



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

TESIS EN

“ANTENA MIMO CON GRAFENO DE 4 PUERTOS EN  
SUBSTRATO TRANSPARENTE PARA WiFi, WiMAX y 5G”

QUÉ PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADA EN ELECTRÓNICA

PRESENTA

JOCELYN MONTES DE LA ROSA

ASESORES

DR. RICHARD TORREALBA MELÉNDEZ

M.C. EDNA ILIANA TAMARIZ FLORES (FCC)

VoBo

H. PUEBLA DE ZARAGOZA, PUE.

NOVIEMBRE 2023

## ***Agradecimientos***

*Este apartado es especialmente dedicado al agradecimiento a todas aquellas personas que estuvieron apoyándome a lo largo de este proceso tan importante para mí. Comenzando agradeciéndole a alguien muy especial e importante, mi mamá Verónica De la Rosa Cornejo por estar siempre a mi lado, por festejar mis logros y secar mis lágrimas en momentos de frustración, por siempre tener las palabras perfectas para motivarme y jamás dejar que me rinda. Mami, este trabajo es todo tuyo.*

*También le quiero agradecer a mi papá Gerardo Montes Cruz y mi hermano Diego Montes De la Rosa, por apoyarme y acompañarme con amor y paciencia en este proceso y nunca dudar de mí. Con todo cariño los menciono en este apartado ya que sin ustedes no lo hubiera logrado.*

*Igualmente les agradezco a todos y cada uno de mis tíos quienes siempre confiaron en mí y hacían lo posible para que no me faltara nada durante mi carrera, cada detalle y cada palabra suya siempre lo llevo presente en corazón y alma.*

*A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y a la Facultad de Ciencias de la Electrónica por darme las bases para mi futuro profesional, les agradezco por ser mi segunda casa en estos años y brindarme sus instalaciones. Al igual, gracias porque aquí encontré personas que se volvieron salvadores en mi vida, en especial a mi tutora la Dra. Julia Chávez Chávez, le agradezco infinitamente todo lo que hizo por mí.*

*A mis amigos que se volvieron familia tanto en las clases como en estos últimos semestres de tesis; Ana, Vane, Marco, Roy, Wil, Moni y Mau, por mencionar algunos, les doy las gracias por tantas risas, tantas alegrías y tantas experiencias que hicieron más agradable la carrera de inicio a fin.*

*Por último, gracias al Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas de la FCE por el préstamo de todo su equipo que está a cargo de el Dr. Richard Torrealba Meléndez a quien también le agradezco por recibirme y apoyarme con paciencia y compartirme su conocimiento en todo momento tanto en las prácticas como en el trabajo de tesis, al igual que la M.C. Edna Iliana Tamariz Flores.*

*Y una mención especial a un par de ángeles que hoy ya no están conmigo, pero en su momento me regalaron un cariño especial y siempre estuvieron apoyándome en diferentes etapas de mi vida y que fueron parte de mi crecimiento. A Israel Ramírez Sánchez por siempre recibirme con una sonrisa y un abrazo enorme, siempre mostrándome su admiración y siempre brindándome las palabras más bellas para siempre motivarme y a Thais Madelene Roquillo Intriago por ser una amiga tan leal y cariñosa que me enseñó diferentes puntos de ver la vida. A ambos los llevo en el corazón y les mando un beso hasta el cielo.*

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	6
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 Estado del arte .....	13
1.2 Justificación .....	15
1.3 Objetivos .....	16
1.3.1 Objetivo general .....	16
1.3.2 Objetivo específico .....	16
1.4 Metodología .....	17
1.5 Organización.....	18
CAPITULO 2. TECNOLOGÍAS WiFi Y WiMAX, 5G Y TEORÍA DE ANTENAS .....	19
Introducción .....	19
2.1 Tecnología celular de quinta generación.....	19
2.2 Tecnología WiFi .....	21
2.3 Tecnología WiMAX .....	22
2.4 Antenas.....	23
2.4.1 Antenas de microcinta.....	24
2.4.2 Antena de Parche .....	25
2.4.3 Antenas coplanares .....	26
2.5 Antenas MIMO.....	29
2.6 Teoría de antenas .....	30
2.6.1 Coeficiente de reflexión .....	31
2.6.2 Ancho de banda.....	31
2.6.3 Diagrama de radiación .....	32
2.6.4 Ganancia .....	33
2.6.5 Coeficiente de transmisión entre puertos .....	34
2.7 Grafeno .....	35
CAPITULO 3. ANTENA MIMO DE 4 PUERTOS .....	36
Introducción .....	36
3.1 Fase 1: Antena elemental.....	36
3.2 Diseño .....	37
3.2.1 Línea coplanar .....	37
3.2.2 Parche.....	40

3.2.3	<i>Antena elemental final simulada</i> .....	44
3.3	<b>Construcción</b> .....	46
3.3.1	<i>Antenas elementales finales construidas</i> .....	50
3.4	<b>Fase 2: Antena MIMO de 2 puertos</b> .....	50
3.5	<b>Diseño</b> .....	51
3.5.1	<i>Migración de la antena elemental a antena MIMO</i> .....	51
3.5.2	<i>Antena MIMO de 2 puertos final simulada</i> .....	53
3.6	<b>Construcción</b> .....	54
3.6.1	<i>Antena MIMO de 2 puertos final construida</i> .....	55
3.7	<b>Fase 3: Antena MIMO de 4 puertos</b> .....	55
3.8	<b>Diseño</b> .....	55
3.8.1	<i>Migración de la antena MIMO de 2 puertos a antena MIMO de 4 puertos</i> .....	56
3.8.2	<i>Antena MIMO de 4 puertos final simulada</i> .....	58
3.9	<b>Construcción</b> .....	59
3.9.1	<i>Antena MIMO de 4 puertos final construida</i> .....	59
<b>CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIONES, MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....		60
	<b>Introducción</b> .....	60
4.1	<b>Antena elemental de cinta de cobre</b> .....	60
4.1.1	<i>Coefficientes de reflexión</i> .....	61
4.1.2	<i>Diagramas de radiación</i> .....	63
4.1.3	<i>Ganancias</i> .....	67
4.2	<b>Antena elemental de grafeno</b> .....	68
4.2.1	<i>Coefficientes de reflexión</i> .....	69
4.2.2	<i>Diagramas de radiación</i> .....	71
4.2.3	<i>Ganancias</i> .....	75
4.3	<b>Antena MIMO de 4 puertos de grafeno</b> .....	76
4.3.1	<i>Coefficientes de reflexión</i> .....	77
4.3.2	<i>Coefficientes de transmisión</i> .....	80
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b> .....		87
	<b>Introducción</b> .....	87
5.1	<b>Conclusiones</b> .....	87
5.2	<b>Trabajo futuro</b> .....	89
<b>APÉNDICE A. EQUIPOS DE MEDICIÓN</b> .....		90
<b>REFERENCIAS</b> .....		92

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

<i>Ilustración 1.1. Ejemplos de la evolución de las comunicaciones celulares. [29]</i> .....	10
<i>Ilustración 1.2. Evolución industrial [24]</i> .....	12
<i>Ilustración 1.3. Tecnología Massive MIMO por la IFT [26]</i> .....	13
<i>Ilustración 1.4. Beamforming por la IFT [25]</i> .....	14
<i>Ilustración 2.1. Evolución de los sistemas de comunicaciones celulares.</i> .....	20
<i>Ilustración 2.2. Frecuencias de la tecnología WiFi. [30]</i> .....	21
<i>Ilustración 2.3.Tecnología WiMAX. [31]</i> .....	22
<i>Ilustración 2.4.Relación entre antena transmisora y receptora. [15]</i> .....	23
<i>Ilustración 2.5.Antena de parche y sus componentes. [32]</i> .....	25
<i>Ilustración 2.6. Estructura de una línea coplanar [12]</i> .....	27
<i>Ilustración 2.7 Ejemplo de antena coplanar con planos de tierra rectangulares [9]</i> .....	28
<i>Ilustración 2.8. Ejemplo de planos de tierra semicirculares [16]</i> .....	28
<i>Ilustración 2.9.Ejemplo de sistema MIMO de antenas. [15]</i> .....	30
<i>Ilustración 2.10.Ejemplo de coeficientes de reflexión. [33]</i> .....	31
<i>Ilustración 2.11.Ejemplo de ancho de banda. [11]</i> .....	32
<i>Ilustración 2.12.Diagrama de radiación a) isotrópico, b) omnidireccional y c) direccional [11].</i> .....	33
<i>Ilustración 2.13. Representación esquemática de una lámina de grafeno.[34]</i> .....	35
<i>Ilustración 3.1. Diseño de la línea.</i> .....	38
<i>Ilustración 3.2. Creación y división del círculo.</i> .....	39
<i>Ilustración 3.3. Diseño final de plano de tierra</i> .....	39
<i>Ilustración 3.4. Diseño final de la línea coplanar.</i> .....	40
<i>Ilustración 3.5. Primer diseño de parche.</i> .....	41
<i>Ilustración 3.6. Cortes en el parche rectangular.</i> .....	42
<i>Ilustración 3.7. Diseño final de antena elemental.</i> .....	43
<i>Ilustración 3.8. Antena elemental de cinta de cobre en HFSS.</i> .....	44
<i>Ilustración 3.9. Antena elemental de grafeno en HFSS.</i> .....	45
<i>Ilustración 3.10. Respuesta del coeficiente de reflexión <math>S_{11}</math> de las antenas elementales.</i> .....	46
<i>Ilustración 3.11. Construcción de antena elemental cobre.</i> .....	47
<i>Ilustración 3.12. Antena elemental sumergida en ácido férrico.</i> .....	47
<i>Ilustración 3.13. Antena elemental de cobre después del proceso del ácido férrico.</i> .....	48
<i>Ilustración 3.14. Antena elemental de cinta de cobre terminada.</i> .....	48
<i>Ilustración 3.15. Antena elemental de cinta de grafeno terminada.</i> .....	49
<i>Ilustración 3.16. Antenas elementales finales.</i> .....	50
<i>Ilustración 3.17. Primer diseño de antena MIMO 2 puertos.</i> .....	51
<i>Ilustración 3.18. Inclusión de barrera a la antena MIMO de 2 puertos.</i> .....	52
<i>Ilustración 3.19. Parámetros de antena MIMO de 2 puertos.</i> .....	52
<i>Ilustración 3.20. Antena MIMO de 2 puertos de grafeno en HFSS.</i> .....	53
<i>Ilustración 3.21. Respuesta del coeficiente de reflexión y transmisión de antena MIMO de 2 puertos.</i> ..	54
<i>Ilustración 3.22. Antena MIMO de 2 puertos final.</i> .....	55
<i>Ilustración 3.23. Primer diseño de antena MIMO 4 puertos.</i> .....	56
<i>Ilustración 3.24. Inclusión de barrera a la antena MIMO de 4 puertos.</i> .....	57
<i>Ilustración 3.25. Parámetros de antena MIMO de 4 puertos.</i> .....	57
<i>Ilustración 3.26. Antena MIMO de 4 puertos de grafeno en HFSS.</i> .....	58
<i>Ilustración 3.27. Antena MIMO de 4 puertos final.</i> .....	59
<i>Ilustración 4.1. Comparación del diseño de la antena elemental de cobre: a) diseñada en HFSS, b) construida</i> .....	60

<i>Ilustración 4.2. Medición del coeficiente de reflexión <b>S11</b> en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.</i>	61
<i>Ilustración 4.3. Comparación del coeficiente de reflexión en <b>S11</b> de la simulación en HFSS y medición en VNA.</i>	62
<i>Ilustración 4.4. Posiciones de antena para diagrama de radiación en 2D. a) <math>\theta = 0^\circ</math> b) <math>\phi = 0^\circ</math></i>	63
<i>Ilustración 4.5. Diagramas de radiación 2D simulados y medidos a 3.5 GHz. a) Plano H, <math>\theta = 0^\circ</math>, b) Plano E <math>\phi = 0^\circ</math>.</i>	64
<i>Ilustración 4.6. Diagramas de radiación 2D simulados y medidos a 5 GHz. a) Plano H, <math>\theta = 0^\circ</math>, b) Plano E <math>\phi = 0^\circ</math>.</i>	65
<i>Ilustración 4.7. Diagramas de radiación en 3D simulados a 3.5 GHz.</i>	66
<i>Ilustración 4.8. Diagramas de radiación en 3D simulados a 5 GHz.</i>	66
<i>Ilustración 4.9. Medición de la ganancia en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.</i>	68
<i>Ilustración 4.10. Comparación del diseño de la antena elemental de grafeno: a) diseñada en HFSS, b) construida.</i>	68
<i>Ilustración 4.11. Medición del coeficiente de reflexión <b>S11</b> en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.</i>	69
<i>Ilustración 4.12. Comparación del coeficiente de reflexión en <b>S11</b> de la simulación en HFSS y medición en VNA.</i>	70
<i>Ilustración 4.13. Posiciones de antena para diagrama de radiación en 2D. a) <math>\theta = 0^\circ</math> b) <math>\phi = 0^\circ</math></i>	71
<i>Ilustración 4.14. Diagramas de radiación 2D simulados y medidos a 3.5 GHz. a) Plano H, <math>\theta = 0^\circ</math>, b) Plano E <math>\phi = 0^\circ</math>.</i>	72
<i>Ilustración 4.15. Diagramas de radiación 2D simulados y medidos a 5 GHz. a) Plano H, <math>\theta = 0^\circ</math>, b) Plano E <math>\phi = 0^\circ</math>.</i>	73
<i>Ilustración 4.16. Diagramas de radiación en 3D simulados a 3.5 GHz.</i>	74
<i>Ilustración 4.17. Diagramas de radiación en 3D simulados a 5 GHz.</i>	74
<i>Ilustración 4.18. Medición de la ganancia en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.</i>	76
<i>Ilustración 4.19. Comparación del diseño de la antena MIMO de 4 puertos: a) diseñada en HFSS, b) construida</i>	76
<i>Ilustración 4.20. Medición de los coeficientes de reflexión en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.</i>	77
<i>Ilustración 4.21. Coeficientes de reflexión de la antena simulada.</i>	79
<i>Ilustración 4.22. Coeficientes de reflexión de la antena construida.</i>	79
<i>Ilustración 4.23. Coeficientes de transmisión simulados de puerto 1.</i>	81
<i>Ilustración 4.24. Coeficientes de transmisión medidos de puerto 1.</i>	81
<i>Ilustración 4.25. Coeficientes de transmisión simulados de puerto 2.</i>	82
<i>Ilustración 4.26. Coeficientes de transmisión medidos de puerto 2.</i>	83
<i>Ilustración 4.27. Coeficientes de transmisión simulados de puerto 3.</i>	84
<i>Ilustración 4.28. Coeficientes de transmisión medidos de puerto 3.</i>	84
<i>Ilustración 4.29. Coeficientes de transmisión simulados de puerto 4.</i>	85
<i>Ilustración 4.30. Coeficientes de transmisión medidos de puerto 4.</i>	86
<i>Ilustración A.1. Analizador vectorial de redes ANRITSU MS4644b. [11]</i>	90
<i>Ilustración A.2. Analizador de señales ANRITSU MS2830A. [11]</i>	91
<i>Ilustración A.3. Analizador de señales ANRITSU MG3692C. [11]</i>	91

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 3-1. Parámetros de la línea. ....</i>	38
<i>Tabla 3-2. Parámetros de diseño final de línea coplanar. ....</i>	40
<i>Tabla 3-3. Parámetros de parche rectangular. ....</i>	42
<i>Tabla 3-4. Parámetros finales de la antena elemental. ....</i>	44
<i>Tabla 3-5. Parámetros de simulación de antena elemental de cita de cobre. ....</i>	45
<i>Tabla 3-6. Parámetros de simulación de antena elemental de grafeno. ....</i>	45
<i>Tabla 3-7. Parámetros de antena MIMO de 2 puertos. ....</i>	53
<i>Tabla 3-8. Parámetros de antena MIMO de 4 puertos. ....</i>	58
<i>Tabla 4-1. Comparación de las frecuencias de resonancia medidas, simuladas y el coeficiente de reflexión. ....</i>	62
<i>Tabla 4-2. Comparación de las ganancias medidas y simuladas en 3.5 GHz y 5 GHz. ....</i>	68
<i>Tabla 4-3. Comparación de las frecuencias de resonancia medidas, simuladas y el coeficiente de reflexión. ....</i>	70
<i>Tabla 4-4. Comparación de las ganancias medidas y simuladas en 3.5 GHz y 5 GHz. ....</i>	76
<i>Tabla 4-5. Comparación de los coeficientes de reflexión en 3.5 GHz y en 5GHz. ....</i>	80
<i>Tabla 4-6. Comparación de los anchos de banda en cada parámetro S. ....</i>	80

## RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se diseñó, caracterizó e implementó una antena MIMO de cuatro puertos en plexiglass como sustrato transparente y grafeno para los elementos radiadores de cada antena, en base al diseño de una antena elemental con un monopolo de parche octagonal de una banda ultra ancha alimentado de una línea coplanar para las frecuencias de WIFI y WIMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G.

Para el diseño de la antena elemental y lograr la migración de esta a la antena MIMO se tomará en cuenta la constante dieléctrica del sustrato transparente (plexiglass)  $\epsilon_r = 2.5$ , la altura  $h = 1 \text{ mm}$  y la conductividad eléctrica del grafeno  $3.5 \times 10^5 \text{ S/m}$ .

El diseño y caracterización tanto de la antena elemental como de la antena MIMO de cuatro puertos se realizó por medio de simulación en el programa HFSS de ANSYS, así obteniendo el coeficiente de reflexión, diagramas de radiación en dos y tres dimensiones y la ganancia para la antena elemental y los coeficientes de reflexión y transmisión y los acoplamientos en cada puerto para la antena MIMO.

Posteriormente se fabricó ambas antenas para su caracterización por medio de la obtención experimental de coeficiente de reflexión, diagramas de radiación en dos dimensiones y la ganancia para la antena elemental y los coeficientes de reflexión y transmisión y los acoplamientos en cada puerto para la antena MIMO y se realizó la comparación de los resultados simulados y los experimentales.

# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

---

La necesidad del humano de estar en constante comunicación y de acceder a la información de manera rápida y segura ha provocado que los sistemas de comunicación evolucionen a una velocidad sorprendente. Esta evolución se debe al desarrollo que ha tenido la electrónica en los últimos años.

Respecto a los sistemas de comunicación, se hace mención especial a las comunicaciones celulares, estas han impactado de manera significativa el día a día de la humanidad. Las comunicaciones celulares han evolucionado desde su primera generación hasta la quinta generación en menos de 3 décadas. La primera generación fue puramente analógica, no tenía seguridad y ningún tipo de codificación. La segunda generación migro a realizar una comunicación de manera digital y se incluía el envío de mensajes de texto. En la tercera generación se logró el acceso a internet a través de la red celular para consultar correo electrónico y páginas web simplificadas. En el caso de la cuarta generación se realiza la transmisión de imágenes de alta calidad, transmisiones en vivo y servicios de streaming. Finalmente, los sistemas de quinta generación se plantean abordar tres aspectos importantes los cuales son: incremento en las velocidades de transmisión, reducción de los retardos en comunicación y tener comunicaciones masivas en áreas reducidas. En relación a estos tres aspectos, las comunicaciones de quinta generación usarían como aliados a los sistemas MIMO (Múltiples entradas y múltiples salidas) [1].



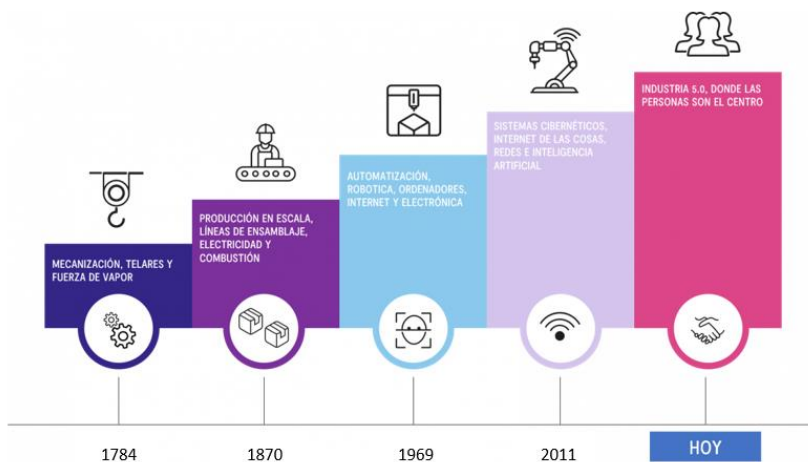
*Ilustración 1.1. Ejemplos de la evolución de las comunicaciones celulares. [29]*

Al igual que se ha dado esta evolución de las comunicaciones celulares también se ha dado la evolución industrial, la cual ha impactado de forma significativa los procesos industriales logrando mejoras a lo largo del tiempo dependiendo totalmente de la aceleración tecnológica y electrónica, dando paso a la reciente llegada de la industria 5.0.

Todo comenzó en 1784 con la industria 1.0 la cual se caracteriza por ser la era de vapor y el carbón, estos eran los materiales principales para la mecanización de la fabricación y para aumentar la productividad. De los principales beneficiados fueron la industria textil y nuevos medios de transporte como barcos y locomotoras de vapor. En 1870 llega la industria 2.0 con grandes descubrimientos y avances transformando los procesos de fabricación al ya incluir la electricidad, el gas y el petróleo, se introdujo las famosas líneas de producción o montaje las cuales redujeron considerablemente el costo y tiempo de producción, al igual que fue la era en donde se creó el motor de combustión. La industria 3.0 tuvo su llegada en 1970, la era de la revolución informática, esta surgió gracias a las grandes innovaciones electrónicas, haciendo posible la automatización de parte de la línea de producción. La fabricación y la automatización avanzaron considerablemente gracias al acceso a Internet, la conectividad y las energías renovables. Llega la industria 4.0 para el año 2011 trayendo consigo cambios significativos como las máquinas inteligentes, sistemas de almacenamiento, instalaciones de producción capaces de intercambiar información de manera autónoma y como si no fuera suficiente, desencadena acciones y se controla entre sí sin intervención humana. Las principales características de esta industria son: sistemas ciberfísicos, Internet de las Cosas (IoT), computación en la nube y la computación cognitiva. [24]

Hasta ahora se ha observado una evolución constante, dando pasos lentos, pero con grandes innovaciones, sin embargo, hoy en día las evoluciones se dan de manera rápida y sorpréndete como es el caso de la llegada de la industria 5.0 después de 10 años de la industria 4.0, citando al Dr. Jesús Muñoz Pacheco “Estos avances tecnológicos están fusionando los mundos físico, digital y biológico en un ecosistema con grandes beneficios potenciales para mejorar la calidad de vida de la sociedad, en donde la electrónica se presenta como un área de investigación fundamental para soportar y unificar el progreso de las tecnologías de la industria 4.0 y 5.0, ya que la electrónica está involucrada en el diseño y desarrollo de circuitos, dispositivos y sistemas electrónicos de última generación.” [1].

El regreso de las manos y las mentes humanas al marco industrial es el objetivo de la Industria 5.0. La interacción entre computadoras, robots y trabajadores humanos finalmente se volverá más significativa y mutuamente esclarecedora a medida que la inteligencia artificial mejora y los robots de las fábricas adquieren capacidades más similares a las humanas. [24]



*Ilustración 1.2. Evolución industrial [24]*

Por otro lado, existen WiFi y WiMAX permite tener comunicación de alta velocidad en hogares y oficinas, la demanda de estas tecnologías requiere que estas mejoren sus prestaciones de manera constante. Una manera de mejorar es con la inclusión de antenas MIMO para tecnologías WiFi y WiMAX [2].

Para desarrollar antenas MIMO, las antenas planas como coplanares o microcinta se utilizan y permiten la integración con diferentes circuitos y sistemas. En las últimas décadas el grafeno se ha utilizado para desarrollar antenas planas en sustratos transparentes, mostrando un mejor desempeño en comparación con antenas que usan películas conductoras, como el óxido de indio [9].

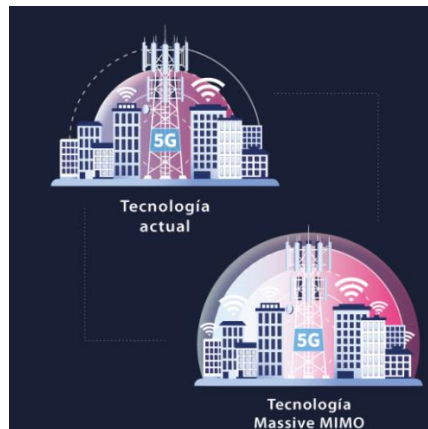
## 1.1 Estado del arte

Las antenas MIMO tienen un gran impacto hoy en día para las nuevas tecnologías celulares y también en las comunicaciones inalámbricas, esto se debe a su gran evolución desde su introducción en la década de 1990. Este tipo de antenas son muy benéficas ya que ofrecen mejorar la capacidad y la calidad de la comunicación inalámbrica.

Estos son algunos desarrollos y tendencias recientes de las antenas MIMO:

### *MIMO masivo*

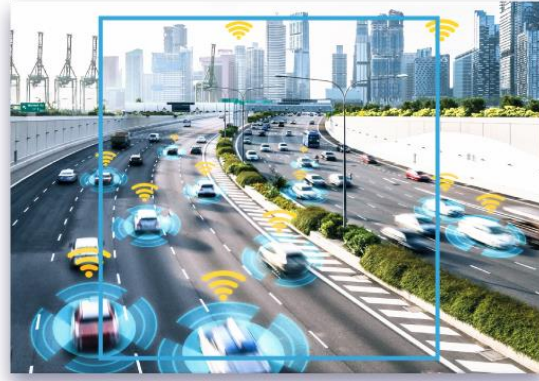
Esta tecnología que es mejor conocida como Massive MIMO es una de las tendencias más importantes de las antenas MIMO, es una tecnología de acceso inalámbrico por debajo de los 6 GHz y es la más atractiva para quinta generación. Esta se basa en el uso de un gran número de antenas tanto en la estación base como en los dispositivos de los usuarios y estas sirven a muchas terminales simultáneamente, en el mismo recurso de tiempo-frecuencia. [26]



*Ilustración 1.3. Tecnología Massive MIMO por la IFT [26]*

### *Beamforming*

Esta es una técnica importante para las antenas MIMO y esta es la conformación de haces y citando al Instituto Federal de Telecomunicaciones “se trata de una técnica inalámbrica clave que utiliza tecnologías de antenas avanzadas tanto en dispositivos móviles como en estaciones base de redes para enfocar una señal inalámbrica en una dirección específica, en lugar de transmitir a una señal amplia.” El beamforming nos ofrece esta gran ventaja lo que permite aplicaciones nuevas que no serían posibles con las generaciones pasadas de las tecnologías celulares. [25]



*Ilustración 1.4. Beamforming por la IFT [25]*

### ***MIMO en múltiples bandas***

Las antenas MIMO se han estado actualizando constantemente y para mejorar las prestaciones tanto para las comunicaciones inalámbricas como para las tecnologías celulares es necesario contar con el uso en múltiples bandas de frecuencia, esto ofrece una mayor eficiencia en la comunicación. Sobre todo, en las tecnologías como la 5G, WiFi y WiMAX que usas una amplia gama de frecuencias.

### ***Nuevos diseños y de bajo perfil***

Sin duda alguna las antenas MIMO han llegado para revolucionar las comunicaciones y dar un vistazo al futuro tecnológico y para grandes ventajas se necesita innovadores diseños como una reducción considerable para estas antenas, así como la integración de novedosos materiales para su construcción, lo que permite su integración en dispositivos móviles, al igual que en aplicaciones de Internet de las cosas (IoT).

### ***Soluciones de antenas para aplicaciones específicas***

El buen funcionamiento y los evidentes beneficios de estas antenas han provocado que se realicen diseños específicos para aplicaciones como vehículos autónomos, sistemas de radar, comunicaciones satelitales, redes de sensores y más. Estos diseños especializados dan como resultado un rendimiento óptimo en entornos específicos.

## 1.2 Justificación

Los sistemas MIMOS de antenas, utilizan múltiples antenas como transmisores y múltiples antenas como receptores. Al permitir que los datos viajen por múltiples rutas de señal al mismo tiempo, las múltiples antenas en cada extremo de los sistemas de comunicaciones se combinan para reducir los errores, optimizar la velocidad de los datos y mejorar la capacidad de transmisiones. La creación de múltiples versiones de la misma señal aumenta las posibilidades de que los datos lleguen a la antena receptora sin que el desvanecimiento los afecte. Para lograr esto, la inclusión de antenas MIMO en los sistemas de comunicaciones se fundamenta en los siguientes aspectos:

1. Diversidad espacial [3].
2. Multiplexación espacial. Se utiliza para aumentar la capacidad de envío de datos. Para ello emplea los diferentes caminos que recorre la señal desde cada antena [3].

El primero se emplea para optimizar la relación entre la señal y el ruido y se caracteriza por mejorar la fiabilidad del sistema. Por su parte la multiplexación espacial se utiliza para aumentar la capacidad de envío de datos. Para ello emplea los diferentes caminos que recorre la señal desde cada antena. Estos dos aspectos permiten mejorar el desempeño de los sistemas de comunicación y potenciaran la implementación de las redes de quinta generación.

La integración de las antenas es importante, en la actualidad existen diversos diseños de antenas MIMO planas de microcinta o coplanares [4] y [5]. Estos diseños van desde tener antenas de dos elementos o 4 elementos que incrementan la diversidad y multiplexación espacial. Por otro lado, en la actualidad se desarrollan antenas planas en substratos transparentes para integrarlas en aplicaciones para ciudades inteligentes y comunicaciones vehiculares. En ese mismo sentido, también se desarrollan películas conductoras transparentes para los elementos del radiador de las antenas, como el óxido de indio [6] o el óxido de zinc [7] y [8], pero estas presentan bajas ganancias. Una opción que mejora la ganancia de las antenas en substratos transparentes es la inclusión del grafeno para la implementación de los elementos radiadores de las antenas [9].

Por tal razón en esta tesis se propone el diseño e implementación de una antena MIMO de 4 puertos coplanar con grafeno para aplicaciones de WIFI, WiMAX y 5G.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 *Objetivo general*

Implementar una antena MIMO con grafeno de 4 puertos en plexiglass como sustrato transparente para las frecuencias de WIFI y WIMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G.

### 1.3.2 *Objetivo específico*

- Diseñar un monopolo octagonal de banda ultra ancha, alimentado con una línea coplanar, con grafeno en plexiglass como elemento fundamental de la antena MIMO, para las frecuencias de WIFI y WIMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G.
- Caracterizar mediante simulaciones la antena elemental mediante la obtención de su coeficiente de reflexión, diagrama de radiación en dos y tres dimensiones y su ganancia.
- Fabricar y caracterizar la antena elemental mediante la obtención experimental de su coeficiente de reflexión, diagrama de radiación en dos dimensiones y su ganancia.
- Simular una antena MIMO de cuatro puertos, usando la antena elemental para su diseño.
- Obtener de la simulación, los coeficientes de reflexión y transmisión.
- Fabricar y caracterizar la antena MIMO mediante la obtención experimental de su coeficiente de reflexión y los acoplamientos en cada puerto.

## 1.4 Metodología

Este trabajo se inicia con una búsqueda bibliográfica del estado del arte de las antenas MIMO se continuará una investigación sobre las antenas coplanares, su funcionamiento, los usos en la vida cotidiana y sobre todo sus características ya que serán clave para el diseño de la antena elemental acto seguido se diseñará el monopolo hexagonal, como el reportado en [10], con forme a lo que se encontrará en las indagaciones correspondientes, para este acto es importante tomar en cuenta las especificaciones que tiene nuestro substrato transparente (Plexiglass) y las del grafeno.

La caracterización de la antena elemental mediante simulaciones con el programa HFSS y así obtiene su coeficiente de reflexión, diagrama de radiación en dos y tres dimensiones y su ganancia. Una vez que se llegue al diseño final tomado en cuenta las frecuencias de WIFI y WiMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G se fabricará y caracterizará mediante la obtención experimental de su coeficiente de reflexión usando un analizador vectorial de redes (VNA), diagrama de radiación y su ganancia, lo obtenido se compara con los resultados de las simulaciones en HFSS. La caracterización experimental se realiza en el laboratorio de caracterización de sistemas basados en microondas de la FCE-BUAP.

Una vez que se terminada la antena fundamental se continua con la caracterización de la antena MIMO de cuatro puertos, usando la antena elemental para su diseño y se obtendrá los coeficientes de reflexión y transmisión tomado en cuenta las frecuencias de WIFI y WIMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G. Obteniendo el diseño final se fabricará y caracterizará mediante la obtención experimental de su coeficiente de reflexión de cada elemento y sus respectivos acoplamientos.

## 1.5 Organización

La organización de la presente tesis se divide por 5 capítulos los cuales a continuación se describirán brevemente:

**Capítulo 1:** Comienza con una introducción de los sistemas de comunicación, las comunicaciones celulares y la evolución de sus generaciones. Al igual se mencionan la tecnología de WiFi y WiMAX. En la justificación se mencionan las antenas MIMO, sus tipos de diseño y sus características importantes. Se continua con los objetivos, estableciendo el objetivo general y los objetivos específicos. Por último, se hace la descripción de la metodología a seguir para cumplir con los objetivos mencionados.

**Capítulo 2:** Se da la información necesaria para comprender mejor los objetivos, la metodología y los resultados que se presentarán en capítulos posteriores. Se abordan los temas de la tecnología celular de quinta generación, tecnología WiFi, tecnología WiMAX, antenas, antenas MIMO, teoría de antenas y e hablará un poco de las propiedades del grafeno.

**Capítulo 3:** Se realiza el diseño en base a la teoría de cada una de las antenas que se mencionarán, igualmente se lleva acabo las simulaciones en el programa ANSYS con la herramienta HFSS y se mostrarán algunos resultados necesarios para la demostración que el objetivo con el que se diseña fue cumplido. Por último, se escribe la construcción de las antenas.

**Capítulo 4:** En este capítulo de realiza el análisis cualitativo de las caracterizaciones y mediciones que se le hicieron a todas y cada una de las antenas que se han descrito en el capítulo 3. Aquí se hablará de parámetros como coeficientes de reflexión, coeficientes de transmisión, diagramas de radiación, ganancias, acoplamientos y anchos de banda.

**Capítulo 5:** Se presentan las conclusiones en base a los resultados presentados en el capítulo 4.

# CAPITULO 2. TECNOLOGÍAS WiFi Y WiMAX, 5G Y TEORÍA DE ANTENAS

---

## **Introducción**

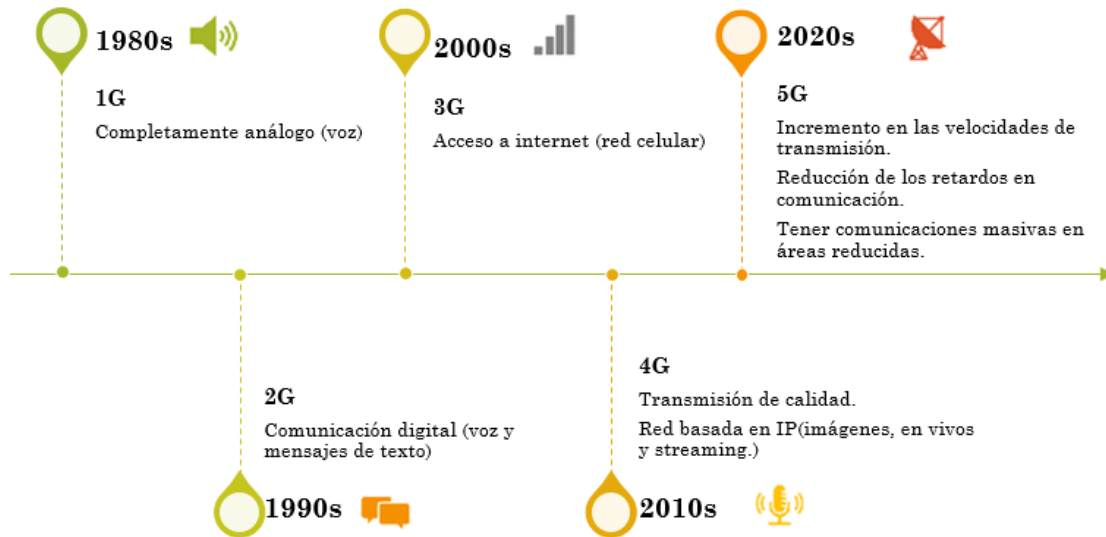
En este capítulo se abordan los temas fundamentales para el diseño, caracterización e implementación de la antena tipo MIMO de 4 puertos con las características específicas que se menciona en el capítulo 1 en el apartado de objetivos. Igualmente se incluyen los principales aspectos teóricos sobre las tecnologías como WiFi, WiMAX y la tecnología celular de quinta generación, las cuales marcarán las frecuencias a trabajar para este trabajo de tesis.

Por otro lado, se muestran las definiciones que resultan primordiales para el análisis cualitativo tanto del diseño de la antena MIMO como la evaluación de los parámetros de los resultados obtenidos en la parte de simulación y la obtención experimental.

## **2.1 Tecnología celular de quinta generación**

Es difícil imaginar nuestra actualidad sin los servicios de comunicación que se tienen y mucho menos sin las prestaciones que han ido evolucionando a lo largo de 3 décadas desde que llegó la comunicación completamente análoga, hoy se tiene acceso inmediato a la información. Demasiados procesos civiles e industriales se aceleran y se optimizan por el uso de los sistemas de comunicaciones. Vivimos en una época donde es imprescindible la conectividad: nuestras cuentas bancarias, el entretenimiento, nuestra vida social, la salud, por mencionar algunos aspectos cotidianos, están ligados a un dispositivo de comunicaciones electrónicas. [1]

Gracias al desarrollo y evolución que ha tenido la electrónica en estas últimas décadas ha propiciado la rápida evolución de los sistemas de comunicación logrando pasar de la primera generación (1G) a la quinta generación (5G) en poco menos de tres décadas como se muestra en la ilustración 2.1.



*Ilustración 2.1. Evolución de los sistemas de comunicaciones celulares.*

Los sistemas de 5G también son definidos como AAAA (por sus siglas en inglés, Anytime, Anywhere, Anyone, Anything) que se podría traducir como: tener comunicación en cualquier momento, donde sea, con cualquier persona y con cualquier cosa. Al permitir comunicaciones masivas se plantea que 5g sea un pilar para la implementación de sistemas que empleen el internet de las cosas (IoT), usando redes inalámbricas de sensores para la recolección de datos y su procesamiento para toma de decisiones por medio de inteligencia artificial o aprendizaje de máquina. [1]

La 5G se basa en las redes LTE existentes utilizando las frecuencias de 700 MHz y 3,5 GHz. Las bandas actuales serán migradas gradualmente a 5G y las bandas "milimétricas", 26 y 28 GHz, serán utilizadas para completar los despliegues. [27]

Además, las antenas massive MIMO reducen la cantidad de energía transmitida en otras direcciones, que permite dirigir esta potencia únicamente a la dirección requerida, lo que significa niveles de exposición más bajos que los de las tecnologías actuales (2G, 3G y 4G). [27]

Dichas antenas, utilizan los mismos recursos para enviar y recibir más datos simultáneamente a más usuarios. Las antenas convencionales pueden funcionar con estas antenas inteligentes. [27]

## 2.2 Tecnología WiFi

WiFi, abreviatura de “Wireless Fidelity”, es una tecnología que permite la transmisión de datos y la conexión a Internet a través de ondas de radio. Transmite información a través de radiofrecuencias entre dispositivos, como computadoras, teléfonos móviles, tabletas y otros dispositivos electrónicos, y un punto de acceso inalámbrico, como un enrutador. [22]

En 1997, los usuarios finales tuvieron acceso comercial al WiFi gracias a la creación del Comité 802.11. Posteriormente, se adoptó la estandarización IEEE 802.11, que se refiere a la estandarización de comunicación para redes de área local inalámbricas (WLAN). [ 22]

En 2009 se presenta el estándar 802.11n, que es más fiable y rápido que su antecesor. Los datos MIMO, que utilizan varias antenas para mejorar las comunicaciones entre transmisor y receptor, son responsables de este aumento en la efectividad. De esta manera, se logró un incremento significativo en los datos sin requerir un mayor ancho de banda ni energía de transmisión. [22]

El rango de 2.4 GHz se amplió debido a este último estándar, lo que provocó que más dispositivos se conectaran en la misma banda. Esto causó congestión, un problema grave en la transmisión de datos, lo que llevó a la elección de la banda de 5 GHz. Los fabricantes de equipos WIFI desarrollaron enrutadores de doble banda que podían conectarse a 2.4 GHz y 5 GHz al mismo tiempo. [22] En la ilustración 2.2 se muestran unos ejemplos de cada frecuencia.

Esta tecnología cuenta con una cobertura de hasta 300 metros y una velocidad de datos 11-54 Mbps.



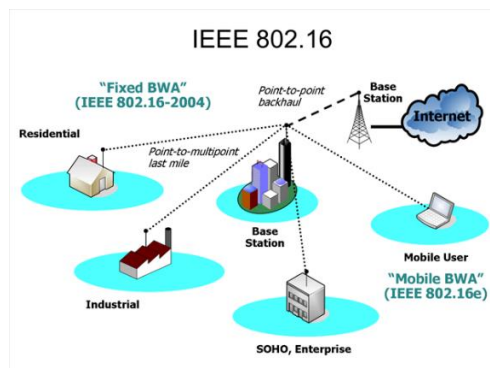
*Ilustración 2.2. Frecuencias de la tecnología WiFi. [30]*

## 2.3 Tecnología WiMAX

La tecnología WiMAX por sus siglas en inglés (Interoperability for Microwave Access), su traducción Interoperabilidad Mundial para el acceso por Microondas es el nombre de la red de banda ancha inalámbrica de cobertura metropolitana (WMAN) que se basa en el estándar IEEE 802.16 que está destinado a proporcionar un gran ancho de banda de manera inalámbrica. Además, retoma las funciones y ventajas que ofrecen las redes inalámbricas, como la movilidad y la posibilidad de conectarse a la red sin un cableado. Sin embargo, también trae consigo requisitos como la transferencia de llamadas o servicio handoff, la seguridad y las pérdidas de información generadas por el propio medio de transmisión. [21] En la ilustración 2.3 se muestra cómo es que opera esta tecnología en un escenario hipotético como lo puede ser una ciudad la cual contiene hogares, industrias y oficinas las cuales requieren la prestación de una red inalámbrica para sus dispositivos.

Para brindar servicios de banda ancha inalámbricos, la disponibilidad del espectro de frecuencias es fundamental. El despliegue de la tecnología WiMAX puede ocurrir en una variedad de bandas de frecuencia, ya que opera tanto en las bandas de frecuencia como en las bandas de frecuencia que dependen del país para obtener licencias de uso del espectro radioeléctrico. Las bandas libres de esta tecnología son 2.3GHz, 2.5GHz, 3.5GHz y 5.8GHz. [21]

WiMAX cuenta con una cobertura de hasta 70 kilómetros y una velocidad de datos de hasta 124 Mbps, estas son las más notorias diferencias a comparación con la tecnología WiFi.



*Ilustración 2.3. Tecnología WiMAX. [31]*

## 2.4 Antenas

Para la definición de **antena** se consulta al Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) la cual tiene el estándar IEEE 145-2013 que afirma que una antena es definida como un elemento de un sistema de transmisión o recepción, que se encarga de radiar y recibir ondas electromagnéticas. [4]

Las antenas son dispositivos que permiten la transición entre ondas guiadas y espacio libre. En el primer caso, las ondas están limitadas entre los extremos de una línea de transmisión, mientras que, en el espacio libre, las ondas son irradiadas sin límites. Debido a que las guías de onda están diseñadas para que no produzcan pérdidas por radiación, las antenas están diseñadas para producir la mayor cantidad de energía posible. Por lo tanto, las antenas son dispositivos diferentes. [4]

En el caso de la antena transmisora, dependerá de la cantidad de energía que le brinde su generador; a mayor cantidad de energía, mejor será la cobertura que brinda. En el caso de la antena receptora, la sensibilidad del receptor determina la cantidad de señal que recibirá; a mayor sensibilidad, menor señal a recibir, esto se observa en la ilustración 2.4. [15]

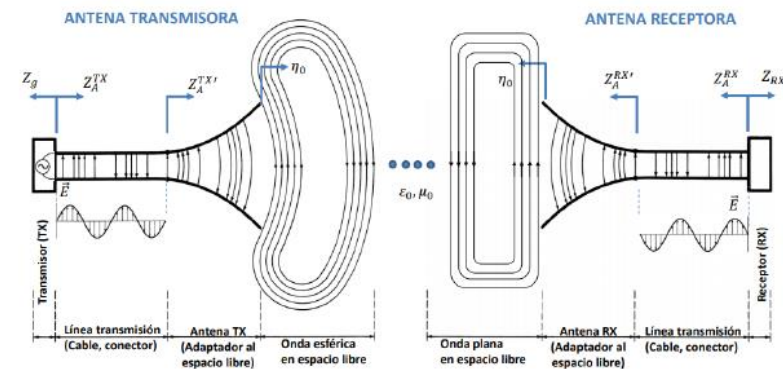


Ilustración 2.4. Relación entre antena transmisora y receptora. [15]

Existen diferentes tipos de antenas que ofrecen diversas prestaciones, así como poseen diferente diseños, parámetros, aplicaciones, ventajas y desventajas. Para fines de este trabajo se mencionarán las principales que se utilizaron para el diseño, caracterización y construcción de la antena de esta tesis.

### ***2.4.1 Antenas de microcinta***

Estas son un tipo específico de antenas que se caracterizan por su diseño y construcción utilizando tecnología de microcinta. Se utilizan en dispositivos como antena de parche, antenas de ranura y otras más. La popularidad de estas antenas comenzó en los años 70's y en la actualidad siguen siendo una gran alternativa. [11]

La construcción de las antenas de microcinta en un parche metálico suspendida sobre un sustrato dieléctrico que a su vez está sobre un plano de tierra conductor.

El diseño del parche como su dimensión, su forma la separación con el plano de tierra, afectan las propiedades de la antena como la frecuencia de resonancia y la polarización. La fabricación se lleva a cabo utilizando la técnica de fotograbado sobre un sustrato dieléctrico laminado en cobre por ambas superficies. Como tecnología plana, reduce su tamaño y peso y facilita su integración con el resto de los sistemas. [11]

Las antenas de microcinta son altamente usadas en aplicaciones de comunicación de corta y media distancia, unos ejemplos, en dispositivos de comunicación inalámbrica, sistemas de rastreo y sensores remotos.

### 2.4.2 Antena de Parche

Es un componente de impresión en un substrato dieléctrico que puede ser de un tipo específico de conductor, tiene la capacidad de radiar y recibir ondas electromagnéticas a una determinada anchura y longitud elemental y adapta la salida del transmisor o la entrada del receptor. [15] En la ilustración 2.5 se muestra un ejemplo de las antenas de parche.

Este tipo de antena tiene una popularidad dentro de las aplicaciones de comunicación inalámbrica, un ejemplo de esto podría ser los routers WiFi, sistemas de seguimiento por satélite y tarjetas de res inalámbrica. Estas antenas son altamente direccionales, en otras palabras, concentran su radiación en una dirección específica así mejorando la eficiencia de la comunicación.

La mayoría de estas máquinas son resonantes y funcionan en una banda de frecuencias estrecha, por lo que deben estar adaptadas para que no tengan problemas. En otras palabras, si el transmisor funciona a una frecuencia específica y transmite la señal a la antena, si la antena no está adaptada a esa frecuencia, pueden surgir problemas de radiación, degradación de la señal y una baja eficiencia de la antena. [15]

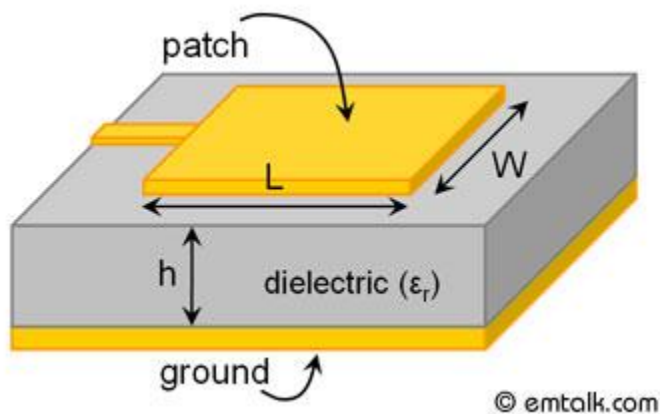


Ilustración 2.5. Antena de parche y sus componentes. [32]

### **2.4.3 Antenas coplanares**

Las antenas coplanares son un tipo de antena la cual se caracteriza por que los elementos radiantes se encuentran en el mismo plano del sustrato, es decir, se encuentran la línea de transmisión, el parche conductor y las tierras se sitúan en el mismo plano.

Este tipo de antenas tienen diferentes tipos, como antenas de parche coplanares, antenas de monopolo coplanar y antenas de ranura coplanar, entre otras. Cada uno de estos diseños contienen ventajas y desventajas, y depende de las especificaciones requeridas para la aplicación es como se puede acoplar cada uno de estos tipos.

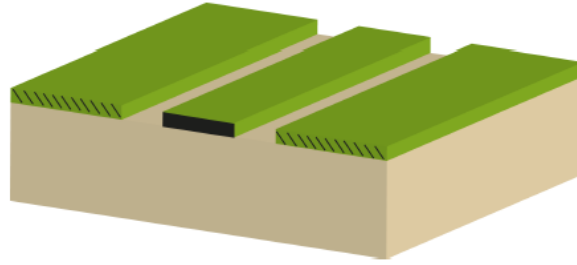
La antena coplanar tiene muchos beneficios sobre las antenas microstrip. Estas cuentan con un mayor ancho de banda, una menor dispersión y una menor pérdida de radiación que las microstrip. Además, facilita la construcción de prototipos y las conexiones de elementos activos y pasivos en serie y paralelo. Igualmente, facilita la inclusión de cambios en el diseño original. Revisando los estudios y desarrollos que se han realizado sobre las antenas CPW, se ve la amplitud de posibilidades que ofrece el diseño de este tipo de antenas, ya que hay una gran cantidad de prototipos con una variedad de geometrías. [12]

Debido a sus características, este tipo de antenas se utiliza principalmente en redes inalámbricas, especialmente en sistemas WI-FI y WIMAX. [12]

#### **2.4.3.1 Línea coplanar**

Este tipo de línea de transmisión la característica principal es que los planos de tierra están a ambos lados de la línea de transmisión como se observa en la ilustración 2.6 en lugar de estar en la parte inferior como ocurre en el caso de la línea microcinta.

La amplitud de la línea de transmisión conductora, la amplitud de las ranuras entre el conductor y los planos de tierra, el grosor del material conductor y el sustrato y la conductividad del material conductor son los factores que determinan el diseño de esta línea y su comportamiento electromagnético.



*Ilustración 2.6. Estructura de una línea coplanar [12]*

#### **2.4.3.2 Planos de Tierra**

Como ya se ha planteado anteriormente, los planos de tierra son un componente determinante para el diseño de las antenas coplanares, estos pueden llegar a afectar o a mejorar su rendimiento, por lo que la elección del tipo de geometría de estos planos tomando en cuenta la aplicación específica o principal para lo que ha sido diseñada la antena.

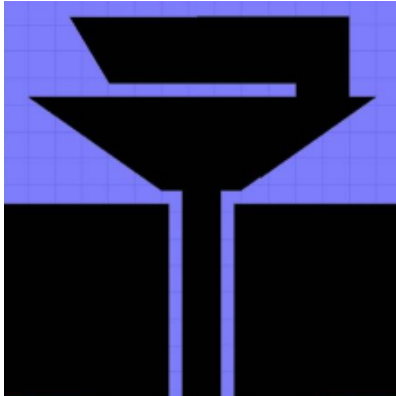
Para este trabajo se tomaron en cuenta algunos tipos de planos de tierra tomando en cuenta la frecuencia de operación, el tamaño del sustrato elegido y los requisitos especificados en los objetivos del capítulo 1.

Se comienza con definir la característica principal y más común de los planos de tierra de las antenas coplanares que es:

**Plano de tierra conductor continuo:** Este es un plano que se coloca en el mismo plano que el sustrato de la antena y proporciona una referencia de retorno para la corriente de la antena.

Entrando más en materia de las geometrías se hablarán de dos específicamente que son:

**Geometría rectangular o cuadrada:** Este tipo de geometría es una de las más utilizadas para el diseño de las antenas coplanares, esto se debe a su simplicidad y facilidad de fabricación, a la facilidad que tiene para integrarse con diferentes diseños de parches de antenas, por su buen rendimiento de ancho de banda, su control de la polarización y la versatilidad en cuestión de su adaptación a diversas frecuencias por lo que se encuentran mucho en los sistemas de comunicación, sistemas de radiofrecuencia y en comunicación inalámbrica. Un ejemplo de esta geometría en una antena se observa en la ilustración 2.8

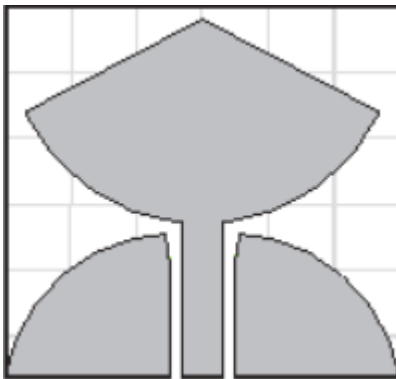


*Ilustración 2.7 Ejemplo de antena coplanar con planos de tierra rectangulares [9]*

### **Geometría circular o semicircular:**

Este tipo de geometría para los planos de tierra no son tan comunes como las rectangulares que sin duda tiene buenos beneficios pero si se requiere mejorar estas prestaciones y se tiene aplicaciones específicas, el mejor aliado sin duda será la geometría circular o semicircular ofreciendo una reducción de pérdidas dieléctricas y de radiación asociadas a las esquinas y bordes de otra geometrías, características de radiación simétricas arrojando un patrón de radiación más uniforme, reducción de dimensiones de la antena, mejora en el ancho de banda y una estética y diseño diferentes.

Esta geometría es mayormente utilizada para las aplicaciones de comunicaciones inalámbricas, comunicación satelital y aplicaciones de microondas. [16] Un ejemplo de esta geometría en una antena se observa en la ilustración 2.8



*Ilustración 2.8. Ejemplo de planos de tierra semicirculares [16]*

## 2.5 Antenas MIMO

Las antenas MIMO por sus siglas en inglés (Multiple Input, Multiple Output) son un conjunto de elementos radiantes que forman una única antena con múltiples entradas y múltiples salidas. Cada elemento radiante tiene su propia señal de propagación, y todas las señales de propagación viajan juntas por un único canal a la misma frecuencia. Esto hace que la transmisión de información sea altamente efectiva y con poca degradación de la transmisión o, cuando se encuentran problemas. [15]

Algunas de las características de las antenas MIMO son:

- **Diversidad espacial**

El objetivo de la diversidad espacial es la reducción de la atenuación y el desvanecimiento selectivo del canal, esta es una técnica que utiliza múltiples antenas en el transmisor o en el receptor que aprovecha las rutas de propagación entre ellos. Esto beneficia para la fiabilidad de la comunicación. [3]

- **Multiplexación espacial**

El objetivo de la multiplexación espacial es aumentar la capacidad del sistema al transmitir múltiples corrientes de datos de forma simultánea por diferentes antenas. La multiplexación implica el uso simultáneo de las múltiples antenas que transmiten múltiples caminos de datos independientes en la misma frecuencia. [3]

La tecnología MIMO es muy popular en las redes inalámbricas debido a sus grandes ventajas. Es fácil de implementar y no cuesta mucho, tiene una gran diversidad en el espacio gracias a sus diferentes caminos de propagación, se transmite velozmente y multiplica su capacidad y no requiere mucha potencia. [15]

Estas antenas se utilizan tanto en transmisión como en recepción, pero en recepción se utiliza una técnica conocida como selección, que se basa en elegir el elemento con la mejor relación señal-ruido. Cuando la señal toca un elemento radiante, cambiará a otro elemento si no supera su umbral. Esto se conoce como conmutación. La combinación es el último método de recepción. Recoge todas las señales y las clasifica en diferentes categorías, como si tenían mayor ganancia o potencia, por ejemplo. [15]

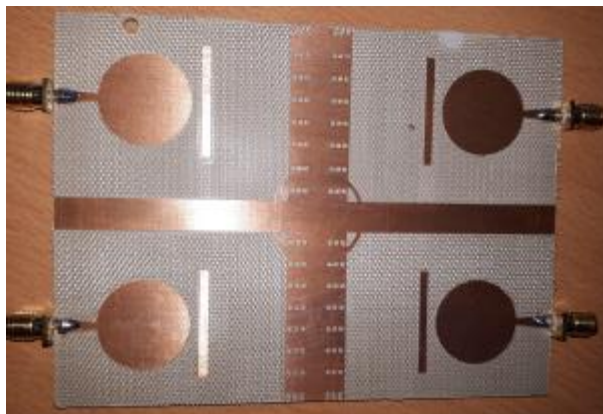
Las antenas MIMO pueden tener varios puertos, hay de 2, 4, 6 hasta de 8 puertos, cada puerto en estas antenas es representante de una entrada o una salida, el número de puertos afecta en varios aspectos que ya se han definido de estas antenas, así logrando mayores beneficios en aplicaciones como las comunicaciones celulares (5G) y en comunicaciones inalámbricas como WiFi y WiMAX.

Algunos aspectos que se ven afectados por el número de puertos son:

**Diversidad espacial:** El aumento de puertos en las antenas MIMO afectan la diversidad, logrando la equivalencia de entre mayor número de puertos, mayor diversidad, esto al proporcionar más caminos de señales y se ve reflejado con mayor robustez con la reducción de la probabilidad de pérdida debido a desvanecimientos, mayor optimización en la relación señal – ruido y mejorando la fiabilidad del sistema.

**Multiplexación espacial:** En la multiplexación aplica igual que en la diversidad, entre mayor número de puertos, mayor multiplexación, esto por aumentar la capacidad de envío de datos al tener más caminos que recorre la señal, lo que se traduce en un mejor desempeño.

También se beneficia en la reducción de interferencia entre puertos y en el aumento de ancho de banda. En la ilustración 2.9 se muestra un ejemplo de una antena MIMO de 4 puertos.



*Ilustración 2.9. Ejemplo de sistema MIMO de antenas. [15]*

## 2.6 Teoría de antenas

Sin duda, la parte más importante de este trabajo es el diseño y caracterización de la antena ya que nos definirá el funcionamiento del sistema completo y la forma de analizar su comportamiento y funcionamiento es por medio de unos parámetros fundamentales que toda antena tiene y se analizan de forma cualitativa.

### 2.6.1 Coeficiente de reflexión

Los parámetros S, describen las entradas y salidas de los circuitos en términos de potencia, representan el coeficiente de reflexión, ya que son una medida de la potencia transmitida y reflejada por un componente del circuito con una impedancia específica. Los parámetros S son cantidades complejas que suelen ser expresadas como magnitudes y fases. [4]

El coeficiente de reflexión  $S_{11}$  se utiliza para determinar el valor de una antena con un solo puerto. Idealmente, este coeficiente toma un valor de 1 cuando toda la potencia de la señal del puerto es reflejada hacia el mismo puerto y un valor de 0 cuando toda la potencia de la señal es transmitida. El valor del coeficiente de reflexión se maneja en escala logarítmica, en particular en decibeles, utilizando la potencia del puerto como referencia. Cuando toda la potencia es reflejada, el valor de  $S_{11}$  es de 0 dB, en el caso contrario, que toda la potencia es transmitida  $S_{11}$  toma un valor negativo y grande en magnitud. [4]

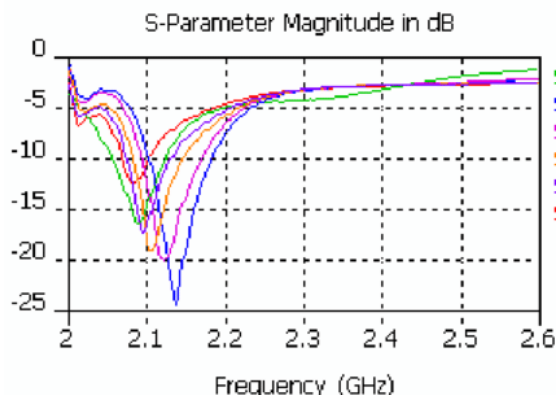
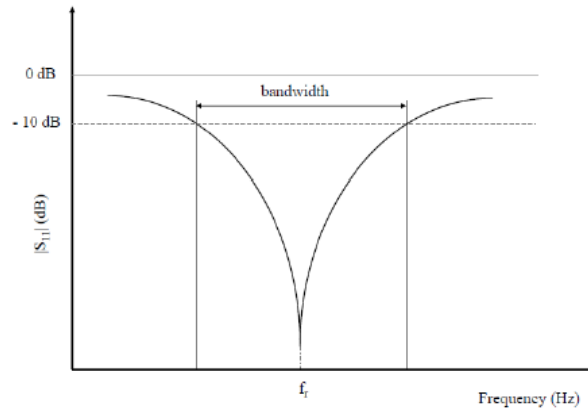


Ilustración 2.10. Ejemplo de coeficientes de reflexión. [33]

### 2.6.2 Ancho de banda

La frecuencia central del ancho de banda, que normalmente se conoce como la frecuencia de resonancia de una antena, se encuentra dentro de este conjunto de frecuencias. La norma específica determina el ajuste de esta frecuencia central. En las antenas de banda ancha, se refiere a la proporción de frecuencias superiores e inferiores que son aceptables para el funcionamiento. Dicho de otro modo, el ancho de banda es el rango de frecuencias en el que una antena funciona. [11]



*Ilustración 2.11. Ejemplo de ancho de banda. [11]*

### **2.6.3 Diagrama de radiación**

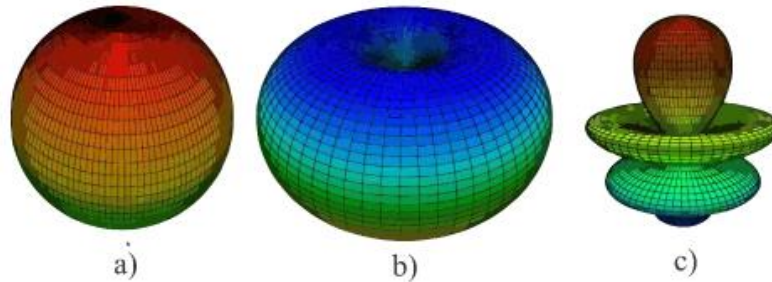
Usando un sistema de coordenadas esféricas, un diagrama de radiación muestra las propiedades de radiación de una antena en función de las diferentes direcciones del espacio a una distancia determinada. [11]

La antena debe estar en el origen y la distancia entre ella y el receptor no debe variar, siempre constante. El campo eléctrico se utiliza en función de las variables angulares:  $\theta$  y  $\phi$ . Para atribuir la dirección del espacio,  $\theta$  representa el ángulo de elevación y  $\phi$  el ángulo de Azimut. El sistema de coordenadas define los vectores unitarios  $\hat{r}$ ,  $\hat{\theta}$  y  $\hat{\phi}$ , son definidos por el sistema de coordenadas y se ven afectados por las variables angulares. Esto proporciona un esquema tridimensional sobre la dimensión de la antena a la que se dirige. [11]

Los diagramas de radiación las antenas tienen ciertas especificaciones que se consideran:

- **Isotrópica:** Los radiadores isotrópicos son antenas "sin pérdidas" o ideales que radian con la misma intensidad en todas las direcciones.
- **Omnidireccional:** El objetivo es irradiar o recibir radiación en la mayor cantidad posible de direcciones. Si es capaz de irradiar en todas las direcciones de un plano con una distribución relativamente uniforme, se considera una antena con estas características; obteniéndose una escasa radiación en el eje sobrante debido a las limitaciones físicas de las antenas.

- **Direccional:** Un radiador direccional concentra la energía en una dirección y transmite o recibe ondas electromagnéticas con mayor eficiencia en áreas específicas que en otras.



*Ilustración 2.12. Diagrama de radiación a) isotrópico, b) omnidireccional y c) direccional [11]*

#### 2.6.4 Ganancia

La ganancia se define como la relación de la directividad de la densidad de potencia radiada y la densidad de la potencia radiada en una antena isotrópica, con una similitud en distancias y potencias entregadas a la antena. [11] Su ecuación es la siguiente:

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{W_e}{4\pi r^2}} \quad (2.1)$$

La siguiente ecuación, se utiliza en caso de que no se especifique la dirección angular, siendo la ganancia la máxima radiación [11]:

$$G = \frac{P_{max}}{\frac{W_e}{4\pi r^2}} \quad (2.2)$$

La potencia de entrada es la potencia radiada. Si la antena tiene una eficiencia del 100%, la potencia de entrada sería igual a la potencia radiada. Sin embargo, se debe tener en cuenta que una pequeña parte de esa potencia se absorberá debido a las pérdidas del conductor y del dieléctrico. Por ser adimensional, la ganancia se expresa en decibeles relativos a la isotrópica (dBi) y su relación con la eficiencia de la antena, obsérvese la ecuación 2.3 [11]:

$$P_{rad} = \eta \cdot P_{ent} \quad (2.3)$$

### ***2.6.5 Coeficiente de transmisión entre puertos***

Para asegurarse de que las señales se propaguen correctamente en sistemas MIMO, especialmente aquellos cuyos puertos utilizan bandas de frecuencia contiguas, las antenas del sistema multipuerto operan de manera independiente. Esto significa que una antena contigua no es un medio para captar energía de otra antena del sistema. [4]

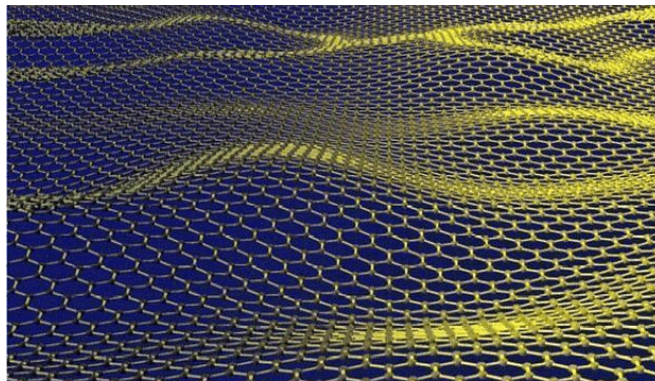
Hay una diversidad de variables que evalúan esta interacción. La primera se refiere a los coeficientes de transmisión y reflexión que se encuentran en una red de  $N$  puertos, que se identifican mediante los parámetros  $S$ . En una antena MIMO con dos elementos de radiación,  $i$  y  $j$ , los parámetros  $S_{ii}$  y  $S_{jj}$  denotan los coeficientes de reflexión de sus respectivos elementos, mientras que los parámetros  $S_{ij}$  y  $S_{ji}$  denotan los coeficientes de transmisión entre los puertos, que representan la energía transmitida al puerto  $i$  del puerto  $j$  y la energía transmitida hacia el puerto  $j$  proveniente del puerto  $i$ , respectivamente. Los valores de transmisión de energía entre puertos deben ser del 1% de la energía, equivalentes a  $-20$  dB. [4]

## 2.7 Grafeno

El grafeno fue separado por cinta adhesiva del carbono por primera vez en 2004, lo que lo convierte en uno de los materiales relativamente nuevos. A pesar de ser un material bidimensional, este material tiene una alta resistencia mecánica. El grafeno se utiliza actualmente en una variedad de estudios, incluidos dispositivos nanoelectrónicos, compuestos, almacenamiento de energía, microondas y líneas de transmisión. La estructura atómica del grafeno y/o su dopado en compuestos mejoran las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas. [9]

El grafeno tiene muchas propiedades, pero las más notables son su alta conductividad, elasticidad, dureza, ligereza y resistencia. algunas características que podrían ser muy útiles para innovar en varios sectores y representar una verdadera revolución. [23]

Las características del grafeno tienen el potencial de cambiar por completo el campo de la electrónica. Este material permitiría crear dispositivos más pequeños, ligeros, duraderos y eficientes que no se obtienen con los componentes actuales. El grafeno en los circuitos electrónicos también los haría "inmunes" a la humedad, una de las principales causas de deterioro. Además, la conductividad térmica y eléctrica superior del cobre es mil veces superior. [23]



*Ilustración 2.13. Representación esquemática de una lámina de grafeno.[34]*

## CAPITULO 3. ANTENA MIMO DE 4 PUERTOS

---

### Introducción

En este capítulo se realizará el estudio y los análisis paramétrico para la construcción de la antena MIMO de 4 puertos, este diseño se realizará en 3 fases partiendo con la primera fase que será el diseño y construcción principal la cual se le llamará “antena elemental”, se continuará con la segunda fase que será el diseño y construcción de la migración de esta antena elemental a una antena MIMO de 2 puertos y se analizará sus coeficientes de transmisión entre los puertos (acoplamientos) para después dar paso al diseño y construcción de el objetivo principal, la antena MIMO de 4 puertos.

Para la realización de estas tres fases se debe de tener presente todas y cada uno de los parámetros que influyen para el diseño de las tres fases, como lo son las frecuencias deseadas, la constante dieléctrica del substrato transparente (plexiglass), el espesor y la conductividad eléctrica del grafeno.

Cabe resaltar, que para el diseño de las tres fases mencionadas se ejecutarán en el programa ANSYS, con la herramienta HFSS que es un software de simulación electromagnética 3D multifuncional full-wave para diseñar y simular productos electrónicos de alta frecuencia, tales como antenas, componentes de radiofrecuencia, interferencias electromagnéticas, conectores, ICs y PCBs.

### 3.1 Fase 1: Antena elemental

En la parte de introducción se hizo mención de esta primera fase que se le nombró “*antena elemental*”, el diseño de esta antena consiste en un monopolo octagonal de banda ultra ancha, alimentado con una línea coplanar, con el material de plexiglass como substrato transparente que tiene una constante dieléctrica de  $\epsilon_r = 2.5$  y una altura de  $h = 1 \text{ mm}$  y como elemento conductor se realizará una prueba con cinta de cobre y posteriormente con el material principal el grafeno con una conductividad eléctrica  $3.5 \times 10^5 \text{ S/m}$ .

Como ya ha sido mencionado en el capítulo 1, el objetivo es para las frecuencias de WIFI y WIMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G.

## 3.2 Diseño

Se comienza con el diseño de esta antena elemental en base a unos artículos [4, 9, 12] de antenas coplanares con parche octagonal de banda ultra ancha, considerando los materiales que se emplearán como lo son el plexiglass como substrato transparente, cinta de cobre y grafeno como elementos conductores y las frecuencias con las que se desea trabajar. El diseño se ejecutará en el programa ANSYS, con la herramienta HFSS.

### 3.2.1 Línea coplanar

La línea coplanar es un elemento fundamental para el diseño de la antena elemental, por lo tanto, será lo primero a analizar.

Para este primer diseño que se simulará se toma el substrato plexiglass con una constante dieléctrica de  $\epsilon_r = 2.5$  y una altura de  $h = 1 \text{ mm}$ . La frecuencia que se tomó en consideración fue de 4 GHz con un desfaseamiento de  $90^\circ$  y la impedancia  $Z_0 = 50\Omega$ .

Se inició obteniendo el valor del ancho  $W$  como se muestra en la Ilustración 3.1, la cual se calcula con las siguientes ecuaciones [9]:

$$\frac{W}{h} = \frac{8 e^A}{e^{2A} - 2}; \frac{W}{h} \leq 2 \quad (3.1a)$$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]; \frac{W}{h} > 2 \quad (3.1b)$$

Donde:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right); \quad B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

Con el valor  $W$  se puede realizar el cálculo de la permitividad efectiva  $\epsilon_{eff}$  y esta se obtiene por medio de la siguiente ecuación [9]:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

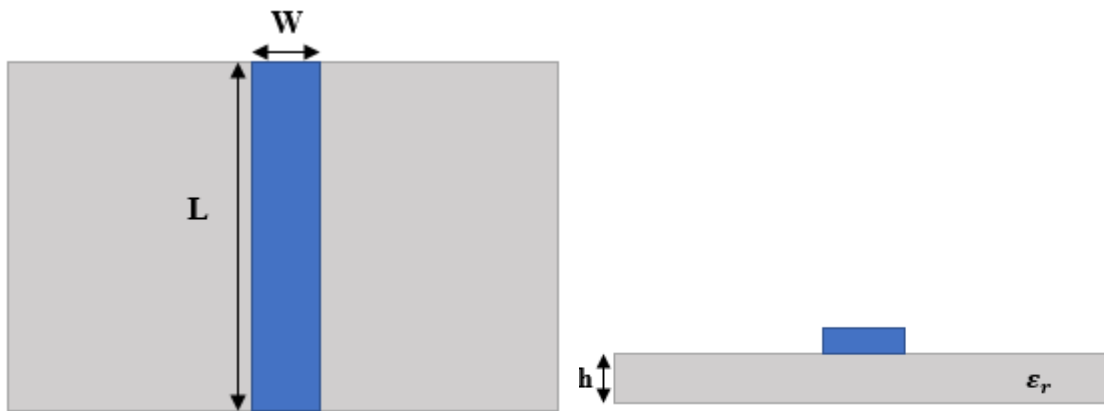
El valor resultante de la ecuación 3.2, se calcula la longitud de onda, con la ecuación [9]:

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.3)$$

Esta longitud de onda es con un desfase de 360°, como el diseño de la antena requiere un desfase de 90°, se divide la longitud de onda entre 4, dando la siguiente expresión:

$$\frac{\lambda}{4} \quad (3.4)$$

La ecuación 3.4 corresponde al largo de la línea que se le llamará  $L$ . Con todas las ecuaciones resueltas, la línea queda con los siguientes parámetros que se resumen en la tabla 3-1:



*Ilustración 3.1. Diseño de la línea.*

W	L	h
2 mm	13.6 mm	1 mm

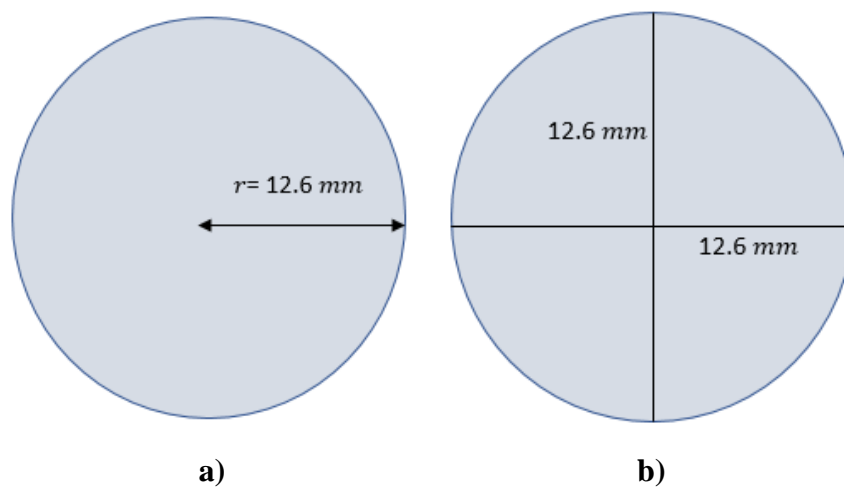
*Tabla 3-1. Parámetros de la línea.*

Ahora que ya se tiene las dimensiones de la línea, se continua con el cálculo de sus planos de tierra que para esta tesis se optó por unos planos de tierra semicirculares por los beneficios mencionados en el capítulo 2.

Se comienza definiendo el parámetro que se le llamará  $y_g$  que será la altura del plano de tierra, el valor se le dará considerando un espaciado entre el parche que se insertará posteriormente y el plano de tierra de 1mm, obteniendo:

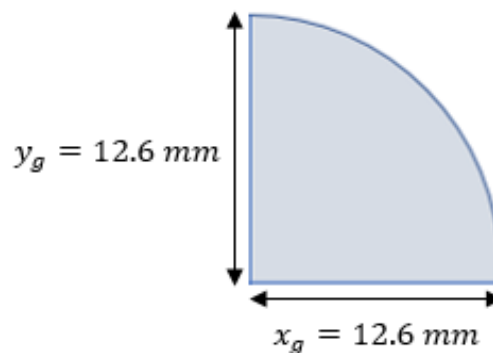
$$y_g = 12.6 \text{ mm}$$

Siendo consiente del valor de la altura del plano de tierra, esta se utilizará para la construcción del semicírculo. Se diseña un círculo considerando los 12.6 mm como radio, posteriormente este círculo se dividirá en 4 partes, como en la ilustración 3.2.



*Ilustración 3.2. Creación y división del círculo.*

Se toma un cuarto del círculo dividido, quedando una geometría con los catetos de la misma medida que serán la altura y anchura del plano de tierra,  $y_g$  y  $x_g$  respectivamente, siendo así el plano de tierra que se utilizará quedando como la ilustración 3.3.



*Ilustración 3.3. Diseño final de plano de tierra*

Con este diseño final del plano de tierra en la ilustración 3.4 se muestra el diseño final de la línea coplanar con sus parámetros ya definidos en la tabla 3-2.

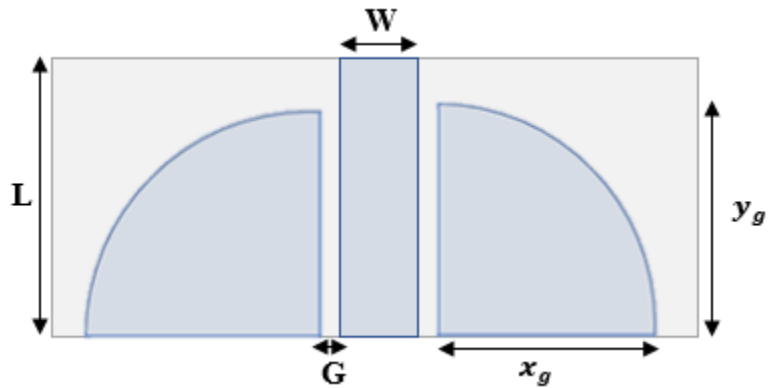


Ilustración 3.4. Diseño final de la línea coplanar.

<b>L</b>	13.6 mm
<b>W</b>	2 mm
<b>G</b>	0.3 mm
<b><math>x_g</math></b>	12.6 mm
<b><math>y_g</math></b>	12.6 mm

Tabla 3-2. Parámetros de diseño final de línea coplanar.

### 3.2.2 Parche

Se procede con el diseño del parche para lograr el diseño final de la antena elemental, el objetivo es que el parche sea un monopolo octagonal, pero para llegar a esta geometría se parte de un parche rectangular, siendo la guía el artículo de “Compact CPW-Fed Microstrip Octagonal patch antenna with H slot for WLAN and WIMAX Applications” de Tarbouch, M., El Amri, A. y Terchoune, H. [10]

El ancho del parche se define por medio de la ecuación 3.5 [11], para que este elemento radiador resuene de una manera eficiente:

$$W' = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.5)$$

Se procede por calcular la constante dieléctrica efectiva con la ecuación 3.6 [11]:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W'} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

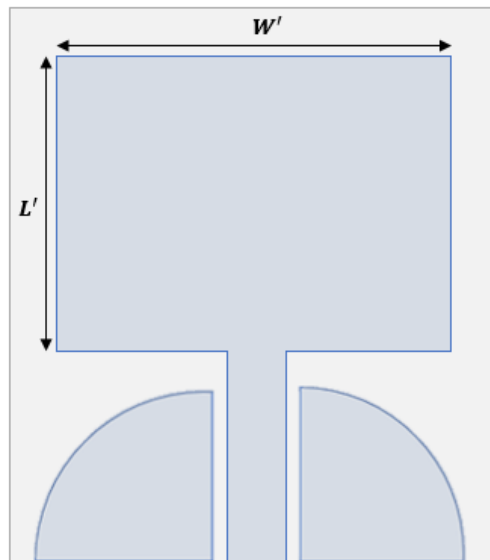
La longitud del efecto de borde  $\Delta L$ , se obtiene por la ecuación 3.7 [11]:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W'}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W'}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.7)$$

Finalmente, se obtiene el largo del parche rectangular con la ecuación 3.8 [11]:

$$L' = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.8)$$

Y se obtiene una antena primaria que se muestra en la ilustración 3.5, con sus dimensiones en la tabla 3-3.

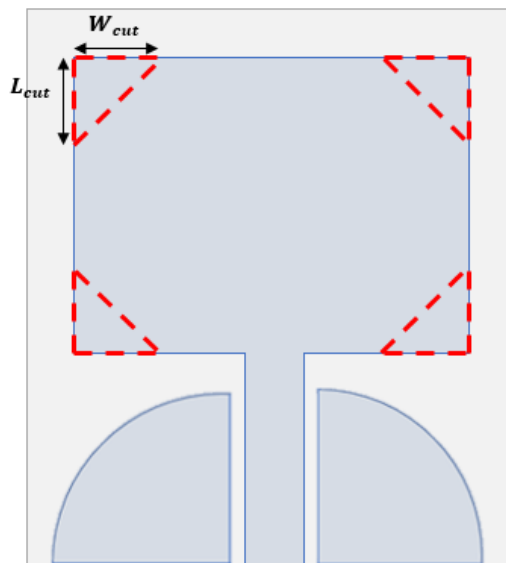


*Ilustración 3.5. Primer diseño de parche.*

$W'$	$L'$
32.30 mm	27.30 mm

*Tabla 3-3. Parámetros de parche rectangular.*

Ahora que ya se tiene el parche rectangular con sus dimensiones se procede a realizar el diseño octagonal iniciando con unos cortes triangulares en los cuatro ángulos del rectángulo como en la ilustración 3.6, a las dimensiones de esta pequeña geometría se las llamará  $W_{cut}$  y  $L_{cut}$ , los cuales para obtener sus dimensiones se considerará un nuevo parámetro llamado  $D$ .



*Ilustración 3.6. Cortes en el parche rectangular.*

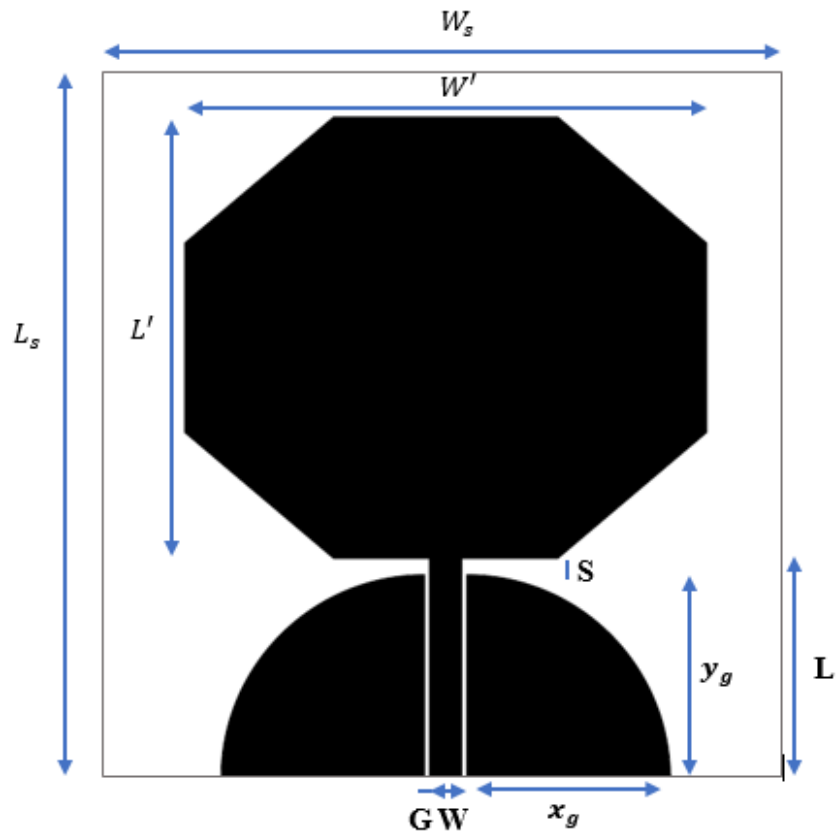
Para el cálculo de  $W_{cut}$  y  $L_{cut}$  se considera que el parámetro  $D = 3.5$  ya que resulta una variable aceptable ya que no reduce de forma significativa el parche y arroja un mejor resultado en el coeficiente de reflexión a comparación de otras variables.

Por lo tanto,  $W_{cut}$  y  $L_{cut}$  se definen como [10]:

$$W_{cut} = \frac{W'}{D} = \frac{32.30 \text{ mm}}{3.5} = 9.22 \text{ mm} \quad (3.9)$$

$$L_{cut} = \frac{L'}{D} = \frac{32.30 \text{ mm}}{3.5} = 7.8 \text{ mm} \quad (3.10)$$

Se procede a realizar los cortes con los parámetros obtenidos, quedando el diseño final que se muestra en la ilustración 3.7 con sus dimensiones en la tabla 3-4.



*Ilustración 3.7. Diseño final de antena elemental.*

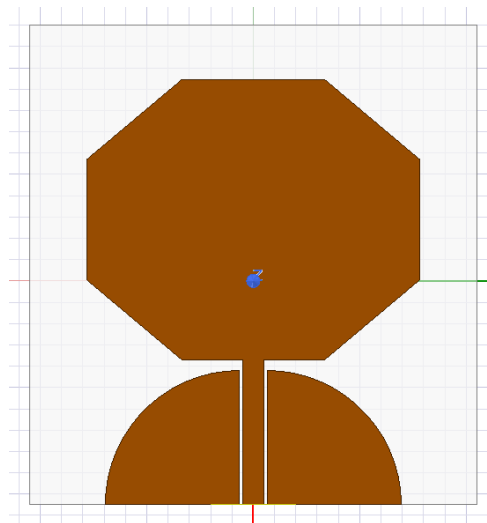
$L_s$	46 mm
$W_s$	42 mm
$W'$	32.30 mm
$L'$	27.30 mm
$W$	2 mm
$L$	13.6 mm
$x_g$	12.6 mm
$y_g$	12.6 mm
$S$	1 mm
$G$	0.3 mm

*Tabla 3-4. Parámetros finales de la antena elemental.*

### **3.2.3 Antena elemental final simulada**

Ya teniendo el diseño final de la antena elemental se procede a realizar la simulación en el programa ANSYS con la herramienta de HFSS, aquí se mostrarán 2 antenas con el mismo diseño, pero con diferentes materiales conductores que son la cinta de cobre y el grafeno, esto para comprobar la eficiencia y los beneficios del grafeno que ya han sido mencionados en el capítulo 1 y 2 sobre la cinta de cobre.

Primero se muestra la antena elemental en la ilustración 3.8 con cinta de cobre con los siguientes parámetros de la tabla 3-5:

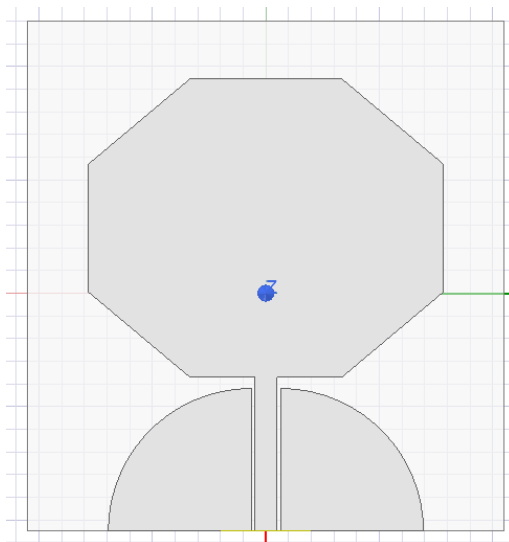


*Ilustración 3.8. Antena elemental de cinta de cobre en HFSS.*

<b>Frecuencia de diseño <math>f_r</math></b>	4 GHz
<b>Constante dieléctrica del plexiglass <math>\epsilon_r</math></b>	2.5
<b>Conductividad eléctrica del cobre</b>	$5.8 \times 10^6 S/m$
<b>Límites de simulación</b>	1 GHz – 11GHz

*Tabla 3-5. Parámetros de simulación de antena elemental de cita de cobre.*

Posteriormente se muestra la antena elemental en la ilustración 3.9 con cinta de grafeno con los siguientes parámetros de la tabla 3-6:

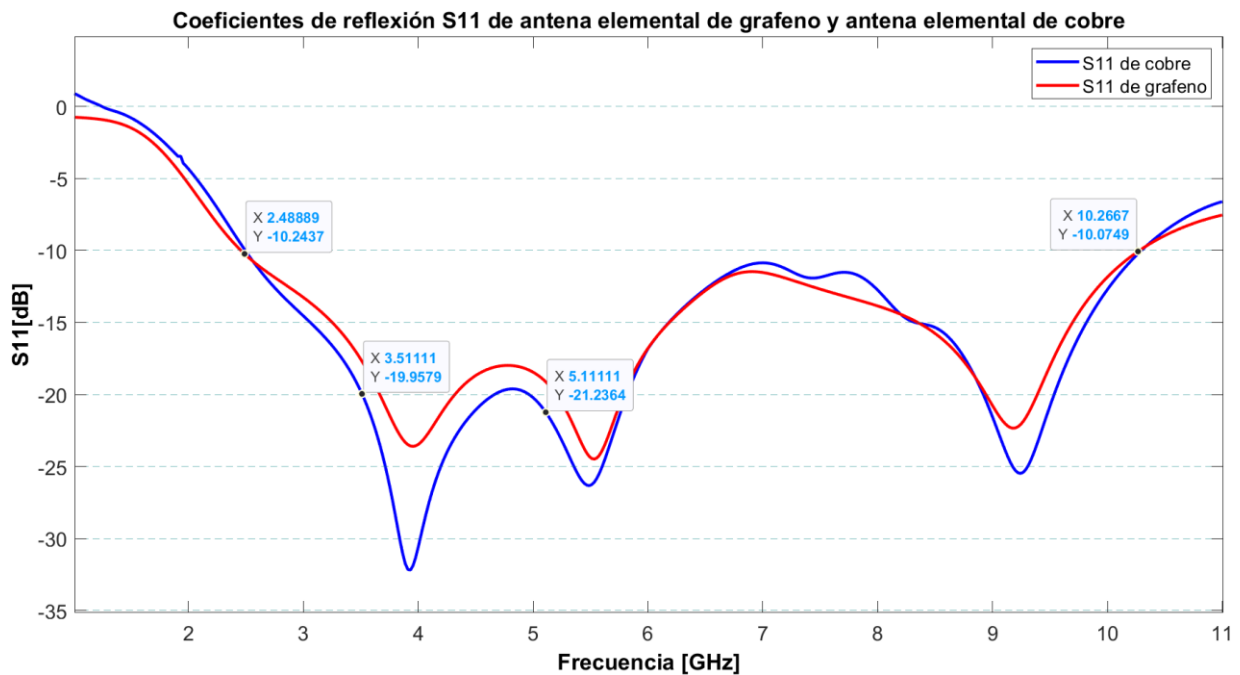


*Ilustración 3.9. Antena elemental de grafeno en HFSS.*

<b>Frecuencia de diseño <math>f_r</math></b>	4 GHz
<b>Constante dieléctrica del plexiglass <math>\epsilon_r</math></b>	2.5
<b>Conductividad eléctrica del grafeno</b>	$3.5 \times 10^5 S/m$
<b>Límites de simulación</b>	1 GHz – 11GHz

*Tabla 3-6. Parámetros de simulación de antena elemental de grafeno.*

Al obtener los coeficientes de reflexión de ambas simulaciones se observó una respuesta aceptable de los parámetros  $S_{11}$ , cumpliendo con el objetivo de diseñar un monopolo octagonal de banda ultra ancha. Además, que en las frecuencias de WIFI y WIMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G la antenna arroja  $-21.2\text{ dB}$  y  $-19.9\text{ dB}$ , respectivamente, estando por debajo de los  $-10\text{ dB}$  que se interpreta que la antenna resuena en esas frecuencias y están transmitiendo por lo menos el 70% de su potencia. Esto se observa en la ilustración 3.10.



*Ilustración 3.10. Respuesta del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  de las antenas elementales.*

### 3.3 Construcción

Como se desea hacer la primera prueba de este diseño con el material de la cinta de cobre respetando el plexiglass como el substrato, se realizarán dos antenas elementales con el mismo diseño.

Las construcciones de las antenas son fabricadas en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE.

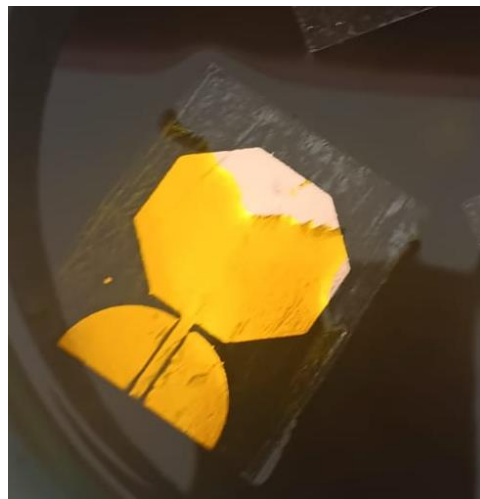
Primero se describirá el proceso de construcción de la antena elemental de cinta de cobre, el paso 1 para la construcción de la antena es cortar el substrato que es el material plexiglass al tamaño de  $L_s$  y  $W_s$ . Después se corta la cinta de cobre al mismo tamaño que el plexiglass y

se pega en uno de los planos, posteriormente se manda el diseño de la antena elemental a una impresión en corte vinil ayudando a que cada componente se pueda pegar sobre la cinta de cobre como en la ilustración 3.11.



*Ilustración 3.11. Construcción de antena elemental cobre.*

Acto seguido, se sumerge esta placa en ácido férrico un tiempo considerable hasta que el ácido pueda disolver el cobre sobrante de la cinta de cobre y quede únicamente el diseño de la antena como se puede observar en la ilustración 3.12.



*Ilustración 3.12. Antena elemental sumergida en ácido férrico.*

Por último, se retira la placa con mucha precaución, se sumerge en agua limpia, se retira y se seca con cuidado, se limpia los restos de pegamento de la cinta de cobre hasta que quede como la ilustración 3.13.



*Ilustración 3.13. Antena elemental de cobre después del proceso del ácido férrico.*

Se retira el vinil y se le tiene que soldar un conector SMA de  $50\Omega$  hembra para conectarla a los equipos necesarios y obtener las mediciones y resultados deseados.



*Ilustración 3.14. Antena elemental de cinta de cobre terminada.*

Posteriormente se realiza la construcción de la antena elemental de grafeno, el proceso de esta antena es un poco más complejo por que el material no se puede manipular tan fácil como la cinta de cobre en cuestión de sumergirlo a algún ácido y tampoco resiste pegarle directamente algún tipo de material como el vinil ya que es muy sensible y al tener varias capas se van levantando cuando se intenta manipular de esa forma, al igual con un mal corte el grafeno ya no puede servir para la construcción por el mismo efecto.

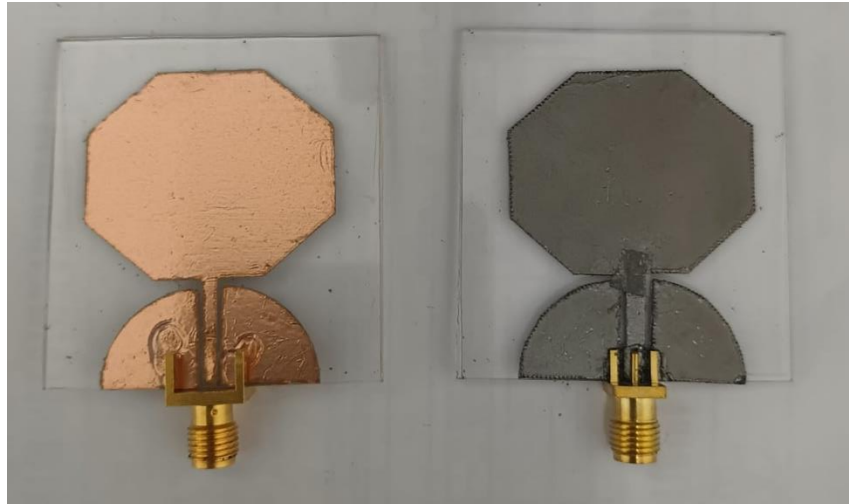
Al igual que la antena de cobre, el primer paso es cortar el substrato plexiglass al tamaño de  $L_s$  y  $W_s$ . Posterior a esto se limpia bien la placa obtenida con acetona y algodón. Después se corta con mucha precaución el grafeno al mismo tamaño que el plexiglass y en una de sus caras se le pega una cinta doble cara de forma que no se corra el riesgo de que se pueda despegar del grafeno en alguna de sus esquinas o alguno de sus lados. Encima de la cinta doble cara se pega las impresiones de vinil del diseño final de la antena elemental para luego con un cúter bien afilado o unas tijeras con la misma característica se proceda a cortar en diseño en el grafeno con bastante precaución de no levantar las capas, ni la cinta doble cara. Terminando este proceso se pega el diseño en uno de los planos del plexiglass, el grafeno tampoco permite el poder soldar algún componente, por lo tanto, se le asegura un conector SMA de  $50\Omega$  hembra para poder conectarla a los equipos necesarios y obtener las mediciones y resultados deseados.



*Ilustración 3.15. Antena elemental de cinta de grafeno terminada.*

### ***3.3.1 Antenas elementales finales construidas***

Ya que se describió el proceso de construcción de ambas antenas elementales, se muestra en la ilustración 3.16 las antenas juntas para observar que efectivamente es el mismo diseño y tamaño de ambas.



*Ilustración 3.16. Antenas elementales finales.*

Culminando la construcción de las antenas el análisis de su caracterización y mediciones de los resultados obtenidos se describirán en el capítulo 4.

### **3.4 Fase 2: Antena MIMO de 2 puertos**

Con la seguridad de que la antena elemental fue correctamente diseñada y construida se continua con la migración a la antena MIMO de 2 puertos, esta es una prueba que se hace antes de llegar al diseño final y objetivo principal que es la antena MIMO de 4 puertos para asegurar la correcta migración ya que aquí se agrega un resultado más por analizar que son los coeficientes de transmisión que nos arrojan el acoplamiento que existe entre los puertos.

A partir de esta fase las antenas se diseñan y se construyen únicamente con el material conductor grafeno usando el plexiglass como substrato.

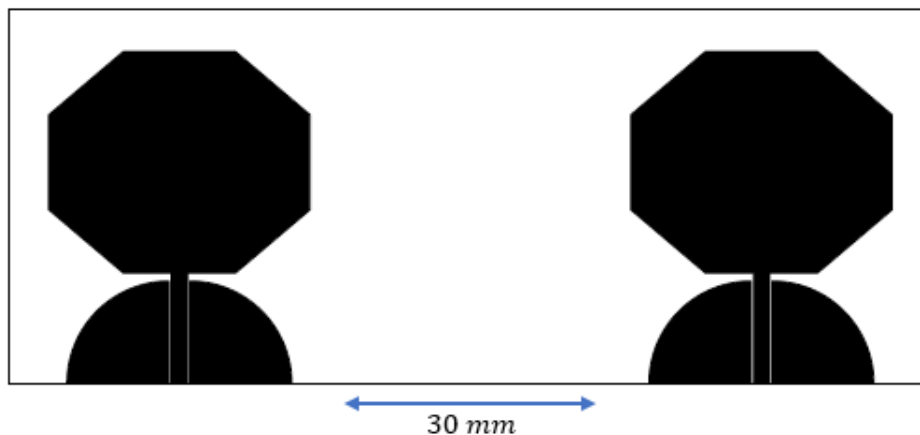
### 3.5 Diseño

Para el diseño de la antena MIMO de 2 puertos es indispensable la antena elemental de grafeno, su diseño con todas y cada uno de sus parámetros para su migración.

#### 3.5.1 Migración de la antena elemental a antena MIMO

La migración de diseño que se describirá a continuación fue basada en la tesis “Análisis y diseño de una antena transparente para telefonía celular de quinta generación” de el Lic. Fernando López Marcos [6]. Esta migración consiste en la réplica de la línea del elemento resonador y estas líneas tendrán conectado puertos diferentes, estas réplicas dependen de los puertos deseados, en esta fase únicamente serán 2. También son necesarias réplicas del plano de tierra y el aislamiento físico de ellos.

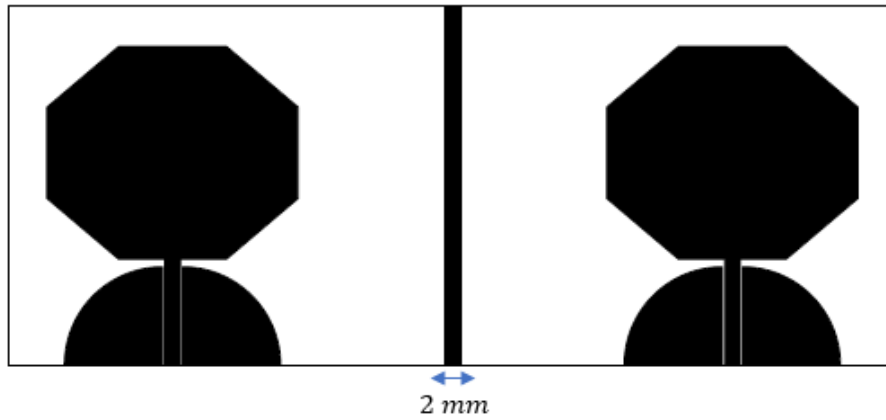
Un parámetro que se une y es determinante para este diseño es la separación de las antenas ya que si no se logra una medida adecuada se corre el riesgo de que exista acoplamiento entre ambos puertos. Por ello, se propone una separación de 30 mm entre las antenas. Quedando el primer diseño como la ilustración 3.17



*Ilustración 3.17. Primer diseño de antena MIMO 2 puertos.*

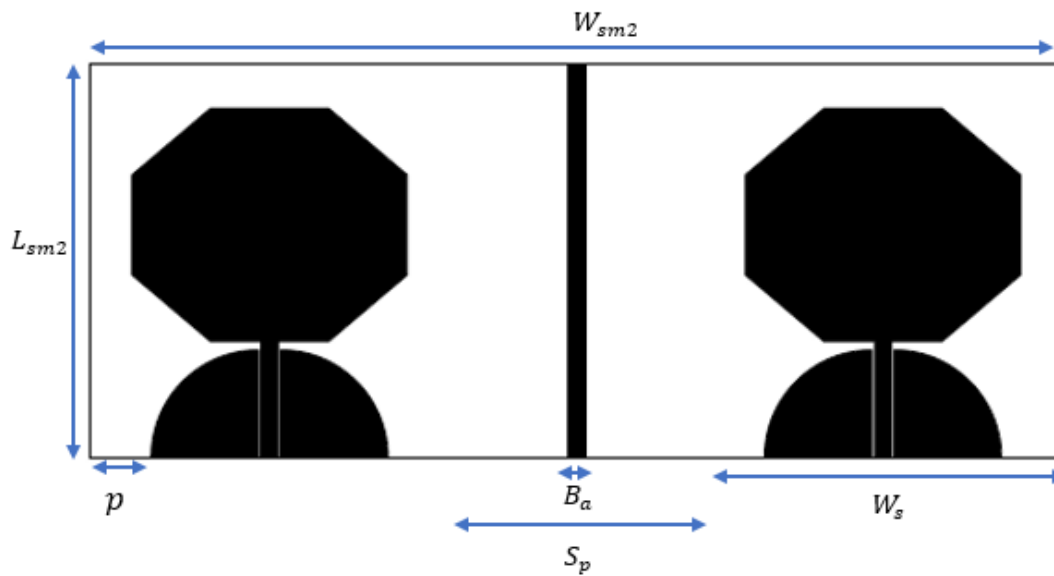
No siempre basta la separación para evitar los acoplamientos, también se incluyen barreras que aseguran este objetivo. En este caso se le incluirá una barrera del mismo material conductor (grafeno) de 2 mm de grosor que es igual al grosor de la línea coplanar en medio

de ambas antenas respetando la separación de 30 mm. Se observa esta descripción en la ilustración 3.18.



*Ilustración 3.18. Inclusión de barrera a la antena MIMO de 2 puertos.*

Las dimensiones finales de la antena se presentan en la tabla 3-7 y la ilustración 3.19.



*Ilustración 3.19. Parámetros de antena MIMO de 2 puertos.*

$L_{sm2}$	46 mm
$W_{sm2}$	114 mm
$W_s$	42 mm
$p$	9 mm
$S_p$	30 mm
$B_a$	2 mm

Tabla 3-7. Parámetros de antena MIMO de 2 puertos.

### 3.5.2 Antena MIMO de 2 puertos final simulada

Ya teniendo el diseño final de la antena MIMO de 2 puertos se procede a realizar la simulación en el programa ANSYS con la herramienta de HFSS, se muestra la antena en la ilustración 3.20 con la definición de los puertos 1 y 2 y con los mismos parámetros de la tabla 3-6.

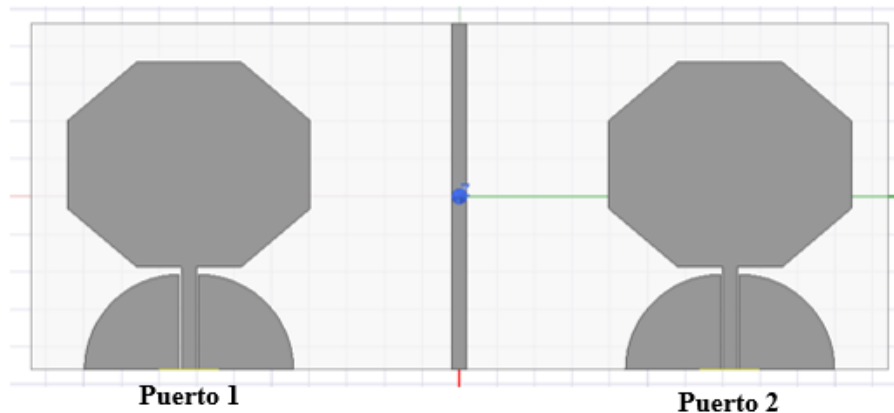
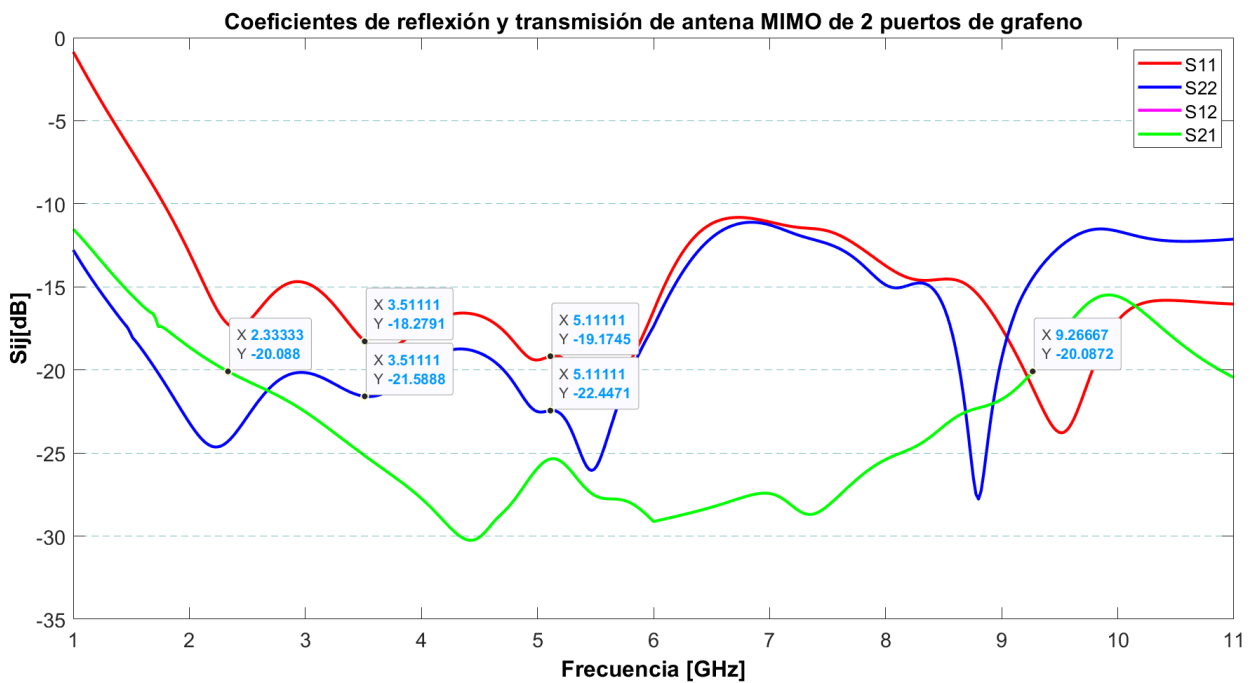


Ilustración 3.20. Antena MIMO de 2 puertos de grafeno en HFSS.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en la simulación, mostrando una buena respuesta en los coeficientes de reflexión  $S_{11}$  y  $S_{22}$ , se sigue respetando la condición la anda ultra ancha y sigue resonando en las frecuencias de WIFI y WIMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G la antena arroja  $-19.1\text{ dB}$ ,  $-22.4\text{ dB}$  y  $-18.2\text{ dB}$ ,  $-21.5\text{ dB}$ , respectivamente, estando por debajo de los  $-10\text{ dB}$  y para los coeficiente de transmisión  $S_{12}$  y  $S_{21}$  se nota un ancho de banda que va de los 2.33 GHz a los 9.26 GHz que está por debajo de los  $-20\text{ dB}$  que se puede interpretar que la antena tiene una transmisión de energía

de máximo 1% por lo que el desacoplamiento de los puertos está garantizado. Esto se puede observar en la ilustración 3.21.



*Ilustración 3.21. Respuesta del coeficiente de reflexión y transmisión de antena MIMO de 2 puertos.*

### 3.6 Construcción

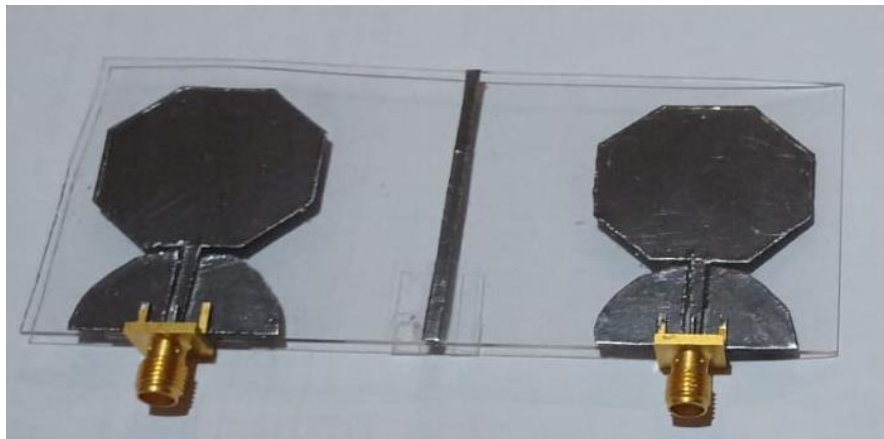
La antena es fabricada en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE.

La construcción de esta fase es exactamente igual que la fase 1, la cual se volverá a describir brevemente, se corta el sustrato plexiglass al tamaño de  $L_{sm2}$  y  $W_{sm2}$ , se limpia bien la placa obtenida con acetona y algodón. Después se corta con mucha precaución el grafeno al mismo tamaño que el plexiglass y en una de sus caras se le pega una cinta doble cara de igual manera con mucha precaución, encima de la cinta doble cara se pega las impresiones de vinil del diseño final de la antena MIMO de 2 puertos que son las 2 antenas elementales incluyendo la barrera que se añadió, luego con un cúter bien afilado o unas tijeras con la misma característica se proceda a cortar en diseño en el grafeno con bastante cuidado de no levantar las capas, ni la cinta doble cara.

Terminando este proceso se pega el diseño en uno de los planos del plexiglass y se le asegura 2 conectores SMA de 50 $\Omega$  hembra para poder conectarlos a los equipos necesarios y obtener las mediciones y resultados deseados.

### ***3.6.1 Antena MIMO de 2 puertos final construida***

Una vez finalizada la construcción de esta fase, se presenta en la ilustración 3.22 la antena final construida.



*Ilustración 3.22. Antena MIMO de 2 puertos final.*

### **3.7 Fase 3: Antena MIMO de 4 puertos**

Una vez comprobado que la antena MIMO de 2 puertos fue correctamente diseñada y construida, se inicia la fase 3 que es la última, aquí ya se define el diseño final y objetivo principal de esta tesis que es la antena MIMO de 4 puertos con grafeno y plexiglass como el substrato transparente mencionado en los objetivos del capítulo 1.

Aquí se migrará el diseño de la MIMO de 2 puertos al diseño final, igualmente se tomará en cuenta la barrera para evitar los acoplamientos de los puertos.

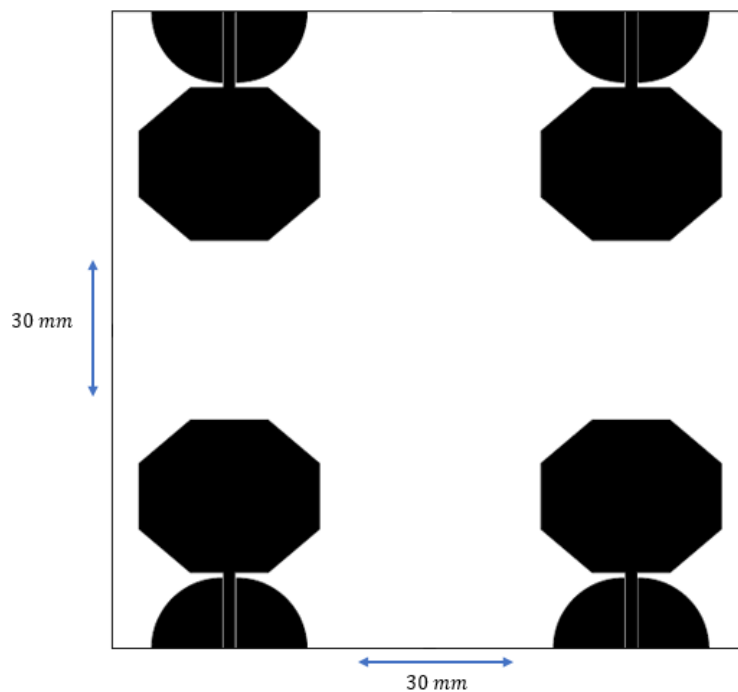
### **3.8 Diseño**

Para diseñar la antena MIMO de 4 puertos se retoman los diseños que se han hecho hasta ahora, desde la antena elemental de grafeno, hasta la antena MIMO de 2 puertos, esto porque se van a respetar las dimensiones de cada pieza realizada.

### 3.8.1 Migración de la antena MIMO de 2 puertos a antena MIMO de 4 puertos

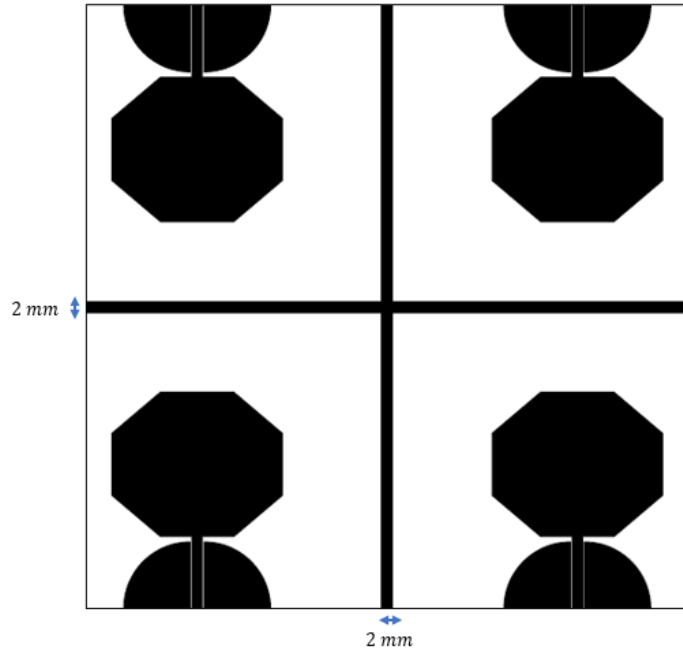
La migración de diseño se retomará de la fase 2 ya que mostró un buen resultado en los coeficientes de reflexión y transmisión, igualmente esto va a consistir en la réplica de las líneas de los elementos resonadores, las cuales tendrán su propio puerto, también se replican los planos de tierra y el aislamiento entre ellos.

Retomando el parámetro de separación entre los puertos se dejará el mismo valor de  $30\text{ mm}$  entre los puertos, tanto en el costado como en la parte superior. Obteniendo así el primer diseño de la fase en la ilustración 3.23.



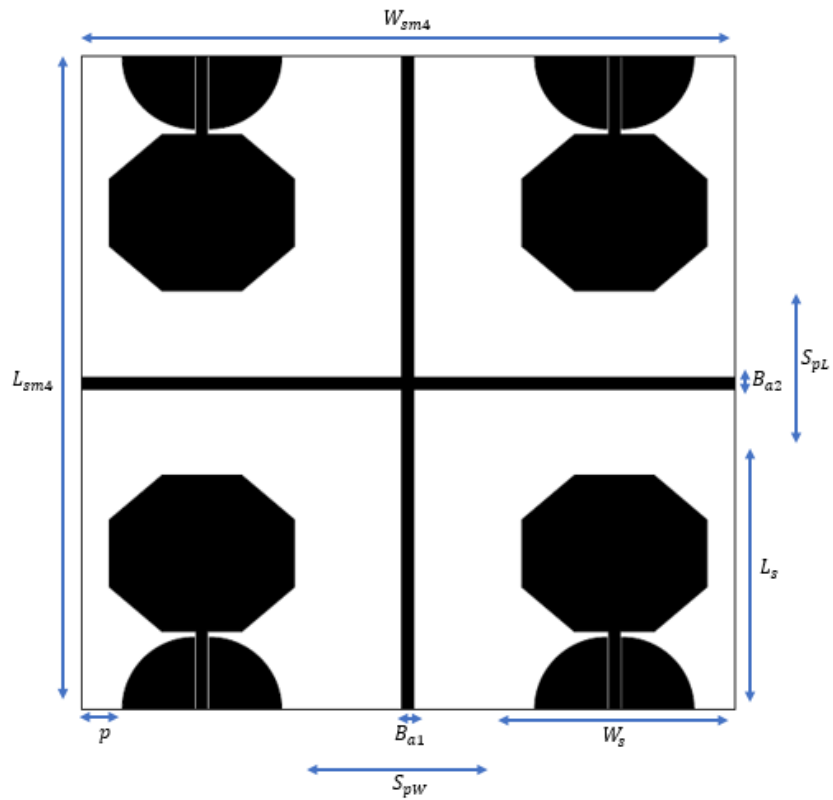
*Ilustración 3.23. Primer diseño de antena MIMO 4 puertos.*

Para este diseño también se le añadirán unas barreras para asegurar el desacoplamiento entre los 4 puertos, esta barrera tendrá una forma de cruz procurando que cada puerto esté aislado, de igual manera que en la fase anterior la barrera tendrá un grosor de  $2\text{ mm}$  como sus líneas coplanares, también se respetarán el tamaño de las separaciones quedando como en la ilustración 3.24.



*Ilustración 3.24. Inclusión de barrera a la antena MIMO de 4 puertos.*

Las dimensiones finales de la antena se presentan en la tabla 3-8 y la ilustración 3.25.



*Ilustración 3.25. Parámetros de antena MIMO de 4 puertos.*

$L_{sm4}$	122 mm
$W_{sm4}$	114 mm
$W_s$	42 mm
$L_s$	46 mm
$p$	9 mm
$S_{pL}$	30 mm
$S_{pW}$	30 mm
$B_{a1}$	2 mm
$B_{a2}$	2 mm

Tabla 3-8. Parámetros de antena MIMO de 4 puertos.

### 3.8.2 Antena MIMO de 4 puertos final simulada

Ya teniendo el diseño final de la antena MIMO de 4 puertos se procede a realizar la simulación en el programa ANSYS con la herramienta de HFSS, se muestra la antena en la ilustración 3.26 con la definición de los puertos 1, 2, 3 y 4, con los mismos parámetros de la tabla 3-6.

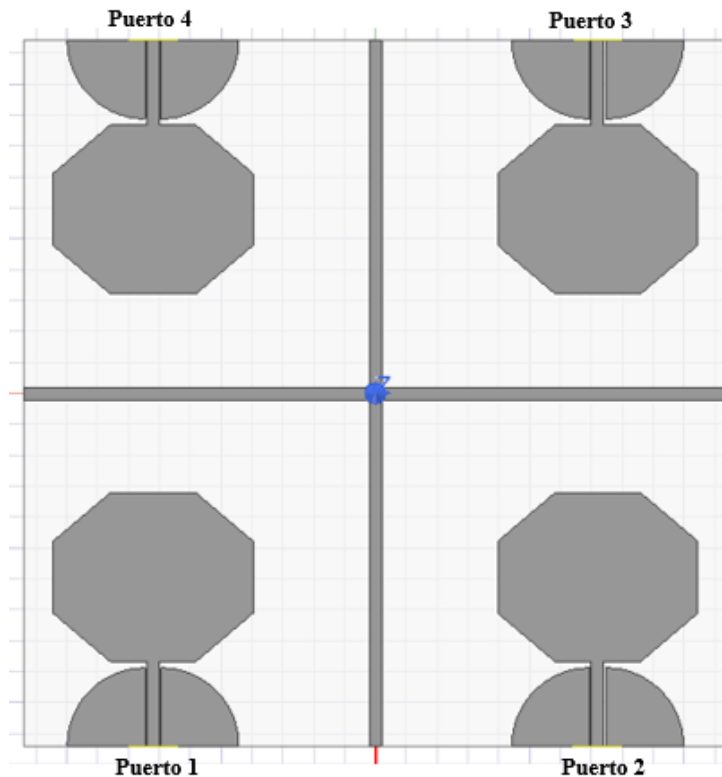


Ilustración 3.26. Antena MIMO de 4 puertos de grafeno en HFSS.

Como esta es la simulación de la antena final y la principal de esta tesis todos y cada uno de sus caracterizaciones, mediciones y resultados tanto de simulación como experimentales se presentarán en el capítulo 4 con su respectiva explicación cualitativa.

### 3.9 Construcción

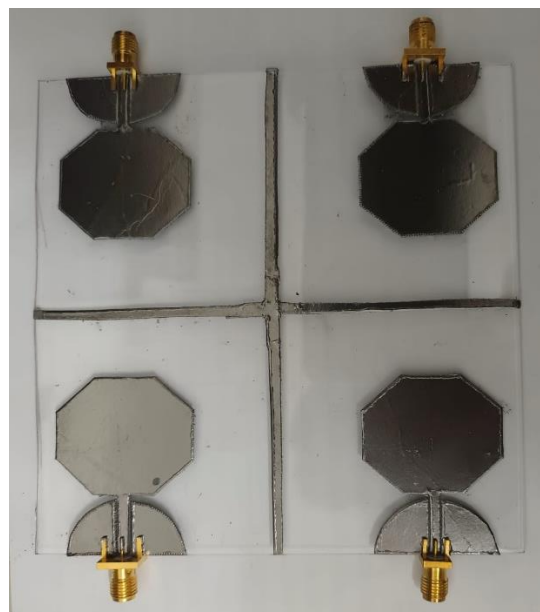
La antena es fabricada en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE.

La construcción de esta fase es exactamente igual a las dos anteriores, la cual se retomará brevemente, se corta el substrato plexiglass al tamaño de  $L_{sm4}$  y  $W_{sm4}$ , se limpia bien la placa obtenida con acetona y algodón. En la cinta doble cara se pega las impresiones de vinil del diseño final de la antena MIMO de 4 puertos que son las 4 antenas elementales incluyendo la barrera en forma de cruz que se añadió.

Terminando este proceso se pega el diseño en uno de los planos del plexiglass y se le asegura 4 conectores SMA de  $50\Omega$  hembra para poder conectarlos a los equipos necesarios y obtener las mediciones y resultados deseados.

#### 3.9.1 Antena MIMO de 4 puertos final construida

Una vez culminada la construcción de esta última fase, se presenta en la ilustración 3.27 la antena final construida.



*Ilustración 3.27. Antena MIMO de 4 puertos final.*

# CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIONES, MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

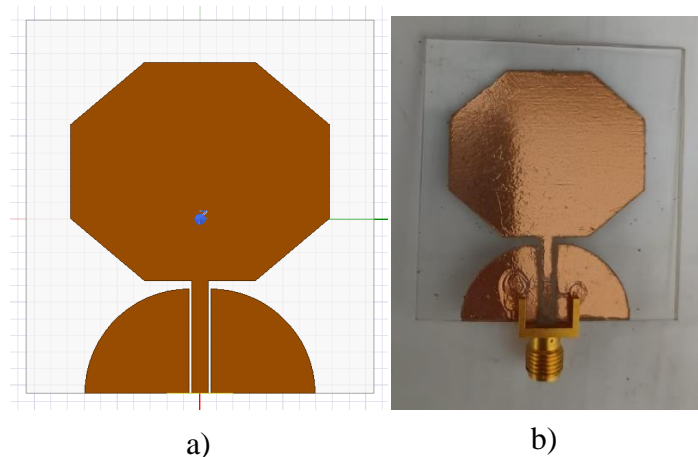
## Introducción

En este cuarto capítulo se presentarán las caracterizaciones, mediciones y los análisis de los resultados que se obtengan de las tres fases ya descritas en el capítulo anterior. Se llevará a cabo las comparaciones entre lo obtenido por las simulaciones y obtención experimental con un análisis y descripción cualitativa de que es lo que se observa en las gráficas.

Un punto importante que se analizará y se hará énfasis serán en los resultados de las antenas en las frecuencias de WIFI y WIMAX de 5GHz y en la banda de 3.5GHz para 5G, ya que estas son el objetivo principal.

### 4.1 Antena elemental de cinta de cobre

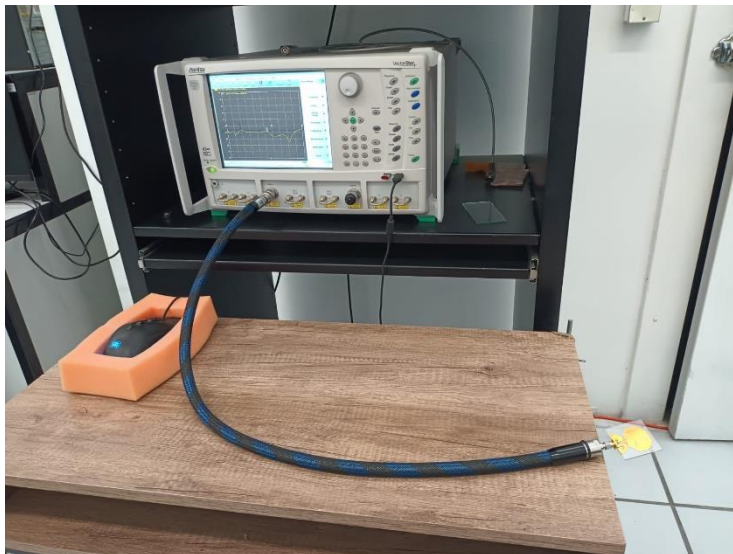
En la ilustración 4.1 se compara el diseño de la antena de cinta de cobre simulada y la construida.



*Ilustración 4.1. Comparación del diseño de la antena elemental de cobre: a) diseñada en HFSS, b) construida*

### 4.1.1 Coeficientes de reflexión

Para la caracterización del coeficiente de reflexión primero se obtuvo por medio de simulación el parámetro  $S_{11}$  la reflexión de energía alimentada al mismo puerto, es decir, del puerto 1 y se procedió con la obtención experimental en el cual se ocupó el Analizador Vectorial de Redes (VNA, por sus siglas en inglés) de la marca ANRITSU (*Apéndice A*) como en la ilustración 4.2.



*Ilustración 4.2. Medición del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.*

Se presenta la comparación del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  entre la simulación en HFSS y lo recabado del VNA y el resultado se presenta en la ilustración 4.3. Se puede analizar que el parámetro  $S_{11}$  simulado para la banda de 3.5 GHz es de  $-19.9$  dB mientras que el parámetro  $S_{11}$  medido es de  $-10$  dB pero en la frecuencia de 3.93 GHz; presenta un corrimiento de 0.43 GHz hacia la derecha con respecto a la simulada. En la frecuencia de 5 GHz el parámetro  $S_{11}$  simulado es de  $-20.2$  dB mientras que el parámetro  $S_{11}$  medido es de  $-10.1$  dB pero en la frecuencia de 5.22 GHz; presenta un corrimiento de 0.22 GHz hacia la derecha con respecto a la simulada.

Para el coeficiente de reflexión de la antena simulada se observa un ancho de banda de 7.8 GHz (2.49 GHz a 10.29 GHz), mientras que para la antena construida se analizan ciertos puntos que están en los  $-10$  dB como son en las frecuencia de 2.6 GHz, 3.93 GHz, 5.42 GHz

y un ancho de banda de 3.25 GHz (6.65 GHz a 9.9 GHz): lo que se interpreta como que la antena elemental de cinta de cobre solo resuena en las frecuencias mencionadas. En la tabla 4.1 se plasman de manera más ordenada las comparaciones descritas.

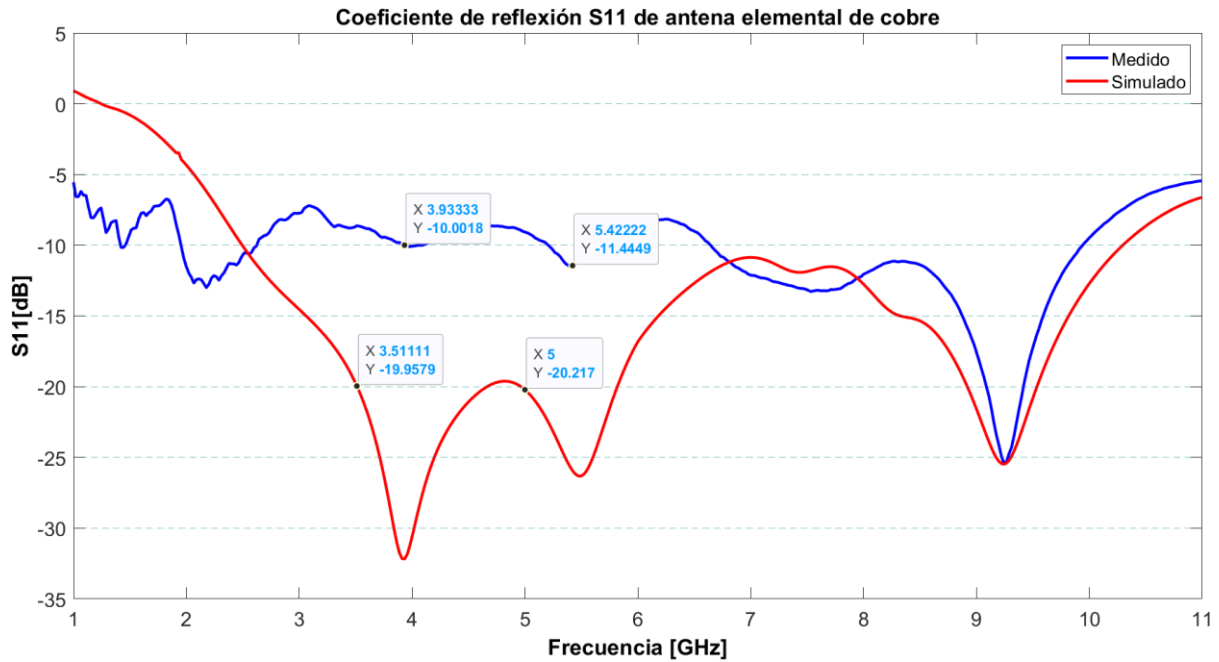


Ilustración 4.3. Comparación del coeficiente de reflexión en  $S_{11}$  de la simulación en HFSS y medición en VNA.

<i>Antena elemental de cinta de cobre</i>				
<b>General</b>	<b>Simulado</b>		<b>Medido</b>	
<b>Ancho de banda</b>	7.8 GHz		3.25 GHz	
<b>Específico</b>	<b>3.5 GHz</b>		<b>5 GHz</b>	
<b>Respuesta</b>	<b>Simulado</b>	<b>Medido</b>	<b>Simulado</b>	<b>Medido</b>
<b>Frecuencia</b>	3.5 GHz	3.93 GHz	5 GHz	5.22 GHz
<b>dB</b>	-19.9 dB	-10 dB	-20.2 dB	-10.1 dB

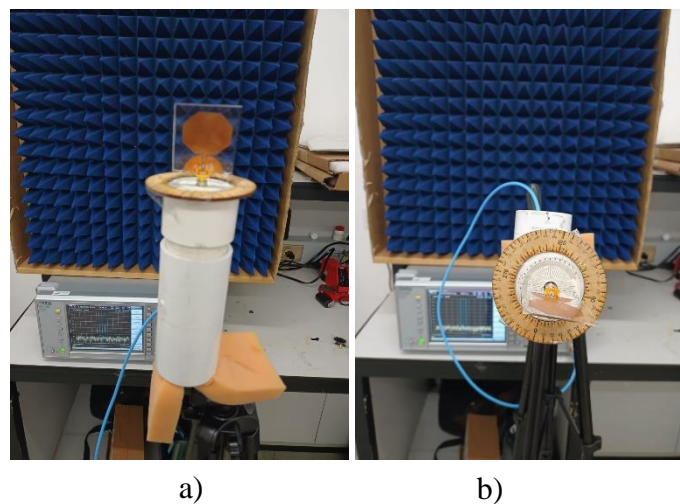
Tabla 4-1. Comparación de las frecuencias de resonancia medidas, simuladas y el coeficiente de reflexión.

### 4.1.2 Diagramas de radiación

Se compararán los diagramas de radiación de la antena elemental de cinta de cobre entre o simulado y lo medido, estos diagramas se dividirán en 2D y 3D, se analizarán conforme a sus frecuencias (3.5 GHz o 5 GHz) y su posición  $\phi = 0^\circ$  y  $\theta = 0^\circ$ . Los resultados se grafican en el programa MATLAB.

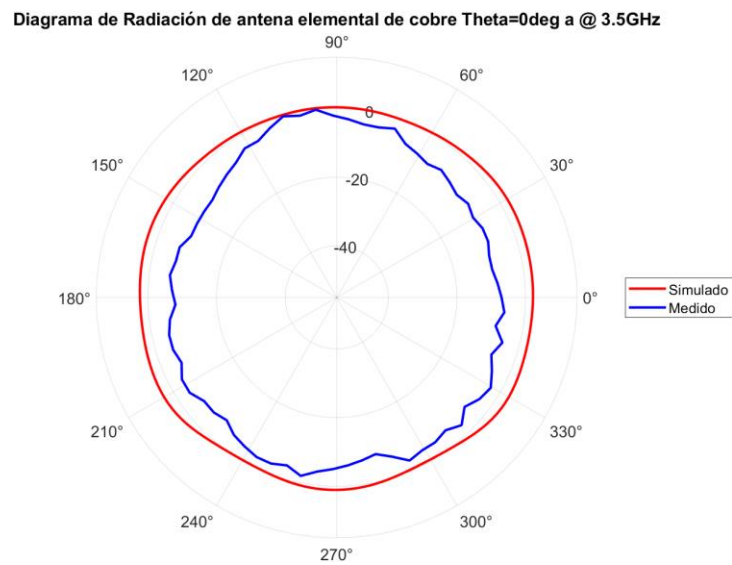
#### 4.1.2.1 2D

Las mediciones se realizaron en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE. Para obtener estos diagramas se empleó el método de las dos antenas [28] el cual consiste en que una antena transmisora AARONIA HyperLog7060 se conecta al generador de señales ANRITSU MG3693 (*Apéndice A*) y la antena receptora que es la antena elemental de cinta de cobre se conecta al analizador de señales ANRITSU MS2830A (*Apéndice A*). La antena receptora se estará rotando cada  $5^\circ$  partiendo de  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  en la posición,  $\phi = 0^\circ$  (antena acostada) y  $\theta = 0^\circ$  (antena parada), como en la figura 4.4.

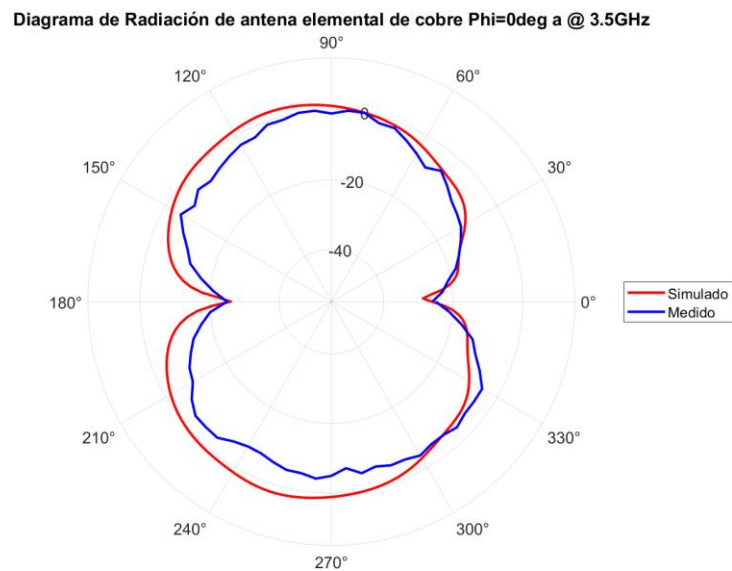


*Ilustración 4.4. Posiciones de antena para diagrama de radiación en 2D. a)  $\theta = 0^\circ$  b)  $\phi = 0^\circ$*

En la figura 4.5, se comparan los diagramas de radiación en 2D simulados y medidos en la frecuencia de 3.5 GHz en el plano H y el plano E, para cada una de las posiciones.



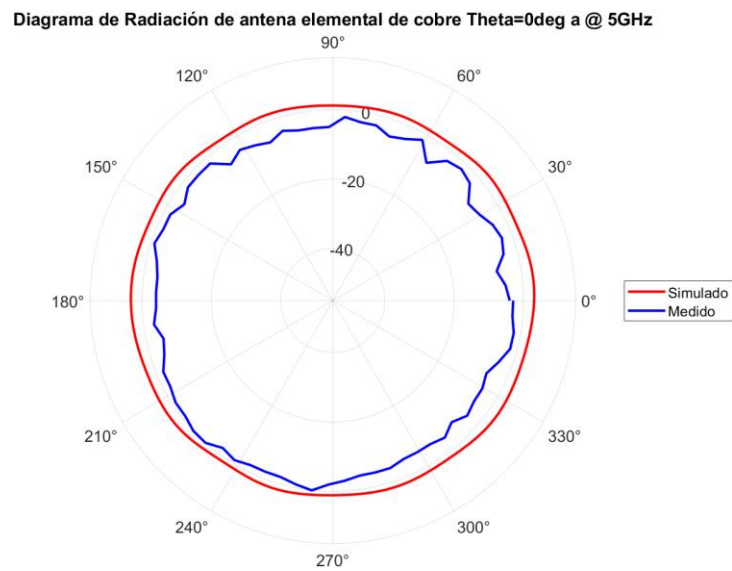
a)



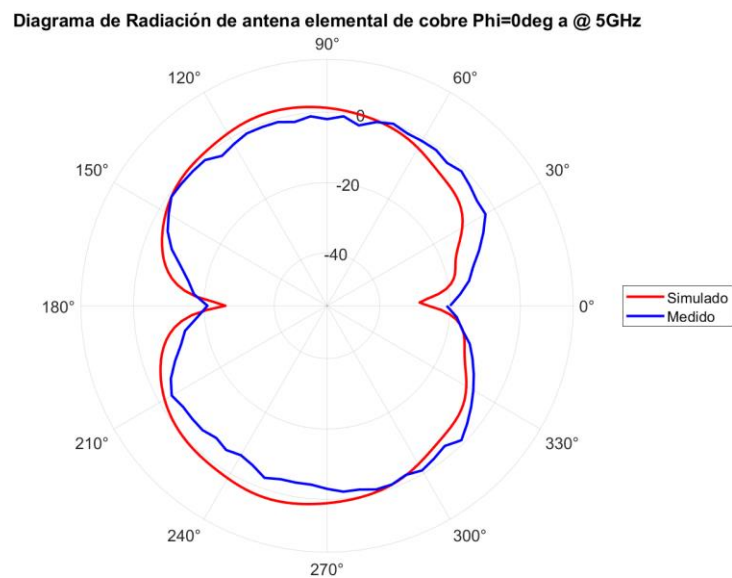
b)

*Ilustración 4.5. Diagramas de radiación 2D simulados y medidos a 3.5 GHz. a) Plano H,  $\theta = 0^\circ$ , b) Plano E  $\phi = 0^\circ$ .*

En la figura 4.6, se comparan los diagramas de radiación en 2D simulados y medidos en la frecuencia de 5 GHz en el plano H y el plano E, para cada una de las posiciones.



a)



b)

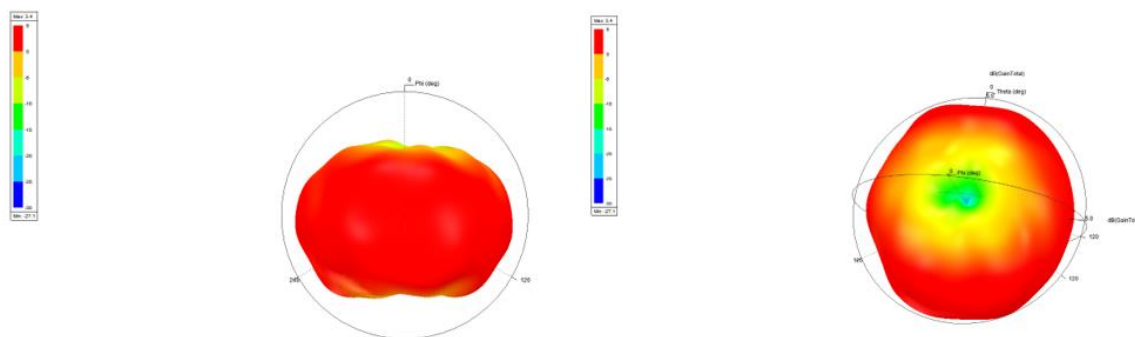
*Ilustración 4.6. Diagramas de radiación 2D simulados y medidos a 5 GHz. a) Plano H,  $\theta = 0^\circ$ , b) Plano E  $\phi = 0^\circ$ .*

Las variaciones que existen en las mediciones del diagrama de radiación en 2D se deben a la incertidumbre presentada debido a que las mediciones no se realizaron en un ambiente controlado.

#### 4.1.2.2 3D

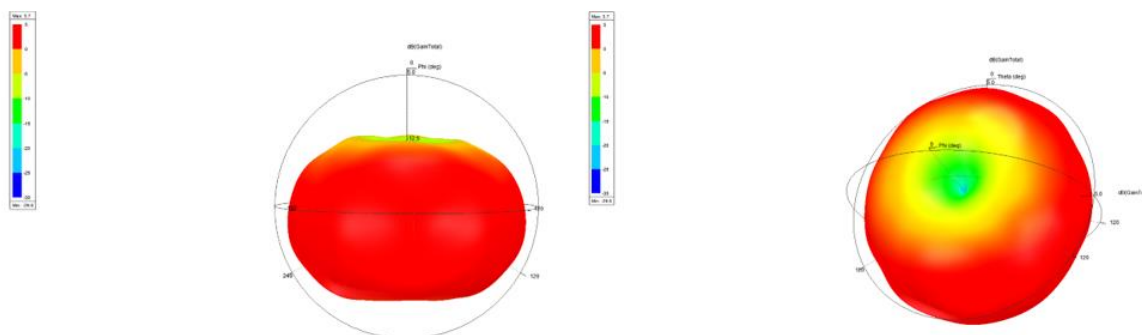
Se muestra los diagramas de radiación en 3D en las frecuencias de 3.5 GHz y 5 GHz únicamente en simulación en HFSS.

Para 3.5 GHz se muestra una resonancia omnidireccional total en donde la máxima radiación se centra en toda la antenna hasta llegar a los extremos superiores e inferiores, su ganancia es de 3.4 dB.



*Ilustración 4.7. Diagramas de radiación en 3D simulados a 3.5 GHz.*

Para 5 GHz se muestra una resonancia omnidireccional total en donde la máxima radiación se centra en toda la antenna hasta llegar a los extremos superiores e inferiores, su ganancia es de 3.7 dB.



*Ilustración 4.8. Diagramas de radiación en 3D simulados a 5 GHz.*

### 4.1.3 Ganancias

Para realizar la medición de las ganancias se empleó el mismo método que para los diagramas de radiación en 2D, el método de las dos antenas [28] como se muestra en la ilustración 4.9.

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 ( $m$ )
- $\lambda$  = longitud de la onda ( $m$ )

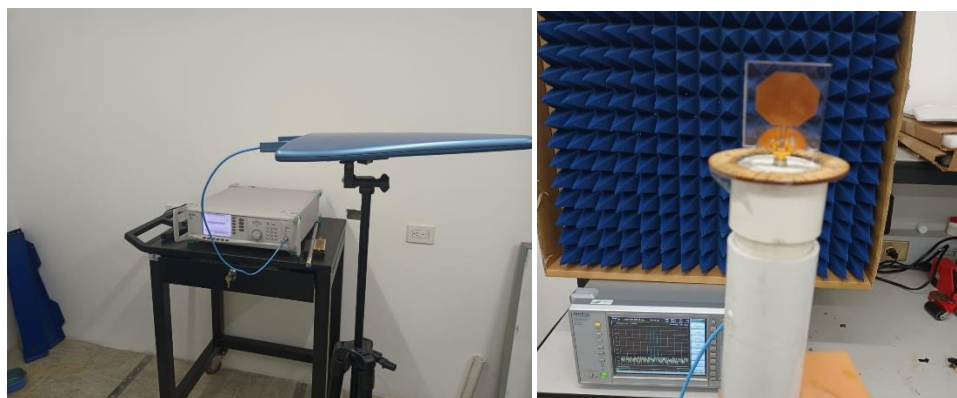
Con la ecuación 4.1 se obtiene la ganancia medida:

$$G_{or} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) - G_{ot} \quad (4.1)$$

El generador de funciones se conectó directamente al analizador de espectros para determinar las pérdidas de los cables. Se descubrió que el cable transmisor tenía una pérdida de -1.8 dB, mientras que el cable receptor tenía una pérdida de -2.4 dB; por lo tanto, el nivel de potencia del generador de funciones se estableció a 1.8 dBm para garantizar que la antena emitiera una potencia de ganancia igual a 0 dBm. La potencia del analizador de espectros se suma a las pérdidas del cable Rx.

- $G_{ot} = 4 \text{ dB (3.5 GHz)}, 3.8 \text{ dB (5GHz)}$  (depende de la frecuencia a la que se trabaje, más información accede a la hoja de especificaciones [35])
- $P_t = 0.001 \text{ W}$
- $P_r = 2.51 \times 10^{-7} \text{ W (3.5 GHz)}, 1.58 \times 10^{-7} \text{ W (5 GHz)}$
- $R = 0.8 \text{ m (3.5 GHz)}, 0.8 \text{ m (3.5 GHz)}$
- $\lambda = 0.085 \text{ m (3.5 GHz)}, 0.06 \text{ m (5GHz)}$

Los resultados se presentan en la tabla 4-2, para las frecuencias de 3.5 GHz y 5GHz, se comparan con los resultados simulados en los diagramas de radiación en 3D. Las ganancias obtenidas de forma experimental fueron menores con respecto a las ganancias simuladas, con una diferencia entre 1.04 dB- 1.95 dB.



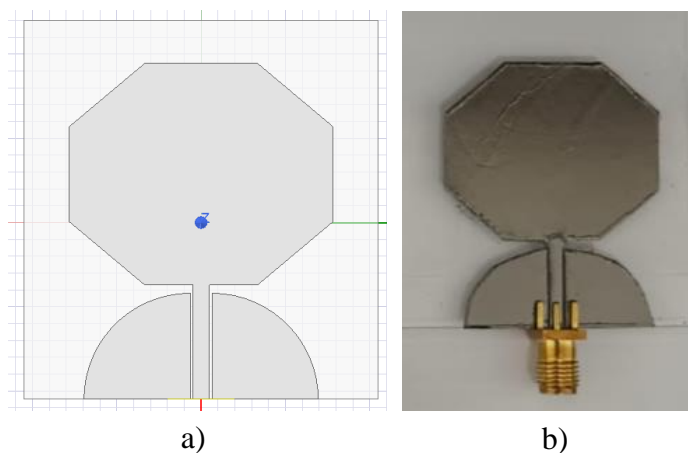
*Ilustración 4.9. Medición de la ganancia en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.*

<b>Frecuencia</b>	<b>3.5 GHz</b>	<b>5 GHz</b>
<b>Simulación (dB)</b>	3.4 dB	3.7 dB
<b>Medido (dB)</b>	1.45 dB	2.66 dB

*Tabla 4-2. Comparación de las ganancias medidas y simuladas en 3.5 GHz y 5 GHz.*

## 4.2 Antena elemental de grafeno

En la ilustración 4.10 se compara el diseño de la antena de cinta de cobre simulada y la construida.



*Ilustración 4.10. Comparación del diseño de la antena elemental de grafeno: a) diseñada en HFSS, b) construida.*

### 4.2.1 Coeficientes de reflexión

Para la caracterización del coeficiente de reflexión, al igual que la antena elemental de cobre primero se obtuvo por medio de simulación el parámetro  $S_{11}$  que es la reflexión de energía alimentada al mismo puerto, es decir, del puerto 1 y se procedió con la obtención experimental como en la ilustración 4.11.



*Ilustración 4.11. Medición del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.*

Se presenta la comparación del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  entre la simulación en HFSS y lo recabado del VNA y el resultado se presenta en la ilustración 4.12. Se puede analizar que el parámetro  $S_{11}$  simulado para la banda de 3.5 GHz es de  $-17.6$  dB mientras que el parámetro  $S_{11}$  medido es de  $-16.7$  dB. En la frecuencia de 5 GHz el parámetro  $S_{11}$  simulado es de  $-18.4$  dB mientras que el parámetro  $S_{11}$  medido es de  $-15.9$  dB.

Para el coeficiente de reflexión de la antena simulada se observa un ancho de banda de 7.8 GHz (2.46 GHz a 10.26 GHz), mientras que para la antena construida el coeficiente de reflexión se observa con un ancho de banda de 8.3 GHz (2.7 GHz a 11 GHz), lo que se traduce como que la antena resuena en esos rangos de frecuencia. En la tabla 4-3 se plasman de manera más ordenada las comparaciones descritas.

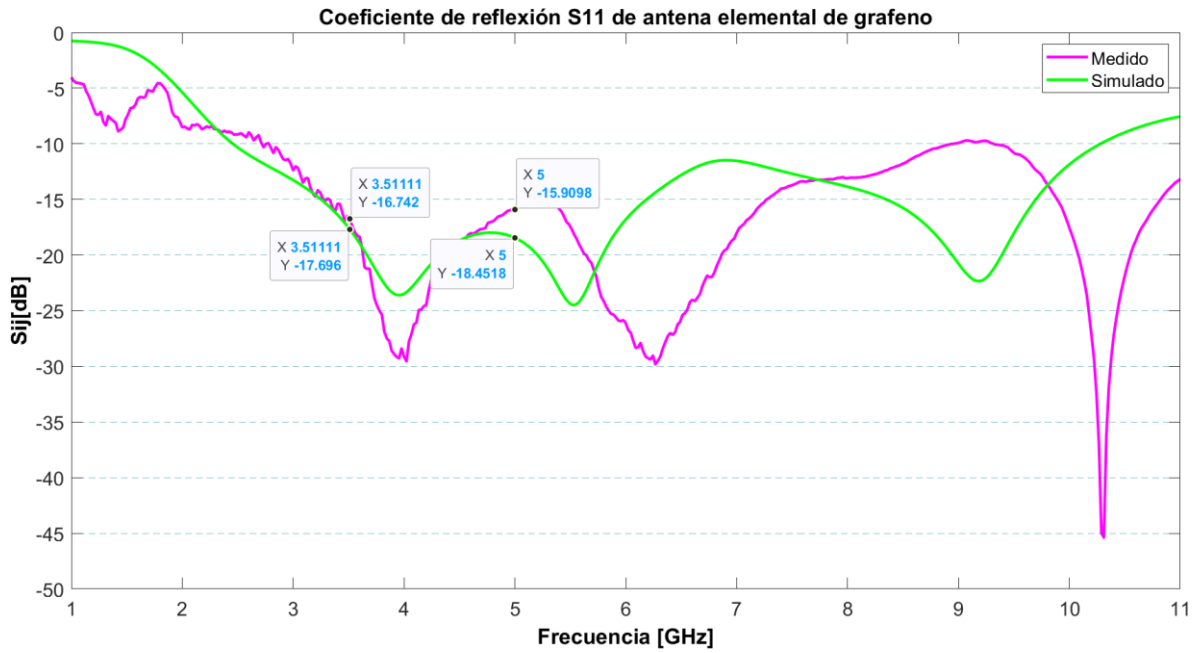


Ilustración 4.12. Comparación del coeficiente de reflexión en  $S_{11}$  de la simulación en HFSS y medición en VNA.

<i>Antena elemental de cinta de grafeno</i>				
General	Simulado		Medido	
Ancho de banda	7.8 GHz		8.3 GHz	
Específico	3.5 GHz		5 GHz	
Respuesta	Simulado	Medido	Simulado	Medido
Frecuencia	3.5 GHz	3.5 GHz	5 GHz	5 GHz
dB	-17.6 dB	-16.7 dB	-18.4 dB	-15.9 dB

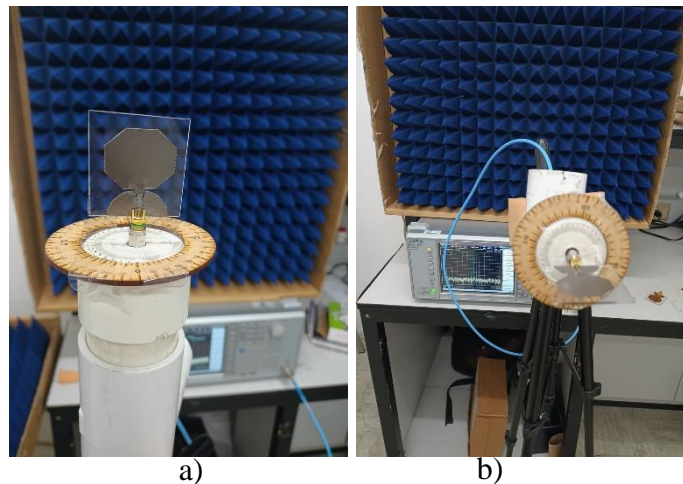
Tabla 4-3. Comparación de las frecuencias de resonancia medidas, simuladas y el coeficiente de reflexión.

## 4.2.2 Diagramas de radiación

Se compararán los diagramas de radiación de la antena elemental de cinta de grafeno entre lo simulado y lo medido, estos diagramas se dividirán en 2D y 3D, se analizarán conforme a sus frecuencias (3.5 GHz o 5 GHz) y su posición  $\phi = 0^\circ$  y  $\theta = 0^\circ$ . Los resultados se grafican en el programa MATLAB.

### 4.2.2.1 2D

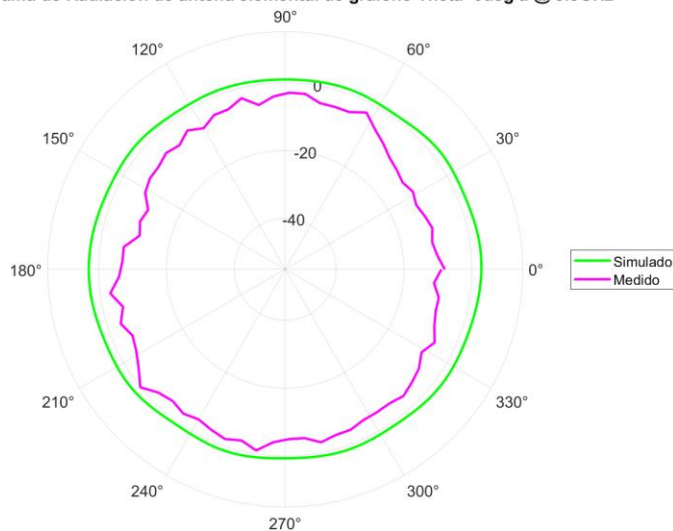
Las mediciones se realizaron en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE. Para obtener estos diagramas se empleó el método de las dos antenas [28] la cual ya ha sido descrita para la antena elemental de cinta de cobre. La antena receptora se estará rotando cada  $5^\circ$  partiendo de  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  en la posición,  $\phi = 0^\circ$  (antena acostada) y  $\theta = 0^\circ$  (antena parada), como en la figura 4.13.



*Ilustración 4.13. Posiciones de antena para diagrama de radiación en 2D. a)  $\theta = 0^\circ$  b)  $\phi = 0^\circ$*

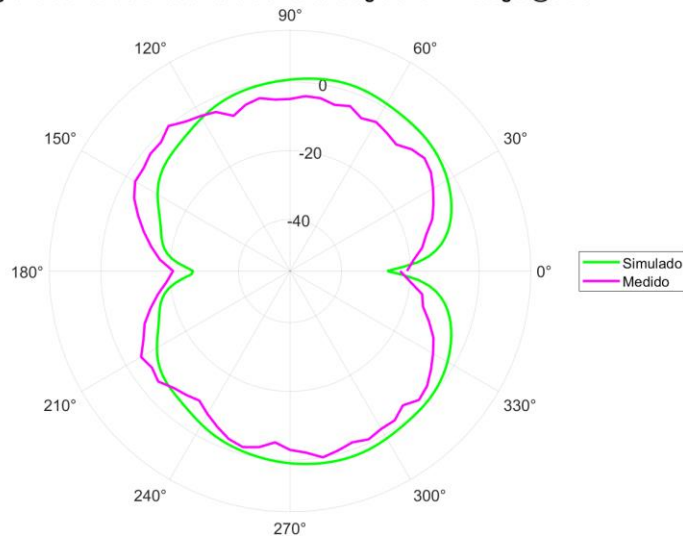
En la figura 4.14, se comparan los diagramas de radiación en 2D simulados y medidos en la frecuencia de 3.5 GHz en el plano H y el plano E, para cada una de las posiciones.

Diagrama de Radiación de antena elemental de grafeno Theta=0deg a @ 3.5GHz



a)

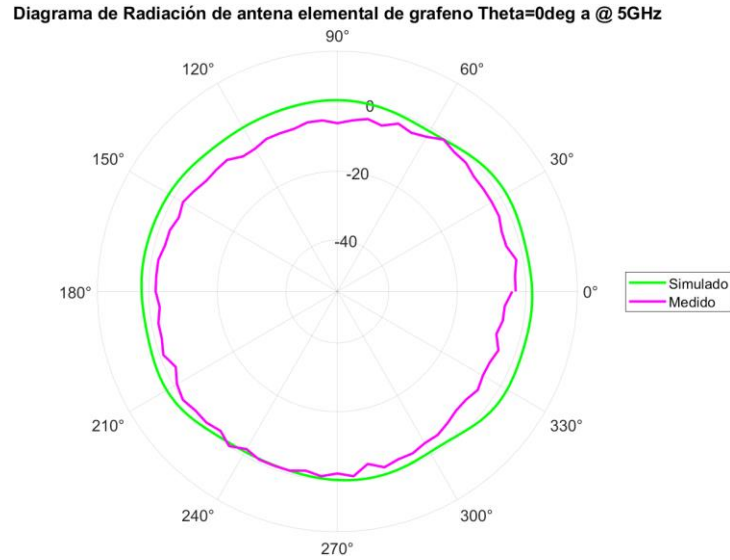
Diagrama de Radiación de antena elemental de grafeno Phi=0deg a @ 3.5GHz



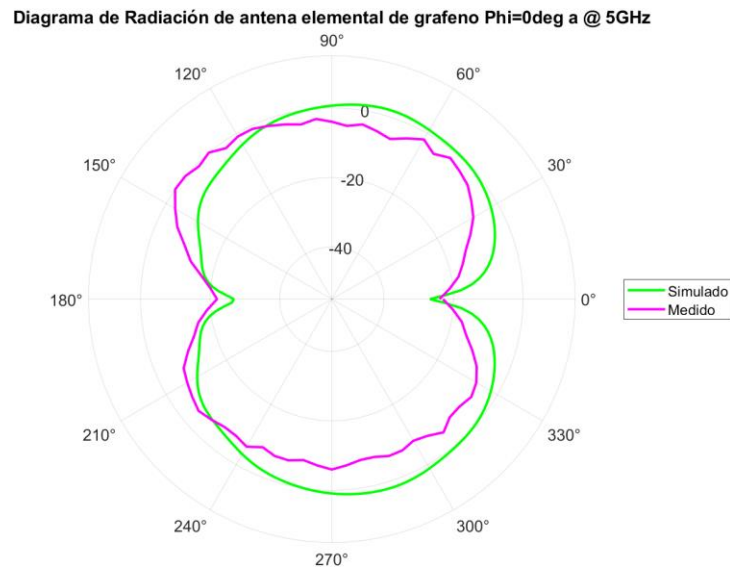
b)

Ilustración 4.14. Diagramas de radiación 2D simulados y medidos a 3.5 GHz. a) Plano H,  $\theta = 0^\circ$ , b) Plano E  $\phi = 0^\circ$ .

En la figura 4.15, se comparan los diagramas de radiación en 2D simulados y medidos en la frecuencia de 5 GHz en el plano H y el plano E, para cada una de las posiciones.



a)



b)

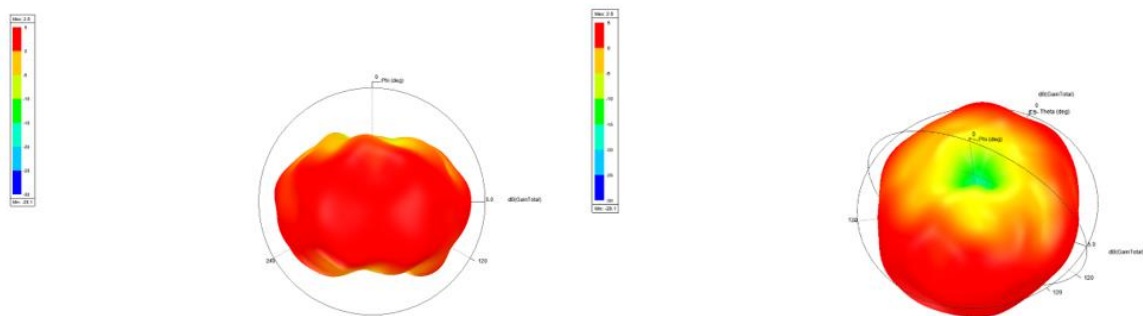
*Ilustración 4.15. Diagramas de radiación 2D simulados y medidos a 5 GHz. a) Plano H,  $\theta = 0^\circ$ , b) Plano E  $\phi = 0^\circ$ .*

Las variaciones que existen en las mediciones del diagrama de radiación en 2D se deben a la incertidumbre presentada debido a que las mediciones no se realizaron en un ambiente controlado.

#### 4.2.2.2 3D

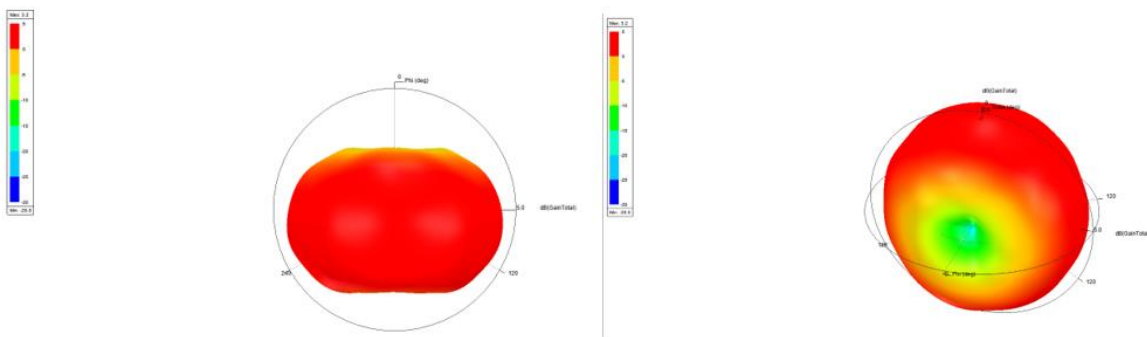
Se muestra los diagramas de radiación en 3D en las frecuencias de 3.5 GHz y 5 GHz únicamente en simulación en HFSS.

Para 3.5 GHz se muestra una resonancia omnidireccional total en donde la máxima radiación se centra en toda la antena hasta llegar a los extremos superiores e inferiores, su ganancia es de 2.6 dB.



*Ilustración 4.16. Diagramas de radiación en 3D simulados a 3.5 GHz.*

Para 5 GHz se muestra una resonancia omnidireccional total en donde la máxima radiación se centra en toda la antena hasta llegar a los extremos superiores e inferiores, su ganancia es de 3.2 dB.



*Ilustración 4.17. Diagramas de radiación en 3D simulados a 5 GHz.*

### 4.2.3 Ganancias

Para realizar la medición de las ganancias se empleó el mismo método que para los diagramas de radiación en 2D, el método de las dos antenas [28] como se muestra en la ilustración 4.18. Los parámetros necesarios para hacer la medición de la ganancia son los mismos que se describieron para la antena elemental de cinta de cobre.

Se retoma la ecuación 4.1 para calcular la ganancia medida:

$$G_{or} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) - G_{ot} \quad (4.1)$$

El generador de funciones se conectó directamente al analizador de espectros para determinar las pérdidas de los cables. Se descubrió que el cable transmisor tenía una pérdida de -1.8 dB, mientras que el cable receptor tenía una pérdida de -2.4 dB; por lo tanto, el nivel de potencia del generador de funciones se estableció a 1.8 dBm para garantizar que la antena emitiera una potencia de ganancia igual a 0 dBm. La potencia del analizador de espectros se suma a las pérdidas del cable Rx.

- $G_{ot} = 4 \text{ dB (3.5 GHz)}, 3.8 \text{ dB (5GHz)}$  (depende de la frecuencia a la que se trabaje, más información accede a la hoja de especificaciones [35])
- $P_t = 0.001 \text{ W}$
- $P_r = 1.58 \times 10^{-7} \text{ W (3.5 GHz)}, 1 \times 10^{-7} \text{ W (5 GHz)}$
- $R = 1 \text{ m (3.5 GHz)}, 1 \text{ m (5 GHz)}$
- $\lambda = 0.085 \text{ m (3.5 GHz)}, 0.06 \text{ m (5GHz)}$

Los resultados se presentan en la tabla 4-4, para las frecuencias de 3.5 GHz y 5GHz, se comparan con los resultados simulados en los diagramas de radiación en 3D. Las ganancias obtenidas de forma experimental fueron menores con respecto a las ganancias simuladas, con una diferencia entre 0.58 dB- 1.22 dB.



*Ilustración 4.18. Medición de la ganancia en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.*

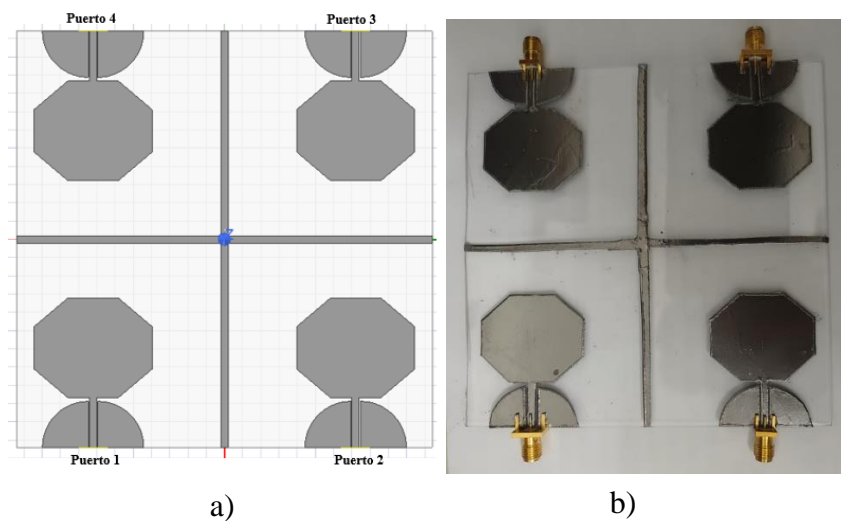
Frecuencia	3.5 GHz	5 GHz
Simulación (dB)	2.6 dB	3.2 dB
Medido (dB)	1.38 dB	2.62 dB

*Tabla 4-4. Comparación de las ganancias medidas y simuladas en 3.5 GHz y 5 GHz.*

### 4.3 Antena MIMO de 4 puertos de grafeno

Se han obtenido las caracterizaciones y mediciones de las antenas elementales y se obtuvieron respuestas satisfactorias, por lo tanto, se procede al análisis de las mediciones y caracterizaciones del objetivo principal, la antena MIMO de 4 puertos.

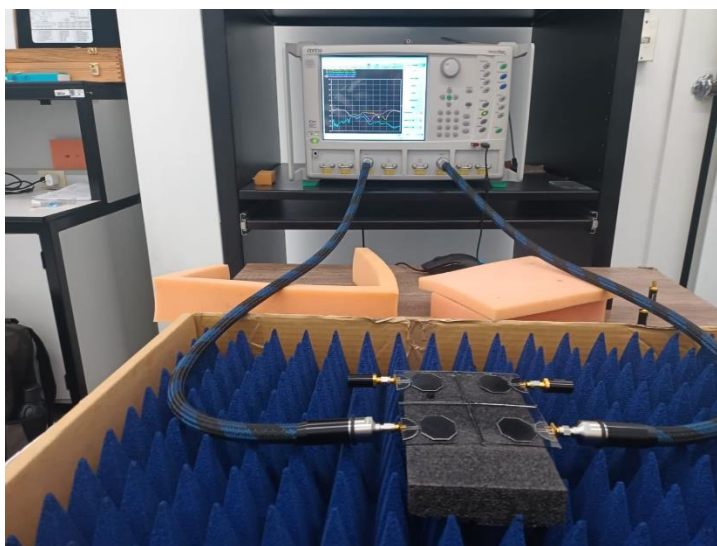
En la ilustración 4.19 se compara el diseño de la antena de cinta de cobre simulada y la construida.



*Ilustración 4.19. Comparación del diseño de la antena MIMO de 4 puertos: a) diseñada en HFSS, b) construida*

### 4.3.1 Coeficientes de reflexión

Para la caracterización de los coeficientes de reflexión, al igual que las antenas elementales, primero se obtuvo por medio de simulación los parámetros  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$  y  $S_{44}$  que son la reflexión de energía alimentada al mismo puerto, es decir, la reflexión del puerto 1 alimentada del mismo puerto 1, la reflexión del puerto 2 alimentada del mismo puerto 2, la reflexión del puerto 3 alimentada del mismo puerto 3 y la reflexión del puerto 4 alimentada del mismo puerto 4 y se procedió con la obtención experimental como en la ilustración 4.20.



*Ilustración 4.20. Medición de los coeficientes de reflexión en el Laboratorio De Caracterización En Sistemas Basados En Microondas FCE.*

Se presenta la comparación del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  entre la simulación en HFSS y lo recabado del VNA y el resultado se presenta en la ilustración 4.21 y 4.22. Se puede analizar que el parámetro  $S_{11}$  simulado para la banda de 3.5 GHz es de  $-19.9$  dB mientras que el parámetro  $S_{11}$  medido es de  $-12.9$  dB. En la frecuencia de 5 GHz el parámetro  $S_{11}$  simulado es de  $-20$  dB mientras que el parámetro  $S_{11}$  medido es de  $-11.7$  dB.

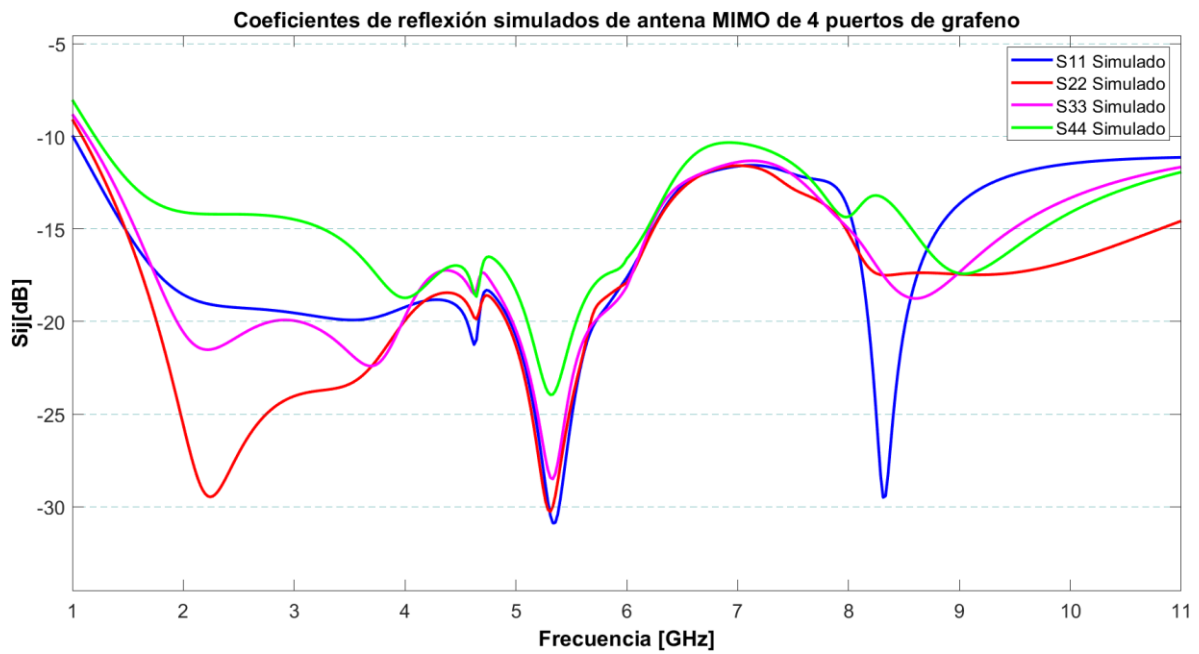
La comparación del coeficiente de reflexión  $S_{22}$  entre la simulación en HFSS y lo recabado del VNA, se puede analizar que el parámetro  $S_{22}$  simulado para la banda de 3.5 GHz es de  $-23.2$  dB mientras que el parámetro  $S_{22}$  medido es de  $-12$  dB. En la frecuencia de 5 GHz el parámetro  $S_{22}$  simulado es de  $-20$  dB mientras que el parámetro  $S_{22}$  medido es de  $-15.9$  dB.

La comparación del coeficiente de reflexión  $S_{33}$  entre la simulación en HFSS y lo recabado del VNA, se puede analizar que el parámetro  $S_{33}$  simulado para la banda de 3.5 GHz es de  $-21.7 \text{ dB}$  mientras que el parámetro  $S_{33}$  medido es de  $-17 \text{ dB}$ . En la frecuencia de 5 GHz el parámetro  $S_{22}$  simulado es de  $-20 \text{ dB}$  mientras que el parámetro  $S_{33}$  medido es de  $-15.3 \text{ dB}$ .

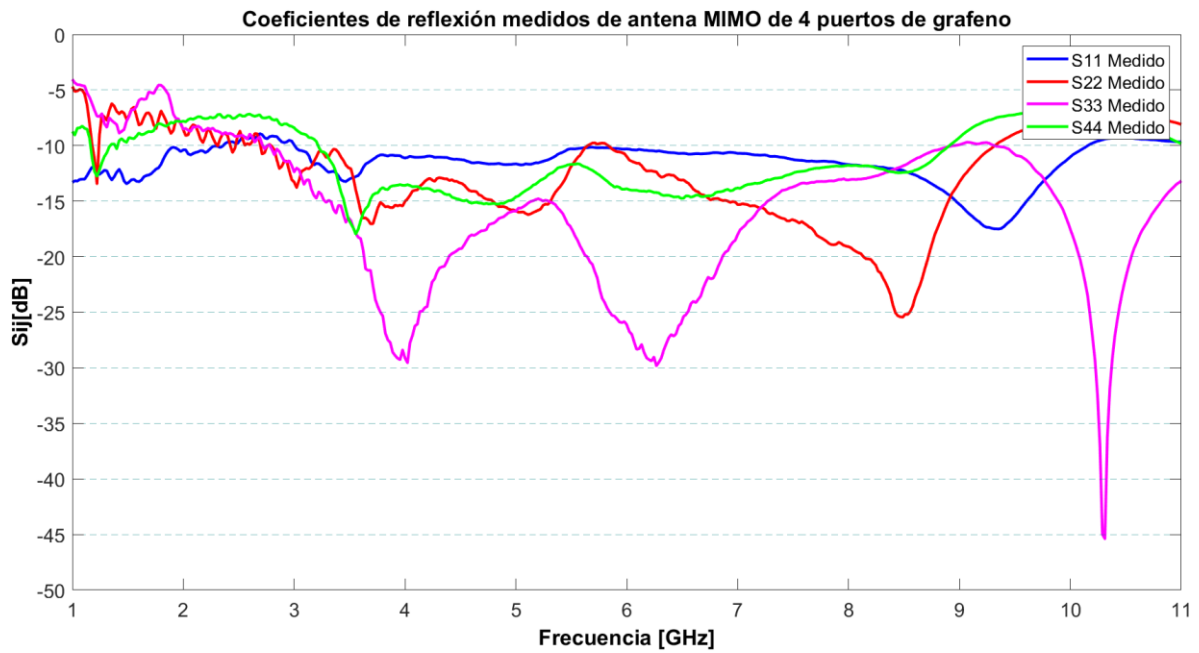
Y, por último, la comparación del coeficiente de reflexión  $S_{44}$  entre la simulación en HFSS y lo recabado del VNA, se puede analizar que el parámetro  $S_{44}$  simulado para la banda de 3.5 GHz es de  $-15.9 \text{ dB}$  mientras que el parámetro  $S_{44}$  medido es de  $-17 \text{ dB}$ . En la frecuencia de 5 GHz el parámetro  $S_{44}$  simulado es de  $-19.7 \text{ dB}$  mientras que el parámetro  $S_{44}$  medido es de  $-14.5 \text{ dB}$ .

Para los coeficientes de reflexión de la antenna simulada se observa un ancho de banda en  $S_{11}$  es de 10 GHz (1 GHz a 11 GHz), mientras que para la antenna construida es de 7.78 GHz (2.35 GHz a 10.13 GHz), el ancho de banda para la antenna simulada en  $S_{22}$  es de 9.92 GHz (1.08 GHz a 11 GHz), mientras que para la antenna construida es de 6.5 GHz (2.8 GHz a 9.3 GHz), el ancho de banda para la antenna simulada en  $S_{33}$  es de 9.85 GHz (1.15 GHz a 11 GHz), mientras que para la antenna construida es de 8.2 GHz (2.8 GHz a 11 GHz) y el ancho de banda para la antenna simulada en  $S_{44}$  es de 9.78 GHz (1.22 GHz a 11 GHz), mientras que para la antenna construida es de 5.58 GHz (3.22 GHz a 8.8 GHz).

Por lo que, la antenna construida resuena en esos rangos de frecuencia cada uno de sus respectivos puertos. En la tabla 4-5 y 4-6 se plasman de manera más ordenada las comparaciones descritas.



*Ilustración 4.21. Coeficientes de reflexión de la antena simulada.*



*Ilustración 4.22. Coeficientes de reflexión de la antena construida.*

Antena MIMO de 4 puertos de grafeno (dBs)								
Frecuencias	3.5 GHz				5 GHz			
Coefficientes de reflexión	$S_{11}$	$S_{22}$	$S_{33}$	$S_{44}$	$S_{11}$	$S_{22}$	$S_{33}$	$S_{44}$
dB Simulados	-19.9 dB	-23.3 dB	-21.7 dB	-15.9 dB	-20 dB	-20 dB	-20 dB	-19.7 dB
dB Medidos	-12.9 dB	-12 dB	-17 dB	-17 dB	-11.7 dB	-15.9 dB	-15.6 dB	-14.5 dB

Tabla 4-5. Comparación de los coeficientes de reflexión en 3.5 GHz y en 5GHz.

Antena MIMO de 4 puertos de grafeno (ancho de banda (WB))				
Coefficientes de reflexión	$S_{11}$	$S_{22}$	$S_{33}$	$S_{44}$
WB Simulados	10 GHz	9.92 GHz	9.85 GHz	9.78 GHz
WB Medidos	7.8 GHz	6.5 GHz	8.2 GHz	5.58 GHz

Tabla 4-6. Comparación de los anchos de banda en cada parámetro S.

### 4.3.2 Coeficientes de transmisión

A continuación, se presentarán los coeficientes de transmisión que son los que definirán el acoplamiento que existen entre los puertos, se recuerda que lo esperado es que esté por debajo de los  $-20$  dB ya que se puede interpretar que la antena tiene una transmisión de energía de máximo 1% por lo que el desacoplamiento entre los puertos se puede ver garantizado.

Esta sección se dividirá en 4 partes, cada una representará un puerto diferente, esto para realizar un mejor análisis de cómo se comporta cada puerto con respecto al resto.

### 4.3.2.1 Puerto 1

Se comienza con el análisis del puerto 1, se mostrará las gráficas en las ilustraciones 4.23 y 4.24, los coeficientes  $S_{21}$  (transmisión de energía desde el puerto 2 hacia el puerto 1),  $S_{31}$  (transmisión de energía desde el puerto 3 hacia el puerto 1) y  $S_{41}$  (transmisión de energía desde el puerto 4 hacia el puerto 1).

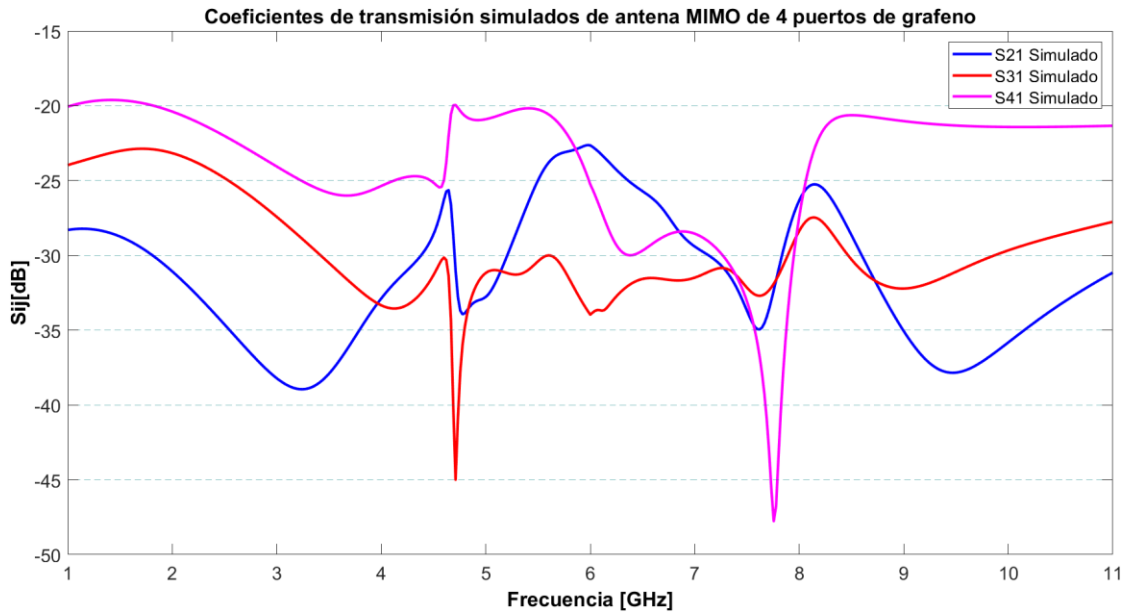


Ilustración 4.23. Coeficientes de transmisión simulados de puerto 1.

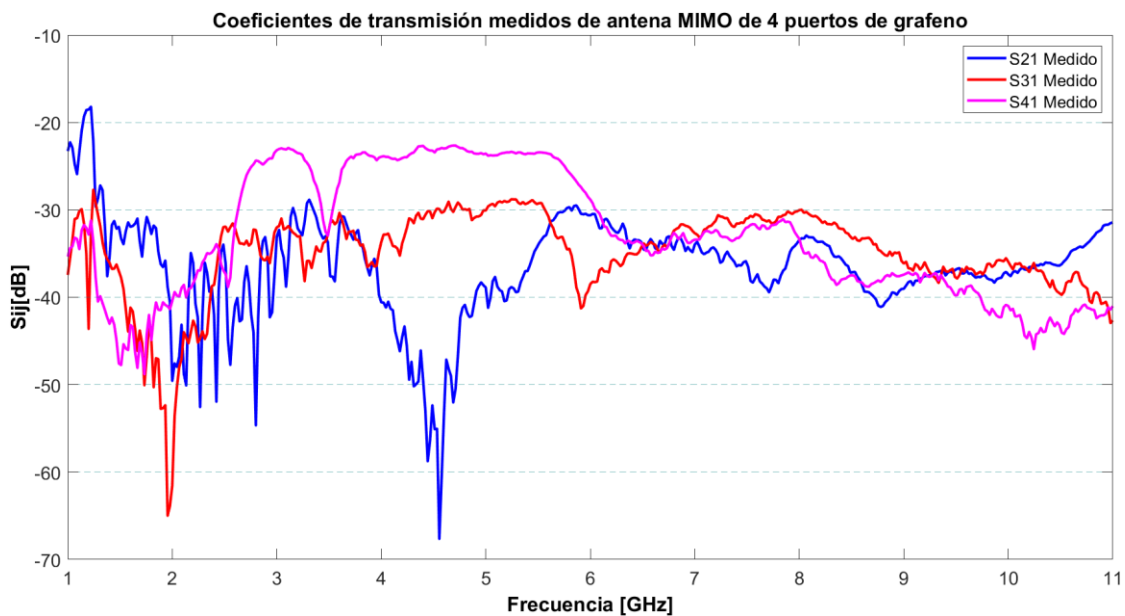


Ilustración 4.24. Coeficientes de transmisión medidos de puerto 1.

En ambos resultados es evidente que los coeficientes de transmisión cumplen con la regla de estar por debajo de los  $-20\text{ dB}$ , en todo el ancho de banda de 1 GHz hasta los 11 GHz a excepción de un punto en  $1.44\text{ GHz}$  con  $-19.6\text{ dB}$  de el parámetro  $S_{41}$  en la gráfica de los resultados simulados y otro punto en  $1.22\text{ GHz}$  con  $-18.2\text{ dB}$  del parámetro  $S_{21}$  en la gráfica de los resultados medidos.

Con estos resultados se puede decir que el puerto 2, 3 y 4 están desacoplados con el puerto 1.

#### 4.3.2.2 Puerto 2

Se continua con el análisis del puerto 2, se mostrará las gráficas en las ilustraciones 4.25 y 4.26, los coeficientes  $S_{12}$  (transmisión de energía desde el puerto 1 hacia el puerto 2),  $S_{32}$  (transmisión de energía desde el puerto 3 hacia el puerto 2) y  $S_{42}$  (transmisión de energía desde el puerto 4 hacia el puerto 2).

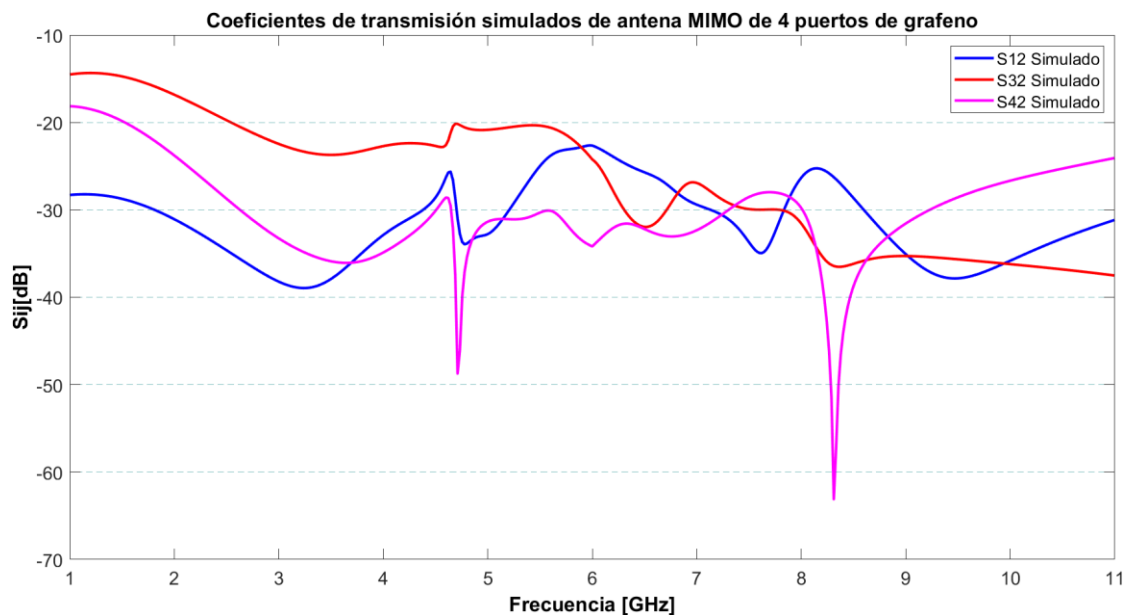
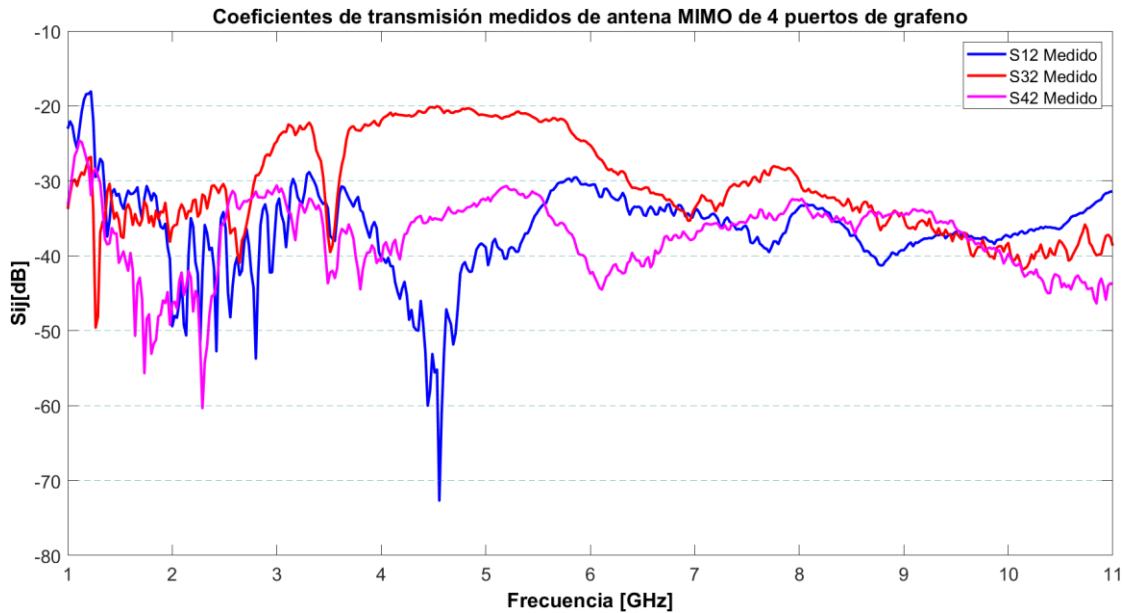


Ilustración 4.25. Coeficientes de transmisión simulados de puerto 2.



*Ilustración 4.26. Coeficientes de transmisión medidos de puerto 2.*

En los resultados de la gráfica de los coeficientes de transmisión simulados se tiene al parámetro  $S_{32}$  con un ancho de banda de 8.5 GHz (2.5 GHz a 11 GHz) que está por debajo de los  $-20\text{ dB}$  y el parámetro  $S_{42}$  con un ancho de banda de 9.5 GHz (1.5 GHz a 11 GHz) que cumple con la misma condición y  $S_{12}$  cumple en todo el ancho de banda de 10 GHz, mientras que para el parámetro  $S_{12}$  en la gráfica de los resultados medidos se tiene un punto en  $1.22\text{ GHz}$  con  $-18.2\text{ dB}$  y  $S_{32}$  junto con  $S_{42}$  cumplen en todo el ancho de banda de 10 GHz.

Con estos resultados se puede decir que el puerto 1, 3 y 4 están desacoplados con el puerto 2 en los rangos de frecuencia mencionados.

#### **4.3.2.3 Puerto 3**

Luego se prosigue con el análisis del puerto 3, se mostrará las gráficas en las ilustraciones 4.27 y 4.28, los coeficientes  $S_{13}$  (transmisión de energía desde el puerto 1 hacia el puerto 3),  $S_{23}$  (transmisión de energía desde el puerto 2 hacia el puerto 3) y  $S_{43}$  (transmisión de energía desde el puerto 4 hacia el puerto 3).

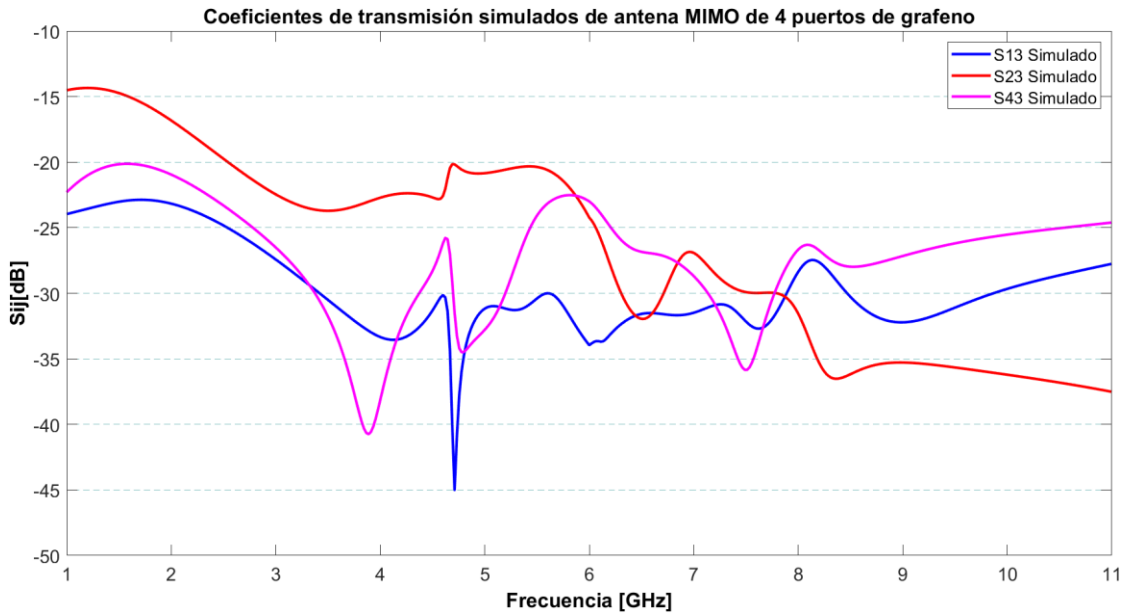


Ilustración 4.27. Coeficientes de transmisión simulados de puerto 3.

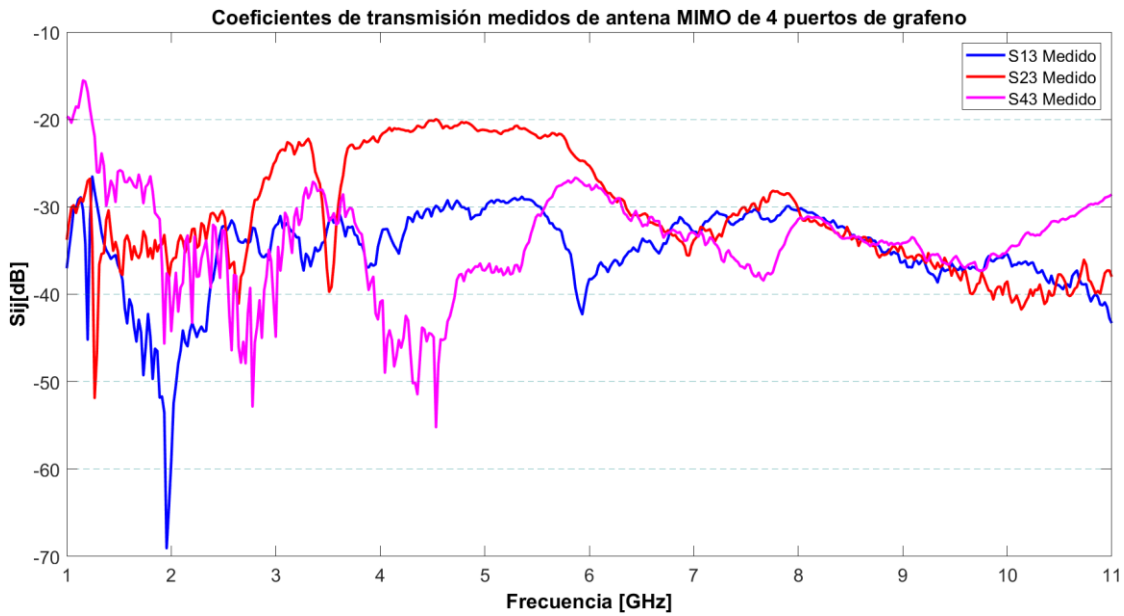


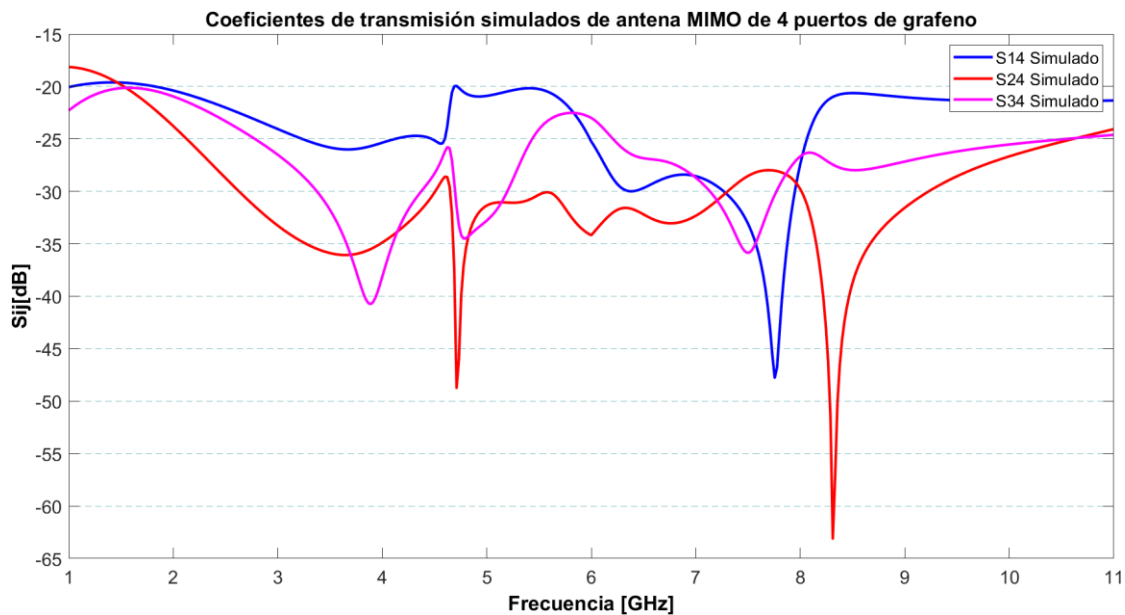
Ilustración 4.28. Coeficientes de transmisión medidos de puerto 3.

En los resultados de la gráfica de los coeficientes de transmisión simulados se tiene al parámetro  $S_{23}$  con un ancho de banda de 8.5 GHz (2.5 GHz a 11 GHz) que está por debajo de los  $-20$  dB, por otro lado,  $S_{13}$  y  $S_{43}$  cumplen en todo el ancho de banda de 10 GHz, mientras que para el parámetro  $S_{43}$  en la gráfica de los resultados medidos se tiene un punto en 1.15 GHz con  $-15.5$  dB,  $S_{13}$  y  $S_{23}$  cumplen en todo el ancho de banda de 10 GHz.

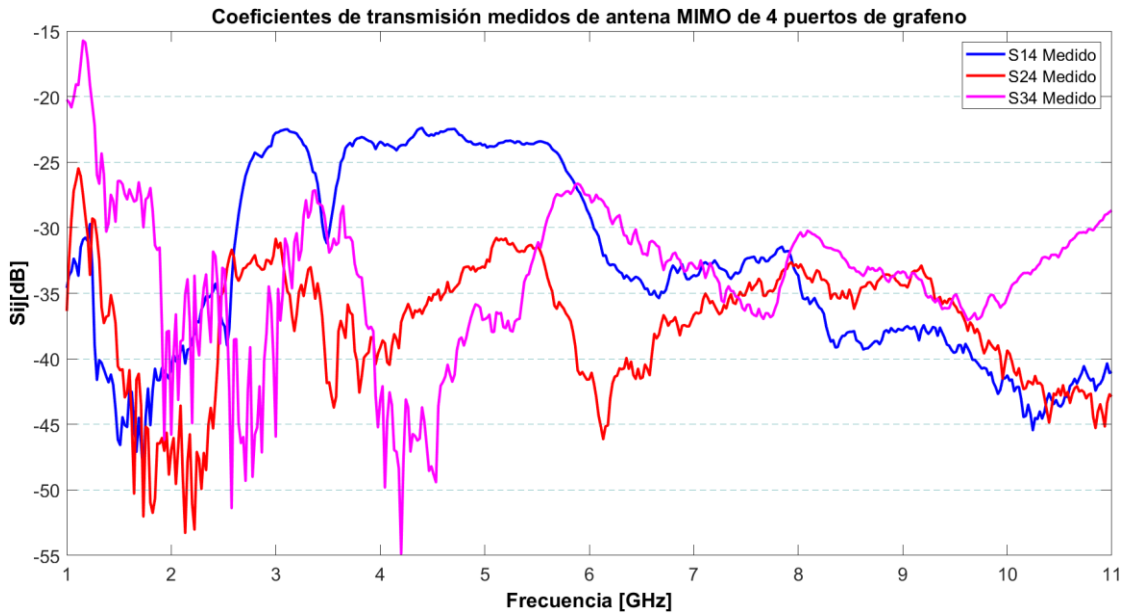
Con estos resultados se puede decir que el puerto 1, 2 y 4 están desacoplados con el puerto 3 en los rangos de frecuencia mencionados.

#### 4.3.2.4 Puerto 4

Y por último el análisis del puerto 4, se mostrará las gráficas en las ilustraciones 4.29 y 4.30, los coeficientes  $S_{14}$  (transmisión de energía desde el puerto 1 hacia el puerto 4),  $S_{24}$  (transmisión de energía desde el puerto 2 hacia el puerto 4) y  $S_{34}$  (transmisión de energía desde el puerto 3 hacia el puerto 4).



*Ilustración 4.29. Coeficientes de transmisión simulados de puerto 4.*



*Ilustración 4.30. Coeficientes de transmisión medidos de puerto 4.*

En los resultados de la gráfica de los coeficientes de transmisión simulados se tiene al parámetro  $S_{14}$  con un ancho de banda de 9.2 GHz (1.8 GHz a 11 GHz) que está por debajo de los  $-20$  dB y el parámetro  $S_{24}$  con un ancho de banda de 9.5 GHz (1.5 GHz a 11 GHz) que cumple con la misma condición y  $S_{34}$  cumple en todo el ancho de banda de 10 GHz, mientras que para el parámetro  $S_{34}$  en la gráfica de los resultados medidos se tiene un punto en 1.15 GHz con  $-15.7$  dB y  $S_{14}$  junto con  $S_{24}$  cumplen en todo el ancho de banda de 10 GHz

Con estos resultados se puede decir que el puerto 1, 2 y 3 están desacoplados con el puerto 4 en los rangos de frecuencia mencionados.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

---

### **Introducción**

En este capítulo final se relatarán las conclusiones que se obtuvieron después de todo el proceso que ha ido describiendo desde el capítulo uno. Igualmente se hará un apartado de algunos posibles trabajos futuros en base a este trabajo de tesis.

### **5.1 Conclusiones**

Sin duda alguna las antenas MIMO llegaron para hacer grandes aportaciones al mundo tecnológico, sobre todo en el área de las comunicaciones inalámbricas como WiFi y WiMAX y las comunicaciones celulares en las cuales las antenas MIMO han mejorado sus prestaciones y estas tecnologías han revolucionado por completo el mundo de la telefonía celular, aplicaciones para IoT, aplicaciones para las Ciudades inteligentes, la comunicación vehicular y el mundo industrial y con la recién llegada de la 5G y la industria 5.0 que apoyan y modernizan la vida cotidiana del ser humano sin la búsqueda de su remplazo, si no con el objetivo de darle poder de manejo al usuario.

Por esta razón es necesario innovar en este tipo de antenas, por eso se optó en esta tesis por un diseño con un substrato transparente por su versatilidad en la adaptación en diferentes ambientes y no interfiere con las infraestructuras en las cuales podría ser implementada, en la búsqueda bibliográfica se encontraron antenas con vidrio como substrato transparente pero son frágiles y propensas a algún accidente por lo que se prefirió otro material y en este caso se escogió el plexiglass, un material que no es flexible, con diferentes grosores similares a las del vidrio y no es tan delicado como lo podría llegar a ser el vidrio.

Hablando de los materiales, también se escogió otro tipo de conductor para la construcción del elemento radiador, este material fue el grafeno ya que en diferentes sitios bibliográficos hablan de una mejora en los parámetros como el ancho de banda y la ganancia a comparación de otros materiales, es por ello que se decidió realizar una prueba con las antenas elementales incluyendo el diseño, implementación y caracterización de la antena con cinta de cobre.

En la comparación de estas antenas elementales se observa en sus respuestas de los parámetros  $S_{11}$  simulados que el coeficiente de reflexión pico de la antena de cobre es de  $-32.1 \text{ dB}$  mientras que la del grafeno es de  $-23.6 \text{ dB}$ , cuentan ambas con el mismo ancho

de banda de  $7.8\text{ GHz}$  en las respuestas de simulación, sin embargo, en la obtención experimental del parámetro  $S_{11}$  la antena de grafeno arroja un mayor ancho de banda de  $4.75\text{ GHz}$  sobre la antena de cobre, el coeficiente de reflexión pico de  $-25\text{ dB}$  es para la antena física de cobre y el coeficiente de reflexión pico de la antena física de grafeno es de  $-45\text{ dB}$ , por lo que el grafeno efectivamente mejora el ancho de banda sobre el cobre en las antenas físicas, también demostró que en las frecuencias interesadas para este trabajo la antena de grafeno cumplió con estar dentro del rango de los  $-10\text{ dB}$ , mientras que en la antena de cobre las frecuencias se recorrieron hacia la derecha.

En cuestión de los diagramas de radiación en 2D ambas antenas elementales mostraron unas respuestas aceptables, ya que los dos casos las geometrías de los patrones son similares tanto en los planos H y los planos E en ambas frecuencias deseadas en lo simulado y lo medido, cabe recalcar que estas mediciones fueron realizadas en un ambiente no controlado y con presencia de sistemas interferentes y el posicionamiento de las antenas para medir los diagramas y la ganancia fue realizado de manera manual donde la precisión del movimiento tiene una alta incertidumbre.

En cuestión de la antena MIMO de 4 puertos los parámetros S simulados presentaron coeficientes de reflexión pico de hasta  $-31\text{ dB}$ , mientras que los parámetros S medidos presentaron coeficientes de reflexión pico de hasta  $-45\text{ dB}$ , los decibels de las respuestas medidas en las frecuencias específicas de cada puerto se vieron disminuidos a comparación de las respuestas simuladas al igual que sus anchos de banda, esto se puede atribuir a los siguientes factores como que la fabricación fue hecha 100% a mano lo que puede aumentar la incertidumbre por el error humano, también que los puertos SMA de  $50\Omega$  hembra se intentaron asegurar ya que soldarlos no era una opción, sin embargo, estos puertos llegaban a moverse o incluso a caerse por lo que las mediciones se pudieron ver afectadas y por último las mediciones se realizaron en un ambiente no controlado y con presencia de sistemas interferentes.

Por el lado de los coeficientes de transmisión se puede expresar que las respuestas de las gráficas fueron sorprendidas ya que los puertos no se acoplaron entre ellos, en los parámetros S de la antena física se observó una mejora en comparación a lo simulado, por lo que puede decir que en este ámbito se obtuvieron respuestas bastante favorables.

Se agradece al Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por el préstamo de sus instalaciones y de su equipo que son descritos en el Apéndice A, ya que con ellos se pudo obtener todas estas respuestas experimentales con exactitud y precisión.

Por lo que se puede hacer una conclusión final de que este trabajo cumplió con todos y cada uno de sus objetivos de manera satisfactoria haciendo mención que aún hay cosas por mejorar para que futuros trabajos puedan obtener resultados extraordinarios.

## **5.2 Trabajo futuro**

Trabajos de este tipo siempre van a tener actualizaciones por realizar, innovaciones, muchas áreas de oportunidad por mejorar por toda esta evolución acelerada de la tecnología por lo que se proponen algunos trabajos futuros.

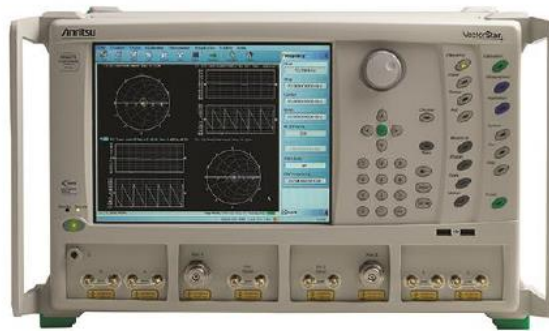
- Proponer diferentes materiales tanto en sustratos como para los elementos radiadores con la misma esencia de ser una antena MIMO con sustrato transparente.
- Si se quisiera respetar los materiales propuestos en esta tesis, se propone aumentar los puertos y analizar sus coeficientes de reflexión y transmisión.
- La obtención experimental de los diagramas de radiación en las antenas MIMO ya que en este trabajo no se pudo por falta de equipo.
- Explorar más frecuencias de las tecnologías inalámbricas y las comunicaciones celulares.
- Innovación en la geometría del monopolo de la antena elemental.
- Diferentes métodos de construcción las cuales ofrezcan más fiabilidad y exactitud para el corte del diseño de la antena si se quiere seguir manejando el material grafeno.
- Buscar formas más eficientes y certeras para asegurar los puertos SMA de  $50\Omega$  hembra a las líneas de las antenas.

## APÉNDICE A. EQUIPOS DE MEDICIÓN

---

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

El coeficiente de reflexión de cada una de las antenas mencionadas en este trabajo de tesis fue medido utilizando la eficacia de este equipo. El rango de trabajo de 70 KHz hasta 40 GHz, un rango dinámico de 142 dB y una alta potencia de +14 dBm son sus características principales. Es compatible con cuatro bucles de acceso directo y tiene dos puertos. Su uso principal es en antenas, mezcladores, convertidores de frecuencia y amplificadores. Los parámetros S, el ruido de la figura, los parámetros X y los pulsos RF son las mediciones que se realizan en el VNA.



*Ilustración A.1. Analizador vectorial de redes ANRITSU MS4644b. [11]*

### **Analizador de señales ANRITSU MS2830A**

El trabajo de este equipo fue medir la ganancia de las antenas mencionadas en este trabajo de tesis. Su rango de frecuencia va de 9 KHz a 26 GHz, y tiene un convertidor descendente de 1 GHz en el rango dinámico de 6 GHz. Contiene anchos de banda para análisis de modulación y análisis de señales de 10/31,25/62,5/125 MHz. Se utiliza para medir TOI, MC, ACP OBW, CCDF APD y otras mediciones. Algunas de sus aplicaciones están destinadas a la telefonía móvil y a otros propósitos.



*Ilustración A.2. Analizador de señales ANRITSU MS2830A. [11]*

### **Generador de señales ANRITSU MG3692C**

Esta herramienta se utilizó para generar señales a la frecuencia de resonancia de las antenas mencionadas en este trabajo de tesis. Su rango de frecuencia va de 2 GHz a 20 GHz, tiene una resolución de 0.01 Hz y un nivel de ruido de -199 dB. Contiene tanto modulación analógica (AM/FM) como modulación por pulsos.



*Ilustración A.3. Analizador de señales ANRITSU MG3692C. [11]*

## REFERENCIAS

---

1. Richard Torrealba Meléndez, Edna Iliana Tamariz, Flores Mario López-López (2023). LA ELECTRÓNICA EN LA INDUSTRIA 5.0 (Vol. 49, páginas 2–7). Spinor, BUAP.
2. Cardona Arias, J. C. (2021). Antenas multibanda de WLAN y WIMAX (Bachelor's thesis).
3. Cárdenas, F., Otáñez, J., Inga, J., Inga, E., & Ortega, A. Análisis del Rendimiento de D-BLAST MIMO sobre SDR-USRP D-BLAST MIMO Performance Analysis over SDR-USRP.
4. López-Marcos, F., Torrealba-Meléndez, R., Vasquez-Agustin, M. A., Muñoz-Pacheco, J. M., Tamariz-Flores, E. I., & Lopez-Lopez, M. (2022). A MIMO transparent antenna for FR1-5G communications. *Wireless Personal Communications*, 123(4), 3645-3660.
5. Trujillo-Flores, J. I., Torrealba-Meléndez, R., Muñoz-Pacheco, J. M., Vásquez-Agustín, M. A., Tamariz-Flores, E. I., Colín-Beltrán, E., & López-López, M. (2020). CPW-fed transparent antenna for vehicle communications. *Applied Sciences*, 10(17), 6001.
6. López-Marcos, F., Torrealba-Meléndez, R., Vasquez-Agustin, M. A., Muñoz-Pacheco, J. M., & Tamariz-Flores, E. I. (2020, noviembre). A fractal octagonal-shaped transparent antenna for C-band applications. In *2020 17th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)* (pp. 1-5). IEEE.
7. Chishti, A. R., Aziz, A., Qureshi, M. A., Abbasi, M. N., Algarni, A. M., Zerguine, A., ... & Hussain, R. (2022). Optically transparent antennas: A review of the state-of-the-art, innovative solutions and future trends. *Applied Sciences*, 13(1), 210.
8. Green, R. B., Guzman, M., Izyumskaya, N., Ullah, B., Hia, S., Pitchford, J., ... & Topsakal, E. (2019). Optically transparent antennas and filters: A smart city concept to alleviate infrastructure and network capacity challenges. *IEEE Antennas and propagation magazine*, 61(3), 37-47.

9. Morales-Centla, N., Torrealba-Meléndez, R., Tamariz-Flores, E. I., López-López, M., Arriaga-Arriaga, C. A., Muñoz-Pacheco, J. M., & Gonzalez-Diaz, V. R. (2022). Dual-Band CPW Graphene Antenna for Smart Cities and IoT Applications. *Sensors*, 22(15), 5634.
10. Tarbouch, M., El Amri, A., & Terchoune, H. (2017, April). Compact CPW-Fed microstrip octagonal patch antenna with H slot for WLAN and WIMAX applications. In 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS) (pp. 1-6). IEEE.
11. Petlachi Tochimani, Rodrigo. (2023). ANTENA FRACTAL PARA UN CUBESAT. [Tesis de licenciatura]. Benemérita Universidad autónoma de Puebla.
12. Ruiz Quevedo, Roberto. (2020). DISEÑO DE UNA ANTENA IMPRESA DE RANURA PLEGADA SINTONIZABLE. [Tesis de licenciatura]. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.
13. Ray, K. P., Pandey, M. D., & Krishnan, S. (2007). Determination of resonance frequency of hexagonal and half hexagonal microstrip antennas. *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(11), 2876-2879.
14. Prakasam, V., & Reddy, N. (2021, January). Hexagonal shaped micro-strip patch antenna design for 2.45 GHz WLAN system. In 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) (pp. 13-18). IEEE.
15. Elian Elías, Jamil. (2020). ANTENAS MIMO. [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma de Madrid.
16. Elhabchi, M., Srfi, M. N., & Touahni, R. (2018, November). A novel CPW-Fed semi-circular triangular antenna with modified ground plane for super Ultra Wide Band (UWB) applications. In 2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT) (pp. 1-5). IEEE.

17. Bahena Brito, M. Elena. (2020). DISEÑO DE UNA ANTENA PARA APLICACIONES MIMO DE BANDA ANCHA BASADA EN UNA RANURA ELÍPTICA. [Tesis de licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional.
18. Song, R., Chen, X., Jiang, S., Hu, Z., Liu, T., Calatayud, D. G., ... & He, D. (2021). A graphene-assembled film-based MIMO antenna array with high isolation for 5G wireless communication. *Applied Sciences*, 11(5), 2382.
19. Dinesh, V., & Murugesan, G. (2019). A CPW-Fed hexagonal antenna with fractal elements for UWB applications. *Applied Mathematics & Information Sciences, An International Journal*, 13(1), 73-79.
20. Avilez Rosas, D. Hernández López, O. Ortega Solís, C.L. (2008). DISEÑO DEL ENLACE PARA REDES BASADA EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.16. [Tesis de licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional.
21. Martín, M. G., & Fernández, S. M. (2006). Introducción de nuevos servicios sobre tecnologías WiFi y WiMax. *ICE, Revista de Economía*, 832. <https://revistasice.com/index.php/ICE/article/view/985/985>
22. Empresas, W. (2023). ¿Conoces la evolución del WIFI? Win Empresas. <https://winempresas.pe/blog/conoces-la-evolucion-del-wifi#strong-stylebackground-color-transparent-color-rgb0-0-0que-es-el-wifistrong>
23. ¿Qué es el grafeno? Propiedades y aplicaciones. (n.d.). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/grafeno/index.cshtml#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20el%20grafeno%20aplicado%20a>
24. Escudero, E. (2023). De la Industria 1.0 a la 5.0: una historia de la manufactura. *Ambiente Plástico*. <https://ambienteplastico.com/de-la-industria-1-0-a-5-0-una-historia-de-la-manufactura/>

25. CONFORMACIÓN DE HACES (BEAMFORMING) | IFT. (n.d.). Sensor5g.ift.org.mx.  
<https://sensor5g.ift.org.mx/beamforming>
26. MASSIVE MIMO | IFT. (n.d.). Sensor5g.ift.org.mx.  
[https://sensor5g.ift.org.mx/masive\\_mimo](https://sensor5g.ift.org.mx/masive_mimo)
27. Rojas, J. (2022). ¿Qué es el 5g, para qué sirve y cómo funciona? Telefónica.  
<https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/noticias/que-es-el-5g-y-para-que-sirve-y-como-funciona/>
28. B. Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Design, 3<sup>o</sup> Edición. New York: John Wiley & Sons Inc. 2005.
29. Las Generaciones Anteriores de Redes Móviles. (n.d.). Mobiletrans.wondershare.com  
<https://mobiletrans.wondershare.com/es/5g/g-generations.html>
30. WiFi de 2.4 Ghz vs. WiFi de 5 Ghz. (n.d.). Espanol.centurylink.com.  
<https://espanol.centurylink.com/home/help/internet/wireless/which-frequency-should-you-use.html>
31. ¿Futuro de WiMax? | Blog – Raytel Chile – Telefonía IP, Digital Signage, Redes Inalámbricas, Monitoreo y Soporte de Redes. (n.d.). Raytel.cl.  
<https://raytel.cl/blog/noticia/futuro-de-wimax>
32. em: talk - Microstrip Patch Antenna Calculator. (n.d.). Www.emtalk.com.  
<https://www.emtalk.com/mpacalc.php>
33. Tomeo Reyes, I. (2008). Aplicación de las superficies de alta impedancia al diseño de antenas de hilo de bajo perfil (Tesis de maestría).
34. Agustín Arnedo. (2012, October 22). El Grafeno: propiedades, características y aplicaciones | Blog SEAS. Blog de SEAS. <https://www.seas.es/blog/automatizacion/el-grafeno-propiedades-caracteristicas-y-aplicaciones/>

35. Aaronia AG "Logper Antennas HyperLog 70 Series - DataSheet" Versión 5.2, (2022), [https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/HyperLOG/Aaronia\\_HyperLOG\\_70\\_Logper\\_Antennas.pdf](https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/HyperLOG/Aaronia_HyperLOG_70_Logper_Antennas.pdf)