

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:  
ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA EN LOS  
PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE ANTENAS LPDA PARA LA BANDA MMW**

**AUTORES:  
JOSELIN YADIRA LEMA USHIÑA  
VINICIO RAFAEL QUILUMBA USHIÑA**

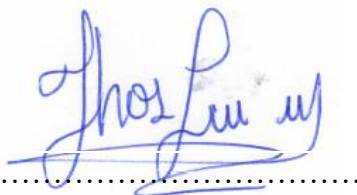
**TUTOR:  
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

**Quito, julio del 2021**

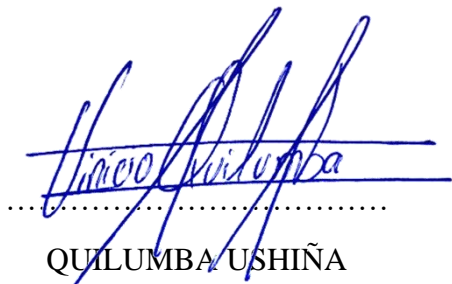
## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Lema Ushiña Joselin Yadira con documento de identificación N° 1724607146 y Quilumba Ushiña con documento de identificación N° 1726163692 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación con el tema: ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA EN LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE ANTENAS LPDA PARA LA BANDA MMW, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIEROS ELECTRÓNICOS, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



LEMA USHIÑA  
JOSELIN YADIRA  
CI: 1724607146



QUILUMBA USHIÑA  
VINICIO RAFAEL  
CI: 1726163692

Quito, julio del 2021

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA EN LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE ANTENAS LPDA PARA LA BANDA MMW realizado por Joselin Yadira Lema Ushiña y Vinicio Rafael Quilumba Ushiña, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, julio de 2021

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line. The signature is highly stylized and cursive, appearing to read 'Lenin Wladimir Aucatoma Guamán'.

Ing. Lenin Wladimir Aucatoma Guamán

C.C: 1717985830

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación quiero dedicar a mi abuelita Angela María Guamán que fue una madre para mí y aunque ya no esté conmigo para celebrar la culminación de esta etapa en mi vida, quiero expresar que siempre llevo y llevaré presente sus consejos y enseñanzas en forma de cuentos; a mi familia, ya que sin su apoyo incondicional no habría podido finalizar esta etapa, pero quiero resaltar y agradecer el esfuerzo que realiza mi padre en su trabajo; a todos los amigos que he hecho en el transcurso de mi vida, ya que siempre están apoyándome y a pesar del pasar tiempo aún estamos juntos para festejar nuestros logros y agradecerles también por seguir llenándome de anécdotas; por último a los ingenieros de la UPS que se han convertido en grandes amigos.

*Joselin Yadira Lema Ushiña*

Durante mi carrera han estado varias personas apoyándome y de manera directa o indirectamente ayudándome a cumplir este sueño, es por esto que este trabajo de titulación lo dedico primeramente a Dios por darme la sabiduría y el conocimiento necesario para crecer como profesional en esta etapa de mi vida. A mis padres Clara y Jaime que, con su confianza, sacrificios y esfuerzo me permitieron culminar mis estudios universitarios. A mis hermanos Jonathan y Rubi que con sus palabras de afecto me animaban a continuar en el camino que me propuse. A mi familia y amigos que de una u otra forma supieron acompañarme en este proyecto de vida. También a una persona especial Nora que con su apoyo incondicional y cariño no me permitió rendirme a pesar de las adversidades que se presentaron.

*Vinicio Rafel Quilumba Ushiña*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al momento de agradecer a las personas que estuvieron involucradas en la realización del proyecto de una u otra forma, va a resultar injusto no nombrar a todos, por lo tanto, de antemano pido disculpas.

Sin embargo, voy a utilizar este espacio para agradecer especialmente a: Dios por mantener a mi familia unida y con salud para disfrutar de nuestros logros; a mis padres Luis Ángel Lema y María Ushiña que me han apoyado de todas las formas posibles para que cumpla cada una de mis metas y anhelos; a mis hermanos Denilson y Andersson por dañarme los deberes con sus juegos con el objetivo de que los mejore; a la UPS por brindarme docentes enfocados en impartir sus conocimientos y reforzarlos con calidad humana; finalmente al Ing. Lenin Aucatoma por ayudarnos con el desarrollo del proyecto y por convertirse en un gran amigo.

*Joselin Yadira Lema Ushiña*

Quiero agradecer a Dios por darme la vida, salud y fuerza para llegar al final de mi carrera universitaria. A mis padres Jaime Quilumba y Clara Ushiña por brindarme su cariño, apoyo incondicional y consejos los cuales me guiaron en el largo camino que me propuse. A Nora Huacho y a mis hermanos Rubi Quilumba y Jonathan Quilumba por permanecer junto a mí en los malos y buenos momentos. A mis amigos por hacer de la universidad mi segundo hogar. A la Universidad Politécnica Salesiana y todos sus docentes en especial a Lenin Aucatoma que me permitieron adquirir conocimientos y valores para formarme como un gran profesional.

*Vinicio Rafael Quilumba Ushiña*

# Análisis del impacto de la frecuencia de resonancia en los parámetros de dispersión de antenas LPDA para la banda MMW

Lema Ushiña Joselin  
Yadira  
Universidad Politécnica  
Salesiana  
Quito, Ecuador  
jlemau@est.ups.edu.ec

Quilumba Ushiña Vinicio  
Rafael  
Universidad Politécnica  
Salesiana  
Quito, Ecuador  
vquilumba@est.ups.edu.ec

Aucatoma Guamán Lenin  
Wladimir  
Docente Universidad  
Politécnica Salesiana  
Quito, Ecuador  
laucatoma@ups.edu.ec

**Resumen** – El presente artículo analiza el comportamiento de antenas LPDA (Arreglo logarítmico periódico de dipolos) al resonar en frecuencias de banda de onda milimétrica (MMW). Las antenas trabajan en las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz, cumpliendo con un coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ) menor a -20 dB, una Relación de Onda Estacionaria de Voltaje (VSWR) comprendida en un rango de 1 a 2 y diagramas de radiación sin nullos en su lóbulo principal. Las simulaciones fueron realizadas en el software ANSYS HFSS, el cual permite diseñar estructuras de antenas de alta frecuencia en 3D.

Al trabajar a altas frecuencias se obtuvo antenas de aproximadamente 3mm, es por lo que se recomienda trabajar con antenas de tipo impreso. Para el diseño de las antenas se utilizó plata como material conductor para los dipolos. Debido a que cuenta con una mejor conductividad eléctrica y un sustrato de Duroid 5880 que tiene una permitividad eléctrica y pérdida tangencial baja. Esto permitió obtener ganancias mayores a 7.5 dB y anchos de bandas sobre los 1.2 GHz.

**Palabras Claves**- Arreglo logarítmico de dipolos, Coeficiente de reflexión, Ganancia, Patrón de radiación, VSWR.

**Abstract** - This article analyzes the behavior of LPDA (Logarithmic Periodic Dipole Arrangement) antennas when resonant at millimeter wave (MMW) band frequencies. The antennas work at the frequencies of 60, 67 and 74 GHz, complying with a reflection coefficient ( $S_{11}$ ) lower than -20 dB, a Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) comprised in a range of 1 to 2 and radiation patterns without null in its main lobe. The simulations were carried out in the ANSYS HFSS software, which allows the design of high-frequency antenna structures in 3D.

When working at high frequencies, antennas of approximately 3mm were obtained, which is why it is recommended to work with printed type antennas. For the design of the antennas, silver was used as the conductive material for the dipoles. Because it has better electrical conductivity and a Duroid 5880 substrate that has low electrical permittivity and tangential loss. This allowed obtaining gains greater than 7.5 dB and bandwidths above 1.2 GHz.

**Keywords**- Logarithmic array of dipoles, Reflection coefficient, Gain, Radiation pattern, VSWR.

## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico móvil ha ido evolucionando de manera exponencial en estos últimos tiempos. Se predice que el uso de datos móviles crecerá a gran escala cada año durante esta época [1]. Para satisfacer esta cantidad de flujo de datos móviles el espectro de frecuencias menores a 3 GHz queda obsoleto. Para solucionar este problema se propone utilizar la banda de frecuencias de ondas milimétricas comprendida entre los 30 y 300 GHz la cual se encuentra sin uso [2].

La utilización de la banda de onda milimétrica trae consigo el diseño de antenas que puedan operar en este espectro, con un ancho de banda grande y sean adaptables a los dispositivos móviles existentes [3]. Al ser antenas de dimensiones reducidas y tener la necesidad de integración, es necesario implementar y diseñar antenas de tipo impreso [4].

Existen investigaciones de antenas LPDA para frecuencias no mayores a 60GHz. En [5] se diseña una antena LPDA para 60 GHz en la cual se estudia el impacto del material en los parámetros de dispersión  $S_{11}$  y VSWR; en [6] se comparan diseños de antenas logarítmicas periódicas para 2.4 y 5.8 GHz priorizando la sintonización y anchos de banda aceptables. En ninguna de estas investigaciones se toma en cuenta el comportamiento de las antenas LPDA ante la variación de la frecuencia de resonancia. Con este antecedente se analiza el impacto del aumento de frecuencia de resonancia en los parámetros de dispersión en las frecuencias de 60, 67 y 74 [GHz]. Para efecto de investigación se propone antenas LPDA con dipolos impresos de plata por ser el mejor conductor con un sustrato de Duroid 5880 [7].

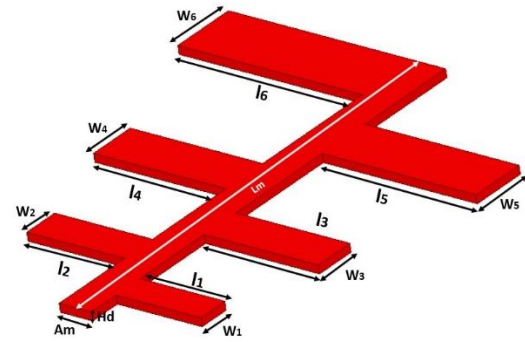
## II. DISEÑO DE LA ANTENA

Para el diseño de antenas LPDA se toma como principio fijar una frecuencia máxima y una frecuencia mínima, partiendo de esto se toma  $\pm 5$  GHz de las frecuencias de sintonización [5], el rango de frecuencias de diseño se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Rango de frecuencias de diseño

Frecuencia [GHz]	Rango [GHz]
60	55 - 65
67	62 - 72
74	69- 79

La antena que se implementó en este artículo es una antena LPDA impresa en un sustrato de Duroid 5880 (ver figura 1.a y 1.c), este tipo de antena consiste en un conjunto de dipolos de diferentes longitudes y espaciamientos distintos (ver figura 1.b y 1.d), los dipolos están conectados de forma cruzada con su dipolo adyacente y su alimentación se la realiza en el dipolo de menor longitud. El tipo de circuito impreso para el diseño de la antena LPDA es un PCB de dos caras [6], el cual permite conectar las dos caras del circuito impreso (ver figura 1.a).



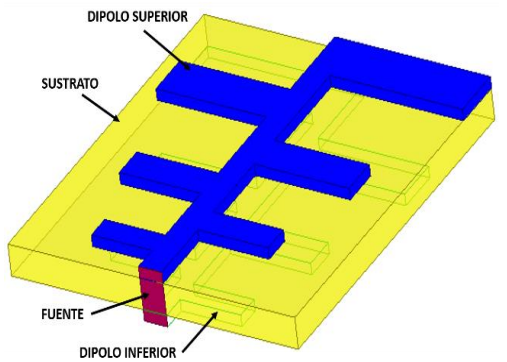
(d)

Figura 1. (a) Estructura de la antena LPDA impresa; (b) Dipolos impresos parte superior; (c) Sustrato Duroid 5885; (d) Dipolos impresos parte inferior

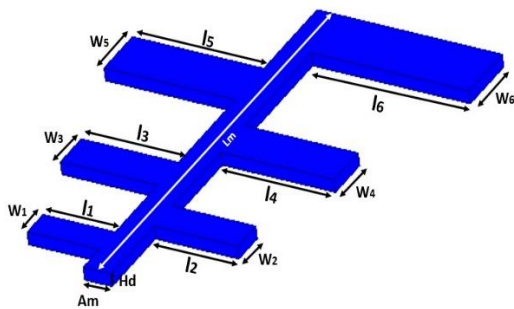
En la tabla 2 se presentan los valores de las dimensiones del diseño de las antenas LPDA por ajuste, con los que se obtuvo los parámetros S11, VSWR y el patrón de radiación. Para la simulación de la antena se utilizó un sustrato de Duroid 5880 y dipolos impresos de plata.

Tabla 2. Resultados de ajuste de las dimensiones de antenas

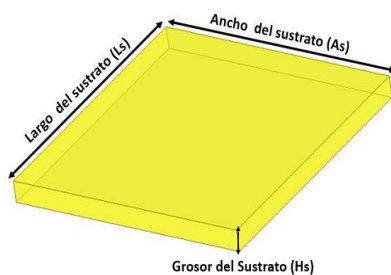
Dimensiones ajustadas de antenas LPDA [mm]				
Nombre	Parámetro	60 GHz	67 GHz	74 GHz
Largo de dipolos	l6	1.35	1.2	1.05
	l5	1.15	1	0.91
	l4	1.00	0.86	0.79
	l3	0.85	0.74	0.685
	l2	0.70	0.635	0.595
	l1	0.60	0.55	0.515
Ancho de dipolos	W6	0.60	0.4	0.38
	W5	0.51	0.34	0.33
	W4	0.43	0.29	0.29
	W3	0.37	0.25	0.25
	W2	0.31	0.22	0.22
	W1	0.26	0.19	0.19
Distancia entre dipolos	d6;5	0.70	0.61	0.50
	d5;4	0.60	0.53	0.43
	d4;3	0.52	0.45	0.38
	d3;2	0.44	0.39	0.33
	d2;1	0.36	0.34	0.29
Largo mástil	Lm	3.23	2.81	2.37
Ancho mástil	Am	0.3	0.21	0.18
Grosor dipolos / mástil	Hd	0.075	0.05524	0.055
Ancho sustrato	As	3.11	2.61	2.28
Largo sustrato	Ls	3.23	2.81	2.37
Grosor sustrato	Hs	0.24	0.212	0.171



(a)



(b)



(c)

Se utilizó como ganancia directiva para los diseños de las antenas logarítmicas periódicas 7.5 dB [8]. Las fórmulas matemáticas para obtener los parámetros, dimensiones y espaciamiento entre dipolos fueron obtenidas en base a [9]:

Factor de escala:

$$\tau = \frac{f_{min}}{f_{max}} \quad (1)$$

Donde:

$\tau$ : Factor de escala

$f_{min}$ : Frecuencia mínima

$f_{max}$ : Frecuencia máxima

Con el factor de escala y la ganancia directiva se procede a encontrar el factor de espaciamento haciendo uso de la gráfica de Carrel (ver figura 2).

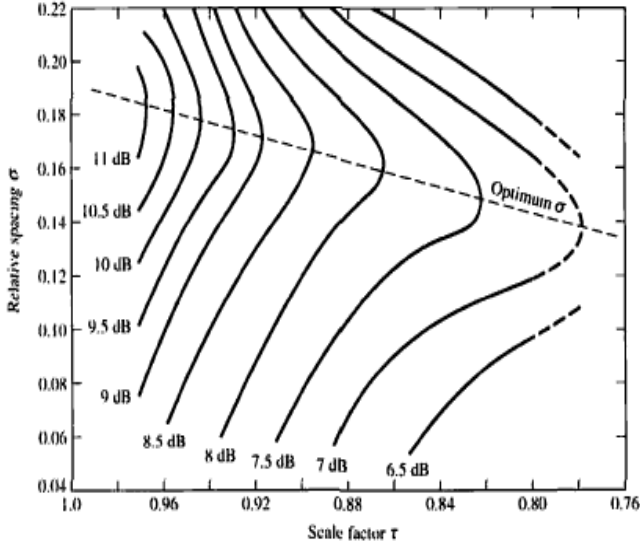


Figura 2. Gráfica de Carrel tomada de [9]

Ángulo de apertura:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{1 - \tau}{4\sigma} \right) \quad (2)$$

Donde:

$\alpha$ : Ángulo de apertura

$\tau$ : Factor de escala

$\sigma$ : Factor de espaciamento

Ancho de banda en la región activa:

$$Bar = 1.1 + 7.7(1 - \tau)^2 \cot(\alpha) \quad (3)$$

Donde:

$Bar$ : Ancho de banda en la región activa

$\tau$ : Factor de escala

$\alpha$ : Ángulo de apertura

Ancho de banda deseado:

$$B = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (4)$$

Donde:

$B$ : Ancho de banda deseado

$f_{min}$ : Frecuencia mínima

$f_{max}$ : Frecuencia máxima

Ancho de banda para el diseño:

$$Bs = Bar * B \quad (5)$$

Donde:

$Bs$ : Ancho de banda para el diseño

$Bar$ : Ancho de banda en la región activa

$B$ : Ancho de banda deseado

Número de dipolos:

$$N = 1 + \frac{\ln(Bs)}{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)} \quad (6)$$

Donde:

$N$ : Numero de dipolos

$Bs$ : Ancho de banda para el diseño

$\tau$ : Factor de escala

Longitud de onda máxima:

$$\lambda_{max} = \frac{c}{f_{min}} \quad (7)$$

Donde:

$\lambda_{max}$ : Longitud de onda máxima

$c$ : Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s<sup>2</sup>)

$f_{min}$ : Frecuencia mínima

Distancia desde el dipolo más largo hasta el dipolo más corto:

$$L = \frac{\lambda_{max}}{4} \left( 1 - \frac{1}{Bs} \right) \cot(\alpha) \quad (8)$$

Donde:

$L$ : Distancia entre dipolo más largo y más corto

$\lambda_{max}$ : Longitud de onda máxima

$Bs$ : Ancho de banda para el diseño

$\alpha$ : Ángulo de apertura

Longitud dipolo más largo:

$$l_{max} = \frac{\lambda_{max}}{2} \quad (9)$$

Donde:

$l_{max}$ : Longitud dipolo más largo

$\lambda_{max}$ : Longitud de onda máxima

Longitudes del resto de dipolos:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{l_{n+1}}{l_n} \quad (10)$$

Donde:  $l_n = l_{n+1}(\tau)$

$l_{n+1}$ : Longitudes de dipolos

$\tau$ : Factor de escala

Espaciamento entre dipolos:

$$d_{n+1} : n = 2\sigma l_{n+1} \quad (11)$$

Donde:

$\sigma$ : Factor de espaciamento

$l_{n+1}$ : Longitudes de dipolos



Para calcular el ancho de los dipolos se utilizó el programa Tx-Line el cual es un software libre y apropiado para el diseño matemático de antenas de alta frecuencia [10], se obtiene el ancho del dipolo más largo  $w_6$  [5][6]. En este software se ingresan los valores de: permitividad eléctrica, pérdida tangencial y grosor del sustrato que se utilizará, además se ingresa el grosor de la línea de transmisión y la impedancia con la que se trabajará es  $50\Omega$  que es la impedancia más usada en este tipo de antenas [11], a partir de esta dimensión se calcula el ancho del resto de dipolos con ayuda de las fórmulas obtenidas en [6].

Ancho del resto de dipolos:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W_{n+1}}{W_n} \quad (12)$$

Donde:  $W_n = W_{n+1}(\tau)$

$W_n$ : Ancho dipolos

$\tau$ : Factor de escala

Espaciamiento entre líneas:

$$H_s \leq \frac{0.3(3 \times 10^8)}{2\pi(fr)(\sqrt{\epsilon_r})} \quad (13)$$

Donde:

$fr$ : Frecuencia de resonancia

$\epsilon_r$ : Permitividad eléctrica del sustrato

### III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se van a analizar los parámetros de dispersión obtenidos de las simulaciones en el software Ansys HFSS y el impacto de la frecuencia de resonancia en las antenas LPDA.

Con las dimensiones matemáticas (Mat) no se lograron cumplir las frecuencias de resonancia y los parámetros de dispersión. Por lo que se ajustó del diseño: Largo de los dipolos, Ancho del sustrato ( $A_s$ ), Ancho del mástil ( $A_m$ ), Grosor dipolos/mástil ( $H_d$ ) y Grosor del sustrato ( $H_s$ ). Los valores obtenidos matemáticamente y de ajuste se presentan en la tabla 3 con su respectivo porcentaje de desfase.

**Tabla 3** Dimensiones matemáticas vs ajustadas en las antenas LPDA para las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz.

Dimensiones de antenas LPDA [mm]										
Nombre	Param	60 GHz			67 GHz			74 GHz		
		Mat	Ajuste	Desfase [%]	Mat	Ajuste	Desfase [%]	Mat	Ajuste	Desfase [%]
Largo de dipolos	l6	1.35	1.35	0	1.21	1.2	0.82	1.085	1.05	3.22
	l5	1.15	1.15	0	1.05	1	4.76	0.945	0.91	3.70
	l4	1.00	1.00	0	0.905	0.86	4.97	0.82	0.79	3.65
	l3	0.85	0.85	0	0.78	0.74	5.12	0.715	0.685	4.19
	l2	0.7	0.70	0	0.67	0.635	5.22	0.62	0.595	4.03
	l1	0.6	0.60	0	0.575	0.55	4.34	0.54	0.515	4.62
Distanciamiento entre dipolos	d6;5	0.70	0.60	0	0.61	0.4	0	0.50	0.38	0
	d5;4	0.60	0.51	0	0.53	0.34	0	0.43	0.33	0
	d4;3	0.52	0.43	0	0.45	0.29	0	0.38	0.29	0
	d3;2	0.44	0.37	0	0.39	0.25	0	0.33	0.25	0
	d2;1	0.36	0.31	0	0.34	0.22	0	0.29	0.22	0
Ancho de dipolos	W6	0.6	0.26	0	0.40	0.19	0	0.38	0.19	0
	W5	0.51	0.70	0	0.34	0.61	0	0.33	0.50	0
	W4	0.43	0.60	0	0.29	0.53	0	0.29	0.43	0
	W3	0.37	0.52	0	0.25	0.45	0	0.25	0.38	0
	W2	0.31	0.44	0	0.22	0.39	0	0.22	0.33	0
	W1	0.26	0.36	0	0.19	0.34	0	0.19	0.29	0
Largo mástil	Lm	3.23	3.23	0	2.81	2.81	0	2.37	2.37	0
Ancho mástil	Am	0.3	0.3	0	0.26	0.21	19.23	0.24	0.18	25
Grosor dipolos / mástil	Hd	0.03	0.075	60	0.03	0.05524	45.69	0.03	0.055	36.36
Ancho sustrato	As	3.00	3.11	3.53	2.68	2.61	2.61	2.41	2.28	5.39
Largo sustrato	Ls	3.23	3.23	0	2.81	2.81	0	2.37	2.37	0
Grosor sustrato	Hs	0.2	0.24	16.66	0.14	0.212	33.96	0.13	0.171	23.97

#### A. Impacto de la frecuencia en el parámetro $S_{11}$

El coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ) representa la cantidad de energía que se refleja a la fuente, esto corresponde a una

relación de potencia reflejada y potencia transmitida ( $P_r/P_t$ ), con un equivalente de  $1/100$  [12], por lo tanto, se debe asegurar que el parámetro  $S_{11}$  esté por debajo de  $-20$  dB, para que la antena sea considerada con buen

funcionamiento. En la figura 3 se puede observar la sintonización de frecuencia en cada diseño y sus respectivas curvas de S11.

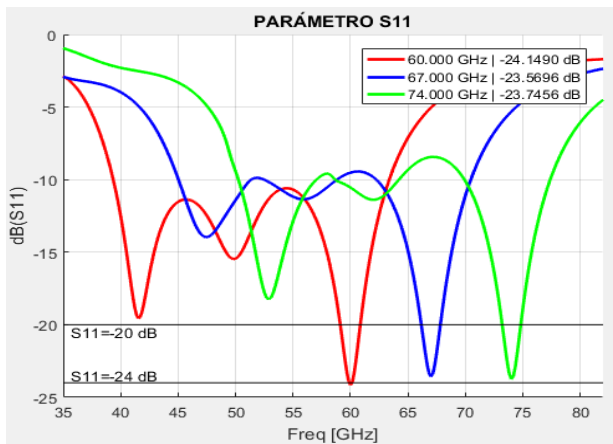


Figura 3. S11 ajustado para las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz

Para obtener parámetros de S11 que cumplan con los objetivos de investigación, se ajustaron los valores de grosor de sustrato (Hs) y grosor de dipolos/mástil (Hd), estos parámetros presentan un decrecimiento a medida que la frecuencia aumenta.

El parámetro S11 tiene un comportamiento no lineal con respecto al aumento de frecuencia de resonancia.

#### B. Impacto de la frecuencia en el parámetro VSWR

El VSWR es la medida que indica la cantidad de desajuste que existe entre la antena y su línea de transmisión. En aplicaciones de antenas un valor de VSWR inferior a 2 es considerado adecuado, siendo 1 un acoplamiento ideal y 1.5 un acoplamiento aceptable, para valores mayores a 2 se considera que la antena está mal adaptada con su línea de transmisión [5]. En la figura 4 se puede visualizar los valores de VSWR obtenidos en las simulaciones para cada frecuencia de resonancia.

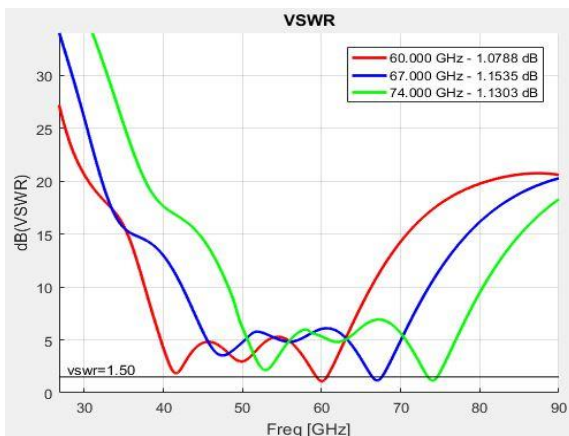


Figura 4. VSWR de las frecuencias de 60,67 y 74 GHz

Se identificó que el parámetro VSWR es proporcional a S11 lo que quiere decir que si S11 es menor a -20 dB el

VSWR se va acercando al valor de 1, por lo tanto, los ajustes en las dimensiones de la antena que se realizó para S11 ayuda a cumplir directamente con los objetivos de VSWR. Se puede observar los valores obtenidos para S11 y VSWR en la tabla 4, se muestra que el parámetro VSWR al igual que S11 tienen un comportamiento no lineal a medida que la frecuencia aumenta.

Tabla 4. Parámetros obtenidos de S11, VSWR y ancho de banda de los diseños ajustados

Frecuencia [GHz]	Parámetro		
	S11	VSWR	Ancho de banda [GHz]
60	-24.1490	1.0788	1.32
67	-23.5696	1.1535	1.21
74	-23.7456	1.1303	1.2

En la tabla 4 se presentan los valores de ancho de banda de los diseños ajustados, para encontrar el ancho de banda se tomó una referencia en las gráficas de VSWR a 1.5 (ver figura 4).

El comportamiento del ancho de banda en las antenas LPDA a medida que la frecuencia aumenta tiene un comportamiento decreciente.

#### C. Impacto de la frecuencia de resonancia en el patrón de radiación y en la ganancia de la antena

El patrón de radiación puede ser representado en gráficas 2D o 3D. Muestran características de radiación como, por ejemplo: la potencia radiada, la amplitud o fase del campo eléctrico [13].

En la figura 5 se puede observar los patrones de radiación en 2D del plano H de cada una de las frecuencias de resonancia. Se pudo identificar que a medida que la frecuencia aumenta el lóbulo posterior del patrón de radiación tiene un crecimiento lineal, además el crecimiento de frecuencia no produce pérdidas significativas para que se presenten lóbulos secundarios.

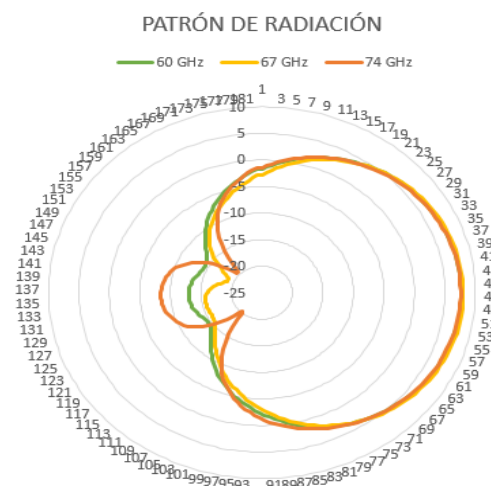


Figura 5. Diagramas de radiación de las frecuencias de 60, 67, 74 GHz

Por la forma de los patrones de radiación resultantes se puede identificar que la antena radia de forma directiva, pero

por los valores de haz de la tabla 6 pueden ser consideradas también antenas de radiación sectorial debido a que su ancho de haz está dentro del rango de  $60^\circ$  a  $180^\circ$  [14]. Pese al aumento de frecuencia se mantiene la forma en que radia energía la antena.

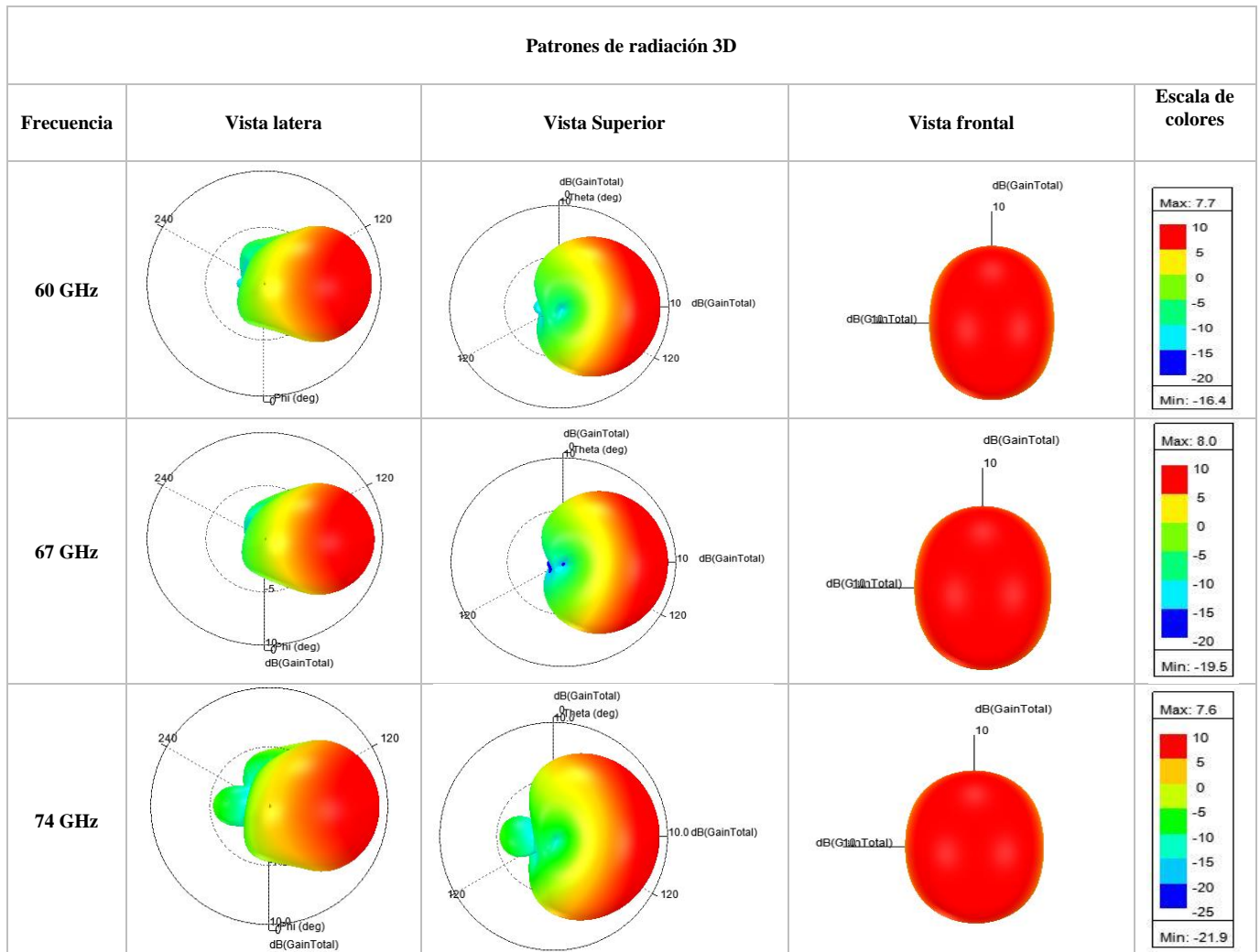
Tabla 6. Valores de ancho de haz y ganancia de diseños ajustados

Frecuencia	60 GHz	67 GHz	74 GHz
Ancho de haz	$101^\circ$	$95^\circ$	$103^\circ$
Ganancia [dB]	7.7	8.0	7.6

En la tabla 6 se puede observar los valores de ganancia de la antena, a medida que la frecuencia aumenta la ganancia tiene un comportamiento no lineal.

En la tabla 7 se puede observar los patrones de radiación en 3D, estos cuentan con un lóbulo principal donde se concentra la mayor parte de energía radiada y adicional tienen un lóbulo posterior, estos patrones no poseen lóbulos secundarios o nulos en el lóbulo principal.

Tabla 7 Patrones de radiación en 3D desde diferentes vistas



#### D. Impacto de la permitividad y conductividad de los materiales

La conductividad eléctrica de un material es la capacidad de conducir corriente eléctrica por él [15], mientras que la permitividad eléctrica describe como se propaga, refleja y atenúa la energía electromagnética que fluye a través del material [16]. En base a esto se realizaron distintas pruebas haciendo uso de los materiales de la tabla 5. Estas pruebas reflejaron que a medida que la conductividad eléctrica aumenta y la permitividad eléctrica

disminuye los parámetros de dispersión  $S_{11}$  y VSWR tienden a acercarse a valores ideales. Los diseños con mejores resultados fueron con dipolos impresos de plata y con un sustrato de Duroid 5880. Ya que si se utiliza un conductor con menor conductividad y un sustrato con mayor permitividad las medidas de grosor de dipolos/mástil ( $H_d$ ) y dimensiones de sustratos se agrandan desproporcionalmente al diseño de la antena. En la tabla 5 se presenta los materiales y sustratos usados para el diseño de antenas con sus valores de permitividad y conductividad respectivamente.

Tabla 5. Características de los sustratos y materiales conductores

Sustratos		
Material	Permitividad ( $\epsilon_r$ )	Perdida tangencial ( $\delta$ )
Zafiro	11	0.0004
Cerámica	9.5	0.0001
FR-4	4.4	0.018
Cuarzo	3.5	0.0015
Duroid 5880	2.2	0.0009
Materiales Conductores		
Material	Conductividad [ $S/m$ ]	
Hierro	0.11x10 <sup>8</sup>	
Aluminio	0.377 x10 <sup>8</sup>	
Oro	0.452 x10 <sup>8</sup>	
Cobre	0.58 x10 <sup>8</sup>	
Plata	0.630x10 <sup>8</sup>	

#### IV. CONCLUSIONES

Con los diseños ajustados se logró obtener valores de S11 inferiores a -20 dB consiguiendo -24.1490 dB para 60 GHz, -23.5696 dB para 67 GHz y -23.7456 dB para 74 GHz, visualizando una mejoría de 5.20, 16.31 y 40.25 [%] respectivamente, en comparación a los diseños matemáticos. Con respecto al VSWR se obtuvieron resultados de 1.0788 para 60 GHz, 1.1535 para 67 GHz y 1.1303 para 74 GHz visualizando que este parámetro es mayor a 1 pero inferior a 1.2 teniendo un desfase de 13.51, 41.11 y 84.56 [%] respectivamente frente a los valores matemáticos.

A medida que la frecuencia aumenta el desfase con respecto a la frecuencia de sintonización crece de manera lineal en una proporción de 1.5 GHz aproximados, es por lo que es necesario disminuir la longitud de los dipolos en una proporción de 11% y el ancho de mástil en 25% para lograr las frecuencias centrales de sintonización.

Se observó que si la frecuencia aumenta la ganancia de la antena tiene un comportamiento no lineal, logrando ganancias mayores a 7.5 dB y menores a 8 dB, mientras que el ancho de banda tiene un decrecimiento uniforme alcanzando valores mayores a 1 GHz.

#### REFERENCIAS

- [1] J. G. Jiménez, «Modelado y estudio de canales realistas en sistemas mmMIMO.» Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2014.
- [2] D. M. Ramos, «Propuesta de utilización de las ondas milimétricas en la interfaz radio de la quinta generación móvil.» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016.
- [3] E. M. Beltrán, «Desarrollo de antenas miniatura UWB con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5G.» CICESE, Ensenada, 2019.
- [4] N. G. Fernández, «Antenas para dispositivos móviles 5G e IoT.» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2019.
- [5] C. J. Paucar Diaz y A. E. Taco Navarrete, «Análisis de parámetros de dispersión de una antena logarítmica periódica para banda de onda

- [6] milimétrica.» Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2021.
- [6] C. E. Morales Tobar, «Diseño, análisis, simulación y construcción de una red de antenas del tipo Log-periódicas impresas para la banda de 2.4 GHz y 5.8 GHz.» Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, 2020.
- [7] Rogers Corporation. (s. f.). RT/duroid 5880 Laminates - Rogers Corporation. Recuperado 28 de abril de 2021, de <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880-laminates>.
- [8] V. C. Ornetta, «Diseño y fabricación de una antena Log-periódica 200-1000 MHz.» Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2005.
- [9] C. A. Balanis, «Antenna Theory Analysis and Design», New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [10] Cadence. (2019, 26 febrero). TX-LINE | AWR Software. <https://www.awr.com/awr-software/options/tx-line>.
- [11] R. R. Z. Cruz, «Característica de Impedancia y Radiación de Antenas Log. -Periódicas de Dipolos en V.» Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara-Cuba, 2012.
- [12] Lic. A. Rela, «Electrónica y Electricidad.» Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2010, p. 66.
- [13] C. A. Gómez Álvarez, «Diseño de una antena de lámina curva para onda milimétrica.» Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2020.
- [14] J. I. Argüello Santillán y L. D. Arias Torres, «Diseño e Implementación de un prototipo de antena directiva de microlínea en la banda de 2.4 GHz.» Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, 2009.
- [15] García, V. P. (2001). «Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico». Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- [16] Gómez, E. S. (2014). «Desarrollo de un sensor de permitividad dieléctrica de bajo costo a la frecuencia de 2.45 GHz». Tonantzintla-Puebla: Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.