



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

DISEÑO DE ANTENAS EN BANDA DE FRECUENCIAS MILIMÉTRICAS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES 5G

Autor: Dennis Noel Arizaca Cusicuna

Director: Dr. Miguel Ferrando Bataller

Lugar de trabajo: Grupo de Radiaciones Electromagnéticas

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el diseño de antenas lente metálicas de bajo perfil, altas directividades y duales en polarización operando en bandas de frecuencia milimétricas y de microondas, factibles para su uso en estaciones base de sistemas de quinta generación móvil y comunicaciones satelitales.

Metodología

La metodología que ha seguido el presente trabajo es la siguiente:

- Revisión bibliográfica sobre 5G y aplicaciones recientes de antenas lente en altas frecuencias. Consulta que se realizó en artículos especializados de antenas y microondas pertenecientes a bases de datos como IEEE Xplore y Springer.
- Estudio de herramientas de simulación electromagnética, seleccionándose al software CST Studio como herramienta principal para el diseño y evaluación de antenas para aplicaciones de quinta generación móvil.
- Diseño de prototipos de antenas zonales de Fresnel con la capacidad de generar múltiples haces en distintas direcciones para su uso en 5G.
- Simulación de soluciones propuestas en las que se analiza la orientación de los haces generados, el ancho de haz, y su directividad.
- Evaluación de las características de radiación más importantes de los modelos propuestos.

Desarrollos teóricos realizados

Se ha realizado un análisis de los parámetros más relevantes de antenas lente como: directividad, ganancia y eficiencia, empleando formulas similares a las utilizadas en reflectores parabólicos.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio

Se diseñan 3 prototipos multihaz operando en la frecuencia de 20.5 GHz. El primer prototipo emplea un anillo metálico y varias antenas alimentadoras ubicadas sobre un semicírculo, obteniendo 9 haces en direcciones diferentes con una capacidad de exploración amplia. Un segundo prototipo sugiere usar las antenas alimentadoras sobre un mismo plano consiguiendo un diseño de bajo perfil, pero con haces menos directivos que el anterior. El tercer modelo emplea un conjunto de anillos con múltiples antenas alimentadoras ubicadas sobre el mismo plano, logrando formar 19 haces con inclinaciones mayores a los modelos precedentes y por último se propone un modelo de alta directividad con bocinas excitadas simultáneamente.

De igual manera se replica los dos primeros modelos a 28 GHz, considerada una de las bandas con mayor potencial para su utilización en 5G.

Resultados

Se ha diseñado antenas multihaz con resultados idóneos para su aplicación en redes 5G y comunicaciones satelitales. El primer modelo de un anillo metálico y alimentadores dispuestos en un arco focal consigue 9 haces con excelentes resultados de directividad, cuyos valores superan los 14.6 dBi y un rango de exploración de $\pm 27^\circ$ en dos planos diferentes. El segundo modelo de antena multihaz genera 9 haces con directividades superiores a 13.9 dBi y ángulo de cobertura de 34 grados en 4 planos distintos, además de su configuración de bajo perfil. Un tercer modelo agrupa 7 anillos para ampliar el rango de exploración, y la cantidad de haces orientados alcanzado 19 haces con directividades mayores a 14 dBi y rangos de exploración de $\pm 62^\circ$. Además, se propone un sistema de antenas altamente directivo de 27.4 dBi. Para concluir se replican los dos primeros modelos a la frecuencia de 28 GHz con resultados similares a los obtenidos en la banda K.

Líneas futuras

Se expone algunas líneas de investigación futura atendiendo al trabajo desarrollado:

- Partiendo del modelo desarrollado con varios anillos circulares sería conveniente el estudio de lentes zonales poligonales, triangulares, pentagonales o hexagonales que posibiliten ensamblar estructuras regulares.
- Una interesante línea de trabajo será el diseño y desarrollo de una esfera conformada por varias lentes zonales de Fresnel, cada una alimentada por una o más bocinas en una formación circular dentro de la estructura y que permitirá una cobertura de 360 grados.
- Respecto al diseño de antenas multihaz, se puede profundizar en el uso de antenas de varias zonas elípticas que serán capaces de generar haces direccionados sin necesidad del movimiento de sus alimentadores.

Abstract

This work focuses on the design of metallic multibeam antennas operating in microwave and millimeter frequency bands for 5G and satellite communications applications. It presents 3 multibeam models operating at 20.5 GHz. The first generates 9 beams with directivity values greater than 14.6 dBi and scanning ranges of $\pm 26^\circ$, the second is of a low-profile configuration and produces 9 beams with directivities greater than 13.9 dBi and a scan range of $\pm 17^\circ$. The third model uses 7 rings to generate 19 beams with directivities greater than 14 dBi and a 62 degrees scan range. In addition, an antenna system is designed that achieves a high directivity of 27.4 dBi.

Finally, the first two models are replicated at 28 GHz with similar directivity, beamwidth and scan angle results.

INDICE

I	INTRODUCCIÓN	6
I.1	OBJETIVOS	6
I.1.1	Objetivos específicos.....	6
I.2	CONCEPTOS GENERALES DE 5G	6
I.3	ESPECTRO 5G.....	7
I.4	ANTENAS PARA 5G	8
I.5	SOFTWARE DE SIMULACION ELECTROMAGNETICA CST STUDIO	9
II	ANALISIS Y DISEÑO DE ANTENAS LENTES METALICAS	9
II.1	CONCEPTOS GENERALES DE LENTES METALICAS	9
II.2	ANTENAS LENTE	11
II.2.1	Antenas Zonales de Fresnel.....	11
II.3	PARÁMETROS DE LAS ANTENAS LENTE	12
II.3.1	Directividad.....	12
II.3.2	Ganancia.....	12
II.3.3	Eficiencia de una antena lente metálica plana	13
II.4	ANILLO DE DIMENSIONES ELECTRICAS GRANDES	14
II.4.1	Cálculo de punto focal por el método de Incidencia con onda plana	15
II.5	ALIMENTADORES PARA LAS ANTENAS	16
II.5.1	Bocina Rectangular	16
II.5.2	Bocina Rectangular con plano de Masa	18
II.6	ESTRUCTURA DE LA ANTENA LENTE.....	19
II.6.1	Ajuste de la distancia focal.....	20
II.6.2	Resultados	21
II.7	RESUMEN DE RESULTADOS	23
III	ANALISIS Y DISEÑO DE ANTENAS MULTIHAZ.....	23
III.1	ANTENA MULTIHAZ CON ALIMENTADORES SOBRE CURVAS DE EXPLORACION	24
III.1.1	Estructura de La Antena	24
III.1.2	Resultados	25
III.2	ANTENA MULTIHAZ CON ALIMENTADORES EN UN MISMO PLANO	26
III.2.1	Estructura de la antena	26
III.2.2	Resultados	27
III.3	ANTENA MULTIHAZ DE VARIOS ANILLOS METALICOS Y VARIOS	
ALIMENTADORES		28
III.3.1	Estructura de la antena	28
III.3.2	Resultados	29
III.4	SISTEMA DE ANTENAS DE ALTA DIRECTIVIDAD.....	31
III.4.1	Estructura de la antena	31
III.4.2	Resultados	31
III.5	RESUMEN DE RESULTADOS	32
IV	ANTENA LENTE MULTIHAZ EN LA BANDA MILIMETRICA	32
IV.1	ANTENA LENTE EN LA BANDA DE 28 GHZ	32
IV.2	ANTENAS MULTIHAZ EN LA BANDA DE 28 GHZ.....	34
IV.3	RESUMEN DE RESULTADOS.....	37
V	CONCLUSIONES	38
	AGRADECIMIENTOS	39
	BIBLIOGRAFÍA	39

I INTRODUCCIÓN

I.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es el diseño de antenas lente metálicas de bajo perfil, altas directividades y duales en polarización operando en bandas de frecuencia milimétricas y de microondas, factibles para su uso en estaciones base de sistemas de quinta generación móvil y comunicaciones satelitales.

I.1.1 *Objetivos específicos*

- Analizar antenas lente basado en superficies metálicas operando en la banda de frecuencia K y alimentadas por bocinas.
- Proponer diseños para la generación y el direccionamiento de múltiples haces en antenas zonales de Fresnel.
- Conformar agrupaciones de antenas para conseguir sistemas de alta directividad y sistemas multihaz.
- Diseñar antenas lente multihaz en la banda de 28 GHz.

I.2 *CONCEPTOS GENERALES DE 5G*

El desbordado crecimiento de dispositivos inteligentes, la introducción de nuevas tecnologías y aplicaciones multimedia sumado al aumento exponencial en el uso de datos inalámbricos está saturando las redes celulares actuales, esto provocará que en un corto tiempo las demandas de los usuarios no puedan ser satisfechas por las redes existentes. Debido a ello la generación de comunicaciones móviles 5G pretende solucionar estos problemas brindando velocidades de datos de varios Gbps, latencias de aproximadamente 1 ms, aumento en la capacidad de las estaciones base y una calidad de servicio mejorada en comparación a tecnologías anteriores [1][2][3].

5G tiene como objetivo brindar un rendimiento muy alto para afrontar el desmesurado volumen de tráfico. Entonces surge la necesidad de migrar a nuevas bandas de frecuencias que antes no habían sido consideradas para comunicaciones móviles. De ahí que la banda milimétrica se presenta como solución para proveer velocidades y capacidades superiores. Sin embargo, el uso de estas frecuencias altas revela varios desafíos como, las elevadas pérdidas de trayectoria, la [2]atenuación por condiciones atmosféricas y el bloqueo de infraestructuras comunes. Esto significa que se puede conseguir rendimientos muy altos en enlaces inalámbricos con ondas milimétricas, pero a costa de reducir la calidad del enlace.

En este contexto el empleo de antenas altamente directivas y los sistemas de comunicación de haz direccional jugaran un rol importante para mitigar las características de propagación de las ondas milimétricas en redes 5G.

Requerimientos tecnológicos de 5G

Los principales requisitos de las redes 5G pueden identificarse como:

Velocidades de datos de hasta 10 Gbps en redes reales que es 10 veces mayor a su antecesora LTE, reducción de latencias de subida y bajada a 1ms, grandes anchos de banda que habilitaran la conectividad de miles de dispositivos IoT. Cobertura y disponibilidad percibida de casi el 100%, reducción de consumos de energía del 90 %, reducción del consumo de batería de los dispositivos de usuarios [2].

1.3 ESPECTRO 5G

Un elemento fundamental para lograr el éxito de 5G es la asignación del espectro y su regulación, la adecuada gestión del mismo debe asegurar la disponibilidad oportuna del espectro y permitir que esta tecnología en desarrollo responda a la demanda de servicios de los consumidores e industrias.

Según el estándar 3GPP que incluye a las redes 5G, el primer grupo de redes y dispositivos desplegados a nivel mundial está clasificada como No Autónoma (NSA), esto hace mención a que las redes 5G tienen que ser compatibles con las redes 4G actualmente desplegadas [3]. En este punto, los equipos terminales preparados para 5G se enlazarán con frecuencias habilitadas para esta red, y de esta manera optimizar la transferencia de datos, pero a su vez seguirán usando la red 4G para operaciones que no requieren grandes transferencias de datos.

Por otra parte, la interfaz 5G New Radio, está en la capacidad de soportar gran cantidad de equipos terminales con requisitos de conectividad muy diferentes, dentro de estos podemos mencionar aplicaciones para la industria, para logística compleja y redes de servicios.

Para satisfacer estas exigencias, se debe hacer uso de técnicas de espectro multicapa con el propósito de tener un conjunto de múltiples escenarios y requisitos de uso, Entonces se han agrupado frecuencias que pueden clasificarse en dos rangos, de 1 a 6 GHz y por encima de 6GHz:

Bandas de 1 a 6 GHz. – Estas bandas serán esenciales para proporcionar mayor cobertura y ampliar la experiencia 5G de banda ancha móvil a escenarios amplios y zonas de difícil acceso. También son cruciales para el despliegue temprano de 5G por las ventajas que presenta como su equilibrada combinación entre cobertura amplia y buena capacidad.

Bandas por encima a 6 GHz. - Estas podrán ser usadas para lograr mejorar la capacidad y proporcionar velocidades de datos extremadamente altos, esto para ciertas aplicaciones de 5G. Actualmente el enfoque se encuentra en frecuencias superiores a los 24 GHz; hecho que ha

despertado un gran interés dentro de los grupos de investigación en esta área; la cual comúnmente se conoce como onda milimétrica (mmWave)

Cabe indicar que cada país tiene una canalización y regulación diferente lo que representa un gran reto técnico para el diseño de los equipos terminales que deben proporcionar el mejor rendimiento y fiabilidad para posibles composiciones de frecuencias .

I.4 ANTENAS PARA 5G

La alta demanda de dispositivos inteligentes y los nuevos servicios han ocasionado que el tráfico de datos inalámbrico aumente de manera exponencial. Es por ello que se hace necesario la implantación del sistema de comunicaciones móviles denominada 5G, la cual contará con características claves como el alto rendimiento, baja latencia, mayor eficiencia espectral, gran ancho de banda y el uso de la banda milimétrica. Este último representa un desafío importante debido a las pérdidas de propagación y sensibilidad de bloqueo que experimentan los enlaces de ondas milimétricas. Las atenuaciones provocadas por las lluvias, la absorción atmosférica y la baja capacidad de atravesar estructuras como edificios requiere esquemas con alta eficiencia espectral que solo son posibles con antenas transmisoras- receptoras de alta ganancia, además estas antenas tendrán un reducido ancho de haz de potencia por lo cual también será apremiante contar con la capacidad de direccionamiento de haz de manera que se facilite la localización de estaciones base, usuarios y adicionalmente compense las pérdidas mencionadas anteriormente[4][5][6].

Existen diferentes tipos de antenas factibles para su aplicación en enlaces de comunicaciones móviles en la banda milimétrica tanto como para estaciones base como terminales de usuario. Entre los de mayor interés tenemos:

Antenas multihaz pasivas. - estas antenas generan haces orientados controlados por un numero finito de puertos cuyo rango de exploración está determinado por la cantidad de haces y su ancho. Estas se pueden estar basadas en reflectores, lentes y circuitos formadores de haces[5].

Matrices de Antena en fase. - Estos dispositivos generan haces dinámicos para el escaneo electrónico usando para ello desfasadores para cada elemento radiante. Pueden ser activos y pasivos.

Antenas multihaz activas. - son capaces de realizar la formación de haces utilizando chips de procesamiento de señales digitales de manera que el barrido electrónico sea más suave que los dos anteriores.

I.5 SOFTWARE DE SIMULACION ELECTROMAGNETICA CST STUDIO

CST es un potente software de simulación usada para el diseño y análisis de dispositivos de radiofrecuencia que emplea diversos módulos y métodos numéricos que permiten simulaciones, análisis y optimizaciones eficientes en alta frecuencia. Brinda módulos de solución FIT (técnica de integración finita), referido al dominio del tiempo, FEM (método de elementos finitos) referido a la solución en el dominio de la frecuencia, (TLM) método de matriz de línea de transmisión, y finalmente utiliza el método de la ecuación integral mediante momentos MoM para el análisis de estructuras [7].

Este software es ideal para la simulación de antenas por el rendimiento y fiabilidad de sus resultados. Para el desarrollo de este trabajo se usa diferentes solucionadores en distintas circunstancias. Cuando es necesario realizar cálculos en un amplio rango de frecuencias se usa el solucionador en el dominio de la frecuencia, debido a que solo se necesita una simulación y luego por medio de la transformada rápida de Fourier se obtiene la respuesta en frecuencia. Por otro lado, para sistemas de antenas multihaz en los que se tiene múltiples alimentadores se usa el solucionador en el dominio de la frecuencia pues una sola simulación puede obtener resultados para todos los puertos.

II ANALISIS Y DISEÑO DE ANTENAS LENTES METALICAS

II.1 CONCEPTOS GENERALES DE LENTES METALICAS

La particularidad que diferencia a las antenas de quinta generación móvil de otras generaciones es que estas deben ser altamente directivas para compensar las pérdidas de espacio libre y atenuaciones por condiciones atmosféricas que caracterizan a las ondas milimétricas, además deben ser capaces de reconfigurar su diagrama de radiación en tiempo real y reducir el consumo energético[8].

Todos estos requerimientos que introduce la tecnología de ondas milimétricas y la necesidad de usar frecuencias cada vez más altas impulsan un renovado interés en el diseño de antenas de lentes tanto para sistemas de radar y comunicaciones.

Dentro de este contexto la comunidad científica discute acerca de la aplicación de antenas de lente para futuros sistemas de comunicación 5G. En [6] se plantea la utilización de meta-superficies para crear lentes totalmente metálicas, que presentan menores pérdidas a frecuencias altas que las de material dieléctrico, resultando conveniente para su uso en el régimen milimétrico.

Así mismo es este documento se proponen prototipos de lentes para su uso en comunicaciones 5G. Por ejemplo, se implementa una lente de Luneburg sobre una placa con orificios que permiten alcanzar el índice de refracción requerido por la lente. Esta lente es capaz de generar un diagrama de radiación orientable gracias a una red de alimentación formada por guías de onda escalonadas. Los resultados son prometedores para el uso de la lente en 5G ya que proporciona alta directividad, niveles bajos de lóbulos laterales y alta eficiencia de radiación. En [9] se propone una lente metálica compacta para operar en la frecuencia de Tera hercios, esta utiliza líneas de retardo para la compensación de fase y se compone de 4 partes, la lente metálica, la estructura piramidal que permite mejorara la directividad, una cavidad pequeña y la bocina de alimentación de plano H.

De igual manera es necesario mencionar a las antenas zonales de Fresnel que son mucho más reducidas en grosor, volumen y peso que las lentes ordinarias permitiendo la creación de antenas de lentes más ligeras. En la literatura se demuestra que este tipo de antenas también son factibles para su uso en la banda milimétrica [10]. Al igual que las lentes ordinarias existen diversos prototipos de lentes zonales de Fresnel que han demostrado buenos resultados de desempeño en la banda milimétrica. En [11] se presenta antena de placa de zona de Fresnel con un diámetro de 300 mm operando a 75 GHz obteniéndose una ganancia de 44,29 dBi y una eficiencia de apertura del 48,42%. Este prototipo es adecuado para su uso en comunicaciones por satélite. También en [12] se propone una antena zonal de Fresnel de doble banda y apertura compartida que se logra al unir dos antenas zonales que operan a diferentes frecuencias, 75 y 120 GHz, y cuyos anillos están formados por meta-rejillas. Los valores de ganancia obtenidos en esta antena de 20,3 y 21,9 dBi respectivamente los hacen potenciales soluciones para comunicaciones multibanda en ondas milimétricas. Así mismo en [13] se implementa una antena zonal de Fresnel de ocho capas que opera a 60 GHz y es iluminada por una bocina cónica, esta antena utiliza material plástico de impresión 3D con el que se consigue una ganancia de 34 dB.

Además de las buenas características de radiación que se puede lograr con las antenas zonales de Fresnel en la banda milimétrica, es importante que tengan la posibilidad de generar y orientar múltiples haces, en consecuencia, se han realizado estudios de la capacidad de barrido de haz de las antenas lente en ondas milimétricas lo que resulta conveniente para aplicaciones de comunicaciones móviles 5G. En [14] se compara las propiedades de exploración de una lente con anillos elípticos y otra con anillos circulares, pero con la alimentación desplazada, ambos consiguen propiedades de exploración destacables, aunque la primera con una mayor capacidad de escaneo. Por ejemplo, se pueden encontrar prototipos con diversas configuraciones que buscan haces orientables. En [15] se ha diseñado una antena lente operando en frecuencias milimétricas, específicamente se trata de un sistema de 7 antenas de Fresnel alimentadas por una matriz en fase. Esta configuración logra un ángulo de escaneo máximo de $\pm 52^\circ$ y ganancias mayores a 12dBi.

Otro prototipo se presenta en [16] donde se expone la formación de haces en el rango de $\pm 40^\circ$ del plano H o E en una lente zonal de Fresnel de bajo perfil a 30 GHz con valores de directividad por encima de 9dBi. Igualmente, en [17] se tiene una estructura de 3 capas con valores de ganancia de 19.3 dBi y un rango de exploración de $\pm 45^\circ$ en el plano horizontal y vertical operando en el rango de frecuencias de 5 a 6.3 GHz.

Por último, también existen estudios de lentes de zonas de Fresnel Poligonales cuyas geometrías son bastante provechosas para la formación de agrupaciones, además ofrecen ventajas como la reducción de lóbulos laterales y su distanciamiento del lóbulo primario [18] [19]. Estos beneficios pueden ser aprovechables para la creación de esferas con capacidades de exploración de 360° .

II.2 ANTENAS LENTE

De manera similar a los reflectores, las antenas lente permiten modelar frentes de fase de ondas electromagnéticas e influenciar en su propagación en diferentes direcciones, siendo muy común su uso para concentrar haces de rayos paralelos y así aumentar la ganancia de antenas de microondas. Específicamente el propósito de las antenas lente es transformar frentes de onda esféricos o cilíndricos en frentes de onda plano. [20]

II.2.1 Antenas Zonales de Fresnel

Una antena zonal de Fresnel es una estructura plana que se compone de zonas circulares concéntricas alternadas entre transparentes (aire) y opacas (metal) con un diámetro total D tal como se muestra en la Fig.1 [21], la cual está iluminada por una antena alimentadora, que comúnmente es un dipolo o una bocina, ubicada a una distancia denominada punto focal F a lo largo del eje de propagación.

Este tipo de antenas han ganado protagonismo recientemente para aplicaciones inalámbricas en altas frecuencias ya que ofrecen ventajas importantes sobre las tecnologías convencionales, especialmente en relación a su tamaño, volumen, fácil fabricación y costo reducido.

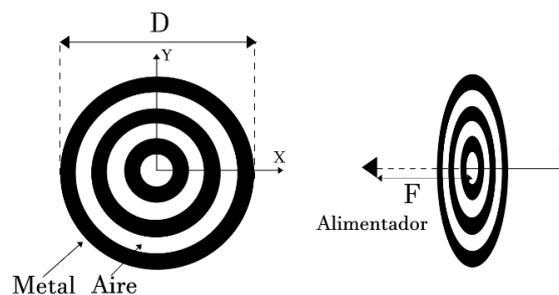


Fig. 1. Estructura de una lente zonal de Fresnel

II.3 PARÁMETROS DE LAS ANTENAS LENTE

Resulta importante caracterizar el comportamiento radiante de toda antena. Para ello en este trabajo se considera una lente metálica iluminada por una fuente isotrópica que ha sido ubicada en el foco tal como se muestra en la Fig. 2.

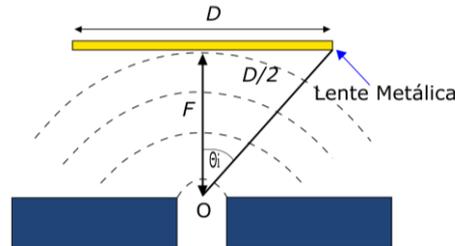


Fig. 2. Lente metálica iluminada por una fuente isotrópica

II.3.1 Directividad

Las antenas reflectoras, antenas de bocina, antenas de lente y antenas de matriz pueden clasificarse como antenas de apertura. En dichas antenas es posible demostrar que la directividad máxima que puede obtenerse de una apertura eléctricamente grande del área A_E se expresa como:

$$Dir_{max} = \frac{4\pi A_E}{\lambda^2} \quad (1)$$

No obstante, existen diversos factores que reducen la directividad de su valor máximo como por ejemplo el desbordamiento del campo de apertura, es por ello que la eficiencia de apertura es definida como la relación entre la directividad real de una antena de apertura y la directividad máxima presentada en la ecuación 1 [22].

De esta forma la directividad de una antena de apertura puede escribirse como:

$$Dir = \frac{4\pi A_E}{\lambda^2} \cdot \eta_{ap} \quad (2)$$

II.3.2 Ganancia

Otro parámetro que es necesario mencionar es la ganancia definida como la relación entre la densidad de potencia radiada en una determinada dirección y la densidad de potencia dada por una antena isotrópica [23]. La ganancia y la directividad están relacionadas por la eficiencia de manera que:

$$G = \frac{4\pi A_E}{\lambda^2} \quad (3)$$

II.3.3 Eficiencia de una antena lente metálica plana

Existen diversas eficiencias de acuerdo a la naturaleza de las pérdidas, es así que la eficiencia total de una antena lente (η_{ap}) será el producto de:

- La eficiencia de desbordamiento (η_s), definida como la relación entre la potencia que se radia fuera de la estructura y la potencia total. Si consideramos un alimentador con un diagrama de radiación simétrico la eficiencia de desbordamiento puede ser expresada en función del campo eléctrico incidente E_i y del ángulo que forma el punto central focal O con uno de los límites de la estructura del lente D, así como se muestra continuación.

$$\eta_s = \frac{\int_0^{\theta_i} |E_i(\theta)|^2 \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} |E_i(\theta)|^2 \sin(\theta) d\theta} \quad (4)$$

Además, al tener presente el alimentador con diagrama simétrico, el campo eléctrico incidente se puede expresar como:

$$E_i = \cos(\theta)^n \quad (5)$$

Reemplazándolo en la ecuación 4 resulta:

$$\eta_s = \frac{\int_0^{\theta_i} |\cos(\theta)^n|^2 \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{\pi/2} |\cos(\theta)^n|^2 \sin(\theta) d\theta} \quad (6)$$

Si se resuelve las integrales tanto del numerados como del denominador se obtiene:

$$\int_0^{\theta_i} |\cos(\theta)^n|^2 \sin(\theta) d\theta = -\frac{1}{2n+1} ((\cos \theta_i)^{2n+1} - 1) \quad (7)$$

$$\int_0^{\pi/2} |\cos(\theta)^n|^2 \sin(\theta) d\theta = \frac{1}{2n+1} \quad (8)$$

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{D/2}{F}\right) \quad (9)$$

Se puede concluir entonces que la eficiencia de desbordamiento está en función del diámetro total de la lente D y la distancia focal F.

- La eficiencia de iluminación (η_{il}), que es posible expresarla en función del área geométrica efectiva AE de la siguiente forma

$$\eta_{ii} = \frac{1 \left| \int_{A_E} E_i(\theta) dS \right|^2}{A_E \int_{A_E} |E_i(\theta)|^2 dS} \quad (10)$$

Si se aproxima el área efectiva AE a un círculo de diámetro D y se expresa la ecuación anterior en función de coordenadas polares, se obtiene lo siguiente.

$$\eta_{ii} = \frac{(n-1) \left(-4F^2 + \left(1 + \frac{D^2}{4F^2} \right)^{-\frac{n}{2}} (D^2 + 4F^2) \right)^2}{\left(\frac{D}{2} \right)^2 (n-2)^2 \left(4F^2 - \left(1 + \frac{D^2}{4F^2} \right)^{-n} (D^2 + 4F^2) \right)} \quad (11)$$

De esta forma con las expresiones resultantes de ambas eficiencias se puede hallar la eficiencia teórica de una lente metálica y comprobar que depende de la relación entre la distancia focal F y el diámetro externo de la lente D.

II.4 ANILLO DE DIMENSIONES ELECTRICAS GRANDES

Las antenas zonales constan de una serie de anillos concéntricos entre metálicos y transparentes que pueden usarse como lentes o reflectores. Esta geometría circular se debe a que las ondas esféricas provenientes de la fuente de alimentación crean zonas de fase constante en superficies planas que son circulares. Los anillos metálicos representan las subzonas de fase alterna y cuando las ondas electromagnéticas inciden en las regiones transparentes se difractan y suman para colimar un rayo en el campo lejano [24].

En este trabajo, con la finalidad de aumentar la directividad y la ganancia se elige realizar el estudio con un anillo metálico de dimensiones eléctricas grandes con diámetro interno $D_i = 44$ mm, ancho = 15 mm y espesor de la estructura $t = 15$ mm. Este anillo resuena en el intervalo de frecuencia de 19 a 22 GHz y este modelado en cobre [25].

Seguidamente será necesario calcular la distancia óptima que debe existir entre la antena alimentadora y la estructura circular de manera que sea capaz de transformar las ondas esféricas de la fuente en un haz colimado.

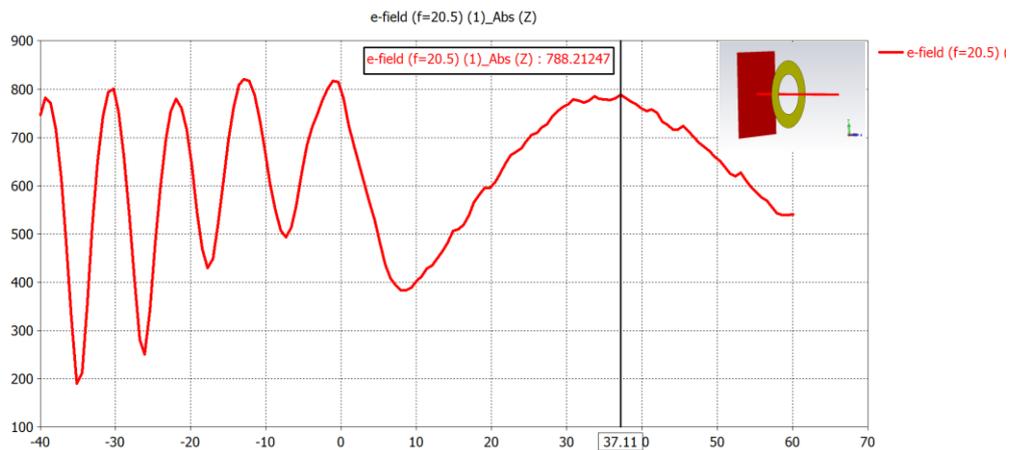
II.4.1 Cálculo de punto focal por el método de Incidencia con onda plana

Las lentes de placas zonales de Fresnel tienen dos modos de operación, transmisión y recepción. En transmisión permiten modificar la fase de una onda esférica incidente en un haz colimado u onda plana mientras que en recepción realizan la operación opuesta [26] [27]

Estos conceptos son empleados para obtener el punto focal, partiendo de incidir una onda plana sobre la estructura en estudio. Concretamente se debe hacer un análisis de la antena lente en modo recepción, en la cual se utiliza una onda electromagnética plana de una fuente de alimentación para iluminar la estructura. Cuando la onda plana incide sobre la lente, los rayos convergen en un punto provocando así una concentración de energía debido al fenómeno de refracción. Esta zona en la que se concentra el campo eléctrico es denominado punto focal y representara el lugar optimo teórico donde se pueda ubicar la antena de alimentación.

Este análisis se realiza empleando el software de simulación electromagnética comercial CST. La Fig. 3 muestra los resultados obtenidos al simular la incidencia de onda plana en la estructura circular a 20.5 GHz

a)



b)

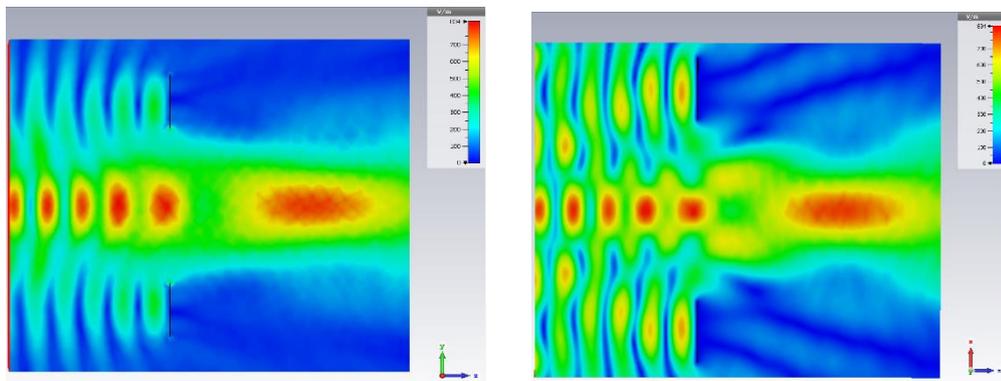


Fig. 3. Comportamiento de campo eléctrico antes y después de la incidencia de onda plana

Como se aprecia en la parte superior derecha de la Fig.3a se traza una línea de simulación que atraviesa el centro del anillo metálico para de esta forma analizar los valores de la magnitud del campo eléctrico. Previo a la incidencia de la onda plana el campo eléctrico tiene un valor de alrededor de 850 V/m, al otro lado del anillo, es decir después de la incidencia estos valores alcanzan un valor máximo de 788 V/m a una distancia de 37.1 mm representado en la Fig. 3b. Claramente este punto indica una mayor concentración de campo como lo demuestra la Fig. 3c y por ende representa el punto focal. De acuerdo a lo que se mencionó anteriormente este punto corresponde a la distancia optima en la que se ubicará la antena alimentadora para que la lente transforme la radiación incidente en un frente de onda plano.

II.5 ALIMENTADORES PARA LAS ANTENAS

II.5.1 Bocina Rectangular

Las antenas bocina son ampliamente utilizadas como alimentación para reflectores y lentes. Comúnmente sirven como estándar para realizar calibraciones y mediciones de ganancia de otras antenas de alta ganancia. Esta consiste en una estructura que permite aumentar el tamaño de la apertura, estrechar el haz y elevar los valores de directividad de una guía de onda. Su uso tan generalizado se debe a la simplicidad en el diseño, construcción, facilidad de excitación, gran ancho de banda y versatilidad, no obstante, su mayor deficiencia está en el volumen, lo que dificulta su integración.

En este apartado se presentará una antena bocina rectangular como alimentador del anillo resonante previamente analizado. Para ello el primer paso será seleccionar la guía de onda comercial para trabajar en la misma banda de frecuencias del anillo, Es este caso se seleccionó la guía WR42 con dimensiones 10.668 X 4.318 mm que trabaja en el intervalo de 17.60 a 26.70 GHz esta constará de una apertura cuadrada de dimensiones 10.668 X 10.668 mm con la intención de conseguir anchos de haz similares tanto para el plano E como el plano H. La estructura de la bocina rectangular se muestra en la Fig. 4 y cabe resaltar que este modelado en aluminio.

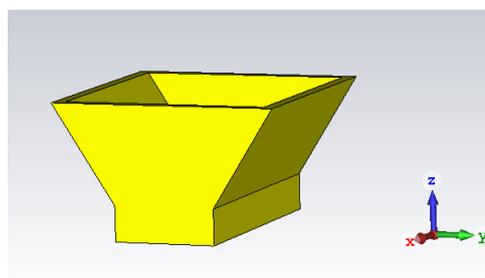


Fig. 4. Estructura de la bocina aislada

La Fig. 5 muestra los resultados del parámetro S11 de la bocina rectangular simulada en el que se puede apreciar un buen nivel de adaptación de la estructura en la banda de interés ($S_{11} < -11.8$ dB).

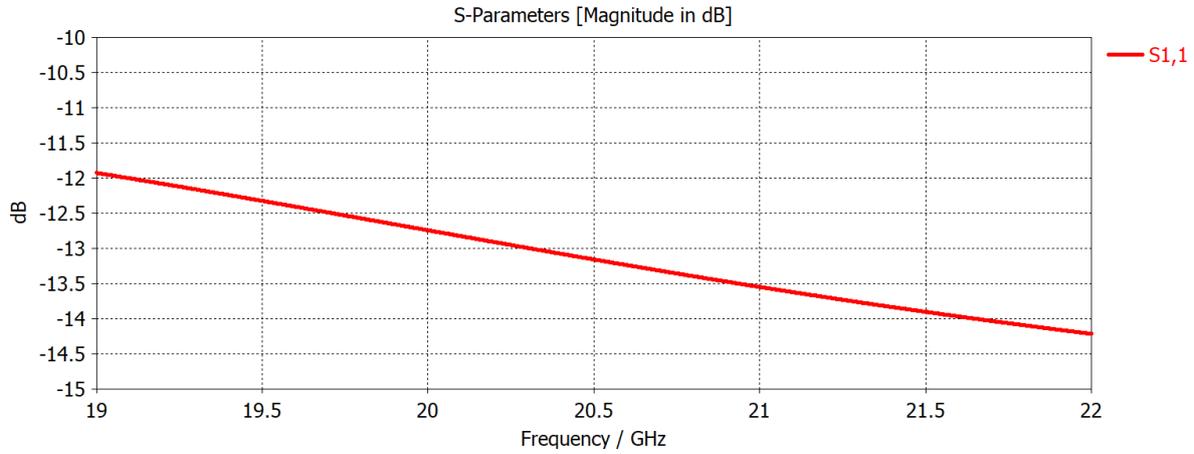


Fig. 5. Simulación del parámetro S11 de la bocina aislada

De igual manera en la Fig. 6 podemos observar el diagrama de radiación en 3D y Polar resultante en el que se obtiene una directividad de 8.58 dB a la frecuencia de 20.5 GHz. Además, se puede comprobar la simetría del diagrama para los planos XZ y YZ.

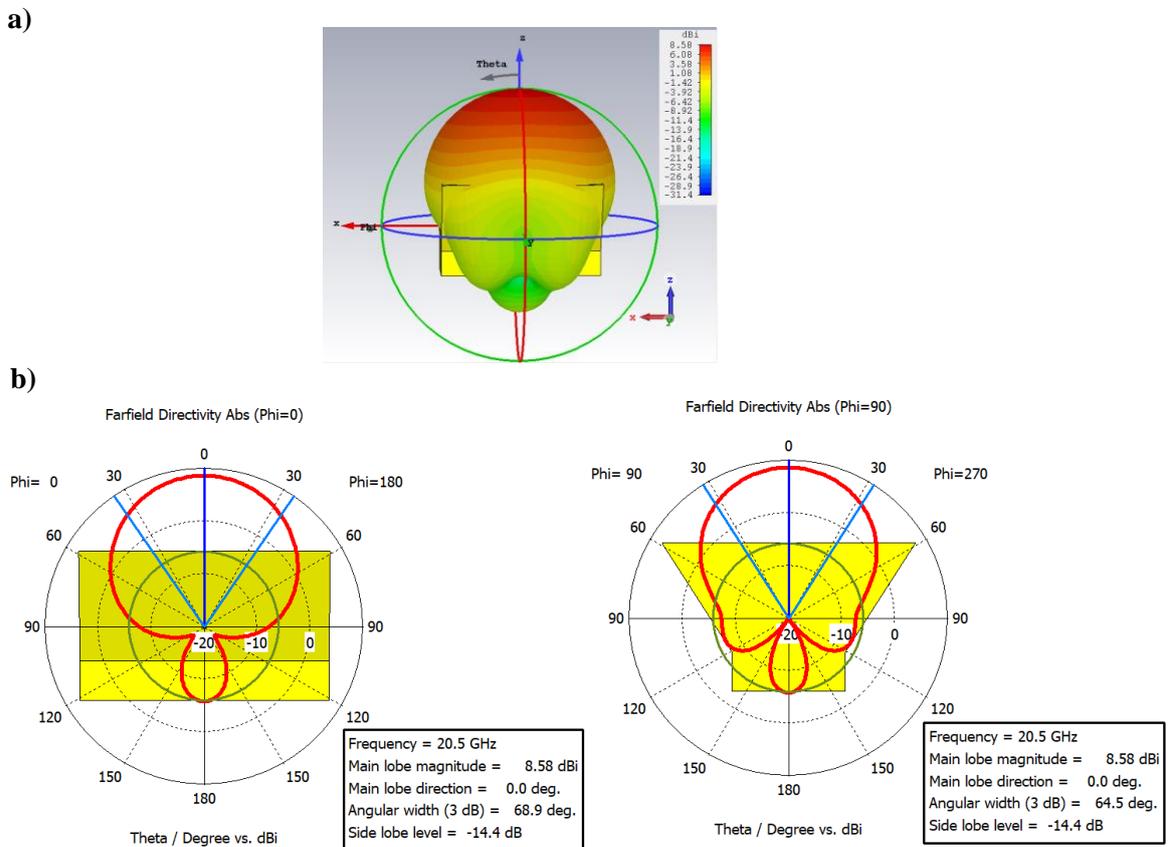


Fig. 6. Diagramas de radiación 3D y polar de la bocina

II.5.2 Bocina Rectangular con plano de Masa

Las reflexiones que produce el anillo resonante disminuyen la eficiencia de la antena lente. Para compensar dicho efecto y elevar la ganancia de la apertura se analiza la bocina rectangular acoplada a un plano de masa de dimensiones 100 X 100 mm creada con material de aluminio. En la Fig. 7. se observa la guía de onda WR42 con su transición a una apertura cuadrada y acoplada al plano de masa.

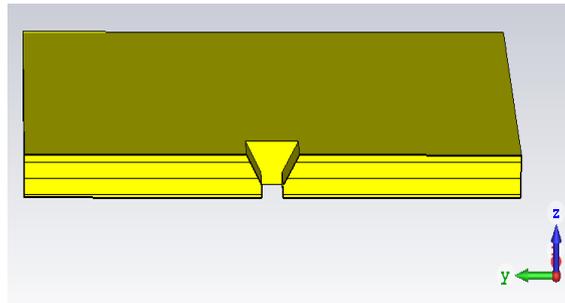


Fig. 7. Estructura de la bocina acoplada a un plano de masa

Los resultados obtenidos de la simulación muestran en la Fig. 8. Que los valores del parámetro S11 son menores a -12.2 dB en la banda de interés, mostrando nuevamente un acoplamiento adecuado en rango de frecuencias en análisis

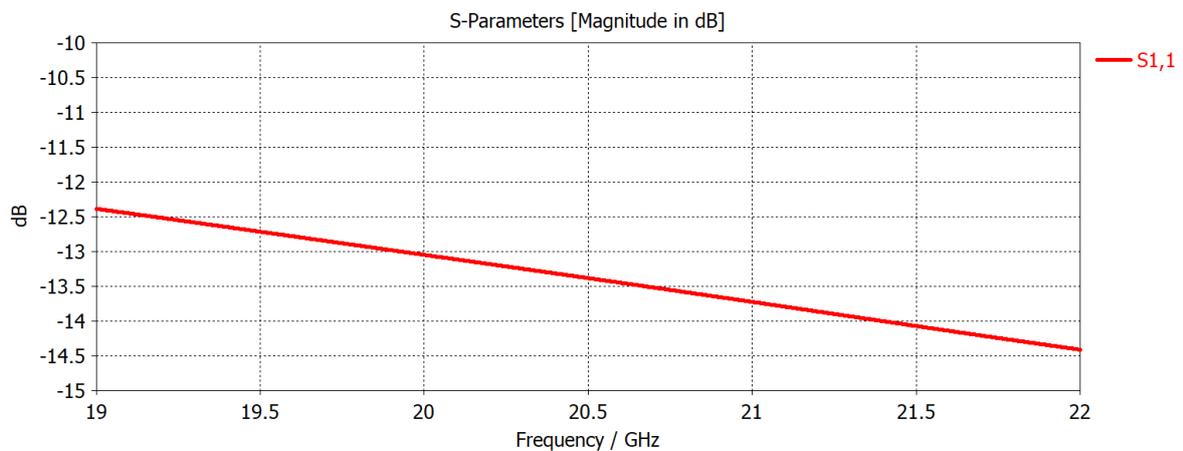


Fig. 8. Simulación del parámetro S11 de la bocina acoplada a un plano de masa

El diagrama de radiación obtenido en la simulación se muestra en la Fig. 9. En esta se puede apreciar que se logra una directividad de 8.29 dBi y de manera similar a los obtenido en la bocina anterior se muestra la simetría del diagrama de radiación

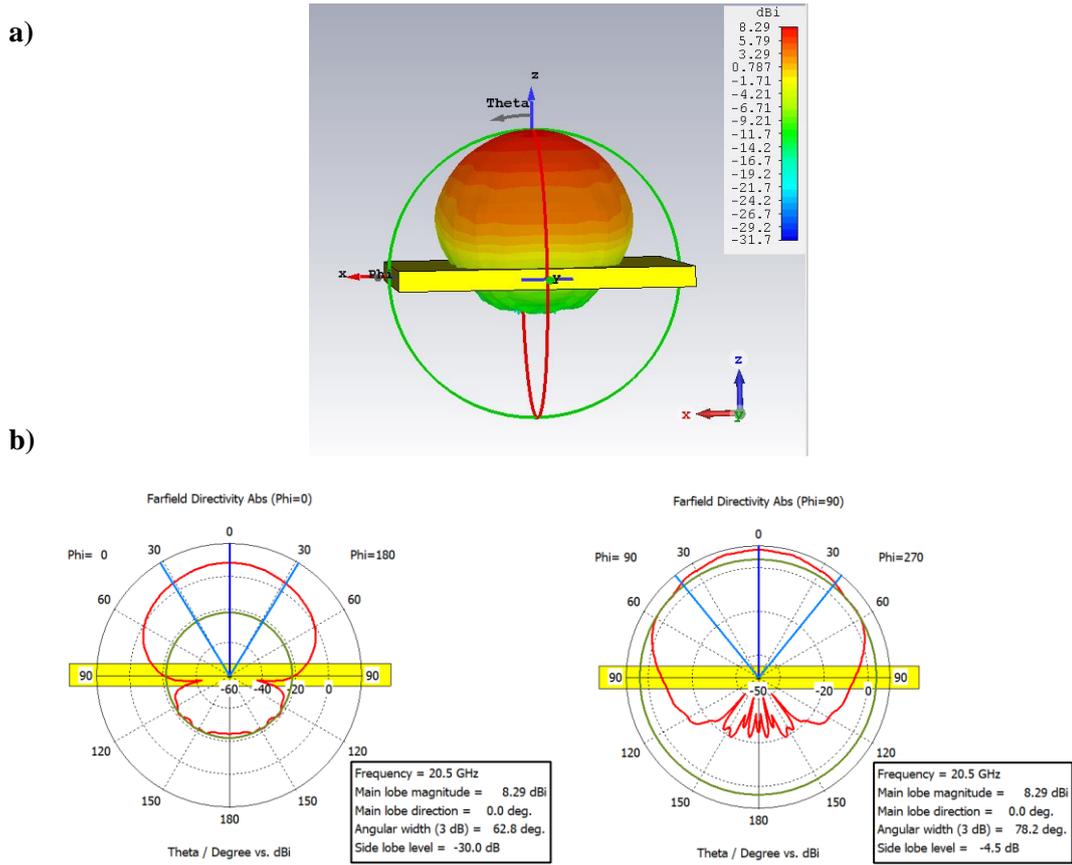


Fig. 9. Diagrama de radiación en 3D y polar de la bocina acoplada a un plano de masa

II.6 ESTRUCTURA DE LA ANTENA LENTE

El sistema de antena lente completo está conformado por el anillo metálico modelado previamente y la antena de apertura cuadrada excitando dicha estructura. Como se había señalado la antena alimentadora está situada a una distancia focal $F = 37.1$ mm, que fue calculada partiendo del análisis de incidencia de onda plana.

La estructura de la lente y los prototipos que serán evaluados en el software de simulación electromagnética en la Fig. 10.

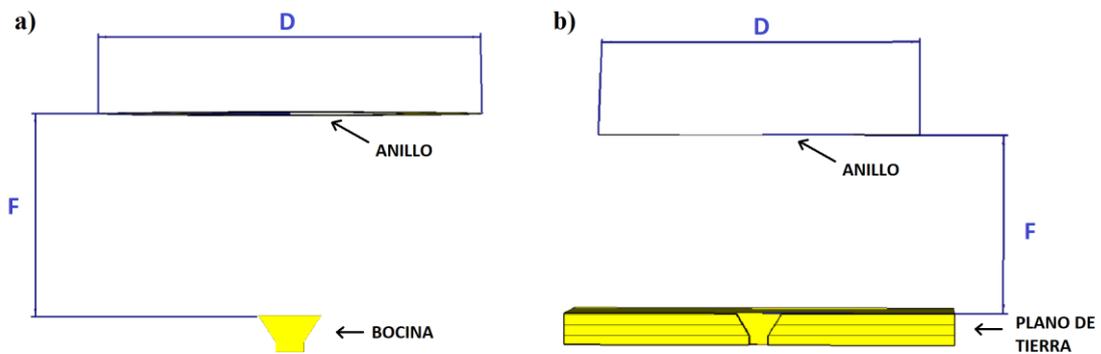


Fig. 10. Estructura de las antenas lente a evaluar

II.6.1 Ajuste de la distancia focal

Anteriormente se calculó la distancia focal utilizando la técnica de incidencia de onda plana, analizando la concentración de radiación en una pequeña región que se forma al otro lado de la estructura. No obstante, con la intención de mejorar la eficiencia de la lente se empleó la herramienta de “barrido paramétrico” que posee el software de simulación electromagnética CST. Con esta podremos variar el espaciado entre la antena bocina y la lente zonal de Fresnel. Se partió con una distancia focal inicial de 36 y se hicieron incrementos de 0.5, seguidamente se tomó el intervalo de 39.1 y 39.5 y se repitió el proceso realizando incrementos de 0.1. Las Fig.11a y Fig.11b muestran el comportamiento de la directividad máxima versus la frecuencia a medida que se varia la distancia focal.

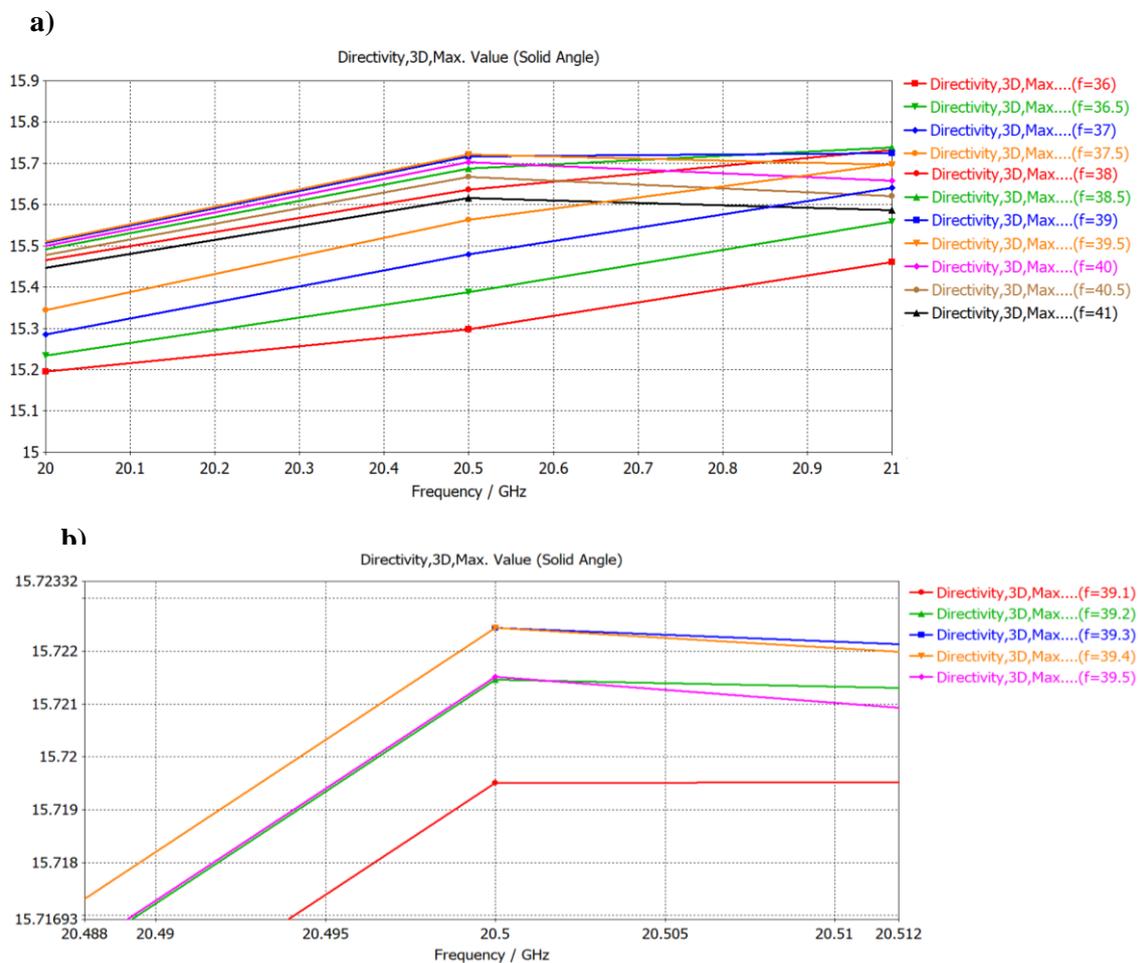


Fig. 11. Directividad vs Frecuencia

Para ajustar la distancia desde la apertura del alimentador hasta la estructura se puede advertir que a 39.3 mm se consigue una mayor directividad de la antena lente para la frecuencia de 20.5 GHz, es decir que a esta distancia se logra una mayor concentración de campo eléctrico.

II.6.2 Resultados

Una vez ajustado la distancia focal, se procede a simular la antena lente. En un inicio se evalúa el anillo metálico excitado por la bocina aislada y luego también se evalúa el caso en el que la bocina esta acoplada a un plano de masa.

En la Fig. 12 se observa los resultados del parámetro S11 con valores por debajo de -11 dB en el rango de frecuencias de 19 a 22 GHz lo que sugiere un nivel de adaptación bueno. Por otro lado, en la Fig. 13 se presenta el diagrama de radiación de la estructura a 20.5 GHz, donde se puede apreciar el aumento de directividad de la antena lente completa en comparación con la bocina aislada, pasando de 8.58 dBi a casi 16 dBi.

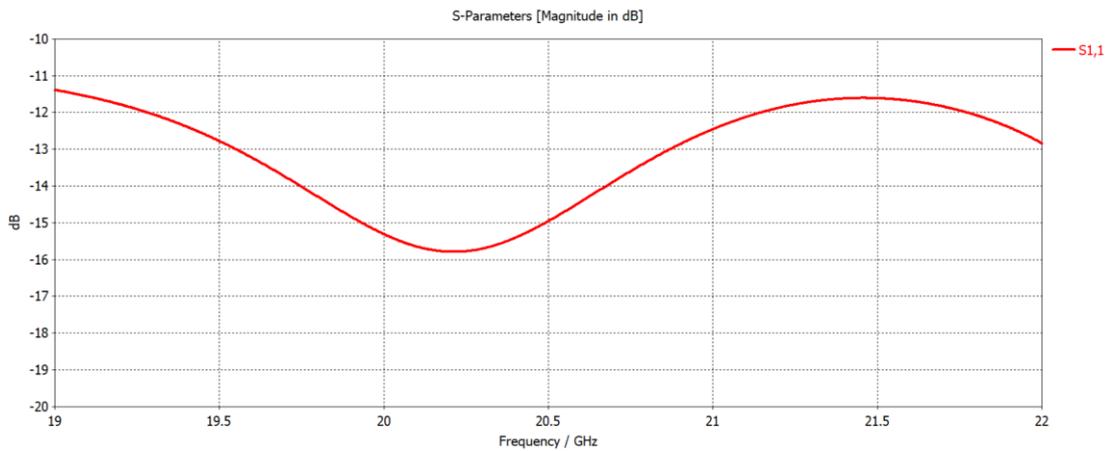


Fig. 12. Simulación del parámetro S11 de la antena lente

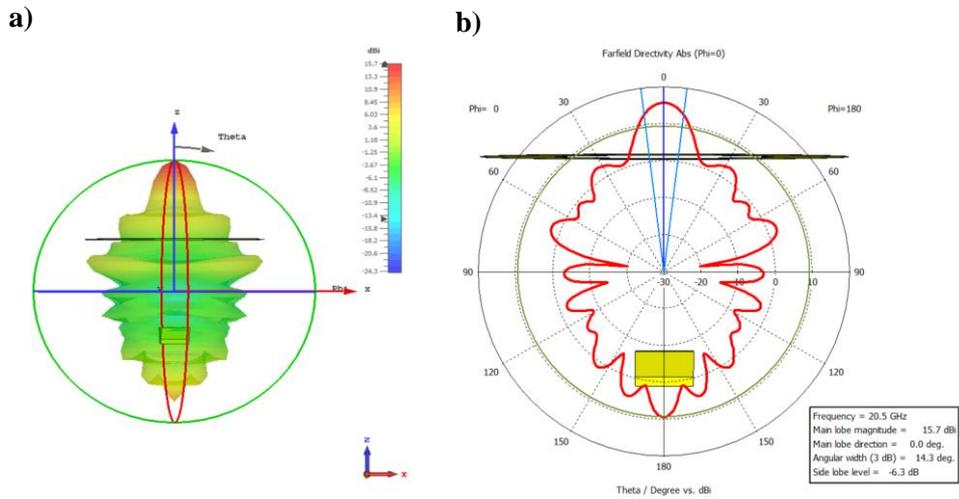


Fig. 13. Diagramas de radiación de la antena lente

Así mismo como se mencionó previamente, se realiza una segunda simulación de la antena lente asociada a una bocina con plano de masa con la finalidad de aprovechar las reflexiones que se producen en el anillo metálico. La Fig.14 Muestra nuevamente buenos niveles de adaptación con valores del parámetro S11 por debajo de -10.5 dB. También en la Fig.15 se presenta los diagramas

de radiación en 3D y Polar, comprobándose la mejora en la directividad que se logra con el plano de masa, alcanzando un valor de 19 dBi.

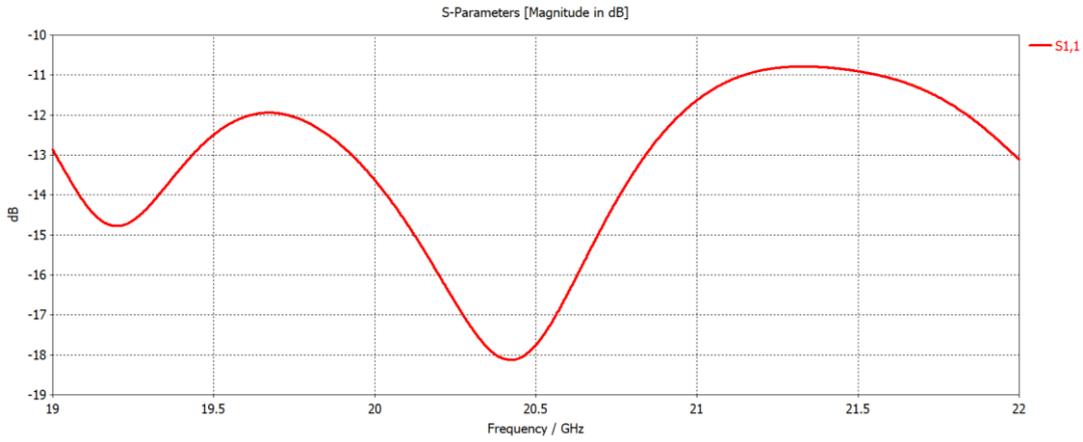


Fig. 14. Simulación de parámetros S11 de la antena lente

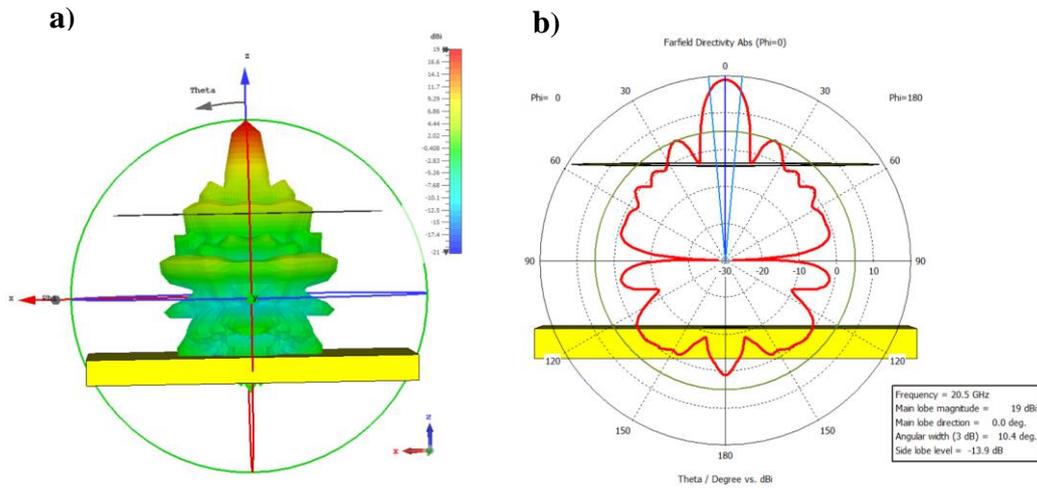


Fig. 15. Diagrama de radiación de la antena lente

Por último, se presenta un cuadro comparativo de las directividades obtenidas por la bocina aislada, la bocina acoplada a un plano de masa, y las antenas lente compuestas por ambas.

Tabla 1. Comparación de las directividades obtenidas

Estructura	Directividad
Bocina aislada	8.58 dBi
Bocina con plano de masa	8.29 dBi
Bocina y anillo	15.7 dBi
Bocina con plano de masa y anillo	19 dBi

II.7 RESUMEN DE RESULTADOS

En este capítulo se han analizado puntos importantes como:

- Se presenta una breve revisión de las antenas zonales de Fresnel y su uso en altas frecuencias, demostrando su potencial para su empleo en estaciones base de quinta generación móvil.
- También se analiza un anillo metálico de dimensiones grandes, cuyo punto focal es hallado con la técnica de incidencia de onda plana.
- Así mismo se hace un estudio de dos antenas alimentadoras para lentes, una bocina aislada y otra acoplada a un plano de masa, ambas de apertura cuadrada para mantener simetría en sus diagramas de radiación.
- Se presentan los resultados de simulación de dos antenas lente con diferentes alimentadores para finalmente realizar una comparación de todas las estructuras analizadas en términos de directividad.

III ANALISIS Y DISEÑO DE ANTENAS MULTHAZ

Una tecnología clave para el impulso de la quinta generación móvil son los sistemas de antenas multihaz que operan en la banda milimétrica y que últimamente han captado la atención de los investigadores para dar soporte a las altas velocidades de transmisión, mayores eficiencias espectrales y mejores relaciones señal a ruido que requiere 5G.

Se sabe que las ondas en la banda milimétrica sufren severas pérdidas en el espacio libre, para suplir esta característica es importante contar con antenas de alta ganancia y haces directivos que mejoren el SNR y mitiguen el efecto Doppler. Las antenas multihaz tienen la capacidad de generar múltiples haces directivos con altos valores de ganancia que los hace cruciales para superar estas deficiencias y habilitar MIMO masivo [5][28]

Las antenas multihaz han sido muy usadas en sistemas de radar y comunicaciones por satélite, mas no en comunicaciones móviles por su voluminosidad, no obstante, considerando las longitudes de onda milimétricas, las tecnologías de antenas planares y de lentes, es posible conseguir dispositivos más compactos que permitan servir a diferentes usuarios simultáneamente con diferentes haces directivos. Estos beneficios hacen de las antenas multihaz dispositivos prometedores para su uso en estaciones base como terminales de usuario de sistemas de quinta generación móvil.

A continuación, en este capítulo se presenta algunas soluciones de antenas multihaz empleando lentes zonales de Fresnel.

III.1 ANTENA MULTIHAZ CON ALIMENTADORES SOBRE CURVAS DE EXPLORACION

El escaneo de haz resulta complicado y costoso cuando se usa arrays en fase, sin embargo, se puede conseguir fácilmente en antenas FZP donde la exploración del haz se logra desplazando la antena de alimentación. Este desplazamiento no se realiza de forma aleatoria, sino corresponde a un patrón establecido denominado superficie de exploración que traza posiciones en los que la ganancia es lo mayor posible para determinados ángulos de escaneo de haz.

En una lente zonal de Fresnel la curva de exploración se asemeja a un círculo [29]. Específicamente en nuestro caso se trata de un círculo con radio F y cuyo centro coincide con el centro del anillo metálico como se muestra en la Fig. 16.

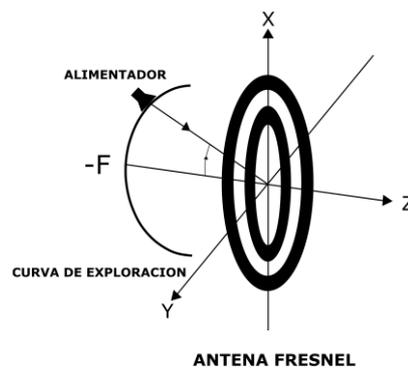


Fig. 16. Curva de exploración en una antena Fresnel

III.1.1 Estructura de La Antena

El sistema está conformado por nueve antenas alimentadoras y un anillo metálico de dimensiones grandes. Cinco de las bocinas se encuentran dispuestas en un semicírculo cuyo radio corresponde al valor optimizado de la distancia focal $F = 39.3$ mm, mientras que las cuatro restantes forman junto con la bocina central otro semicírculo del mismo radio, pero rotadas 90 grados respecto al eje de propagación z tal como se muestra en la Fig. 17.

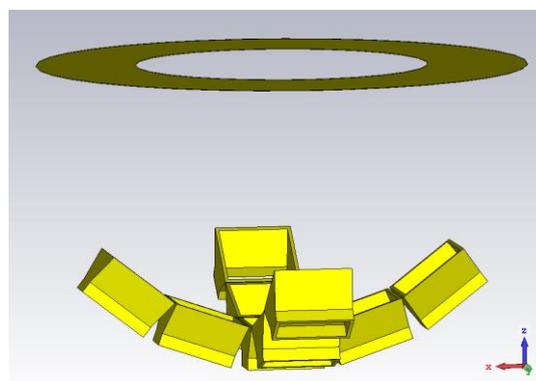


Fig. 17. Estructura de la antena multihaz con alimentadores en semicírculo

Como puede observarse ambos semicírculos comparten la bocina central ubicada en el eje de propagación, en tanto las bocinas laterales forman ángulos de 20 y 40 grados con dicho eje de manera que existe una distancia de separación mínima entre ellas.

III.1.2 Resultados

Se analiza el diagrama de radiación a 20.5 GHz obtenido en el software de simulación electromagnética. Al tratarse de sistema de antena multihaz pasiva cada antena alimentadora genera un haz, así tenemos 9 haces en diferentes direcciones con directividades mayores a 14.6 dBi y nivel de lóbulos secundarios SLL menores a -6.5 dB. El haz generado por la bocina central está en dirección del eje de propagación con una directividad de 15.8 dBi y un ancho a 3dB de 14.3 grados como se muestra en la Fig. 18.

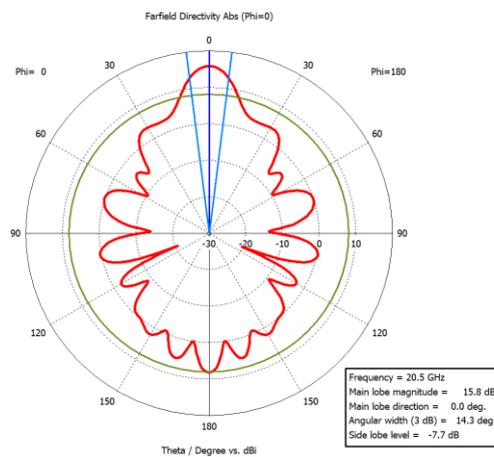


Fig. 18. Haz central con un máximo de directividad de 15.8 dBi

Así mismo tenemos haces orientados en dos planos: En Phi = 0 se generan cuatro haces que se con direcciones -27,-14, 14 y 27 grados con directividades de 14.9, 15.6, 15.6 y 14.9 dBi respectivamente, cada uno de ellos con un ancho de haz de 14 dB. Loas haces más representativos de este plano se observan en la Fig. 19

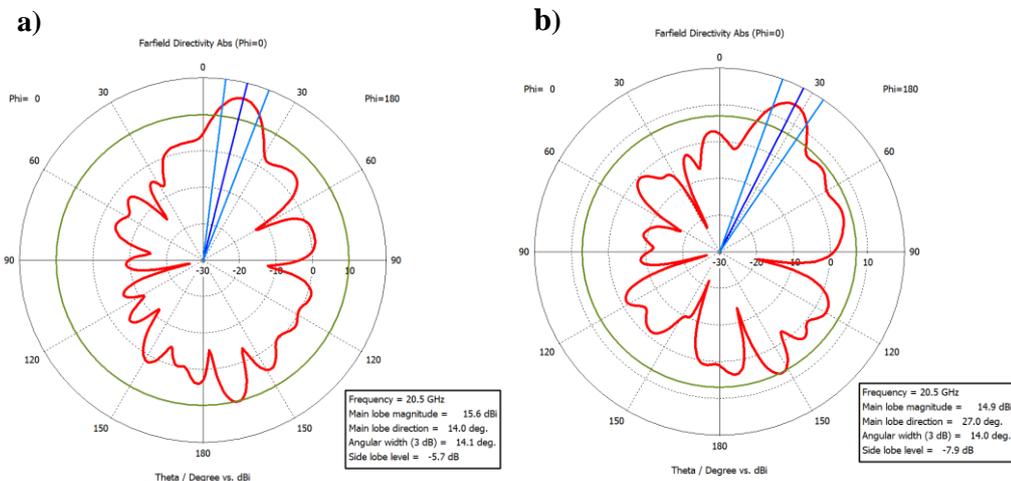


Fig. 19 a) haz en dirección 14 grados con 15.6 dBi de directividad b) haz en dirección 27 grados con 14.9 dBi de directividad

Por otro lado, también se tiene 4 haces en el plano $\Phi = 90^\circ$ con direcciones similares al anterior de -26,-13,13 y 26, con directividades de 14.6, 14.7, 14.7 y 14.6 respectivamente y anchos de haz de 13.6, 14.2, 13.7, 14.7 grados. La Fig. 20 muestra los haces más representativos en este plano

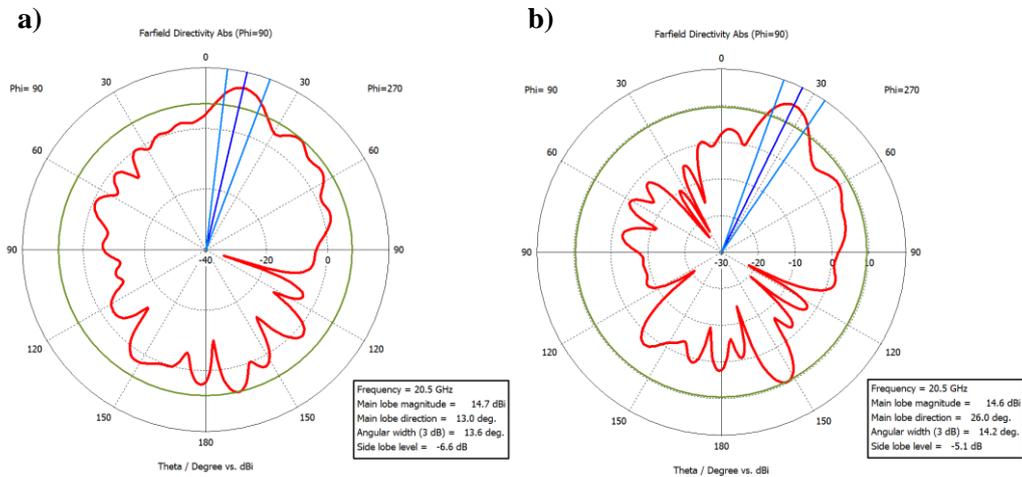


Fig. 20. a) Haz en dirección 13 grados con 14.7 dBi de directividad, b) haz en dirección 26 grados con 14.6 dBi de directividad

III.2 ANTENA MULTHAZ CON ALIMENTADORES EN UN MISMO PLANO

La distribución circular de las antenas alimentadoras dificulta el diseño, fabricación e implementación de antenas de placas zonales. En consecuencia, se plantea ubicar las antenas alimentadoras sobre un mismo plano, de modo que el desplazamiento de las bocinas a lo largo de su eje transversal sea capaz de generar haces direccionados [30].

III.2.1 Estructura de la antena

Esta configuración, al no necesitar bocinas posicionadas en forma circular, posibilita el empleo de varias antenas alimentadoras ubicadas en un área más reducida generando cada bocina un haz en distintas direcciones. La antena puede observarse en la Fig. 21, consta de 9 bocinas distribuidas en una matriz cuadrada de 3 x 3 y el mismo anillo metálico de la configuración anterior, cabe recalcar que se mantiene la distancia focal de 39.3 mm.

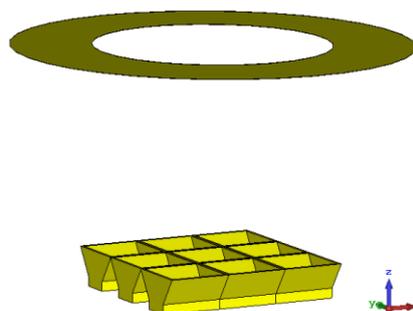


Fig. 21. Estructura de la antena multihaz con alimentadores sobre un plano

III.2.2 Resultados

Se presenta los diagramas de radiación obtenidos en la simulación. Se consigue 9 haces en distintas direcciones con valores de directividad mayores a 13.9 dBi y con niveles de lóbulo secundario SLL menores a -3.6 dBi. El haz central en dirección del eje de propagación tiene una directividad de 15.4 dBi y un ancho de haz de 14.6 grados como se muestra en la Fig.22.

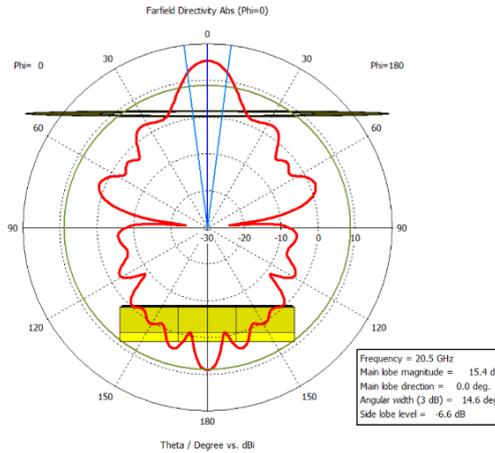


Fig. 22. Haz central con un máximo de directividad de 15.4 dBi

En tanto las bocinas laterales generan haces orientados en distintos planos. En el plano $\Phi = 0^\circ$ y se tienen dos haces con direcciones de 13 y -13 grados cada uno con una directividad de 14.8 dBi y ancho de haz de 14.3 grados como se parecía en la Fig. 23. Resultados similares se obtienen en el plano $\Phi = 90^\circ$.

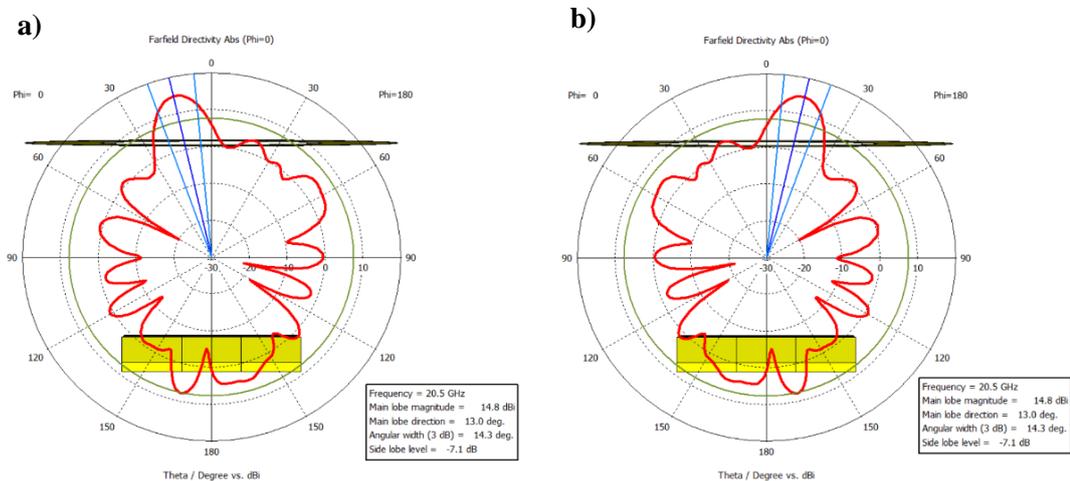


Fig. 23 Haces en el plano $\Phi = 0$ con rango de exploración de 26°

En $\Phi = 45^\circ$ los haces tienen direcciones de $\pm 17^\circ$ con valores de directividad de 13.9 dBi y anchos de haz de 13.1 grados. Estos se aprecian en la Fig.24. dichos diagramas se reiteran en el plano $\Phi = 135^\circ$

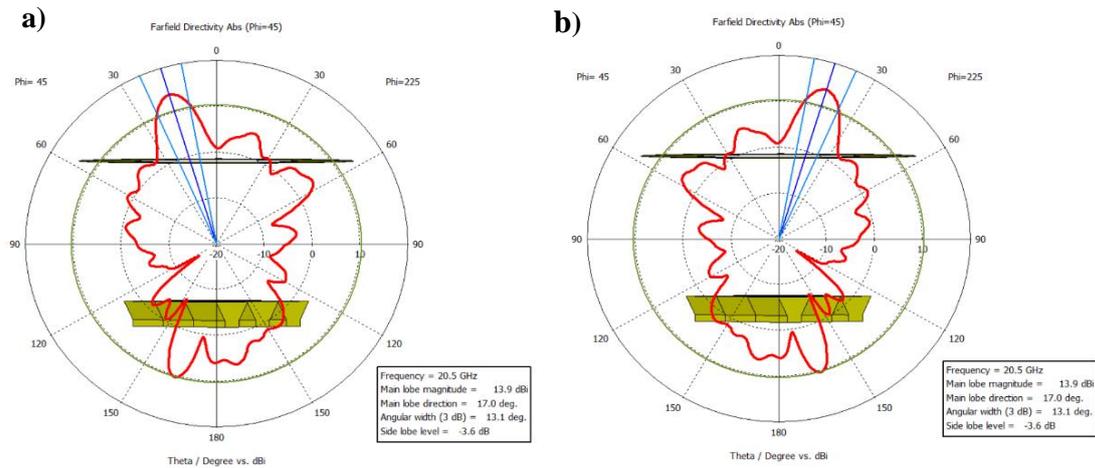


Fig. 24. Haces en el plano $\Phi = 45^\circ$ con rango de exploración de 34°

Se advierte que los valores de directividad son menores que en la configuración anterior ya que las antenas alimentadoras no están en las posiciones de mayor ganancia, además resulta inviable la añadidura de bocinas para formar arrays de mayor dimensión, por ejemplo, una 4×4 , debido a que produciría mayores niveles de lóbulos secundarios y distorsión en los haces orientados. Por el contrario, esta configuración de bajo perfil permite el escaneo electrónico en mayor número de planos que la estructura anterior, que sumado a su diseño y construcción más sencilla es una solución a considerarse.

III.3 ANTENA MULTIHAZ DE VARIOS ANILLOS METALICOS Y VARIOS ALIMENTADORES

Aplicando el direccionamiento de haz que produce tanto el desplazamiento transversal de las bocinas y la inclinación de las mismas, se plantea una solución de bajo perfil que logre una mayor área de exploración, para ello se usa un número superior de antenas alimentadoras ubicadas en un mismo plano generando a su vez haces en distintas direcciones.

III.3.1 Estructura de la antena

El prototipo se desarrolló para obtener un sistema con la capacidad de escanear un haz sobre un hemisferio o para aplicaciones de cobertura hemisférica. La estructura de la lente conformada por siete anillos y 19 antenas alimentadoras se muestra en la Fig.25. Se puede apreciar que existe un anillo central rodeada por otros seis, estos últimos mantienen una inclinación de 15 grados con el propósito de emular el círculo focal y situar las antenas alimentadoras sobre un mismo plano, además esta inclinación también ensanchará el ángulo de barrido del haz.

Cada uno de los anillos es alimentado con tres bocinas, es decir que por cada uno de ellos se producirán 3 haces con distintas direcciones. Las antenas alimentadoras del anillo central tienen una apertura mayor en comparación a las laterales con la finalidad de obtener mayor directividad y compensar su ubicación ligeramente superior a la distancia focal óptima. Por su parte las antenas alimentadoras de los anillos laterales tienen una pequeña separación entre ellas y un desplazamiento transversal de 14 mm respecto al punto focal.

También es necesario mencionar que existe una distancia de separación entre el anillo central y los laterales de 10mm debido a que se busca que la radiación de sus alimentadores interfiera mínimamente entre ellos.

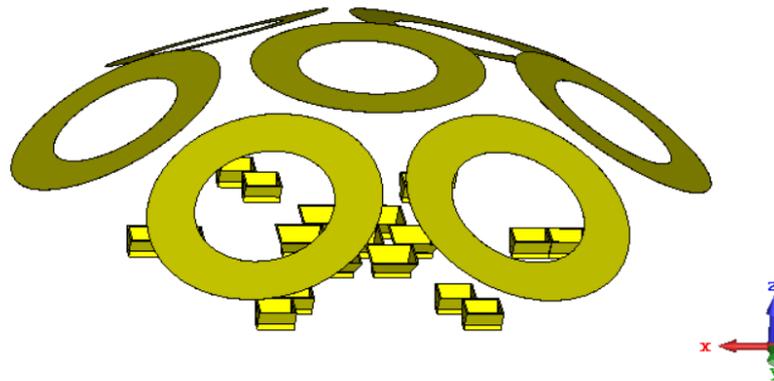


Fig. 25. Estructura de la antena multihaz con 7 anillos

III.3.2 Resultados

La estructura hemisférica logra generar 19 haces en tres planos distintos, un haz central y 18 con orientaciones diferentes. El diagrama del haz central está en dirección del eje de propagación y tiene una directividad máxima de 15.8 dBi con un ancho de haz de 10.4 grados y se presenta en la Fig. 26.

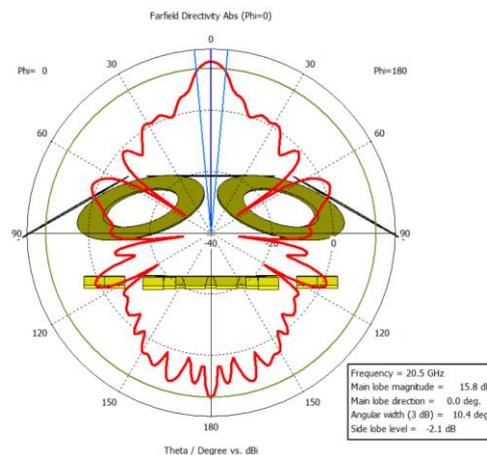


Fig. 26. Haz central con una directividad máxima de 15.8 dBi

En el plano $\Phi = 0$ se forman 6 haces con direcciones $-31, -19, -15, 15, 19, 31$ grados con anchos de haz de $12.5, 11.4, 12.7, 12.7, 12.5, 11.4, 12.5$ grados. Los haces mas representativos se muestran en la Fig. 27

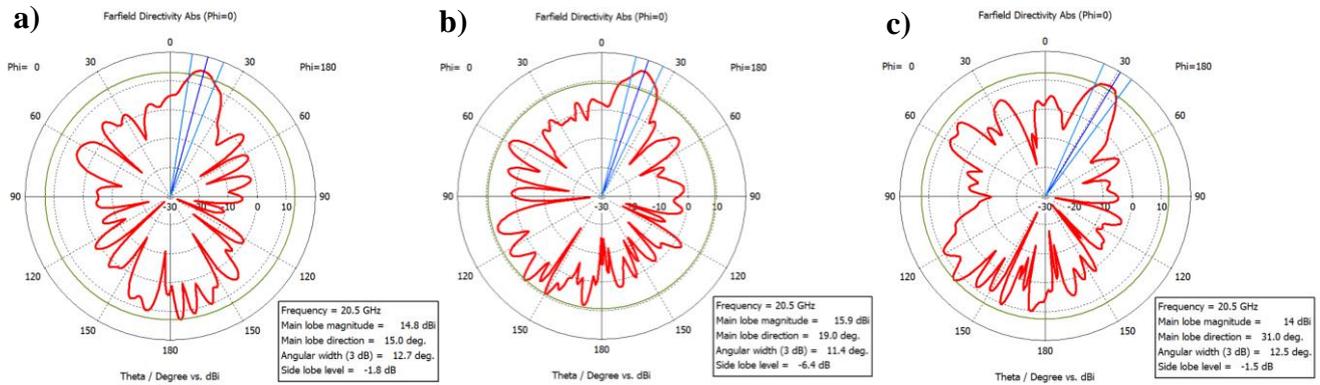


Fig. 27. Haces representativos en el Plano $\Phi = 0$ con direcciones $15, 19, 31^\circ$

Mientras tanto en el plano $\Phi = 60^\circ$ que se muestra en la Fig. 28 también se consigue 6 haces con direcciones $-32, -21, -15, 15, 21$ y 33 grados con anchos de haz de $12.6, 12.2, 11.6, 11.6, 12.2, 12.6$ grados respectivamente.

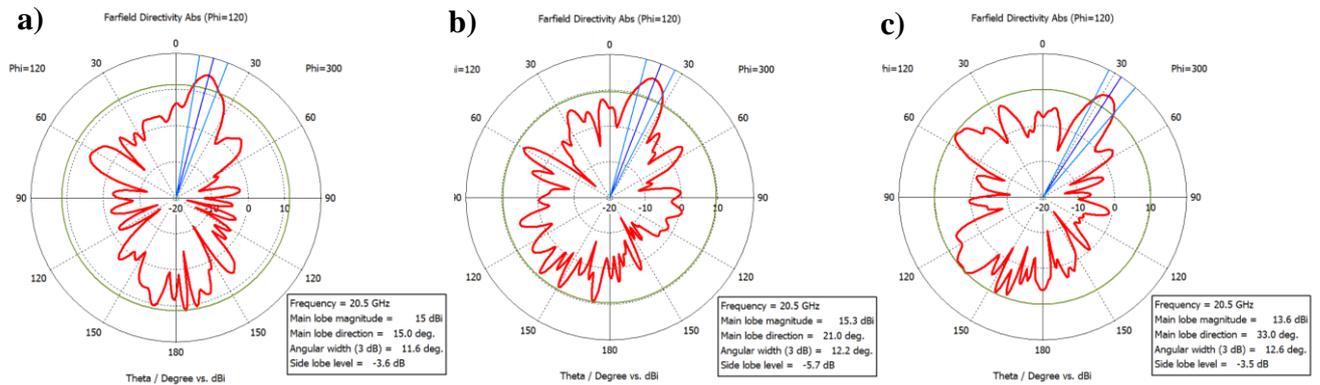


Fig. 28. Haces representativos en el Plano $\Phi = 0$ con direcciones $15, 21, 33^\circ$

Por último, se generan los restantes 6 haces en el plano $\Phi = 120^\circ$ que por simetría corresponden a las direcciones y anchos de haz del plano $\Phi = 60^\circ$.

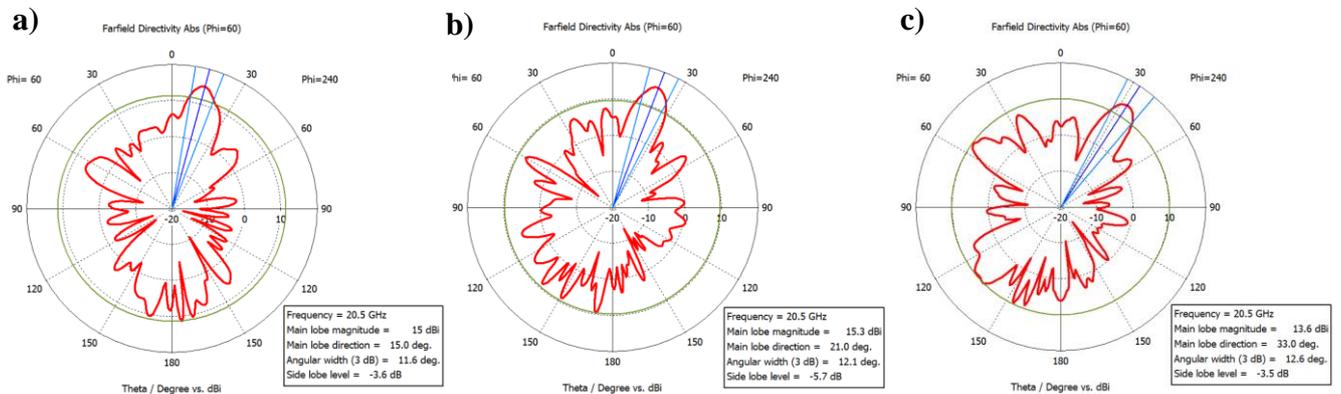


Fig. 29. Haces representativos en el Plano $\Phi = 0$ con direcciones $15, 21, 33^\circ$

III.4 SISTEMA DE ANTENAS DE ALTA DIRECTIVIDAD

Uno de los fines de un array de antenas es aumentar la directividad mediante la interferencia de campos radiados de cada antena. Como se sabe la directividad es una medida de la capacidad que tiene el agrupación para concentrar el haz principal en una dirección determinada [23].

En esta sección se emplea un array de antenas zonales de Fresnel con el propósito de que sus campos interfieran constructivamente y se consiga la máxima directividad.

III.4.1 Estructura de la antena

Esta antena está compuesta por una agrupación de 7 anillos, cada uno alimentado por una apertura cuadrada ubicada en la distancia focal óptima anteriormente calculada, $F = 39.3\text{mm}$ y acoplada a un plano de masa como se observa en la Fig. 30. La finalidad de esta configuración es aumentar la directividad del sistema excitando simultáneamente todas las antenas alimentadoras, además el sistema permitirá convertir las reflexiones producidas entre el anillo y el plano de masa en rayos directivos hacia la dirección del eje de propagación.

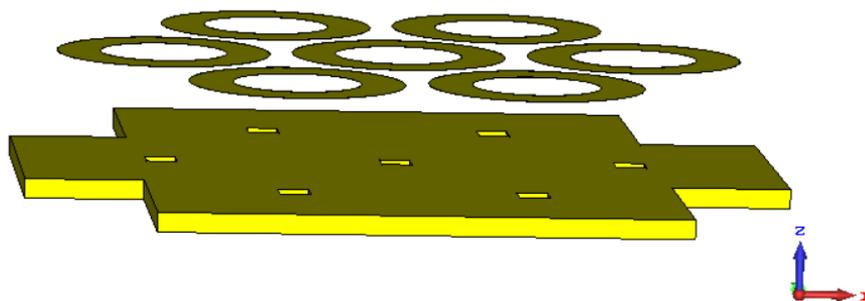


Fig. 30. Estructura de la antena altamente directiva

III.4.2 Resultados

La Fig. 33. revela los resultados del diagrama de radiación obtenidos en el software de simulación, como se observa con esta configuración se consigue una mejora significativa en los valores de directividad aumentando en un factor de 10, alcanzándose así una directividad máxima de 27.4 dBi en dirección del eje de propagación. También es necesario mencionar que se obtiene un ancho de haz a 3dB de 3.7 grados y un nivel de lóbulos secundarios menor a -12.6 dB.

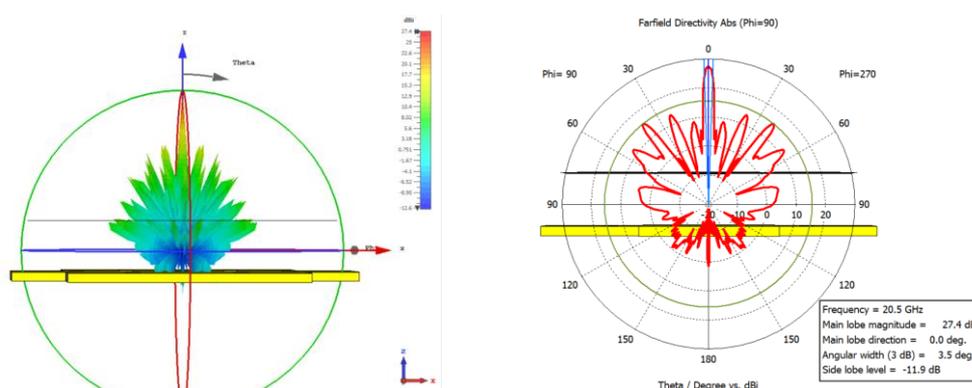


Fig. 31. Diagramas de radiación de la antena altamente directiva

III.5 RESUMEN DE RESULTADOS

- Se proponen dos diseños de antenas multihaz empleando un solo anillo metálico y varias antenas alimentadoras en diferentes disposiciones; sobre un semicírculo y sobre un mismo plano. Obteniéndose en ambos resultados satisfactorios en la generación de haces direccionados.
- Así mismo se diseña una antena multihaz con 7 anillos y 19 alimentadores, dando como resultado 19 haces con distintas direcciones y con un amplio rango de exploración.
- Para finalizar se plantea un diseño de un array de 7 antenas lente con plano de masa para lograr máxima directividad en dirección del eje de propagación

IV ANTENA LENTE MULTHAZ EN LA BANDA MILIMETRICA

La elección de una frecuencia dentro del amplio espectro milimétrico será clave para cumplir con los requerimientos de la quinta generación móvil. Anteriormente empresas como Samsung y Qualcomm realizaron mediciones de canal y demostraron que 28 GHz es una frecuencia viable para las comunicaciones celulares [2]. En estas mediciones validaron la pérdida de ruta esperada para entornos urbanos, además Qualcomm realizó experimentos antenas para demostrar la tecnología de formación de haz direccional para comunicaciones sin línea de visión

Por lo expuesto en este trabajo también se considera la frecuencia de 28 GHz para desarrollar prototipos de antenas lente multihaz que sean aprovechables en estaciones base 5G.

IV.1 ANTENA LENTE EN LA BANDA DE 28 GHZ

El estudio inicia considerando un anillo metálico con un radio de apertura grande cuyo diámetro interno D_i mide 32 mm ($3*\lambda$), con ancho $w = 11$ mm ($1.02 * \lambda$) y espesor $t = 0.035$ mm modelado en cobre. Al igual que en capítulo anterior en la Fig.32 se utiliza la técnica de incidencia de onda plana para analizar la concentración de campo eléctrico al otro lado del anillo y de este modo hallar la distancia a la que se encuentra el punto focal.

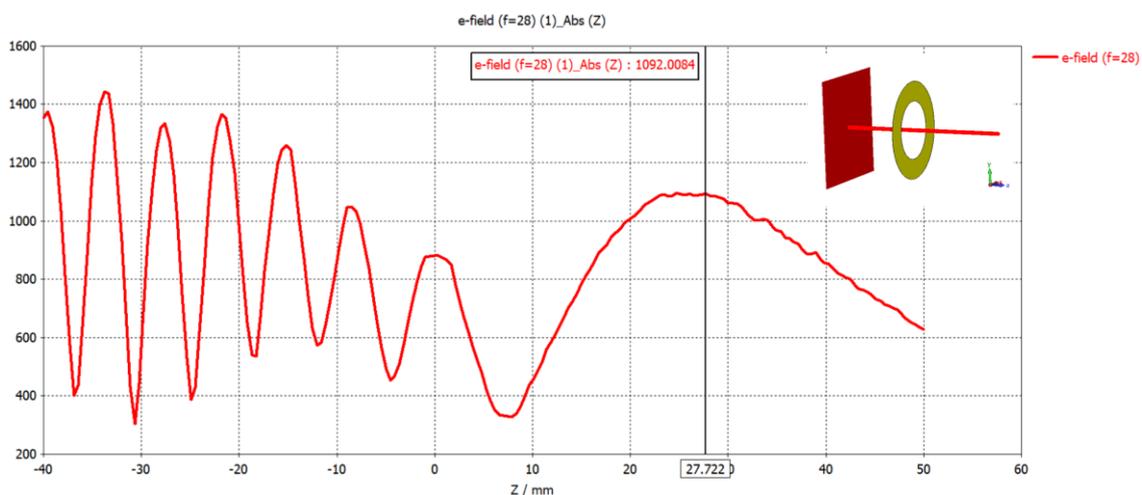


Fig. 32. Comportamiento del campo eléctrico antes y después de la incidencia de onda plana

Como se observa a la distancia $F = 27.7$ existe una mayor concentración de campo eléctrico, representando el punto en el que debe ubicarse la antena alimentadora.

Por otro lado, al igual que los modelos desarrollados en la frecuencia de 20.5 GHz se opta por una bocina para excitar el anillo. Por ende, como primer paso se selecciona la guía de onda comercial WR34 que trabaja en el rango de frecuencias de 22 a 33 GHz con una dimensión de 8.636 x 4.318 mm. Seguidamente se le incorpora una apertura de 8.63 mm creando de esta forma una bocina de apertura cuadrada mecanizada en aluminio que como se mencionó anteriormente busca simetría en su diagrama de radiación en los planos H y E. Los resultados de simulación en CST se muestran en la Fig.33.

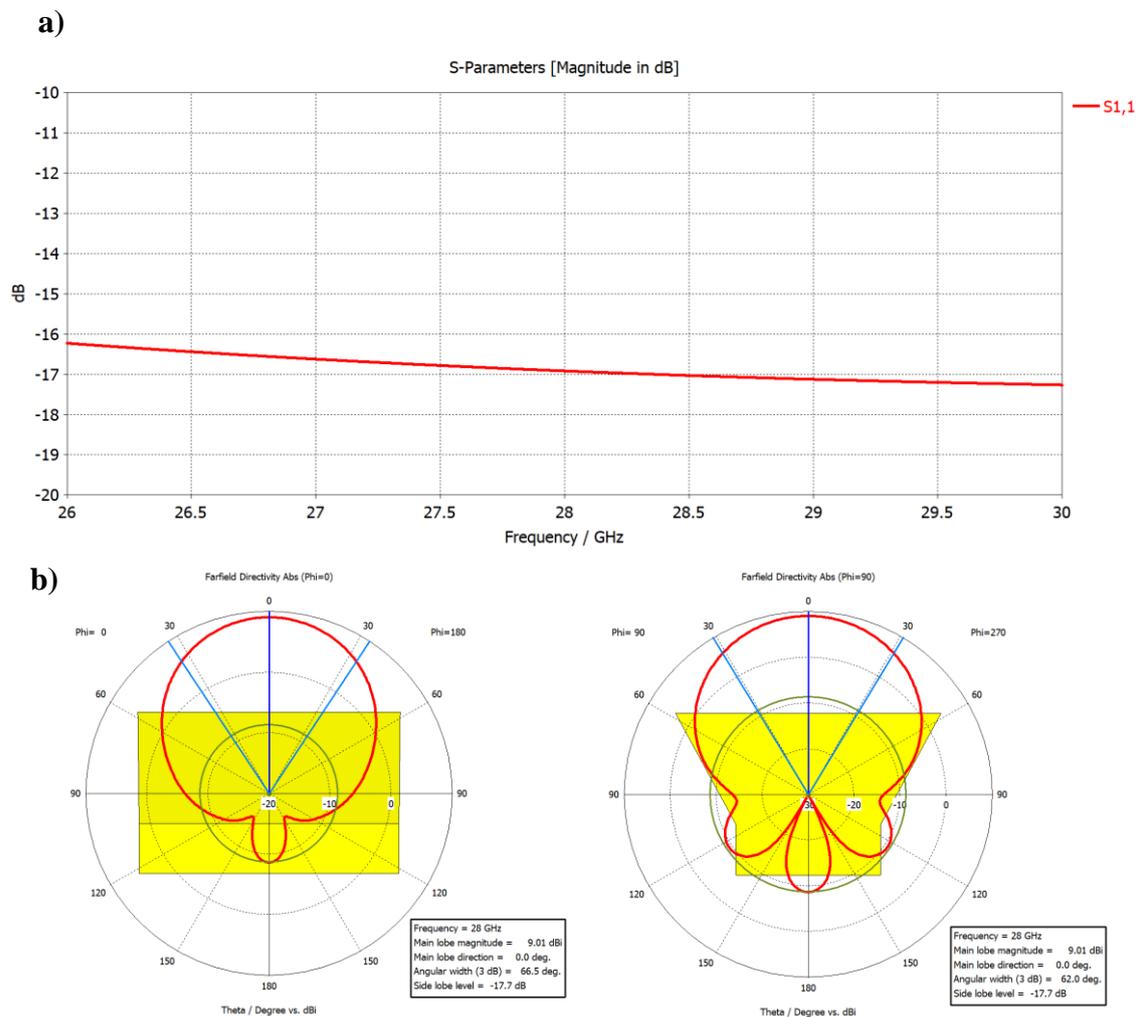


Fig. 33. Resultados del parámetro S11 y diagramas de radiación de la bocina

Como se observa en la Fig. 33a la bocina tiene un nivel de adaptación adecuado con valores de s_{11} por debajo 16 en la banda de 26 a 33 GHz. También en la Fig. 33b se puede ver que la directividad alcanzada es de 9 dBi con un diagrama de radiación casi simétrico en ellos planos H y E.

El siguiente paso será analizar el anillo acoplado a la bocina como un sistema de antena lente completo. Pero antes análogamente a lo visto en el capítulo anterior se realiza el ajuste de la distancia focal empleando la herramienta de barrido paramétrico, así como muestra la Fig.34.

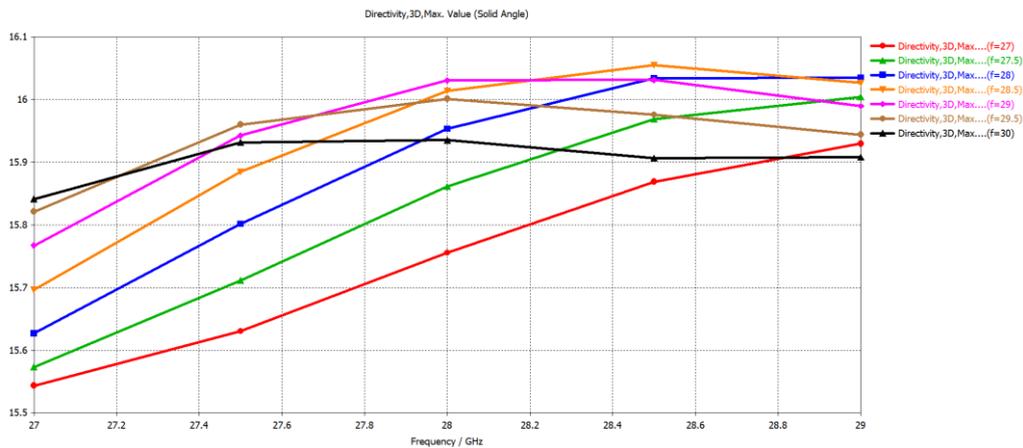


Fig. 34. Directividad vs frecuencia

Finalmente, este procedimiento nos permitirá ubicar la antena alimentadora a una distancia de 29 mm. Esta antena es analizada en el software de simulación electromagnética obteniéndose e los resultados que se muestran a continuación en la fig. 35.

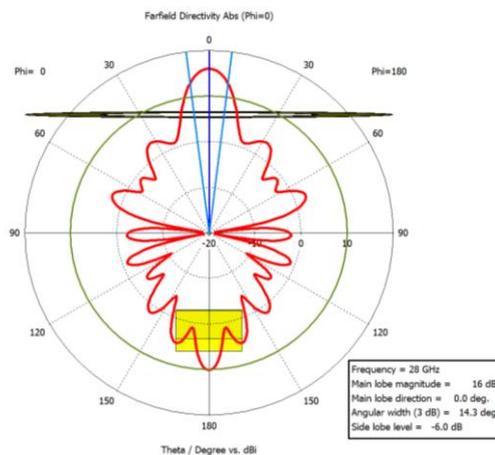


Fig. 35. Diagrama de radiación de la antena lente

Se observa que la directividad máxima conseguida es de 16 dBi en dirección del eje de propagación y con un ancho de haz de 14.6 grados.

IV.2 ANTENAS MULTIHAZ EN LA BANDA DE 28 GHZ

Al igual que en el capítulo anterior se diseñan modelos para obtener múltiples haces en diferentes direcciones. El primer modelo utiliza un solo anillo y dos distribuciones semicirculares de los alimentadores con radio $F = 29.3$ mm como se muestra en la fig.36 de modo que su posición permita directividades elevadas.

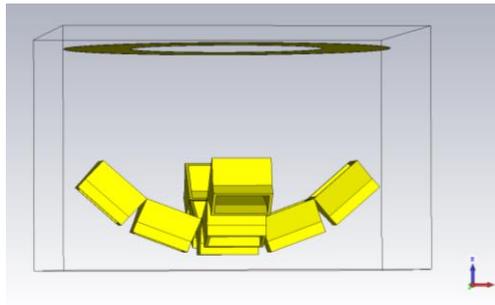


Fig. 36. Estructura de la antena multihaz con alimentadores en semicírculo

Los resultados del diagrama de radiación obtenidos para cada haz se muestran a continuación:
 El primer resultado es el haz central en dirección del eje de propagación con una directividad máxima de 16.7 dBi que se aprecia en la Fig.37.

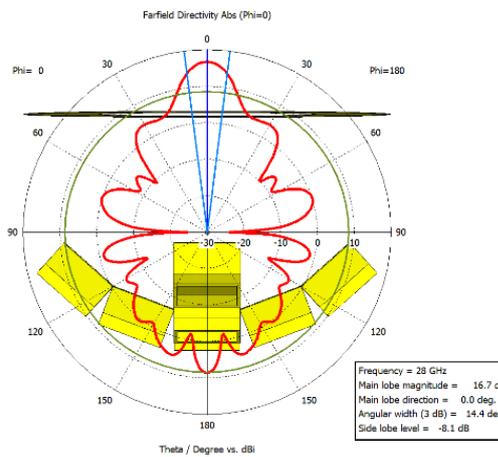


Fig. 37. Diagrama de radiación del haz central

Dos haces representativos obtenidos en el plano Phi = 0 se muestran en la Fig.38.

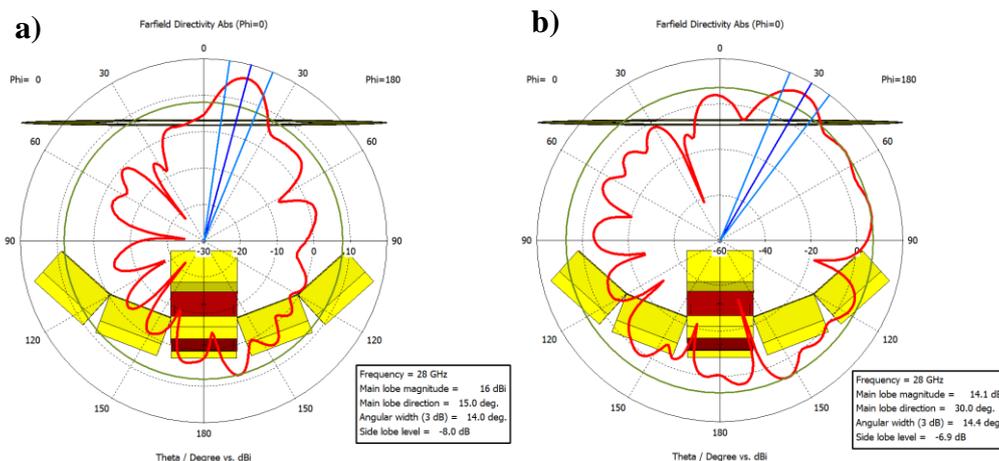


Fig. 38. Haces representativos en el Plano Phi = 0° con direcciones 15, y 30 grados

Y para el plano $\Phi = 90^\circ$ se presentan también dos haces representativos en la Fig. 39

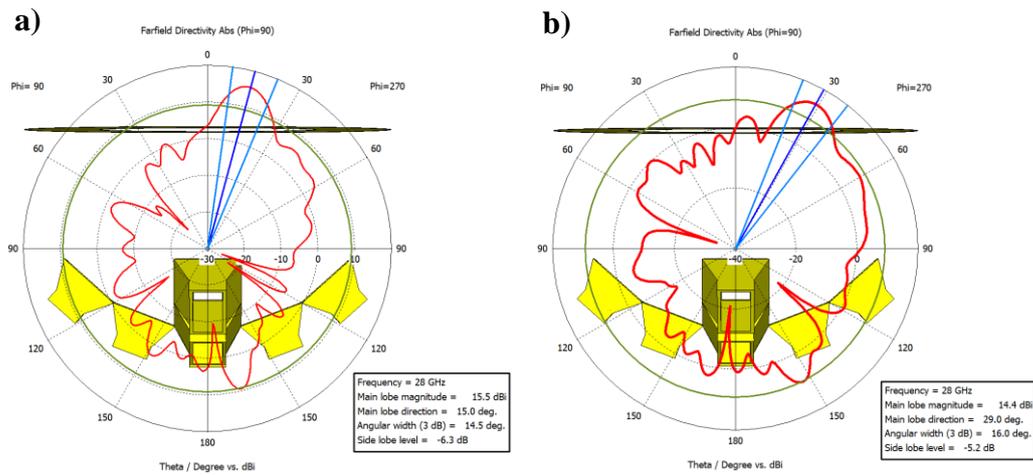


Fig. 39. Haces representativos en el Plano $\Phi = 90^\circ$ con direcciones 15, y 29 grados

En concreto en este modelo se generan 9 haces en dos planos distintos con inclinaciones de hasta 30° y valores de directividad superiores a 14.4 dBi

El segundo modelo emplea el mismo anillo, pero esta vez con un arreglo de bocinas de 3x3 ubicadas sobre el mismo plano como se aprecia en la Fig.40.

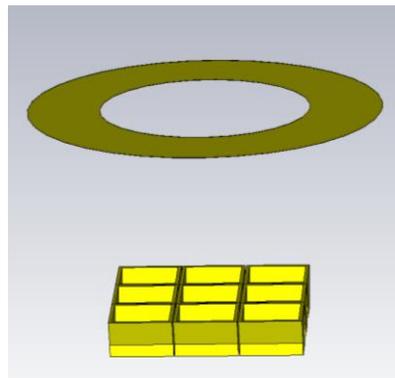


Fig. 40. Estructura de antena multihaz con alimentadores sobre un plano.

El haz central en dirección del eje de propagación tiene una directividad de 16.6 dBi y un ancho de haz de 14.8 grados como se muestra en la Fig.41.

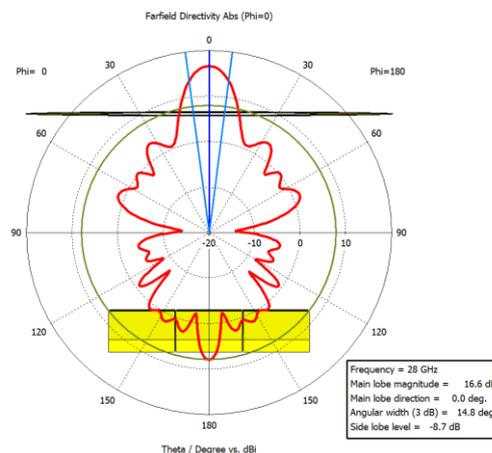


Fig. 41. Diagrama de radiación del haz central

En el plano $\Phi = 0^\circ$ y se tienen dos haces con direcciones de 14 y -14 grados cada uno con una directividad de 15.1 dBi y ancho de haz de 14 grados como se parecía en la Fig. 42. Resultados similares se obtienen en el plano $\Phi = 90^\circ$.

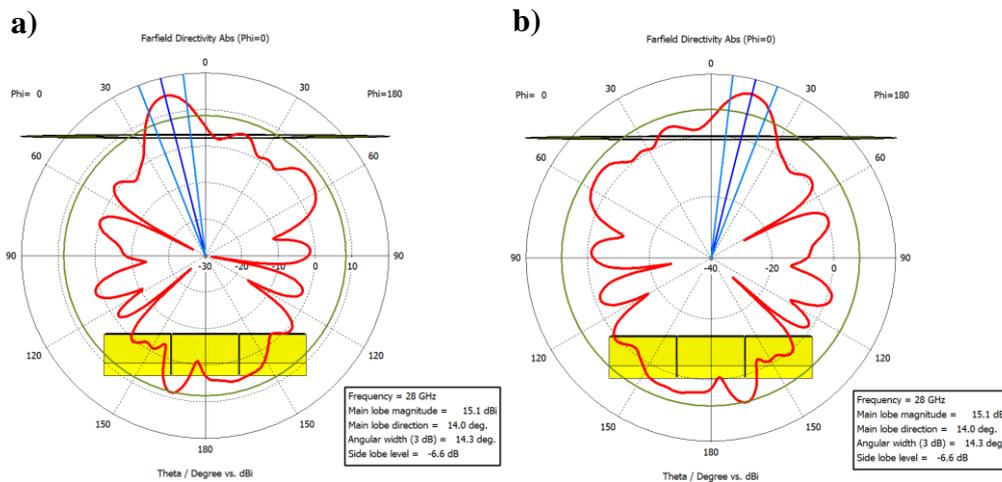


Fig. 42 Haces en el plano $\Phi = 0$ con rango de exploración de 28°

En $\Phi = 45^\circ$ los haces tienen direcciones de $\pm 19^\circ$ con valores de directividad de 13.8 dBi y anchos de haz de 14 grados. Estos se aprecian en la Fig.43. dichos diagramas se reiteran en el plano $\Phi = 135^\circ$

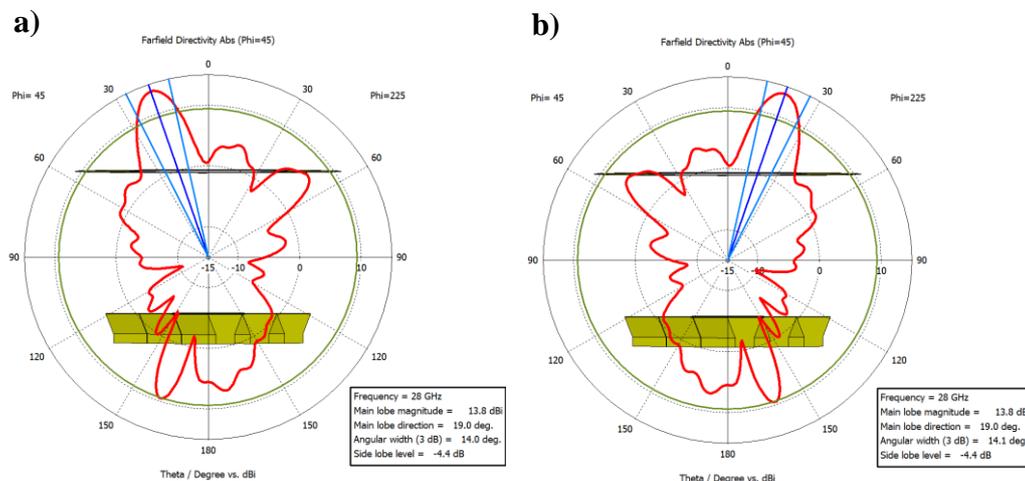


Fig. 43. Haces en el plano $\Phi = 0$ con rango de exploración de 38°

IV.3 RESUMEN DE RESULTADOS

- Se diseña un anillo metálico y una bocina para su operación a 28 GHz. Así mismo se usa la técnica de incidencia de onda plana para el caculo de la distancia focal optima.
- Se presentan 3 diseños de antena multihaz con resultados prometedores en una de las bandas más propicias para el despliegue de la quinta generación móvil.

V CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha demostrado la viabilidad del uso de antenas lente en estaciones base de quinta generación móvil y comunicaciones satelitales. El aporte más notable de este trabajo radica en el diseño de prototipos de sistemas de antenas multihaz metálicas con resultados prometedores en términos de directividad y rangos de exploración, que sumado a las ventajas que ofrece las lentes zonales de Fresnel como el tamaño y peso reducido, hacen de dichos prototipos potenciales soluciones para su adopción en sistemas de comunicación 5G.

Para ello en primer lugar se ha analizado antenas lente alimentadas por una bocina de apertura cuadrada evidenciándose los efectos y la importancia de la correcta ubicación del alimentador en el punto focal, también se demuestra que un alimentador acoplado a un plano de masa aprovecha las reflexiones que produce en conjunto con el anillo para incrementar la directividad pasando de 15.7 dBi que se alcanza con una bocina aislada a 19 dBi. Seguidamente se toma como base estas pruebas iniciales y se proponen tres modelos de antena multihaz: El primer modelo usa un anillo metálico y alimentadores posicionados en un arco focal de manera que se consigue 9 haces con excelentes resultados de directividad cuyos valores superan los 14.6 dBi y un rango de exploración que va desde -27 a 27 grados en dos planos diferentes. Por otro lado, el segundo modelo plantea una antena multihaz con alimentadores sobre un mismo plano, en el cual nuevamente se generan 9 haces con directividades superiores a 13.9 dBi y ángulo de cobertura de 34 grados en 4 planos distintos, este modelo resulta atractivo justamente por su bajo perfil, tamaño reducido y facilidad de fabricación debido a la disposición de las bocinas. Un tercer modelo presenta un conjunto de 7 anillos con el que logra ampliar el rango de exploración, y la cantidad de haces obtenidos con los dos anteriores, específicamente se alcanzan directividades mayores a 14 dBi y 19 haces con un rango de exploración mayor a 62 grados en tres planos distintos, $\Phi = 0^\circ$, $\Phi = 60^\circ$ y $\Phi = 120^\circ$

Además de estos prototipos multihaz se aprovecha lo beneficios relacionados con el uso de un plano de masa para diseñar un sistema de antenas de alta directividad que emplea 7 anillos excitados simultáneamente obteniendo un haz bastante directivo de 27.4 dBi en dirección del eje de propagación.

Finalmente se replican dos sistemas de antenas multihaz operando en 28 GHz que es una las frecuencias más atractivas para el despliegue de la quinta generación móvil. Cada uno de los modelos genera 9 haces y sus resultados son similares a los diseñados en la banda K

En resumen, se ha cumplido con todos los objetivos planteados al inicio del trabajo y se ha comprobado el buen desempeño de antenas lente de bajo perfil en frecuencias de microondas, así como milimétricas y por tanto queda demostrado la viabilidad de su uso en comunicaciones móviles 5G y satelitales.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres y a mi hermano por su apoyo incondicional. También agradecer al Dr. Miguel Ferrando Bataller por su apoyo y guía en cada una de las etapas de este proyecto y por último al grupo de radiaciones electromagnéticas por brindarme las herramientas y recursos para llevar a cabo este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. S. Rappaport *et al.*, “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!,” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013, doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- [2] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, “Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2532458.
- [3] M. Agiwal, H. Kwon, S. Park, and H. Jin, “A Survey on 4G-5G Dual Connectivity: Road to 5G Implementation,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 16193–16210, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052462.
- [4] S. K. Karki, “Beam-steerable E-band lens antenna for 5G backhaul link,” *Masters thesis*, 2016.
- [5] W. Hong *et al.*, “Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6231–6249, 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2712819.
- [6] O. Quevedo-Teruel, M. Ebrahimpouri, and F. Ghasemifard, “Lens antennas for 5G communications systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 7, pp. 36–41, 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1700977.
- [7] H. Ch. Moy-Li, “Lentes de microondas de bajo perfil en la banda de ondas milimétricas,” Universitat Politècnica de València, 2020.
- [8] J. J. Lee, “Lens Antennas,” in *Microwave Antennas*, S. S. Media, Ed. New York: York, Springer Science+Business Media New, 1961, pp. 262–370.
- [9] Z. C. Hao, J. Wang, Q. Yuan, and W. Hong, “Development of a low-cost thz metallic lens antenna,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, no. c, pp. 1751–1754, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2671880.
- [10] J. M. Rodríguez, H. D. Hristov, and W. Grote, “Fresnel zone plate and ordinary lens antennas: Comparative study at microwave and terahertz frequencies,” *Eur. Microw. Week 2011 "Wave to Futur. EuMW 2011,*. October, pp. 894–897, 2011.
- [11] J. Gómez, A. Tayebi, J. de Lucas, and F. Cátedra, “Metal-only fresnel zone plate antenna for millimetrewave frequency bands,” *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 8, no. 6, pp. 445–450, 2014, doi: 10.1049/iet-map.2013.0196.
- [12] J. Zhu *et al.*, “Additively Manufactured Millimeter-Wave Dual-Band Single-Polarization Shared Aperture Fresnel Zone Plate Metalens Antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3070224.
- [13] J. Pourahmadazar, S. Sahebghalam, S. Abazari Aghdam, and M. Nouri, “A Millimeter-Wave Fresnel Zone Plate Lens Design Using Perforated 3D Printing Material,” *2018 IEEE MTT-S Int. Microw. Work. Ser. Adv. Mater. Process. RF THz Appl. IMWS-AMP 2018*, pp. 17–19, 2018, doi:

- 10.1109/IMWS-AMP.2018.8457170.
- [14] G. Leon, L. F. Herran, M. Munoz, F. Las-Heras, and Y. Hao, "Millimeter-wave offset fresnel zone plate lenses characterization," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 54, pp. 125–131, 2014, doi: 10.2528/PIERC14091901.
- [15] T. A. Hill, J. R. Kelly, M. Khalily, and T. W. C. Brown, "Cascaded Fresnel Lens Antenna for Scan Loss Mitigation in Millimeter-Wave Access Points," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 10, pp. 6879–6892, 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2992837.
- [16] S. Cho, Y. Youn, W. Hong, and H. J. Song, "Reconfigurable Binary-Amplitude Fresnel Zone Plate for Millimeter-Wave Beamforming," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, no. c, 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3070072.
- [17] C. Ma *et al.*, "Implementation of a 2-D Reconfigurable Fresnel-Zone-Plate Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 1, pp. 520–525, 2021.
- [18] J. Alda and F. J. Gonzalez, "Polygonal Fresnel zone plates," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 11, no. 8, 2009, doi: 10.1088/1464-4258/11/8/085707.
- [19] I. V Minin and O. V Minin, "Array of Fresnel zone plate lens antennas: Circular, hexagonal with chiral symmetry and hexagonal boundary," *IRMMW-THz 2006 - 31st Int. Conf. Infrared Millim. Waves 14th Int. Conf. Terahertz Electron.*, p. 270, 2006, doi: 10.1109/ICIMW.2006.368478.
- [20] J. L. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, Fourth Edi. 2020.
- [21] S. M. Stout-Grandy, a. Petosa, I. V Minin, O. Minin, and J. S. Wight, "Recent Advances in Fresnel Zone Plate Antenna Technology," *Microw. J.*, no. August 2015, pp. 1–15, 2008.
- [22] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.
- [23] Á. Cardama, L. Jofre, J. M. Rius, J. Romeu, S. Blanch, and M. Ferrando, "Antenas," *Edicions la Univ. Politècnica Catalunya*, 2002.
- [24] S. Stout-Grandy, *Investigation of planar Fresnel zone plate antennas*, 1st ed., vol. 41, no. 6. Ottawa, Ontario, Canada: Carleton University, 2008.
- [25] D. Santillan, "Diseño de lentes metalicas usando la Teoria de modos caracteristicos," Universitat Politecnica de Valencia, 2020.
- [26] L. C. J. Baggen, "The Fresnel zone plate antenna : design and analysis," EINDHOVEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 1992.
- [27] H. Hristov, "Fresnel Zone Plate Antenna," in *Handbook of Antenna Technologies*, vol. 1–4, S. S. M. S. 2016, Ed. 2016, pp. 1–3473.
- [28] I. I. Idrus, T. A. Latef, Y. Yamada, M. S. A. Talip, N. K. Aridas, and T. A. Rahman, "Multibeam Characteristics of an Array Antenna for 5G Mobile Base Station," *RFM 2018 - 2018 IEEE Int. RF Microw. Conf. Proc.*, pp. 33–36, 2018, doi: 10.1109/RFM.2018.8846548.
- [29] L. C. J. Baggen, C. J. J. Jeronimus, and M. H. A. J. Herben, "The scan performance of the fresnel-zone plate antenna: A comparison with the parabolic reflector antenna," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 13, pp. 769–774, 1993, doi: 10.1002/mop.4650061314.
- [30] S. Karimkashi and A. A. Kishk, "Focusing properties of fresnel zone plate lens antennas in the near-field region," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 5, pp. 1481–1487, 2011.