



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

TÍTULO DE TESIS

DESARROLLO DE UN LENTE TIPO HONGO IMPRESO EN
3D PARA UNA ANTENA VIVALDI EN LA BANDA ULTRA
ANCHA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LIC. EN ING. MECATRÓNICA

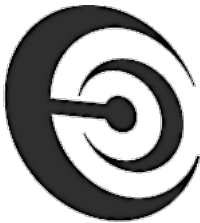
PRESENTA:

JOSÉ ANTONIO VELASCO ALDAY

BAJO LA ASESORÍA DE:

DR. RICHARD TORREALBA MELÉNDEZ (FCE-BUAP)

DRA. OLGA GUADALUPE FÉLIX BELTRÁN (FCE-BUAP)



FCE

Facultad de Ciencias
de la Electrónica

H. PUEBLA DE ZARAGOZA, PUE.

JUNIO 2023

*Dedicado a mis padres
con todo amor y admiración*

AGRADECIMIENTOS

A dios por darme la fuerza, y habilidad para concluir este gran reto.

A mi madre Josefa Alday Domínguez, tu bendición a diario a lo largo de mi vida siempre me protegerá y me llevará por el camino del bien, a mi padre Francisco Velasco Santiago, cuando me equivoco sé que estás ahí para ayudarme y cuando dudo siempre me aconsejas, gracias a ambos y sabiendo que jamás existirá una forma de agradecer una vida de lucha, de sacrificio y esfuerzo, deseo que entiendan que el logro no solo es mío, este logro también es de ustedes, mi esfuerzo está inspirado en ustedes y mi único ideal es seguir su ejemplo para ser una persona de provecho, un excelente profesionista y un mejor ser humano.

Mi agradecimiento a la Benemérita Universidad autónoma de Puebla y la Facultad Ciencias de la Electrónica por darme un espacio en sus aulas y aceptarme como un estudiante más que está en busca de lograr un objetivo, ser un mejor ser humano y un excelente profesionista en busca de mejores oportunidades.

Gracias a mi asesor Dr. Richard Torrealba Meléndez que me brindó de sus consejos y sobre todo gracias por su apoyo incondicional, gracias a mi asesora Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán, por darme la oportunidad de trabajar a su lado en el servicio social, prácticas profesionales, gracias por ser una guía para mi futuro, ya que sin usted no hubiera conocido el otro panorama del estudio y de la investigación. Gracias a los dos por el apoyo en la tesis, fueron mis dos grandes guías y mis soportes para culminar este objetivo de una carrera universitaria.

A mi esposa y compañera de vida Luz que me acompaña a lo largo de mi carrera, brindándome su apoyo y amor incondicional todos los días.

Gracias a todos mis amigos y compañeros que a lo largo de esta vida universitaria fueron mis soportes para llevar una carrera más amena.

RESUMEN

Se propone un nuevo lente dieléctrico similar al presentado en [4], para mejorar el rendimiento e incrementar la ganancia de una antena Vivaldi en el rango banda ultra ancha (*UWB IEEE 802.15.4: de la lengua inglesa Ultra Wide-band*).

Se realizarán simulaciones del lente en conjunto con la antena en el software Ansys HFSS, un software de simulación electromagnética en 3D para diseñar y simular productos electrónicos de alta frecuencia como antenas, componentes de radiofrecuencia (RF) o microondas, conectores, placas de circuitos impresos, etc, con el objetivo de obtener las dimensiones y verificar el correcto funcionamiento de la antena Vivaldi con y sin el lente dieléctrico, así poder comparar la ganancia y el patrón de radiación simulado y medido. Obtenidas las dimensiones del lente dieléctrico este se diseñará en el software SolidWorks, un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D, y así darle realismo al producto que se quiere obtener, finalizado el producto simulado, se realizará la impresión con la ayuda de una impresora 3D (*Creator pro flashforge*), el material escogido para realizar este tema de tesis es ácido poliláctico (*PLA por sus siglas en inglés Polylactic Acid*).

La caracterización del lente en conjunto con la antena Vivaldi se realizará en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas, en la Facultad de Ciencias de la Electrónica, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (FCE-BUAP). La caracterización consistirá en medir y comparar el coeficiente de reflexión, las ganancias obtenidas y simuladas al igual que los diagramas de radiación de la antena (con lente y sin el lente) para cumplir los objetivos esperados.

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	4
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	13
1.2 OBJETIVO GENERAL	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 METODOLOGÍA	15
1.5 ORGANIZACIÓN.....	16
2 CAPÍTULO II: ANTENAS Y LENTES.....	17
2.1 INTRODUCCIÓN.....	17
2.2 ANTENAS.....	17
2.2.1 Eficiencia de la antena.....	18
2.3 PROPAGACIÓN DE ONDAS	18
2.3.1 Ganancia	20
2.3.2 Antenas UWB	20
2.3.3 Antenas Vivaldi.....	21
2.4 LENTES.....	22
2.4.1 Lentes dieléctricos.....	23
2.4.2 Lentes dieléctricos impresos en 3D.....	23
2.4.3 Filamentos conductivos.....	23
3 CAPÍTULO III: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL LENTE DIELECTRICO	24
3.1 INTRODUCCIÓN.....	24
3.2 DISEÑO	24
3.3 MATERIAL DIELECTRICO.....	25

3.4	ECUACIONES PARA DETERMINAR ALTURA Y DIÁMETRO	26
3.5	SIMULACIÓN	30
3.5.1	Diseño y simulación en Ansys HFSS.....	31
3.5.2	Diseño y simulación en solidworks (CAD)	36
3.6	IMPRESIÓN DEL LENTE DIELECTRICO	38
3.7	FABRICACIÓN DE LA ANTENA VIVALDI.....	40
4	CAPÍTULO IV: CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL.....	42
4.1	INTRODUCCIÓN.....	42
4.2	RESULTADO: DISEÑO, FABRICACIÓN DE LA ANTENA Y COEFICIENTE DE REFLEXIÓN 43	
4.2.1	Coeficiente de reflexión sin lente.....	43
4.3	MEDICIÓN DE LA GANANCIA.....	46
4.4	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN EN 2D	49
5	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	51
5.1	INTRODUCCIÓN.....	51
5.2	CONCLUSIONES	51
5.3	CONCLUSIONES DEL LENTE DIELECTRICO.....	52
5.4	TRABAJO FUTURO	53
	APÉNDICE A: DIBUJO TÉCNICO DEL LENTE DIELECTRICO	54
	APÉNDICE B: EQUIPOS DE MEDICIÓN	55
	APÉNDICE C: CÓDIGOS MATLAB.....	57
	BIBLIOGRAFÍA	60

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN ESPECTRAL EN LA BANDA ULTRA ANCHA.....	11
FIGURA 2. TIPOS BÁSICOS DE ANTENAS VIVALDI: (A) ANTENA COPLANAR VIVALDI (AV), (B) DESPIECE DE LA AV COPLANAR, (C) ANTENA ANTIPODAL VIVALDI (AVA) Y (D) DESPIECE DE LA AVA [2].....	12
FIGURA 3. LENTES IMPRESOS EN 3D CON ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA).	14
FIGURA 4. EJEMPLOS DE ANTENAS MONOPOLO DE LA UWB SOBRE PLACA METÁLICA. MONOPOLO GRIS OSCURO, PLANO DE TIERRA GRIS MEDIO Y SUSTRATO DIELECTRICO GRIS CLARO [13].....	21
FIGURA 5. ANTENAS TIPO VIVALDI.....	22
FIGURA 6. PROTOTIPO DE LENTE DIELECTRICO [4].	26
FIGURA 7. SEPARACIÓN DEL MATERIAL (CORTE HORIZONTAL).....	29
FIGURA 8. PARÁMETROS DE LA ANTENA VIVALDI.	32
FIGURA 9. PARÁMETRO S11 ANTENA VIVALDI.....	32
FIGURA 10. DIAGRAMA DE RADIACIÓN DEL PLANO E DE ANTENA VIVALDI SIN LENTE A 6.5 GHz.....	33
FIGURA 11 DIBUJO TÉCNICO EN SOLIDWORKS DE LAS DIMENSIONES DEL LENTE.....	34
FIGURA 12. SIMULACIÓN DE LENTE DIELECTRICO.	34
FIGURA 13. SIMULACIÓN DE ANTENA VIVALDI CON LENTE DIELECTRICO.....	35
FIGURA 14. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN ANTENA VIVALDI CON LENTE DIELECTRICO.	35
FIGURA 15 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SOBREPUESTOS DE LA ANTENA VIVALDI CON Y SIN LENTE.....	36
FIGURA 16 SIMULACIÓN DE LENTE DIELECTRICO TIPO HONGO.	37
FIGURA 17 VISTAS LATERALES DEL LENTE.	38
FIGURA 18 IMPRESIÓN 3D DEL LENTE TIPO HONGO.....	39
FIGURA 19 CORTE DEL SUSTRATO.....	40
FIGURA 20 CORTE VINIL DEL DISEÑO PARA LA ANTENA VIVALDI.	41

FIGURA 21 CONECTOR COAXIAL.	41
FIGURA 22 RESULTADO FINAL A) PLANO DE TIERRA, B) PLANO DE SEÑAL.....	42
FIGURA 23 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS FINALES.....	43
FIGURA 24 PRUEBAS DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN DE LA ANTENA VIVALDI.	44
FIGURA 25. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN (S11) ANTENA SIMULADA, ANTENA MEDIDA Y ANTENA CON LENTE.	45
FIGURA 26 ANTENA VIVALDI CON LENTE REAL.	45
FIGURA 27. COMPARACIÓN ENTRE LOS COEFICIENTES DE REFLEXIÓN.	46
FIGURA 28 ESPACIO PARA REALIZAR LA MEDICIÓN DE LA GANANCIA.	47
FIGURA 29 MEDICIÓN DE GANANCIA ANTENA VIVALDI A) ANTENA VIVALDI CONECTADA GENERADOR DE SEÑALES Y B) ANTENA AARONIA HYPERLOG7060 CONECTADA AL ANALIZADOR DE SEÑALES.....	48
FIGURA 30 DIAGRAMA DE RADIACIÓN ANTENA VIVALDI.	49
FIGURA 31. DIAGRAMA DE RADIACIÓN ANTENA VIVALDI CON EL LENTE DIELECTRICO.	50
FIGURA 32 DIBUJO TÉCNICO DISEÑO DEL LENTE DIELECTRICO REALIZADO EN SOLIDWORKS.....	54
FIGURA A-33 ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES ANRITSU MS4644B.....	55
FIGURA A-34 ANALIZADOR DE SEÑALES ANRITSU MS2830A.....	56
FIGURA A-35 ANALIZADOR DE SEÑALES ANRITSU MS2830A.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE RADIACIÓN CON SU RESPECTIVO ESPECTRO DE FRECUENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS.....	19
TABLA 2. COMPORTAMIENTO DE LA ANTENA EN DIFERENTES FRECUENCIAS	48
TABLA 3. ANCHO DE HAZ DE MEDIA POTENCIA PARA ANTENA CON LENTE Y SIN LENTE PARA UNA FRECUENCIA DE 6.5 GHz	50

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Las tecnologías inalámbricas de área local (WLAN) cada vez son más utilizadas en nuestros días, por WiFi y Bluetooth [1]. Estas fueron desarrolladas con el objetivo de interconectar, sin necesidad de cables, distintos dispositivos en un entorno de cortas distancias a velocidades moderadas. Sin embargo, estas tecnologías presentan aún limitaciones, entre las que destacan [1]:

- La falta de incremento en la velocidad de transmisión.
- La falta de aumento en la autonomía de funcionamiento.
- La necesidad de aumento en la seguridad.

Con el fin de reducir los efectos de las limitaciones de las redes inalámbricas mencionadas, aparece una nueva tecnología, conocida como banda ultra ancha o (*UWB* IEEE 802.15.4: *de la lengua inglesa Ultra Wide-band*). La banda ultra ancha es una tecnología de radiofrecuencia desarrollada en la década de los años 60 en empresas relacionadas con instituciones militares y gubernamentales norteamericanas [1].

Esta tecnología ha demostrado su potencial en muchas aplicaciones y en diversos escenarios, como por ejemplo en el campo militar se empleaba y se sigue utilizando para las comunicaciones y la vigilancia de espacios “oscuros”, como el suelo, subsuelo y los bosques, zonas donde exista dificultad para la comunicación [1]. Sin embargo, esta tecnología presenta algunos inconvenientes, las antenas pertenecientes al rango de la banda ultra ancha operan en un rango amplio del espectro electromagnético con el objetivo de transmitir datos a través del aire, desde 3.1 GHz a 10.6 GHz. Presenta problemas como su alcance (que es limitado) y principalmente

la interferencia, además la banda ultra ancha utiliza un amplio espectro, lo que hace que la señal sea susceptible a interferencias de otros dispositivos que funcionan en frecuencias como sistemas de radar y redes inalámbricas.

Para explicarlo de otra manera, en la Figura 1 se presenta una relación entre las frecuencias existentes y su densidad potencia espectral de algunas señales de radiofrecuencia.

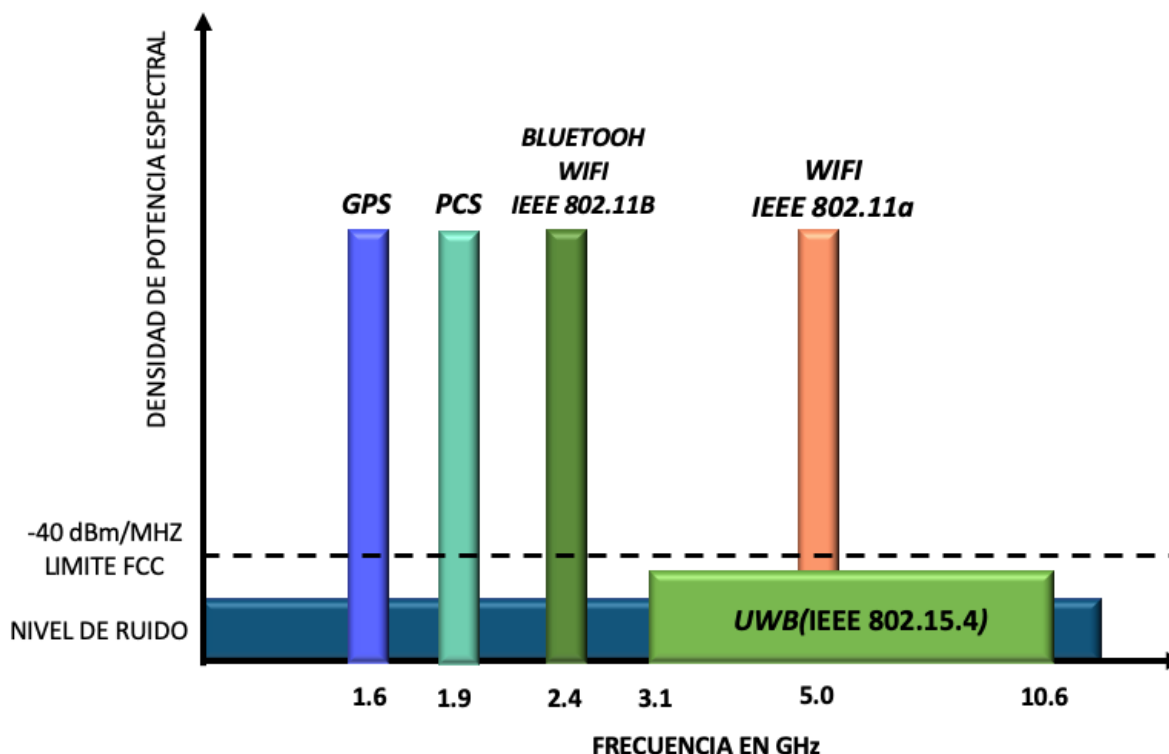


Figura 1. Ubicación espectral en la banda ultra ancha.

Existe una gran variedad de antenas que operan dentro de esta banda, una de las antenas de mayor relevancia que se adapta a los requerimientos de los sistemas de banda ultra ancha actuales es la antena Vivaldi [2], una antena plana que destaca por tener un gran ancho de banda. En cuanto a su diseño, estas antenas están formadas por un dieléctrico de forma rectangular o cuadrada, una capa superior de metal que tiene una ranura (o apertura) normalmente con forma exponencial que se puede asemejar a una forma de “V” que se conoce como radiador y una línea de alimentación. Un ejemplo de estas antenas se muestra en la Figura 1.2.

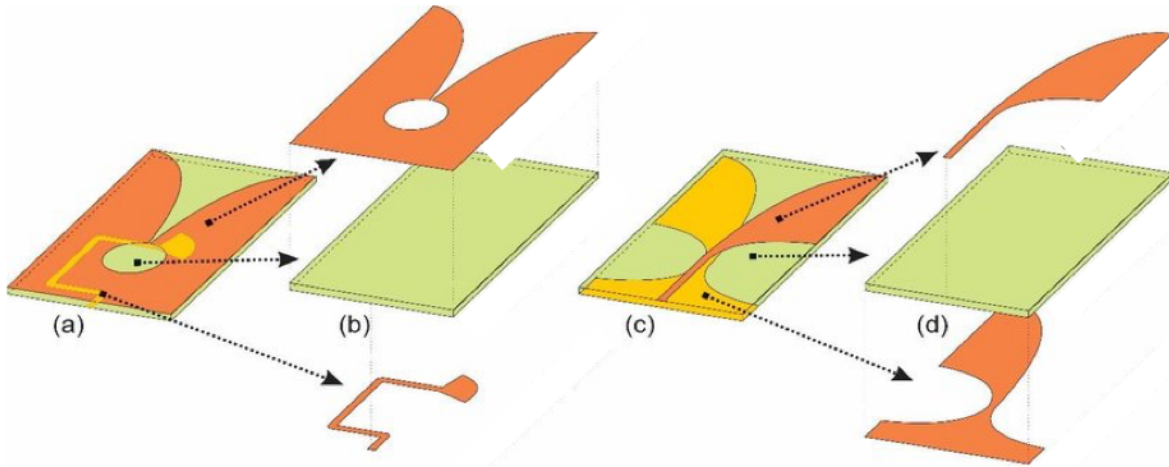


Figura 2. Tipos básicos de antenas Vivaldi: (a) antena Coplanar Vivaldi (AV), (b) despiece de la AV Coplanar, (c) antena antipodal Vivaldi (AVA) y (d) despiece de la AVA [2].

En principio, la gran desventaja en la banda ultra ancha es su menor alcance, sobre todo en comparación con sistemas WiFi. Además de que el nivel de potencia en los sistemas de banda ultra ancha es muy bajo [3]. Para hacer un uso efectivo de la potencia incidida en las antenas se han utilizado lentes dieléctricos para incrementar la ganancia mediante la transformación del diagrama de radiación de la antena [4].

En los últimos años, otra aplicación importante de los sistemas de banda ultra ancha es en los sistemas de radar y esto ha despertado un gran interés en aplicaciones emergentes como lo son: la imagenología vía microondas y en la caracterización de materiales a través de la medición de sus propiedades dieléctricas [3].

Con respecto a los sistemas de imagenología vía microondas, en este trabajo de tesis se propone el uso de un lente dieléctrico en forma de hongo impresa en 3D para mejorar los parámetros y rendimientos de ganancia de una antena Vivaldi, este lente se fabricará con un nuevo diseño gracias a la tecnología de impresión tridimensional (3-D). Además, el proceso de fabricación se diseñará con mayor libertad y flexibilidad, lo que es difícil de conseguir mediante el proceso de fabricación convencional.

1.1 Estado del arte

En el año 2002, las regulaciones de banda ultra ancha (UWB) permitieron la operación sin licencia en el rango de frecuencia de 3.1 a 10.6 GHz [1]. Después de una operación sin licencia, la tecnología banda ultra ancha se ha utilizado para aplicaciones de radar y comunicación inalámbrica. En principio, la gran desventaja de banda ultra ancha es su menor alcance, sobre todo en comparación con WiFi, el nivel de potencia es muy bajo [3] y con el desarrollo de los sistemas modernos de comunicaciones inalámbricas, se necesitan cada vez más antenas de alta ganancia y de banda ancha.

Se han estudiado muchos métodos eficientes para incrementar ganancias, como la técnica de modo fijo [4], la introducción de elementos directores [5-6] y la formación de arreglos de multielementos [4]. Sin embargo, debido a sus estructuras planas, solo se puede enfocar la energía radiada en el plano E, lo que puede resultar en incrementos de ganancia limitados. Por otro lado, también existen problemas de gran variación de ganancia y patrones de radiación inestables [4].

Otro método para incrementar la ganancia de las antenas, es usar lentes dieléctricos [4]. Los lentes dieléctricos existen desde 1960, pero, debido a su tamaño, a las frecuencias de microondas y a las dificultades de fabricación, se han limitado principalmente a aplicaciones ópticas [7]. Además, al usar el proceso de fabricación convencional, la libertad y la flexibilidad del diseño del lente están muy restringidas, lo que puede dar como resultado un rendimiento limitado del mismo [7].

Recientemente, la tecnología de impresión tridimensional (3-D) se ha adoptado ampliamente en los diseños de antenas de alto rendimiento, encontrando filamentos para realizar impresiones como es el ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés).

En la actualidad las impresoras 3D cuentan con una alta resolución de impresión y un proceso de fabricación flexible, permitiendo que se fabriquen estructuras tridimensionales arbitrarias como componentes de antena, lo que brinda una

innovación de diseño sin precedentes, es por esto que se propone un lente dieléctrico en forma de hongo para aumentar la ganancia de la antena Vivaldi, sabiendo que los lentes se pueden utilizar para modificar la fase o la amplitud.

En la Figura 3, se muestran algunas propuestas de diseños de lentes dieléctricos impresos en PLA.

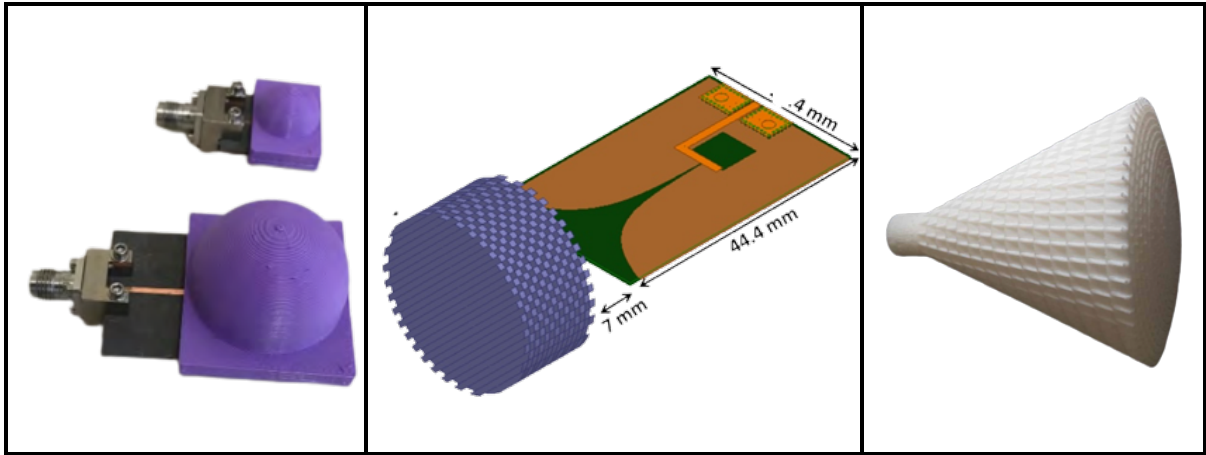


Figura 3. Lentes impresos en 3D con ácido poliláctico (PLA).

El prototipo del lente dieléctrico de esta tesis estará basado en el diseño propuesto en [4], donde la permitividad que es requerida para cada sección del lente se determinará mediante la ecuación del diseño propuesto en [4]. Por lo tanto, el lente propuesto no depende de formas geométricas regulares o frecuencias de operación conocidas, que son puntos importantes en comparación con los lentes dieléctricos convencionales, este lente por su forma es diferente, pero es especial para la antena Vivaldi y, por lo tanto, se podrán notar mejoras en el rendimiento en relación de la ganancia y la directividad.

1.2 Objetivo General

Implementar un lente dieléctrico en una antena Vivaldi para incrementar su ganancia en el rango banda ultra ancha.

1.3 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un lente dieléctrico, usando PLA, para una antena Vivaldi en el rango banda ultra ancha.
- Verificar el funcionamiento del lente en conjunto con la antena mediante simulaciones en Software ANSYS-HFSS, obteniendo su coeficiente de reflexión, ganancia y diagramas de radiación.
- Impresión del lente dieléctrico en una impresora 3D.
- Evaluar la funcionalidad del lente en conjunto con la antena mediante la medición, su coeficiente de reflexión, ganancia, diagramas de radiación.

1.4 Metodología

Se propone un lente dieléctrico similar al presentado en [4], para mejorar el rendimiento de una antena Vivaldi en el rango de la banda ultra ancha (UWB).

Las simulaciones del lente en conjunto con la antena se realizarán en Ansys HFSS, un software de simulación electromagnética en 3D para diseñar y simular productos electrónicos de alta frecuencia como antenas, componentes de radio frecuencia (RF) o microondas, interconexiones de alta velocidad, filtros, conectores, placas de circuitos impresos, etc. Ansys HFSS simulará el funcionamiento del lente en conjunto con la antena, así como los parámetros de ganancia, el patrón de radiación, utilizando el sustrato RO4003C. Por otra parte, el lente se diseñará en SolidWorks, software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D y, así darle realismo al producto que se quiere obtener (dimensiones, materiales, diseño).

Finalizado el producto simulado y verificando su correcto funcionamiento, se realizará la impresión del lente, con la impresora 3D (*Creator Pro Flashforge*), el

material escogido para este producto es PLA o por sus siglas en inglés Polylactic Acid. La caracterización del lente será en Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas, en la Facultad de Ciencias de la Electrónica, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (FCE-BUAP). La caracterización consistirá en medir el coeficiente de reflexión, ganancia y diagramas de radiación de la antena (con lente y sin el lente). Para concluir la caracterización se realizará una prueba de radar para detectar un objeto metálico.

1.5 Organización

Capítulo 2: Teoría de lentes dieléctricos y antenas en el rango de la banda ultra ancha (Antenas Vivaldi), se presentan los conceptos de coeficiente de reflexión, diagramas de radiación, ganancia, ancho de banda y distribución de corriente.

Capítulo 3: Diseño y simulación del lente dieléctrico en conjunto con la antena (antena Vivaldi). Por último, se describe brevemente la obtención de la antena física.

Capítulo 4: Descripción de la metodología para recabar los datos de la caracterización experimental del lente en conjunto con la antena Vivaldi. Se expone y se compara el coeficiente de reflexión, diagramas de radiación, ganancia y eficiencia del lente y la antena con respecto a los resultados experimentales.

Capítulo 5: Finalmente, se presentan las conclusiones de lo obtenido en simulación y en mediciones, además se habla del trabajo futuro.

II

2 CAPÍTULO II: ANTENAS Y LENTES

2.1 Introducción

La comunicación inalámbrica ha evolucionado rápidamente en las últimas décadas. Esta evolución ha cambiado significativamente nuestra forma de ver las sociedades modernas y de interactuar con ellas [8]. Las comunicaciones inalámbricas modernas y los sistemas de comunicaciones actuales requieren antenas de alta ganancia, ya que desempeñan un papel fundamental cuando se habla de comunicaciones y radiofrecuencias. Por ende, estas son cada vez más solicitadas debido a sus ventajas, como banda ancha, patrones de radiación estables, alta directividad y fácil integración con circuitos planos [4].

Por lo tanto, el principal reto para las comunicaciones inalámbricas es el desarrollo de sistemas de alto rendimiento, incluidas las antenas y lentes.

2.2 Antenas

Las antenas constituyen una parte fundamental de los sistemas radioeléctricos de comunicaciones. Las características direccionales, irradiada o recibida por una antena se describirán en los siguientes apartados.

Las antenas son dispositivos diseñados con el fin de emitir o en su defecto, recibir información a través de ondas electromagnéticas, dichas ondas viajan por el espacio. En otras palabras, la antena es una estructura de transición entre el espacio libre y un dispositivo de guía. En otro caso, el dispositivo de guiado o línea de transmisión puede tomar la forma de un cable coaxial o un tubo hueco con el fin de transportar

la energía electromagnética desde la fuente emisora hasta la antena o, por otro lado, de la antena hasta el receptor [9].

Las antenas direccionales utilizadas actualmente para la comunicación V2X en bandas de frecuencia de 5.9 GHz utilizan únicamente antenas simples con directividad limitada [10].

2.2.1 Eficiencia de la antena

Se define la eficiencia de la antena como el coeficiente entre la potencia radiada por la antena y la potencia entregada por el amplificador de potencia.

Se simboliza con la letra η :

$$\eta = \frac{W_r}{W_e} = \frac{\text{potencia radiada}}{\text{potencia entregada}} = \frac{W_r}{R_r + R_\Omega} \quad (1)$$

Donde R_r es la resistencia de radiación en ohms y R_Ω es la resistencia efectiva de la antena en ohms.

En altas frecuencias las pérdidas suelen ser bajas (por ello resulta más fácil radiar de una forma más eficiente a elevadas frecuencias en comparación de bajas frecuencias)[9].

2.3 Propagación de ondas

En general, las ondas son medios de transporte de energía e información. Algunos de los ejemplos más comunes de ondas electromagnéticas son las ondas de radio, las señales de televisión, los haces de radar y los rayos luminosos. Todas estas ondas comparten tres características principales, que son[9]:

- Desplazamiento a una velocidad constante.
- Las propiedades de ondas que adoptan dicho desplazamiento.

- Irradiación hacia fuera desde una fuente sin la necesidad de algún vehículo físico.

El término de propagación de ondas cubre un amplio espectro de fenómenos físicos tales como ondas, luz visible y rayos X. En el vacío, todas las ondas se propagan a la misma velocidad c , pero se distinguen entre sí por sus frecuencias (f) y sus longitudes de onda λ .

La tabla 1, enlista las regiones representativas del espectro de frecuencias electromagnéticas, desde ondas de radio de baja frecuencias (10^4 Hz) hasta los penetrantes rayos gama (10^{22} Hz) [11].

Tabla 1. Tipos de radiación con su respectivo espectro de frecuencias electromagnéticas.

Tipo de radiación Electromagnética	Frecuencia f (Hz)	Longitud de onda λ (m)
Onda de radio	10^4 a 10^8	3 a 3×10^4
TV, FM	10^8	3
Microondas Radar	10^8 a 10^{11}	3×10^{-3} a 3×10^{-1}
Infrarrojo lejano	10^{12}	3×10^{-4}
Radiación Infrarroja	4×10^{13} a 4×10^{14}	8×10^{-7} a 3×10^{-5}
Luz visible	4×10^{14} a 8×10^{14}	4×10^{-7} a 8×10^{-7}
Radiación ultravioleta	8×10^{14} a 10^{17}	3×10^{-11} a 3×10^{-9}
Rayos X blandos	10^{17} a 10^{19}	3×10^{-11} a 3×10^{-9}
Rayos X	10^{19} a 10^{22}	3×10^{-12} a 3×10^{-11}
Rayos gama	10^{19} a 10^{22}	3×10^{-14} a 3×10^{-12}

Las ondas electromagnéticas se propagan a través de cualquier material dieléctrico como se presentará posteriormente, estos materiales tienen características particulares que definen el comportamiento de las señales electromagnéticas.

2.3.1 Ganancia

La ganancia directiva es la relación entre la densidad de potencia radiada a una distancia fija en una determinada dirección, y la densidad de potencia que habría sido radiada a esa misma distancia pero en todas direcciones [10]. La ganancia de potencia es lo mismo que la ganancia directiva, excepto que se usa la potencia total alimentada a la antena, es decir, se toma en cuenta la eficiencia de la antena [11].

La ecuación de la ganancia de potencia A_p está dada por:

$$A_p = D_\eta \quad (2)$$

Donde D es la ganancia directiva y η significa que no tiene pérdidas, además de irradiar al 100% ($\eta = 100\%$) [10-11].

2.3.2 Antenas UWB

En la actualidad el espectro radio es un recurso cada vez más escaso. En este aspecto, la UWB tiene la ventaja de que trabaja en las bandas con licencia, pero con un nivel de potencia por debajo de -40 dB (límite inferior de interferencia de los aparatos de radio tradicionales) con lo que los usuarios con licencia no experimentarán ningún tipo de interferencia.[1]. Con el desarrollo de la tecnología de RF, la tecnología de detección de la UWB ha progresado mucho. Tal como lo define la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), la UWB es una tecnología de transmisión inalámbrica con un ancho de banda que puede exceder la frecuencia central en un 20 % y que puede realizar comunicaciones de alta velocidad y detección de radar a baja potencia de 3.1 a 10.6 GHz [11].

Los sistemas de detección en la UWB suelen utilizar antenas como herramientas para transmitir y recibir señales; por lo tanto, el desempeño de las antenas tiene un impacto importante en los resultados de detección.

Las antenas adecuadas para la detección de la UWB deben tener un alto ancho de banda, baja pérdida de señal, alta radiación direccional, ancho de haz estrecho y alta ganancia [9].

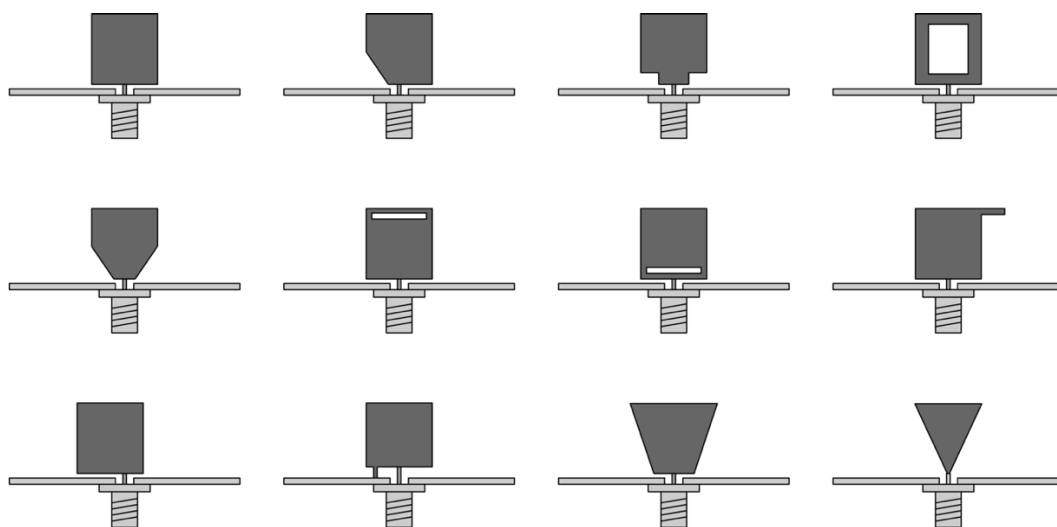


Figura 4. Ejemplos de antenas monopolo de la UWB sobre placa metálica. monopolo gris oscuro, plano de tierra gris medio y sustrato dieléctrico gris claro [13].

2.3.3 Antenas Vivaldi

La antena de Vivaldi propuesta por primera vez en 1979, ha sido ampliamente utilizada en radares, sistemas de detección remota y comunicaciones por satélite, gracias a su radiación focal, estructura simple y operación de banda ancha [2]. Sin embargo, la ganancia de un elemento de antena de este tipo no es ideal. Por lo tanto, las estructuras de matriz se utilizan para optimizar la ganancia.

Las antenas convencionales de Vivaldi se utilizaron principalmente en conjuntos de antenas planas. Dado que la frecuencia resonante de los elementos radiantes se

determina por la dimensión de apertura del elemento, las matrices de Vivaldi son difíciles de miniaturizar [3]. La antena Vivaldi fue propuesta por Gibson en 1979 como una antena de bajo perfil, en comparación con otras antenas, incluida la antena Horn, antena de parche, antena de corbatín y antena resonadora, la antena Vivaldi tiene ventajas en términos de dirección de radiación, menos pérdida de señal en el dominio de la frecuencia y un tamaño más compacto [2,9].

Sin embargo, también tiene el problema de un rendimiento inestable debido a los efectos del tamaño de la antena en la frecuencia operativa, la direccionalidad superficial y los patrones de alimentación [9]. Por lo tanto, se han considerado algunos enfoques estructurales para mejorar el rendimiento de la antena Vivaldi, en los cuales se destacan los lentes dieléctricos, en la Figura 5 se muestran ejemplos de antenas Vivaldi.

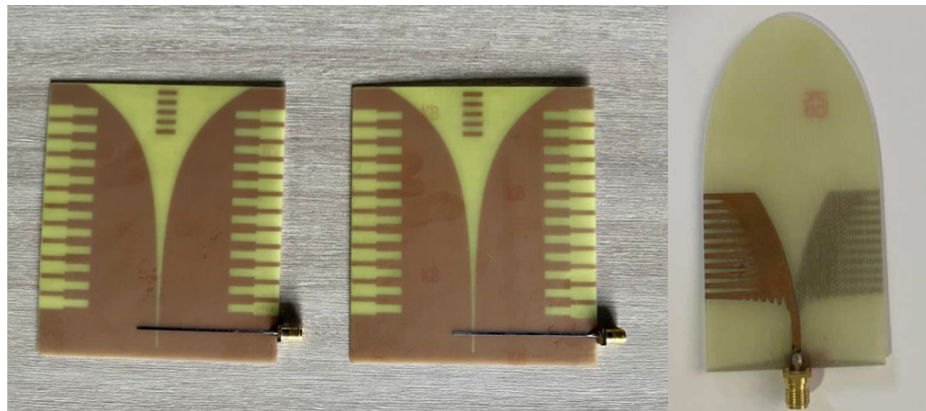


Figura 5. Antenas tipo Vivaldi.

2.4 Lentes

El concepto de lentes integradas comenzó con lentes semiesféricas de un solo material añadidas sobre antenas de circuitos integrados para eliminar los modos de sustrato y aumentar la eficacia de la radiación (Rebeiz 1992). Esto ha evolucionado hacia el uso de otras formas canónicas fijas como la elíptica o la hemisférica extendida para mejorar aún más la ganancia, produciendo haces de salida colimados (Filipovic et al. 1993) [10].

2.4.1 Lentes dieléctricos

Los lentes dieléctricos existen desde 1960, pero, debido a su tamaño, a las frecuencias de microondas y a las dificultades de fabricación, se han limitado principalmente a aplicaciones ópticas [7]. Las antenas de lentes dieléctricas son un enfoque interesante que se deriva de la óptica y permite desarrollar antenas en bandas de frecuencia milimétricas y sub-milimétricas. El tamaño de una lente tiene que ser grande en comparación con la longitud de onda para proporcionar una ganancia elevada, por lo que las antenas de lente se utilizan con menos frecuencia en las bandas de frecuencias más bajas [13].

2.4.2 Lentes dieléctricos impresos en 3D

La tecnología de impresión 3D aporta cada vez más ventajas, incluso en electromagnetismo, con interesantes perspectivas de aplicación. Aparte del uso de la fabricación aditiva para realizar componentes dieléctricos de antenas con formas adecuadas, el objetivo ambicioso es, sin duda, la realización totalmente en 3D de circuitos de radiofrecuencia y de microondas, así como de estructuras radiantes, incluidas, por tanto, las piezas conductoras [15]. La fabricación aditiva ha sido una tecnología facilitadora de muchas nuevas aplicaciones y prototipos, lo que ha permitido reducir los costes y los tiempos de desarrollo en diferentes aplicaciones, abriendo la oportunidad de fabricar estructuras que eran demasiado caras o difíciles de construir [16].

2.4.3 Filamentos conductivos

Actualmente, se están produciendo filamentos imprimibles en 3D con interesantes propiedades conductoras. Sin embargo, sigue faltando una caracterización rigurosa de su conductividad, lo que dificulta la estimación del comportamiento real del dispositivo electromagnético final impreso en 3D [15]. En los últimos años, muchos estudios han utilizado la impresión 3D, gracias a la introducción de filamentos conductores, filamentos dieléctricos de bajas pérdidas y a la reducción del coste de las impresoras 3D de alta precisión [16].

III

3 CAPÍTULO III: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL LENTE DIELECTRICO

3.1 Introducción

En este apartado se estudian y analizan las principales bases para el desarrollo y diseño del lente dieléctrico en forma de hongo, al mismo tiempo realiza un análisis paramétrico para obtener las dimensiones del lente, para que funcione correctamente en conjunto con la antena Vivaldi en el rango de la banda ultra ancha. Posteriormente, se realiza nuevamente un análisis paramétrico sobre el diseño y las dimensiones del lente para ajustarlo a las frecuencias deseadas (en el caso de que los resultados no sean los esperados).

Los diseños son realizados en el software Ansys-HFSS, donde se caracteriza y se obtienen los diagramas de radiación en 2D y 3D, distribución de corriente, ganancia y otros análisis que se necesitan para obtener los resultados que se proyectan.

3.2 Diseño

En los sistemas de comunicación inalámbrica, las antenas son lo más importante, un buen diseño de la antena hace que exista un mejor rendimiento de cualquier sistema electrónico inalámbrico. Los parámetros de la antena permiten describir su comportamiento, sin embargo, muchas veces estos parámetros no están relacionados

entre sí y, por lo tanto, no se necesitan especificar para explicar completamente el funcionamiento de la antena.

La tecnología de impresión en 3D se ha adoptado ampliamente en los diseños de antenas y lentes de alto rendimiento [1]. Considerando la resolución de impresión y sobre todo los procesos de fabricación de estas. Los lentes dieléctricos son un componente clave para un mejor rendimiento de las antenas que están dentro de la UWB. Los lentes dieléctricos se utilizan para enfocar el campo electromagnético en la dirección deseada y así reducir la interferencia en otras direcciones.

La impresión 3D es un método muy útil para personalizar lentes dieléctricos, ya que permite la creación de estructuras y productos complejos con una alta precisión y un diseño más atractivos. Además, la impresión 3D permite la fabricación de lentes con una gran variedad de materiales dieléctricos, por ejemplo, el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el ácido poliláctico (PLA), el policarbonato (PC) o el teflón.

3.3 Material dieléctrico

El PLA es un polímero biodegradable ampliamente utilizado en la impresión 3D [22]. Aspectos relevantes para mencionar:

Constante dieléctrica del PLA: tiene una constante dieléctrica que generalmente varía entre 2 y 3.5, lo que lo convierte en un material dieléctrico con propiedades moderadas [22].

Pérdida dieléctrica del PLA: el PLA tiene una pérdida dieléctrica baja, la cual se aproxima a 2.6×10^{-3} lo que significa que tiene una capacidad relativamente baja para disipar energía en forma de calor cuando se somete a un campo eléctrico alternante. Esta baja pérdida dieléctrica es deseable para mantener un buen rendimiento y eficiencia de la antena [23].

Estabilidad y compatibilidad: el PLA es un material estable y compatible con la impresión 3D, lo que permite una fabricación precisa y reproducible de los lentes dieléctricos. Puedes destacar las ventajas de utilizar PLA en términos de facilidad de

procesamiento, disponibilidad y costo en comparación con otros materiales dieléctricos [23].

El PLA al ser un material con propiedades que benefician este trabajo de tesis anteriormente mencionadas, es el candidato perfecto para desarrollar este proyecto, sabiendo que la impresión 3D deposita capa por capa hasta crear la forma del lente, en este caso basándose en el diseño reportado en [4]. La Figura 6 muestra un prototipo de lente dieléctrico para mejorar la ganancia de una antena antipodal de dipolo logarítmico.

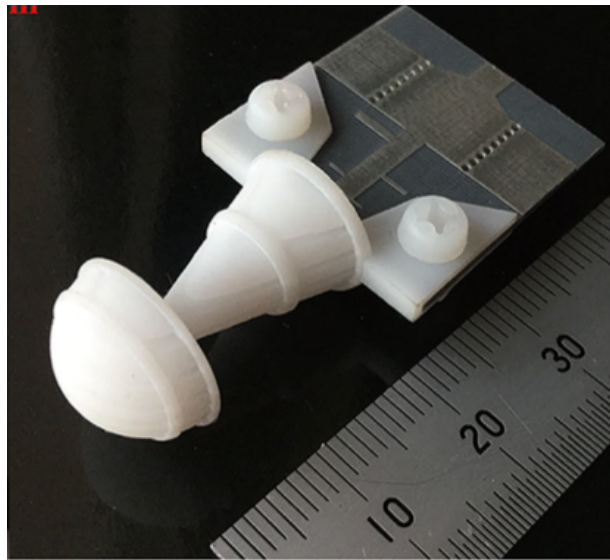


Figura 6. Prototipo de lente dieléctrico [4].

3.4 Ecuaciones para determinar altura y diámetro

Lo reportado en [4] menciona que la altura y el diámetro del hongo de un lente dieléctrico para una antena Vivaldi dependerán de las especificaciones de diseño de la antena y de las propiedades del material dieléctrico seleccionado. Se presentan pasos para ayudar en el proceso de determinar la altura y el diámetro del hongo:

- Se selecciona el material dieléctrico: el material dieléctrico debe ser el adecuado, en función de las especificaciones de diseño de la antena y de la disponibilidad del material.

- Se calcula la constante dieléctrica efectiva del material: se puede calcular a partir de las propiedades del material, como la densidad y la permitividad.
- Se utiliza un software de simulación de antenas: para esta propuesta se utiliza Ansys HFSS, para calcular la altura y el diámetro del lente dieléctrico en función de las especificaciones de diseño de la antena y de las propiedades del material dieléctrico seleccionado.
- Se verifica el diseño: Se usa el software de simulación de antenas para verificar el rendimiento del lente dieléctrico y de la antena Vivaldi completa y se ajusta el diseño según sea necesario para optimizar el rendimiento.

Una vez valorando estos puntos se procede a dar la altura y el diámetro del lente, con el diseño ya definido, se procede a dimensionar. Para el diseño del lente con respecto a su diámetro debe corresponder con la abertura de la antena para aumentar la ganancia [17-18].

Se utilizan ecuaciones que relacionan los diferentes parámetros del lente con sus propiedades y sus dimensiones, se presentan ecuaciones para obtener datos que serán de vital importancia para darle el diseño y los parámetros correctos al lente dieléctrico.

Calculo de la longitud de onda

La longitud de onda (λ) es una medida de la distancia que recorre una onda en un ciclo completo. Se expresa en unidades de longitud, como metros (m), centímetros (cm), milímetros (mm) o nanómetros (nm) [18-19].

Para calcular la longitud de onda de una señal de radiofrecuencia, se puede utilizar la siguiente fórmula [20]:

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

donde c , es la velocidad de la luz ($\frac{m}{s}$), f es frecuencia (GHz) y λ es la longitud de onda (m). Al desarrollar la ecuación anterior, considerando la frecuencia central de la UWB que es de 6.5 GHz, se obtienen los siguientes resultados:

$$\lambda = \frac{299,792,458 \frac{m}{s}}{6.5 \times 10^9 Hz} \quad (4)$$

$$\lambda = 0.0461 m \quad (5)$$

$$\lambda = 4.6 cm \quad (6)$$

Calculo de la altura

La altura del lente se calcula en función de la longitud de onda, la señal de radiofrecuencia y el índice de refracción del material utilizado para fabricar el lente PLA [18-19]. La fórmula para calcular la altura del lente dieléctrico se presenta a continuación:

$$H = \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

donde H es la altura (cm) y λ es la longitud de onda (m). Desarrollando la ecuación (7) se obtiene:

$$H = \frac{4.6 cm}{2} \quad (8)$$

$$H = 2.3 cm \quad (9)$$

Calculo del diámetro

El diámetro del lente se determina en función del ancho del haz deseado y la distancia focal [19-20], la cual está dada como:

$$D = \lambda \times \frac{f}{w} \quad (10)$$

donde D es el Diámetro, f la distancia focal (cm) y w es la anchura o abertura de la antena (2.8).

Sustituyendo los datos obtenidos (6).

$$D = 4.6 \text{ cm} \times \frac{2 \text{ cm}}{3.2 \text{ cm}} \quad (11)$$

$$D = 2.87 \text{ cm} \quad (12)$$

Se tiene que recalcar que si un lente es más alto tendrá una distancia focal más corta, mientras que un lente más ancho tendrá una distancia focal más larga [18-19].

La relación entre la anchura de el corte (Dw1) y la anchura de el material (Dw2), deben elegirse adecuadamente para obtener la permitividad relativa deseada (ϵ_{rm}) [4]. En la Figura 7 se presentan los cortes en vista horizontal del lente.

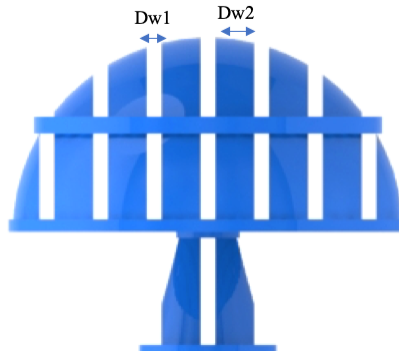


Figura 7. Separación del material (corte horizontal).

La ecuación para determinar las dimensiones de los cortes del lente surgen a partir de la ecuación (13) como se presenta en [4]:

$$e_r = e_{rm} * \frac{Dw2}{Dw1 + Dw2} + e_{rair} * \frac{Dw1}{Dw1 + Dw2} \quad (13)$$

$$e_r = e_{rm} * \frac{4.66}{1.74 + 4.66} + e_{rair} * \frac{1.74}{1.74 + 4.66} \quad (14)$$

$$e_r = (2.7 * 0.7281) + (1.0003 * 0.271) \quad (15)$$

$$e_r = 1.965 + 0.271 \quad (16)$$

$$e_r = 2.236 \quad (17)$$

donde $e_{rm} = 2.7$ y $e_{rair} = 1.003$ son las permitividades relativas del material de impresión y el aire, respectivamente [4].

Teniendo las ecuaciones y los resultados de la altura y el diámetro, llevamos los datos a la simulación para verificar el correcto funcionamiento del lente en conjunto con la antena.

3.5 Simulación

Las simulaciones en la actualidad cada vez son más necesarias en proyectos e investigaciones de diversas áreas, esto permite prever e identificar posibles problemas, limitaciones, fallas en las dimensiones, además de los comportamientos de los sistemas o procesos antes de implementarlos y llevarlos a la realidad y, así optimizar el uso de recursos y minimizar los riesgos asociados al mismo. En particular, las simulaciones son muy útiles, ya que permiten probar diferentes escenarios y ajustar las variables de manera controlada, lo que puede ahorrar tiempo y recursos a largo plazo con la finalidad de obtener éxito en el producto, ya que al simular diferentes escenarios y analizar los resultados, el usuario puede cotejar diferentes resultados

obtenidos y saber si va por un buen camino o cambia valores que ya tenía planificados, no solo eso, además pueden tomar decisiones más informadas, incluso optimizar la planificación del producto y aumentar la eficiencia del proyecto en general.

3.5.1 Diseño y simulación en Ansys HFSS

Las simulaciones realizadas en Ansys HFSS son herramientas valiosas para este proyecto de tesis, ya que en este simulador se involucra principalmente el diseño y análisis del lente dieléctrico, así como la antena Vivaldi.

Ansys HFSS es un software de simulación electromagnética, que permite modelar y analizar la interacción entre los campos electromagnéticos y los materiales en sistemas complejos (como antenas, circuitos y dispositivos electrónicos). Estas simulaciones son útiles para evaluar y optimizar el rendimiento de los sistemas electromagnéticos antes de la fabricación, lo que puede ahorrar tiempo y costos significativos en la etapa de prototipo y producción. En la Figura 9 se muestra el plano de trabajo del software HFSS donde se realizarán las simulaciones del parámetro S11, de ganancia, y diagramas de radiaciones.

Conociendo los parámetros de la altura y el diámetro del lente, se realiza el diseño en HFSS; para empezar el diseño y simulación en este software, se diseña la antena Vivaldi, con el objetivo de observar y demostrar el incremento en la ganancia de esta.

En la Figura 8 se observa el diseño de la antena Vivaldi que se utilizará en esta tesis, este diseño se tomó de [20]. Esta antena está diseñada en un sustrato Rogers 4003c con un grosor de 1.54 mm y una constante dieléctrica de 3.38. El coeficiente de reflexión (S11) de la antena se muestra en la Figura 9. De esta figura se observa que el rango de operación de la antena es de 2.5 a 15 GHz, que satisface el rango de frecuencias para la UWB, esto debido a que el coeficiente de reflexión está por debajo de los -10 dB y con esto se asegura que la antena radiará por lo menos el 70% de la energía inyectada.

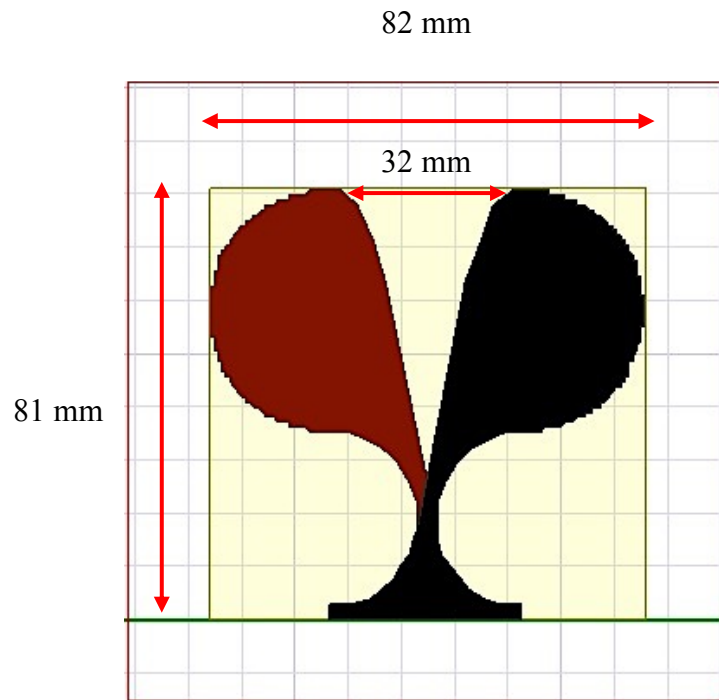


Figura 8. Parámetros de la Antena Vivaldi.

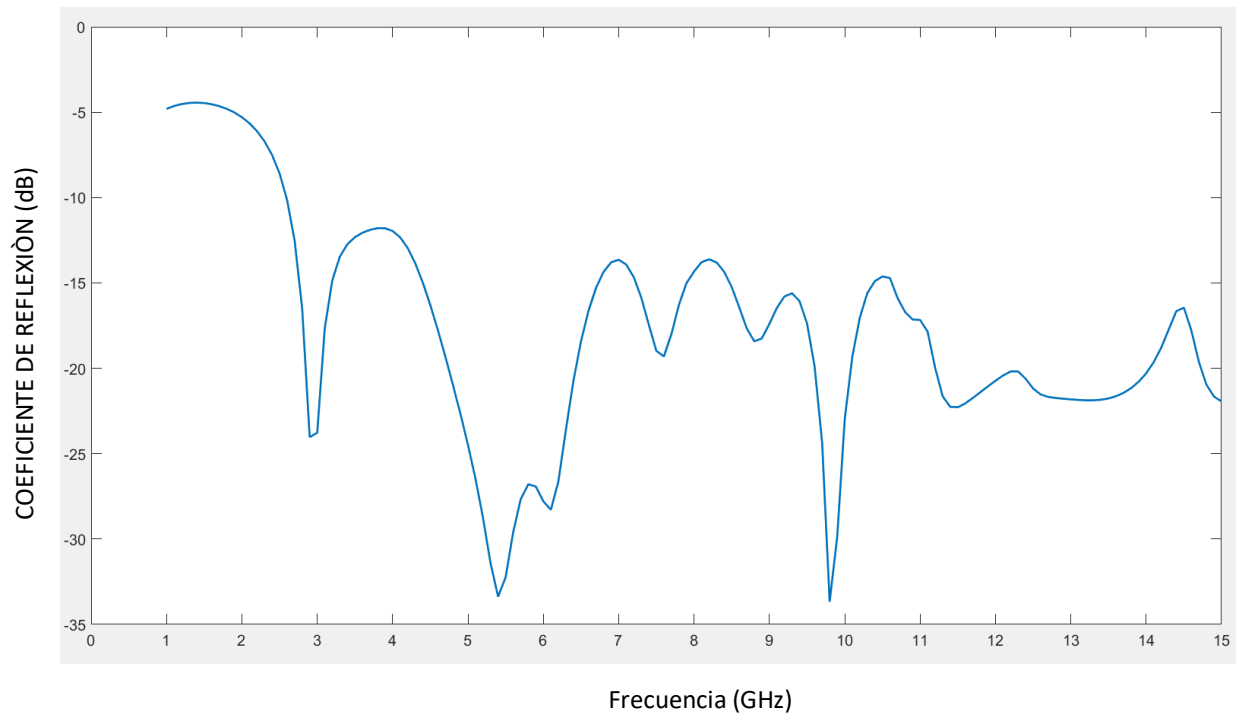


Figura 9. Parámetro S_{11} antena Vivaldi.

Otro parámetro importante es el diagrama de radiación ya que proporciona información importante sobre la capacidad de emisión y recepción en diferentes direcciones, también el ancho de haz indica el ángulo en el cual la antena emite o recibe la mayor parte de su energía. La antena Vivaldi bien diseñada tendrá un ancho de haz estrecho, lo que significa que concentrará su energía en una dirección específica y reducirá la radiación en otras direcciones, la Figura 10 presenta el diagrama de radiación simulado en el plano E de la antena propuesta a 6.5 GHz.

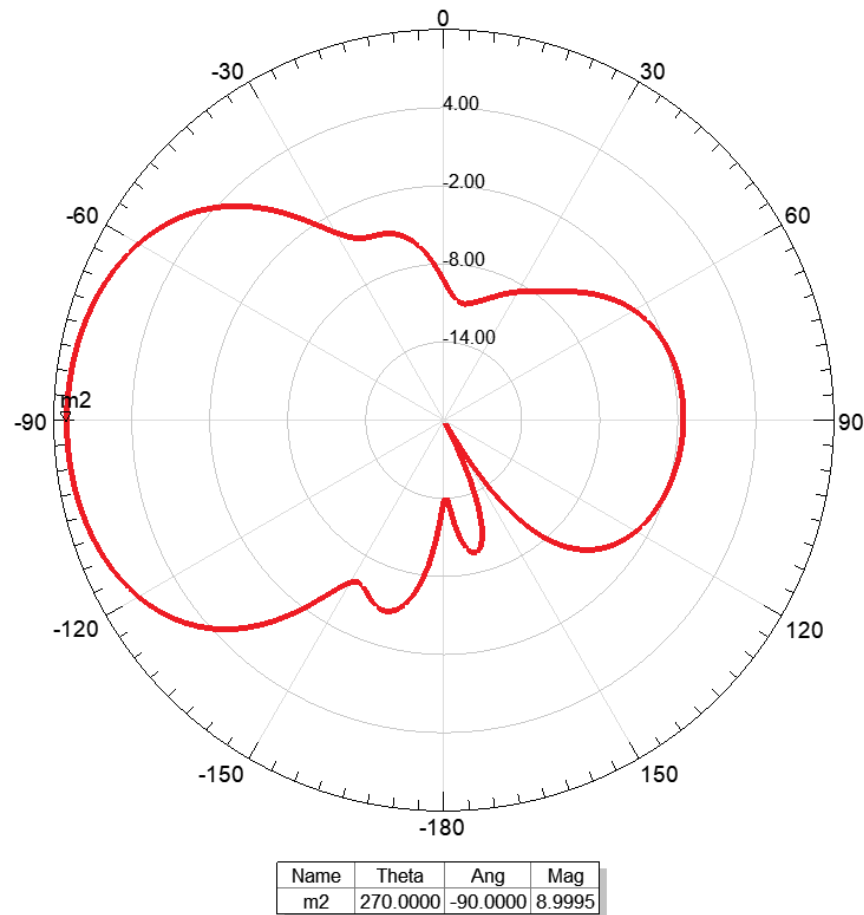


Figura 10. Diagrama de radiación del plano E de antena Vivaldi sin lente a 6.5 GHz.

El máximo pico de ganancia obtenida en la simulación es de 8.9 dB. El siguiente paso es diseñar el lente dieléctrico en el simulador Ansys HFSS, con las dimensiones del lente dieléctrico anteriormente obtenidas en la Sección 3.4. Esta construcción consta de 2 partes, una semiesfera y un cono.

Posteriormente se realiza una fusión de elementos, en La Figura 11 se muestra un dibujo técnico obtenido en SolidWorks. [4].

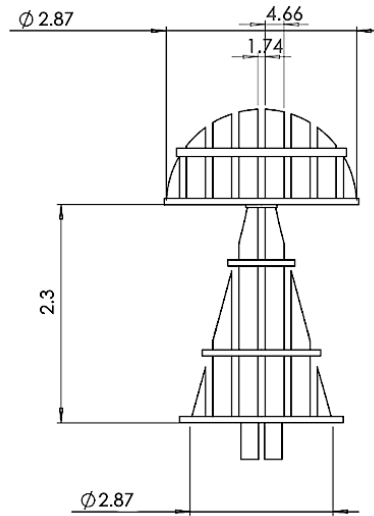


Figura 11 Dibujo técnico en SolidWorks de las dimensiones del lente.

En la Figura 12 se observa el diseño del lente dieléctrico en el software Ansys HFSS.

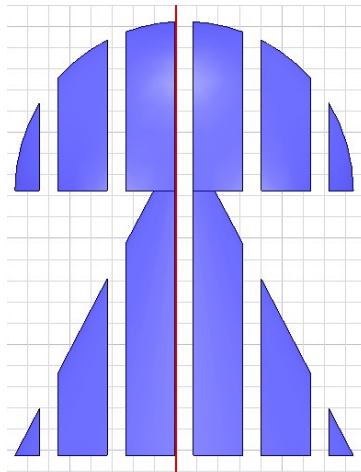


Figura 12. Simulación de lente dieléctrico.

Una vez diseñado el lente, el siguiente paso a realizar es ensamblarlos, para que se simule y se obtengan mediante simulación el coeficiente de reflexión S11, la ganancia y el diagrama de radiación. La Figura 13 muestra el ensamblaje de la antena y el lente.

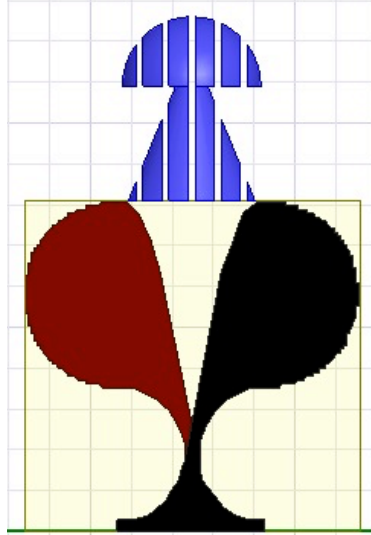


Figura 13. Simulación de antena Vivaldi con lente dieléctrica.

En la Figura 14 se muestra el coeficiente de reflexión (S_{11}) de la antena Vivaldi en conjunto con el lente dieléctrico.

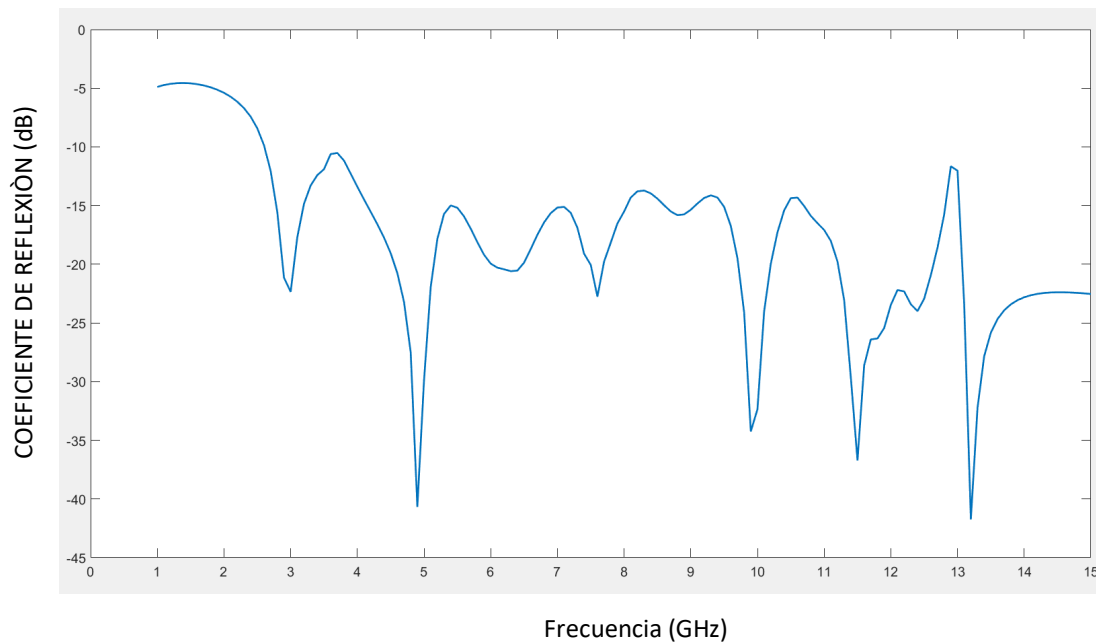


Figura 14. Coeficiente de reflexión Antena Vivaldi con Lente Dieléctrica.

Después de haber realizado las simulaciones y teniendo los parámetros deseados para dimensionar, se procede a llevar los cálculos al diseño en CAD para posteriormente llevarla a la impresión en 3D y se realice la caracterización.

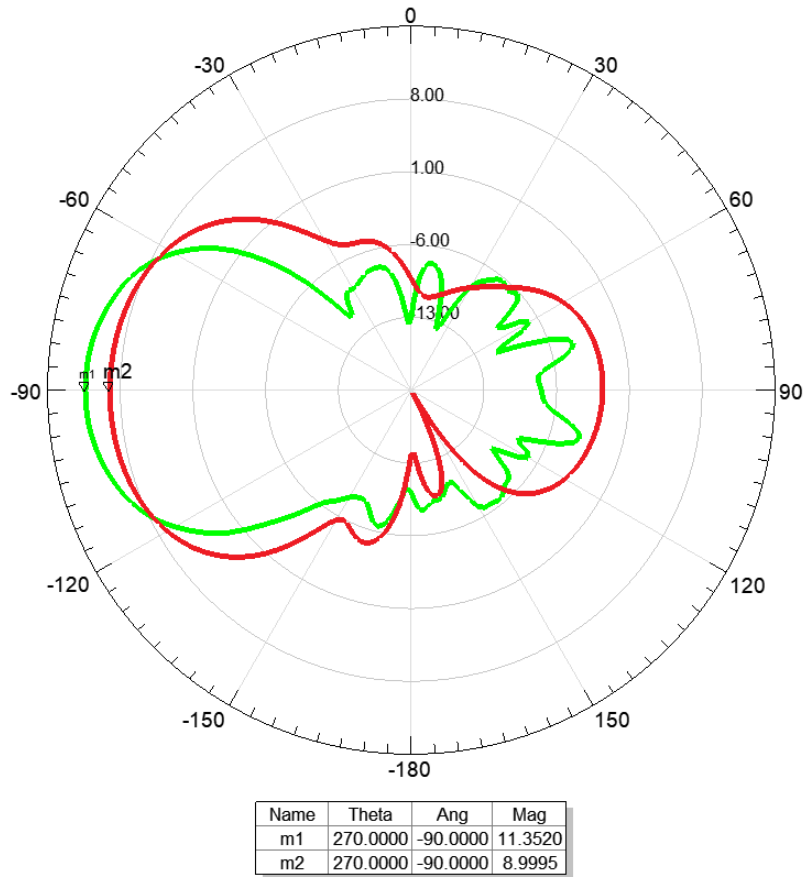


Figura 15 Diagramas de radiación sobrepuestos de la antena vivaldi con y sin lente.

Se observan los diagramas de radiación sobrepuestos en la Figura 15, donde se representa la antena Vivaldi sola y combinada con el lente dieléctrico, se observa una ganancia mayor en comparación con el primer diagrama de la antena sin el lente. Esta mejora que existe en la ganancia indica que el lente dieléctrico ha logrado enfocar y concentrar de manera más eficiente y con mejor directividad la energía radiada por la antena, lo que resulta en un rendimiento mejorado en términos de la señal transmitida o recibida.

3.5.2 Diseño y simulación en solidworks (CAD)

Las simulaciones realizadas en CAD (Diseño Asistido por Computadora), son de mucha importancia, ya que en este software involucra la creación del producto físico. SolidWorks permite diseñar los modelos tridimensionales más detallados de piezas y

ensamblajes antes de que se realice la fabricación en físico, con la finalidad de poder identificar problemas en el diseño, en valores y dimensiones, para que sean más eficientes y los trabajos sean de mayor calidad y así ahorrarse tiempo y costos en materiales, una vez llevándolo a lo físico.

Con los parámetros ya establecidos y obtenidos del HFSS y sabiendo que realmente funciona el producto, se procede a diseñar en SolidWorks el lente dieléctrico, se dan las dimensiones correctas y se hace una representación o una primera impresión de cómo podría ser en realidad dándole un poco más de vida. En la Figura 14 se muestra el plano de trabajo donde posteriormente se creará el lente.

Una vez diseñado el lente ya con los valores correctos en altura y diámetro, se puede observar las primeras muestras más reales de cómo podrá ser una vez que se realice la impresión.

El resultado del lente dieléctrico tipo hongo renderizado se presenta en la Figura 16 con la finalidad de observar a más detalle el resultado final.



Figura 16 Simulación de lente dieléctrico tipo hongo.

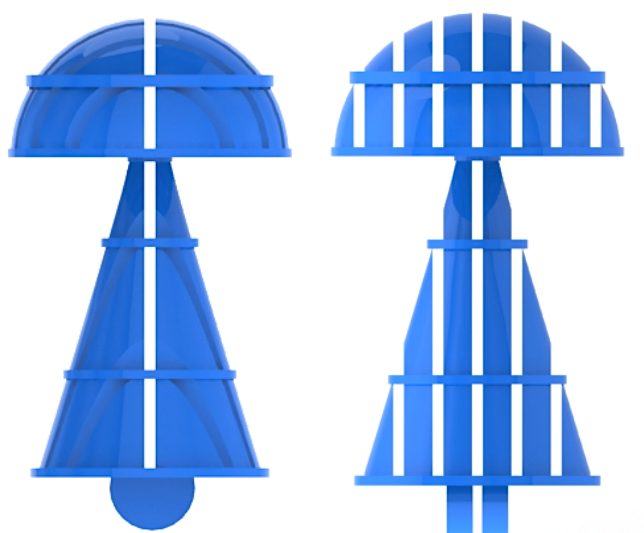


Figura 17 Vistas laterales del lente.

La integración de SolidWorks en esta investigación ofreció ventajas significativas, al proporcionar una interfaz intuitiva y herramientas de simulación para el diseño del lente que será impreso en 3D. Combinado con la herramienta de simulación como Ansys HFSS, SolidWorks amplió el alcance de esta investigación y permitió una validación cruzada de los resultados.

3.6 Impresión del lente dieléctrico

En secciones anteriores se especificó que SolidWorks es un software de diseño CAD que se utiliza en la industria para crear modelos 3D de alta precisión, se puede diseñar y modelar una gran variedad de objetos, incluido el lente dieléctrico tipo hongo anteriormente mostrado. Este software es de gran apoyo, ya que nuestro archivo será interpretado en un formato STL compatible con la impresora 3D.

Creado y simulado el modelo del lente dieléctrico en SolidWorks, se siguen los siguientes pasos para realizar una correcta impresión:

- Se abre el software SolidWorks y se selecciona el archivo que se imprimirá, es este caso se selecciona el lente dieléctrico anteriormente diseñado en SolidWorks presentado en la Figura 16.
- Se exporta el modelo en un formato que sea compatible con la impresora 3D, el formato es STL.
- Se abre el formato STL, utilizando para este proyecto de tesis, el software FLASH PRINT, original de la impresora *Creator Pro Flashforge*.
- Flash Print nos da una simulación y una presentación de la construcción del lente donde está presente el tiempo, número de capas y el resultado final.
- Se seleccionan los parámetros correspondientes y se crean soportes con la finalidad de que el lente tenga una mejor estabilidad y calidad de impresión.
- Se realiza una pequeña inspección en la calibración y en la instalación del filamento o material a ocupar.
- Finalmente, se realiza la impresión.

La impresión del lente se muestra en la Figura 18.

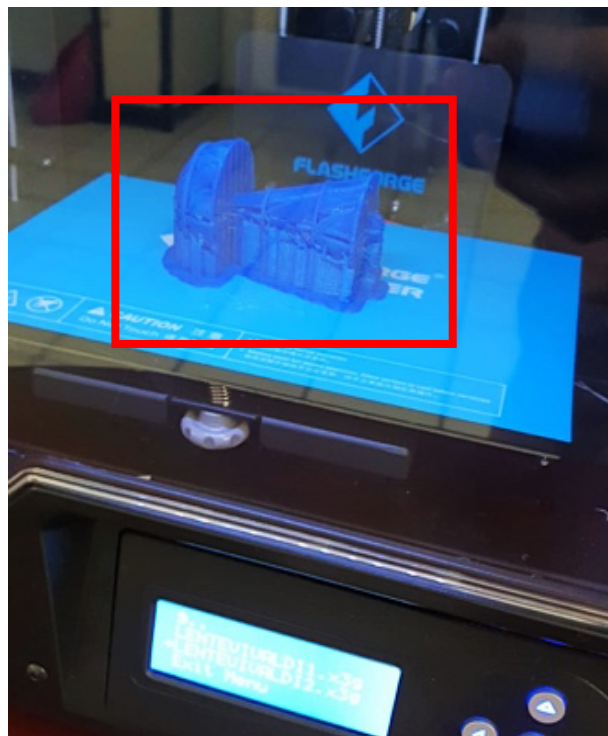


Figura 18 Impresión 3D del lente tipo hongo.

Una vez que el lente dieléctrico esté impreso, se coloca en la antena, la impresión 3D de este lente tuvo una duración 1 hora 30 minutos. Esta duración se debe a que antes de imprimir se debe calibrar, ajustar el filamento, y tener limpios los conductos, para tener un buen resultado en la impresión. La ubicación y el tamaño del lente dependerán de la frecuencia de operación de la antena y de las especificaciones de diseño.

3.7 Fabricación de la antena vivaldi

Una vez que se conocen las dimensiones exactas del lente y la antena, obtenidos anteriormente en las simulaciones, se procede a fabricar la antena que será añadida al lente dieléctrico, la antena fabricada fue tomada de [20]. La fabricación de esta antena se realizó utilizando corte por vinil para delimitar su geometría. La fabricación de la antena se realizó teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- Primero se corta el sustrato Ro4003c con las siguientes medidas: 8.1 cm de largo y 8.2 de ancho.
- El corte del sustrato se realizó con una guillotina tipo industrial en el Laboratorio de Diseño y Desarrollo de Prototipos Mecatrónicas de la Facultad Ciencias de la Electrónica como se muestra en la Figura 19.



Figura 19 Corte del sustrato.

- Se limpia por ambos lados con alcohol isopropílico, con la finalidad de que el vinil pueda adherirse con mayor facilidad al sustrato y no se despegue.
- Se pega el vinil con el diseño creado (Figura 20) y se compacta con la ayuda de un rodillo.



Figura 20 Corte vinil del diseño para la antena Vivaldi.

- Se prepara una mezcla entre cloruro férrico y un poco de agua caliente en un recipiente, posteriormente se introduce el sustrato con el tiempo necesario en el cual, se pueda observar que el cloruro férrico disuelva el cobre expuesto del sustrato.
- Por último se solda un conector coaxial SMA hembra con una impedancia de 50Ω (Figura 22) para alimentar la antena.

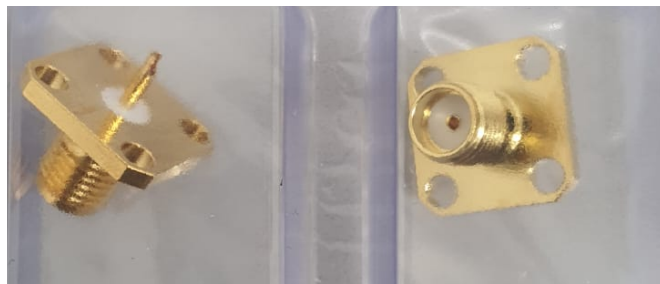
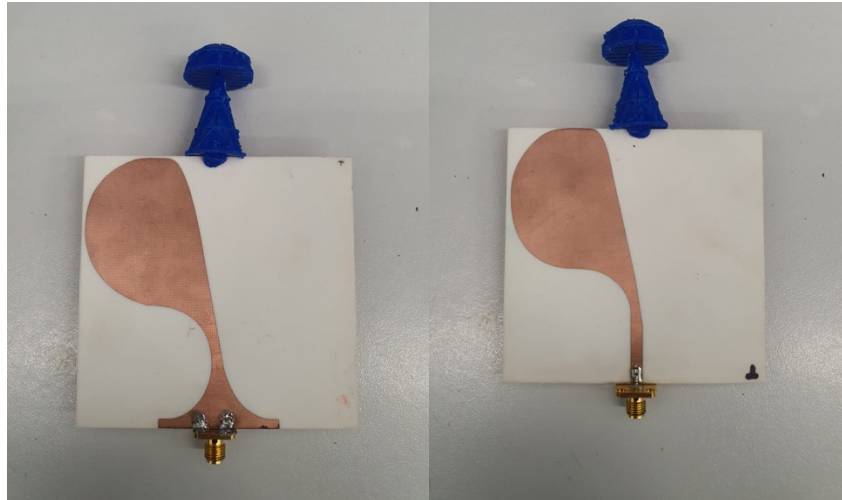


Figura 21 conector coaxial.



A

B

Figura 22 Resultado final A) Plano de tierra, B) plano de señal.

Una vez fabricados la antena y el lente se procede a hacer su caracterización experimental en el Laboratorio de Caracterización Basado en Microondas de la Facultad Ciencias de la Electrónica.

IV

4 CAPÍTULO IV: CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del funcionamiento del lente dieléctrico en conjunto con la antena Vivaldi, mediante las simulaciones y mediciones anteriormente realizadas. El objetivo principal de esta investigación es evaluar cómo el uso de un lente dieléctrico puede mejorar la ganancia

de la antena Vivaldi. Se muestran resultados del coeficiente de reflexión, ganancia, diagramas de radiación en 2D.

Finalmente, se realiza una comparación de los resultados obtenidos de la simulación con los resultados experimentales. La Figura 23 muestra el ensamble del lente con la antena Vivaldi para realizar la caracterización de ambas.

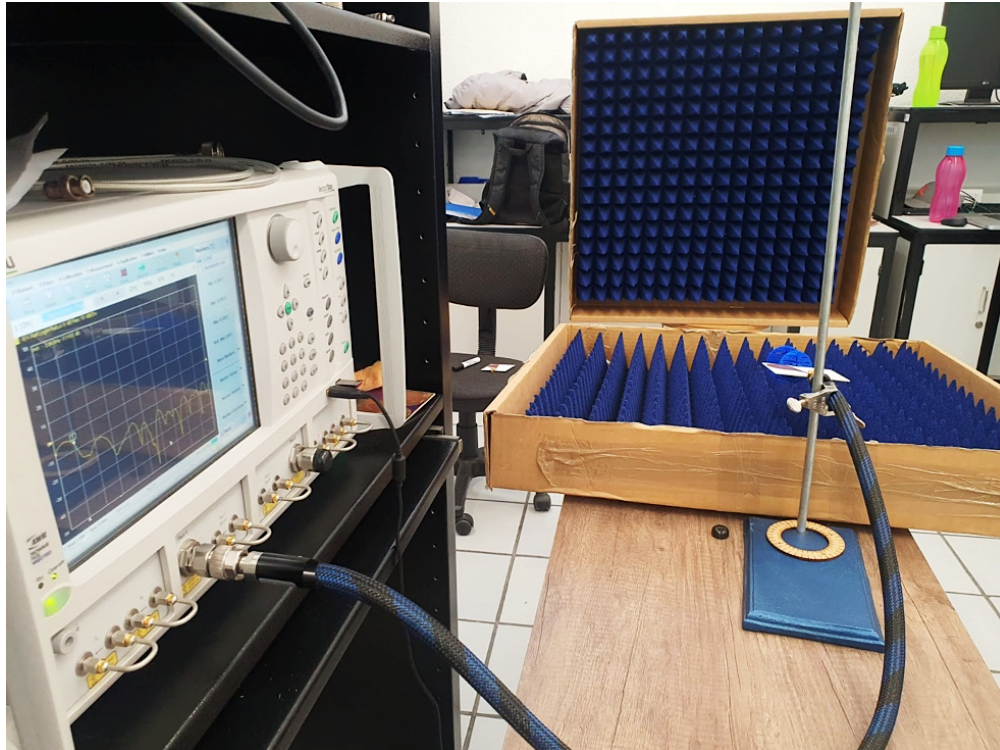


Figura 23 Caracterización de los productos finales.

4.2 Resultado: diseño, fabricación de la antena y coeficiente de reflexión

4.2.1 Coeficiente de reflexión sin lente

Esta sección presenta el coeficiente de reflexión de la antena Vivaldi simulada en el Ansys HFSS y la antena fabricada que fue caracterizada en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE-BUAP. El coeficiente

de reflexión medido fue obtenido utilizando un analizador vectorial de redes (VNA) de la marca Anritsu modelo Vectorstar. La antena fue conectada al VNA mediante un cable de prueba con conectores SMA macho. El VNA fue calibrado usando la técnica SOLT por sus siglas en inglés Short, Open, Load, True. La medición del coeficiente de reflexión se realizó en un rango 1 – 15 GHz. La Figura 24 muestra la configuración inicial de la antena al VNA.

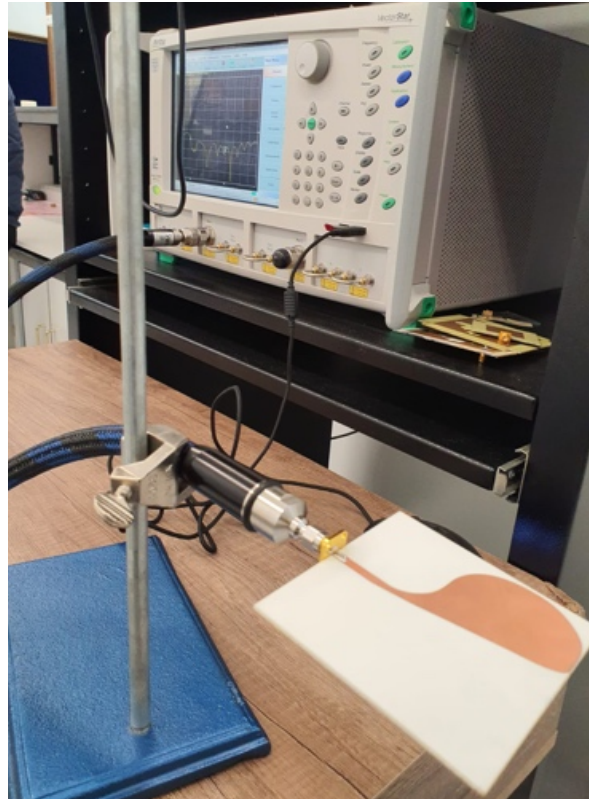


Figura 24 Pruebas del coeficiente de reflexión de la antena Vivaldi.

Los resultados simulados y experimentales del coeficiente de reflexión de la antena sin lente se muestran en la Figura 26, se puede observar que los coeficientes simulados y medidos muestran una concordancia entre ellos. En el rango de 2 a 6 GHz se observa un desplazamiento hacia la derecha de la respuesta medida con respecto a la simulada, esto se debe a errores de fabricación y a la soldadura del conector, pero aun así el coeficiente de reflexión experimental se encuentra por debajo de los -10 dB.

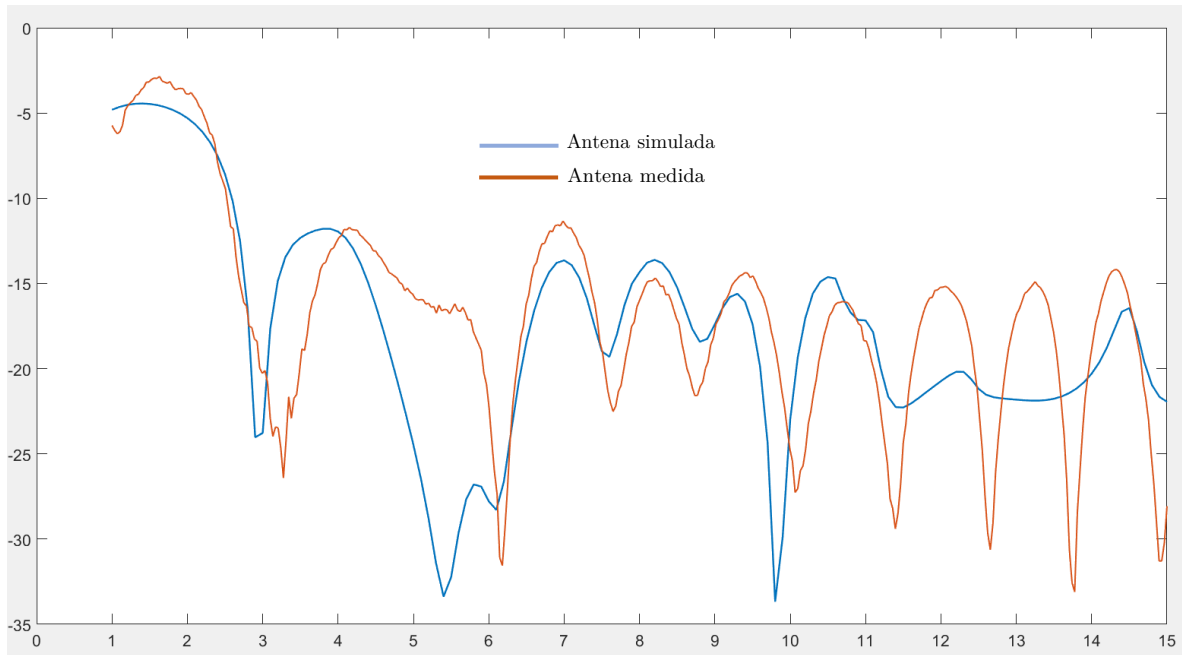


Figura 25. Coeficiente de reflexión (S_{11}) antena simulada, antena medida y antena con lente.

4.2.2 Coeficiente de reflexión con lente

Una vez verificado el funcionamiento experimental de la antena Vivaldi se procedió a colocar el lente y medir el coeficiente de reflexión y compararlo con el coeficiente de reflexión simulado. La Figura 27 muestra la antena con lente conectada al VNA para la obtención de su coeficiente de reflexión.

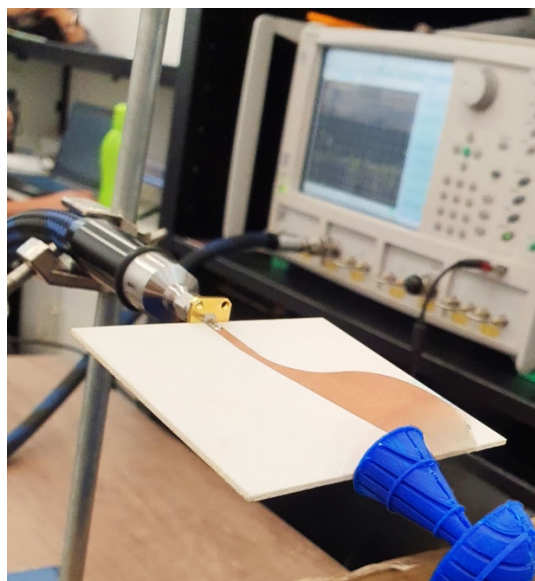


Figura 26 antena Vivaldi con lente real.

La Figura 27 presenta la comparación de los coeficientes de reflexión medidos de la antena con y sin lente así como la simulación del coeficiente de la antena con lente. De esta grafica se puede decir que la interacción del lente con la antena no modifica significativamente el coeficiente de reflexión de la antena, ya que dicho coeficiente se mantiene por debajo de los -10 dB en el rango UWB.

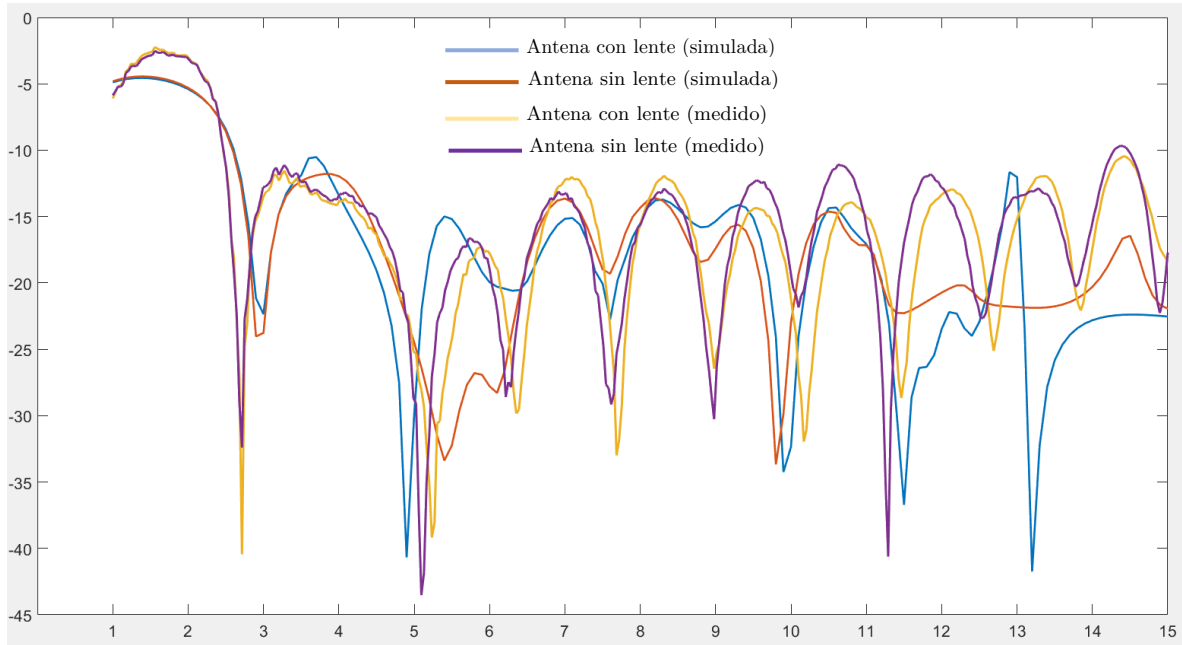


Figura 27. Comparación entre los coeficientes de reflexión para las diferentes configuraciones.

4.3 Medición de la Ganancia

La medición de la ganancia se realizó en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE-BUAP. En la Figura 28 se muestra el espacio que se utilizó.



Figura 28 Espacio para realizar la medición de la ganancia.

Para realizar la medición de la ganancia se empleó el método de dos antenas, este método consiste en usar dos antenas: una transmisora conectada a un generador de funciones y la otra antena receptora conectada a un analizador de espectros. En este caso la antena transmisora es una antena AARONIA HyperLog7060 que se conecta al generador de señales ANRITSU MG3693 y la antena receptora es la antena Vivaldi con y sin lente, que se conecta al analizador de señales ANRITSU MS2830A.

Los parámetros necesarios para hacer la medición de la ganancia son los siguientes:

G_{ot} = ganancia de la antena transmisora (dB), G_{or} = ganancia de la antena receptora (dB), P_t = potencia de la antena transmisora (W), P_r = potencia de la antena receptora (W), R = separación de las antenas (m) y λ = longitud de la onda (m).

La siguiente ecuación nos proporcionará los datos de la ganancia

$$G_{or} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) - G_{ot} \quad (16)$$

Para el desarrollo y evaluación de la ecuación se utilizó el software MATLAB, pero antes de utilizarlo, se realizaron mediciones de la potencia recibida en las siguientes frecuencias 4, 5, 5.5, 6, 6.5 GHz.

La Figura 29 muestra la configuración para la medición de la ganancia.

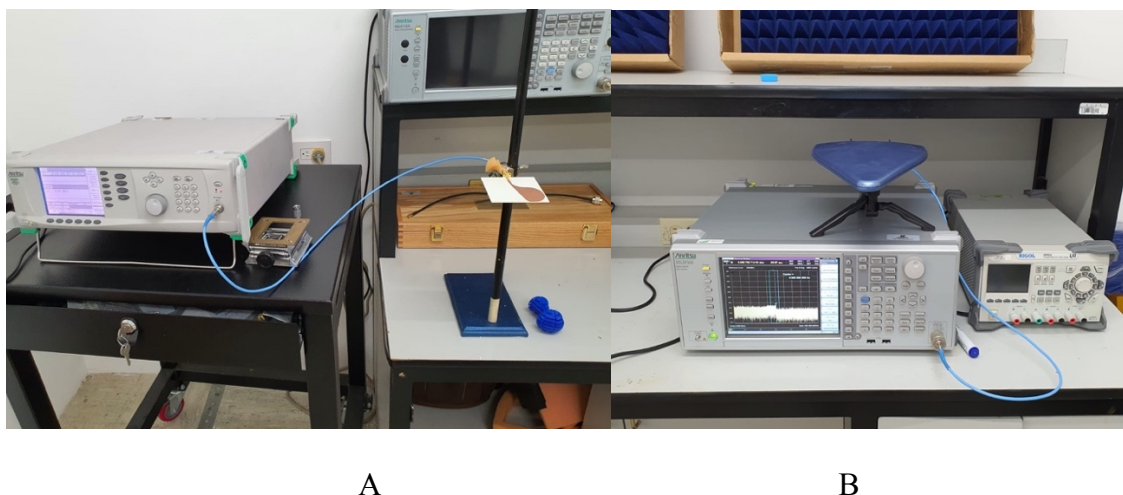


Figura 29 Medición de ganancia antena Vivaldi A) Antena Vivaldi conectada generador de señales y B) Antena AARONIA HyperLog7060 conectada al analizador de señales

Los resultados obtenidos de las mediciones son plasmados en la Tabla 3.

Tabla 2. Comportamiento de la antena en diferentes frecuencias

FRECUENCIA GHz	p_r ANTENA SIN LENTE	GANANCIA	p_r ANTENA CON LENTE	GANANCIA
4.0	-37.75 dB	4.016	-35.39 dB	6.37
5.0	-39.77 dB	3.936	-38.81 dB	4.894
5.5	-39.46 dB	5.072	-38.39 dB	6.142
6.0	-38.74 dB	6.548	-37.56 dB	7.726
6.5	-36.97 dB	8.373	-35.87 dB	9.973

De la Tabla 2. Se observa que el lente incrementa la ganancia pico de la antena tanto en la simulación como en las mediciones, con esto se verificó el desempeño del lente dieléctrico. La diferencia entre las ganancias medidas y simuladas es debido a la incertidumbre que se tiene al realizar las mediciones, ya que estas no fueron realizadas en un ambiente controlado.

4.4 Diagramas de radiación en 2D

Para obtener los diagramas de radiación, se realizaron una serie de mediciones donde la antena receptora con y sin lente gira 360 grados, tomando valores en cada 5 grados, la frecuencia en la que se decidió trabajar fue en 6.5 GHz a una distancia de 1.2 m, obtenido el siguiente diagrama de radiación para la antena Vivaldi y la antena combinada con el lente.

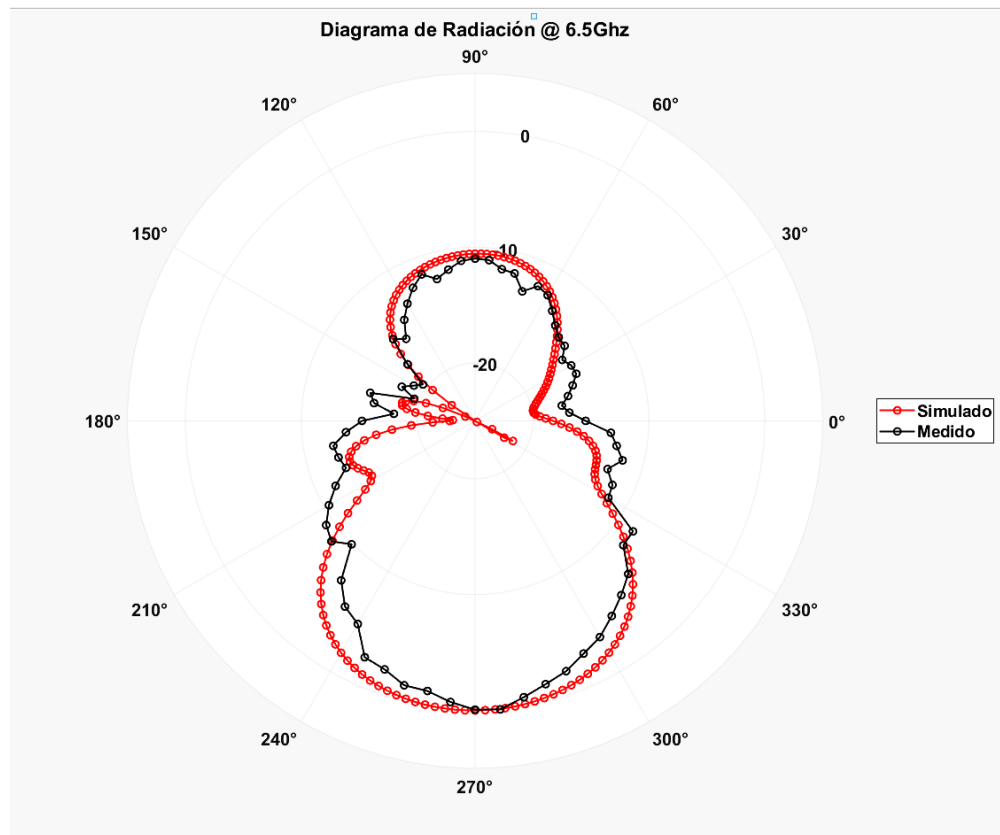


Figura 30 Diagrama de radiación antena Vivaldi.

En la Figura 30 se puede observar que los resultados simulados y medidos de la antena Vivaldi sin lente están en concordancia y que las variaciones que se aprecian son por la incertidumbre del ambiente de medición.

La Figura 31 muestra el diagrama de radiación de la antena con el lente dieléctrico.

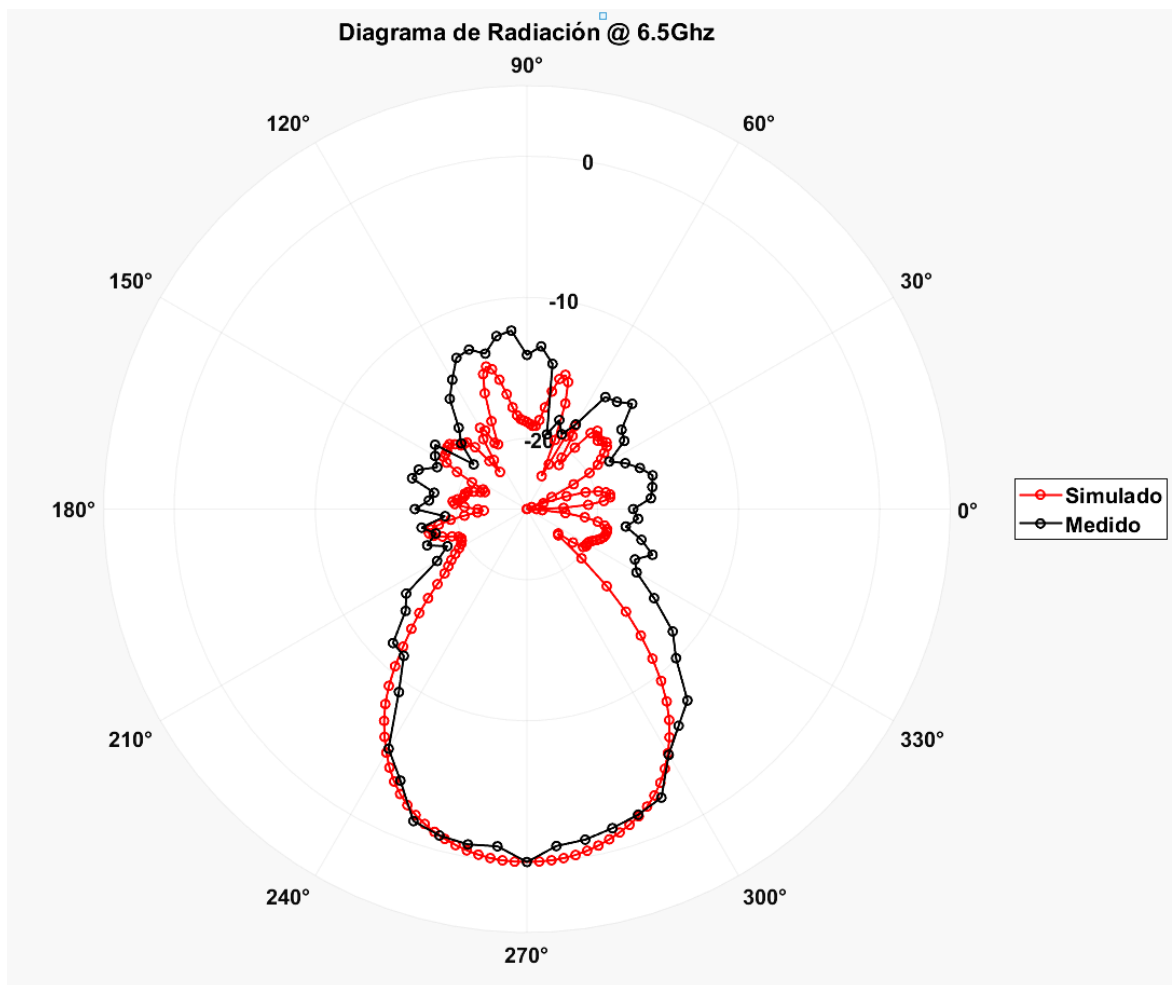


Figura 31. Diagrama de radiación antena Vivaldi con el lente dieléctrico.

De igual manera que en los diagramas sin lente se aprecia concordancia entre los resultados simulados y medidos. Finalmente, en la Figura 31 se muestra la comparación de los diagramas de radiación con lente y sin lente, donde se aprecia que el lente mejora la directividad de la antena, reduciendo su ancho de haz de media potencia (HPBW) en 20° en comparación con la antena sin lente. En la tabla 3 se resumen los resultados con respecto al ancho de haz.

Tabla 3. Ancho de haz de media potencia para antena con lente y sin lente para una frecuencia de 6.5 GHz.

HPBW Sin lente	HPBW con lente
70°	50°

La incertidumbre presentada en las mediciones es debido a que no se tuvo un ambiente controlado donde se mitiguen las interferencias electromagnéticas, por ejemplo: la presencia de personas con sus celulares y redes WiFi cercanas puede generar interferencias electromagnéticas en el entorno de prueba, ya que la antena capta esas frecuencias como se muestra en la Figura 1.

Estas interferencias pueden afectar la señal recibida por la antena, lo que resulta que las mediciones sean un poco inconsistentes en comparación con los resultados simulados. La similitud que se puede observar entre los resultados medidos y las simulaciones sugiere que el lente dieléctrico está funcionando de manera correcta.

V

5 CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Introducción

En este capítulo final de la tesis se presentan las conclusiones de lo realizado a lo largo de esta tesis, basándonos en los cambios favorables observados en la ganancia y en la frecuencia al combinar el lente dieléctrico con la antena Vivaldi, así como aportaciones y mejoras obtenidas a partir de las ideas de los asesores, con la finalidad de cumplir con los objetivos anteriormente descritos.

5.2 Conclusiones

En este trabajo se mostró un lente dieléctrica impresa en 3D donde se encontró una mejora significativa de la ganancia de hasta 10 dBi en la frecuencia central de la UWB. La inclusión de un lente hecho en PLA, siendo un material dieléctrico, fue

una estrategia efectiva para aumentar la ganancia de la antena Vivaldi. Los grandes cambios en la ganancia favorables nos indican que la lente dieléctrica ha logrado mejorar el rendimiento de la antena al dirigir y enfocar la radiación. La afirmación se corroboró utilizando una antena Vivaldi y el lente dieléctrico tipo hongo y realizando una correcta caracterización de ellos, donde se observó una buena relación entre los resultados medidos y los simulados. La lente puede utilizarse de forma independiente en aplicaciones que requieran una ganancia significativa, como la obtención de imágenes, directividad, entre otras.

La mejora de la ganancia de banda ancha hace que la lente sea adecuada y flexible para aplicaciones en las que la frecuencia de funcionamiento no puede especificarse de forma discreta. La mayor direccionalidad y enfoque de la radiación es otra mejora que se puede notar ante la combinación de la antena Vivaldi con el lente dieléctrico, se mostró un cambio favorable en la direccionalidad.

Finalmente, con el uso del lente dieléctrico se apreció que se logra una reducción del ancho de haz de media potencia de hasta 20° y esto se ve reflejado en el incremento de la ganancia.

5.3 Conclusiones del lente dieléctrico

La tecnología de impresión 3D ha revolucionado la producción de piezas y dispositivos en los últimos años, debido a esto la impresión en 3D permite la creación de lentes dieléctricos con alta precisión y formas personalizadas, que es muy útil para producir lentes con formas complejas que no se pueden lograr con la fabricación tradicional de este tipo de lentes. La impresión 3D de lentes dieléctricos es y será una alternativa más económica y accesible a la fabricación tradicional de lentes dieléctricos, que generalmente requiere procesos más costosos y complejos.

En resumen, la incorporación del lente dieléctrico hecho de PLA ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la ganancia, ampliar el ancho de banda y aumentar la directividad de la antena Vivaldi. Estos resultados son prometedores y respaldan la viabilidad y eficacia de la combinación de la antena con el lente

dieléctrico para aplicaciones que requieren una mayor eficiencia y rendimiento en términos de radiación y comunicación inalámbrica.

5.4 Trabajo Futuro

En la actualidad las microondas cuentan con un amplio desarrollo y diversas aplicaciones en el área de la electrónica, entre las principales aplicaciones se encuentran: las comunicaciones vía microondas, comunicaciones satelitales, sistemas de radar, radioastronomía y sistemas de imagenología.

En cuanto al futuro de los lentes dieléctricos impresos en 3D, es probable que se vea una mayor adopción de esta tecnología en una variedad de campos, incluyendo la Óptica, Medicina y la Electrónica. Los lentes dieléctricos impresos en 3D ofrecen muchas ventajas sobre los lentes tradicionales, como la capacidad de fabricar lentes con formas y tamaños personalizados para aplicaciones específicas y la capacidad de producir lentes de alta calidad con una gran precisión, donde no solo se notarán los incrementos en la ganancia y la frecuencia, sino también existirá una mejora en el enfoque de la radiación y el aumento en la directividad, lo que puede ser útil en aplicaciones donde se requiere detección o comunicación en una dirección específica.

Además, la fabricación de lentes dieléctricos impresos en 3D también puede ser más eficiente y menos costosa que la fabricación de lentes tradicionales, lo que podría llevar a una mayor adopción en la industria.

En resumen, se espera que los lentes dieléctricos impresos en 3D tengan un futuro brillante en la óptica y otras áreas relacionadas y es probable que veamos una mayor adopción de esta tecnología en los próximos años.

APÉNDICE A: DIBUJO TÉCNICO DEL LENTE DIELECTRICO

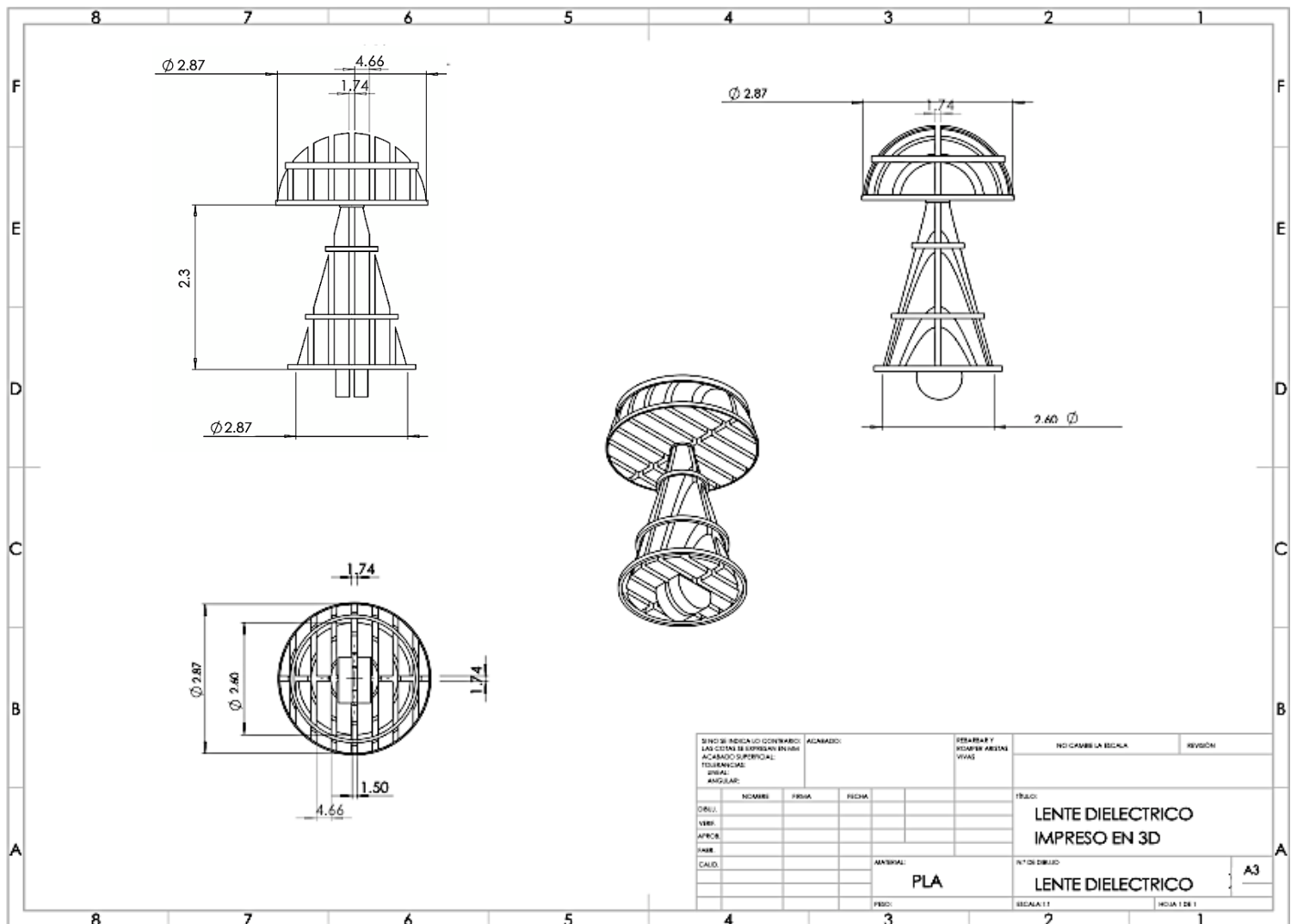


Figura 32 Dibujo técnico diseño del lente dieléctrico realizado en solidworks

APÉNDICE B: EQUIPOS DE MEDICIÓN

VNA – Analizador vectorial de redes ANRITSU MS4644b (Familia VectorStar)

La funcionalidad de este equipo radicó para la medición del coeficiente de reflexión de la antena (ver equipo en Fig. A-33). Sus características principales destacan un rango de trabajo de 70 kHz hasta 40 GHz, con un rango dinámico de 142 dB, una alta potencia de +14 dBm. Cuenta con dos puertos y cuatro bucles de acceso directo. Sus aplicaciones principales se encuentran en antena, mezcladores, convertidores de frecuencia, amplificadores, entre otros. Mediciones en: parámetros S , ruido de figura, parámetros X , pulsos RF.

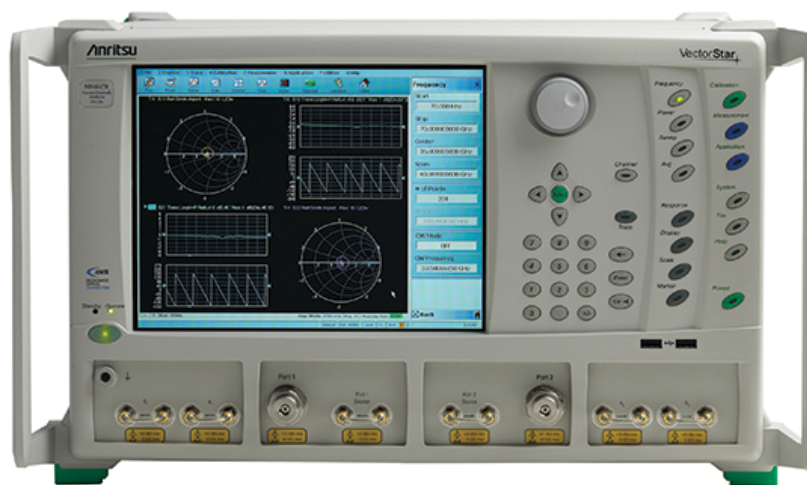


Figura A-33 Analizador vectorial de redes Anritsu MS4644b.

Analizador de señales ANRITSU MS2830A

Para medir la ganancia de la antena se utilizó este instrumento (Fig. A-2). Tiene un rango de frecuencia de 9 kHz a 26 GHz, un rango dinámico de 6 GHz cuenta con un convertidor descendente de 1 GHz (incorporado). Anchos de banda con opciones de 10/31,25/62,5/125 MHz en análisis de modulación y análisis de señales. Admisión de ruido y VER, nivel de ruido promedio de 142 dBm. Empleada para medición de TOI,

MC, ACP OBW, CCDF APD, etc. Sus aplicaciones radican en telefonía móvil y propósitos generales.



Figura A-34 Analizador de señales ANRITSU MS2830A.

Generador de señales ANRITSU MG3692C

Este instrumento fue utilizado para generar las señales a la frecuencia de resonancia de la antena. Rango de frecuencia de 2 GHz a 20 GHz, una resolución de 0.01 Hz con un nivel de ruido de -199 dB. Modulaciones analógicas (AM/FM) y modulación por pulsos.



Figura A-35 Analizador de señales ANRITSU MS2830A.

APÉNDICE C: CÓDIGOS MATLAB

CÓDIGO PARA OBTENER EL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN

```
clear all
clc

%%DATOS
data = load("Coef_Viva.csv");

f2=data(:,1)
db1=data(:,2)

data = load("Coefi_Lente.csv");

f2=data(:,1)
db=data(:,2)

data = load("Antena_Sol2.s1p");
f = data(:,1) ;
r = data(:,2);      % reales
s = data(:,3);      % ciamginarios

s11= r + j*s;
s11db = 20*log10(abs(s11));

data = load("Antena_Len2.s1p");
r1 = data(:,2);      % reales
s1 = data(:,3);      % ciamginarios

s11= r1 + j*s1;
s11db1 = 20*log10(abs(s11));

plot(f2,db,f2,db1, f,s11db, f,s11db1)
```

CÓDIGO PARA OBTENER EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN

```
clc;
clear;
close all;

%% Radiation Pattern 6.5
figure()

d3= load('COEF_ANTLENTE.csv');
rho3 = d3(:,2);
rho3 = rho3-max(rho3);
deg = d3(:,1);
polarplot(rho3,'r-o')
title('Diagrama de Radiación @ 6.5Ghz')
rlim([-25 5])

hold on
rhos3 = [-56.19 -54.9 -54.7 -54.5 -55.2 -56.03 -56.98 -55.3 -54.97 -53.17 -53.8 -54.03 -56.8 -
57.87 -57.01 -58.24 -53.27 -52.15 -52.8 -51.03 -51.28 -52.32 -51.7 -51.9 -53.14 -54.19 -56.2 -
57.14 -58.8 -55.78 -56.2 -56.7 -55.56 -55.3 -57.04 -56.75 -55.78 -57.9 -56.14 -57.03 -56.2 -57.5
-56.37 -53.28 -52.5 -50.3 -50.15 -47.9 -44.12 -42.5 -40.2 -39.78 -39.6 -39.74 -38.72 -39.76 -39.94
-40.32 -40.68 -41.17 -43.62 -44.98 -46.02 -48.78 -50.23 -52.72 -54.75 -55.28 -54.25 -55.32 -56.61
-55.81 -56.19];
nmenor3=max(rhos3);
rhos33= (rhos3)-(nmenor3);
polarplot(rhos33,'k-o')
legend('Simulado', 'Medido')
hold off
```

CÓDIGO PARA OBTENER LA GANANCIA

```
clc
%clear
%close all
%% Gain

f=2.00e9;
c=3e8;
lambda=c/f;
D=1.4;                                % Distance on metters

Gtx=4.3;                               % Gain Transmisition Antenna (dB)
Ptx=0.001 ;                            % Transmition Power (W)
% Prx=316.25e-9;                        % Receptor Power (W)
%
%  $PL=20*\log_{10}(4*\pi*D/\lambda)$ ;
%  $Pp=10*\log_{10}((Prx)/(Ptx))$ ;
%  $G_{rx}=PL+Pp-G_{tx}$                                 % Gain Reception Antenna (dBm)
Prxdbm= -32;                            % Receptor Power (dBm)  % Receptor Power (W)
Prx= 10^((Prxdbm-30)/(10));

PL=20*log10(4*pi*D/lambda);
Pp=10*log10((Prx)/(Ptx));
Grx=PL+Pp-Gtx
```

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Millán, R. J. (2004). UWB (Ultra-Wide Band). Boletín de Ingenieros de Telecomunicación (BIT), 147, 69-71.
- [2] Desenvolvimento e otimização de antenas Vivaldi antipodais para aplicações a altas frequências - Scientific Figure on ResearchGate. (accessed 26 Jan, 2023). Available from: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ilustracao-dos-dois-tipos-basicos-de-antenas-Vivaldi-a-Antena-Vivaldi_fig1_289801507.
- [3] Torrealba M. R. Olvera-Cervantes J. L. and Corona-Chávez A. (2014) "Resolution improvement of an UWB microwave imaging radar system using circular polarization," *International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, Cholula, Mexico, 2014, pp. 189-193, doi: 10.1109/CONIELECOMP.2014.6808589.
- [4] Zhang Y. -X., Jiao Y. -C. and Liu, S. -B. (Nov. 2018) "3-D-Printed Comb Mushroom-Like Dielectric Lens for Stable Gain Enhancement of Printed Log-Periodic Dipole Array," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 11, pp. 2099-2103, doi: 10.1109/LAWP.2018.2851298.
- [5] Zhai GH., Cheng Y., Yin Q. Zhu S. y Gao J. (2013) "Antena de conjunto de dipolos logarítmicos periódicos impresos en modo sujeto integrado con sustrato de súper alta ganancia" *Trans. IEEE. Propagación de antenas*, vol. 61, num. 6, págs. 3009–3016.
- [6] Chu Q.-X., Li X.-R., y Ye M. (2017) "Antena de conjunto de dipolos logarítmicos impresos de alta ganancia con celda parásita para comunicación 5G" *Trans. IEEE. Propagación de antenas*, vol. 65, num. 12, págs. 6338–6344.
- [7] Anwar, M. S., Abufanas, H., & Bangert, A. (2020). 3D printed dielectric lens for the gain enhancement of a broadband antenna. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(4), doi.org/10.1002/mmce.22115.
- [8] Yaru W., Xueqin Z., Ruyue S., Mingji C., Chujing S., Hao X., Rujie H., 3D Printed (2023) *Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges*, Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, Volume 2, Issue1, 100065,SSN2772-6657.
- [9] Manuel H. J. (2013). Antenas para telecomunicaciones. Acta es Recuperado en 2023 ,de https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf
- [10] Fernandes, C. A., Lima, E. B., & Costa, J. R. (2016). Dielectric lens antennas. In *Handbook of antenna technologies* (pp. 1001-1064). Springer, Singapore.

- [11] M. Sadiku, *elementos de electromagnetismo* 3rd ed. New York: Oxford University press (2016) Recuperado en 2023.
- [12] Wang, J., Liu, J., Fan, Y., & Bai, Y. (2022). A novel Vivaldi antenna for UWB detection. *Microwave and Optical Technology Letters*, 65, n/a-n/a.
- [13] Mobashsher, A. T., Cicchetti, R., Miozzi, E., & Testa, O. (2017). Wideband and UWB Antennas for Wireless Applications: A Comprehensive Review. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017. doi.org/10.1155/2017/2390808.
- [14] Kalista, W., Leszkowska, L., Rzymowski, M., Nyka, K., & Kulas, L. (2022). Low-Cost 3D Printed Dielectric Lens Antennas for 5.9 GHz Frequency Band V2X Applications. In *2022 24th International Microwave and Radar Conference (MIKON)* (pp. 1-4). Gdansk, Poland. doi.org/10.23919/MIKON54314.2022.9924842.
- [15] Colella, R., Chietera, F., Michel, A., Muntoni, G., Casula, G., Montisci, G., & Catarinucci, L. (2022). Electromagnetic characterisation of conductive 3D-Printable filaments for designing fully 3D-Printed antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 16, n/a-n/a. doi.org/10.1049/mia2.12278.
- [16] Poyanco, J. M., Pizarro, F., & Rajo-Iglesias, E. (2022). 3D-Printed Half-Maxwell Fish-Eye dielectric lens antenna with integrated DRA feed. In *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-5). Madrid, Spain. doi.org/10.23919/EuCAP53622.2022.9769238.
- [17] Malik, B. T., Doychinov, V., Zaidi, S. A. R., Robertson, I. D., & Somjit, N. (2019). Antenna Gain Enhancement by Using Low-Infill 3D-Printed Dielectric Lens Antennas. *IEEE Access*, 7, 102467-102476. doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931772.
- [18] Komljenovic, T., Sauleau, R., Sipus, Z., & Le Coq, L. (2010). Layered Circular-Cylindrical Dielectric Lens Antennas—Synthesis and Height Reduction Technique. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58(5), 1783-1788. doi.org/10.1109/TAP.2010.2044337.
- [19] Keyrouz, S., & Caratelli, D. (2016). Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, 1-20. doi.org/10.1155/2016/6075680.
- [20] Torrealba M. R., Olvera-Cervantes J. L. and Corona-C. A., "Resolution improvement of an UWB microwave imaging radar system using circular polarization," 2014 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), Cholula, Mexico, 2014, pp. 189-193, doi: 10.1109/CONIELECOMP.2014.6808589. Recuperado en mayo de 2023.

- [21] Sze.hu. Recuperado el 13 de mayo de 2023,
http://maxwell.sze.hu/~ungert/Radiorendszerek_satlab/Segedanyagok/Ajanlott_irodalom/antenna_theory_and_design_-_stutzman_,_thiele.pdf
- [22] Turk A. & Keskin, A. (2012). Partially Dielectric-Loaded Ridged Horn Antenna Design for Ultrawideband Gain and Radiation Performance Enhancement. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*. 11. 921-924. 10.1109/LAWP.2012.2211071. (recuperado en 2023)
- [23] Ramadan M. S., Hassan & Shenawy, Eman. (2023). Tribological Properties of 3D Printed Polymers: PCL, ABS, PLA and Co Polyester. *Tribology in Industry*. 45. 161-167. 10.24874/ti.1410.11.22.02.
- [24] Kuzmanić, Ivica & Vujović, Igor & Petković, Miro & Šoda, Joško. (2023). Influence of 3D printing properties on relative dielectric constant in PLA and ABS materials. *Progress in Additive Manufacturing*. 1-8. 10.1007/s40964-023-00411-0.
- [25] Goode I. and Saavedra C. E., (2022) "3D Printed Linearly Polarized X-Band Conical Horn Antenna and Lens," in *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 3, pp. 549-556, doi: 10.1109/OJAP.2022.3173161.
- [26] Contreras, A., & Urdaneta, M. (2018). Ultra wideband antennas for communications systems on microwave frequency bands: a review. *Revista de Ingeniería. UC*, 25(2), 134-148.
- [27] Haraz O. M., Alshebeili S. A., and Sebak A.-R. (2015) "Low-cost high gain printed log-periodic dipole array antenna with dielectric lenses for V-band applications," *Microw., Antennas Propag.*, vol. 9, no. 6, pp. 541-552, Apr.
- [28] Shalini G. R., Krishna D. R., Karthikeya G. and Koul S. K. (2021) "Design of 3D printed lens antenna for 5G applications," *IEEE MTT-S International Microwave and RF*.
- [29] Diallo A. O., Czarny R., Loiseaux B. and Holé S. (2018) "Comparison Between a Thin Lens Antenna Made of Structured Dielectric Material and Conventional Lens Antennas, in Q-Band in a Compact Volume," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 307-310, doi: 10.1109/LAWP.2017.2787789.
- [30] Poyanco J. -M., Pizarro F. and Rajo-Iglesias E., "3D-printed dielectric GRIN planar wideband lens antenna for 5G applications," *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Dusseldorf, Germany, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411342.
- [31] Farahani, H. S., Rezaee, B., & Bösch, W. (2022). High Gain Filtering Lens Antenna. In *2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)* (pp. 11-12). Sydney, Australia. doi.org/10.1109/ISAP53582.2022.9998640.

- [32] Bansal, A., Panagamuwa, C., & Whittow, W. (2023). Novel Design Methodology for 3D-Printed Lenses for Travelling Wave Antennas. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 1-1. doi.org/10.1109/OJAP.2023.3243408.
- [33] Colella, R., Chietera, F., Muntoni, G., Casula, G., Montisci, G., & Catarinucci, L. (2023). Evaluating the Effectiveness of Planar and Waveguide 3D Printed Antennas Manufactured Using Dielectric and Conductive Filaments. *IEEE Access*. doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3265563
- [34] Chen, Y., He, Y., Li, W., Zhang, L., Wong, S.-W., & Boag, A. (2021). A 3–9 GHz UWB High-Gain Conformal End-Fire Vivaldi Antenna Array. In *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)* (pp. 737-738). Singapore, Singapore. doi.org/10.1109/APS/URSI47566.2021.9703714.
- [35] Heng, Z., Yong, L., & Jing, Z. (2022). An L-Shaped Miniaturized Ultra Wideband Vivaldi Antenna. In *2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China)* (pp. 1-2). Xuzhou, China. doi.org/10.1109/ACES-China56081.2022.10064955.
- [36] Sang, L., Wu, S., Liu, G., Wang, J., & Huang, W. (2020). High-Gain UWB Vivaldi Antenna Loaded With Reconfigurable 3-D Phase Adjusting Unit Lens. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(2), 322-326. doi.org/10.1109/LAWP.2019.2961393
- [37] Kim, W., Kim, J., Won, J., Yu, D., & Yoon, I.-J. (2022). Rapid Prototyping of Reduced-Height Dielectric Lens with One-Take 3D Printing for Antenna Directivity Enhancement. *Applied Sciences*, 12, 11811. doi.org/10.3390/app122211811.
- [38] Hegazy, A. M., Alizadeh, M., Samir, A., Chavoshi, M., Basha, M. A., & Safavi-Naeini, S. (2022). 3D-Printed mmWave Dual Dielectric Lens Antenna for Series-Fed Arrays. In *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)* (pp. 2076-2077). Denver, CO, USA. doi.org/10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9887287.
- [39] Thaiwirot, W., Kamoldej, D., Detchporn, P., Thongdit, P., & Tangwachirapan, S. (2022). Antipodal Vivaldi Antenna with Dielectric Lens for Biomedical Imaging Applications. In *2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)* (pp. 93-96). Bangkok, Thailand. doi.org/10.1109/RI2C56397.2022.9910304.