



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE UNA
ANTENA TIPO PATCH DIPOLO MEDIA ONDA Y ANTENA TIPO HILO DIPOLO
MEDIA ONDA EN LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE 60GHZ**

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

AUTORES: MELANIE MISHALL AUCANCELA YANCHAGUANO
KEVIN FAUSTO HARO USHIÑA

TUTOR: LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN

Quito-Ecuador

2023

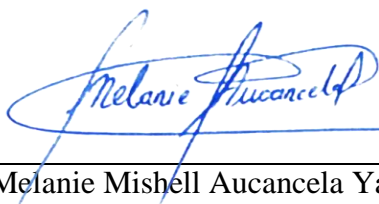
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Melanie Mishell Aucancela Yanchaguano y Kevin Fausto Haro Ushiña con documentos de identificación N°. 1722301288, N°.1724575129 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, 08 de agosto del año 2023

Atentamente,



Melanie Mishell Aucancela Yanchaguano
1722301288



Kevin Fausto Haro Ushiña
1724575129


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

Nosotros, Melanie Mishell Aucancela Yanchaguano y Kevin Fausto Haro Ushiña con documentos de identificación N°.1722301288, N°. 1724575129, 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: “Análisis comparativo de los parámetros de dispersión de una antena tipo patch dipolo media onda y antena tipo hilo dipolo media onda en la frecuencia de resonancia de 60Ghz”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros 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, 08 de agosto del año 2023

Atentamente,



Melanie Mishell Aucancela Yanchaguano
1722301288



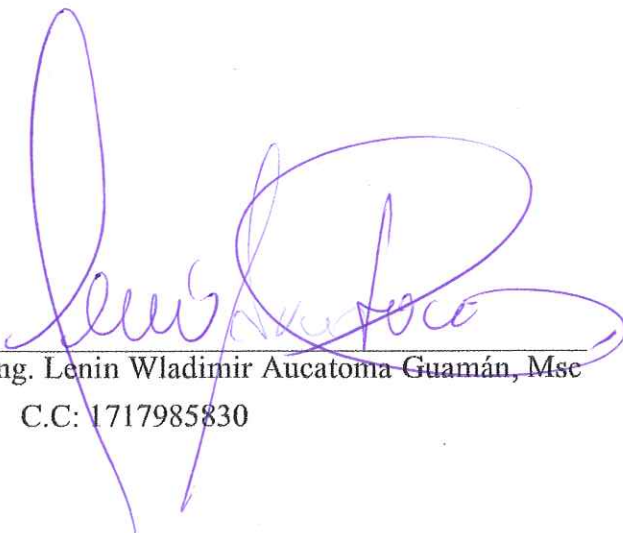
Kevin Fausto Haro Ushiña
1724575129

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: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE UNA ANTENA TIPO PATCH DIPOLO MEDIA ONDA Y ANTENA TIPO HILO DIPOLO MEDIA ONDA EN LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE 60GHZ , realizado por Melanie Mishell Aucancela Yanchaguano y Kevin Fausto Haro Ushiña, 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, 08 de agosto del año 2023

Atentamente,



Ing. Lenin Wladimir Aucatoma Guamán, Msc
C.C: 1717985830

DEDICATORIA

Dedico el siguiente trabajo a Dios, por ser quien ha guiado mis pasos y me ha permitido llegar a la culminación de este importante trabajo de titulación. Como dice Josué 1:9: “¿Acaso no soy yo el que te ordenó que seas fuerte y valiente? No temas ni te acobardes, porque el Señor, tu Dios, estará contigo dondequiera que vayas”.

Su infinita gracia y amor me han sostenido en cada paso de este camino, iluminando mi mente y fortaleciendo mi espíritu. A mi madre Amparo Yanchaguano y mi hermana Wendy Aucancela, quienes, a través de su sacrificio y enseñanzas, han sido la fuerza y motivación para seguir adelante y no desmayar, incluso en momentos difíciles; con gratitud reconozco su papel fundamental en esta conquista.

A mi familia, quienes, con su amor, respeto y sabios consejos, me han sabido formar en la fe y valores que hacen de mí un ser humano. De igual manera, han sido testigos del trabajo arduo realizado durante estos cinco años.

En gratitud y humildad, dedico este logro a Dios, a mis padres y a mi amada familia. Que este trabajo sea un reflejo de su gloria y un recordatorio constante de que, con fe, amor y esfuerzo, podemos alcanzar las metas que Dios tiene preparadas para nosotros.

Melanie Mishell Aucancela Yanchaguano

DEDICATORIA

Con gratitud y regocijo dedico mi trabajo de titulación a mis padres, Fausto Aquiles Haro Haro y Carmen Yolanda Ushiña Chasipanta, quienes, con inquebrantable voluntad y esfuerzo, me han brindado la oportunidad de estudiar en una prestigiosa institución de educación superior como es la Universidad Politécnica Salesiana; a las personas que han marcado el camino recorrido con su buena voluntad de construir un sueño y materializarlo, con la ayuda más desinteresada y la solidaridad que los caracterizo; familiares, maestros y amigos.

Kevin Fausto Haro Ushiña

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, en primer lugar, por otorgarme la fuerza, sabiduría y valentía necesarias para alcanzar este importante logro en mi vida académica.

A mi madre y hermana, cuyo admirable esfuerzo, ejemplo y tenacidad me han enseñado que con dedicación y esfuerzo todo es posible. Gracias por su amor incondicional, por su paciencia hacia mí, su apoyo constante y comprensión han sido mi fortaleza a lo largo de este desafiante camino.

A mi amada familia, quiero agradecerles por ser el pilar fundamental en la culminación de mi trabajo de tesis. En cada paso que di, sentí su amor incondicional impulsándome hacia adelante; sus palabras de aliento y gestos cariñosos fueron el combustible que necesitaba para perseverar incluso en los momentos más difíciles.

A mis amigos, con quienes he compartido triunfos y desafíos durante estos cinco años. Juntos, nos hemos levantamos con mayor fuerza y enfoque para alcanzar nuestros sueños. David, Fausto agradezco su inquebrantable amistad y el privilegio de compartir tantas experiencias.

A todos mis profesores, este logro no solo refleja nuestro esfuerzo como estudiantes, sino también el compromiso y la dedicación que han demostrado en nuestra formación académica. Agradezco por ser ejemplares mentores y por compartir su conocimiento con generosidad.

Finalmente, a la Universidad Politécnica Salesiana, mi agradecimiento por brindarme una educación de excelencia en todo momento. Su contribución ha sido vital para mi crecimiento académico y personal.

Con gratitud sincera,

Melanie Mishell Aucancela Yanchaguano

AGRADECIMIENTO

Gracias Dios por la vida y el sendero en el que me has guiado, por las personas que llegan y las que se van, por quienes infundieron una semilla de esperanza en mi alma, y sobre todo por las ocasiones donde tu luz ha sido guía en la penumbra.

Agradezco eternamente a mis padres quienes consagrados a la misión de entregar lo mejor de sí mismos, me encomendaron sus enseñanzas y voluntad, para contemplar la vida con todos sus matices y junto con su sacrificio y entrega, me han concedido la oportunidad de ser base y amparo para quienes se esfuerzan y sueñan con un mundo mejor.

A Ursulina y Antonio por ser la raíz del corazón de mi madre, que me ha infundido con su amor, los cimientos para encaminarme en una meta que hoy es personificada en mí.

A Griselda y Delfín por ser el alba y rocío en mi infancia, e inculcarme su alegría para contemplar la vida.

A Anita por acompañarme y cuidarme en las situaciones cotidianas, y ser una guardiana en los momentos inesperados.

A Alicia por ser el brazo extendido en el último escalón de este proyecto y brindarme su apoyo.

A todos mis maestros que han develado con conocimiento la niebla de la duda y la ignorancia desde mis inicios.

¡Gracias totales!

Kevin Fausto Haro Ushiña

Análisis comparativo de los parámetros de dispersión de una antena tipo patch dipolo media onda y antena tipo hilo dipolo media onda en la frecuencia de resonancia de 60 GHz.

Aucancela Yanchaguano Melanie Mishell*, Aucatoma Guaman Lenin Wladimir[†], Haro Ushiña Kevin Fausto[‡]
*dept. Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

Email: maucancelay@est.ups.edu.ec

[†]dept. Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

Email: laucatoma@ups.edu.ec

[‡]dept. Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

Email: kharou@est.ups.edu.ec

Abstract—This paper details a comprehensive comparative study between an airborne half-wave dipole antenna and a patch antenna with a half-wave dipole patch, operating at 60 GHz. Theoretical values are calculated for both antennas and modeled using HFSS ANSYS software. The design measurements of each antenna are adjusted to tune them to the target frequency and optimize scattering parameters such as S11, VSWR, impedance, gain and radiation pattern. In addition, the impact of the conductor material on frequency, scattering parameters and gain when changing antenna conductors is analyzed. The results show that, in the half-wave dipole antenna, by increasing the air space between the arms and the radius of the dipoles, the magnetic coupling is reduced and interference or unwanted energy transfer is reduced. Likewise, by increasing the radius of the dipoles, the radiating surface is increased, emitting more energy, reducing reflections and improving the VSWR, since there is a 233.33% difference with respect to the theoretical value, equivalent to an increase of 0.88 units. On the other hand, in the half-wave microstrip dipole antenna, varying the width, length and height of the dipoles influences the operating frequency, also changing the height of the substrate directly affects the bandwidth of the antenna, because as it increases by 128.47% equivalent to 0.37 units, the bandwidth of the antenna increases proportionally.

Index Terms—antena dipolo media onda, antena patch, 60 GHz, HFSS ANSYS, parámetros de dispersión, comparación de antenas, materiales conductores.

Resumen—Este artículo detalla un estudio comparativo exhaustivo entre una antena dipolo de media onda en aire y una antena patch con un parche de dipolo de media onda, operando a 60 GHz. Se calculan los valores teóricos para ambas antenas y se modelan utilizando el software HFSS ANSYS. Se ajustan las medidas de diseño de cada antena para sintonizarlas a la frecuencia objetivo y optimizar parámetros de dispersión como S11, VSWR, impedancia, ganancia y patrón de radiación. Además, se analiza el impacto del cambio del material conductor de las antenas en la frecuencia, los parámetros de dispersión y la ganancia. Los resultados muestran que, en la antena dipolo de media onda, al aumentar el espacio de aire entre los brazos y el radio de los dipolos, se logra reducir el acoplamiento magnético y reducir interferencias o transferencia de energía

no deseada, de igual forma al incrementar el radio de los dipolos, aumenta la superficie radiante logrando emitir mayor energía reduciendo reflexiones y mejoras en el VSWR pues existe una desfase del 233,33 % con respecto al valor teórico equivalente a un incremento de 0.88 unidades. Por otro lado, en la antena microstrip dipolo de media onda, al variar el ancho, la longitud y la altura de los dipolos influye en la frecuencia de operación, asimismo el modificar la altura del sustrato afecta directamente el ancho de banda de la antena, pues a medida que este incrementa en un 128,47 % equivalente a 0.37 unidades, el ancho de banda de la antena incrementa proporcionalmente.

I. INTRODUCCIÓN

El sector de las Telecomunicaciones experimenta un cambio estructural, el crecimiento constante de usuarios, que buscan transmitir grandes cantidades de información a velocidades cada vez más altas, a menor costo y en menor tiempo; ha generado saturación y congestión en las redes inalámbricas. Hasta hace poco, el estándar IEEE 802.11ac sobrepasó los Gbps (Gigabits por segundo), operando a 5GHz. [1]

Debido a este panorama, se ha vuelto fundamental el estudio y exploración de las ondas milimétricas para mejorar los servicios de banda ancha y la seguridad en los enlaces de comunicación. Estas ondas presentan un angosto ancho de haz, lo que permite una mayor reutilización de frecuencias, características relevantes para abordar los desafíos que surgen con la creciente cantidad de dispositivos conectados a las redes inalámbricas. El objetivo es lograr que estas redes sean capaces de soportar la conexión simultánea de cientos y miles de dispositivos [2].

Asimismo, en el diseño de antenas resulta crucial considerar los parámetros de dispersión: "S11, VSWR, Patrón de radiación, Ganancia y Ancho de Banda"; los cuales describen el comportamiento de la antena y varían acorde con las especificaciones de la banda de ondas milimétricas y

las demandas de los usuarios modernos [3].

Las antenas de hilo generalmente tienen ganancias bajas. Estas antenas de hilo se usan más a menudo en frecuencias más bajas, específicamente desde la banda de alta frecuencia (HF, 3-30 MHz) hasta la banda de frecuencia ultra alta (UHF, 300-3000 MHz) [4].

Una antena dipolo de media onda es una de las formas más sencillas de antena y consiste en dos elementos conductores, cada uno de una longitud de un cuarto de la longitud de onda ($\lambda/4$) de la señal que se desea transmitir o recibir. Por lo tanto, la longitud total del dipolo es de media longitud de onda ($\lambda/2$). La longitud de onda (λ) es inversamente proporcional a la frecuencia de la señal según la ecuación $c = f * \lambda$ [5].

A 60 GHz, la longitud de onda de las señales de radio es del orden de 5 mm (en aire/vacío), por lo que una antena dipolo de media onda diseñada para operar a esta frecuencia tendría una longitud total de alrededor de 2,5 mm teóricamente. Este tamaño pequeño puede ser beneficioso para aplicaciones donde el espacio es un factor crítico, como en los dispositivos de comunicaciones inalámbricas modernos. En un espacio ideal, la resistencia de radiación para una antena dipolo de media onda se aproxima a 73 ohmios, cercana a las impedancias características de 50 o 75 ohmios comúnmente usadas en líneas de transmisión. No obstante, factores prácticos como pérdidas del material y deficiencias en diseño y fabricación pueden variar este valor en antenas reales. La resistencia de radiación se identifica también como la resistencia de entrada donde la corriente alcanza su máximo. A su vez, la reactancia asociada a la impedancia de entrada de un dipolo depende de su longitud, siendo igual a $j42,5$. En consecuencia, la impedancia de entrada total para un dipolo de media onda es $Z_{in} = 73+j42,5$ Ohmios [5].

Además, 60 GHz es una frecuencia interesante porque se encuentra en la banda de frecuencia de ondas milimétricas (30-300 GHz), que ofrece la posibilidad de altas tasas de transferencia de datos y tiene la capacidad de manejar un gran número de usuarios simultáneos. Sin embargo, las señales en esta banda también experimentan una alta atenuación, lo que limita su rango. Por lo tanto, las antenas eficientes son críticas para aprovechar al máximo las ventajas de esta banda [2].

Las antenas microstrip son de bajo perfil, se adaptan a superficies planas y no planas, su fabricación es sencilla y barata gracias a la moderna tecnología de circuitos impresos, son mecánicamente robustas cuando se montan en superficies rígidas, son compatibles con diseños MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit en inglés), se refiere a un tipo de circuito que opera en frecuencias de microondas (300 MHz - 300 GHz) y está construido en un solo sustrato semiconductor. y, cuando se seleccionan la forma y el modo de

parche concretos, son muy versátiles en términos de frecuencia de resonancia, polarización, patrón e impedancia. Uno de los desafíos de las antenas microstrip contempla el hecho de que pueden emitir considerables señales electromagnéticas en frecuencias que están fuera de su banda de operación. Esto equivale a un problema debido a que puede interferir con otros sistemas de comunicación que operan en estas frecuencias [5].

Estas antenas se pueden fabricar utilizando métodos fotolitográficos, que es un proceso que utiliza luz para transferir un patrón geométrico de una máscara fotográfica a una capa de resistencia fotosensible en el sustrato. En este caso, tanto los elementos radiantes de la antena (es decir, las partes de la antena que emiten o reciben las ondas electromagnéticas) como la circuitería de alimentación asociada (es decir, las partes del circuito que suministran la señal a la antena o reciben la señal de la antena) se fabrican en sustratos dieléctricos [4].

El estudio se concentra en la comparación de los parámetros de dispersión entre una antena de tipo hilo y una antena patch, donde se toma como punto de partida el mejor diseño de antena dipolo media onda en [6] para el diseño del parche, en el estudio previo se analizan los parámetros de dispersión para una antena dipolo media onda tipo hilo a diferentes frecuencias, 60, 64 y 74 GHz. Para el diseño de la antena microstrip con parche en forma de dipolo se toman los estudios previos de [3], donde se realiza un análisis comparativo de parámetros de dispersión para una antena patch en rangos de bandas de frecuencia 57-64, 64-71 y 71-76 GHz. Además se toma en cuenta el estudio de [7] para el diseño del parche en forma de dipolo, donde se realiza una simulación y optimización de una antena patch dipolo para aplicaciones en 433 MHz.

II. MÉTODOS Y DISEÑO DE LAS ANTENAS

La figura 1, muestra el diseño fundamental de una antena dipolo de media onda, sirve como punto de referencia para la conceptualización y construcción de las antenas discutidas en este estudio.

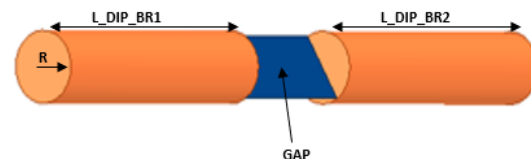


Figura 1: Estructura de la antena tipo hilo dipolo media onda

En la antena dipolo de $\lambda/2$, la longitud de los brazos viene dada por:

$$l = \frac{\lambda - 2g}{4} [m] \quad (1)$$

Donde:

- λ : longitud de onda.
- g : espacio entre los brazos "gap".

El radio de los brazos se describen por la siguiente fórmula en [8]:

$$R = 0,0005\lambda [m] \quad (2)$$

La alimentación de la antena esta ubicada en el centro de los brazos, este espacio denominado como "g", se obtiene al sustituir el valor del radio en la ecuación de la impedancia de [9]:

$$|Z_o| = 120 \ln\left(\frac{g}{R}\right) [\Omega] \quad (3)$$

Si se despeja "g" se obtiene:

$$g = Re^{\frac{|Z_o|}{120}} [m] \quad (4)$$

El siguiente diseño presenta los valores para una antena dipolo de media onda con un espacio de aire incorporado. La adopción de este diseño particular se basa en las ventajas que ofrece una antena dipolo de media onda, incluyendo su eficacia para recibir y transmitir señales en ambas direcciones a lo largo de un plano perpendicular al dipolo [10].

Tabla I: VALORES DE DISEÑO TEÓRICO PARA ANTENA DIPOLO MEDIA ONDA CON AISLANTE AIRE PARA 60 GHz.

<i>Aislante</i>	Aire
<i>Conductor</i>	Acero Inoxidable
<i>Frecuencia esperada [GHz]</i>	60
<i>Frecuencia obtenida [GHz]</i>	57
<i>Gap [mm]</i>	0.0051
<i>Longitud Brazos [mm]</i>	1.2475
<i>Radio [mm]</i>	0.0025

A. Diseño de antena tipo hilo dipolo media onda de Oro en aislante Aire

Debido a las limitaciones presentadas en el rendimiento de la antena parche dipolo media onda simulada en acero inoxidable, se optó por utilizar el oro como material conductor debido a sus propiedades físicas mostradas en la Tabla IV. Con el objetivo de brindar un panorama más completo del diseño implementado, los valores teóricos para la antena dipolo de material conductor oro, son los mostrados en la Tabla I ,puesto que el cambio de material en la antena no influye en los valores de diseño teórico, pero si en los valores sintonizados.

En la Tabla II se muestran los valores de diseño sintonizado para la antena dipolo de oro con aislante de aire:

Tabla II: VALORES DE DISEÑO SINTONIZADO ANTENA DIPOLO MEDIA ONDA ORO CON AISLANTE AIRE PARA 60 GHz

<i>Aislante</i>	Aire
<i>Conductor</i>	Oro
<i>Gap [GHz]</i>	0.00151
<i>Longitud Brazos [GHz]</i>	1.141
<i>Radio [GHz]</i>	0.05175

B. Diseño de antena tipo parche dipolo media onda de acero inoxidable

Se llevó a cabo el diseño teórico de la antena microstrip dipolo media onda a partir de las fórmulas matemáticas extraídas de [5]. El objetivo principal fue determinar los parámetros clave, como el ancho "Wg", longitud "Lg" de la antena patch, longitud de los conductores "Ldip", el ancho y longitud de la línea de transmisión para lograr un diseño óptimo en la frecuencia de 60 GHz.

La antena microstrip dipolo media onda, como se muestra en la Figura 2, se diseñó utilizando el software HFSS Ansys.

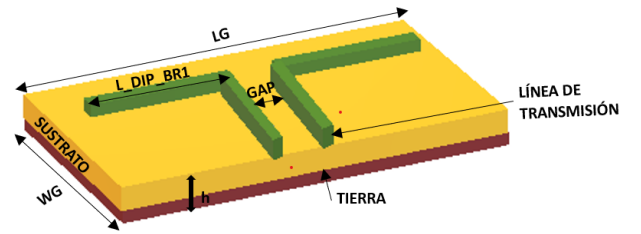


Figura 2: Estructura antena microstrip dipolo media onda

Consta de un plano de tierra de cobre con un espesor $H_{gnd}=0.01\text{mm}$ y un sustrato de material FR4-epoxy de espesor $H_{sus}=0.1138\text{mm}$, con una permitividad relativa $\epsilon_r=4.4$, los cuales poseen un ancho "Wg" y longitud "Lg" igual a:

$$L_g = W_g = 6 * h + l + gap [mm] \quad (5)$$

Donde:

- h : es el espesor del sustrato
- l : representa la longitud efectiva de los dipolos
- gap : región de aire entre los dipolos ec.4

Los conductores se encuentran en forma de "T" separados por una región de aire entre ellos. Los valores teóricos, longitud, ancho y altura se obtuvieron a partir del cálculo del área de un cuadrado inscrito en una circunferencia, considerando el diámetro de los dipolos de hilo representados en 3D.

$$D_{dip} = 2 * r [mm] \quad (6)$$

$$L_{dip} = \sqrt{\frac{D}{2}} [mm] \quad (7)$$

Donde:

- r: radio de los brazos de la antena tipo hilo dipolo media onda.
- D: diámetro de la antena tipo hilo dipolo media onda.

La alimentación de la antena se realiza a través de una línea de transmisión con un ancho "Wltx" determinado matemáticamente:

$$\left(\frac{W_{ltx}}{H_{sus}}\right) = 1,9136 [mm] \quad (8)$$

Donde:

- H_sus: indica la altura del sustrato.

Además, la longitud "Ltx" de la línea de transmisión se obtiene considerando la longitud eléctrica de 90 grados, ya que en una antena dipolo media onda, el desfase de voltaje y corriente ocurre en dicha posición.

$$L_{tx} = 0,6849 [mm] \quad (9)$$

Asimismo, la estructura se complementa con un puerto "lumped port" de 50 ohmios, que permite observar el comportamiento de la antena en función de la frecuencia y los parámetros de dispersión. Se debe destacar que, en cada simulación, se busca obtener un coeficiente de reflexión (S11) de -20 dB o menos, un valor de VSWR entre 1 y 1.5, y un patrón de radiación sin un número significativo de nulos, según se recomienda [3].

En la Tabla III se presentan las dimensiones teóricas para la antena microstrip dipolo media onda.

Tabla III: VALORES DE DISEÑO TEÓRICO ANTENA MICROSTRIP DIPOLO MEDIA ONDA.

Conductor	Oro
Sustrato	Fr4-epoxy
Tierra	Cobre
Línea de Transmisión	Oro
Frecuencia resultante [GHz]	50
Longitud Dipolos "Ldip"[mm]	1.24
Ancho Dipolos "Wdip"[mm]	3.53
Altura Dipolos "Hdip"[mm]	3.53
Longitud Sustrato "Lsust" [mm]	4.263
Ancho Sustrato "Wsust"[mm]	4.263
Altura Sustrato "Hsust"[mm]	0.1138
Longitud Tierra "Lg"[mm]	4.263
Ancho Tierra "Wg"[mm]	4.263
Altura Tierra "Hg"[mm]	0.01
Longitud Ltx "Ltx"[mm]	0.685
Ancho Ltx "Wltx"[mm]	0.217
Altura Ltx "Hltx"[mm]	3.53

Sin embargo, se observó que los valores teóricos correspondientes al diseño de la antena microstrip dipolo media onda no son apropiados para la frecuencia de 60 GHz, ya que se sitúan 10 GHz por debajo del objetivo deseado. Esto se debe a que los materiales utilizados, como los conductores de oro, pueden tener pérdidas dieléctricas y de conductores a

frecuencias altas, los efectos de borde y acoplamientos entre elementos son más pronunciados, afectando así la frecuencia de operación de la antena [4]. Por lo tanto, se llevó a cabo un ajuste de los parámetros como la longitud, el ancho y el material conductor de la antena, tomando en consideración las propiedades físicas del material conductor detalladas en la Tabla XI. Es importante destacar que, a frecuencias más altas, como 60 GHz, los diseños de antenas pueden ser más exigentes y requerir una mayor precisión para lograr un rendimiento óptimo.

Tabla IV: VALORES DE DISEÑO SINTONIZADO ANTE-NA MICROSTRIP DIPOLO MEDIA ONDA CONDUCTORES DE ORO.

Conductor	Oro
Sustrato	Fr4-epoxy
Tierra	Cobre
Línea de Transmisión	Oro
Frecuencia resultante [GHz]	60
Longitud Dipolos "Ldip"[mm]	1.6
Ancho Dipolos "Wdip"[mm]	1
Altura Dipolos "Hdip"[mm]	0.09
Longitud Sustrato "Lsust"[mm]	5.15
Ancho Sustrato "Wsust"[mm]	3.81
Altura Sustrato "Hsust"[mm]	0.26
Longitud Tierra "Lg"[mm]	5.15
Ancho Tierra "Wg"[mm]	3.81
Altura Tierra "Hg"[mm]	0.01
Longitud Ltx "Ltx"[mm]	1.1
Ancho Ltx "Wltx"[mm]	0.2177
Altura Ltx "Hltx"[mm]	0.09

III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A. Comparación de modelos matemático y modelos ajustados

En esta sección, se efectúa una comparativa entre dos conjuntos de valores: teóricos y ajustados. Se ha empleado la fórmula de variación porcentual, ecuación 10, que facilita un indicador del grado en que los valores experimentales se desvían de los valores teóricos.

$$V_p = \frac{V_{experimental} - V_{teorico}}{V_{Teorico}} * 100 \quad (10)$$

En la tabla V, se presenta los resultados obtenidos para la antena dipolo media onda de material oro.

Tabla V: CÁLCULO DE DESFASE ENTRE EL VALOR TEÓRICO Y SINTONIZADO PARA LA ANTENA DIPOLO MEDIA ONDA DE ORO CON AISLANTE DE AIRE.

Diseño	Valor Teórico	Valor sintonizado	Desfase %
Gap g [mm]	0,0051	0,0151	196,08 %
Longitud de brazo [mm]	1,2475	1,141	8,54 % (en reducción)
Radio de brazo [mm]	0,0025	0,05175	1970,00 %

En el diseño de antenas, en particular para una antena dipolo de media onda destinada a operar a 60 GHz, se observa que la aplicación inicial de fórmulas teóricas no resulta en una sintonización precisa a la frecuencia deseada.

Este hecho subraya la importancia de un proceso de ajuste posterior basado en la experimentación y la manipulación de parámetros en el software HFSS Ansys. La utilización de la herramienta Optimetrics, en particular, ha demostrado ser valiosa en la optimización del tiempo y los recursos computacionales.

El proceso de ajuste, que involucra la manipulación de valores dentro de intervalos de prueba, corrobora en gran medida la teoría básica de antenas. A pesar de que la sintonización inicial puede no coincidir con la frecuencia deseada, la adaptación de la antena resalta la insuficiencia de las fórmulas para proporcionar un diseño óptimo de manera aislada.

Se ha notado que la frecuencia aumenta cuando se ajusta el valor teórico del espacio entre los brazos de la antena, o "gap", en un sentido ascendente. De manera similar, la reducción en la longitud del brazo también tiene como resultado un incremento en la frecuencia. Asimismo, se han observado mejoras significativas en el parámetro VSWR al incrementar el radio del brazo. Este hallazgo sugiere que, para mejorar el rendimiento de la antena en términos del VSWR, se podría considerar ajustar el radio del brazo de la antena en un sentido ascendente.

Estos ajustes empíricos complementan las fórmulas teóricas y proporcionan una guía más precisa para la optimización del diseño de la antena. Es a través de esta iteración experimental que se pueden afinar y ajustar los parámetros de diseño para lograr la resonancia deseada a la frecuencia de 60 GHz.

Tabla VI: CÁLCULO DE DESFASE ENTRE EL VALOR TEÓRICO Y SINTONIZADO PARA LA ANTENA DIPOLO MEDIA ONDA DE ORO CON AISLANTE DE AIRE.

Diseño	Valor Teórico	Valor sintonizado	Desfase %
<i>Ldip</i> [mm]	1,24	1,6	29,03 %
<i>Wdip</i> [mm]	3,53	1	71,67 % (en reducción)
<i>Hdip</i> [mm]	3,53	0,09	97,45 % (en reducción)
<i>Jsust</i> [mm]	4,263	5,15	20,81 %
<i>Wsust</i> [mm]	4,263	3,81	10,63 % (en reducción)
<i>Hsust</i> [mm]	0,1138	0,26	128,47 %
<i>Lg</i> [mm]	4,263	5,15	20,81 %
<i>Wg</i> [mm]	4,263	3,81	10,63 % (en reducción)
<i>Hg</i> [mm]	0,01	0,01	0,00 %
<i>Ltx</i> [mm]	0,685	1,2	75,18 %
<i>Wtx</i> [mm]	0,217	0,2177	0,32 %
<i>Htx</i> [mm]	3,53	0,09	97,45 % (en reducción)

El desfase entre los valores teóricos y sintonizados indica la incompatibilidad que existe entre las predicciones matemáticas y las experimentales obtenidas tras simulaciones, ya que las dimensiones teóricas para la antena microstrip dipolo media onda no resultan en la frecuencia deseada, de igual forma son inconsistencias que permiten deducir que la antena no se comporta como un elemento que transmite señales electromagnéticas sino por el contrario, se comporta

como un reflector.

Por lo que los valores teóricos son sometidos a una variación de forma experimental es decir un proceso iterativo que permita alcanzar la frecuencia de 60 GHz.

Las variaciones más significativas con las que se obtuvieron cambios notorios en el comportamiento de la antena fueron: Variación del ancho, longitud y altura de los dipolos, pues se obtuvo una disminución en frecuencia es decir de los 70 GHz que se encontraba en el valor teórico comenzó aproximarse en el rango de los 57 a 64 GHz.

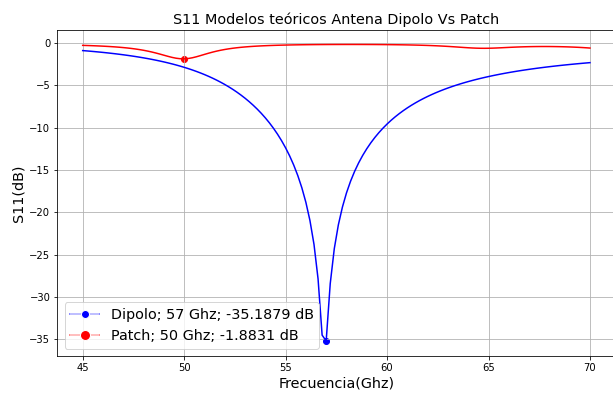
De igual forma, la variación de la longitud y ancho de la línea de transmisión, sobre todo la longitud de la línea permitió tener mayor incidencia en el comportamiento de la antena, pues como se observa en la Tabla VI, posee un desfase positivo lo que indica que los valores sintonizados son aproximadamente un 75.18 % mayores que los valores teóricos, lo que equivale a un incremento de aproximadamente 0.515 unidades, asimismo la variación de altura de la línea de transmisión al reducir en un 97,45 % es decir 3.44 unidades permite alcanzar valores de S11 en el rango de los -16 a -23 dB.

Finalmente el modificar la altura del sustrato es decir al incrementar el valor en un 128,47 % equivalente 0.37 unidades se observó que influye en el patrón de radiación puesto que a la medida de 0.26 mm se obtiene un patrón definido con dos lóbulos predominantes similar al patrón de radiación de una antena dipolo media onda sin embargo se debe tener en cuenta que este valor es un punto de inflexión ya que al tratar de incrementar o disminuir, el patrón tiende a deformarse y presentar atenuaciones en el comportamiento general de la antena.

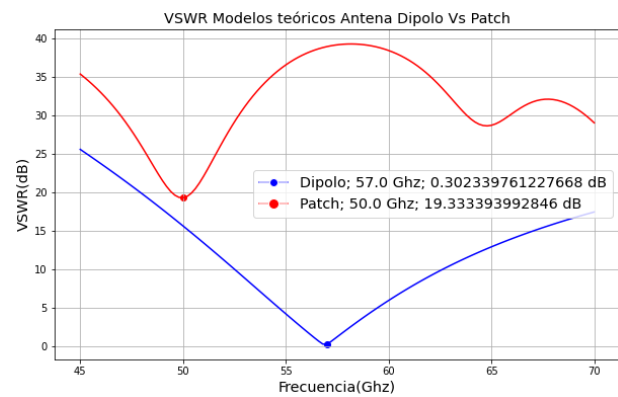
B. Relación de frecuencia de resonancia con S11 y VSWR

Una ROE de 1:1 es ideal e indica que no hay reflexiones, lo que denota que toda la energía de RF de la línea de transmisión se absorbe y radia a través de la antena. No obstante, esto no es muy usual en la práctica, por lo que una ROE de hasta 1.5:1 o incluso 2:1 a menudo se considera aceptable en muchas aplicaciones de antenas. Una ROE más alta podría indicar un problema de diseño con la antena, como un ajuste incorrecto de la longitud o la impedancia de la antena [11]. En la frecuencia de resonancia, tanto S11 como VSWR alcanzan sus valores mínimos, lo que indica una eficiencia máxima para la transmisión o recepción de energía. Por otra parte, si la frecuencia se aleja de la frecuencia de resonancia, la antena empezará a comportarse de manera más reactiva, resultando en más energía reflejada y, por lo tanto, mayores valores de S11 y VSWR [12].

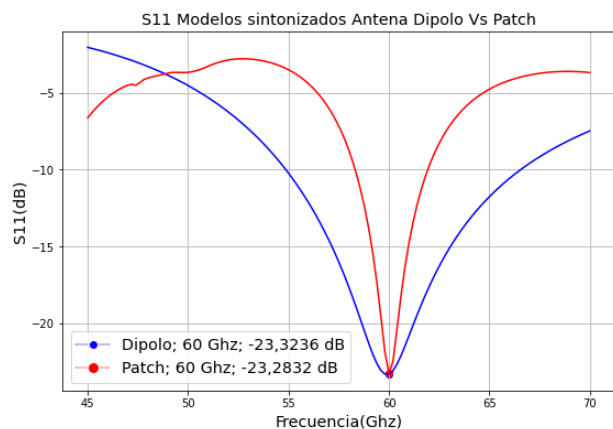
En la figura 3, se observa el cambio y comparativa de parámetros S11 Y VSWR de los diseños teórico y sintonizado.



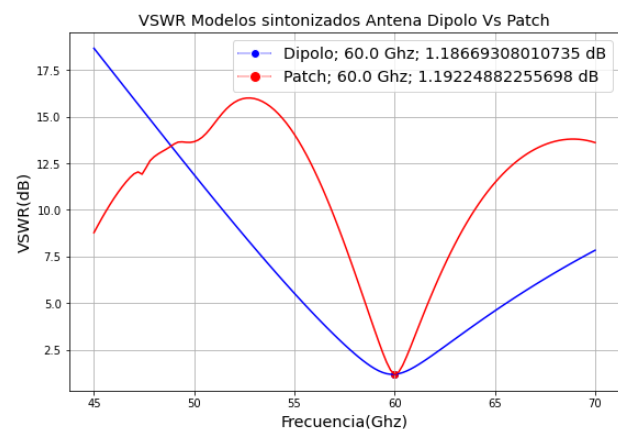
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3: Comparación de S11 y VSWR para modelos sintonizados y teóricos, (a) S11 Modelos teóricos Antena Dipolo vs Patch, (b) VSWR Modelos teóricos Antena Dipolo vs Patch, (c) S11 Modelos sintonizados Antena Dipolo vs Patch, (d) VSWR Modelos sintonizados Antena Dipolo vs Patch.

A partir de la observación de las gráficas del patrón de radiación de las diferentes antenas se tiene:

- Para el modelo teórico de la antena dipolo vs patch la frecuencia de resonancia no es la esperada a pesar de los cálculos matemáticos.
- La antena dipolo presenta un valor adecuado de parámetro S11 a pesar de estar desfasado 0.0526 % es decir 3dB por debajo de la frecuencia objetivo.
- En el caso de la antena microstrip el valor del valor s11, es decir que actúa como reflector.
- Para la antena microstrip con un parche de oro, en el modelo teórico se evidencia que la frecuencia resuena a 50 GHz con material conductor de oro, sin embargo el diseño inicial fue considerado el material acero inoxidable, que presento inconsistencias y resultados desfavorables e irrelevantes.
- El VSWR en los diseño teóricos de antena dipolo es de 0,3023 lo que indicaría que existe un buen acoplamiento entre la impedancia de la antena y la fuente de alimentación, es decir que toda la energía se transmite y nada se

refleja, lo cual es ideal, ya que en la realidad los efectos ambientales provocan que se la onda se refleje en cierto porcentaje.

- El VSWR para la antena microstrip teórica indicaría que toda la energía que llega a la antena es reflejada, debido a su valor de 19.33 que indica una mal acoplamiento entre la antena y la línea de transmisión [5].

Tabla VII: Parámetro S11 y VSWR modelo sintonizado entre la antena dipolo media onda y antena microstrip dipolo media onda

Parámetros Dispersión	Dipolo Media Onda	Microstrip Dipolo Media Onda
S11 [dB]	-23,32	-23,28
VSWR	1,18	1,19

- Para los modelos sintonizados el S11 se mantiene en niveles adecuados por debajo de -20dB, esto indica una buena adaptación de impedancia en ambas antenas a la

frecuencia de operación, es decir que el 1 % de la potencia incidente es reflejada de vuelta por la antena, mientras que el 99 % de la potencia es aceptada o absorbida por la antena [13].

- Para ambos modelos se evidencian valores de VSWR cercanos a 1, es decir, que la antena esta bien adaptada a la línea de transmisión, cumpliendo la condición ideal de 1:1, que indica un buen rendimiento en términos de eficiencia y minimización de pérdidas.

En la figura 4, al realizar la comparativa entre las características del patrón de radiación; en primera instancia la antena dipolo de media onda, guarda estrecha relación con la teoría de antenas, por su forma característica de dona, en ambos diseños teórico y experimental, sin cambios sustanciales más que en la ganancia. Para la antena microstrip con parche dipolo media onda, no se cumple con el patrón de radiación característico de una antena tipo parche rectangular, pues las dimensiones teóricas se descartan al no ser favorables para el diseño de antenas en alta frecuencia, tampoco existen estudios previos que sustenten con ecuaciones las dimensiones de un parche en forma de dipolo, es por eso que se obtuvo un patrón de radiación inconsistente sin forma definida, esto sirvió de motivación para implementar un modelo experimental en el diseño ajustado, donde resulta en un patrón de radiación con una ganancia significativamente mayor de 4.8 dB en comparación con la antena dipolo de media onda 2.2 dB. Esto indica que la antena microstrip dipolo de media onda tiene una mayor capacidad de radiar energía en la dirección deseada, lo que resulta en una mayor eficiencia de radiación.

En la tabla VIII, se presentan los valores de ganancia de ambas antenas en sus modelos: teórico y ajustado.

Tabla VIII: VALORES DE GANANCIAS ENTRE LA ANTENA DIPOLO MEDIA ONDA Y MICROSTRIP DIPOLO MEDIA ONDA TEÓRICO - SINTONIZADO.

DISEÑO	Fo [GHz]	G_min [dB]	G_max [dB]
Dipolo Teórico	57	- 72.8	1.9
Dipolo Sintonizado	60	- 56	2.2
Microstrip Dipolo Teórico	50	- 34.9	-7.4
Microstrip Dipolo Sintonizado	60	- 29.7	4.8

Se observa que en los diseños teóricos y sintonizados de las antenas, las ganancias mínimas son negativas debido a que irradian menos potencia en direcciones específicas. Sin embargo, en el caso de la antena microstrip teórica, tanto la ganancia máxima como la mínima son negativas, lo que indica una deficiencia en la antena y una pérdida de potencia de radiación, ya que toda la energía transmitida se refleja y se absorbe hacia el interior del plano de tierra. Por tanto, mediante el arreglo en la forma de los conductores, se logra obtener una ganancia positiva equivalente a 2.6 dB por encima de la ganancia de la antena dipolo, de igual forma se reduce la presencia de lóbulos secundarios en el patrón de radiación.

C. Ancho de banda

El ancho de banda describe el rango de frecuencia en que las antenas satisfacen una especificación de parámetro particular [6]

La Tabla IX indica el ancho de banda de los diseños sintonizados a la frecuencia de 60 GHz, se observa que la antena dipolo exhibe un ancho de banda mayor, con una mejora de 1.3 dB en comparación con la antena microstrip dipolo media onda. Esta diferencia se debe a las características de diseño de la antena dipolo, la forma de distribución de corriente y excitación en múltiples modos de radiación, lo que provee un ancho de banda más amplio, para aplicaciones que requieren un mayor rango de frecuencias. [4]

Tabla IX: ANCHO DE BANDA DISEÑOS SINTONIZADOS CON VSWR 1.5:1.

DISEÑO	Fo [GHz]	Fi [GHz]	Fr [GHz]	Bw [GHz]
Dipolo Sintonizado	60	58.99	60.85	1.86
Microstrip Dipolo Sintonizado	60	59.75	60.31	0.56

D. Parámetros de dispersión de la antena Dipolo media onda y Microstrip dipolo media onda a 60 GHz

Tras realizar los ajustes necesarios en los parámetros físicos de los diseños teóricos, se muestran en la tabla X los parámetros de dispersión, los cuales proporcionan información sobre cómo se comportan las antenas a la frecuencia objetivo de 60 GHz.

Tabla X: PARÁMETROS DE DISPERSIÓN MODELO SINTONIZADO ENTRE LA ANTENA DIPOLO MEDIA ONDA Y ANTENA MICROSTRIP DIPOLO MEDIA ONDA

Parámetros Dispersión	Dipolo Media Onda	Microstrip Dipolo Media Onda
SII [dB]	-23,32	-23,28
VSWR	1,18	1,19
Ganancia [dB]	2,2	4,8
Ancho de Banda [Ghz]	1,86	0,56
Impedancia Característica [Ohms]	80.73-8.96j	57.31-0.79j

La impedancia característica o impedancia de onda es una propiedad importante de una línea de transmisión, como un cable coaxial o una antena, que determina cómo la energía se propaga a lo largo de la línea. La impedancia característica no depende de la longitud de la línea de transmisión. Es importante hacer coincidir la impedancia de la antena con la del transmisor o receptor al que está conectada para garantizar una eficiente transferencia de energía. Si las impedancias no coinciden, se produce una reflexión de la energía, lo que puede resultar en una menor eficacia de la transmisión o incluso en daño al equipo. La impedancia se mide en ohmios. En

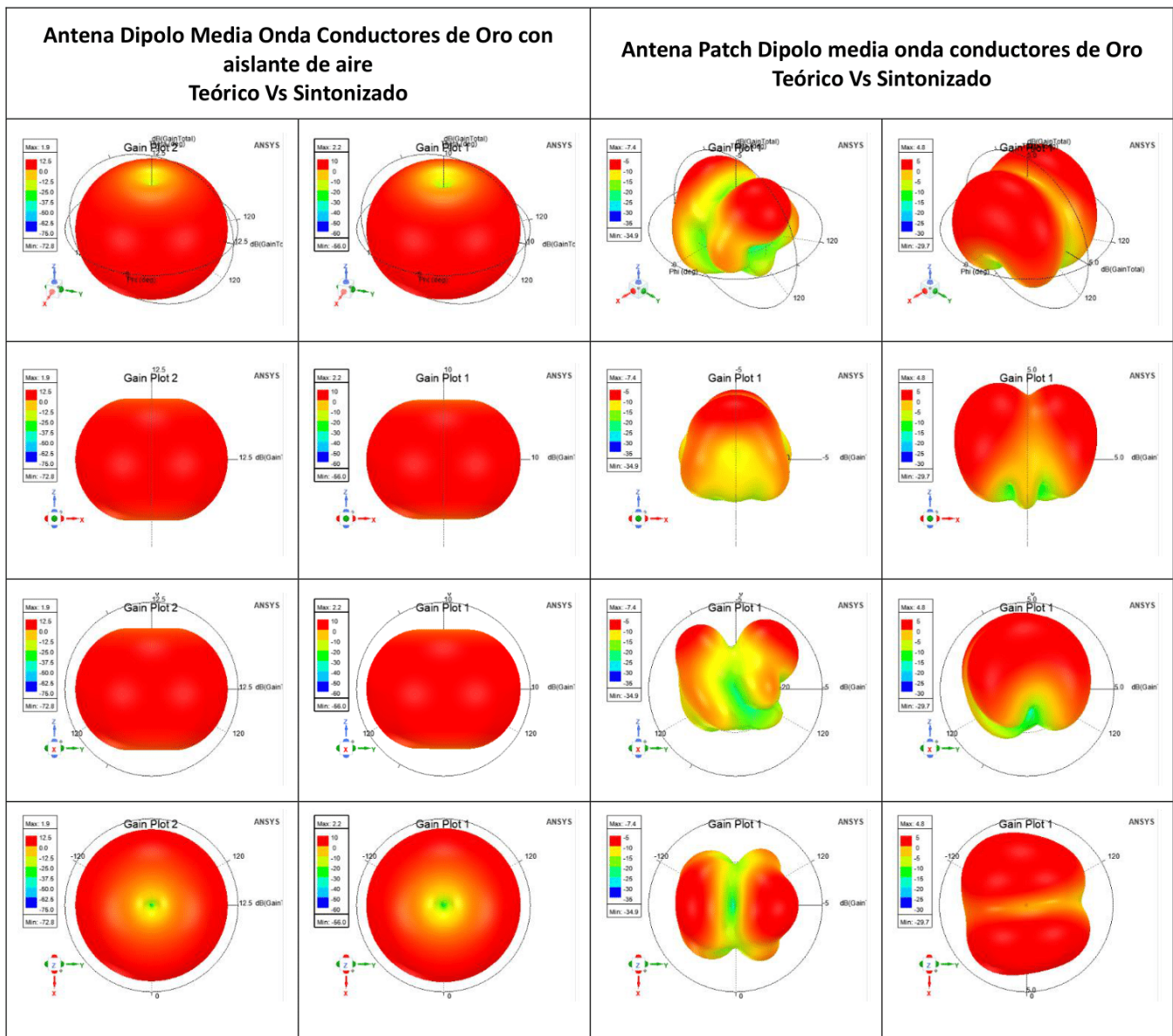


Figura 4: Patrón de radiación 3D de antenas de estudio.

el caso de muchas antenas de radiofrecuencia, la impedancia característica estándar es de 50 ohmios o, en algunos casos, de 75 ohmios [14].

En una impedancia compleja, la parte imaginaria puede ser positiva o negativa. Una reactancia positiva indica un comportamiento inductivo, mientras que una reactancia negativa indica un comportamiento capacitivo. Estos resultados de impedancia característica representan impedancias complejas, con partes reales e imaginarias. La parte real (resistencia) representa la disipación de energía, mientras que la parte imaginaria (reactancia) representa el almacenamiento de energía. En el contexto de una antena, la resistencia se asocia a menudo con la radiación y las pérdidas resistivas, y la reactancia se asocia con la acumulación de energía en campos eléctricos o

magnéticos. Los resultados obtenidos muestran impedancias características distintas para las antenas de tipo patch y dipolo estudiadas. La antena de tipo patch presentó una impedancia de $Z_0=57.31-0.79j$ ohmios, mientras que la antena de tipo dipolo mostró una impedancia de $Z_0=80.73-8.96j$ ohmios, ambas a una frecuencia de resonancia de 60 GHz. Es evidente que la antena de tipo dipolo tiene una mayor resistencia, lo que indica una mayor disipación de energía en comparación con la antena tipo patch. Además, la reactancia negativa de la antena de tipo dipolo sugiere una mayor acumulación de energía en el campo eléctrico, lo que puede deberse a un efecto capacitivo inherente. Estos hallazgos son consistentes con las diferencias estructurales y operativas inherentes a estos dos tipos de antenas. Estos resultados pueden tener implicaciones importantes

en la selección y diseño de antenas para aplicaciones de alta frecuencia en la gama de 60 GHz, donde las características de impedancia pueden tener un impacto significativo en la eficiencia y rendimiento de la transmisión de la señal.

E. Variación de Materiales para el modelo propuesto

Tomando en consideración los materiales de la tabla XI, se procede a la variación de los materiales conductores de las antenas sintonizadas.

Tabla XI: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS MATERIALES CONDUCTORES ANTENA MICROSTRIP DIPOLO MEDIA ONDA.

Elemento	Permitividad Relativa	Permeabilidad Relativa	Conductividad [siemens/m]
Acero inoxidable	1	1	1100000
Bronce	1	1	110000000
Oro	1	0.99996	41000000
Plata	1	0.99998	61000000

La Tabla XII, presenta las variaciones de materiales conductores y su impacto en los parámetros S11, VSWR y frecuencia de resonancia para la antena dipolo sintonizada. Se evidencia que hay resultados prometedores para el material plata y oro, ya que no se presenta variación en la frecuencia; presenta una pequeña variación en el VSWR al igual que el VSWR. Para el material Bronce hay una variación en la frecuencia de resonancia que disminuye en 0.20 dB's, el VSWR y S11 evidencian mínimas variaciones.

Tabla XII: VARIACIÓN DE MATERIALES CONDUCTORES PARA ANTENA DIPOLO SINTONIZADA.

Gap [mm]	0.0151		
Longitud de Brazos [mm]	1.141		
Radio [mm]	0.05175		
Conductor	Oro	Bronce	Plata
Frecuencia de Resonancia [Ghz]	60	59,80	60
S11 [dB]	-23,3236	-23,2791	-23,3451
VSWR	1,1867	1.1928	1.1838

En la tabla XIII, se presenta los valores obtenidos tras variar los materiales conductores tomando en consideración sus propiedades físicas como su conductividad, permitividad y permeabilidad relativa características de un conductor, se procedió a la primera variación optando a la plata como material de la superficie radiante, teniendo como resultado un desfase en frecuencia equivalente a 0,2 GHz por debajo de la frecuencia objetivo. Asimismo, el parámetro S11 varía de forma proporcional a la frecuencia, sin embargo el VSWR se ve afectado de forma negativa ya que disminuye a tal punto de convertirse en un valor nulo.

Finalmente, la segunda variación fue con el material de bronce el cual desfasa 4.6GHz por encima de la frecuencia objetivo de igual forma el VSWR incrementa en un 0.65 más que el diseño de oro sintonizado lo que se entiende

Tabla XIII: VARIACIÓN DE MATERIALES CONDUCTORES PARA ANTENA MICROSTRIP SINTONIZADA.

Longitud Dipolos "Ldip"[mm]	1.6		
Ancho Dipolos "Wdip"[mm]	1		
Altura Dipolos "Hdip"[mm]	0.09		
Longitud Sustrato "Lsust"[mm]	5.15		
Ancho Sustrato "Wsust"[mm]	3.81		
Altura Sustrato "Hsust"[mm]	0.26		
Longitud Tierra "Lg"[mm]	5.15		
Ancho Tierra "Wg"[mm]	3.81		
Altura Tierra "Hg"[mm]	0.01		
Longitud Ltx "Lltx"[mm]	1.1		
Ancho Ltx "Wltx"[mm]	0.2177		
Altura Ltx "Hltx"[mm]	0.09		
Conductor	Oro	Bronce	Plata
Frecuencia de Resonancia [GHz]	60	64,60	59,80
S11 [dB]	-23,2832	-19,5194	-34,0179
VSWR	1.1922	1,8429	0,3459

como un valor aceptable, teniendo en cuenta que a medida que incrementa mayor será la cantidad de energía reflejada y menor será la eficiencia de la transmisión, sin embargo el parámetro S11 es un valor aceptable pero se debe tener en consideración que un valor cercano a -20 dB, indicaría una excelente adaptación de impedancia y una mínima reflexión de energía.

IV. CONCLUSIONES

Dado que uno de los objetivos de este estudio fue el diseño de la antena microstrip con un parche en forma de dipolo, el mismo que tuvo punto de partida de [6], donde se afirma que uno de los mejores diseños para una antena dipolo de media onda conlleva el uso del material conductor acero inoxidable, por lo que este material muestra buenos resultados al diseñar antenas de tipo hilo, sin embargo se descarta su uso en el diseño de antenas microstrip, específicamente en altas frecuencias como 60 GHz, puesto que muestra resultados inconsistentes en el modelo teórico y al calcular sus parámetros S11, VSWR y ganancia, donde actúa como reflector. Se recomienda utilizar otros materiales para el elemento conductor como tungsteno de cobre "WCu", debido a su alta resistencia, punto de fusión elevado, estabilidad dimensional baja y buena conductividad eléctrica, entre otras características físicas [15].

En el diseño del parche rectangular, al cambiar a una forma tipo "T" que corresponde a un dipolo de media onda, se observa que la radiación se vuelve más directiva y se concentra en ciertas zonas específicas. A diferencia del patrón de radiación de una antena tipo hilo dipolo de media onda, que es omnidireccional y se distribuye uniformemente en todas las direcciones. En términos de ganancia, la antena dipolo produjo una ganancia de 2.2 dB, mientras que la antena microstrip proporcionó una ganancia superior de 4.8 dB.

REFERENCIAS

- [1] J. Leyva Bravo and D. Beltrán Casanova, "La comunicación inalámbrica a través de la banda de los 60 GHz," *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 8, pp. 89 – 96, 08 2016.
- [2] J. L. Bravo and D. B. Casanova, "La comunicación inalámbrica a través de la banda de los 60 ghz," *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 8, pp. 89–96, 2016.
- [3] E. J. Chalapud Patiño, "Análisis comparativo de los parámetros de dispersión de una antena microstrip para las bandas de 57-64, 64-71 y 71-76 ghz," B.S. thesis, 2021.
- [4] D. Pozar, *Microwave Engineering*. Wiley, 2011.
- [5] C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 2016.
- [6] F. X. López Orbea and I. S. De La Torre Trujillo, "Comparación de los parámetros de dispersión de una antena dipolo para las frecuencias de 60, 67 y 74 ghz," B.S. thesis, 2021.
- [7] A. H. Rambe, N. Adilah, S. HS, Suherman, I. Wahyudi, and M. Zulfin, "Simulation and optimization of microstrip dipole antenna using cohen-minkowski fractal for 433 mhz applications," in *2021 5th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, vol. 5, pp. 178–181, 2021.
- [8] E. Monachesi, A. M. Frenzel, G. Chaile, C. Agustín, and F. A. G. López, "Conceptos generales de antenas," *Recuperado de: http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf*, p. 20, 2011.
- [9] A. Inc., *An Overview of HFSS*. 18 ed., 2016.
- [10] C. Amor Jiménez and F. Paredes, "Dipolo impreso para aplicaciones wi-fi y caracterización de la ganancia por medio de la celda tem," 2011.
- [11] D. Misra, *Radio-Frequency and Microwave Communication Circuits: Analysis and Design*. Wiley, 2012.
- [12] J. du Preez and S. Sinha, *Millimeter-Wave Antennas: Configurations and Applications*. Signals and Communication Technology, Springer International Publishing, 2016.
- [13] R. Ludwig and G. Bogdanov, *RF Circuit Design: Theory and Applications*. Pearson international edition, Prentice-Hall, 2009.
- [14] C. Free and C. Aitchison, *RF and Microwave Circuit Design: Theory and Applications*. Microwave and Wireless Technologies Series, Wiley, 2021.
- [15] E. Lassner and W.-D. Schubert, *Tungsten Compounds and Their Application*, pp. 133–177. Boston, MA: Springer US, 1999.