



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**DISEÑO DE UNA ANTENA DIPOLO DOBLADO CON MATERIAL GRAFENO EN
DOS FRECUENCIAS DE LA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones

AUTORES: JHOSUE PATRICIO DÍAZ MOSQUERA

STEVEEN PATRICIO CEVALLOS IMAICELA

TUTOR: LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN

Quito-Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jhosue Patricio Díaz Mosquera con documento de identificación N° 1718830431 y Steven Patricio Cevallos Imaicela con documento de identificación N° 1150403739; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 15 de febrero del año 2023

Atentamente,



Jhosue Patricio Díaz Mosquera

1718830431



Steven Patricio Cevallos Imaicela

1150403739

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Jhosue Patricio Díaz Mosquera con documento de identificación No. 1718830431, y Steven Patricio Cevallos Imaicela con documento de identificación No. 1150403739, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Diseño de una antena dipolo doblado con material grafeno en dos frecuencias de la banda de onda milimétrica”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

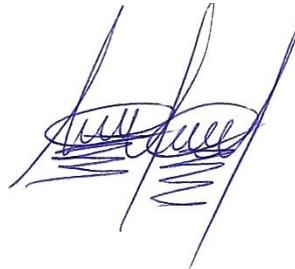
Quito, 15 de febrero del año 2023

Atentamente,



Jhosue Patricio Díaz Mosquera

1718830431



Steven Patricio Cevallos Imaicela

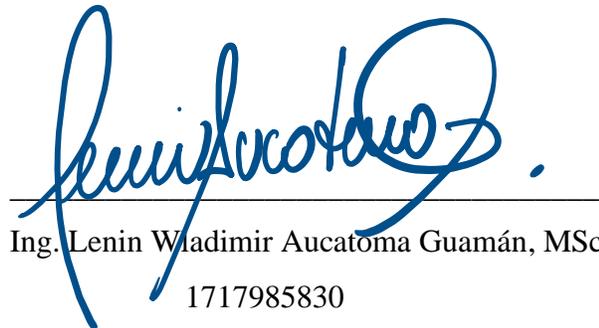
1150403739

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Lenin Wladimir Aucatoma Guamán con documento de identificación N° 1717985830 , docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UNA ANTENA DIPOLO DOBLADO CON MATERIAL GRAFENO EN DOS FRECUENCIAS DE LA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA, realizado por Jhosue Patricio Díaz Mosquera con documento de identificación N° 1718830431 y por Steven Patricio Cevallos Imaicela con documento de identificación N° 1150403739, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de febrero del año 2023

Atentamente,



Ing. Lenin Wladimir Aucatoma Guamán, MSc

1717985830

DEDICATORIA

El presente artículo académico se lo dedico principalmente a mi madre Evelin Mosquera, que sin duda es mi guía y fuente de inspiración para lograr cada meta en mi vida, brindándome siempre su amor y apoyo incondicional. A mis hermanos, Danny y Martín, que en todo momento son mi mejor compañía y fortaleza tanto en buenos como malos momentos. A mis queridas abuelitas, Lourdes Salazar y María Hernández por sus cuidados, valiosos consejos y al mismo tiempo, inculcarme constantemente en valores para ser un hombre de bien. A mi padre Franklin Díaz, por enseñarme que con esfuerzo y dedicación es posible salir adelante, a pesar de las adversidades. Finalmente, a LYMS que en su momento fue parte de esta gran historia.

Jhosue Patricio Díaz Mosquera

El presente trabajo de titulación lo quiero dedicar a mis padres Regina y Hugo a quienes les quiero expresar mi más sincero agradecimiento por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Gracias por su dedicación y sacrificios, que me han permitido alcanzar mis metas y sueños. A mi hijo Saulito que, con su amor y alegría, me da la fuerza diaria para continuar. A mi querida Gladys, por su constante apoyo en los momentos difíciles, a mis hermanos, tíos y primos, por su motivación y consejos valiosos. Esta dedicatoria es para todos ustedes, mi querida familia, que me han dado el empuje y la motivación para seguir adelante. Les agradezco de todo corazón por todo lo que han hecho por mí.

Steven Patricio Cevallos Imaicela

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a Dios, por guiarnos en nuestra vida personal y bendecirnos desde un principio en la carrera profesional, sin duda sus tiempos son perfectos.

Un agradecimiento especial para nuestro tutor, por compartir su amplio conocimiento y brindarnos continuamente el apoyo necesario para desarrollar este artículo académico.

A cada uno de los docentes de la carrera de Telecomunicaciones por siempre transmitir de la mejor manera su vasto conocimiento en las distintas asignaturas, formando excelentes profesionales y además, buenas personas.

A nuestros familiares y amigos por su constante apoyo a lo largo de nuestra carrera profesional. El respaldo de los seres queridos es fundamental para alcanzar los objetivos y metas propuestas, siendo importante reconocer su gran acompañamiento. ¡Gracias a todos ustedes por su ayuda incondicional!

Jhosue Patricio Díaz Mosquera

Steven Patricio Cevallos Imaicela

Diseño de una antena dipolo doblado con material grafeno en dos frecuencias de la banda de onda milimétrica

1st Díaz Mosquera Jhosue P.
Ing. Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
jdiazm7@est.ups.edu.ec

2nd Cevallos Imaicela Steven P.
Ing. Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
scevallosi@est.ups.edu.ec

3rd Aucatoma Guamán Lenin W.
Ing. Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
laucatoma@ups.edu.ec

Resumen— Este artículo presenta el diseño de una antena dipolo doblado con material grafeno para analizar su desempeño en frecuencias de 50 y 60 [GHz] mediante el software ANSYS HFSS. Debido a que mediante el modelamiento teórico se encontró un desfase positivo en frecuencia del 8 %, se efectuó un ajuste en las dimensiones físicas de cada elemento de la antena, con el propósito de sintonizar su frecuencia de resonancia y obtener un buen rendimiento de los parámetros de dispersión S11, VSWR y patrón de radiación. Finalmente, se demostró que las características electromagnéticas de este nanomaterial, dependen de factores influyentes como el potencial electroquímico, tiempo de relajación, temperatura, frecuencia de trabajo e incluso el número de láminas utilizadas en el diseño.

Palabras clave— Antena dipolo doblado, grafeno, onda milimétrica

Abstract— This article presents the design of a folded dipole antenna with graphene material to analyze its performance at frequencies of 50 and 60 [GHz] using the ANSYS HFSS software. Due to the fact that through the theoretical modeling a positive frequency gap of 8 % was found, an adjustment was made in the physical dimensions of each element of the antenna, with the purpose of tuning its resonance frequency and obtaining a good performance of the scattering parameters S11, VSWR and radiation pattern. Finally, it was shown that the electromagnetic characteristics of this nanomaterial depend on influential factors such as electrochemical potential, relaxation time, temperature, operating frequency, and even the number of sheets used in the design.

Keywords— Folded dipole antenna, graphene, mmWave

I. INTRODUCCIÓN

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [1] menciona a la red 5G como la próxima generación de normas móviles, utilizando la banda de onda milimétrica EHF (Extremely High Frequency) que tiene un rango de frecuencia de 30 a 300 [GHz], debido a que las bandas de frecuencia actuales no tienen suficiente capacidad en relación al espectro radioeléctrico [2]. 5G ofrece nuevas aplicaciones y servicios que son capaces de alcanzar velocidades de gigabits, alta disponibilidad, eficiencia de la red, fiabilidad y baja latencia en las comunicaciones [3], facilitando el aprovechamiento de

las tecnologías emergentes, conjuntamente con las antenas que constituyen los sistemas radiantes para interconectar redes de comunicaciones [4] [5]. De manera que la aplicación de la antena dipolo doblado es una solución interesante por su capacidad de resonancia y mejorar el ancho de banda debido a su estructura [6].

Por otro lado, los estudios sobre el grafeno están en rápido crecimiento con respecto a la ciencia de los materiales, revelando una gran cantidad de nuevas aplicaciones tecnológicas. Además, es un material rigurosamente bidimensional constituido por átomos de carbono con una estructura plana en forma de panal, que dispone de un peso ligero, durabilidad mecánica, alta conductividad eléctrica y térmica, baja permeabilidad y elevada constante dieléctrica [7]. Por lo que la aplicación de este nanomaterial en sistemas de alta frecuencia, resultaría en ventajas adquiridas para la obtención de parámetros mejorados de coeficiente de reflexión, VSWR y patrón de radiación.

Referente a investigaciones anteriores, en [8] se diseña una antena dipolo doblado en el rango de 60 a 74 [GHz] aplicando oro, aluminio, hierro y conductor eléctrico perfecto (Perfect Electrical Conductor, PEC), manifiesta que al aumentar la frecuencia, los valores de S11 como VSWR tienen un desfase directamente proporcional. Concluyendo que el material conductor que mejor se acopló al diseño de la antena de 60 [GHz] fue el aluminio, obteniendo un coeficiente de reflexión S11 igual a -23.16 [dB] y VSWR igual a 1.20, por medio de un patrón de radiación omnidireccional. Por otro lado en [9] para un rango de 24 a 27.5 [GHz], el material que mejor se ajustó al brazo conductor fue el PEC, consiguiendo un VSWR con onda reflejada casi nula y coeficiente de reflexión con pérdidas menores al 1 %.

Mientras que en [10] se plantea el diseño de una antena dipolo que trabaja en el rango de frecuencia de los THz utilizando grafeno como elemento conductor y demuestra que las antenas basadas en este nanomaterial pueden presentar un haz bastante direccional, mediante un arreglo de muchas celdas unitarias, debido a que el tamaño de estos arreglos se encuentra en el orden de los micrómetros (um).

Por lo antes mencionado, se propone analizar el com-

portamiento del grafeno como elemento en ciertos bloques constitutivos en el diseño de la antena dipolo doblado, en las frecuencias de 50 y 60 [GHz], para identificar las ventajas y desventajas del mismo, además de las interacciones que tiene el material con parámetros objetivo como; coeficiente de reflexión, VSWR entre 1 y 1.5, S11 igual o por debajo de -15 [dB] y patrón de radiación sin la existencia de nulos en el lóbulo principal.

II. DISEÑO DE LA ANTENA

Se modelaron dos antenas dipolo doblado que operan en frecuencias de 50 y 60 [GHz] respectivamente, donde la antena se compone de un puerto de alimentación (S) que separa a dos conductores secundarios con longitud (l'), los cuales se enlazan a un conductor primario de longitud (L), siendo (R) el radio, (B) la separación entre sus conductores y (X) la longitud del transformador de impedancia, como se observa en la "Fig. 1".

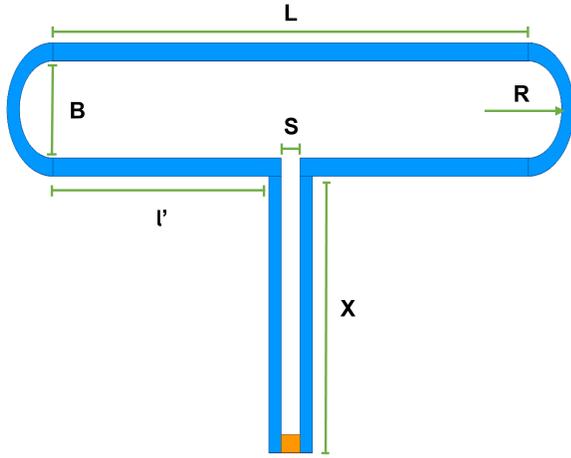


Figura 1: Diseño de la antena dipolo doblado.

Las antenas están diseñadas en el software Ansys HFSS, el cual aplica el método de elementos finitos para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales en base al modelamiento matemático de los campos electromagnéticos. El diseño es expuesto a modificaciones en la dimensión de sus elementos, obteniendo sus parámetros físicos por medio de fórmulas matemáticas según [9], descritas en la tabla 1.

TABLA I: Ecuaciones de parámetros físicos de la antena dipolo doblado

| Longitud de onda | Longitud conductor primario |
|----------------------------------|--|
| $\lambda = \frac{c}{f}$ (1) | $L = \frac{\lambda}{2}$ (2) |
| Longitud conductor secundario | Radio del conductor |
| $l' = \frac{\lambda}{4}$ (3) | $R = S/e^{\frac{Z_0}{120}}$ (4) |
| Separación punto de alimentación | Separación entre líneas de transmisión |
| $S \leq 0.02\lambda$ (5) | $B \leq 0.05\lambda$ (6) |

En donde, la longitud del conductor principal (L) y la longitud de los dos conductores secundarios (l') cumplen con las ecuaciones (2) y (3) respectivamente, teniendo en cuenta la longitud de onda dada por (1), con la velocidad en el vacío $c = 3 \times 10^8 [m/s]$. La ecuación (4) representa el radio del conductor (R), en la cual Z_0 representa la impedancia característica de la antena dipolo doblado con un valor de $300[\Omega]$ y la separación entre el punto de alimentación (S) que hace referencia a la ecuación (5), no debe ser mayor a 0.02λ . Así mismo, la separación entre las líneas de transmisión (B) obedece a (1) y no debe exceder 0.05λ .

Adicionalmente, se implementó un transformador $\lambda/4$ basado en la ecuación (7), facilitando adaptar las impedancias entre el conector de alimentación con $Z_C = 50[\Omega]$ y la antena con $Z_L = 300[\Omega]$, obteniendo una impedancia $Z_T = 122.47[\Omega]$.

$$Z_T = \sqrt{Z_L \cdot Z_C} \quad (7)$$

Donde:

- $Z_T = Impedancia \text{ transformador } \lambda/4$
- $Z_L = Impedancia \text{ de la antena}$
- $Z_C = Impedancia \text{ del conector}$

A causa de que las propiedades electromagnéticas del grafeno cambian según la frecuencia de trabajo f y teniendo en cuenta otros factores influyentes como el potencial electroquímico μ_c , tasa de dispersión Γ y temperatura T , se obtuvo la conductividad a partir de los coeficientes de regresión lineal respecto a cuatro variables independientes, por medio del método de mínimos cuadrados. En base a la fórmula de Kubo [11], las ecuaciones de regresión real e imaginaria (8) según [12] para la conductividad eléctrica son:

$$\sigma_{gr} = -0.08 + 4.04T + 0.3\mu_c + 0.03\tau - 1.06 \cdot 10^{-13} f$$

$$\sigma_{gi} = 0.01 - 3.5 \cdot 10^{-9} T - 0.02\mu_c - 0.002\tau - 3.8 \cdot 10^{-15} f \quad (8)$$

Para el diseño de utilizó los siguientes valores:

- $T = 300 [K]$
- $\mu_c = 0.1 [eV]$
- $\tau = 3 [ps]$
- $f = 50 \text{ y } 60 [GHz]$

Donde se consideró una temperatura ambiente equivalente a $26.85[^\circ C]$. Además, el potencial electroquímico μ_c de una lámina de grafeno puede ser ajustado mediante dopaje químico o voltaje de polarización *bias*, teniendo en cuenta la concentración de portadores n_s [14]. Por otra parte, la tasa de dispersión Γ está directamente relacionada con el tiempo de relajación τ expresado como $\Gamma = 1/2\tau$, considerando además, la movilidad del portador de grafeno $n_c = 2[m^2/V \cdot s]$ y la velocidad de Fermi $v_F = 10^6 [m/s]$ [14], como se muestra en la ecuación (9):

$$\tau = \frac{n_c \cdot \mu_c}{(e \cdot (v_F)^2)} \quad (9)$$

Conjuntamente, la ecuación (10) según [12] para la constante dieléctrica relativa del grafeno $\epsilon_r(\text{Grafeno})$ depende de parámetros como:

- Módulo conductividad $|\sigma_{(Grafeno)}| = \sqrt{(\sigma_{gr})^2 + (\sigma_{gi})^2}$ según la ecuación (8)
- Frecuencia angular $\omega = 2\pi \cdot f$
- Grosor lámina de grafeno t
- Número de láminas de grafeno N_g
- Constante dieléctrica en vacío $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [F/m]$

$$\varepsilon_r(Grafeno) = 1 + \frac{i |\sigma_{(Grafeno)}|}{\omega \cdot t \cdot N_g \cdot \varepsilon_0} \quad (10)$$

Una lámina de grafeno está a nivel molecular con un grosor Van der Waals (t) aproximado de $0.34 [nm]$ [13], debido a este factor y limitaciones con el software ANSYS HFSS por ser un valor extremadamente pequeño, para el diseño de la antena se utilizaron $N_g = 9000$ láminas, equivalente a un espesor de $3.1 [um]$, como se observa en la "Fig. 2".

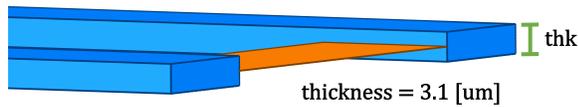


Figura 2: Espesor thk para el material conductor grafeno.

Por otra parte, la permeabilidad magnética relativa del grafeno $\mu_r(Grafeno)$ puede ser considerada como 1 según [12] [14]. Debido a lo antes mencionado, en la tabla 2 se muestran las propiedades electromagnéticas de este nanomaterial para 50 y 60 [GHz].

TABLA II: Propiedades electromagnéticas del grafeno.

| MATERIAL | CONDUCTOR ELÉCTRICO | | |
|----------|---|------------------------------------|--|
| | 50 [GHz] | | |
| Grafeno | 140.54×10^3 | 1 | 1211.945 |
| | 60 [GHz] | | |
| | 134.48×10^3 | 1 | 1211.944 |
| | Permitividad relativa (ε_r) | Permeabilidad relativa (μ_r) | Conductividad [Siemens/m] (σ) |

En la tabla 3 se puede evidenciar los parámetros físicos del diseño para las frecuencias de 50 y 60 [GHz] con el material conductor grafeno, que a partir de un modelamiento teórico por medio de las ecuaciones descritas en la tabla 1, no fue posible conseguir los valores objetivos. Por esta razón, se ejecutó un modelamiento de ajuste para ambas antenas, las cuales fueron sometidas a variaciones en sus dimensiones físicas, hasta lograr obtener los parámetros S11 inferior a -15 [dB], VSWR entre 1 a 1.5 y adecuado patrón de radiación.

De igual manera, en la tabla 3 se presentan los valores teóricos, ajustados y porcentajes de desfase relativo para cada elemento constituyente en el diseño. Es posible apreciar que la separación entre líneas de transmisión (B) no presenta alteraciones, esto debido a que la ecuación (6) para su cálculo no permite exceder un valor mayor a 0.05λ . Por último, estos ajustes se vieron desfasados 9.7% y 9.6% con respecto a los valores teóricos.

TABLA III: Dimensiones físicas del diseño teórico y ajustado de la antena dipolo doblado con grafeno para frecuencias de 50 y 60 GHz.

| CONDUCTOR | | Grafeno | |
|------------|--------------|----------------|-----------------|
| FRECUENCIA | | 50 [GHz] | 60 [GHz] |
| Valor | Parámetro | | |
| Teórico | F-resonancia | 54 | 64.85 |
| Ajustado | [GHz] | 50 | 60 |
| Teórico | L [mm] | 3.00 | 2.5 |
| Ajustado | | 3.29 | 2.74 |
| Desfase | | + 0.29 [mm] | + 0.24 [mm] |
| | | + 9.7 [%] | + 9.6 [%] |
| Teórico | l' [mm] | 1.44 | 1.2 |
| Ajustado | | 1.579 | 1.3152 |
| Desfase | | + 0.139 [mm] | + 0.1152 [mm] |
| | | + 9.7 [%] | + 9.6 [%] |
| Teórico | S [mm] | 0.12 | 0.1 |
| Ajustado | | 0.1316 | 0.1096 |
| Desfase | | + 0.0116 [mm] | + 0.0096 [mm] |
| | | + 9.7 [%] | + 9.6 [%] |
| Teórico | B [mm] | 0.3 | 0.25 |
| Ajustado | | 0.3 | 0.25 |
| Teórico | R [mm] | 0.00985 | 0.009071 |
| Ajustado | | 0.0108 | 0.009942 |
| Desfase | | + 0.00095 [mm] | + 0.000871 [mm] |
| | | + 9.7 [%] | + 9.6 [%] |
| Teórico | X [mm] | 1.5 | 1.25 |
| Ajustado | | 1.645 | 1.37 |
| Desfase | | + 0.145 [mm] | + 0.12 [mm] |
| | | + 9.7 [%] | + 9.6 [%] |

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Respecto a la simulación en el software ANSYS HFSS, se asignó una región abierta de radiación perfectamente adaptada (Perfectly Matched Layer, PML), la cual usa varias capas de materiales especiales que absorben los campos electromagnéticos salientes de la antena [15]. En cuanto a la excitación, se utilizó un puerto agrupado (Lumped Port), situado en la línea de transmisión $\lambda/4$ como se muestra en la figura "Fig. 1". Además, se determinó un barrido de frecuencias en el rango de 40 a 75 [GHz] con pasos de 0.2 y 0.15 [GHz] respectivamente. Por último, se empleó una configuración de esfera de radiación en campo lejano (Infinite Sphere) para visualizar el patrón de radiación 2D y 3D, considerando los ángulos de elevación y azimut en coordenadas esféricas, con un rango $phi(\phi): 0^\circ \rightarrow 360^\circ$ y $theta(\theta): -180^\circ \rightarrow 180^\circ$ en pasos de 2.

En la presente investigación, se puede apreciar que el grafeno, posee menor conductividad eléctrica y mayor permitividad relativa en comparación a otros materiales con $\varepsilon_r = 1$ como:

- Grafito: $\sigma = 70 \times 10^3 [S/m]$
- Acero inoxidable: $\sigma = 1100 \times 10^3 [S/m]$

- Oro: $\sigma = 41 \times 10^6$ [S/m]
- Aluminio: $\sigma = 38 \times 10^6$ [S/m]
- Cobre: $\sigma = 58 \times 10^6$ [S/m]

Esto se debe a que mediante las ecuaciones (8) y (10) según la fórmula de Kubo y aplicando el método de mínimos cuadrados para encontrar los coeficientes de regresión lineal respecto a cuatro variables (T , μ_c , τ , f), se obtuvo las características eléctricas de un grafeno simple, es decir, se encuentra en su forma y estructura dimensional 2D básica. Dicho de otra manera, el nanomaterial grafeno usado en el actual diseño no está dopado químicamente con otros materiales, a pesar de ello, experimentó un comportamiento aceptable en la obtención de los parámetros de dispersión.

Se puede extraer mejores características electromagnéticas con un grafeno modificado químicamente, mediante aleaciones con otros materiales [5], o incluso, diferentes métodos para su fabricación como se muestra en [16] [17].

III-A. Relación de onda estacionaria (VSWR) y Coeficiente de reflexión (S11)

En un primer diseño, pese a que la antena no contaba con un adaptador de impedancia, su frecuencia de resonancia lograba sintonizar en 50 y 60 [GHz]; sin embargo, los parámetros de dispersión S11 y VSWR estaban bastante alejados de los valores objetivo. Por tal razón, fue indispensable implementar un transformador de impedancia $\lambda/4$, para obtener mejores resultados.

Modelamiento teórico. Los parámetros de VSWR teóricos presentados en la "Fig. 3" se obtuvieron mediante un diseño experimental para las antenas de 50 y 60 [GHz], evidenciando que los valores están entre 1 y 1.5, como se estableció en el objetivo de la investigación. Por otra parte, en la figura "Fig. 4" se puede demostrar que los resultados teóricos del coeficiente de reflexión (S11) también cumplen con el valor objetivo, al estar por debajo de -15 [dB]. Sin embargo, en ambos casos la frecuencia de resonancia se encuentra desfasada hacia la derecha 4 y 4.85 [GHz], determinando que los diseños no se encuentran sintonizados en base al modelo matemático.

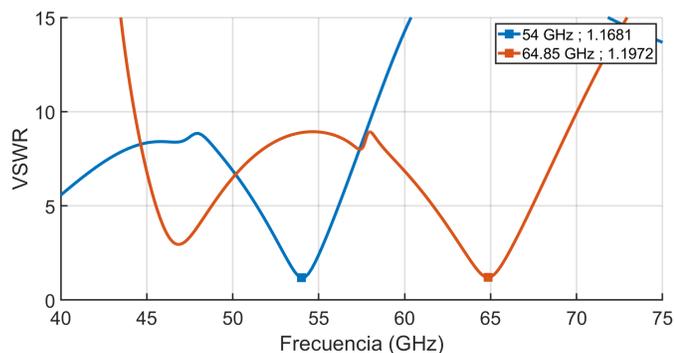


Figura 3: Relación de onda estacionaria (VSWR) para 50 y 60 [GHz] según diseño teórico.

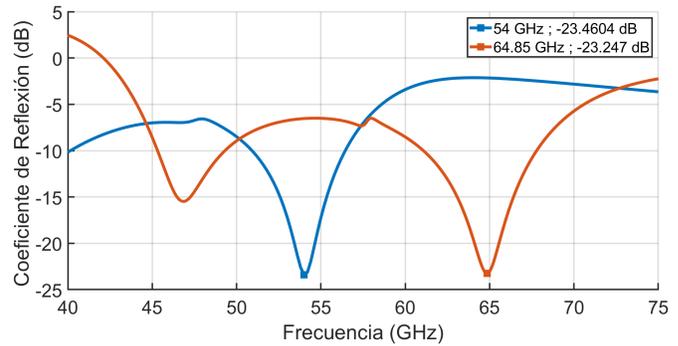


Figura 4: Coeficiente de reflexión (S11) para 50 y 60 [GHz] según diseño teórico.

Modelamiento ajustado. Los valores para el VSWR y S11 se muestran en la "Fig. 5" y "Fig. 6", resultado del ajuste efectuado. En el que mediante la herramienta optimetrics, fue posible encontrar las dimensiones apropiadas para cada dipolo doblado, permitiendo obtener los siguientes valores objetivo:

- Frecuencia de resonancia sintonizada en 50 y 60 [GHz]
- Valores VSWR de 1.28 y 1.30
- Altas pérdidas de retorno (S11) de -22.65 y -22.52 [dB]

Con el modelo teórico se obtuvieron frecuencias de 54 y 64.85 [GHz] y al diseñar un modelo de ajuste, la frecuencia para cada antena disminuyó hasta llegar a 50 y 60 [GHz]. Esto debido a que se incrementó el tamaño de los conductores secundarios (l'), radio (R), separación del puerto de alimentación (S) y la longitud del transformador de impedancia $\lambda/4$ (X), a causa de que estos elementos dependen del conductor primario (L). Lo cual cumple con la teoría de antenas, en donde al aumentar la dimensión de una antena, su frecuencia de trabajo se reduce, siendo esta una relación inversamente proporcional.

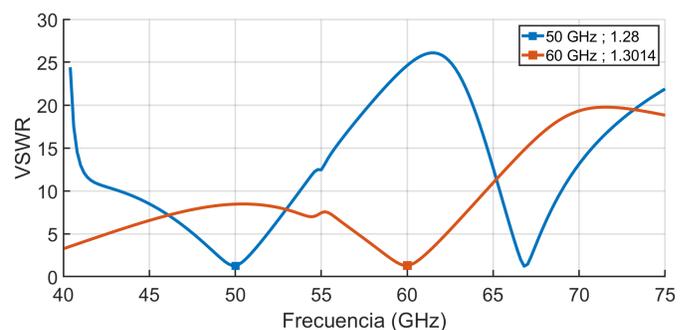


Figura 5: Relación de onda estacionaria (VSWR) para 50 y 60 [GHz] según diseño ajustado.

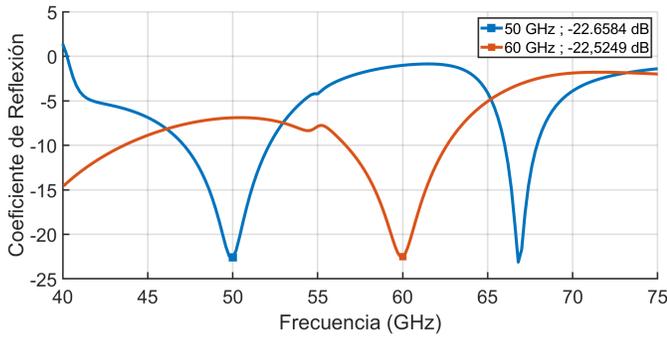


Figura 6: Coeficiente de reflexión (S11) para 50 y 60 [GHz] según diseño ajustado.

En comparación con la investigación [8], el material que mejor se adaptó al diseño del dipolo doblado para 60 [GHz] fue el aluminio, con S11 igual a -23.1 [dB] y VSWR igual a 1.21, los cuales son valores bastante similares a los encontrados con el grafeno; S11 igual a -22.5 [dB] y VSWR igual a 1.3. No obstante, el grafeno es superior, siendo más elástico, delgado, flexible, 5 veces más ligero que el aluminio y 100 veces más resistente que el acero y otros materiales conductores conocidos [18].

En la tabla 4 se da a conocer el desfase que existe entre los valores teóricos y ajustados de los parámetros S11, VSWR y ancho de banda (BW). El coeficiente de reflexión a pesar de que experimenta un desfase negativo en [dB] de -3.41 % y -3.1 %, mantiene altas pérdidas de retorno, dicho de otro modo, conserva una calidad del sistema radiante. Por el contrario, la relación de onda estacionaria mostró un desfase positivo de +9.7 % y +8.7 %, no obstante, el ancho de banda de operación para ambos diseños dado generalmente por la especificación VSWR 1:1.5, sostiene un rendimiento aceptable con 680 [MHz] y 790 [MHz], respectivamente.

TABLA IV: Desfase de parámetros VSWR y S11 según diseño teórico y ajustado de la antena dipolo doblado con grafeno para frecuencias de 50 y 60 [GHz].

| CONDUCTOR | | Grafeno | |
|------------|--------------|-----------|------------|
| FRECUENCIA | | 50 [GHz] | 60 [GHz] |
| Valor | Parámetro | | |
| Teórico | S (1,1) [dB] | -23.4604 | -23.247 |
| Ajustado | | -22.6584 | -22.5249 |
| Desfase | | -3.41 [%] | -3.106 [%] |
| Teórico | VSWR | 1.1681 | 1.1972 |
| Ajustado | | 1.2815 | 1.3014 |
| Desfase | | +9.70 [%] | +8.70 [%] |
| Teórico | BW [MHz] | 890 | 1040 |
| Ajustado | | 680 | 790 |
| Desfase | | -23.5 [%] | -24.04 [%] |

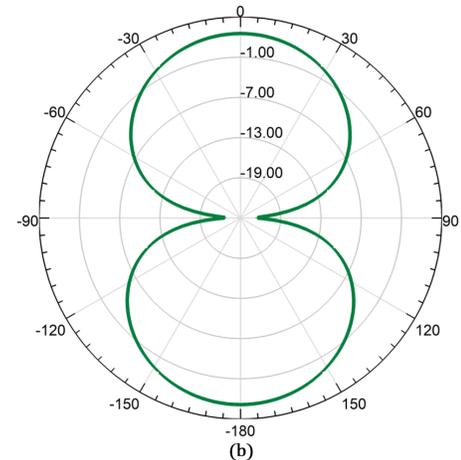
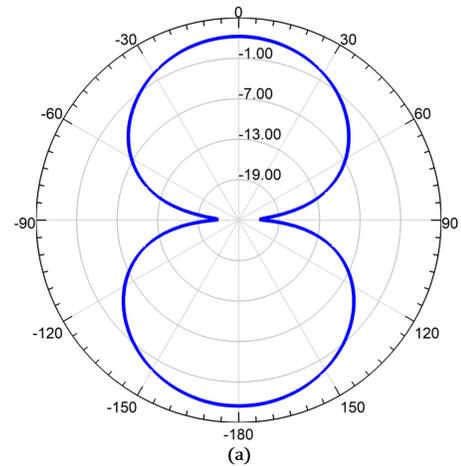
Además, al comparar los resultados obtenidos en los diseños de 50 y 60 [GHz], la antena sintonizada en 50 [GHz] posee mejor rendimiento, teniendo una mejora del 0.6 % con respecto

al coeficiente de reflexión y 1.55 % en relación al VSWR. Es decir, pese a ser un nanomaterial que tiene tendencia a cambiar sus características electromagnéticas en base a su frecuencia y tener mayor permitividad relativa, ha demostrado un buen desempeño con respecto a los valores de S11 y VSWR, evidenciando resultados que se adaptan de acuerdo a la teoría de las antenas.

III-B. Patrón de radiación

Las características de radiación de una antena se definen como una función matemática o representación gráfica de sus propiedades de propagación, determinadas por coordenadas esféricas phi y theta [19], teniendo como objetivo analizar las ondas electromagnéticas salientes de la antena para obtener su ganancia y directividad.

En la "Fig. 7" se presentan los patrones de radiación omnidireccional 2D y 3D en base al modelo teórico y ajustado. A las frecuencias sintonizadas de 50 y 60 [GHz] se tiene una ganancia y directividad máxima de 2.84 y 2.85 [dB] correspondientemente. Así mismo, se puede observar la vista general, superior y lateral del patrón de radiación 3D.



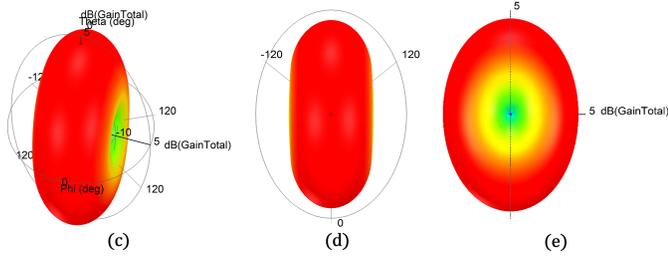


Figura 7: Patrón de radiación 2D y 3D para frecuencia de resonancia en 50 y 60 [GHz], (a) Diseño teórico, (b) Diseño ajustado, (c) Vista general, (d) Vista superior, (e) Vista lateral.

En contraste con la investigación [8], para una frecuencia de 60 [GHz] en el diseño del dipolo doblado con material aluminio, se obtuvo una ganancia máxima de 3 [dB], mientras tanto, con material grafeno la ganancia según el patrón de radiación 2D y 3D es ligeramente menor con un valor de 2.84 [dB], por lo tanto, resulta ser una antena omnidireccional menos directiva, irradiando uniformemente toda su potencia de mejor manera. En términos de tamaño, la antena de grafeno tiene mayor longitud en su conductor primario, respecto a la antena de aluminio, con un aumento del 46 %.

De igual modo, al contrastar los resultados adquiridos en los modelos de 50 y 60 [GHz], en la tabla 5 se puede evidenciar un aumento ligero de aproximadamente el 11 % para la ganancia y 10 % para la directividad, respecto al diseño teórico. Es decir, el patrón de radiación de las antenas modeladas con grafeno, es muy similar al de una antena dipolo doblado característica, lo que demuestra que es un nanomaterial bastante adaptable, presentando un buen rendimiento en la banda de onda milimétrica.

TABLA V: Parámetros de ganancia y directividad según diseño teórico y ajustado de la antena dipolo doblado con grafeno para frecuencias de 50 y 60 [GHz].

| CONDUCTOR | | Grafeno | |
|------------|-------------------|-------------|-------------|
| FRECUENCIA | | 50 [GHz] | 60 [GHz] |
| Valor | Parámetro | | |
| Teórico | Ganancia [dB] | 2.5517 | 2.5565 |
| Ajustado | | 2.8405 | 2.8475 |
| Desfase | | + 11.32 [%] | + 11.38 [%] |
| Teórico | Directividad [dB] | 2.5748 | 2.5766 |
| Ajustado | | 2.8369 | 2.8461 |
| Desfase | | + 10.18 [%] | + 10.46 [%] |

IV. CONCLUSIONES

En promedio para ambos diseños, se hizo un incremento del 9.65 % en sus dimensiones, experimentando en 50 [GHz] un mejor desempeño, con porcentajes del 0.6 % y 1.55 % para el S11 y VSWR, respecto al diseño en 60 [GHz]. Dicho de otro modo, al aumentar la frecuencia de trabajo se tiene una relación directamente proporcional en los parámetros del coeficiente de reflexión y relación de onda estacionaria,

utilizando al grafeno en su forma y estructura básica, es decir, sin estar dopado químicamente. Todo esto, pese a depender de factores como la frecuencia, potencial electroquímico, tiempo de relajación, temperatura, y además, trabajar con menor conductividad eléctrica y mayor permitividad relativa comparado con otros materiales conductores conocidos.

Finalmente, fue posible obtener un buen rendimiento en los parámetros de dispersión S11, VSWR y patrón de radiación, gracias a un ajuste en el diseño dimensional de las antenas, conjuntamente con la implementación de un transformador $\lambda/4$ para conseguir un adecuado acople de impedancias y reducir el desfase entre la onda directa y la onda reflejada, obteniendo un VSWR ≤ 1.5 .

REFERENCIAS

- [1] ITU, "5G – Quinta generación de tecnologías móviles" [Online]. Abril, 2022. Available: <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>
- [2] C. Sánchez, "Caracterización de las ondas milimétricas para determinar su posible aplicación en la quinta generación de comunicaciones inalámbricas" Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. Mar. 2018.
- [3] I. Zhou and J. Romeu, "UltraWideband Microstrip to Waveguide Transition for 5G MillimeterWave Applications," IEEE Trans. Antennas Propagation, 2022.
- [4] T. Howard, G. Naranjo, "Beneficios de las redes 5G implementadas en Colombia" Tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia, Santa Marta, Colombia. Dic. 2021.
- [5] M. Alibakhshikenari, E. Mousa, M. Soruri, M. Dalarsson, M. Naser-Moghadasi, B. Virdee, C. Stefanovic, A. Pietrenko, S. Koziel, S. Szczepanski and E. Limiti, "A Comprehensive Survey on Antennas On-Chip Based on Metamaterial, Metasurface, and Substrate Integrated Waveguide Principles for Millimeter-Waves and Terahertz Integrated Circuits and Systems," IEEE Trans. Antennas Propag., January 2022.
- [6] M. Sumi and Y. Suzuki, "A Wideband Single-Sided Folded-Off-Center-Fed Dipole Antenna for 4G/5G/Wi-Fi M2M/IoT Applications and UAVs," IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), November 2021.
- [7] A. Geim and K. Novoselov, "The rise of graphene," Springer Nature, Nature Mater 6, pp. 183-191, 2007.
- [8] K. M. Ortiz Guerra Y B. D. Villamar Arias, "Comparación De Los Parámetros De Dispersión De Una Antena Dipolo Para Las Frecuencias De 60, 67 Y 74 Ghz," Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2021.
- [9] L. J. Caiza Gualotuña Y K. M. Sandoval Llamba, "Comparación De Los Parámetros De Dispersión De La Antena Dipolo Para Las Frecuencias De 24.25, 25.8 Y 27.5 GHz," Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2022.
- [10] N. R. N. M. Rodrigues, R. de Oliveira and V. Dmitriev, "Smart Terahertz Graphene Antenna: Operation as an Omnidirectional Dipole and as a Reconfigurable Directive Antenna," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 60, no. 5, pp. 26-40, Oct. 2018, doi: 10.1109/MAP.2018.2859169.
- [11] R. Alaei, M. Farhat, C. Rockstuhl y F. Lederer, "A perfect absorber made of a graphene micro-ribbon metamaterial," Optics Express, vol. 20, n.º 27, p. 28017, Dec. 2012, doi: <https://doi.org/10.1364/oe.20.028017>.
- [12] H. Zhang y Z. Wu, "Analysis of Electromagnetic Properties of New Graphene Partial Discharge Sensor Electrode Plate Material", Sensors, vol. 22, n.º 7, p. 2550, Mar. 2022, doi: doi.org/10.3390/s22072550.
- [13] Aravind Kumar, J., Krithiga, T., Venkatesan, D., Sathish, S., Amarnath, D.J., "Synthesis, Properties, and Applications of Graphene Nanocomposite". In: Hussain, C.M., Thomas, S. (eds) Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology. Springer, Cham. 2021, doi: doi.org/10.1007/978-3-030-40513-772.
- [14] V. P. Gusynin, S. G. Sharapov y J. P. Carbotte, "Sum rules for the optical and Hall conductivity in graphene", Physical Review B, vol. 75, n.º 16, Apr. 2007, doi: doi.org/10.1103/physrevb.75.165407.

- [15] ANSYS, "An Introduction to HFSS", Electromagnetics Suite, EE. UU., ISO 9001, Jan. 2021.
- [16] J. Li, B. Wu and C. Fan, "Graphene-based Beam Steering Antenna," IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Shenzhen, China, 2020, pp. 460-462, doi: 10.1109/ICEICT51264.2020.9334372.
- [17] M. H. Mubarak, S. Hara, I. Watanabe and A. Kasamatsu, "Beam Steering in Graphene-Based sub-THz Dipole Phased Array Antenna," IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), Hiroshima, Japan, 2020, pp. 154-156, doi: 10.1109/RFIT49453.2020.9226174.
- [18] Sharotri, N., Rana, A.K., Neha, Thakur, N., Dogra, S., Dhiman, N., "Fundamental of Graphene Nanocomposites". In: Hussain, C.M., Thomas, S. (eds) Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology. Springer, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40513-759>.
- [19] C. A. "Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design", 4 ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2016.