



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Maestría en Ingeniería Electrónica, opción Instrumentación Electrónica

Tesis para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Electrónica

Diseño de líneas y antenas coplanares de microondas usando grafeno

Presenta:

Ing. Nathaniel Morales Centla*

Directores:

Dr. Richard Torrealba Meléndez (FCE-BUAP)

M.C. Edna Iliana Tamariz Flores (FCC-BUAP)

Agradecimientos

A mi madre, *Félix Centla de León*, por el apoyo y ánimo constante brindado para buscar y alcanzar mis objetivos personales y profesionales.

A mis asesores, el *Dr. Richard Torrealba Meléndez* y la *MC. Edna Iliana Tamariz Flores*, por el apoyo, la paciencia y el compromiso dedicado tanto con mi proceso de aprendizaje como con el desarrollo del presente trabajo de tesis.

A estudiantes, tanto compañeros de la maestría como prestadores de servicio social del *Laboratorio de Sistemas Basados en Microondas de la FCE-BUAP*, por el apoyo que me brindaron durante la realización de esta tesis.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* por el apoyo económico para mi desarrollo profesional otorgado durante el periodo de agosto 2020 a julio 2022.

A la *Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla* por la invaluable oportunidad de cursar mi Maestría, proporcionando los medios y recursos necesarios.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, simulación y caracterización de líneas de transmisión y antenas de parche y coplanar simuladas en el rango de microondas. El material propuesto como conductor para estas simulaciones es el grafeno con una conductividad (σ) de 3700S/cm, depositado sobre un sustrato de vidrio con una constante dieléctrica (ϵ_r) de 4.5 y 5. Este se comparó con antenas y líneas de transmisión con cobre como material conductor ya que es uno de los materiales conductores más utilizados en la actualidad.

Las dimensiones de cada diseño simulado son diferentes debido a la geometría con la que se diseñó, y las frecuencias de resonancia, las cuales cubren la frecuencia de 2.45GHz y en un diseño bibanda, también la frecuencia de 5.6GHz. También se analizó el grosor de la película de grafeno a través del efecto piel, para poder saber cuál podría ser el grosor mínimo para minimizar las pérdidas por inserción. Ya con esos resultados se pudo analizar también relación que existe entre la resistencia de hoja, la conductividad eléctrica y el grosor del material.

Con todos los datos y ecuaciones presentadas, se pudo realizar la caracterización de los principales parámetros, los cuales fueron sus parámetros S, ganancia en el caso de las antenas, los anchos de banda y su directividad, los cuales son óptimos para poder fabricar las antenas de manera física y realizar una comparativa entre los valores simulados y medidos.

Índice general

Agradecimientos	2
Resumen	3
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	7
Capítulo 1 Introducción	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Objetivos.....	9
1.2.1 Objetivo General.....	9
1.2.2 Objetivos Específicos	9
1.3 Justificación	9
1.4 Descripción.....	10
Capítulo 2 Fundamentos de microondas	13
2.1 Espectro electromagnético.....	13
2.1.1 Frecuencias de transmisión.....	13
2.2 Líneas de transmisión	15
2.2.1 Ondas electromagnéticas transversales	16
2.2.4 Líneas de transmisión de conductores paralelos	18
2.2.2 Tipos de líneas de transmisión	19
2.2.5 Líneas de transmisión concéntrica o coaxial	21
2.3 Líneas de transmisión de microcinta y de cinta.....	22
2.3.1 Microcinta.....	22
2.3.2 Línea de cinta.....	24
2.4 Propagación de ondas en línea de transmisión	26
2.4.1 Factor de velocidad.....	26
2.5 Parámetros de dispersión	27
2.6 Microondas	28
2.7 Grafeno	29
2.7.1 Estructura mecánica.....	30
2.7.1.1 Propiedades mecánicas en el plano del grafeno	31

2.7.1.2 Propiedades mecánicas fuera del plano del grafeno	32
2.7.2 Estructura electrónica	33
2.7.2.1 Grafeno monocapa.....	33
2.7.2.2 Grafeno bicapa.....	34
2.8 Aplicaciones en microondas	35
2.9 Efecto piel.....	35
2.10 Relación entre resistencia de hoja, conductividad eléctrica y grosor de material	38
2.11 Conclusiones.....	42
Capítulo 3 líneas de transmisión con grafeno.....	43
3.1 Línea de Microcinta.....	43
3.2 Línea coplanar	46
3.4 Conclusiones.....	49
Capítulo 4 Antenas con grafeno	50
4.1 Antena de parche	50
4.2 Antena coplanar de banda dual.....	54
4.3 Antena coplanar Triangular	58
4.4 Conclusiones.....	63
Capítulo 5 Conclusiones y trabajo a futuro	64
5.1 Conclusiones.....	64
5.2 Trabajo a futuro	64
Referencias	65
Apéndice.....	69
A.1 “microstrip and coplanar lines with graphene”	69
A.2 “Dual-band CPW Graphene Antenna for Smart Cities and IoT Applications”	70
A.3 “Antena de microcinta con grafeno para aplicaciones en ciudades inteligentes”	71

Índice de Figuras

Figura 1- 1 Diagrama de procedimiento.....	11
Figura 2- 1 Espectro electromagnético de a) frecuencias b) longitudes de onda [18].....	13
Figura 2- 2 Ejemplo de una línea de transmisión, antena y ondas de radiación en espacio libre [2]	16
Figura 2- 3 Vistas: (a) en perspectiva; (b) transversal indicando el desplazamiento relativo en los campos E y H en una línea de transmisión [17].....	17
Figura 2- 7 Líneas de transmisión: (a) alambres desnudos; (b) conductores gemelos; (c) par trenzado; (d) par blindado [17]	19
Figura 2- 4 Sistema de transmisión diferencial o balanceado	19
Figura 2- 5 Resultados de corrientes metálicas y longitudinales en una línea de transmisión balanceada: (a) corrientes metálicas debidas a tensiones de señal; (b) intensidades longitudinales debidas a tensiones de ruido [18].....	20
Figura 2- 6 Sistema de transmisión asimétrico o desbalanceado.....	21
Figura 2- 8 líneas de transmisión concéntrica o coaxial: (a) Rígida llena de aire; (b) Línea maciza flexible [18]	22
Figura 2- 9 líneas de transmisión de microcinta: (a) desbalanceada; (b) balanceada; (c) dimensiones [18] ...	24
Figura 2- 10 línea de transmisión de cinta: (a) vista de frente y lateral; (b) dimensiones [18]	25
Figura 2- 11 Estructura atómica del grafeno [20]	30
Figura 2- 12 (a) Modos de carga comunes para materiales 3D: compresión, tensión, torsión y flexión. (b) Carga de grafeno en el plano y fuera del plano [4]	31
Figura 2- 13 (a) Esquema de experimentos de nanoindentación sobre grafeno. (b) Profundidad de sangría en función de la carga curvas [4]	31
Figura 2- 14 Ondulación controlada en monocapa de grafeno inducida por estrés térmico [4]	32
Figura 2- 15 Una vista esquemática del grafeno (a) forma de panal, (b) la primera zona de Brillouin y (c) la estructura de bandas del grafeno [7]	33
Figura 2- 16 El diagrama de bandas de energía en semiconductores y grafeno [7]	34
Figura 2- 17 Estructura electrónica y DOS para metales, semiconductores y grafeno [7]	34
Figura 2- 18 Estructura electrónica de (a) monocapa, (b) bicapa simétrica y (c) grafeno bicapa asimétrica [19]	35
Figura 2- 19 Efecto piel en un conductor δ : a mayor frecuencia, menor superficie para el flujo de corriente .	36
Figura 2- 20 Relación entre efecto piel y frecuencia angular	37
Figura 2- 21 Relación entre efecto piel y conductividad.....	38
Figura 2- 22 Respuesta de resistencia de hoja aplicando 3 grosores fijos.....	40
Figura 2- 23 Respuesta de resistencia de hoja aplicando 3 conductividades fijas.....	40
Figura 2- 24 Relación entre conductividad y resistencia de hoja.....	41
Figura 2- 25 Relación entre conductividad y grosor	41
Figura 3- 1 Diseño de línea de microcinta	44
Figura 3- 2 Coeficiente de reflexión grafeno y cobre.....	45
Figura 3- 3 Coeficiente de transmisión: grafeno, cobre.....	45
Figura 3- 4 Estructura de una línea coplanar [44]	46
Figura 3- 5 Líneas coplanares a) sin plano de tierra b) con plano de tierra [46]	46
Figura 3- 6 Diseño de línea coplanar	47
Figura 3- 7 Respuesta del coeficiente de reflexión	48
Figura 3- 8 Respuesta del coeficiente de transmisión	48

Figura 3- 9 Valores obtenidos en S11 y S21	49
--	----

Figura 4- 1 Diseño y medidas de antena de parche (unidades en mm): a) medidas de antena b) vista frontal c) vista isométrica	51
Figura 4- 2 Respuesta de Antena S11	52
Figura 4- 3 Respuesta S11 con parche modificado	52
Figura 4- 4 Ganancia de Antena dB tridimensional a 2.45GHz	53
Figura 4- 5 Diagrama de la distribución de la corriente a 2.45GHz.....	53
Figura 4- 6 Respuesta de VSWR antena de parche.....	54
Figura 4- 7 Diseño de antena banda dual [37]	54
Figura 4- 8 Diseño de antena banda dual con grafeno en HFSS.....	55
Figura 4- 9 Respuesta de S11 cobre y grafeno superpuestas	56
Figura 4- 10 Ganancia de Antena dB tridimensional a 2.45GHz	57
Figura 4- 11 Diagrama de la distribución de la corriente a) 2.45GHz b) 5.6GHz	57
Figura 4- 12 Respuesta VSWR antena bi-banda.....	58
Figura 4- 13 Dimensiones de antena triangular [39].....	59
Figura 4- 14 Diseño de antena triangular coplanar.....	60
Figura 4- 15 Respuesta de S11 cobre y grafeno superpuestas	61
Figura 4- 16 Ganancia de Antena dB tridimensional a 2.45GHz	61
Figura 4- 17 Diagrama de la distribución de la corriente	62
Figura 4- 18 Respuesta VSWR antena triangular	62

Índice de Tablas

Tabla 2- 1 Designaciones de banda CCIR	14
Tabla 2- 2 Factores de velocidad	26
Tabla 2- 3 Constantes dieléctricas	26
Tabla 2- 4 Designación de las bandas de frecuencias empleadas en microondas	29
Tabla 2- 5 Valores de efecto piel con diferentes materiales y frecuencias	36
Tabla 2- 6 Valores presentados en documentos de: conductividad, grosor, resistencia de hoja y resistividad de material grafeno	39

Tabla 3- 1 Medidas de microcinta	44
Tabla 3- 2 Valores obtenidos en S11 y S21	46
Tabla 3- 3 Medidas de línea coplanar	47

Tabla 4- 1 Respuestas en frecuencia y coeficiente de reflexión.....	53
Tabla 4- 2 Medidas de antena banda dual (mm) [37].....	55
Tabla 4- 3 Respuesta de S11 cobre y grafeno.....	56
Tabla 4- 4 valor de inset en [39]	59
Tabla 4- 5 Respuesta de S11 cobre y grafeno.....	60

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción

En la actualidad las comunicaciones inalámbricas tienen un rol importante en la vida cotidiana. La mayor parte de los sistemas de comunicaciones inalámbricas se localizan en el rango de frecuencias de microondas. Las microondas se encuentran en un rango de frecuencias entre 300 MHz (3×10^8 Hz) y 300 GHz (3×10^{11} Hz), con una longitud de onda eléctrica correspondiente entre $\lambda = c/f = 1\text{m}$ y $\lambda = 1\text{mm}$, respectivamente. [1]. En este sentido hay dispositivos activos y pasivos que operan en el rango de las microondas. Dentro de los dispositivos pasivos se destacan los siguientes: líneas de transmisión, divisores de potencia, filtros pasivos, resonadores y antenas. Las antenas son un elemento indispensable en los sistemas de comunicaciones inalámbricas. El diccionario Webster define como "un dispositivo generalmente metálico (como una varilla o un cable) para radiar o recibir ondas de relación". Otra definición que podemos mencionar para las antenas es la de IEEE (IEEE Std 145-1983)¹ la cual dice: "un medio para emitir o recibir ondas de radio". Simplificando esto la antena es una estructura entre un espacio libre y un dispositivo guía [2].

En la actualidad los dispositivos de microondas planos que se integran a los sistemas de comunicaciones inalámbricas se fabrican utilizando líneas de microcinta o coplanares. Para la fabricación de estos dispositivos, se utilizan materiales conductores con características favorables para la transmisión y baja resistencia eléctrica como el cobre, plata y oro por mencionar algunos. Además, estos dispositivos de microondas están diseñados sobre sustratos rígidos o flexibles como la fibra de vidrio, vidrio o polímeros [3].

En las últimas décadas, el grafeno se ha vuelto relevante en la investigación debido a sus propiedades eléctricas, ópticas, alta conductividad térmica y mecánicas que son únicas [4,5]. A pesar de que el grafeno se considera un material novedoso e interesante, la estructura bidimensional (2D) limita sus aplicaciones como materiales estructurales [4], pero también destaca que por estas mismas características se han desarrollado dispositivos de microondas basados en el grafeno [5,6]. La primera aplicación prevista para el grafeno fue por su propiedad de alta movilidad para electrónica de alta velocidad y trabajar en la mejora de $I_{on} = I_{off}$ para dispositivos de Radio Frecuencia (RF) [7], este material ha mostrado un adecuado desempeño en el rango de microondas. El grafeno, en el rango de frecuencia de microondas, presenta una de sus propiedades más destacadas, que es el cambio de resistividad tras la aplicación de un voltaje de polarización [6]. Sin embargo, en aplicaciones de microondas se requieren grandes áreas de grafeno [6]. Por esta razón se opta por el uso de escamas de grafeno que son más fáciles de fabricar y conservan sus propiedades resistivas ajustables y esto se aprovecha para muchos dispositivos sintonizables como atenuadores, absorbedores y otros componentes de microondas [5,6]. Debido a que el grafeno también

¹ IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vols. AP-17, No. 3, May 1969; AP-22, No. 1, January 1974; and AP-31, No. 6, Part II, November 1983.

tiene excelentes propiedades mecánicas se han realizado diferentes tipos de dispositivos planos como Divisor de potencia de nueve vías basado en escamas de grafeno, Atenuador ajustable de GCPW basado en nanoplacas de grafeno, Atenuador de filtro sintonizable basado en grafeno CVD [5]. También se han desarrollado diseños de antenas flexibles impresas [8,9]. No obstante, la conductividad de los dispositivos impresos con hojuelas de grafeno es significativamente menor que utilizar oro, plata cobre que son los principales utilizados en antenas flexibles [8,9], el uso de grafeno se ve compensado debido a su flexibilidad y resistencia a la fatiga mecánica, bajo costo y estabilidad química [9].

En esta tesis, se estudiará el comportamiento del grafeno mediante el diseño y simulación de dispositivos pasivos de microondas utilizando al grafeno como elemento conductor para ser utilizado en el sector de la Ingeniería de Microondas y Comunicaciones.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar y simular líneas de transmisión y antenas coplanares de microondas empleando grafeno como material conductor.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar líneas de transmisión.
- Analizar dispositivos pasivos de microondas con líneas de transmisión.
- Examinar las propiedades del grafeno para aplicaciones en dispositivos de microondas.
- Diseñar y simular líneas de transmisión coplanares usando grafeno y sustratos transparentes, la simulación será en un rango de 0.5 a 10 GHz.
- Diseñar y simular una antena tipo parche coplanar a que cubra la frecuencia de 2.45 GHz usando grafeno y sustratos transparentes.
- Caracterizar los diseños simulados mediante los parámetros S, impedancia de entrada y relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR).
- Analizar el impacto de grosor de la película de grafeno en los diseños.

1.3 Justificación

En los últimos años el desarrollo tecnológico ha tenido una evolución más acelerada en el campo industrial, social, etc. Debido a eso han aparecido nuevos conceptos como la I4.0, IOT y en algunas partes del mundo ya inician a manejar el concepto de I5.0. Por tal motivo surge la necesidad de innovar a la par en los dispositivos que se utilizan. Para ellos se necesitan utilizar materiales con una amplia gama de características para su fácil manipulación y bajos costos de producción en masa.

El grafeno es un tipo de material bidimensional (2D) muy delgado (0.34 nm), en los que los átomos de carbono se disponen en un panel para formar una sola capa de carbono [11, 12]. La alta movilidad de carga del grafeno produce su alta conductividad y tiene una alta

resistencia mecánica y flexibilidad [9,10, 13]. Aunque el grafeno tiene propiedades físicas excepcionales, en el ámbito de las radiofrecuencias, las investigaciones se han centrado en realizarlas en la banda de frecuencia de THz [11, 13], dejando en segundo plano la banda de frecuencia de microondas, ya que los resultados no han sido los esperados [11].

A pesar de ello se han buscado alternativas para utilizar el grafeno en dispositivos que trabajan en el rango de microondas. Uno de los procesos que ha despertado gran interés en los últimos años es la electrónica impresa, ya que, con ella se tiene una amplia gama de aplicaciones [8, 12, 14]. Tomando como tintas conductoras más utilizadas a base de metal y aunque tiene diversas ventajas, también existen desventajas notables como su alto costo (hablando de tintas de plata, oro) y esto limita la producción en masa. Otros materiales como aluminio y cobre, aunque son más económicos, su oxidación fácilmente en el ambiente hace que formen óxidos no conductores que perjudican al dispositivo para el que se emplea el material [12]. Algunos han optado por utilizar tintas híbridas metal/base carbono [14], o solamente usar tintas base carbono (grafeno) [8, 12].

Los procesos de obtención de grafeno actualmente hacen que producir tintas a base grafeno sea a un bajo costo y se puedan utilizar a gran escala. Este tipo de dispositivos impresos. Ya sea con tintas híbridas o tintas de base carbono, da la posibilidad del desarrollo de dispositivos flexibles de bajo costo [8, 12, 14]

Otro proceso que se ha estado implementado para el diseño de dispositivos con grafeno es la técnica de grafeno inducido por láser (LIG) [15], la cual es una técnica muy versátil para la inducción de grafeno poroso a partir de sustratos poliméricos. Las antenas se consideran una de las aplicaciones de la electrónica donde el grafeno juega un papel importante. El bajo costo y la alta estabilidad motivan a los investigadores a utilizar el grafeno en la fabricación de antenas [11, 12, 15].

Ya que como se mencionó anteriormente el grafeno tiene muchas aplicaciones se han enfocado para la frecuencia de THz, otro dispositivo donde también se aplica el grafeno son los filtros atenuadores sintonizables para microondas, esto gracias a la conductividad eléctrica controlable y la resistencia omnidireccional del grafeno [11, 13].

Existen diferentes tipos de diseño y fabricación para dispositivos a base grafeno como LIG [15], estructura intercalada de grafeno (GSS) [13], impresión de grafeno [2, 12, 14] por mencionar algunos, todos estos con el mismo objetivo, la utilización del grafeno en el rango de microondas.

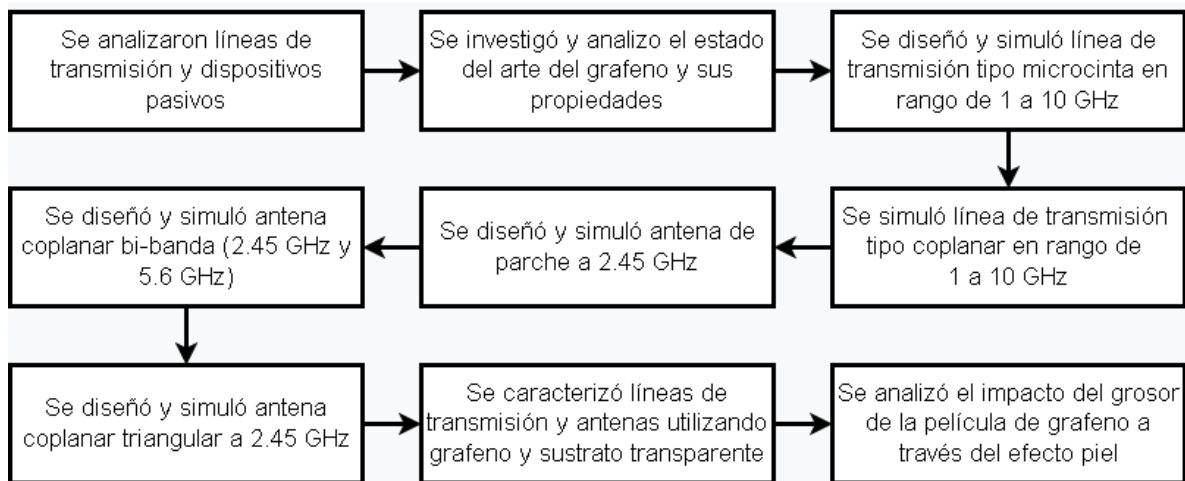
1.4 Descripción

Esta tesis inicio con el estudio y análisis de las líneas de transmisión (microondas) y los dispositivos pasivos. Así como también se realizó una investigación sobre el estado del arte del grafeno y sus propiedades mecánicas y eléctricas. Adicionalmente se investigó sobre sustratos transparentes como vidrio y polímeros, que son empleados actualmente en el diseño de dispositivos pasivos de microondas, con esto se conoció cuáles fueron los sustratos por utilizar en las simulaciones. Subsiguiente a ello, se diseñó líneas de transmisión usando el

grafeno como el elemento conductor y también el diseño de una antena de parche rectangular, una antena coplanar bi-banda y una antena coplanar triangular igualmente utilizando el grafeno como el elemento conductor.

Los diseños ya mencionados se simularon en un programa de onda completa (HFSS) en un rango de 1 a 10 GHz para las líneas de transmisión. Las antenas fueron simuladas en un rango de 1 a 3GHz en el caso de la de parche y coplanar triangular y la bi-banda se simulo de 1 a 6GHz. En estas simulaciones se obtuvieron y analizaron los siguientes parámetros: parámetros S, impedancia de entrada, VSWR, coeficiente de reflexión y ganancia en el caso de la antena. En ambos casos se efectuará un análisis paramétrico para optimizar la respuesta de los diseños.

Previamente a los diseños se analizó el impacto del grosor del grafeno y la conductividad, a esto se le llama el efecto piel y una vez obtenidos los resultados del efecto piel se obtuvo un valor mínimo de grosor para que no existirá alguna perdida por ese factor. Todo lo ya mencionado se puede visualizar simplificado en la *Figura 1- 1*



*Figura 1- 1*Diagrama de procedimiento

Los capítulos de esta tesis se describen brevemente a continuación iniciando desde el capítulo dos:

En el capítulo dos se muestra una investigación del estado del arte sobre dos temas los cuales son: líneas de transmisión y el grafeno. En las líneas de transmisión, se hizo una investigación desde el espectro electromagnético, tipos de líneas de transmisión hasta las aplicaciones en el área de microondas. Después se investigó sobre el grafeno, su estructura y propiedades particulares del material y para finalizar se describen algunas aplicaciones en el área de microondas con grafeno y sus características, que hacen destacable el uso de este material en ellas, junto que el efecto de la resistencia de hoja en el material y el efecto piel que influye en todo conductor.

En el capítulo tres se realizaron dos diseños y simulaciones de líneas de transmisión, una de microcinta y la otra coplanar. En estas se analizó el coeficiente de transmisión y coeficiente

de reflexión en el grafeno y se comparó con cobre como material conductor y así poder determinar el comportamiento de los dos materiales y ver sus diferencias.

En el capítulo cuatro se muestra el diseño y simulación de tres antenas dos de ellas coplanares y una de parche, en las cuales se utilizaron como material conductor el grafeno y de sustrato el vidrio, una de las antenas (bi-banda) se utilizó como base a [39] y se hizo un análisis paramétrico necesario para poder hacer que una de las bandas cubriera la frecuencia de 2.45GHz al igual que las otras dos. También se analizó la respuesta en su coeficiente de transmisión, el ancho de banda, su distribución de corriente en la antena, su ganancia y su relación de onda estacionaria (VSWR).

En el capítulo quinto y último se muestran las conclusiones generales de esta tesis y el trabajo a futuro que se planea realizar.

Capítulo 2 Fundamentos de microondas

En este capítulo se describen los tipos de líneas de transmisión, las microondas y sus características principales, cuáles son las propiedades del grafeno y aplicaciones de microondas con grafeno.

2.1 Espectro electromagnético

La frecuencia es el movimiento periódico de una señal durante un tiempo, esta puede ser cuadrada, senoidal de voltaje o de corriente por mencionar algunas. Un ciclo se puede describir como una inversión completa de una onda y la unidad básica de la frecuencia es el Hertz (Hz), Esto quiere decir que un Hertz es igual a un ciclo por segundo (1Hz = 1cps). En las ingenierías, en este caso la electrónica es usual utilizar prefijos para la representación de cantidades grandes de unidades. [1, 17,18] Por ejemplo, el kHz (kilo Hertz), MHz (mega Hertz), esto para indicar miles Hertz y millones de Hertz respectivamente.

2.1.1 Frecuencias de transmisión

En la Figura 2- 1 se muestra el espectro electromagnético de frecuencias, en este se la asignación bandas de servicios, que van desde las subsónicas (unos pocos Hertz) hasta los rayos cósmicos (10^{22} Hz) [18].

Este espectro se divide en bandas o subsecciones, cada una con su rango de operación y nombre. La comisión federal de comunicaciones (FCC) se encarga de las asignaciones de frecuencias para radio propagación en espectro libre. En radiofrecuencias (RF) el espectro total útil se divide en bandas, las cuales se les asignan nombres y números descriptivos, de las que algunas se dividen en diferentes tipos de servicios [17,18]. Estas bandas son designadas por el comité consultivo internacional de radio (CCIR), lo cuales se muestran en la Tabla 2- 1.

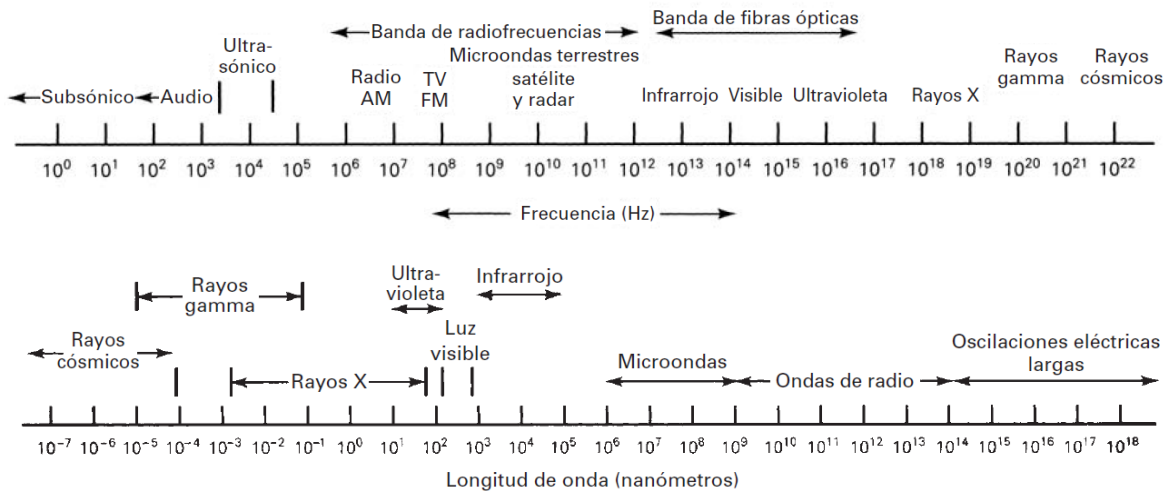


Figura 2- 1 Espectro electromagnético de a) frecuencias b) longitudes de onda [18]

Número de banda	Intervalo de frecuencias*	Designación
2	30Hz – 300Hz	ELF (frecuencias extremadamente bajas)
3	0.3kHz – 3kHz	VF (frecuencias de voz)
4	3kHz – 30kHz	VLF (frecuencias muy bajas)
5	30kHz – 300kHz	LF (bajas frecuencias)
6	300kHz – 3MHz	MF (frecuencias intermedias)
7	3MHz – 30MHz	HF (frecuencias altas)
8	30MHz – 300MHz	VHF (frecuencias muy altas)
9	300MHz – 3GHz	UHF (frecuencias ultra altas)
10	3GHz – 30GHz	SHF (frecuencias super altas)
11	30GHz – 300GHz	EHF (frecuencias extremadamente altas)
12	0.3THz – 3THz	Luz infrarroja
13	3THz – 30THz	Luz infrarroja
14	30THz – 300THz	Luz infrarroja
15	0.3PHz – 3PHz	Luz visible
16	3PHz – 30PHz	Luz ultravioleta
17	30PHz – 300PHz	Rayos X
18	0.3 EHz – 3EHz	Rayos Gama
19	3EHz – 30EHz	Rayos cósmicos
* 10 ⁰ , Hertz (Hz); 10 ³ , kiloHertz (Hz); 10 ⁶ , megaHertz (Hz); 10 ⁹ , gigaHertz (Hz); 10 ¹² , teraHertz (Hz); 10 ¹⁵ , petaHertz (Hz); 10 ¹⁸ , exaHertz (Hz)		

Tabla 2- 1 Designaciones de banda CCIR

Las frecuencias ultra altas (UHF, de ultrahigh frequencies) son aquellas que están en un rango de 300 MHz a 3 GHz. Esta banda es muy utilizada en servicios móviles de comunicaciones terrestres, teléfonos celulares, sistemas de radio por microondas y por satélite, sistemas de radar y navegación y emisión de televisión comercial. Desde el extremo inferior de esta banda se considera que es donde inicia las microondas [2, 17, 18].

Las frecuencias súper altas (SHF, por superhigh frequencies) son aquellas que están en un rango de 3 a 30 GHz. Esta es mayormente utilizada para sistemas de radiocomunicaciones por microondas y satélites [2, 17, 18].

Las frecuencias extremadamente altas (EHF, de extremely high frequencies) son aquellas que están en un rango de 30 y 300 GHz. Esta banda casi no se ocupa para radiocomunicaciones comerciales, es mayormente utilizada para aplicaciones complicadas,

costosas y especializadas. El extremo superior de esta banda se considera que es el límite de las microondas [2, 17, 18].

Cuando se trabaja con ondas de radio no se acostumbra a usar frecuencia sino longitudes de onda. Esta se puede describir como la distancia de un ciclo ocupada en el espacio de una onda electromagnética o la distancia entre los puntos correspondientes a una onda repetitiva. La longitud de onda es directamente proporcional a su velocidad de propagación e inversamente proporcional a su frecuencia [18]. Tomando en cuenta que la velocidad de propagación en un espacio libre es de 3×10^8 m/s, podemos describir como la relación entre frecuencia, velocidad y longitud de onda de la siguiente manera:

$$\text{longitud de onda} = \frac{\text{velocidad}}{\text{frecuencia}} \quad \lambda = \frac{c}{f} = u \cdot T \quad (2-0)$$

Donde:

λ = longitud de onda (metros por ciclo).

c = velocidad de la luz (300,000,000 metros por segundo)

f = frecuencia (Hertz)

T = periodo

u = velocidad de propagación de onda

En la Figura 2- 1 se muestra el espectro de las longitudes de onda donde se indican en nanómetro los diferentes servicios con sus bandas, donde el rango de las microondas ocupa el 10^6 hasta 10^9 nanómetros (1mm a 1m respectivamente) [1, 18]

2.2 Líneas de transmisión

La línea de transmisión generalmente se utiliza conductores metálicos con la finalidad de transferir de un punto a otro punto energía eléctrica. De una manera más concreta se podría decir que una línea de transmisión consta de 2 o más conductores separados por un aislador como se puede apreciar en la Figura 2- 2. Estas líneas de transmisión se pueden utilizar para propagar CA o CD de alta, baja o frecuencia intermedia, como lo son radiofrecuencia, señales de audio o corriente eléctrica de 60 Hertz. Estas no tienen una medida estándar, tanto puede tener dimensiones de milímetros hasta varios kilómetros de longitud. Depende de la frecuencia de uso es como suelen tener comportamientos diferentes, en propagación de señales en baja frecuencia su frecuencia es muy sencilla y predecible pero cuando se utiliza para la propagación de frecuencias altas su comportamiento resulta ser algo especial y sus características se complican [1,17,18].

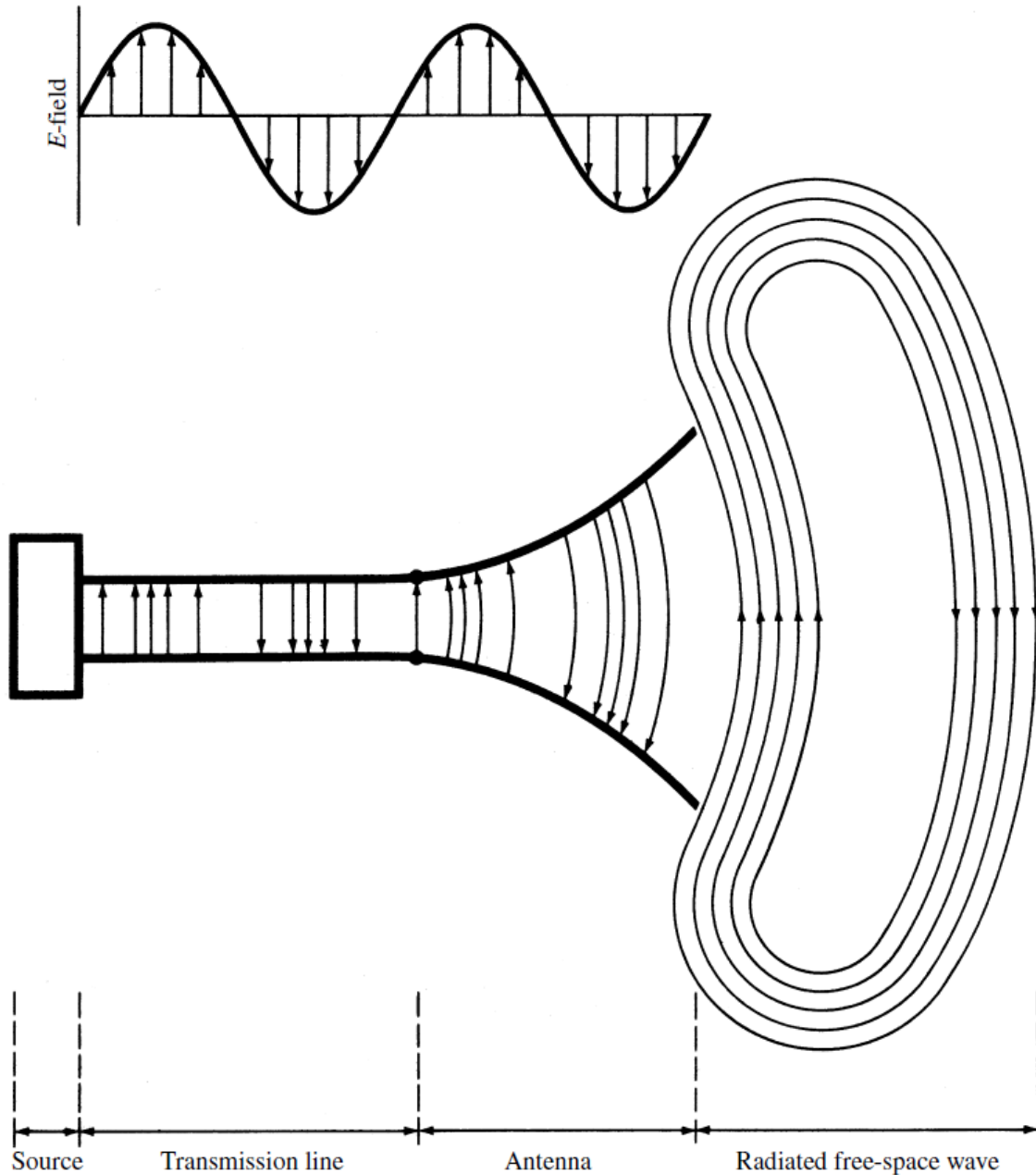


Figura 2- 2 Ejemplo de una línea de transmisión, antena y ondas de radiación en espacio libre [2]

2.2.1 Ondas electromagnéticas transversales

En las líneas de transmisión la propagación de la energía eléctrica se hace en forma de ondas electromagnéticas transversales (EMT). Una onda se describe como un movimiento oscilatorio, también se podría decir que es una vibración, y esta al ser aplicada en una partícula genera una excitación de vibraciones semejantes en partículas vecinas. Las ondas EMT principalmente se propagan a través del no conductor (dieléctrico), este es el que separa los conductores de una línea de transmisión. Esto quiere decir que la onda se propaga a través de un medio [18].

Cuando se habla de ondas transversales, decimos que la dirección de desplazamiento es transversal a la de propagación y en una onda longitudinal la dirección del desplazamiento es perpendicular a la propagación. Un ejemplo puede ser la onda superficial del agua, ya que la onda es longitudinal. Otro ejemplo de ondas longitudinales pueden ser las ondas sonoras [17].

En las ondas electromagnéticas (EM) siempre hay una producción de carga eléctrica por la aceleración y en un conductor la tensión y la intensidad siempre van acompañadas de campos eléctricos (E) y campos magnéticos (H) en las regiones vecinas del espacio [1, 17]. En la Figura 2- 3a se muestra una onda electromagnética y sus relaciones entre los campos E y H y en la Figura 2- 3b se muestran una línea de 2 alambres en paralelo y un coaxial con cortes transversales de los campos E y H. En las imágenes se puede apreciar que entre los campos E y H siempre existe un ángulo de 90° (son perpendiculares) y a esto se le llama cuadratura espacial. Se le llama ondas incidentes a las ondas electromagnéticas que viajan de la fuente a la carga por una línea de transmisión y ondas reflejadas a las que viajan de la carga a la fuente [1, 17, 18].

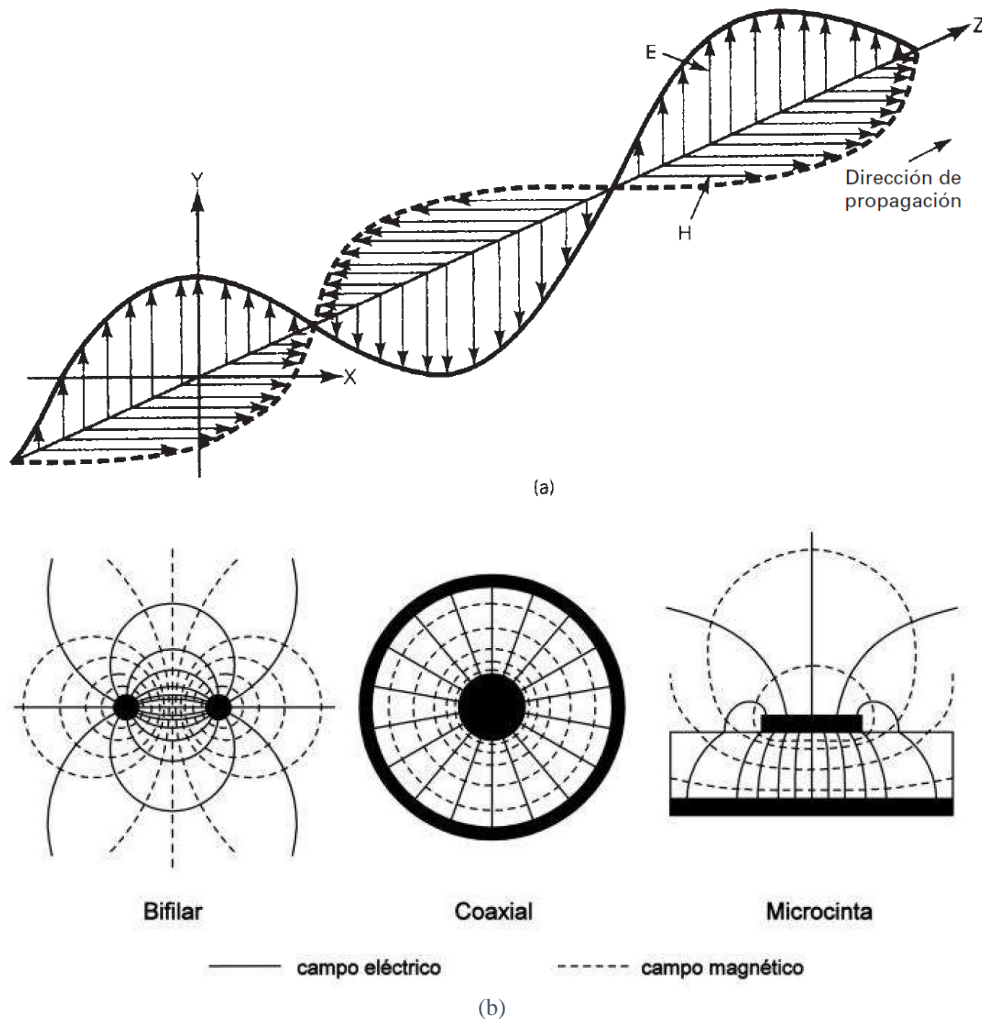


Figura 2- 3 Vistas: (a) en perspectiva; (b) transversal indicando el desplazamiento relativo en los campos E y H en una línea de transmisión [17]

2.2.4 Líneas de transmisión de conductores paralelos

Línea de transmisión de alambre desnudo. En la Figura 2- 4a se muestra este tipo de línea de transmisión la cual se compone por solo dos cables conductores paralelos separados a corta distancia. Para que esta distancia sea constante y poderlos sujetar se colocan separadores no conductores a distancias periódicas, estas distancias son generalmente entre dos y seis pulgadas. Estos cables conductores tienen un dieléctrico el cual es el aire por el cual se propaga la EMT y su única ventaja es que su construcción es sencilla, pero al no tener un blindaje en contra de ruidos, es muy susceptible al mismo y sus pérdidas por radiación son altas. Esta línea de transmisión comúnmente se utiliza en modo balanceado [1, 17, 18].

Conductores gemelos. También llamados cables de cinta. Estos son otra línea de transmisión de dos alambres conductores en paralelo como se presenta en la Figura 2- 4b, estos son prácticamente iguales que los conductores desnudos, aunque estos ya tienen un dieléctrico sólido, el cual también sirve como separador entre los dos alambres. El dieléctrico más usado para este tipo de línea son teflón y polietileno y la separación más común entre los dos alambres para los usados en transmisión de TV es de 5/16 de pulgada [17,18].

Cable de par trenzado. Este tipo de línea de transmisión es formado por un par de conductores aislados y torcidos como se muestra en la Figura 2- 4c. Comúnmente se forman unidades de pares trenzados con distintos pasos (longitud de torcimiento) para aminorar la interferencia entre ellos, esos pares son cubiertos por varios forros, esto va a depender del uso asignado. La resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia son constantes primarias o parámetros eléctricos. Estos parámetros dependen de las diferencias de manufactura y también de las variaciones de los esfuerzos mecánicos, la humedad y temperatura [17, 18].

Par de cable blindado. Este tipo de línea de transmisión de las mencionadas es una de las más eficientes para reducir pérdidas por radiación y/o interferencia, ya que esta es cubierta por una malla hecha de alambre metálico que se conecta a tierra y actúa como un blindaje. En la Figura 2- 4d se aprecia un ejemplo de esta la cual es un par de cables conductores separados por un dieléctrico macizo cubierto por una malla y esta a su vez está cubierta por una capa de polímero (plástico). Este tipo de blindaje (malla) también es ocupado para que las señales del par de conductores no irradien fuera de ellos y evitar interferencias con otros conductores. En algunas configuraciones de pares trenzados ocupan el blindaje (malla) [17, 18].

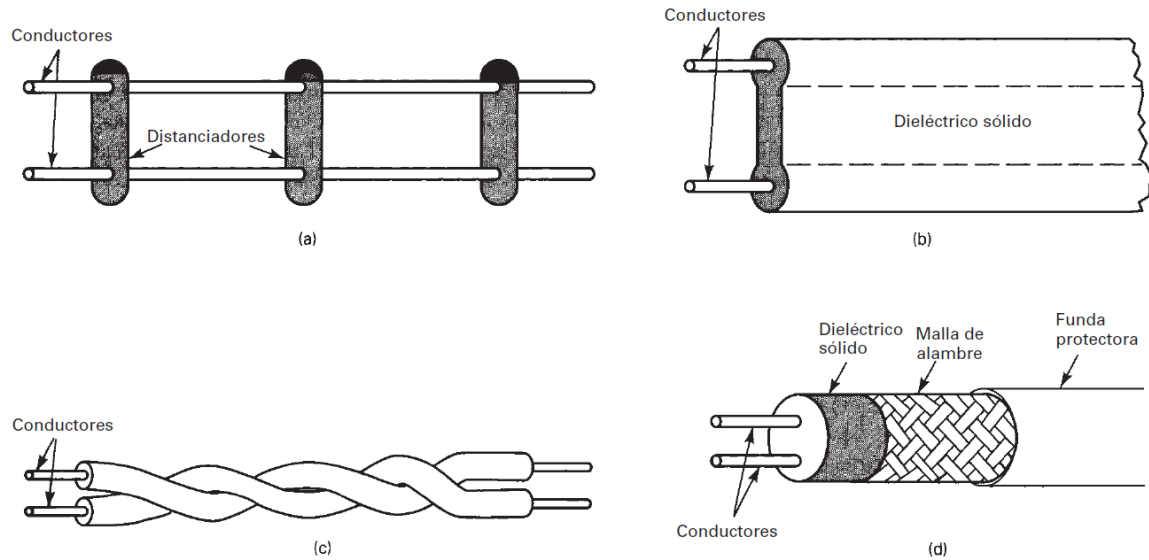


Figura 2- 4 Líneas de transmisión: (a) alambres desnudos; (b) conductores gemelos; (c) par trenzado; (d) par blindado [17]

2.2.2 Tipos de líneas de transmisión

En la clasificación de líneas transmisión se pueden dividir en dos: balanceadas y desbalanceadas. En las líneas balanceadas llamadas de transmisión diferencial o balanceada de señal, son dos alambres conductores, ambos llevan corriente, uno con la señal y el otro con el regreso. Esta señal es medida como una diferencia de potencial, este tipo de línea de transmisión se observan en la Figura 2- 5. En la imagen se muestra que las 2 líneas de transmisión tienen una conexión a masa o tierra eléctrica y poseen la misma magnitud, pero se mueven en direcciones opuestas [18].

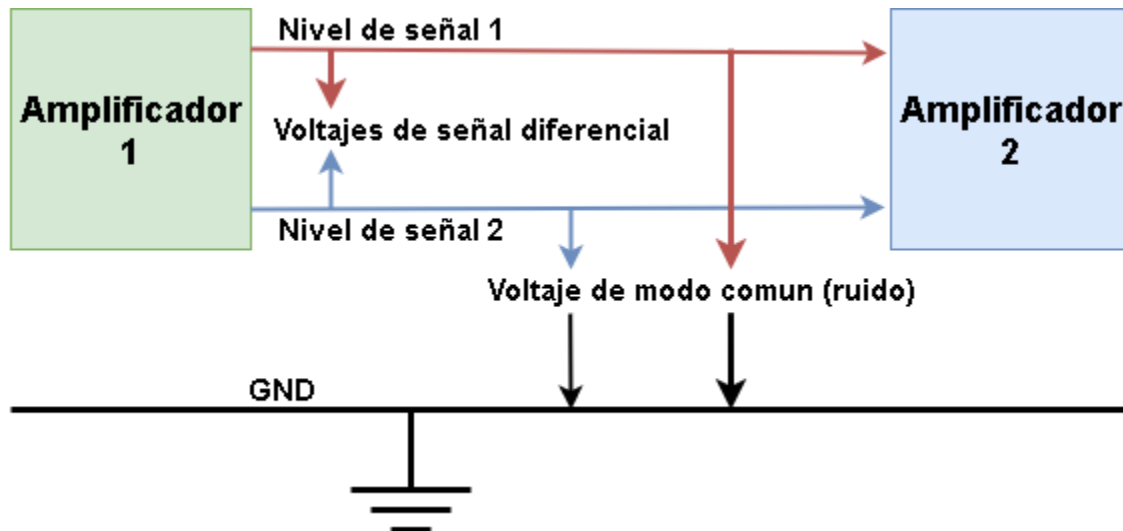


Figura 2- 5 Sistema de transmisión diferencial o balanceado

Si en un par balanceado de alambres las intensidades de corriente se mueven en dirección opuesta una de la otra se le llaman *corrientes de circuito metálico*, pero si estas intensidades de corriente se mueven en la misma dirección se le llaman *corrientes longitudinales* [18]. Una de las ventajas de un par balanceado es que la mayoría del voltaje en modo común (ruido)

de interferencia) es inducido de igual manera en los dos conductores y esto genera corrientes longitudinales que genera una anulación en esas cargas [17]. Se observa en la Figura 2- 6 una línea de transmisión y como resultan corrientes metálicas y longitudinales, las ultimas producidas con frecuencia debido a las interferencias estáticas y como se anulan en la carga. [17, 18].

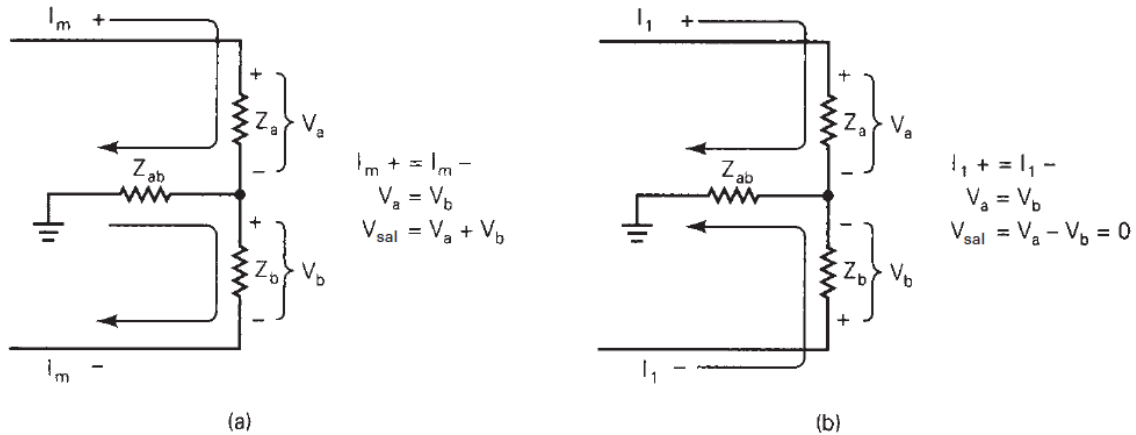


Figura 2- 6 Resultados de corrientes metálicas y longitudinales en una línea de transmisión balanceada: (a) corrientes metálicas debidas a tensiones de señal; (b) intensidades longitudinales debidas a tensiones de ruido [18]

En un par de alambres, siempre y cuando ninguno de ellos esté a potencial de tierra, puede trabajar en modo balanceado, aun cuando tengan un blindaje, ya que este generalmente se conecta a tierra para que las interferencias estáticas no afecten a los conductores centrales, en este tipo se puede incluir cualquier tipo de cable que tenga dos conductores centrales y un blindaje.

Las transmisiones desbalanceadas o también llamadas asimétricas son aquellas que un alambre es portador de la señal y el otro está conectado al potencial de tierra. Este mismo alambre puede servir no solo para un alambre, es decir puede ser una referencia para más alambres conductores portadores de señal [18]. Al ocupar de esa manera el alambre de tierra, este deber ir junto con el conductor portador de señal y esto puede generar problemas ya que al ser usado como tierra por más alambres portadores en algunos tramos puede existir resistencia, inductancia y capacitancia, generando una diferencia de potencial pequeña entre dos puntos del conductor de tierra. Este conductor de tierra ya no es un punto de referencia perfecto ya que puede tener un ruido inducido. Un ejemplo de una transmisión desbalanceada es un cable coaxial, ya que uno de los conductores es el blindaje y comúnmente se conecta a tierra [17]. En la Figura 2- 7 se muestra un sistema de transmisión desbalanceado, estos miden su diferencia de potencial entre el conductor portador de señal y la tierra, y también podemos ver que ocupan un mismo alambre conductor para la conexión de tierra (referencia). Los sistemas balanceados y desbalanceados establecen conexiones, pero solo con transformadores llamados balunes, que son un tipo de transformador especial.

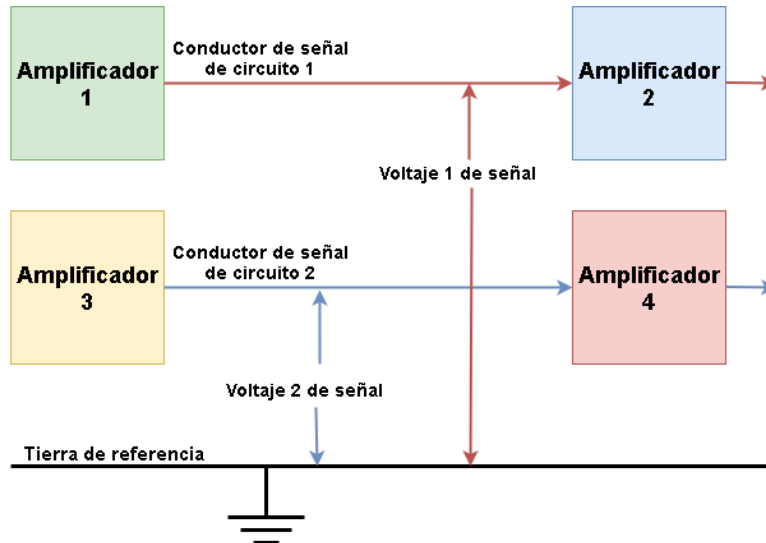


Figura 2- 7 Sistema de transmisión asimétrico o desbalanceado

2.2.5 Líneas de transmisión concéntrica o coaxial

Cuando las aplicaciones donde se aplica la línea de transmisión es baja, los conductores paralelos son los más adecuados, pero si se utilizan esas líneas de transmisión en altas frecuencias sus pérdidas por radiación y en el dieléctrico aumentan considerablemente y la se ve más susceptible a interferencias externas. En casos de trabajar en aplicaciones de alta frecuencias, el conductor coaxial es una buena ayuda a aislar la transmisión en su trayectoria y también reduce las pérdidas, esto gracias al conductor externo que funciona como un blindaje contra interferencias externas. Este tipo de líneas se limita a un uso de aplicaciones desbalanceadas ya que regularmente el conductor externo funciona como un blindaje, eso quiere decir que su conexión es a tierra [1]. En la Figura 2- 8 se muestran dos tipos de cables coaxiales, que son en esencia los que existen. En la Figura 2- 8a muestra la línea rígida llena de aire. Este tipo de coaxial tiene un conductor central rodeado de aire que este sirve como el material aislador y el conductor externo que tiene un distanciador del conductor central de un material no conductor, el cual puede ser poliestireno, pyrex u otro [18]. En Figura 2- 8b podemos ver un cable coaxial flexible, su material aislante entre los dos conductores suele ser polietileno macizo no conductor. El conductor interno es un alambre flexible y puede ser sólido o hueco.

Los cables coaxiales a diferencia de los cables paralelos pueden trabajar a más altas frecuencias y también son prácticamente inmunes a la radiación externa, aunque una de sus desventajas es que el uso se limita mucho para usar en modo desbalanceado. El mantenimiento de los coaxiales rígidos para minimizar las pérdidas es que el aire debe estar libre de humedad. Los coaxiales sólidos son más fáciles de fabricar, instalar y mantener. Aun así debemos tomar en cuenta que es relativamente caro el fabricarlos y más si son usados para aplicaciones de baja frecuencia [1, 18].

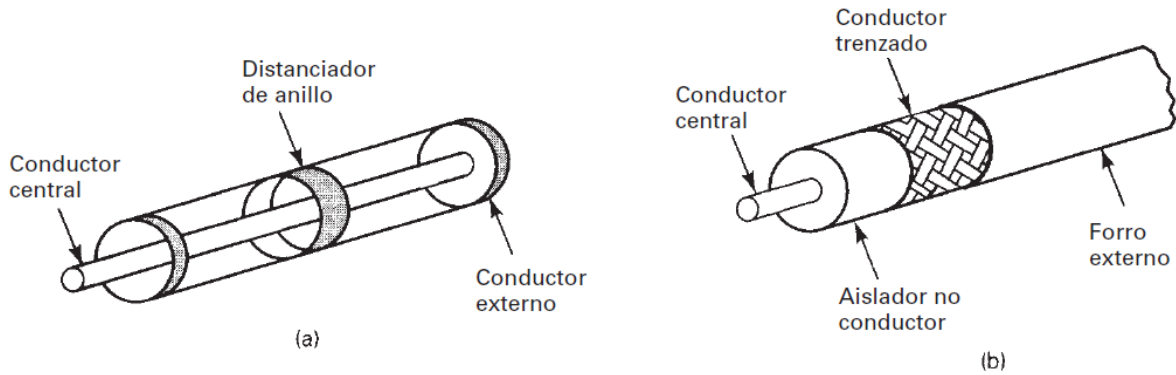


Figura 2- 8 líneas de transmisión concéntrica o coaxial: (a) Rígida llena de aire; (b) Línea maciza flexible [18]

2.3 Líneas de transmisión de microcinta y de cinta

En aplicaciones de alta frecuencia, las líneas de transmisión normales serían demasiado largas, por eso se han desarrollado tarjetas de circuito impreso (PC, printed circuit, o PCB, printed circuit board), las cuales son líneas de transmisión para utilizarse principalmente en frecuencias de 300 MHz a 3 GHz [2, 17] Inicialmente se implementaba en patrones de cobre, pero en la actualidad ya se desarrollan con otros materiales conductores, estas son llamadas microcintas o línea de cinta. Estas líneas de transmisión se utilizan para interconectar fuente y carga si su distancia es de unos pocos centímetros, esto ya que para una línea coaxial resulta ser impráctico por los componentes que conlleva para la conexión [1, 2].

El proceso de manufactura de las microcintas y líneas de cintas en cobre resulta ser fácil ya que es el mismo proceso que el de una tarjeta de un circuito impreso, y esto resulta ser práctico para añadirlo desde el principio en un diseño de tarjeta [18]. El nombre microcinta o línea de cinta depende de donde se grabarán las pistas en la tarjeta PC, ya que si es en la parte superficial (Top o Bottom) es llamada microcinta, pero si se aloja en una capa intermedia se le llama línea de cinta. Las líneas de transmisión no solo se pueden ocupar las microcintas y las líneas de transmisión, también se pueden ocupar como inductores filtros desplazadores de fase, capacitores, circuitos sintonizados y dispositivos de acoplamiento de impedancias [17].

2.3.1 Microcinta

En la Figura 2- 9 se muestra los tipos de microcintas: balanceada y desbalanceada. Estas son uno o dos materiales conductores planos separados por un dieléctrico del plano de tierra, en la Figura 2- 9a se puede ver una microcinta de una pista, en ella se puede ver el conductor inferior que al menos debe ser 10 veces más ancho que el conductor superior y este al conectarse a tierra sirve como punto común del circuito [1, 2, 17]. Este tipo de microcinta es su equivalente a una línea de transmisión desbalanceada. Esta es de un cuarto o media longitud de onda, a la frecuencia de operación. En la Figura 2- 9b se aprecia una microcinta de dos hilos que es equivalente a una línea de transmisión balanceada. En general las líneas que tiene mayor tendencia a irradiar son las líneas en corto sobre las abiertas.

Las características físicas influyen en la impedancia de cualquier línea de transmisión y una línea de microcinta no es la excepción, así que para obtener una impedancia característica de 50 a 200 Ohms solo es necesario modificar sus dimensiones, pero cada microcinta tiene una propia ecuación para calcular la impedancia [18]. La ecuación 2-1 es para calcular la impedancia de una microcinta desbalanceada, cada una de las medidas a tomar en cuenta se muestran en la Figura 2- 9c.

$$Z_o = \frac{87}{\sqrt{\varepsilon+1.41}} \ln \left(\frac{5.98h}{0.8w+t} \right) \quad (2-1)$$

En donde Z_o = Impedancia característica (ohms)
 ε = Constante dieléctrica (para plástico reforzado con fibra de vidrio
FR-4, $\varepsilon = 4.5$ y para el teflón $\varepsilon = 3$)
 w = ancho de la pista de cobre²
 t = espesor de la pista de cobre²
 h = distancia entre la pista de cobre y el plano de tierra, es decir, el espesor dieléctrico²

² Las dimensiones de w , t y h pueden expresarse en cualquier unidad de longitud (pulgadas, milímetros, etc.), siempre y cuando se usen las mismas unidades.

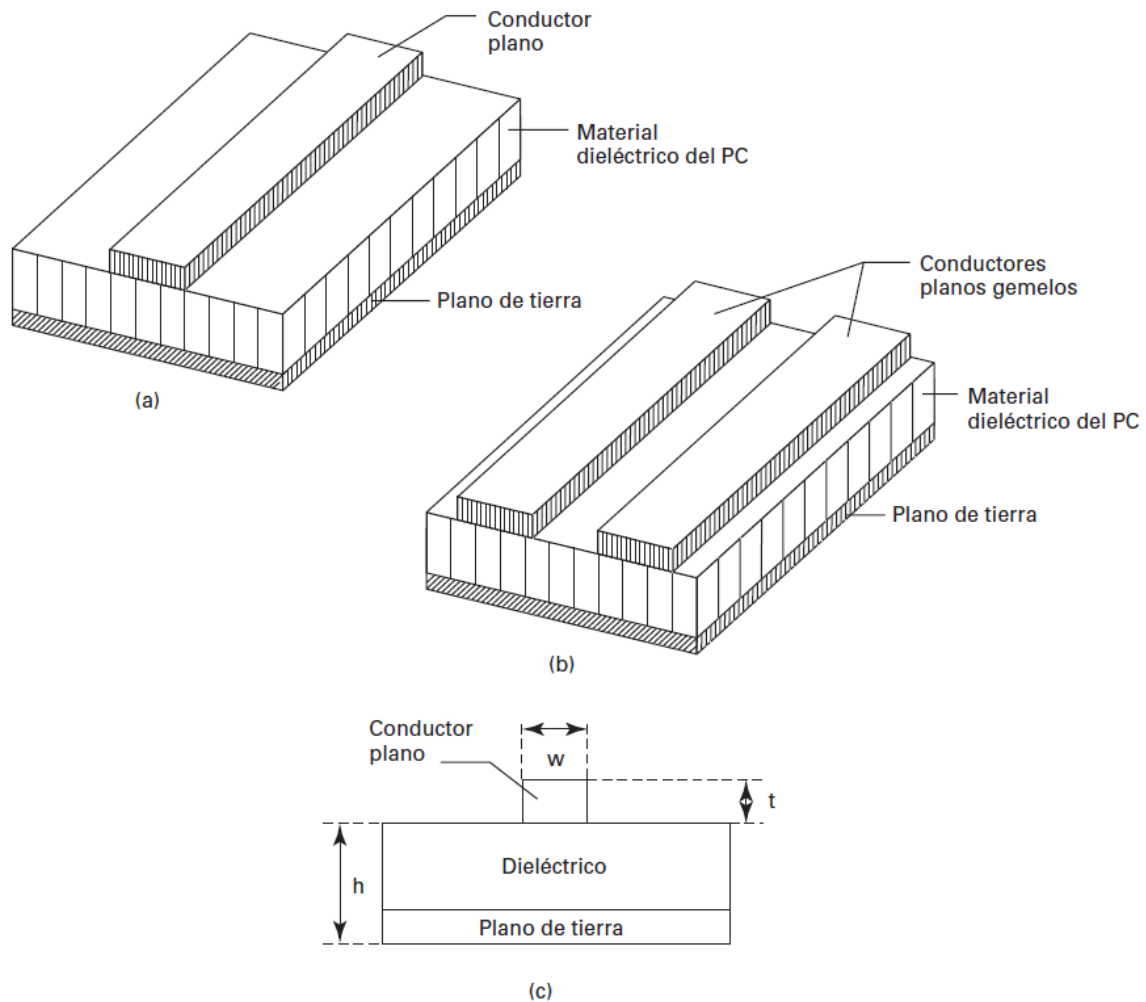
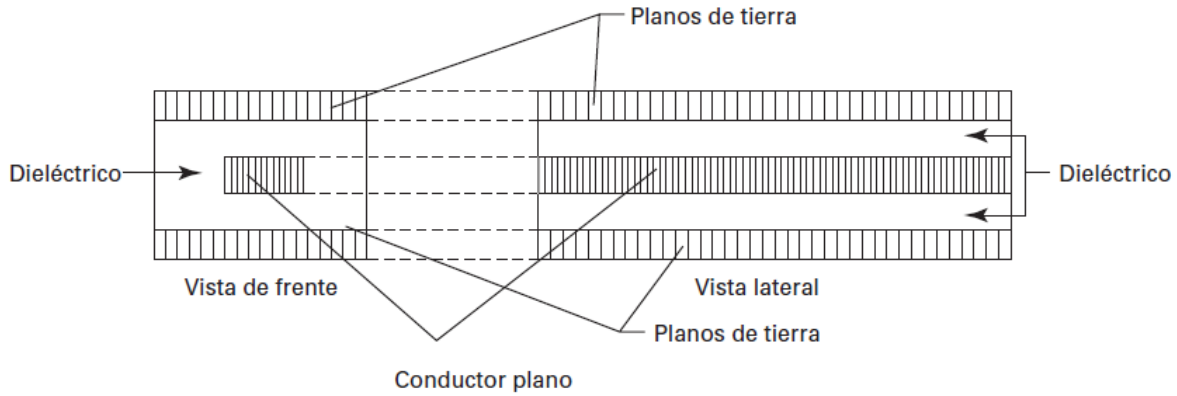


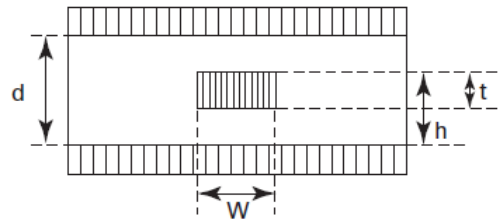
Figura 2- 9 líneas de transmisión de microcinta: (a) desbalanceada; (b) balanceada; (c) dimensiones [18]

2.3.2 Línea de cinta

Como se puede ver en la Figura 2- 10, una línea de cinta consta de dos planos de tierra y un material conductor en la parte de en medio separados por material un dieléctrico. En este tipo de cinta es menos la pérdida en comparación a la microcinta, pero también es más difícil su fabricación. Son más utilizadas en líneas en corto y la longitud de una línea de cinta va de un cuarto o media longitud de onda [1, 16, 17].



(a)



Vista de frente

(b)

Figura 2- 10 línea de transmisión de cinta: (a) vista de frente y lateral; (b) dimensiones [18]

La impedancia característica de una línea de cinta, configurada como se ve en la Figura 2-10 es

$$Z_o = \frac{60}{\epsilon} \ln \left(\frac{4d}{0.67\pi w(0.8+t/h)} \right) \quad (2-2)$$

Siendo

Z_o = Impedancia característica (ohms)

ϵ = Constante dieléctrica (para plástico reforzado con fibra de vidrio

FR-4, $\epsilon = 4.5$ y para el teflón $\epsilon = 3$)

d = espesor dieléctrico

w = ancho de la traza conductora de cobre³

t = espesor de la traza conductora de cobre³

h = distancia entre la traza de cobre y el plano de tierra³

³ Las dimensiones de w , t y h pueden expresarse en cualquier unidad de longitud (pulgadas, milímetros, etc.), siempre y cuando se usen las mismas unidades.

2.4 Propagación de ondas en línea de transmisión

La velocidad de las ondas electromagnéticas depende del medio de propagación, en el vacío su velocidad es igual a la velocidad de la luz y en un medio como el aire es casi igual a la velocidad de la luz. En las líneas de transmisión esta velocidad es completamente variante ya que depende del conductor y en los materiales dieléctricos. Esto quiere decir que en una línea de transmisión es más lento el viaje de las ondas electromagnéticas [2, 18].

2.4.1 Factor de velocidad

Para obtener la constante o factor de velocidad es necesario dividir la velocidad de propagación real entre la del espacio vacío, este valor resultante es adimensional y la ecuación para obtenerlo es la siguiente [17,18]

$$V_f = \frac{V_p}{c} \quad (2-3)$$

Donde V_f = factor de velocidad (adimensional)

V_p = velocidad real de propagación (m/s)

c = velocidad de propagación a través del espacio vacío ($c = 3 \times 10^8$ m/s)

Y para obtener la velocidad real de propagación podemos despejar la ecuación 2-3, tomando en cuenta que se debe conocer el factor de velocidad como el ejemplo de la Tabla 2- 2 donde se muestran algunos de los materiales más comunes utilizados en líneas de transmisión y su factor de velocidad, tomando este valor y sabiendo que la velocidad de propagación en vacío es una constante, obtenemos el siguiente despeje [2, 18]

$$V_f \times c = V_p$$

Material	Factor de velocidad
Aire	0.95-0.975
Hule	0.56-0.65
Polietileno	0.66
Teflón	0.70
Espuma de teflón	0.82
Espigas de teflón	0.81
Espiral de teflón	0.81

Tabla 2- 2 Factores de velocidad

Material	Cte dieléctrica relativa (ϵ_r)
Vacío	1.0
Aire	1.0006
Teflón	2.1
Polietileno (PE)	2.27
Poliestireno	2.5
Papel parafinado	2.5
Hule	3.0
Cloruro de polivinilo (PVC)	3.3
Mica	5.0
Vidrio	7.5

Tabla 2- 3 Constantes dieléctricas

Para obtener el factor de velocidad, necesitamos conocer la constante dieléctrica del material que se utiliza en la línea de transmisión, el cual es el aislante entre los 2 conductores, en la Tabla 2- 3 se muestra algunos de los materiales más usados. La ecuación 2-4 es una forma aproximada de obtener el factor de velocidad [1, 18].

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-4)$$

En donde ϵ_r es la constante dieléctrica del material dado.

La velocidad de propagación de una onda electromagnética en una línea de transmisión no solo depende de los valores de la inductancia y capacitancia, y el tiempo de carga es $T = \sqrt{LC}$. Siendo una relación entre la velocidad de propagación, la capacitancia e inductancia mostrada por la formula [18]

$$\text{velocidad} \times \text{tiempo} = \text{distancia}$$

Por consiguiente,
$$V_p = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{D}{T}$$

Al sustituir el tiempo se obtiene
$$V_p = \frac{D}{\sqrt{LC}} \quad (2-5)$$

Si la distancia se normaliza a 1m, la velocidad de propagación de una línea sin perdida es

$$V_p = \frac{1m}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} m/s \quad (2-6)$$

Donde V_p =velocidad de propagación (m/s)

$$\sqrt{LC} = \text{Segundos}$$

Ya que las líneas de transmisión no trabajan en un espacio vacío, y la constante dieléctrica actúa directamente a la longitud de onda y la velocidad de propagación de una onda electromagnética, podemos replantear la ecuación 2-0 como se muestra a continuación [18]

$$\lambda = \frac{V_p}{f} = \frac{cV_f}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-7)$$

2.5 Parámetros de dispersión

Los parámetros de dispersión o parámetros S son aquellos que sirven para medir circuitos de microondas y determinar la relación entre potencias transmitidas y potencias reflejadas [1].

De los cuales tenemos cuatro parámetros los cuales son:

S11. Mide la cantidad de potencia reflejada en el puerto de entrada.

S12. Mide la cantidad de potencia recibida en el puerto de entrada.

S21. Mide la cantidad de potencia recibida en el puerto de salida.

S22. Mide la cantidad de potencia reflejada en el puerto de salida.

Los parámetros S son muy útiles para medir la eficiencia de los dispositivos de microondas, ya que solamente perciben los niveles de potencia en las terminales de 2 puertos [17].

2.6 Microondas

El análisis y diseño es difícil tanto de componentes como sistemas de microondas debido a las altas frecuencias y las longitudes de onda cortas, pero estos mismos factores proporcionan otras oportunidades únicas en la aplicación de sistemas de microondas debido a los siguientes puntos:

- La ganancia de una antena es proporcional a su tamaño eléctrico, Si hay altas frecuencias más ganancia tendrá la antena, por lo tanto, esto hace posible una implementación de sistemas de microondas miniaturizados [1,16].
- Es muy importante el ancho de banda, ya que de ellas depende el transporte de información y en el espectro electromagnético se agotan rápidamente, pero al trabajar en frecuencias más altas, un ancho de banda del 1% a 600Mhz es igual a 6Mhz, el ancho en el que trabajan 100 canales de televisión [1, 16, 18].
- En comparación con señales de baja frecuencia, las señales de microondas viajan por la línea de visión y no se ven afectadas por la ionosfera. Esto genera que haya una capacidad elevada de comunicaciones terrestres y satelitales con una reutilización de frecuencias en ubicaciones mínimamente distantes [1, 16,18].
- En los sistemas de radar generalmente son preferidas las frecuencias de microondas ya que en un objetivo de radar el área de reflexión efectiva suele ser proporcional al tamaño eléctrico del objetivo y adicionalmente a esto se toma en cuenta las características de ganancia de la antena en frecuencia [1, 16, 18].
- En las frecuencias de microondas hay aplicaciones únicas en diferentes áreas como teledecepción, métodos de calentamiento, diagnóstico y tratamiento médico, esto debido a que diversas resonancias moleculares, atómicas y nucleares suceden en este rango de frecuencia [1, 16, 18].

En las microondas la transmisión y recepción se efectúa en longitudes de onda milimétricos regularmente y para describir en que rango de frecuencia trabaja se subdividió en bandas que se designan por letras, esto tuvo una actualización y en la Tabla 2- 4 se muestra la designación por letra de frecuencias en microondas [18].

Frecuencia	Anterior (aun en uso)	Nueva
1-2 GHz	L	D
3-4 GHz	S	E
3-4 GHz	S	F
4-6 GHz	C	G
6-8 GHz	C	H
8-10 GHz	X	I

10-12.4 GHz	X	J
12.4-18 GHz	Ku	J
18-20 GHz	K	J
20-26.5 GHz	K	K
26.5-40 GHz	Ka	K

Tabla 2- 4 Designación de las bandas de frecuencias empleadas en microondas

2.6.1 Aplicaciones

En la actualidad un gran número de aplicaciones de comunicaciones y sistemas de radar ocupan las microondas. En sistemas de radar se utilizan para sistemas anticolidión de automóviles, sistemas de detección remotas y de movimiento, predicción meteorológica, localización y detección de objetivos marítimos, aéreos y terrestres, seguimiento de misiles a través de radar y control de tráfico aéreo [1, 18].

En sistemas de comunicaciones un gran número de transmisiones telefónicas se manejan por microondas, también transmisiones de televisiones internacionales y de larga distancia, así como también transmisión de datos. En la actualidad la mayoría de desarrollo en telecomunicaciones inalámbricas depende mucho de la tecnología de microondas, como los sistemas de transmisión directa por satélite (GPS) ya que funcionan en un rango de frecuencia de 1.5 a 94 GHz [1,18].

2.7 Grafeno

El grafeno es uno de los materiales relativamente nuevos ya que por primera vez fue separado por cinta adhesiva del carbono en el 2004. Este material es un material bidimensional de redes hexagonales y a pesar de que es un material 2D, su resistencia mecánica es alta [4]. Actualmente el grafeno es utilizado para múltiples estudios como dispositivos nanoelectrónicos, compuestos, almacenamiento de energía, microondas, líneas de transmisión, entre otras [4, 19]. Gracias a que el grafeno tiene una estructura atomística y/o el dopado de grafeno en compuestos, ayuda en la mejora de propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas. En la Figura 2- 11 se muestra la estructura atómica del grafeno, la cual consta de enlaces de carbono-carbono de $1,42 \text{ \AA}$ ($1.42 \times 10^{-10} \text{ m}$) [19].

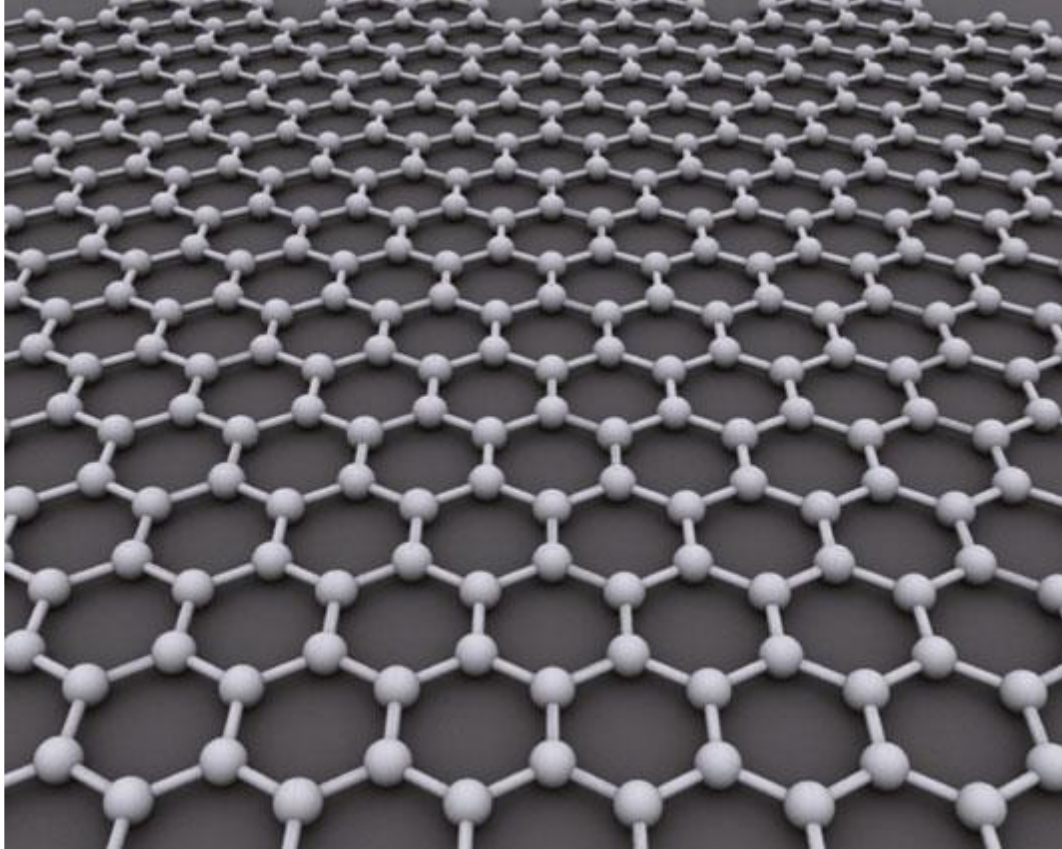


Figura 2- 11 Estructura atómica del grafeno [20]

2.7.1 Estructura mecánica

En los materiales 3D existen cuatro formas fundamentales de carga como se ve en la Figura 2- 12a, pero para el grafeno no funciona de la misma manera, ya que, es un material 2D y por esto solo se utilizan 2 dos propiedades, las cuales son en el plano y fuera del plano como se muestra en la Figura 2- 12b.

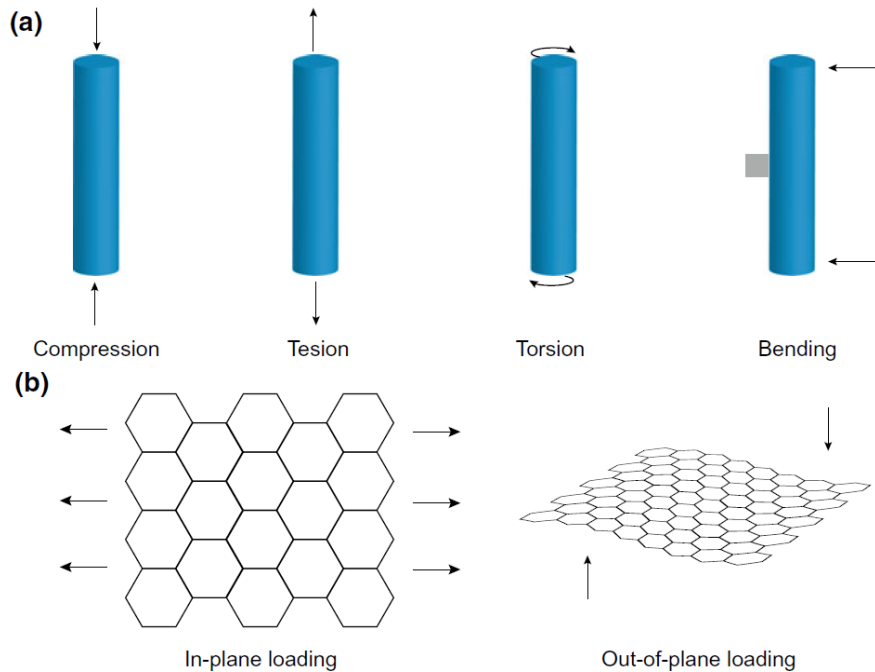


Figura 2- 12 (a) Modos de carga comunes para materiales 3D: compresión, tensión, torsión y flexión. (b) Carga de grafeno en el plano y fuera del plano [4]

2.7.1.1 Propiedades mecánicas en el plano del grafeno

La nanoindentación que se muestra en la Figura 2- 13 es uno de los métodos más comunes para estirar el grafeno, ya que por su estructura monoatómica es muy complicado realizar su estiramiento. Un experimento con este método en 2008 arrojó que el módulo de Young en el grafeno es de 1.0 ± 0.1 Tpa y una fuerza de 130 ± 10 Gpa aproximadamente [4]. La constante de resorte del grafeno varía de 1 a 5 N/m, esto se corroboró usando un microscopio de fuerza atómica (AFM) [21]. En la actualidad hay un gran interés sobre los usos del grafeno multicapa en el deslizamiento (fricción) ya que presenta características de superlubricidad [4].

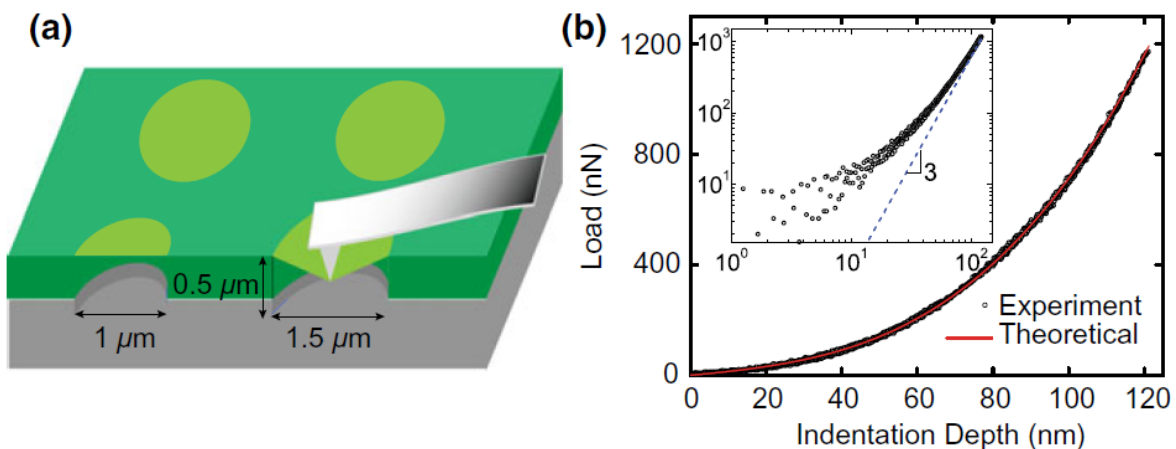


Figura 2- 13 (a) Esquema de experimentos de nanoindentación sobre grafeno. (b) Profundidad de sangría en función de la carga curvas [4]

2.7.1.2 Propiedades mecánicas fuera del plano del grafeno

El grafeno según la termodinámica se considera inestable, pero en cristales 2D de grafeno contiene un gran número de arrugas [22] y esto es lo uno de los factores para que mantenga una estabilidad. En la Figura 2- 14 se muestra como colocando una hoja de grafeno entre dos sustratos de diferentes temperaturas se generan ondulaciones controladas y tensiones térmicas. El grafeno tiene una movilidad de electrones de $15000\text{cm}^2/\text{Vs}$ y una resistencia de $10^{-6}\Omega\text{cm}$, su banda prohibida es 0 y por lo tanto en dispositivos electrónicos no puede usarse como semiconductor [23]. Una de las formas para obtener ondulaciones estables en el grafeno es por disposición química de vapor (CVD) a partir de metano sobre láminas de cobre enfriándose térmicamente a temperaturas elevadas [24]. También hay resultados similares utilizando Cu (111) [25]. Gracias a las características del grafeno, las cuales son alta resistencia y baja densidad, otorga cualidades para trabajar en frecuencias altas de onda transversal. [4]

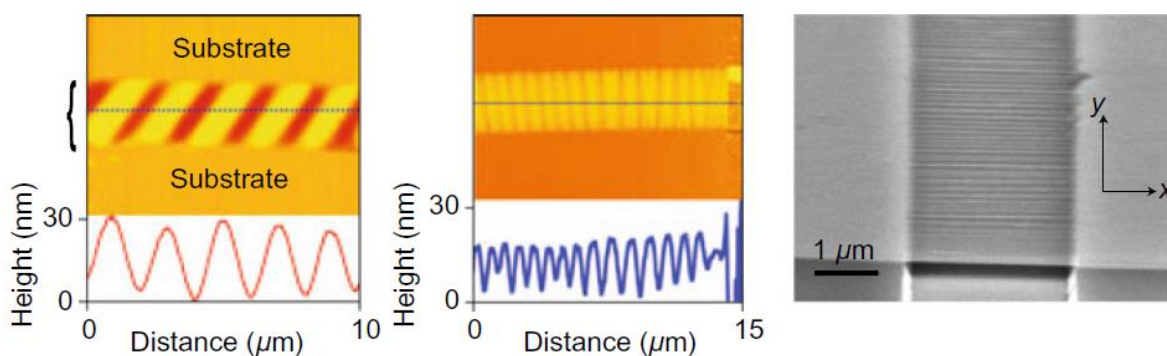


Figura 2- 14 Ondulación controlada en monocapa de grafeno inducida por estrés térmico [4]

El grafeno por tener una estructura 2D, se ve limitada como material estructural, pero para esto se utilizan compuestos de grafeno, los cuales se clasifican en dos. El primero que se efectúa su diseño del grafeno a nano-escala para la mejora de sus propiedades electromagnéticas, estos utilizan el grafeno como material de matriz y se le nombra como grafeno funcionalizado. El segundo utiliza el grafeno como aditivo para mejorar las propiedades físicas, a este se le llama compuestos mejorados con grafeno. Gracias a estas dos clasificaciones es que el grafeno puede trabajar en planos 2D y 3D, generalmente el grafeno funcionalizado en 2D y compuestos mejorados con grafeno en 3D. El óxido de grafeno es uno de los materiales dopados o funcionalizado el cual tiene una resistencia de tracción de 125MPa [26]. En los compuestos mejorados con grafeno están enfocados a que el grafeno funcione como un potenciador en compuestos generalmente 3D y aunque ya se han visto avances como la síntesis de compuestos de nanocintas con grafeno [27] obteniendo beneficios en el módulo de Young y resistencia en tracción máxima, también hay otros casos donde no se obtiene un beneficio sino reducción en sus propiedades, un ejemplo de ellos es los nanocompuestos de grafeno-aluminio [28].

2.7.2 Estructura electrónica

Aunque el grafeno como ya lo vimos tiene muy buenas propiedades, es un material que sus tiende a cambiar sus propiedades dependiendo el número de capas [19].

2.7.2.1 Grafeno monocapa

En el grafeno monocapa posee una configuración de panal (seis átomos de carbono) tiene seis puntos en las esquinas de la primera zona de Brillouin (FBZ) y también se considera una red triangular con dos átomos de base por celda unitaria (Figura 2- 15a), por lo tanto tenemos 2 grupos de 3 puntos [7,19]. Los puntos mencionados se llaman también puntos de Dirac y se indican como K y K0 como se muestra en la Figura 2- 15b. Sus propiedades electrónicas del grafeno se describen mediante la ecuación de Dirac ya que actúa como fermión de Dirac sin masa [7,19]. El grafeno es categorizado como un semimetal o semiconductor de banda prohibida ya que los bordes de la banda de conducción y valencia se cruzan o están muy cerca como se ve en la Figura 2- 15c.

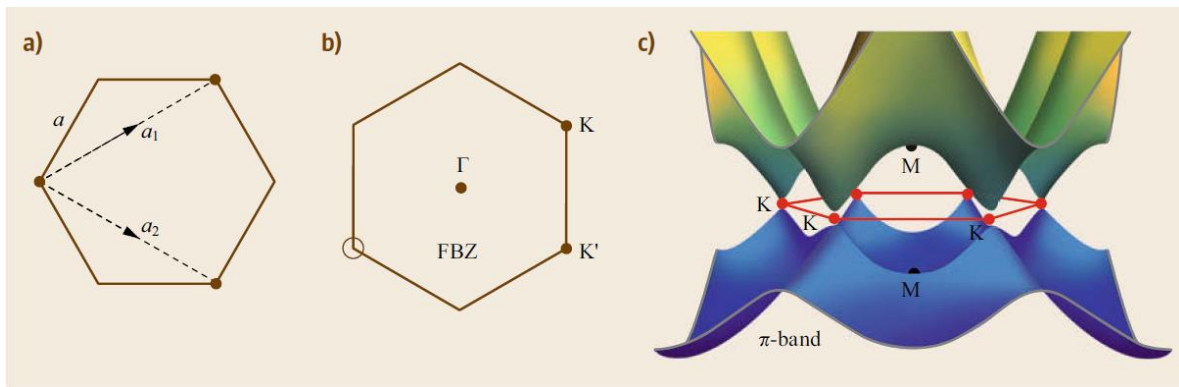


Figura 2- 15 Una vista esquemática del grafeno (a) forma de panal, (b) la primera zona de Brillouin y (c) la estructura de bandas del grafeno [7]

El grafeno tiene una característica especial sobre los semiconductores comunes ya que el momento de energía es de comportamiento lineal y tiene una conducción constante que es la velocidad de Fermi y se estima como $8 \times 10^5 \text{ms}^{-1}$. Esta diferencia se puede notar ya que las curvas de dispersión tienen forma de parábola y la velocidad depende de la segunda derivada de dispersión como se puede ver en la Figura 2- 16 [7]. La velocidad de los electrones de grafeno es 300 veces más lenta que la velocidad de la luz ($\approx 10^6 \text{ m/s}$) [19].

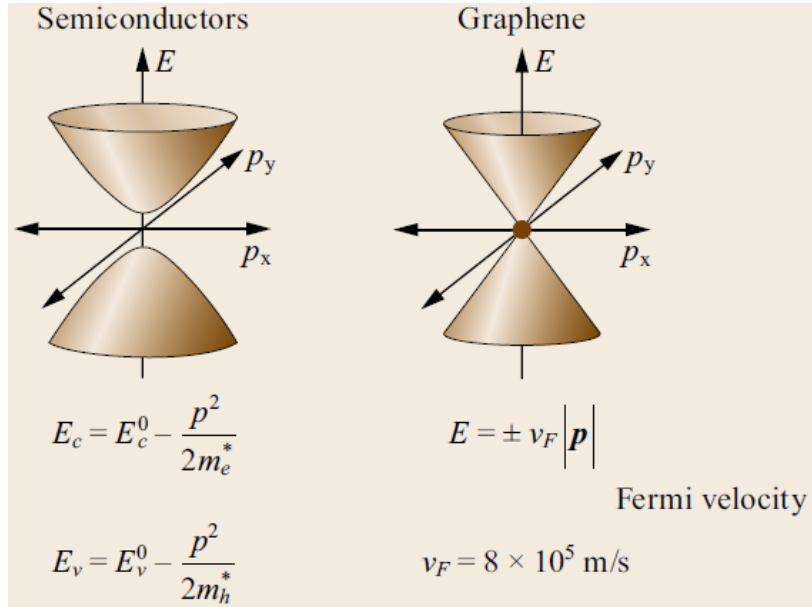


Figura 2- 16 El diagrama de bandas de energía en semiconductores y grafeno [7]

En la Figura 2- 17 podemos ver la densidad lineal de estados (DOS) del grafeno, la cual es diferente a la de semiconductores y metales. La densidad se describe como [7]:

$$\rho(E) = \frac{g_s g_v}{2\pi(\hbar v_F)^2} |E| \quad (2-8)$$

donde:

E = Representa la energía

F = Velocidad de Fermi

$g_s = g_v = 2$

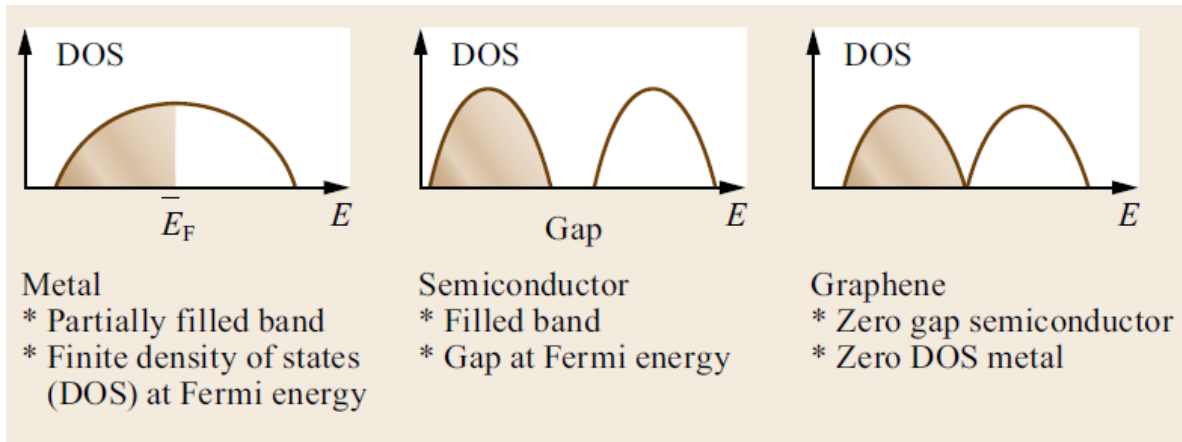


Figura 2- 17 Estructura electrónica y DOS para metales, semiconductores y grafeno [7]

2.7.2.2 Grafeno bicapa

El grafeno bicapa son dos subredes de grafeno que cada celda unitaria tiene cuatro átomos y dos bandas adicionales en estados Π y Π^* . Si se forman bandas en el punto de Dirac como

se ve en la Figura 2- 18b y Figura 2- 18c, quiere decir que la simetría de inversión entre las capas está rota. Si se aplica un campo eléctrico transversal a las capas como si fuera una polarización, se puede controlar la brecha electrónica y esta acción lo convierte en el único semiconductor con brecha sintonizable.

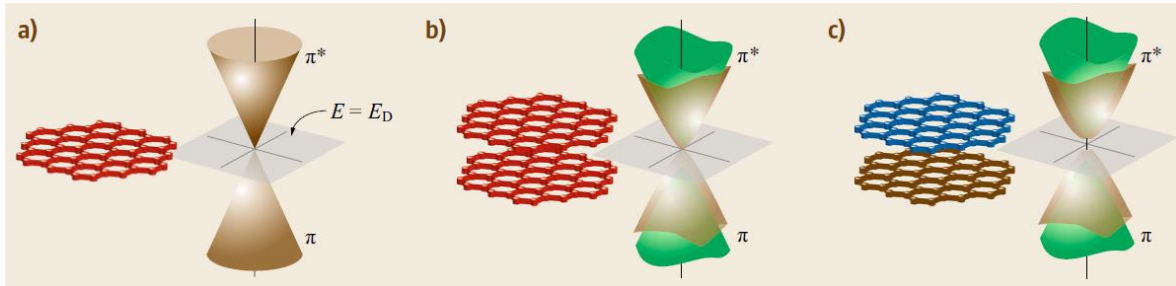


Figura 2- 18 Estructura electrónica de (a) monocapa, (b) bicapa simétrica y (c) grafeno bicapa asimétrica [19]

2.8 Aplicaciones en microondas

En aplicaciones con grafeno existen diferentes vertientes a las que se han enfocado, una de ellas es la de microondas, en la cual no habían hecho un gran estudio ya que por sus propiedades del grafeno, las investigaciones se habían centrado en la banda de THz [11,13]. Pero con nuevos procesos de obtención de grafeno ya se está realizando estudios en microondas. Uno de los procesos que podemos destacar es la impresión a base de grafeno [8,9, 29]. En el caso de [8] su conductividad es de 4.1×10^4 S/m con un grosor de 0.1mm, gracias al uso de polivinilpirrolidona (PVP) sustituyendo al Cyrene y un método de exfoliación ultrasónica. En el caso de [9] se utilizaron sustratos de Kapton (Kapton HN; DuPont; EE. UU.; 76 μm de espesor) donde fueron serigrafiados en una relación 1:2 (grafeno-aglutinante). Se obtuvo $4\Omega/\text{sqr}$ en espesores de 10 μm gracias a una laminación por compresión y tratamiento térmico. Para [29] el valor es de 1.39×10^4 S/m y de $1.9 \pm 0.1 \Omega/\text{sqr}$ en espesores de 38 μm .

Otra técnica que se utiliza es la del grafeno inducido por láser (LIG) y la LIG-MoS2 y en [15] se utiliza para hacer antenas monopolo y las mediciones obtenidas en varios puntos de las antenas están en el rango de 6–15 Ω/sqr y 5–15 Ω/sqr respectivamente.

Algunos de los materiales que utilizan como dieléctricos son el tereftalato de polietileno (PET) con constante dieléctrica de 2.25 [13], el vidrio con una constante de 4.5 [15], sustratos de espuma con una constante de 1.5 [29].

2.9 Efecto piel

El efecto piel (δ) es un problema práctico en todos los conductores el cual consiste en que las corrientes que están fluyendo sobre el conductor se ven restringidas a una pequeña área del mismo y entre mayor sea la frecuencia de trabajo menor será la superficie que usará las corrientes [35], esto se aprecia mejor en la Figura 2- 19.

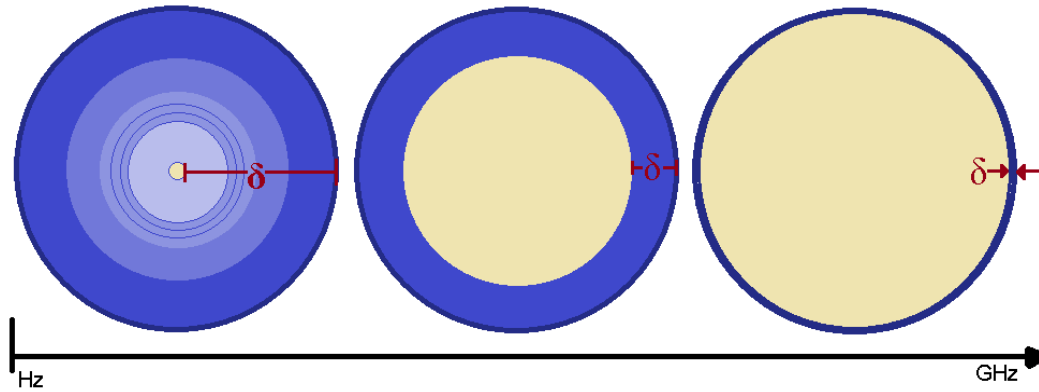


Figura 2- 19 Efecto piel en un conductor δ : a mayor frecuencia, menor superficie para el flujo de corriente

Para obtener el valor del efecto piel en un material se necesita conocer la conductividad (σ), la frecuencia angular de la corriente (ω), la permeabilidad en el espacio libre (μ_0), estos datos se utilizan en la ecuación 2-8. Sabiendo que el valor de la permeabilidad es una constante, si se sustituye en la ecuación, se obtiene el comportamiento del efecto piel variando la conductividad o la frecuencia angular.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \quad (2-8)$$

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa algunos materiales junto con su conductividad [35] y 4 frecuencias las cuales nos da como resultado una longitud del efecto piel en cada material.

Efecto piel (δ)					
Material	Conductividad (σ)	f=60Hz	f=1KHz	f=1MHz	f=1GHz
Plata	62e6	8.25 mm	2.02 mm	0.064 mm	2.02 μ m
Cobre	57e6	8.61 mm	2.1 mm	0.067 mm	2.11 μ m
Oro	41e6	10.1 mm	2.48 mm	0.79 mm	2.48 μ m
Aluminio	38e6	10.5 mm	2.58 mm	0.82 mm	2.58 μ m
Acero	10e6	20.5 mm	5.03 mm	0.159 mm	5.03 μ m
Grafito	7e4	246 mm	60 mm	1.90 mm	60.1 μ m
Silicon	2.3e3	1350 mm	331 mm	10.5 mm	331.9 μ m

Tabla 2- 5 Valores de efecto piel con diferentes materiales y frecuencias

Con base en la tabla anterior podemos determinar que entre más aumente el la frecuencia o la conductividad, la longitud del efecto piel disminuirá. Se estudia el efecto piel para el grafeno considerando tres valores típicos de conductividad de este [8, 11, 28, 29, 30, 32] y tres valores de frecuencia que estén en el rango de microondas. En la Figura 2- 20 se observa que entre menor sea la frecuencia y la conductividad sea baja, la dimensión del efecto piel tiene un mayor rango por donde puede transmitir la corriente en el conductor, pero a medida

que se incrementa la frecuencia la dimensión empieza a disminuir hasta llegar a micrómetros (μm).

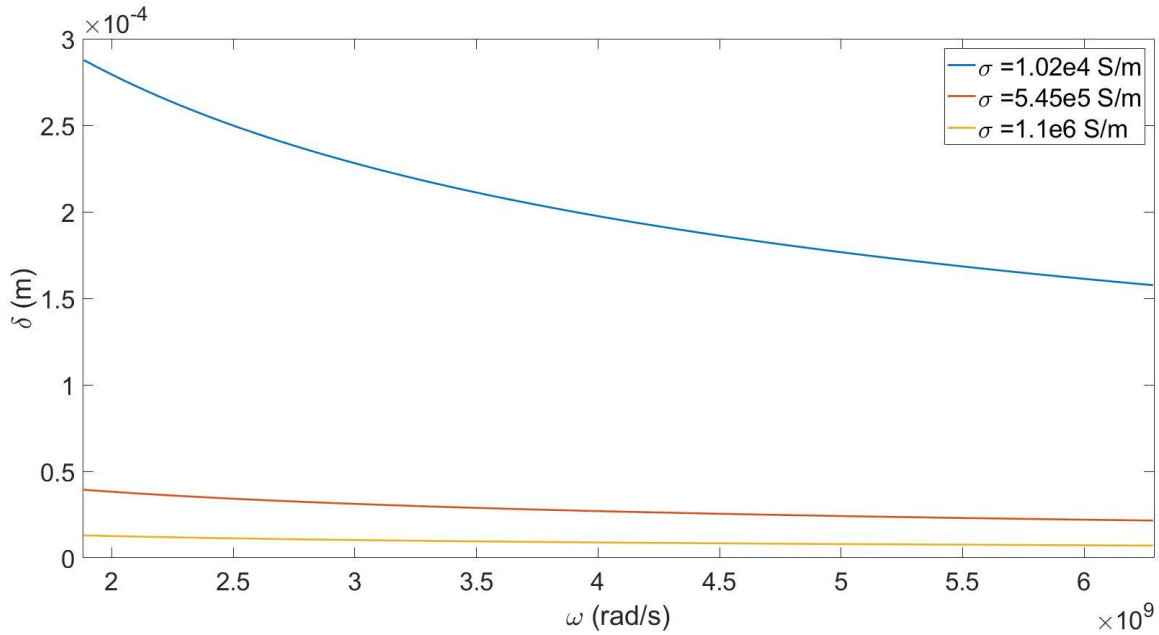


Figura 2- 20 Relación entre efecto piel y frecuencia angular

En la Figura 2- 21 se corrobora lo que se explica en la Figura 2- 20 pero utilizando tres frecuencias fijas, cubriendo las frecuencias de trabajo en el rango de microondas y que se utilizan en esta tesis para los diseños de cintas y antenas, variando el valor de la conductividad con base en la literatura donde se menciona la conductividad del grafeno [8, 11, 28, 29, 30, 32]. Con estos valores obtenidos se logra determinar cuál puede ser el grosor mínimo del grafeno para que trabaje con una buena eficiencia y un mínimo de pérdidas, esta no es un constante ya que va a depender si el material con que se diseñan los dispositivos tiene una mayor o menor conductividad y cuál será frecuencia de resonancia.

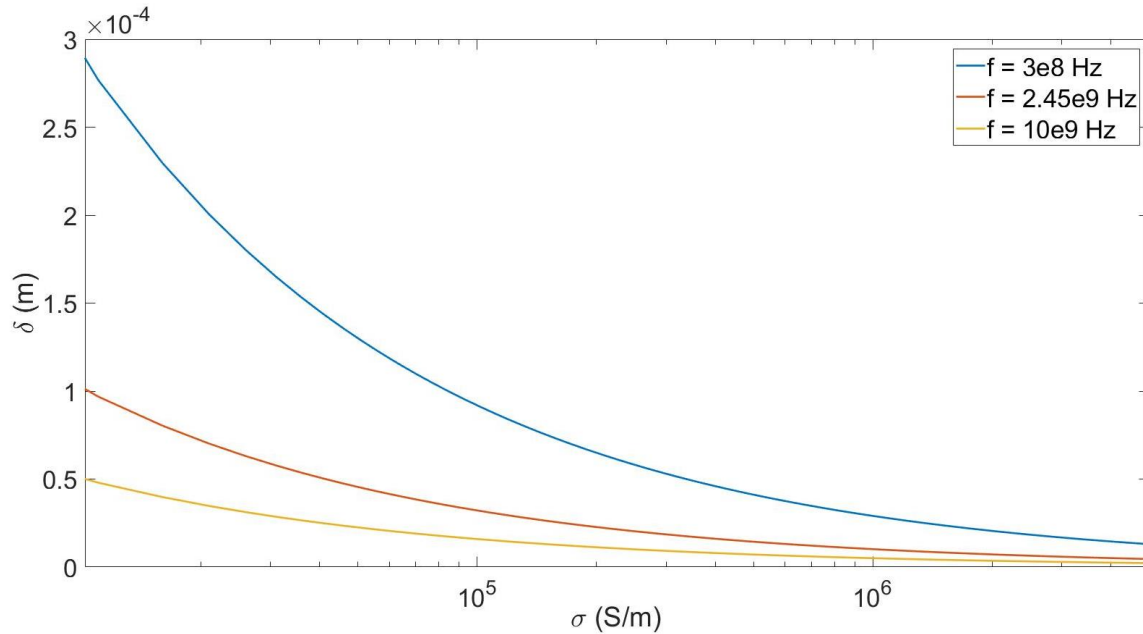


Figura 2- 21 Relación entre efecto piel y conductividad

2.10 Relación entre resistencia de hoja, conductividad eléctrica y grosor de material

Para iniciar en esta sección tenemos que conocer que es la conductividad y la resistencia de hoja, lo cual describiremos brevemente a continuación. La conductividad es una propiedad que poseen los materiales de permitir la propagación de calor o corriente eléctrica a través de él. Depende de la conductividad eléctrica de cada material es como se puede determinar si es un buen o mal conductor y se denota con la letra σ , y esta propiedad es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica, la cual se denota con la letra ρ [34]. En palabras simples, si un material tiene una resistencia eléctrica alta, será un mal conductor eléctrico y viceversa.

La resistencia de hoja es una propiedad usada en los conductores y semiconductores de película delgada, esto con el fin de caracterizar el material. Este tipo de resistencia tiene la ventaja de que no depende de las medidas de la hoja, lo cual hace una fácil comparación entre diferentes muestras [33]. Se analizó en diferentes documentos [8, 9, 11, 12, 15, 28, 29, 31, 32] el máximo y mínimo de que existe en conductividad, resistencia de hoja y grosor del material, en este caso el grafeno, con los datos recabados en la Tabla 2- 6 y utilizando la ecuación 2-9, la cual corresponde a la resistencia de hoja [31], se tomaron tres valores de grosor, tres valores de resistencia de hoja y tres valores conductividades para hacer los gráficos de las siguientes imágenes.

$$R_{sh} = \frac{\rho}{t} \quad (2-9)$$

Donde:

R_{sh} = Resistencia de hoja (Ω/sq)

ρ = Resistividad del material ($\Omega*m$)

t = Grosor del material (μm)

Para utilizar la conductividad en la formula solo sustituimos sabiendo que es el inverso de la resistividad del material, quedando de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2-10)$$

Donde σ es la conductividad en el material y sustituyendo la ecuación 2-10 en 2-9, queda como:

$$R_{sh} = \frac{1}{t*\sigma} \quad (2-11)$$

R_{sh} (ohms/sq)	t (μm)	σ (S/m)	ρ (ohms*m)	Referencia
		5E+06		[32]
	25um	1.10E+06		[36]
		4.10E+04		[8]
		7.13E+04		[8]
4	10um			[9]
5	10um			[9]
6	10um			[9]
		3.70E+04		[11]
2.6	35um			[12]
6.0-15.0	140um			[15]
5.0-15.0	130um			[15]
1.9+-0.1	4.20E-05	1.25E+04	7.90E-05	[29]
1.9+-0.1	3.80E-05	1.39E+04	7.20E-05	[29]
	10um	3.70E+04		[30]

Tabla 2- 6 Valores presentados en documentos de: conductividad, grosor, resistencia de hoja y resistividad de material grafeno

Se seleccionó a 3 valores de cada una de las variables, los cuales fueron un mínimo, un máximo y un valor intermedio y se aplicaron en la ecuación 2-11, en la otra variable se realizó un barrido de datos y así se obtuvo un comportamiento el cual se muestra en las siguientes imágenes.

Se muestra tres valores fijos de grosor en la Figura 2- 22, y aplicando la ecuación 2-11, se logra ver que entre menos sea la conductividad y el grosor del material de grafeno en la fabricación de dispositivos pasivos en el rango de microondas la resistencia de hoja aumenta.

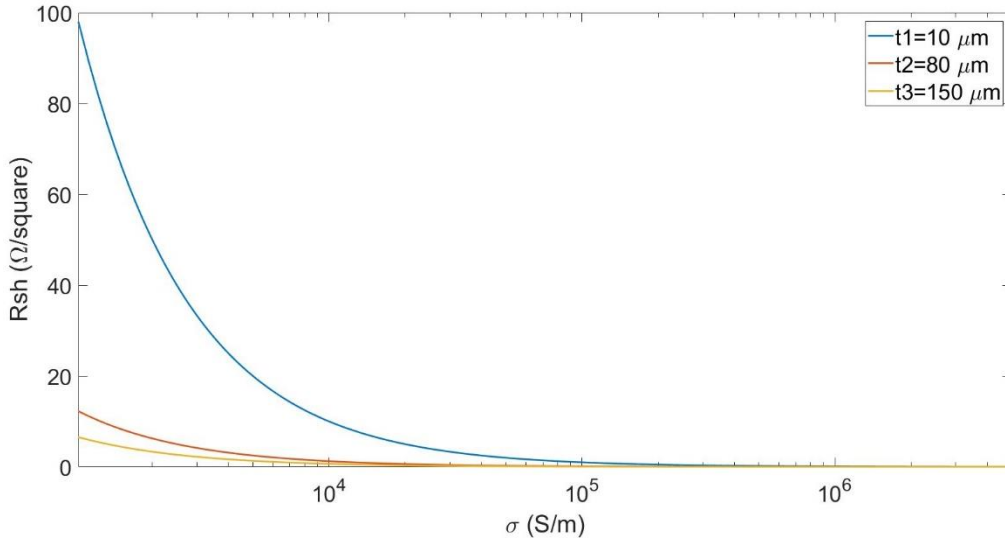


Figura 2- 22 Respuesta de resistencia de hoja aplicando 3 grosores fijos

En la Figura 2- 23 ahora tenemos tres valores fijos de conductividad y la variante de valores es el grosor del material, en esta figura se corrobora que si se tiene una baja conductividad y un grosor de material delgado, la resistencia de hoja incrementará demasiado, pero a medida que aumenta la conductividad en el material ya no hay una gran afectación en la resistencia de hoja. En esta imagen se corrobora que entre mayor sea la conductividad y el grosor del material sea más delgado llegara un punto donde la variación en la resistencia de hoja no sea tan notorio.

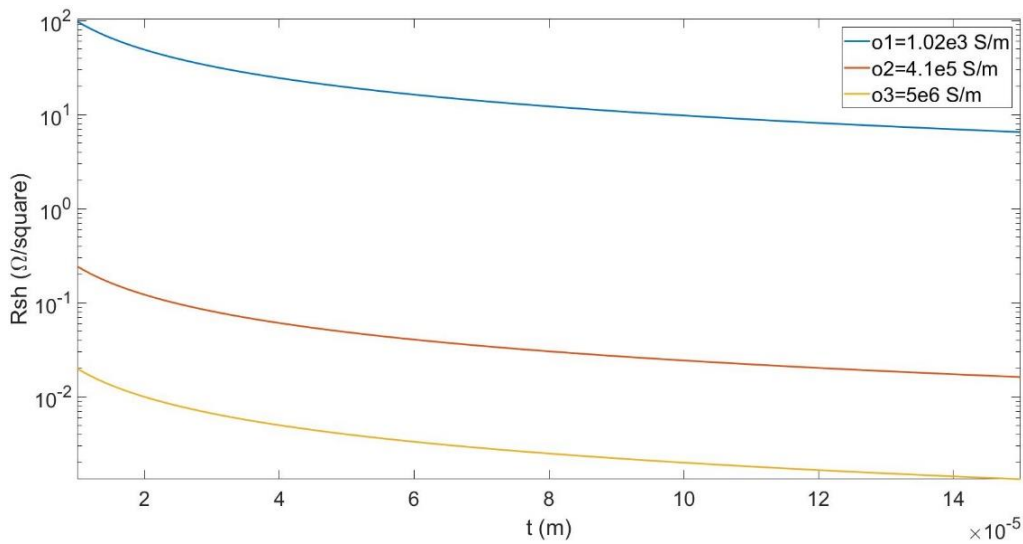


Figura 2- 23 Respuesta de resistencia de hoja aplicando 3 conductividades fijas

En la Figura 2- 24 se utilizó nuevamente tres grosores de material pero ahora se hizo un barrido de valores de resistencia de hoja desde 0.036Ω/sq hasta 7Ω/sq, los cuales obtuvimos de la Tabla 2- 6. En esta figura denota que si se requiere una resistencia baja con un grosor

delgado, el material debe tener una mayor conductividad que cuando se aumenta el grosor del material.

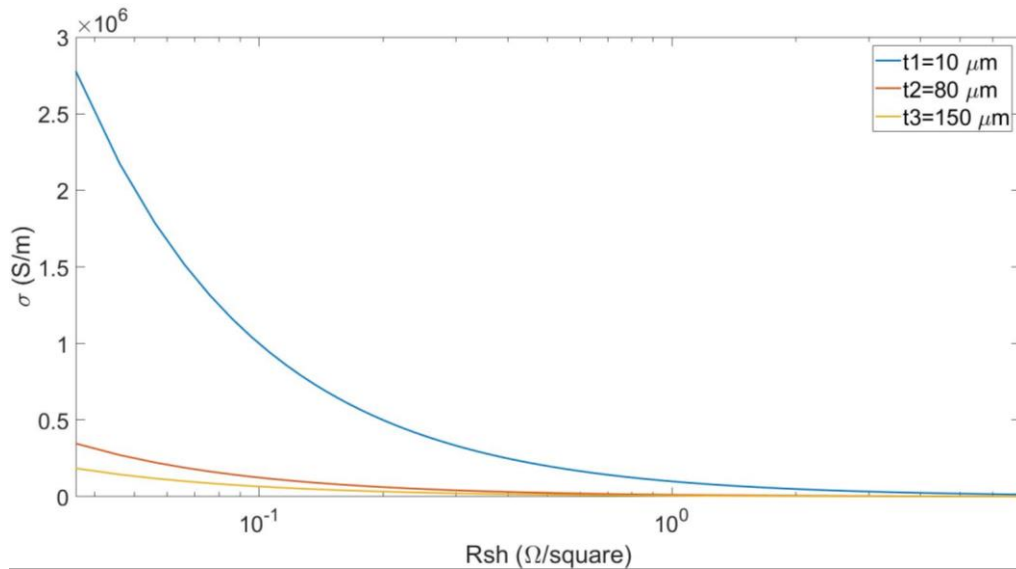


Figura 2- 24 Relación entre conductividad y resistencia de hoja

En la Figura 2- 25 se utilizan tres resistencias de hoja, estas con base en el material grafeno, tomando dos de ellas de la Tabla 2- 6 y una de un valor intermedio entre la máxima y mínima, se realizó un barrido de grosores desde 10μm hasta 150μm, lo cual indica que entre menor sea el grosor del material y menor la resistencia de hoja, tiende a tener una mejor conductividad.

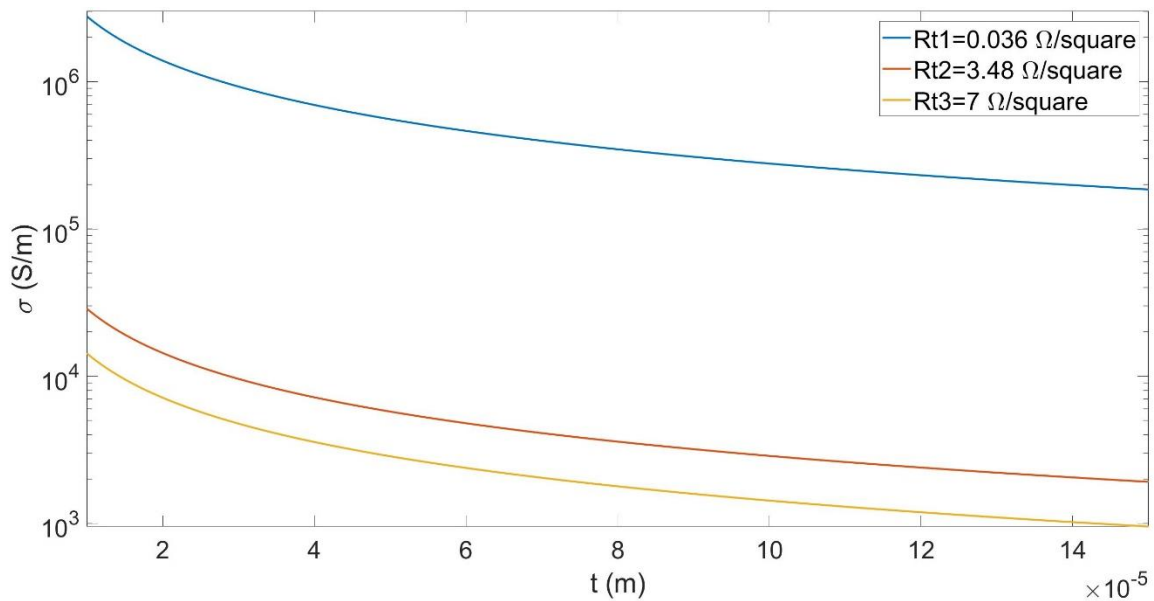


Figura 2- 25 Relación entre conductividad y grosor

2.11 Conclusiones

En esta sección se ha hecho una investigación que va desde el espectro electromagnético, las líneas de transmisión, propagación de ondas. También se realizó el estado del arte del grafeno incluyendo cuales son los rangos de conductividad y grosores comúnmente utilizados, ya que con estos datos y a través de las ecuaciones del efecto piel y la relación entre la resistencia de hoja, conductividad y el grosor del material conductor ha permitido obtener información para realizar un diseño que cumpla con características y disminuir en pérdidas por material.

Capítulo 3 líneas de transmisión con grafeno

3.1 Línea de Microcinta

Para llevar a cabo la simulación de líneas de transmisión de microcinta se debe saber algunos puntos importantes; la conductividad del material, el ancho y largo del conductor, junto con la constante dieléctrica, las pérdidas tangenciales y la altura del sustrato que se utilizará son de los más relevantes para realizar un análisis.

Para estas primeras simulaciones se tomaron dos sustratos los cuales son el vidrio con una constante dieléctrica de $\epsilon_r=5$ y pérdida tangencial de $\delta=0.002$ [15] y una altura de $h=1.6\text{mm}$. La frecuencia que se tomó en consideración fue de 5 GHz con un desfaseamiento de 90° y una $Z_0=50\Omega$. Se inició obteniendo el valor del ancho (W) como se muestra en la Figura 2- 9, la cual se consigue con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A}-2}; \frac{W}{h} \leq 2 \quad (3-1a)$$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]; \frac{W}{h} > 2 \quad (3-1b)$$

Donde:

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

Se obtiene el valor de A, el cual es $A=1.544$ y se sustituye en la ecuación 3-1a, obteniendo como resultado 1.88, el cual es menor a dos y por ello la condición se cumple. Ahora solo hay que sustituir el valor de h en la ecuación, y así calcular el valor de W, el cual es 2.77mm.

De esta manera, con el valor de W se puede calcular la permitividad efectiva (ϵ_{eff}), la cual se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3-2)$$

Sustituyendo los valores, el resultado es $\epsilon_{eff} = 3.71$. Este valor resulta necesario para obtener la longitud de onda, la cual es:

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3-3)$$

Resultando una $\lambda = 31.15$ mm con desfaseamiento de 360° , pero al requerir el valor con un desfase de 90° , solo se divide el valor resultante entre cuatro, el cual es igual a

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{31.15}{4} = 7.78\text{mm}$$

Este valor obtenido corresponde al largo de la microcinta. Tomando los valores calculados de W y L se realizó la simulación en el programa HFSS como se muestra en la Figura 3- 1,

junto con las medidas mostradas en la Tabla 3- 1. También se agregó el grosor del material, el cual es $t=0.035\text{mm}$.

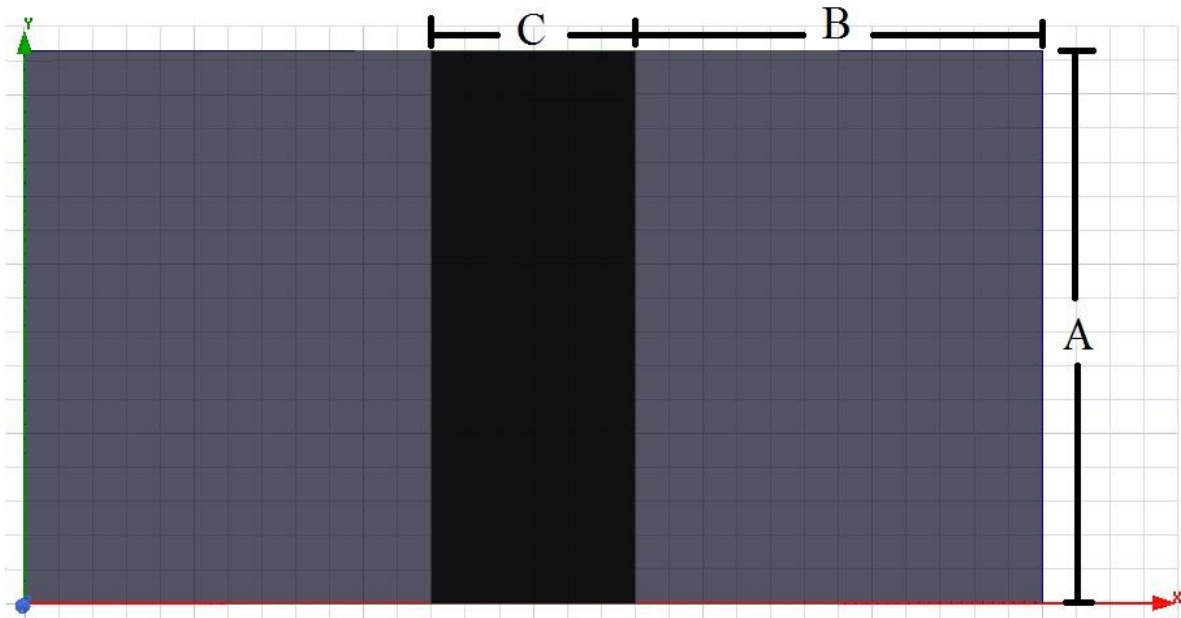


Figura 3- 1 Diseño de línea de microcinta

A	B	C
7.78 mm	5.54 mm	2.77mm

Tabla 3- 1 Medidas de microcinta

Para las simulaciones se consideró dos materiales de conductores diferentes; cobre con una conductividad de $\sigma=58e6 \text{ S/m}$ [35] y grafeno con una conductividad de $\sigma=3700 \text{ S/cm}$, realizando un barrido de frecuencias desde 1GHz hasta 10GHz.

En la Figura 3- 2 se muestra el comportamiento del cobre y grafeno en el coeficiente de reflexión, el cual se observa que ambas líneas tienen un comportamiento de reflexión similar, el cual está entre -40dBm y -20dBm, esto a pesar de que la conductividad del grafeno es menor a la del cobre. La Tabla 3- 2 muestra la respuesta en 4 frecuencias, dos de ellas dentro de las bandas ISM.

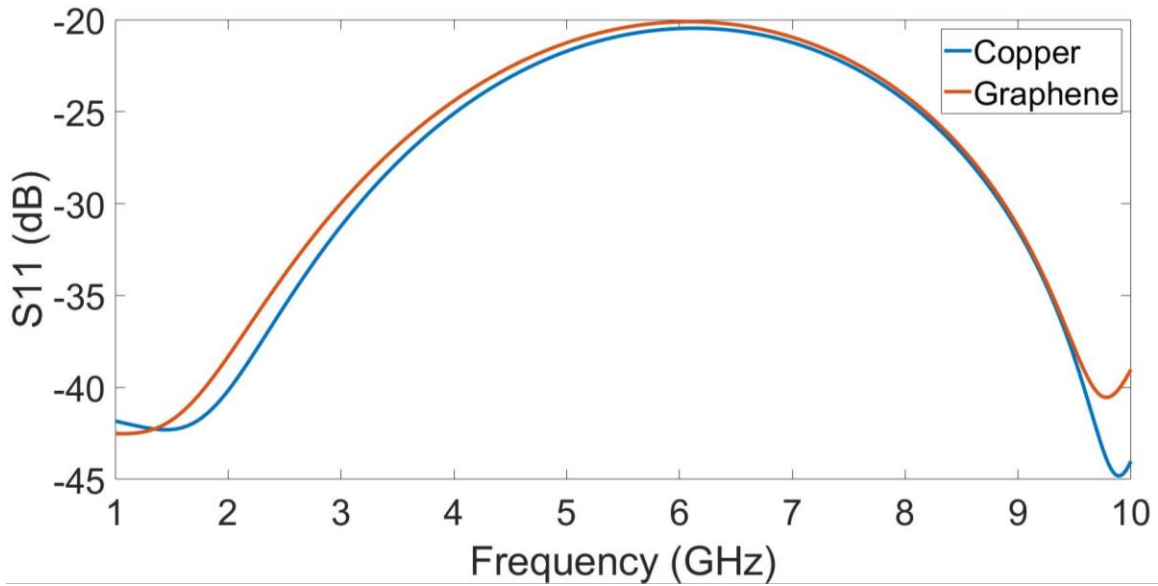


Figura 3- 2 Coeficiente de reflexión grafeno y cobre

La Figura 3- 3 muestra que el coeficiente de transmisión en el cobre es mejor que el grafeno debido a las pérdidas por inserción y a la conductividad del grafeno, esto a pesar de que la transmisión es mejor en el cobre, 0.04dB en su mayor diferencia, pero en las dos bandas ISM su máxima diferencia es de 0.0231dB como se observa en la Tabla 3- 2, y estas pérdidas pueden disminuir aumentando la conductividad del grafeno.

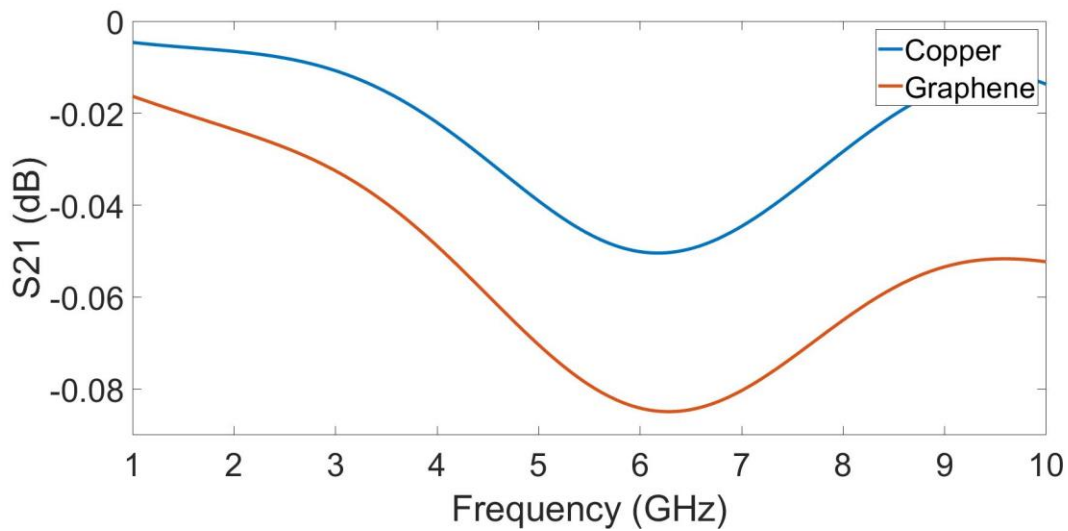


Figura 3- 3 Coeficiente de transmisión: grafeno, cobre

Simulación		
Cobre		
Freq	S11	S21
1GHz	-55.4902	-0.0038
2.45GHz	-37.5923	-0.0069

5.6 GHz	-21.4119	-0.0409
10 GHz	-30.5344	-0.0160
Grafeno		
Freq	S11	S21
1GHz	-47.7863	-0.0150
2.45GHz	-42.4298	-0.0241
5.6 GHz	-22.0879	-0.0640
10 GHz	-30.8236	-0.0524

Tabla 3- 2 Valores obtenidos en S11 y S21

3.2 Línea coplanar

La línea coplanar (CPW) es la segunda más empleada solo después de la de microcinta, la cual consta de un conductor entre dos planos de tierra sobre la misma cara de un sustrato [41, 42, 43, 44, 45, 46]. En la Figura 3- 4 se observa la estructura básica de una línea coplanar.

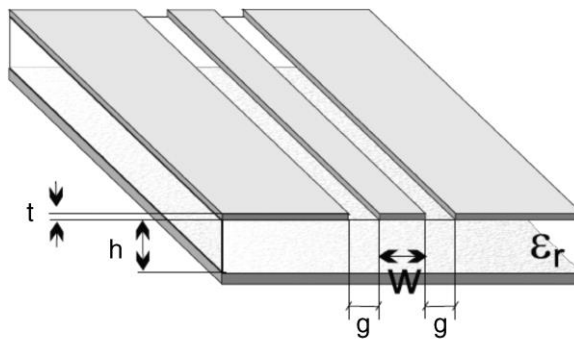


Figura 3- 4 Estructura de una línea coplanar [44]

Una de las principales ventajas que posee es que simplifica la fabricación [42,46] ya que solo necesita ser impreso en un plano. Además, en comparación a las líneas de microcinta se puede usar para conectar tanto componentes de circuitos pasivos como activos [41,45], puede reducirse el tamaño sin límite, pero eso puede ocasionar mayores pérdidas [42]. Estas ventajas incluyendo otras, las hacen ideales para trabajar en aplicaciones MIC y MMIC [42, 44,45]. Existen 2 configuraciones básicas de CPW; donde sus planos de tierra solo los tiene en el mismo plano del conductor y la otra, que adicionalmente tiene un plano de tierra como se usa en una línea de microcinta. Estas dos se muestra en la Figura 3- 5.

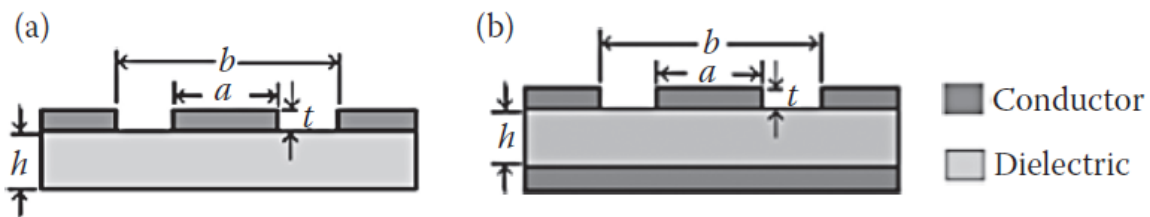


Figura 3- 5 Líneas coplanares a) sin plano de tierra b) con plano de tierra [46]

Para iniciar con el diseño y simulación de una CPW se tomó en cuenta los siguientes datos: como dieléctrico se utilizó el vidrio con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 5$ y una altura de $h=1.6\text{mm}$ y frecuencia $f = 5\text{GHz}$. Además, una impedancia característica de $Z_0 = 50\Omega$ con un desfase de 90° , un valor de $C=3\text{mm}$ y, como materiales conductores, se utilizó el grafeno con una conductividad de 3700S/cm y el cobre con una conductividad de $57\text{e}6\text{S/m}$.

Para calcular la constante dieléctrica efectiva K_{eff} , se utilizó la ecuación 3-4[42].

$$K_{eff} = \epsilon_r/2 + 1/2 \quad (3-4)$$

La longitud de CPW (A) se obtuvo con la ecuación 3-3 dividida en 4. Para evitar resonancias superiores a la propuesta, el valor de $C+2D$ debe ser inferior a $\lambda/2$, y el tamaño de los planos de tierra (2B) debe ser al menos cinco veces el valor de $C+2D$ [47]. El diseño se muestra en Figura 3- 6.

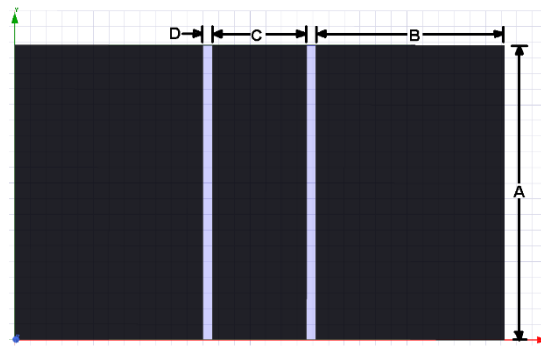


Figura 3- 6 Diseño de línea coplanar

Después de realizar un análisis paramétrico para reducir el tamaño de los planos de tierra, se obtiene que $2B = 4C$, lo cual se muestra en la Tabla 3- 3.

A	B	C	D
9.4 mm	6 mm	3 mm	0.3 mm

Tabla 3- 3 Medidas de línea coplanar

Se simularon dos líneas CPW en el programa de software HFSS. Además, se simuló una línea considerando la conductividad del grafeno de 3700 S/c . La otra línea se simuló utilizando la conductividad del cobre de $57\text{e}6\text{ S/m}$. Los resultados del coeficiente de reflexión se muestran en la Figura 3- 7 y el coeficiente de transmisión en la Figura 3- 8. En cuanto a las dos CPW muestran un coeficiente de reflexión por debajo de -30dB , pero la que está simulada con grafeno se mantiene en el rango de -36db a -30db y la simulada con cobre varía en el rango de -45dB a -33dB . Aunque existen diferencias entre las dos simulaciones, ambas tienen un coeficiente de reflexión por debajo de -30dB .

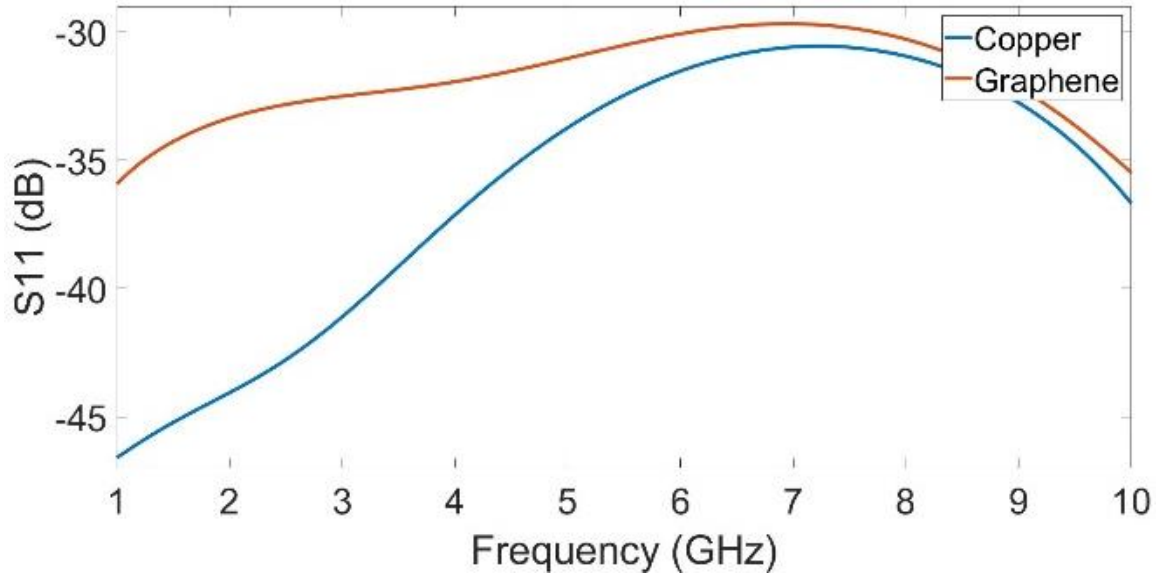


Figura 3- 7 Respuesta del coeficiente de reflexión

En cuanto al coeficiente transmisión mostrado en la Figura 3- 8, la CPW simulada con grafeno presenta mayores pérdidas de inserción que la CPW con cobre. Las diferencias de pérdidas por inserción de la CPW simulada con grafeno y la CPW simulada con cobre oscilan entre -0.7 dB y -0.15 dB en el rango de frecuencia testeada. En la Tabla 3- 3 muestra las pérdidas por inserción y reflexión para cuatro frecuencias, la cuales se encuentran en el rango de microondas y de las cuales dos de ellas se encuentran en las bandas ISM.

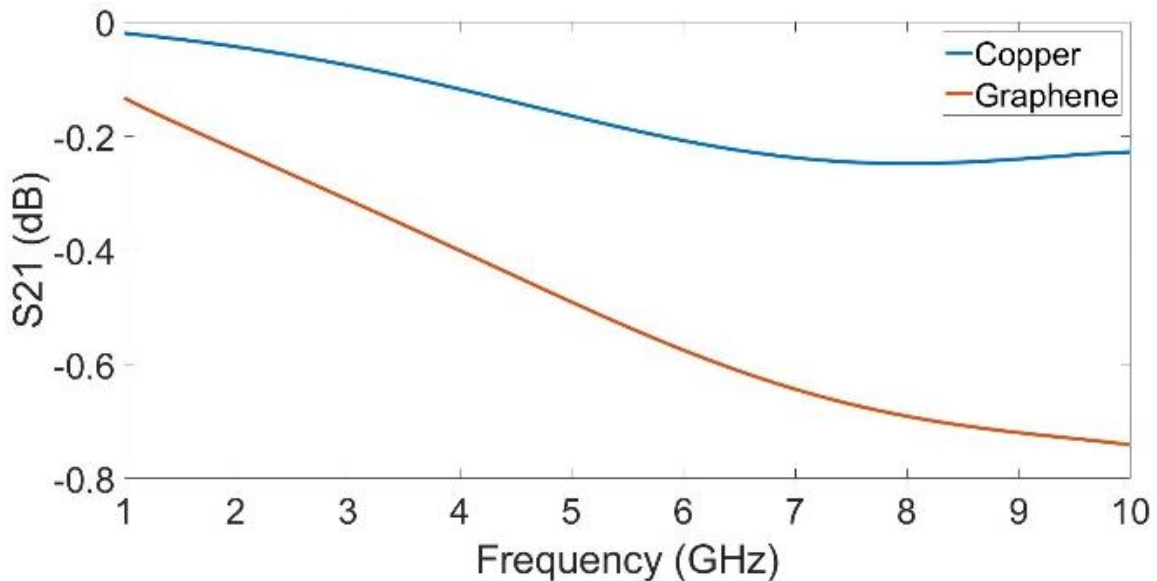


Figura 3- 8 Respuesta del coeficiente de transmisión

Simulación		
Copper		
Freq	S11	S21
1GHz	-46.5965	-0.0197
2.45GHz	-42.9147	-0.0569
5.6 GHz	-32.2544	-0.1917
10 GHz	-36.6859	-0.2279
Graphene		
Freq	S11	S21
1GHz	-35.9347	-0.01332
2.45GHz	-32.8684	-0.02633
5.6 GHz	-30.4198	-0.5428
10 GHz	-35.4867	-0.7412

Figura 3-9 Valores obtenidos en S11 y S21

3.4 Conclusiones

Los resultados derivados en este capítulo demuestran que dependen del sustrato y conductor empleados. En el caso del grafeno se debe considerar, además, la forma de obtención y el método de fabricación, así como su uso en estado puro o si se combina con otros materiales conductores, considerando la frecuencia de trabajo a la que se requiera las líneas de transmisión, de esta forma se obtendrán diferentes cálculos y por ello diferentes respuestas. Otro caso se refiere al sustrato donde se va a montar la línea de transmisión, ya que dependerá de su altura y de su constante dieléctrica, generando así resultados diferentes.

Capítulo 4 Antenas con grafeno

4.1 Antena de parche

Para iniciar el diseño de la antena de parche, lo primero fue designar la frecuencia de resonancia, el sustrato a usar y la altura (h), esto para obtener el ancho (W) y largo (L), Además, se especificó el material conductor a utilizar. El sustrato con el que se diseñó esta antena fue vidrio, el cual tiene una constante dieléctrica de $\epsilon_r = 4.5$ y una altura de $h = 1.6\text{mm}$, la frecuencia de resonancia es $f_r = 2.45\text{GHz}$, la impedancia es $Z_0 = 50\Omega$ y el material conductor fue el grafeno con una conductividad de $1.1e6\text{ S/m}$. Lo primero que se calculó fue el ancho W a través de la siguiente ecuación

$$W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4-1)$$

Donde v_0 = Velocidad de la luz en espacio libre.

De esta forma, se tiene que $W = 3.69\text{cm} \approx 37\text{mm}$. Con este valor obtenido, se utilizó para obtener la permitividad efectiva, y para esto se utilizó la ecuación 3-2 obteniendo el valor de $\epsilon_{eff} = 4.169$. Para obtener el largo (L) se debe tomar en cuenta los efectos de borde, esto hace que sus dimensiones de radiación aumenten en comparación de sus dimensiones físicas [2], por lo tanto, se utiliza la ecuación 4-2

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (4-2)$$

Obteniendo un valor de $\Delta L = 0.074\text{cm} = 0.74\text{mm}$, el cual es por cada lado de L. A partir de este resultado de la ecuación 4-2 se puede calcular el valor de L bajo la ecuación 4-3, la cual requiere del valor de λ y ΔL .

$$L = \frac{\lambda}{2} - 2\Delta L \quad (4-3)$$

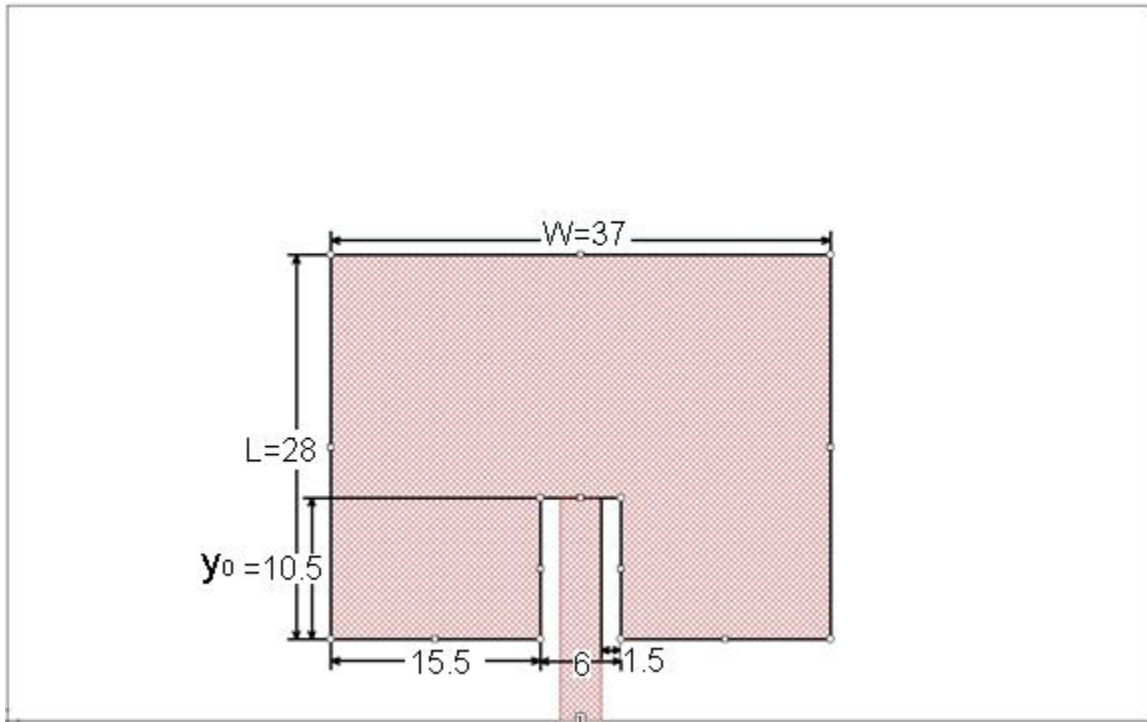
De esta manera, $L = 2.85\text{cm} = 28.5\text{mm}$ y un largo efectivo de $L_e = 2.998\text{cm} \approx 30\text{mm}$. Para la microcinta se requirieron de las ecuaciones 3-1, 3-2 y 3-3, con los valores de $f = 2.45\text{GHz}$, $\epsilon = 4.5$ y $h = 1.6\text{mm}$, obteniendo $W = 3\text{mm}$ y $L = 16.6\text{mm}$. Para calcular la distancia en la que se introducirá la microcinta a la antena de parche, también llamado inset (y_0), se tiene que obtener el valor de la impedancia en la orilla radiadora, la cual se denominó como Z_a , esto se logra a través de la ecuación 4-4

$$Z_a = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \quad (4-4)$$

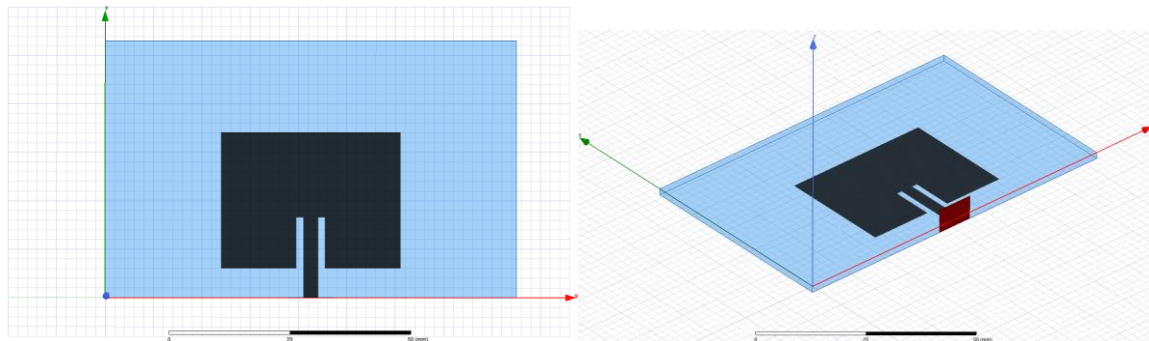
Con el valor obtenido de $Z_a = 310.625\Omega$, se sustituye en la siguiente ecuación para obtener el valor del inset

$$Z_0 = Z_a \cos^2 \frac{\pi y_0}{L} \quad (4-5)$$

Una vez obtenido el valor de $y_0 = 1.05\text{cm} = 10.5\text{mm}$, se inicia con el diseño en HFSS software, y para la separación entre los laterales de la microcinta y el parche se recomienda utilizar menos de dos milímetros en el diseño [17], y un ancho y largo de sustrato $2W$ y $2L$. La Figura 4- 1 muestra el diseño final de la antena de parche con base en las medidas obtenidas.



a)



b)

c)

Figura 4- 1 Diseño y medidas de antena de parche (unidades en mm): a) medidas de antena b) vista frontal c) vista isométrica

Posteriormente se realizó un análisis de la antena y se obtuvo una respuesta que se muestra en la Figura 4- 2. En este primer diseño, la frecuencia de resonancia se localizó en 2.33GHz y así se inició un análisis paramétrico que consistió en reducir el tamaño de L en 0.5mm . Con

esa modificación se realizó nuevamente un análisis brindando una respuesta en la frecuencia original de diseño como se presenta en la Figura 4- 3.

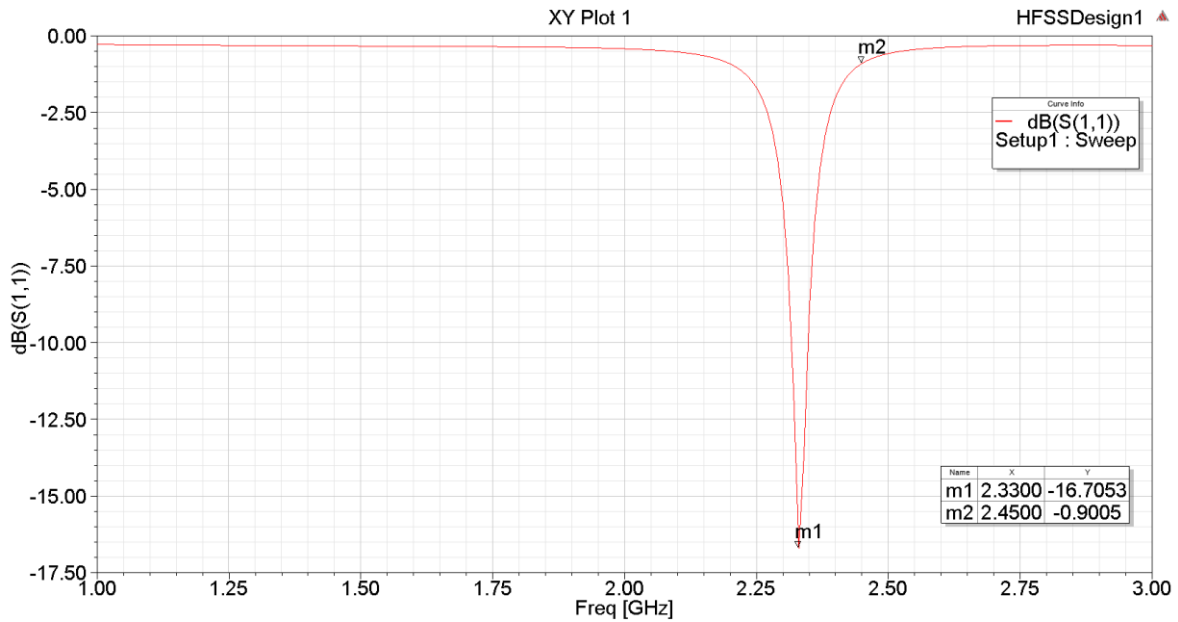


Figura 4- 2 Respuesta de Antena S11

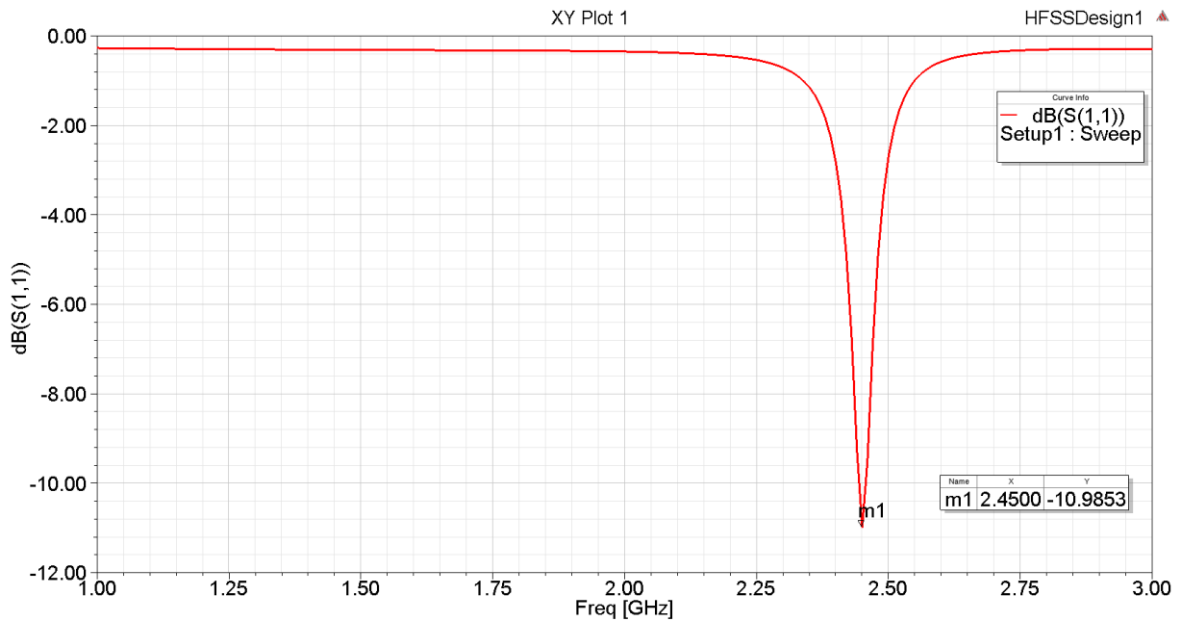


Figura 4- 3 Respuesta S11 con parche modificado

Además de esto, se realizó la simulación del análisis de ganancia en un gráfico tridimensional, el cual se muestra en la Figura 4- 4, con una ganancia máxima de 5dB con la conductividad de 1.1e6 S/m y ya que es una antena de parche solo radiará en 180°. Finalmente, en la Figura 4- 5 se presenta el diagrama de la distribución de la corriente donde

se observa que la antena entra en resonancia debido a que los máximos de corriente se encuentran en los extremos de la antena.

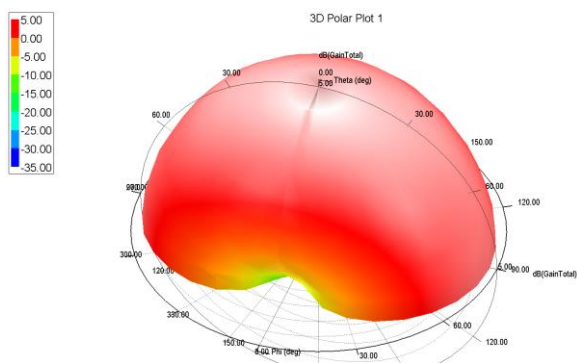


Figura 4- 4 Ganancia de Antena dB tridimensional a 2.45GHz

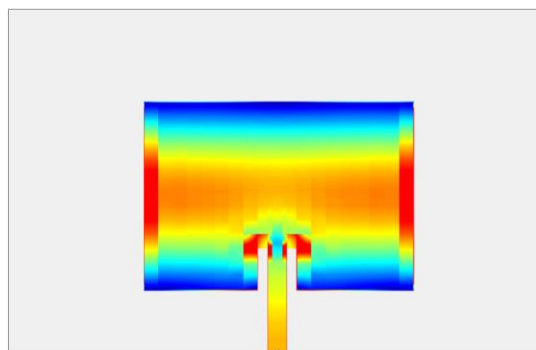


Figura 4- 5 Diagrama de la distribución de la corriente a 2.45GHz

Con base en la Tabla 2- 6 y con las medidas obtenidas, se utilizaron 2 conductividades diferentes adicionales a las del diseño original, esto con la finalidad de observar cómo se modifica el comportamiento en la antena con diferentes conductividades. Los resultados en frecuencia y coeficiente de reflexión, así como la conductividad se muestran en la Tabla 2- 6 del capítulo 2.

Antena L*W (mm)	Conductividad del grafeno (σ)	Frecuencia (GHz)	S11 (dB)	S11 en frecuencia de diseño (dB)
28.5x37	1.1e6 S/m	2.33	-16.7053	-0.9005
28x37	4.7e4 S/m	2.33	-5.5762	-2.2473
28x37	1.1e6 S/m	2.45	-10.9853	-10.9853
28x37	5.0e6 S/m	2.46	-13.2482	-12.4730

Tabla 4- 1 Respuestas en frecuencia y coeficiente de reflexión

Como se observa en la Tabla 4- 1, la antena de parche tiene una mejor eficiencia con una conductividad más alta, su coeficiente de reflexión aumenta, pero también se puede presentar que el punto máximo de reflexión se mueve en frecuencia como lo muestra la tabla anterior.

En la Figura 4- 6 vemos la respuesta de VSWR de la antena de parche, este valor siempre será menor a dos cuando la antena este en resonancia y cómo se observa en la figura, la respuesta de VSWR es de 1.79 a la frecuencia de 2.45GHz y desde que inicia a resonar la antena en 2.44GHz hasta 2.46GHz que es el término de su ancho de banda, está por debajo de dos.

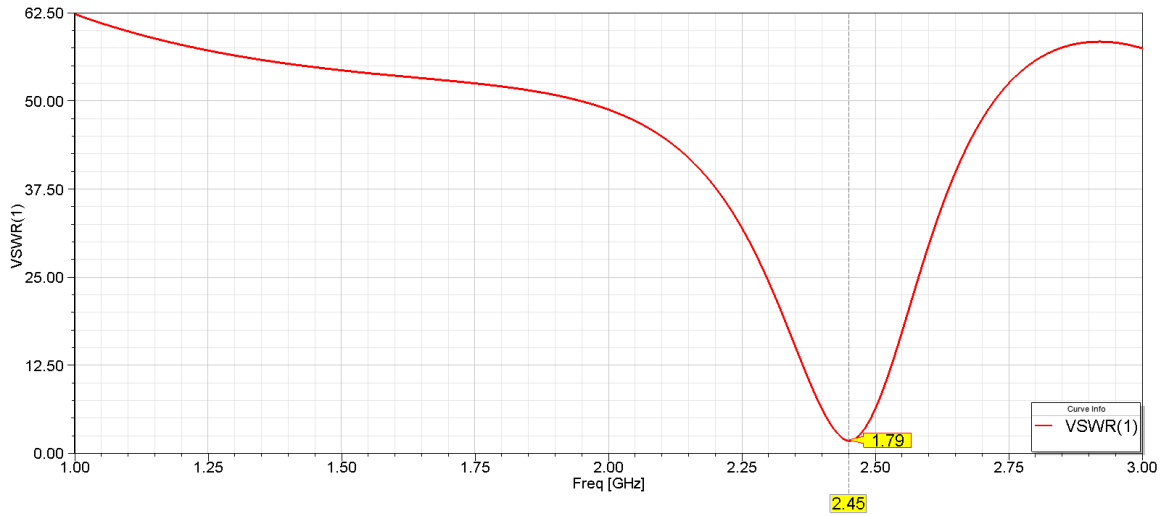


Figura 4- 6 Respuesta de VSWR antena de parche

4.2 Antena coplanar de banda dual

Este diseño se inició con base en [37], en esta literatura se muestran dos tipos de antena coplanar, una de ellas es la utilizada en esta sección, la cual se puede trabajar en dos bandas de frecuencia: 2.45GHz y 5.6GHz. El diseño presentado en [37] utiliza como material conductor el cobre y como sustrato el FR-4 con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 4.4$, así como una altura de $h=1.6\text{mm}$, teniendo como resultados una frecuencia de trabajo de 2.32GHz-2.57GHz y 5.2GHz-5.8GHz. El diseño de la antena se muestra en la Figura 4- 7 y las medidas utilizadas en la Tabla 4- 2.

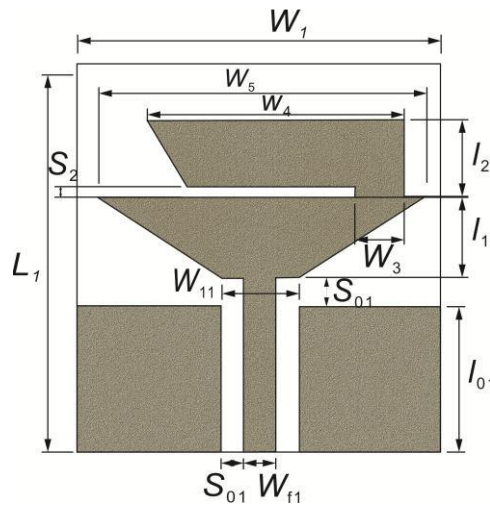


Figura 4- 7 Diseño de antena banda dual [37]

W_1	L_1	w_{f1}	w_{11}	w_2	w_3	w_4
30	30	2.91	6	26	4	20.9

l_{01}	l_1	l_2	s_{01}	s_2	h	
14.6	7	6	1	1	1.6	

Tabla 4- 2 Medidas de antena banda dual (mm) [37]

Como cambio inicial se procedió a realizar un cambio en el sustrato de un FR-4, a un sustrato de vidrio con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 5$ y una altura de $h=1.6\text{mm}$. Como segundo cambio fue el material conductor, el cual se utilizó el grafeno con una conductividad de 3700 S/cm. Teniendo esos cambios en cuenta se inició con el diseño y simulación en HFSS, el diseño se muestra en la Figura 4- 8.

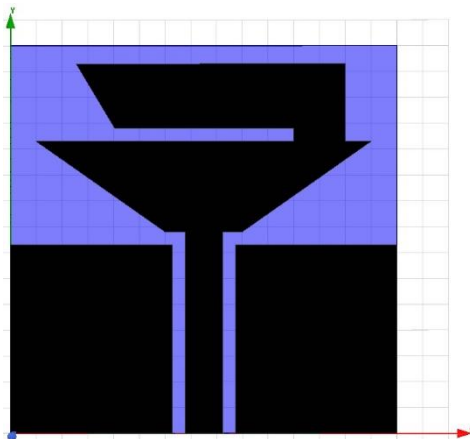


Figura 4- 8 Diseño de antena banda dual con grafeno en HFSS

En esta antena se realizaron dos simulaciones; una con material conductor cobre con una conductividad de $57e6 \text{ S/m}$ y otra con grafeno (3700 S/cm). En la Tabla 4- 3 se muestran los valores mínimos y máximos en donde entra en resonancia la antena con cada uno de los materiales.

En la Figura 4- 9 se superponen las dos respuestas que obtuvimos en las simulaciones para realizar una comparativa de S_{11} , la cual muestra con una respuesta similar con los dos materiales, pero con material grafeno y tomando en cuenta que la antena inicia resuena en -10dB , se puede observar que tiene una mejor ganancia, la cual en 2.45 GHz es de 8.45dB y en la frecuencia de 5.6GHz es de 0.2dB . Adicionalmente, empieza a transmitir a una frecuencia más baja y deja de transmitir a $\pm 13\text{MHz}$. En cuanto a su ancho de banda, se observa que una banda trabaja en el rango de $2.26\text{GHz} - 2.516\text{GHz}$ y la segunda en el rango de $4.6\text{GHz} - 5.65\text{GHz}$. Esto se puede corroborar en la Tabla 4- 3.

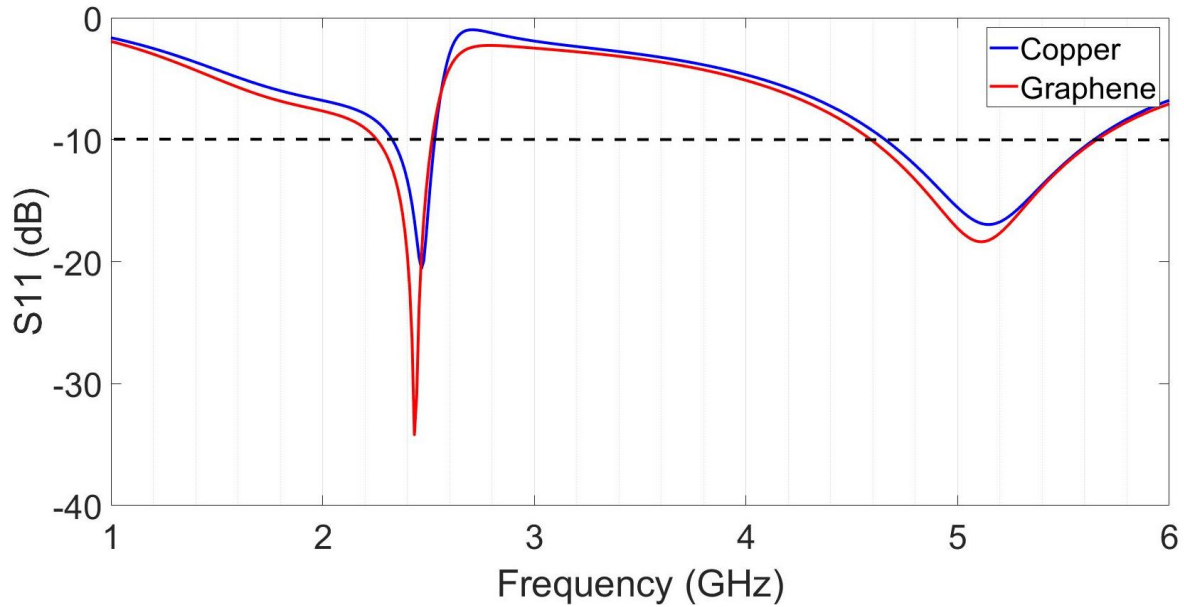


Figura 4- 9 Respuesta de S11 cobre y grafeno superpuestas

Frecuencia	Cobre	Grafeno
Min (2.45GHz)	2.33 GHz	2.26 GHz
2.45GHz	-18.8776 dB	-27.3279 dB
Max (2.45GHz)	2.529 GHz	2.516 GHz
Min (5.6GHz)	4.66 GHz	4.595 GHz
5.6GHz	-10.5651dB	-10.7077 dB
Max (5.6GHz)	5.641 GHz	5.65 GHz

Tabla 4- 3 Respuesta de S11 cobre y grafeno

Asimismo, se realizó la simulación del análisis de la ganancia en un gráfico tridimensional con grafeno como material conductor, el cual se muestra en la Figura 4- 10. Se observa que la ganancia es de -2dB, esto debido a que se utiliza una conductividad 2.9 veces más baja que la antena de parche, esta respuesta estaba prevista ya que en [48] se muestran resultados de ganancia similares a los mostrados en la Figura 4- 10.

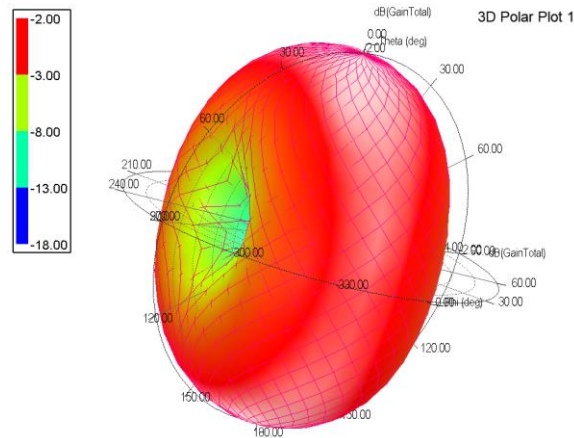


Figura 4- 10 Ganancia de Antena dB tridimensional a 2.45GHz

La Figura 4- 11 muestra el comportamiento de la distribución de la corriente en la antena, la Figura 4- 11a con frecuencia de resonancia a 2.45GHz y en la Figura 4- 11b a frecuencia de resonancia de 5.6GHz. El análisis indica que en la frecuencia de 2.45GHz resuena la parte superior de la antena y cuando está a 5.6GHz, resuena la parte de la antena en forma de trapecio invertido.

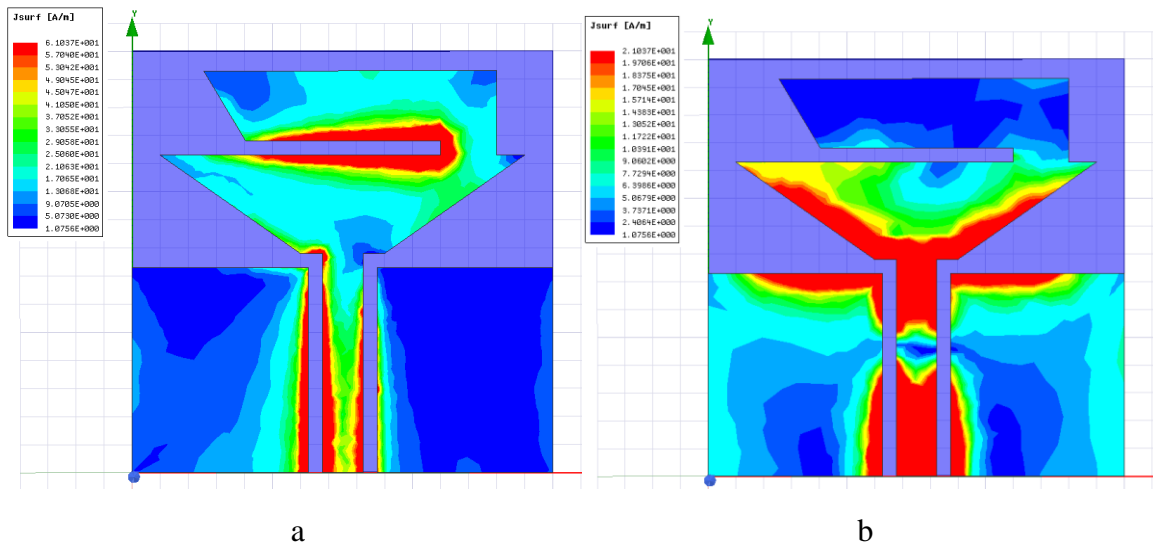


Figura 4- 11 Diagrama de la distribución de la corriente a) 2.45GHz b) 5.6GHz

En la Figura 4- 12 se observa que el valor de VSWR está por debajo de dos en las dos bandas de frecuencia de resonancia de la antena que van desde 2.21GHz hasta 2.51GHz y de 4.59GHz a 5.87GHz, y los valores de VSWR son de 1.2 y 1.66 para los valores puntuales de las frecuencias de 2.45GHz y 5.6GHz respectivamente.

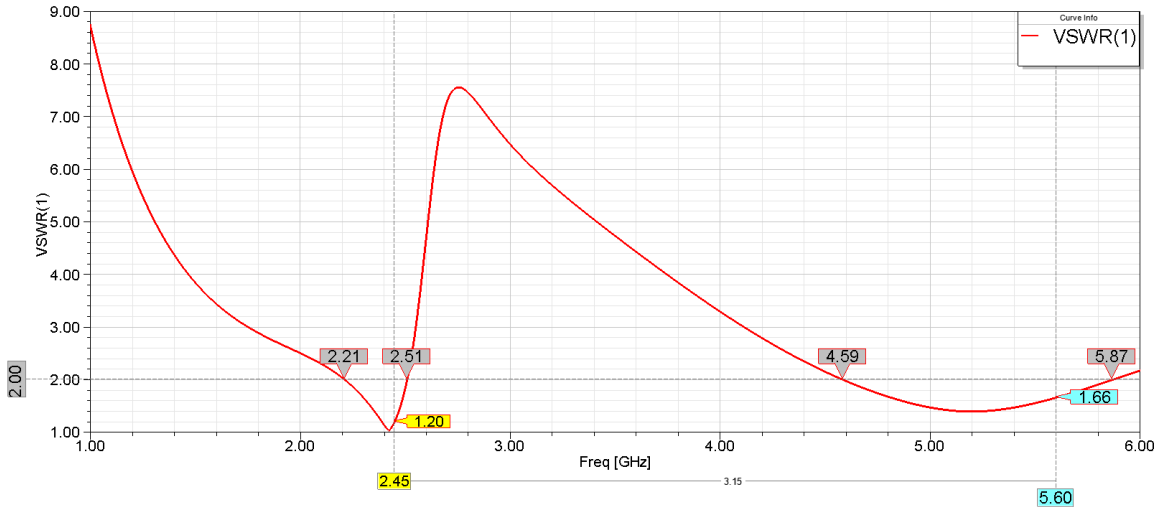


Figura 4- 12 Respuesta VSWR antena bi-banda

4.3 Antena coplanar Triangular

Para realizar este diseño primero se investigó si realizar un diseño de antena con forma triangular era una buena opción, en [38] se reporta una comparación entre antenas de parche rectangular y triangular, obteniendo resultados muy parecidos y en algunos arreglos de antenas, con una mejora en el coeficiente de reflexión. Posterior a eso, se investigó sobre antenas triangulares coplanares y en [39] muestra el desarrollo de una antena triangular iniciada como antena de parche y posterior agregando el plano de tierra coplanar y para modular la frecuencia agregaron cuatro inserciones.

En este diseño y simulación se contemplan los siguientes datos. Al igual que los dos diseños anteriores se usará como sustrato el vidrio con una altura de $h = 1.6mm$, una constante dieléctrica de $\epsilon_r = 5$ y como material conductor se utilizaron dos, el primero es el grafeno con una conductividad de $3700S/cm$ y el segundo material conductor el cobre con una conductividad de $57e06S/m$, con una frecuencia de resonancia de $2.45GHz$ y una impedancia $Z_0 = 50\Omega$.

Lo primero es obtener el valor de a mostrado en la Figura 4- 13, utilizando las ecuaciones de [39,40], las cuales son:

$$a = \frac{2c}{3f_r\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4-6)$$

$$f_r = \frac{2c}{3a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4-7)$$

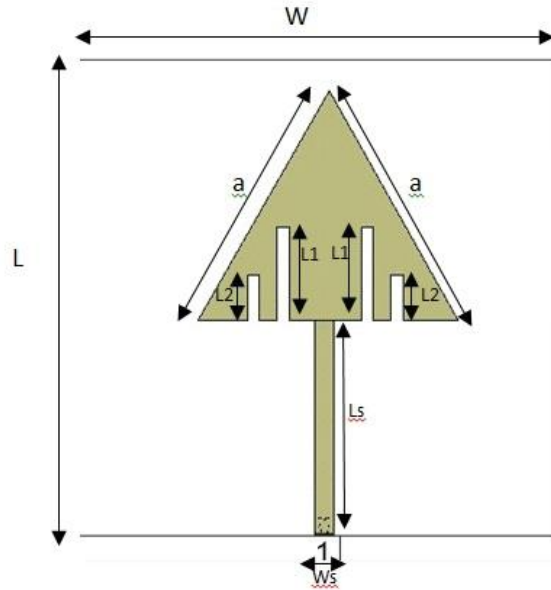


Figura 4- 13 Dimensiones de antena triangular [39]

Al tener la frecuencia de resonancia y la constante dieléctrica, se obtiene el valor de a , el cual queda con un valor de 36.50mm. Para calcular Ws , se utiliza la ecuación 3-1b pero para despejar a B se tiene a la ecuación 4-8:

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4-8)$$

El valor de ϵ_{eff} se calcula mediante la ecuación 3-2. Así, los valores son $\epsilon_{eff} = 3.71$ y $Ws = 2.78mm$.

Se inició con el diseño en HFSS y se simuló con los datos obtenidos, pero al considerar el valor de a , la frecuencia de resonancia se situaba por encima de los 5GHz, por lo que se decidió a colocar cuatro inset como se aprecia en la Figura 4- 13 y se tomaron los valores que se mencionan en [39]. Esto se observa en la Tabla 4- 4.

L1	L2
14mm	9mm
13mm	8mm
12mm	7mm

Tabla 4- 4 valor de inset en [39]

Al realizar esta última acción, la frecuencia de resonancia se mantuvo arriba de 5GHz, por lo que se modificó el valor de la constante efectiva con la ecuación 3-4 quedando con un valor de $\epsilon_{eff} = 3$, de igual forma se modificó la ecuación 4-6, quedando de la siguiente manera:

$$a = \frac{2c}{3f_r\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4-6)$$

Teniendo como resultado de $a = 47.13mm$, esto con la base de que para obtener las medidas de una antena de parche se debe utilizar la constante dieléctrica efectiva. Para finalizar, se realizó un análisis paramétrico en los inset para así obtener la frecuencia de resonancia que se buscaba, el diseño se puede apreciar en la Figura 4- 14.

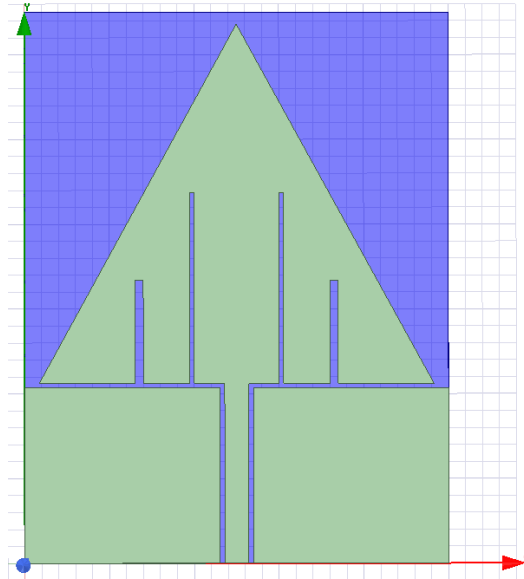


Figura 4- 14 Diseño de antena triangular coplanar

Continuando con las simulaciones, se cambió el material conductor a cobre, se simuló para comparar los resultados entre los dos materiales. Esto se observa en la Tabla 4- 5.

Frecuencia	Grafeno	Cobre
Min (2.45GHz)	2.4022 GHz	2.4711 GHz
2.45GHz	-20.4387 dB	-6.6192 dB
Max (2.45GHz)	2.4978 GHz	2.5244 GHz

Tabla 4- 5 Respuesta de S11 cobre y grafeno

La Figura 4- 15 muestra las dos respuestas superpuestas, concluyendo que a pesar de que las respuestas de cada uno de los materiales son similares en forma, la frecuencia de resonancia y el ancho de banda son distintos, logrando una buena respuesta con el grafeno como material conductor para resonar en 2.45GHz con -20.4387dB y un ancho de banda de 95.6MHz.

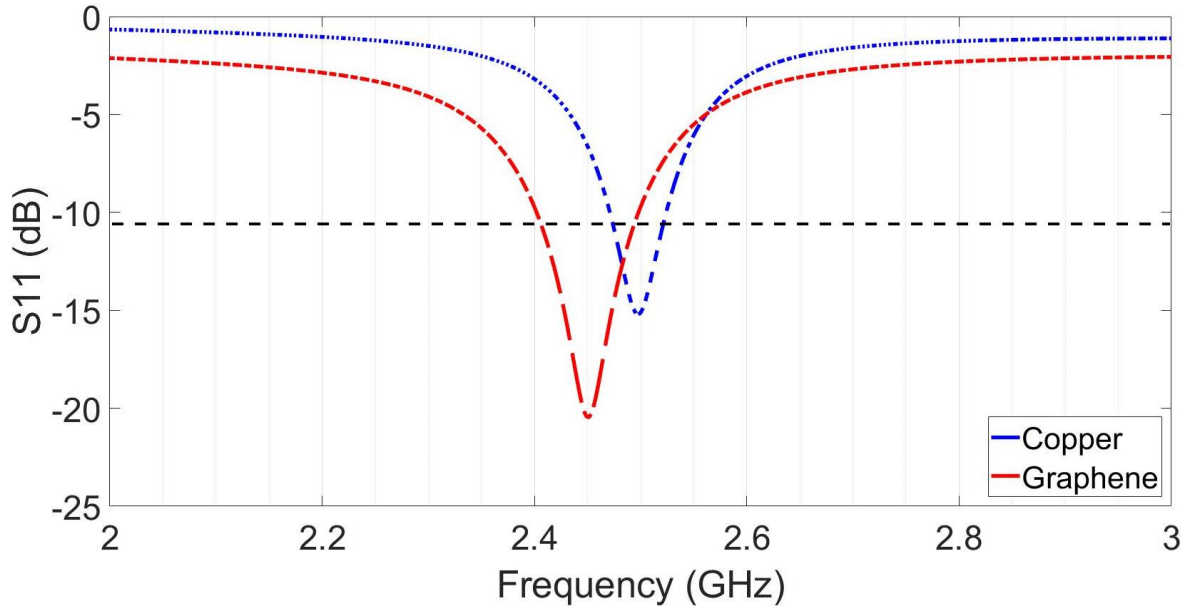


Figura 4- 15 Respuesta de S11 cobre y grafeno superpuestas

Al igual que las antenas anteriores, se realizó la simulación de la ganancia en un gráfico tridimensional como se muestra en la Figura 4- 16, mostrando una ganancia de 0dB en su punto máximo y al igual que la antenna de banda doble, esta tiene una radiación de 360°. Esta antenna presenta una ganancia baja al igual que la antenna bi-banda debido a la conductividad del material con el cual se realizó la simulación, esto demuestra que al igual que la antenna anterior y que en [48] la ganancia será menor debido a la conductividad del material.

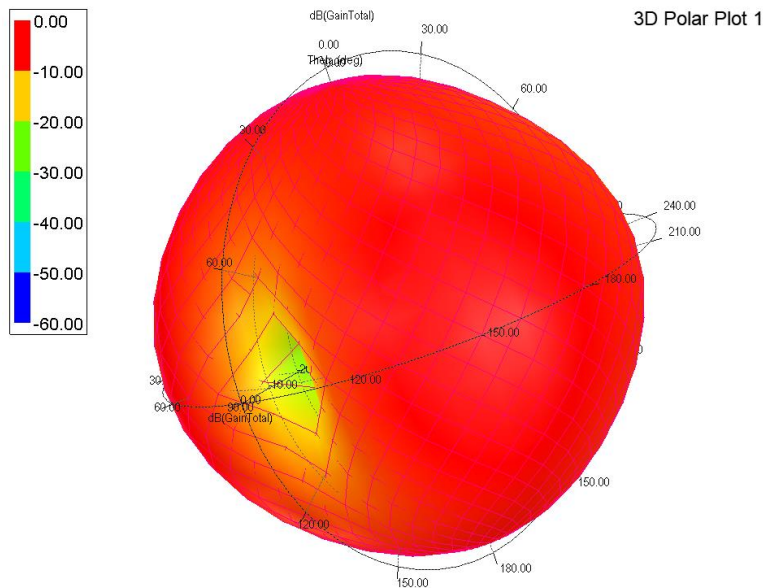


Figura 4- 16 Ganancia de Antena dB tridimensional a 2.45GHz

La Figura 4- 17 muestra el comportamiento de la distribución de la corriente en la antenna con frecuencia de resonancia a 2.45GHz, encontrando que los inset funcionan un papel importante

en la antena, ya que desde ese punto inicia a resonar en la frecuencia de 2.45GHz y al realizar modificaciones en ellos, se modifica el ancho de banda o la respuesta en frecuencia.

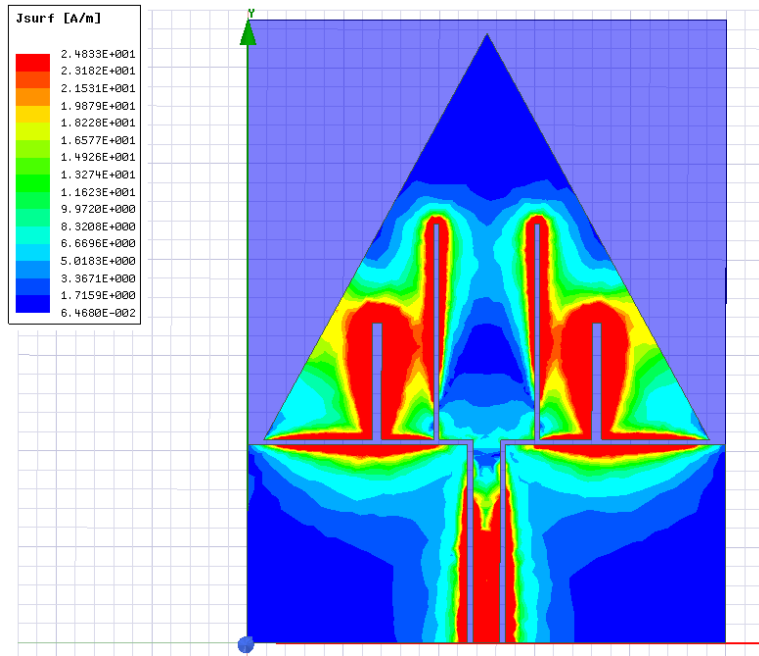


Figura 4- 17 Diagrama de la distribución de la corriente

Para esta antena la respuesta de VSWR la analizamos en la Figura 4- 18, la cual tiene un ancho de banda de 2.40GHz a 2.50GHz donde el valor de VSWR es menor a dos y la respuesta en la frecuencia puntual de 2.45GHz es de 1.21.

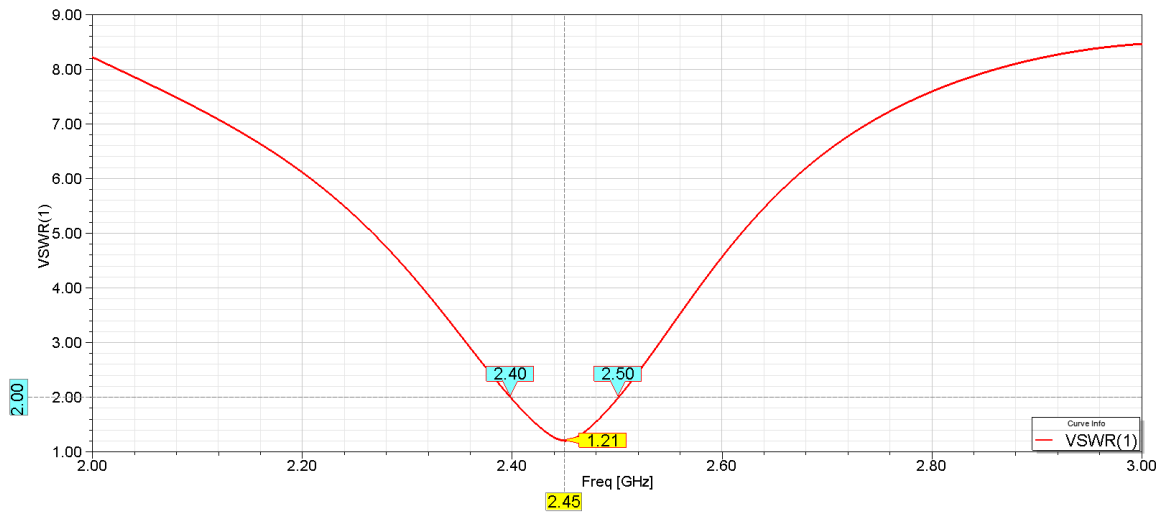


Figura 4- 18 Respuesta VSWR antena triangular

4.4 Conclusiones

Después de haber realizado los tres diseños de antenas, tanto de parche como coplanar podemos determinar lo siguiente.

En la antena de parche, se identificó cómo actúa el largo (L) y la inserción en la respuesta de resonancia y, cómo a través de un análisis paramétrico, se logra obtener la respuesta en la frecuencia original. En la antena bi-banda se identificó las dos zonas de frecuencia y cómo poder variar las dimensiones para poder determinar las óptimas para la obtención de las frecuencias con la conductividad del grafeno. En la antena triangular se identificó cómo se puede variar la frecuencia de resonancia y el ancho de banda a través de la modificación de los inset que se le diseñaron, esto sin hacer una modificación en el ancho del triángulo.

También junto con las antenas coplanares, se determina que el uso del grafeno como material conductor para el uso dispositivos pasivos en rango de microondas es una buena opción ya que a pesar de tener una menor conductividad que el cobre, se pueden obtener resultados similares o mejores en su coeficiente de reflexión y, para mejorar la ganancia de la antena, se podría utilizar un grafeno con una mejor conductividad, ya sea obtenido con otro proceso o dopado con otros materiales conductores.

Cada uno de los modelos de antenas pueden ser usados para aplicaciones diferentes, ya que cada una de ellas cubre un ancho de banda diferente, una o dos frecuencias de resonancia, medidas de antena diferente, diseño diferente, así que, dependerá que proyecto a desarrollar para poder definir cuál es la óptima a utilizar.

Así mismo, se realizó la búsqueda de los grosores y conductividades de grafeno comercial, esto con la finalidad de hacer una caracterización con base en esos valores y obtener una respuesta en simulación cercana a una aplicación y análisis práctico.

Capítulo 5 Conclusiones y trabajo a futuro

5.1 Conclusiones

Como aportes finales de este trabajo se observa que el grafeno es un buen elemento conductor ya que por sus diferentes métodos de obtención se tienen diferentes conductividades, ya sea en su estado puro o dopado con algún otro conductor, esto resulta un buen material en el uso de dispositivos pasivos de microondas ya que podemos modificar la conductividad para impactar en los diseños y geometrías de estos.

Con respecto a las líneas de transmisión se observa que el coeficiente de transmisión (S_{21}) en comparación con el cobre presenta una disminución, para la línea de microcinta y también para la línea coplanar por 8dB; Y con respecto al coeficiente de reflexión (S_{11}) se obtuvo una diferencia de 0.02dB en el caso de la microcinta y hasta de 0.4dB en el caso de la línea coplanar. A pesar de estas diferencias el grafeno es una opción para el diseño de líneas de transmisión en este caso sobre vidrio como material dieléctrico.

Con respecto a las antenas se concluye que a pesar de tener una conductividad baja en el grafeno se lograron diseñar antenas que operen en la frecuencia de diseño seleccionada. Adicionalmente el uso de diferentes geometrías en las antenas hace que su ancho de banda y su coeficiente de reflexión aumente o disminuya, lo cual permite una amplia gama de posibilidades con el grafeno y geometrías para diseños de antenas. Debido a que la conductividad del grafeno es baja, la ganancia también es baja lo cual se podía remediar usando un grafeno con mayor conductividad como se aprecia en el diseño de la antena de parche. Finalmente, el diseño sobre vidrio permitirá que estas antenas se integren a aplicaciones del Internet de las Cosas, Ciudades inteligentes y Redes vehiculares. En estas aplicaciones se requiere que las antenas se integren en la infraestructura de las ciudades, casas y vehículos.

5.2 Trabajo a futuro

Como primer punto será hacer una modificación en el sustrato ya sea con sustratos flexibles transparentes u opacos manteniendo el valor de la conductividad del grafeno para poder caracterizar la respuesta de ellas y poder hacer una comparativa con los diseños presentados en esta tesis.

Analizar los diseños de las antenas con las diferentes obtenciones de grafeno, esto para determinar sus conductividades y hacer una mejora en los diseños.

Utilizar grafeno dopado con algún otro conductor para ver cómo se comporta en sus propiedades físicas, su ganancia y su coeficiente de reflexión.

Referencias

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons., 1998.
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and desing*, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons., 2005.
- [3] Bolaños-Torres M. Á., Torrealba-Meléndez R., Muñoz-Pacheco J. M. et al, “Multiband Flexible Antenna for Wearable Personal Communications”, *Wireless Pers commun*, vol. 100, pp. 1753–1764, Apr. 2018.
- [4] X. Liu, *Nanomechanics of Graphene and Design of Graphene Composites*, Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [5] Y. Zhang, B. Wu, C. Fan, Y. Zhao, S. Sun and X. Liu, "Graphene-based Microwave Planar Devices", *IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Guangzhou, China, pp. 1-3, 2019.
- [6] M. Yasir, S. Bistarelli, A. Cataldo, M. Bozzi, L. Perregri and S. Bellucci, "Tunable Phase Shifter Based on Few-Layer Graphene Flakes", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 1, pp. 47-49, Jan. 2019.
- [7] H. H. Radamson, “Graphene”, *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, pp. 1–1, 2017.
- [8] K. Pan et al., "Graphene Printed UWB Monopole Antenna for Wireless communication applications", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta, GA, USA, pp. 1739-1740, 2019.
- [9] A. Lamminen et al., "Graphene-Flakes Printed Wideband Elliptical Dipole Antenna for Low-Cost Wireless Communications Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1883-1886, 2017.
- [10] N. Ye *et al.*, “High-Performance Bendable Organic Solar Cells With Silver Nanowire-Graphene Hybrid Electrode”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 1, pp. 214–219, Jan. 2019.
- [11] V. Šlegerytė, D. Belova-Plonienė, A. Katkevičius and D. Plonis, "Microwave Devices With Graphene Layers: A Review”, *IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, Riga, Latvia, pp. 87-92 , 2019.
- [12] Weijia Wang, Chao Ma, Xingtang Zhang, Jiajia Shen, Nobutaka Hanagata, Jiangtao Huangfu and Mingsheng Xu “High-performance printable 2.4 GHz graphene-based antenna using water-transferring technology”, *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 20, pp. 870-875, 2019.

- [13] B. Wu et al., "Dynamically Tunable Filtering Attenuator Based on Graphene Integrated Microstrip Resonators", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 12, pp. 5270-5278, Dec. 2020.
- [14] N. Curreli et al., "Graphene-based ultra-wide band printed bow-tie antenna for remote tracking", *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, pp. 1-4, 2019.
- [15] M. R. R. Abdul-Aziz et al., "Enhancing the Performance of Polygon Monopole Antenna Using Graphene/TMDCs Heterostructures", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 19, pp. 269-273, 2020.
- [16] J. Anguera and A. Pérez, *Teoría de antenas*, Creative Commons Deed, 2008.
- [17] R. Neri Vela, *Líneas de transmisión*, 1st ed, Xalapa, Veracruz, México: Universidad Veracruzana, 2013.
- [18] T. Wayne, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, 4th ed, Phoenix, Arizona: Pearson educación, 2003.
- [19] Aravind Vijayaraghavan, Maria Iliut, *Springer Handbook of Nanotechnology*, Berlin: Springer-Verlag, 2017.
- [20] T. Gupta, "Carbon", Springer International Publishing, pp. 197–228, Aug 2018.
- [21] Frank, I. W., Tanenbaum, D. M., van der Zande, A. M., & McEuen, P. L., "Mechanical properties of suspended graphene sheets", *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 25, no 6, pp. 2558. 2007.
- [22] R. Zan *et al.*, "Scanning tunnelling microscopy of suspended graphene", *Nanoscale*, vol. 4, no. 10, pp. 3065, 2012.
- [23] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, "The electronic properties of graphene", *Reviews of Modern Physics*, vol. 81, no. 1, pp. 109–162, Jan. 2009.
- [24] Paronyan TM, Pigos EM, Chen G, Harutyunyan AR, "Formation of Ripples in Graphene as a Result of Interfacial Instabilities", *ACS Nano*, vol. 5, no. 12, pp. 9619–9627, Nov. 2011.
- [25] P. San-Jose, J. González, and F. Guinea, "Electron-Induced Rippling in Graphene", *Physical Review Letters*, vol. 106, no. 4, Jan. 2011.
- [26] H.-P. Cong, X.-C. Ren, P. Wang, and S.-H. Yu, "Wet-spinning assembly of continuous, neat and macroscopic graphene fibers", *Scientific Reports*, vol. 2, no. 1, Aug. 2012.
- [27] M. A. Rafiee *et al.*, "Graphene Nanoribbon Composites", *ACS Nano*, vol. 4, no. 12, pp. 7415–7420, Nov. 2010.

- [28] S. F. Bartolucci, J. Paras, M. A. Rafiee, and Nikhil Koratkar, "Graphene–aluminum nanocomposites", *Materials Science and Engineering*, vol. 528, no. 27, pp. 7933-7937, Oct. 2011.
- [29] M. Akbari, M. W. A. Khan, M. Hasani, T. Björninen, L. Sydänheimo and L. Ukkonen, "Fabrication and Characterization of Graphene Antenna for Low-Cost and Environmentally Friendly RFID Tags", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1569-1572, 2016.
- [30] J. Kumar, B. Basu, F. A. Talukdar and A. Nandi, "Multimode-Inspired Low Cross-Polarization Multiband Antenna Fabricated Using Graphene-Based Conductive Ink", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 10, pp. 1861-1865, Oct. 2018.
- [31] M. R. Haraty, M. Naser-Moghadasi, A. A. Lotfi-Neyestanak and A. Nikfarjam, "Improving the Efficiency of Transparent Antenna Using Gold Nanolayer Deposition", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 4-7, 2016.
- [32] R. Song et al., "Graphene Antenna for Mobile Phone Application", *IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*, 2018, pp. 1-2.
- [33] Miccoli et al., "The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems", *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 27, 2015.
- [34] M. Naftaly et al., "Sheet Resistance Measurements of Conductive Thin Films: A Comparison of Techniques", *Electronics*, vol. 10, no. 8, p. 960, Apr. 2021.
- [35] J. J. A. B. William H. Hayt, *Engineering electromagnetics*, 8th ed, Boston: McGraw-Hill, 2001.
- [36] R. Song, C. Wang, Q. Chen and D. He, "High Conductivity Graphene Based Films for Antenna Application", *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2020, pp. 1-3.
- [37] S. Peng and H. Zheng, "Design of Coplanar-Waveguide-Feed Antenna", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 4, no. 7, pp. 1171-1177, July 2015.
- [38] H. Khraisat and Melad Olaimat, "Comparison between rectangular and triangular patch antennas array", *19th International Conference on Telecommunications*, Apr. 2012, pp. 75-81.
- [39] S. Alam, A. P. Junfithrana and I. Surjati, "Enhancement bandwidth of triangular microstrip antenna using peripheral slit technique fed by coplanar waveguide for mobile communication", *International Conference on Computing, Engineering, and Design (ICCED)*, 2017, pp. 1-4.

- [40] Singh, V., Ali, Z., Singh, A., & Ayub, S., “Dual band triangular slotted stacked microstrip antenna for wireless applications”, *Central European Journal of Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 221-225, 2013.
- [41] R. Collin, “Foundations for Microwave Engineering”, 2nd ed, New York:McGraw Hill, 1992.
- [42] R. Simons, "Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems", New York: Wiley, 2001.
- [43] P. Russer, “Electromagnetics, Microwave Circuit and Antenna Design for Communications Engineering”, 2nd ed, Norwood, MA: Artech House, 2006.
- [44] R. Sorrentino et al., “microwave an RF engineering”, 1st ed, United Kingdom: Wiley, 2010.
- [45] S. Y. Liao, “Microwave devices and circuits”, 3rd ed, New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- [46] A. S. Khan, “Microwave engineering”, 1st ed, Florida: Taylor, 2014.
- [47] Wadell, Brian C., "Transmission line design handbook", 1st ed, Norwood, MA: Teradyne, 1991.
- [48] Leng, T., Pan, K., Jiang, Y., Hu, Z., OUSLIMANI, H., & Abdalla, M. A., “Dual Band Graphene Nanoflakes Printed Compact Monopole Antenna for Low Cost WIFI Applications”, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2019, pp. 1287-1288.

Apéndice

A.1 “microstrip and coplanar lines with graphene”



RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA
UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar - DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

CDMX, May - 2022

MORALES-CENTLA, Nathaniel
ORCID: 0000-0001-8823-786X, CVU CONACYT ID: 1075434
TORREALBA-MELÉNDEZ, Richard
ORCID: 0000-0001-5138-3281, CVU CONACYT ID: 172841
TAMARIZ-FLORES, Edna Iliana
ORCID: 0000-0002-0737-5177, CVU CONACYT ID: 172840
LÓPEZ-LÓPEZ, Mario
ORCID: 0000-0003-0267-6947, CVU CONACYT ID: 67677

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

PRESENT:

We are pleased to inform you that your article “Microstrip and coplanar lines with graphene” with keywords “Graphene, Skin effect, Sheet resistance, Microwaves”. Has been published on pages 1-7 in “Journal of Chemical and Physical Energy”, V-9 N-26 with ISSN: 2410-3934. Journal edited by ECORFAN-Mexico, S.C. Holding Bolivia. (2022) and DOI: 10.35429/JCPE.2022.26.9.1.7.

This article is classified in:

Area: Physics-Mathematics and Earth Sciences
Field: Physics
Discipline: Electronics
Subdiscipline: Microwave devices

This research is published in:
https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol9num26/Journal_of_Chemical_and_Physical_Energy_V9_N26_1.pdf

The Journal is Arbitrated by peer review is Indexed and deposited in Databases:

LATINDEX (Scientific Journals of Latin America, Spain and Portugal) RESEARCH GATE (Germany)
GOOGLE SCHOLAR (Citation indexes-Google)
REDIB (Ibero-American Network of Innovation and Scientific Knowledge - CSIC)
MENDELEY (Bibliographic Reference Manager)
DULCINEA (Spanish scientific journals)
UNIVERSIA (University Library-Madrid)
SHERPA (University of Nottingham- England)

We issue this certificate for the purposes of science, technology and innovation.

Regards.

PERALTA-CASTRO, Enrique. Msc.
CIO-ECORFAN-México, S.C.
CONACYT-RENIECYT: 1702902

<p>ECORFAN-México, S.C. 143 – 50 Itzopan Street La Florida, Ecatepec Municipality Mexico State, 55120 Zipcode Phone: +52 1 55 6159 2296 Skype: ecorfan-mexico.s.c. E-mail: contacto@ecorfan.org Facebook: ECORFAN-México S.C. Twitter: @EcorfanC</p>	<p>www.ecorfan.org</p>	<p>Holdings</p> <table border="0"><tr><td>Mexico</td><td>Colombia</td><td>Guatemala</td></tr><tr><td>Bolivia</td><td>Cameroon</td><td>Democratic Republic of Congo</td></tr><tr><td>Spain</td><td>El Salvador</td><td></td></tr><tr><td>Ecuador</td><td>Taiwan</td><td></td></tr><tr><td>Peru</td><td>Nicaragua</td><td>Paraguay</td></tr></table>	Mexico	Colombia	Guatemala	Bolivia	Cameroon	Democratic Republic of Congo	Spain	El Salvador		Ecuador	Taiwan		Peru	Nicaragua	Paraguay
Mexico	Colombia	Guatemala															
Bolivia	Cameroon	Democratic Republic of Congo															
Spain	El Salvador																
Ecuador	Taiwan																
Peru	Nicaragua	Paraguay															

A.2 “Dual-band CPW Graphene Antenna for Smart Cities and IoT Applications”



Communication

Dual-Band CPW Graphene Antenna for Smart Cities and IoT Applications

Nathaniel Morales-Centla ¹, Richard Torrealba-Melendez ^{1,*}, Edna Iliana Tamariz-Flores ², Mario López-López ¹, Cesar Augusto Arriaga-Arriaga ¹, Jesus M. Munoz-Pacheco ¹ and Victor R. Gonzalez-Diaz ¹

¹ Faculty of Electronics Sciences, Autonomous University of Puebla, Puebla 72570, Mexico; nathaniel.morales@correo.buap.mx (N.M.-C.); mario.lopezlop@correo.buap.mx (M.L.-L.); cesarau.arriaga@correo.buap.mx (C.A.A.-A.); jesusm.pacheco@correo.buap.mx (J.M.M.-P.); vicrodolfo.gonzalez@correo.buap.mx (V.R.G.-D.)

² Faculty of Computational Sciences, Autonomous University of Puebla, Puebla 72570, Mexico; iliana.tamariz@correo.buap.mx

* Correspondence: richard.torrealba@correo.buap.mx; Tel.: +52-222-2-29-55-00 (ext. 7400)

Abstract: In this paper, a dual-band graphene coplanar waveguide antenna is designed for smart cities and internet of things applications. A graphene film is chosen as the conductive material for the radiation patches and ground plane with a thickness of 240 μm and an electric conductivity of 3.5×10^5 S/m. The dielectric is glass with a dielectric permittivity of 6 and a thickness of 2 mm. The implementation of the antenna on glass permits the integration of the antenna in smart cities and IoT applications. This antenna is based on two trapezoidal patches that generate the dual-band behavior. The overall dimensions of the antenna are 30 mm × 30 mm × 2 mm. The reflection coefficient, gain, and radiation patterns were measured and compared with the simulations. The antenna covers two frequency bands; the lower band covers the 2.45 GHz ISM band, and the upper band range covers from 4 to 7 GHz.

Keywords: graphene; coplanar antenna; dual-band antenna; smart cities; internet of things



Citation: Morales-Centla, N.; Torrealba-Melendez, R.; Tamariz-Flores, E.I.; López-López, M.; Arriaga-Arriaga, C.A.; Munoz-Pacheco, J.M.; Gonzalez-Diaz, V.R. Dual-Band CPW Graphene Antenna for Smart Cities and IoT Applications. *Sensors* **2022**, *22*, 5634. <https://doi.org/10.3390/s22155634>

Academic Editors: Antonio Lázaro and Manuel Sierra Castañer

Received: 5 July 2022
Accepted: 27 July 2022
Published: 28 July 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Nowadays, most electronic communications are wireless. Furthermore, the number of wireless links has increased in the last years due to the necessity to connect everything with everything [1]. Moreover, concepts such as the internet of things (IoT) [2–4], smart cities [5–7], and smart health [8,9], and vehicular networks such as vehicle to vehicle (V2V) or vehicle to infrastructure (V2I) [10–12] depend enormously on wireless sensor networks to perform. Antennas are a vital part of the wireless communications system in all these concepts. The antennas need to be placed in windows, buildings, clothing, vehicles, street infrastructure, and human bodies. These antennas must present a specific radiation and frequency operation performance. Moreover, the antennas have to be designed over novel materials that permit integration with the environment. This integration can be achieved using planar antennas fabricated over flexible and rigid materials; this material can also be opaque or transparent [13,14].

On the other hand, copper is usually the most employed in the conductor materials that conform to the antennas; however, recent research reports on using indium oxide (ITO) and graphene as a conductor in antenna design. Concerning ITO antennas, these present wideband behavior but low gain due to the low conductivity of the ITO, as reported in [15–17]. On the other hand, graphene presents properties such as high conductivity, flexibility, and excellent mechanical resistance [18,19]; this is ideal for it to be employed as a conductor in antennas. Due to these properties, graphene has been employed in antenna design for Terahertz communications [20–22] with a frequency range of 1 to 10 THz. In

A.3 “Antena de microcinta con grafeno para aplicaciones en ciudades inteligentes”

SOMI XXVI Congreso de instrumentación.

Clave: yN_SOMI36_75

Estatus: aceptado para su publicación.

Estimado(a) Nathaniel Morales Centla:

Nos complace informarle que, como resultado del proceso de evaluación llevado a cabo por el Comité Científico-Técnico del SOMI XXVI Congreso de Instrumentación, el trabajo titulado “Antena de Microcinta con Grafeno para aplicaciones en Ciudades Inteligentes” con clave yN_SOMI36_75, ha sido aceptado para su presentación en el Congreso. Le recordamos que para que su trabajo pueda ser publicado en su versión en extenso, deberá:

1. Cumplir con las especificaciones del formato del trabajo en extenso, Las instrucciones para la elaboración del trabajo en extenso esta disponible en la sección “Guía para la elaboración de trabajos”
2. Ser evaluado por el Comité Científico Técnico,
3. Contar con la opinión favorable del Comité Científico-Técnico para su publicación en extenso.