas que son 2.4 GHz y 5GHz, en la sección 3.1.9 se analizó el punto focal de la lente metálica respecto al alimentador. Lo siguiente que se realiza es modelar el alimentador como una función de coseno teórica, con el objetivo de calcular las eficiencias teóricas η_s , η_{il} y η_{ap} y directividad de la lente metálica de una capa formada por un anillo central y 12 anillos coplanares alrededor tal como se explica en [21].

4.1.2.1 Eficiencia a 2.4GHz

Las dimensiones de la lente metálica se muestra en la Figura 3.24 bajo estas dimensiones se realizó el análisis del punto focal mediante la incidencia de onda plana en la estructura de manera que se encontró el lugar geométrico donde se halla la mayor concentración de campo eléctrico [21], el valor del punto focal corresponde a $f = 250mm$.

Además se puede modelar el campo eléctrico en la línea donde se ubica la lente metálica como una función de coseno empleando la ecuación 2.14, en la cual al variar el parámetro n se puede hallar la expresión matemática del campo eléctrico que corresponde al valor simulado [21]. El resultado se muestra en la Figura 4.52 donde se indica la expresión matemática del campo eléctrico incidente de la **GCB** corresponde a $E_i = 40(\cos \theta)^{3,5}(V/m)$, para la frecuencia central de 2.4 GHz

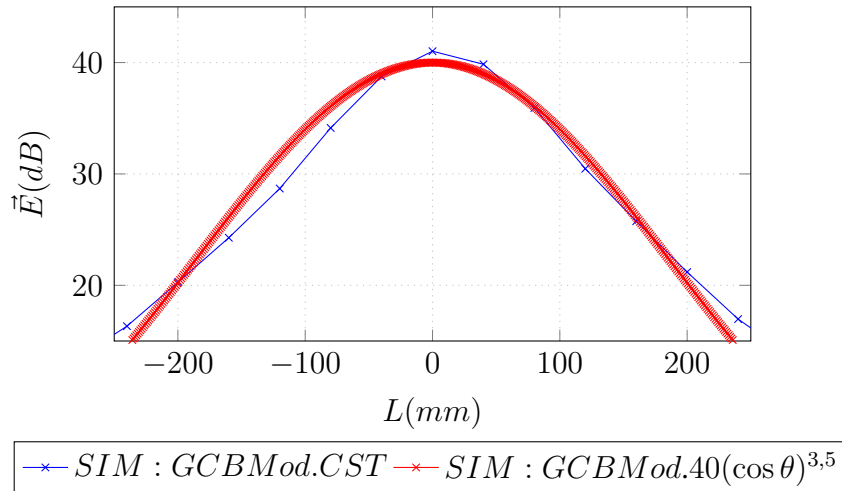


Figura. 4.52. Modelado del campo eléctrico en una línea de longitud $L=520\text{mm}$ a una distancia $f = 250\text{mm}$ de la guía circular con bocina (GCB) a 2.4GHZ

Se puede observar que el campo simulado en CST en la línea colocada a una distancia $f=250$ mm de la **GCB** se puede modelar como una función de coseno, cuya expresión matemática es $E_i = 40(\cos \theta)^{3,5}(V/m)$, como se ilustra en 4.52. La eficiencia teórica de la apertura, cuando se ubica la lente metálica de diámetro externo $D = 520 \text{ mm}$ a una distancia f del alimentador GCB se obtiene al utilizar las ecuaciones descritas en la sección 2.2.3.3. De modo que la eficiencia teórica calculada de la apertura tiene un valor de $\eta_{ap} = 85,53 \%$ como se muestra en la Figura 4.53.

4.1.2.2 Eficiencia a 5GHz

Siguiendo en mismo análisis se calcula las eficiencias teóricas para la banda de 5 GHz, al igual se modela el campo eléctrico en una línea donde se ubica la lente metálica como una función coseno y se varía el parámetro n para encontrar la expresión matemática del campo eléctrico [21].

En este caso corresponde a $E_i = 19,028(\cos \theta)^{2,28}(V/m)$, para la frecuencia central de 5 GHz esto se indica en la Figura 4.54, además se puede observar que el parámetro n ha variado 1.22 respecto al valor de n en 2.4 GHz.

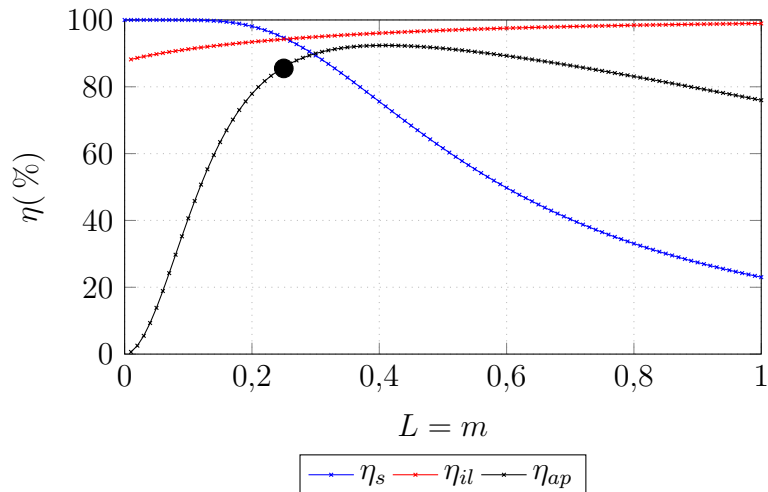


Figura. 4.53. Eficiencia de iluminación η_{il} , de desbordamiento η_s y de apertura η_{ap} para la lente con anillo metálico de ancho 25mm y diámetro externo $D=520$ mm, ubicada a una distancia f de la guía circular con bocina a 2.4GHz

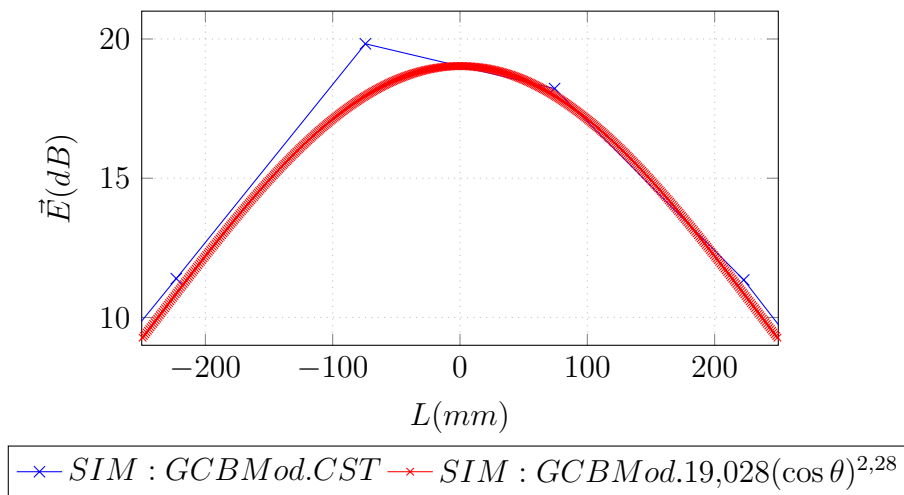


Figura. 4.54. Modelado del campo eléctrico en una línea de longitud $L=520$ mm a una distancia $f = 250$ mm de la guía circular con bocina (GCB) a 5GHZ

La eficiencia teórica de la apertura, al colocar una lente metálica de diámetro externo $D=520$ mm a una distancia f del alimentador GCB, alcanza un valor de $\eta_{ap} = 90,3\%$, según se muestra en la Figura 4.55. Se observa una eficiencia ligeramente superior en la banda de 5 GHz en comparación con la banda de 2.4 GHz, con una mejora de aproximadamente un 5 %.

4.1.3 Comparación entre el alimentador y la lente.

A continuación se muestra el estudio estadístico realizado para el alimentador y la lente simulada, el estudio se realizó con los datos obtenidos del simulador electromagnético CST Studio Suite, donde se evaluara la directividad, ganancia y frecuencia de operación.

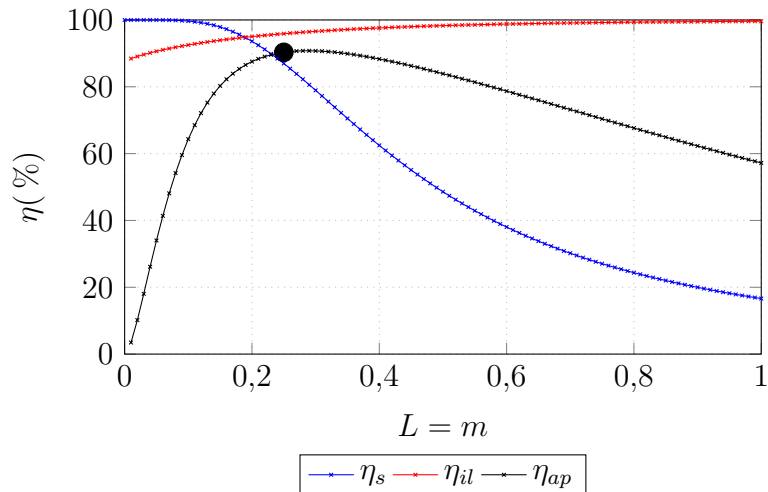


Figura. 4.55. Eficiencia de iluminación η_{il} , de desbordamiento η_s y de apertura η_{ap} para la lente con anillo metálico de ancho 25mm y diámetro externo $D=520$ mm, ubicada a una distancia f de la guía circular con bocina a 5GHz

4.1.3.1 Análisis de adaptación de la lente en 2.4GHz y 5GHz

En el siguiente análisis, se investiga la adaptación de la antena lente, medida a través del parámetro S11, en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz. Se efectúa un detallado análisis estadístico para determinar si la lente muestra una adaptación adecuada en las dos bandas de frecuencia.

Tabla 4.7. Resultado tras aplicar el test t para una muestra a los datos de adaptación en la banda de 2.4GHz

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : El promedio de los valores de la variable S11 a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente igual a -10 dB |
| H_a : El promedio de los valores de la variable S11 a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente inferior a -10 dB |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = -6,0562$ |
| P-valor 0,0000005229 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión |
| En este caso, dado que el valor p es significativamente pequeño (0.0000005229), se acepta la hipótesis alternativa. Esto significa que hay evidencia estadística para afirmar que el promedio de los valores de S11 a la frecuencia de operación de 2.4 GHz es estadísticamente inferior a -10 dB |

Para llevar a cabo este estudio, se recopilan los valores del parámetro S11 obtenidos mediante simulaciones electromagnéticas en ambas bandas de frecuencia. Posteriormente, se aplica un

análisis estadístico apropiado que permita examinar la adaptación de la lente en cada una de estas bandas. Este análisis no solo busca confirmar la adaptación de la lente en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, sino también identificar cualquier disparidad o diferencia significativa entre ambas bandas.

Siguiendo el mismo análisis se realiza para la banda de 5GHz

Tabla 4.8. Resultado tras aplicar el test t para una muestra a los datos de adaptación en la banda de 5GHz

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : El promedio de los valores de la variable S11 a la frecuencia de operación de 5 GHz es estadísticamente igual a -10 dB |
| H_a : El promedio de los valores de la variable S11 a la frecuencia de operación de 5 GHz es estadísticamente inferior a -10 dB |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = -4,3001$ |
| P-valor 0,00005327 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión |
| En este caso, dado que el valor p es significativamente pequeño (0.00005327), se acepta la hipótesis alternativa. Esto significa que hay evidencia estadística para afirmar que el promedio de los valores de S11 a la frecuencia de operación de 5 GHz es estadísticamente inferior a -10 dB |

Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos, se ha generado un diagrama de caja, tal como se muestra en la Figura 4.56. En el análisis de la banda de 2.4 GHz, se observa que la media del parámetro S11 es de -17.61994 y no se observan valores atípicos, lo que sugiere una adaptación efectiva de la antena en esta banda. Es importante destacar que la mayoría de los valores se encuentran por debajo de -10 dB, lo cual es una indicación adicional de una adaptación satisfactoria.

Por otro lado, en la banda de 5 GHz, la media del parámetro S11 es de -15.24945 y se observan pocos valores atípicos, la adaptación de la antena en esta banda parece ser menos consistente en comparación con la banda de 2.4 GHz. En resumen, los resultados sugieren que la antena presenta una mejor adaptación en la banda de 2.4 GHz en comparación con la banda de 5 GHz.

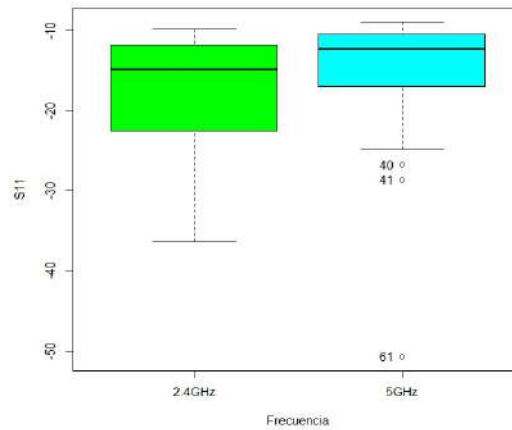


Figura. 4.56. Comparación de la Adaptación entre 2.4GHz y 5GHz: Diagrama de Caja

4.1.3.2 Análisis de la lente comparada con el alimentador en la banda de 2.4GHz

Para realizar este análisis se presenta una estadística comparativa de los resultados de parámetros de directividad, ganancia y frecuencia de operación de la lente propuesta comparada con los resultados del alimentador para la banda de 2.4GHz.

Para iniciar con este análisis se inicia observando si los datos se distribuyen normalmente o no, con el fin de aplicar el test que mejor se adecue a los datos. La primera variable a evaluar es la directividad con los valores del alimentador y cuando se coloca la lente. En la tabla 4.9 muestra el resumen de los valores obtenidos luego de aplicar el test de normalidad Shapiro Wilk para los valores de la directividad del alimentador.

Tabla 4.9. Resultados del Test de Normalidad de Shapiro-Wilk para los Datos de Directividad del Alimentador

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : Los datos de la directividad del alimentador se distribuyen normalmente H_a : Los datos de la directividad del alimentador no se distribuyen normalmente |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 0,87805$ |
| P-valor 0,0001542 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

El mismo análisis se realiza para los datos de la directividad de la lente como se muestra en la

Tabla 4.10. Resultado del Test de Normalidad de Shapiro-Wilk para los Datos de Directividad de la Lente

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : Los datos de la directividad de la lente se distribuyen normalmente H_a : Los datos de la directividad de la lente no se distribuyen normalmente |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 0,72184$ |
| P-valor 0,00000004157 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

tabla 4.10. Una vez confirmada la no normalidad de los datos, se procedió a aplicar el test de Wilconxon para muestras pareadas con el fin de determinar si existe una diferencia significativa entre los datos de directividad del alimentador y los datos de directividad obtenidos al colocar la lente, como se detalla en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Resultado tras aplicar el test de no paramétrico de Wilconxon para muestras pareadas a los datos de directividad del alimentador y la lente

| |
|--|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : No hay diferencia entre la mediana de la directividad del alimentador sin la lente y la mediana de la directividad del alimentador con la lente en la banda de 2.4GHz H_a : Hay una diferencia entre la mediana de la directividad del alimentador sin la lente y la mediana de la directividad del alimentador con la lente en la banda de 2.4GHz. |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 6$ |
| P-valor 0,000000003642 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, hay evidencia suficiente para afirmar que hay una diferencia significativa en la mediana de la directividad del alimentador sin la lente y la mediana de la directividad del alimentador con la lente en la banda de 2.4GHz al 95 % de confianza |

En la Figura 4.57 se presenta el diagrama de cajas referente a la variable de directividad. Se observa que en torno a la Directividad del alimentador, la mediana de la directividad está alrededor de 13.5 aproximadamente. Se identifican algunos valores atípicos hacia abajo, indicados por los puntos individuales fuera de los bigotes inferiores. Por otro lado, al considerar la directividad con la lente, se observa que la mediana de la directividad para este grupo está alrededor de 15.5 aproximadamente. La caja es más alta que en el grupo anterior, se pueden identificar valores atípicos hacia abajo.

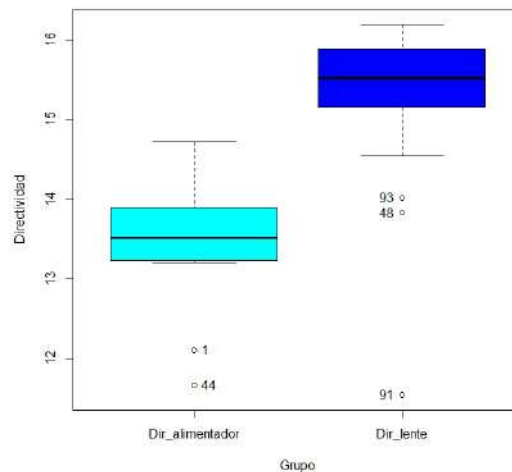


Figura. 4.57. Diagrama de Caja, comparación de Directividad con y sin Lente en la banda de 2.4GHz

En resumen, el diagrama de caja muestra que la directividad tiende a ser más alta cuando se coloca lente en comparación solo con el alimentador, esto demuestra que la presencia de la lente tiene un impacto en la directividad en comparación con el alimentador solo.

Ahora se analiza la variable **ganancia** se sigue el mismo proceso anteriormente mostrado, los resultados se muestran en las tablas 4.12 y 4.13.

Tabla 4.12. Resultado del Test de Normalidad de Shapiro-Wilk para los Datos de la ganancia del alimentador en la banda de 2.4GHz

| |
|--|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : Los datos de la ganancia del alimentador se distribuyen normalmente |
| H_a : Los datos de la ganancia del alimentador no se distribuyen normalmente |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 0,84374$ |
| P-valor 0,00001775 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión |
| Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

En la Figura 4.58 se presenta el diagrama de cajas para la variable de ganancia. Se observa que, para la ganancia del alimentador, la mediana de la ganancia está alrededor de 13.6 aproximadamente, se identifican algunos valores atípicos hacia abajo. Por otro lado, al considerar la ganancia con la lente, la mediana de la ganancia para este grupo parece estar alrededor de 15.9 aproximadamente. La caja es más alta en comparación a caja de la ganancia del alimentador, se observan algunos valores atípicos.

Tabla 4.13. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la ganancia de la lente en la banda de 2.4GHz

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : Los datos de la ganancia de la lente se distribuyen normalmente H_a : Los datos de la ganancia de la lente no se distribuyen normalmente |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 0,70986$ |
| P-valor 0,00000002521 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

Tabla 4.14. Resultado tras aplicar el test no paramétrico de Wilconxon para muestras pareadas a los datos de la ganancia del alimentador

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : No hay diferencia entre la mediana de la ganancia del alimentador sin la lente y la mediana de la ganancia del alimentador con la lente en la banda de 2.4GHz H_a : Hay una diferencia entre la mediana de la ganancia del alimentador sin la lente y la mediana de la ganancia del alimentador con la lente en la banda de 2.4GHz |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 1$ |
| P-valor 0,000000002639 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

En resumen, el diagrama de caja muestra que la ganancia tiende a ser más alta en el grupo de ganancia de la lente en comparación con el grupo de ganancia del alimentador. Esto demuestra que la presencia de la lente tiene un impacto en la ganancia en comparación con el alimentador solo.

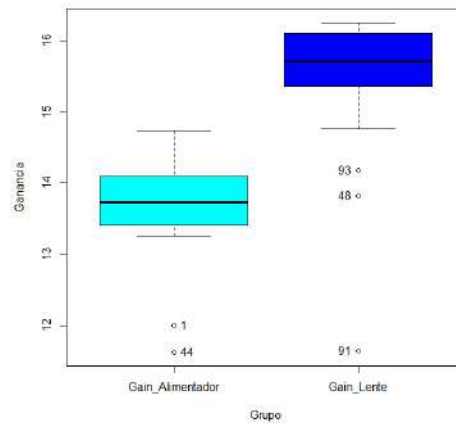


Figura. 4.58. Comparación de la Ganancia del Alimentador con y sin Lente en la banda de 2.4 GHz: Diagrama de Caja

4.1.3.3 Análisis de la lente comparado con el alimentador en la banda de 5GHz

Se procede de manera similar para la banda de 5 GHz, realizando un análisis de la distribución de los datos para determinar si sigue una distribución normal. Luego, se aplica el test correspondiente de acuerdo al resultado obtenido en el análisis.

En la Tabla 4.15 y 4.16 se resumen los resultados de la prueba de normalidad para la directividad, así mismo en la Tabla 4.17 se ilustra el resultado de la prueba de wilconxon.

Tabla 4.15. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la directividad del alimentador en la banda de 5GHz.

| |
|--|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_0 : Los datos de la directividad del alimentador se distribuyen normalmente |
| H_a : Los datos de la directividad del alimentador no se distribuyen normalmente |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 0,85152$ |
| P-valor 0,00005704 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión |
| Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

En la Figura 4.59 se muestra el diagrama de cajas para la variable directividad en torno a esto se nota que, para la directividad del alimentador, la caja es relativamente amplia y no se observan valores atípicos hacia abajo. En cambio, la mediana de la directividad de la lente se encuentra

Tabla 4.16. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la directividad de la lente en la banda de 5GHz.

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : Los datos de la directividad de la lente se distribuyen normalmente H_a : Los datos de la directividad de la lente no se distribuyen normalmente |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 0,8307$ |
| P-valor 0,00001768 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

Tabla 4.17. Resultado tras aplicar el test no paramétrico de Wilconxon para muestras pareadas a los datos de la directividad del alimentador en la banda de 5GHz

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : No hay diferencia entre la mediana de la directividad del alimentador sin la lente y la mediana de la directividad del alimentador con la lente en la banda de 5GHz H_a : Hay una diferencia entre la mediana de la directividad del alimentador sin la lente y la mediana de la directividad del alimentador con la lente en la banda de 5GHz |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 137,5$ |
| P-valor 0,00005227 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, hay evidencia suficiente para afirmar que hay una diferencia significativa en la mediana de la directividad del alimentador sin la lente y la mediana de la directividad del alimentador con la lente en la banda de 5GHz |

en una ubicación más alta que la del alimentador aproximadamente en 17.20 dB, se observan algunos valores atípicos en la directividad de la lente.

En resumen, el diagrama de caja muestra que la directividad tiende a ser más alta en el grupo de directividad de la lente en comparación con el grupo de directividad del alimentador, esto demuestra que la presencia de la lente tiene un impacto en la directividad en comparación con el alimentador solo.

Así mismo se analiza la variable ganancia en la banda de 5GHz, para ello el resultado de prueba de normalidad para la ganancia se resume en las Tablas 4.18 y 4.19, y por último en la Tabla 4.20 detalla el resultado de la prueba de wilconxon.

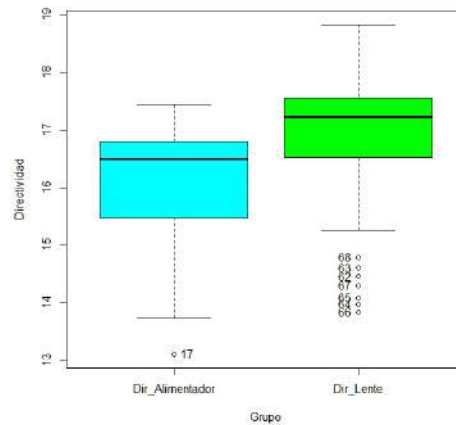


Figura. 4.59. Comparación de la directividad del alimentador con y sin Lente en la banda de 5GHz:Diagrama de caja

Tabla 4.18. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la ganancia del alimentador en la banda de 5GHz.

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : Los datos de la ganancia del alimentador se distribuyen normalmente H_a : Los datos de la ganancia del alimentador no se distribuyen normalmente |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 0,85175$ |
| P-valor 0,00005781 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

Tabla 4.19. Resultado tras aplicar el test de normalidad de Shapiro Wilk a los datos de la ganancia de la lente en la banda de 5GHz.

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : Los datos de la ganancia de la lente se distribuyen normalmente H_a : Los datos de la ganancia de la lente no se distribuyen normalmente |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 0,83387$ |
| P-valor 0,00002102 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión Se rechaza la hipótesis nula, los datos no se distribuyen normalmente con el 95 % de confianza |

Tabla 4.20. Resultado tras aplicar el test no paramétrico de Wilconxon para muestras pareadas a los datos de la ganancia del alimentador en la banda de 5GHz

| |
|---|
| Establecer la hipótesis nula y alternativa. |
| H_o : No hay diferencia entre la mediana de la ganancia del alimentador sin la lente y la mediana de la ganancia del alimentador con la lente en la banda de 5GHz |
| H_a : Hay una diferencia entre la mediana de la ganancia del alimentador sin la lente y la mediana de la ganancia del alimentador con la lente en la banda de 5GHz |
| Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ |
| Estadístico $t = 133$ |
| P-valor = 0,0000414 (es menor a 0.05) |
| Tomar la decisión |
| Se rechaza la hipótesis nula, hay evidencia suficiente para afirmar que hay una diferencia significativa en la mediana de la ganancia del alimentador sin la lente y la mediana de la ganancia del alimentador con la lente en la banda de 5GHz |

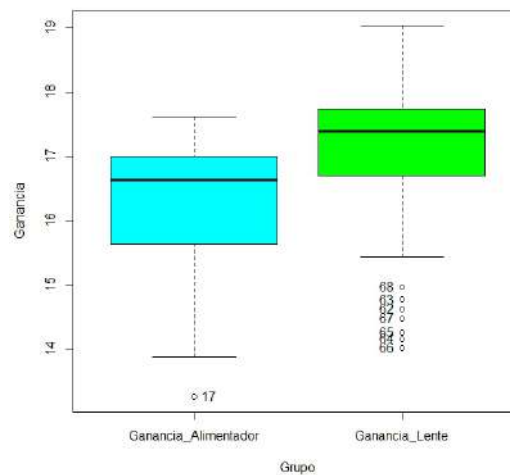


Figura. 4.60. Comparación de la ganancia del alimentador con y sin Lente en la banda de 5GHz: Diagrama de Caja

En la Figura 4.60 se presenta el diagrama de cajas para la variable de ganancia. Se observa que, para la ganancia del alimentador, la mediana es aproximadamente de 16.7 dB. La caja es relativamente amplia y no se observan valores atípicos hacia abajo. Por otro lado, la mediana de la ganancia de la lente se sitúa en una ubicación más alta que la del alimentador, aproximadamente en 17.5 dB, se observan algunos valores atípicos en la ganancia de la lente. En resumen, el diagrama de cajas muestra que la ganancia tiende a ser más alta en el grupo de ganancia de la lente en comparación con el grupo de ganancia del alimentador. Esto demuestra que la presencia de la lente tiene un impacto en la ganancia en comparación con el alimentador solo.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis, se llevó a cabo el diseño de una lente metálica dual band tras realizar un exhaustivo estudio del estado del arte sobre las lentes metálicas. Este estudio reveló una amplia gama de aplicaciones, avances tecnológicos y desafíos en este campo emergente. Se observó que las lentes metálicas ofrecen ventajas significativas, como un tamaño compacto, capacidad de ajuste de parámetros electromagnéticos y versatilidad. Además, se ha constatado que han sido objeto de una investigación extensa en áreas como la mejora de la directividad, la ganancia de antenas, la formación de haces y la focalización de energía electromagnética.

Se diseña una guía de onda circular destinada para iluminar la lente metálica en las bandas de frecuencia de interés. Esta guía presenta un diámetro interno de 40.5 mm ($2,034\lambda_{2,4GHz}$) y una longitud de 230 mm ($1,84\lambda_{2,4GHz}$). Con el fin de mejorar su desempeño, se integra una estructura tipo helicoidal diseñada específicamente para operar en modo axial a 5 GHz. Además, se complementa la guía con un cono truncado de 218 mm ($1,74\lambda_{2,4GHz}$) de diámetro y 115 mm ($0,92\lambda_{2,4GHz}$) de longitud, fabricado íntegramente en aluminio.

Durante este estudio, se ha realizado un análisis de los anillos que componen la lente, utilizando la teoría de modos característicos, donde se observa los modos excitados y la contribución de potencia del mismo. Estos datos han sido fundamentales para validar el funcionamiento de la lente metálica. Aunque el análisis se realizó de forma aislada para cada elemento de la lente, debido a limitaciones de recursos computacionales, no fue posible completar la simulación de la lente en su totalidad. A pesar de esta restricción, los resultados obtenidos han sido satisfactorios, la concordancia entre los datos simulados y las expectativas teóricas respalda la validez del enfoque de análisis.

Tras realizar un análisis paramétrico exhaustivo de los resultados obtenidos de las simulaciones, se logró obtener un coeficiente de reflexión por debajo de los -10 dB en ambas bandas de frecuencia. Además, se observó un incremento significativo en la directividad, con un aumento de 2.48 dB a 2.4 GHz y 2.56 dB a 5 GHz, acompañado de una eficiencia del 85.53 % y 90.3 %, respectivamente todo esta basado en simulación. Si bien el ancho de banda resultó relativamente estrecho en ambas bandas de frecuencia, aproximadamente 300 MHz, el patrón de radiación mostró una directividad notable en ambas bandas de frecuencia. Para verificar la precisión de los resultados, se midió el coeficiente de reflexión con el VNA, y las mediciones experimentales coincidieron satisfactoriamente con los resultados de simulación.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo un estudio experimental más detallado para validar los resultados obtenidos mediante simulaciones electromagnéticas. Esto podría incluir mediciones adicionales de parámetros como la ganancia, la directividad y la eficiencia en condiciones reales de operación. Además, sería beneficioso explorar la posibilidad de optimizar aún más el diseño de la lente metálica dual band para mejorar el ancho de banda y la uniformidad del patrón de radiación, con el fin de maximizar su rendimiento en aplicaciones específicas de comunicaciones inalámbricas o sistemas de radar.

Se recomienda contar con una máquina de alta prestación para llevar a cabo las simulaciones electromagnéticas, esto implica disponer de un equipo con características específicas, como un procesador de alta gama, memoria RAM mínima de 64 GB y espacio en disco de 2 Terabytes. Además, una tarjeta gráfica potente es fundamental para acelerar el rendimiento de las simulaciones y proporcionar una representación visual rápida y precisa de los resultados. Este tipo de máquinas están diseñadas para ofrecer un rendimiento óptimo en tareas computacionales intensivas, como el análisis de modos característicos y el diseño de lentes metálicas.

Estas simulaciones pueden demandar una cantidad considerable de tiempo, especialmente al aumentar la frecuencia de operación. Por ejemplo, se ha observado que las simulaciones a 5 GHz requieren aproximadamente el doble de tiempo que las realizadas a 2.4 GHz. Por lo tanto, contar con una máquina de alto rendimiento no solo agilizará el proceso de simulación, sino que también permitirá realizar iteraciones más rápidas en el diseño y análisis de la lente, facilitando así el proceso de optimización y mejora del rendimiento electromagnético.

Bibliografía

- [1] D. V. Armas Carpio, “Estudio comparativo de lentes utilizados en antenas para la colimación de haces a una frecuencia de operación de 30 ghz por medio de simulaciones electromagnéticas.” B.S. thesis, Quito: EPN, 2022.
- [2] D. M. Pozar, *Microwave Engineering: Theory and Techniques*. John Wiley & Sons, 2021.
- [3] P. M. Gross, “Diseño óptimo de antenas lente en microondas mediante métodos de simulación,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de La Plata, 2019.
- [4] C. Aznar, *Antenas*, 2nd ed. UPC, 2015, vol. 2.
- [5] J. Cusacani, “Diseño e implementación de una antena guía de onda circular con estructura helicoidal para banda wifi de bajo coste,” Master’s thesis, Escuela profesional de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, 2020.
- [6] B. A. González, Cataluña, “Diseño de una red inalámbrica de banda ancha para un entorno rural,” B.S. thesis, Universidad Oberta de Cataluña, 2018.
- [7] H. Wang, P. Zhang, J. Li, and X. You, “Radio propagation and wireless coverage of Isaa-based 5g millimeter-wave mobile communication systems,” *China Communications*, vol. 16, pp. 1–18, 5 2019.
- [8] M. Ayyash, H. Elgala, A. Khreishah, V. Jungnickel, T. Little, S. Shao, M. Rahaim, D. Schulz, J. Hilt, and R. Freund, “Coexistence of wifi and lifi toward 5g: concepts, opportunities, and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 64–71, 2 2016.
- [9] J. Salazar, “Redes inalámbricas,” *Techpedia*. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/81581109.pdf>, 2016.
- [10] G. Vilana, “Diseño de un proceso de monitoreo de calidad de servicio en redes de telecomunicaciones para organismos reguladores,” *Universidad Pontificia Comillas*, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/68118?show=full>
- [11] B. Hernandez, “Estadísticas de la situación digital en ecuador 2021-2022,” *Diario el País*, p. 2–7, Mar 2021.

- [12] I. D. Rodríguez-Díaz and R. V. G. Bermudez, “Diseño e implementación de la red de fibra óptica del cantón chone-ecuador,” *Ingeniería Industrial*, vol. 44, no. 2, pp. 1–18, 2023.
- [13] F. D. Molina Espinoza, “Radioenlace en banda libre 5ghz para proveer de internet a las cabañas de las lagunas de mojanda,” Master’s thesis, Quito: UISRAEL, 2022.
- [14] G. E. Pratomo, “Influencia del material en el diseño del reflector de la antena parabólica para mejorar la recepción de wifi,” *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [15] P. Prado, D. Noslen Rojas, C. Martinez, M. Perera, and J. Reyes, “Design of two directional flat antennas for wifi applications in the 2.4 and 5 ghz bands,” *IEEE Transactions*, Feb 2022.
- [16] L. Carrera, “Antenas multihaz con lente de rotman para las bandas de microondas y milimétricas realizadas en diferentes tecnologías,” *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015.
- [17] Z. Mahlaoui, E. Antonino-Daviu, A. Latif, and M. Ferrando-Bataller, “Design of a dual-band frequency reconfigurable patch antenna based on characteristic modes,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, 2019.
- [18] J. Ren and W. Menzel, “Millimeter-wave single-layer dual-frequency reflectarray antenna,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, pp. 1–4, 2017.
- [19] M. Takao, R. Yamada, Y. Kaimori, S. Makino, S.-I. Yamamoto, and Y. Nishioka, “Broadband reflectarray antenna by controlling phase center of primary radiator,” in *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2023, pp. 1–5.
- [20] A. Wu, Z. Zhang, B. Guan, and L. Peng, “Achievement of various widebands: A design of wide-slot antennas using shape blending,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, pp. 1–9, 2018.
- [21] D. A. Santillán Haro, “Diseño de lentes metálicas usando la teoría de modos característicos.” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2020.
- [22] D. Osuna Ruiz, “Diseño, simulación, fabricación y medida de lentes de metamaterial acopladas a antenas de bocina,” Master’s thesis, Universidad Pública de Navarra, 2015.
- [23] G. Pernaute, “Diseño de una herramienta software para el desarrollo de lentes elípticas y

hemisféricas extendidas para antenas de bocina,” Master’s thesis, ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN, 2018.

- [24] M. Ramzan and P. Sen, “Dual-band gain-boosted planar lens antenna using a single layer metasurface for 6g applications,” in *2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. IEEE, 2022, pp. 446–450.
- [25] P. M. Gross, J. P. Ciafardini, F. Vico Bondia, J. A. Bava, and M. Ferrando Bataller, “Antenas lentes con metamateriales y su aplicación en tecnología espacial,” in *IX Congreso Argentino de Tecnología Espacial (CATE)(Córdoba, 26 al 28 de abril de 2017)*, 2017.
- [26] Q. Lou, C. Xue, and Z. N. Chen, “High-efficiency metalens antenna using Huygens’ metasurface with glide symmetric i-shape metal strips,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 11, pp. 7394–7403, 2021.
- [27] X. Qiao, H. Zhao, and Z. Jiang, “Wideband and high gain horn antenna with lens and wedge ridge,” in *2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*. IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [28] F. Ma, X. Zhang, Y. Yin, H. Yin, C. Song, and L. Zhao, “Low-cost lens antenna design for microwave moisture detection,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, 2022.
- [29] V. Basavarajappa, A. Pellon, I. Montesinos-Ortego, B. B. Exposito, L. Cabria, and J. Basterrechea, “Millimeter-wave multi-beam waveguide lens antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 8, pp. 5646–5651, 2019.
- [30] J. Punto, “Diseño de una antena altamente directiva usando lentes y metamateriales,” Master’s thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2013.
- [31] M. K. T. Al-Nuaimi, W. Hong, and Y. Zhang, “Design of high-directivity compact-size conical horn lens antenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 467–470, 2014.
- [32] A. O. Diallo, R. Czarny, B. Loiseaux, and S. Hole, “Comparison between a thin lens antenna made of structured dielectric material and conventional lens antennas, in q-band in a compact volume,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, pp. 307–310, 2018.
- [33] D. Santilián-Haro, E. Antonino-Daviu, D. Sánchez-Escuderos, and M. Ferrando-Bataller,

“Single layer metasurface lens antenna,” in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2017, pp. 1134–1138.

- [34] D. A. Santillán Haro, J. I. Córdova Ronquillo, and M. A. Dávila Bermeo, “Diseño y validación de lentes metálicas (2.4ghz) para el simulador satelital en el laboratorio de electrónica de la facultad de ingeniería,” Master’s thesis, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10870>
- [35] A. Petosa and A. Ittipiboon, “Shadow blockage effects on the aperture efficiency of dielectric fresnel lenses,” *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 147, p. 451, 2000.
- [36] W. Kock, “Path-length microwave lenses,” *Proceedings of the IRE*, vol. 37, pp. 852–855, 8 1949.
- [37] Á. C. Aznar, J. R. Robert, J. M. R. Casals, L. J. Roca, S. B. Boris, and M. F. Bataller, *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.
- [38] J. Thornton and K.-C. Huang, *Modern lens antennas for communications engineering*. John Wiley & Sons, 2013, vol. 39.
- [39] C. Levis, J. T. Johnson, and F. L. Teixeira, *Radiowave propagation: physics and applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [40] Y. Chen and C.-F. Wang, *Characteristic modes: Theory and applications in antenna engineering*. John Wiley & Sons, 2015.
- [41] M. Cabedo-Fabres, E. Antonino-Daviu, A. Valero-Nogueira, and M. F. Bataller, “The theory of characteristic modes revisited: A contribution to the design of antennas for modern applications,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 5, pp. 52–68, 2007.
- [42] J. U. Gonzalez Villalobos *et al.*, “Comparación entre el estándar ieee 802.11 ax y el estándar ieee 802.11 ac para determinar la evolución del rendimiento de las redes de Área local inalámbricas (wlan),” *URSI2019*, 2020.
- [43] Z. Mahlaoui, E. Antonino-Daviu, A. Latif, and M. Ferrando-Bataller, “Design of a dual-band frequency reconfigurable patch antenna based on characteristic modes,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 20, 2019.

ANEXOS



(a)



(b)



(c)



(d)