

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

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

**TEMA:
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS
PARÁMETROS DE DISPERSIÓN PARA LA ANTENA TIPO CURL EN LA
BANDA DE FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHz**

**AUTORES:
ALEX DARIO AIMACAÑA JAMI
ANTHONY FABRICIO SÁNCHEZ BRICEÑO**

**TUTOR:
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

Quito, julio del 2021

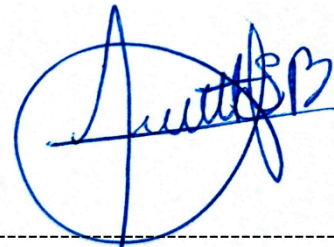
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Alex Dario Aimacaña Jami y Anthony Fabricio Sánchez Briceño con documento de identificación N°1724120819 y N°1718170960 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico intitulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN PARA LA ANTENA TIPO CURL EN LA BANDA DE FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHz**, 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 entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Alex Dario Aimacaña Jami
C.C:1724120819



Anthony Fabricio Sánchez Briceño
C.C:1718170960

Quito, julio del 2021

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN PARA LA ANTENA TIPO CURL EN LA BANDA DE FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHz realizado por Alex Dario Aimacaña Jami y Anthony Fabricio Sánchez Briceño, 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 del 2021



Lenin Wladimir Aucatoma Guamán

C.I: 1717985830

DEDICATORIA

Con todo el corazón dedico este trabajo a Dios, porque es el ser supremo que hizo posible mi existencia, es el ser que me ha dado el regalo más bonito que es la vida y la salud; gracias a él he llegado donde estoy ahora. Además, dedico este trabajo a mis padres por los valores y enseñanzas inculcadas desde que nací y por el apoyo constante e incondicional durante el transcurso de mi vida. Dedico también, a toda mi familia en especial a mi hermana y a todos mis primos que sepan que el camino del conocimiento no tiene límites y los límites están en cada uno de nosotros.

“Gracias Dios por darme a unos padres que me han apoyado siempre, la certeza de este logro es por ellos y para ellos, por el gusto de haber cumplido con mi formación correcta y la satisfacción de haber realizado el sueño de ser profesional, los Amo.”

Alex Dario Aimacaña Jami

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, por darme la vida y permitirme llegar hasta este momento y culminar mi formación como profesional. A mis padres Silvana Briceño y Marco Sánchez por ser los pilares fundamentales en mi vida, por brindarme la oportunidad de estudiar para cumplir este sueño que hoy se hace realidad el ser un ingeniero, que me abre nuevos caminos en mi vida profesional, por todo su amor y apoyo incondicional, por inculcarme buenos valores y principios, motivándome siempre a seguir adelante y a fijarme nuevos objetivos y metas, los tengo en mi corazón.

A mi hermano Michael Sánchez por ser un apoyo cuando más lo necesité y por motivarme a seguir con mis estudios; a toda mi familia por su apoyo y cariño, en especial a mis tíos: Iván Briceño, Ramiro Briceño, Rosa Briceño y Rodrigo Briceño, por todo ese cariño, consejos y palabras de aliento que me ayudaron a seguir adelante y no decaer, han sido como unos segundos padres para mí, los quiero un montón.

Finalmente, a todos mis amigos quienes me han acompañado a lo largo de esta etapa, me alegro de haber conocido personas tan maravillosas que de una o de otra forma me han apoyado siempre, me han brindado su amistad sincera y apoyo moral.

Anthony Fabricio Sánchez Briceño

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios por su forma tan maravillosa e incondicional de amar, por haberme guiado por el camino de la felicidad y brindarme la fuerza y sabiduría para continuar y culminar con esta etapa de estudio.

En segundo lugar, a mis amados padres Luis Humberto Aimacaña y Aurora Jami Jami por su esfuerzo diario realizado para que yo pueda llegar hasta aquí y por enseñarme los valores del camino del bien; por su apoyo incondicional como padres que, sin duda alguna, este logro es por ellos y para ellos.

A mi hermana Carito por su apoyo y aliento cuando la carrera requería un poco más de esfuerzo, y por todo su cariño que me han impulsado a seguir adelante pese a cualquier adversidad.

Al Ing. Lenin Aucatoma que fue el tutor de este artículo, por el compromiso, la confianza y la guía necesaria de los primeros pasos para este trabajo, y por brindarnos el conocimiento como docente lo cual fue fundamental y necesario para culminar con éxito este artículo.

A mi amigo y compañero de tesis Anthony Sánchez Briceño por el ánimo y apoyo incondicional que me han llevado hasta donde estoy ahora, por todo el tiempo compartido y esfuerzo dedicado en toda la vida universitaria, a ser constante en la lucha para alcanzar este logro.

A mi amigo Carlos Cuaical por brindarme su apoyo incondicional y que desde su experiencia adquirida me compartió sus conocimientos cuando la carrera se tornaba difícil.

A mis amigos, por el apoyo en el momento necesario; un agradecimiento especial para todos ellos quienes ayudaron con sus aportes e ideas.

A todos quienes de alguna u otra forma aportaron para el desarrollo de este trabajo de titulación.

Mi agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, por permitirme culminar una de las metas más importantes en mi vida y en una hermosa carrera.

Gracias sinceras a todos.

Alex Dario Aimacaña Jami

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a Dios por todas las bendiciones, salud y vida que me ha dado en especial por darme unos padres maravillosos y por darme la oportunidad de seguir adelante y cumplir mis sueños. A mis padres, a mis abuelitos paternos y maternos, les estaré eternamente agradecido ya que, gracias a todo su amor, su esfuerzo, enseñanzas y paciencia, he logrado culminar otra etapa en mi vida académica y profesional, son mi vida, los amo y siempre agradeceré todo lo que me han brindado, son un ejemplo de constancia, esfuerzo y valentía para mí. A mi hermanito Michael quien ha sido la voz de la razón en mis momentos de ceguera, por todo su apoyo y motivación para culminar mi carrera y no rendirme.

A mis tíos Rosita, Iván, Rodrigo y Ramiro no tengo palabras para agradecerles por toda su ayuda, ustedes al igual que mis padres, han sido mi motor para seguir adelante y no rendirme a pesar de las adversidades y obstáculos que se me presentaron.

A mi gran amigo y compañero de tesis Alex Aimacaña por su amistad, consejos y apoyo incondicional en los momentos más difíciles, por todo el tiempo compartido, por todo su empeño, esfuerzo y profesionalismo para culminar nuestro trabajo de titulación.

Al Ing. Lenin Aucatoma, a quien considero una gran persona, un excelente maestro e ingeniero y un gran amigo, quien con sus conocimientos, experiencia y consejos nos han motivado a seguir adelante y siempre dar lo mejor de nosotros.

A mis mejores amigos: Estefania Acosta, Alex Aimacaña, Leonel Cevallos, Carlos Cuaical, Israel De la Torre, Christian Jami, Evelyn Chalapud, Henry Suquillo, Evelyn Pérez, y Santiago Rubio, con quienes he compartido grandes momentos a lo largo de la carrera, gracias por ser unos amigos incondicionales, son increíbles y me siento afortunado de haberlos conocido.

A mis hermanos del alma, Walter Padilla, Bryan Tobar y Bryan Pazmiño, les agradezco por todo su apoyo, consejos, por brindarme su amistad y por estar ahí siempre.

Finalmente, agradezco a la universidad y a todos los docentes que con toda su sabiduría me han ayudado a enriquecerme y mejorar como persona y profesional.

Anthony Fabricio Sánchez Briceño

Análisis comparativo del comportamiento de los parámetros de dispersión para la Antena tipo Curl en la banda de frecuencias de 60, 67 y 74 GHz

Alex Dario Aimacaña Jami
Departamento de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
aaimacana@est.ups.edu.ec

Anthony Fabricio Sánchez Briceño
Departamento de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
asanchezb2@est.ups.edu.ec

Lenin Wladimir Aucatoma Guamán
Departamento de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
laucatoma@ups.edu.ec

Resumen— En este trabajo se desarrolla el diseño de tres antenas de lámina curva que trabajan a 60, 67 y 74 GHz, partiendo de la teoría de diseño de antenas, utilizando el software de diseño de alta frecuencia “ANSYS HFSS” y la herramienta “LineCalc” del software “Advanced Desing System” (ADS), para realizar los respectivos ajustes en las dimensiones de los elementos de la antena con el objetivo de analizar el comportamiento de los parámetros de dispersión. Se realizó 3 diseños, utilizando materiales como: cobre, aluminio y oro para los conductores y fibra de vidrio, baquelita y porcelana para el sustrato. Donde se determinó que los mejores materiales son: cobre y fibra de vidrio. En base a los ajustes de cada diseño, se observó que la frecuencia tiene un impacto directo en las dimensiones de los elementos de la antena y en los parámetros de dispersión. Además, se identificó que el elemento más significativo de la antena es la línea de transmisión, ya que, presenta un desfase promedio de 167% entre sus dimensiones matemáticas y ajustadas para alcanzar los objetivos planteados, con los resultados obtenidos, se concluyó que la antena trabaja eficientemente en la banda de onda milimétrica.

Palabras Clave— *Coefficiente de reflexión, lámina curva, línea de transmisión, onda milimétrica.*

Abstract— This work develops the design of three curved sheet antennas working at 60, 67 and 74 GHz, starting from the antenna design theory and using the high frequency design software "ANSYS HFSS" and "Advanced Design System", to make the respective adjustments in the dimensions of the antenna elements to analyze the behavior of the dispersion parameters. Three designs were made, using materials such as: copper, aluminum and gold for the conductors and fiberglass, bakelite and porcelain for the substrate. Where it was determined that the best materials are copper and fiberglass. Based on the adjustments of each design, it was observed that the frequency has a direct impact on the dimensions of the antenna elements and on the dispersion parameters. In addition, it was identified that the most significant element of the antenna is the transmission line, since it presents an average phase difference of 167% between its mathematical and adjusted dimensions to achieve the proposed objectives, with the results obtained, it was concluded that the antenna works efficiently in the millimeter wave band.

I. INTRODUCCIÓN

En la última década, las comunicaciones inalámbricas 5G, han ido evolucionando en gran medida, de manera que ofrecen varios beneficios como: mejores tasas de velocidad de Gbps, un tráfico de datos mucho más liviano y, por último, presenta una latencia de 1ms, lo que beneficia la calidad de servicio para los usuarios finales [1]. Sin embargo, el desarrollo de esta tecnología genera problemas en cuanto a pérdidas de transmisión, debido al déficit de bandas de frecuencias, ya que, el espectro radioeléctrico es un recurso limitado, por esta razón la UIT (Unión Internacional de Comunicaciones) establece los rangos de trabajo del espectro de onda milimétrica para el desarrollo de proyectos e investigaciones, evitando así interferencias perjudiciales con otros servicios, facilitando el estudio de esta tecnología 5G [2].

La antena de lámina curva es una versión simplificada de una antena en espiral [3], ya que, esta antena trabaja a lazo abierto debido a su forma de rizo o solenoide; su funcionamiento depende de las dimensiones y materiales para cada elemento de la antena. Esta antena está compuesta por un elemento en forma de rizo, el cual está diseñado de tal forma que posee una polarización circular CP, como esta hélice es pequeña, se asume que la corriente es constante en magnitud y fase sobre su longitud, donde el patrón de radiación de campo lejano es independiente del número de vueltas, por lo tanto, una vuelta equivale a un lazo pequeño, la antena tiene un tamaño reducido, por ende, es el más adecuado para las comunicaciones de alta frecuencia [3][4]. Según la investigación presentada por H. Nakano [5], a medida que aumenta la frecuencia, el tamaño de los elementos del parche disminuye, por lo que esta reducción de tamaño da lugar a dificultades en la construcción de la antena [5]. Este artículo se enfocará en el análisis comparativo de los parámetros de dispersión de las antenas tipo Curl trabajando a tres diferentes frecuencias de resonancia: 60, 67 y 74 GHz, con el propósito de observar e identificar los cambios de cada modelo de antena propuesto en cada frecuencia de resonancia, para determinar la influencia que tiene esta variación de frecuencia en sus parámetros de dispersión.

II. DISEÑO DE LA ANTENA

El diseño planteado para cada antena consta de un parche conformado por un sustrato, la tierra, la línea de transmisión, el punto de excitación y la lámina curva. Para la lámina curva y tierra se utilizó tres tipos de materiales: cobre, aluminio y oro, para el sustrato se utilizó fibra de vidrio, baquelita y porcelana. Para el punto de excitación se utilizó un puerto

agrupado o “Lumped port”. Después de haber realizado varias simulaciones con cada material, se definió que el cobre y fibra de vidrio son los materiales que mejores resultados presentan. Para las dimensiones del sustrato y tierra, se parte de la teoría de la antena tipo parche o “Microstrip”, los cálculos se realizaron con las ecuaciones (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8): [6]

Ancho del parche (W_p)

$$W_p = \frac{c}{2 * f * \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

Donde:

λ : Longitud de onda

ϵ_r : Permitividad Relativa

f : frecuencia

c : velocidad de la luz ($3 * 10^8 \frac{m}{s}$)

Altura del sustrato (h)

$$h = \frac{0.3 * \lambda}{2\pi * (\epsilon_r)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

Donde:

λ : Longitud de onda

ϵ_r : Permitividad Relativa

Constante dieléctrica efectiva (ϵ_f)

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left(1 + \frac{10 * h}{W_p}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Donde:

W_p : Ancho del parche

h : altura del sustrato

ϵ_r : Permitividad Relativa

Longitud efectiva (L_{ef})

$$L_{ef} = \frac{c}{2 * f * (\epsilon_f)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

Donde:

ϵ_f : dieléctrico efectivo

f : frecuencia

c : velocidad de la luz ($3 * 10^8 \frac{m}{s}$)

Incremento de la extensión del parche (Δl)

$$\Delta l = 2 * \frac{h}{(\epsilon_f)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

Donde:

h : altura del sustrato y tierra

ϵ_f : Constante dieléctrica efectiva

Longitud del parche

$$l_p = L_{ef} - 2 * \Delta l \quad (6)$$

Donde:

L_{ef} : longitud efectiva

Δl : Incremento de la extensión del parche

Largo del sustrato y tierra

$$LG = 2 * l_p \quad (7)$$

Donde:

l_p : longitud del parche

Ancho del sustrato y tierra

$$WG = 2 * W_p \quad (8)$$

Donde:

W_p : Ancho del parche

Para la línea de transmisión se utilizó la herramienta llamada “LineCalc” del software ADS (*Advanced Desing System*), el cual proporciona el largo y el ancho de esta, ingresando la frecuencia, permitividad relativa del material del sustrato, altura del sustrato e impedancia, como se observa en la figura 1:

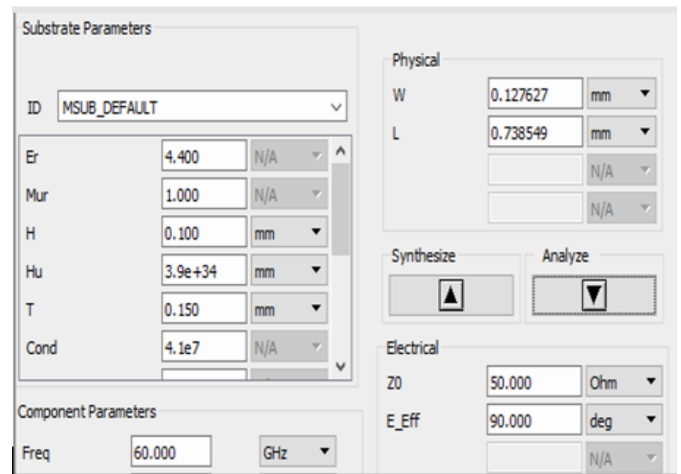


Fig. 1. Herramienta “LineCalc” del software ADS para el cálculo de la línea de transmisión

En el diseño de la línea de transmisión la impedancia juega un papel importante, ese dato se ingresa en la herramienta y es necesario tener el valor de la impedancia de entrada (Z_o) e impedancia total de la antena (Z_T) de acuerdo con la frecuencia de trabajo, la impedancia de entrada Z_o es de 50Ω , este valor de impedancia es el valor con el que trabajará la antena y para que pueda trabajar en alta frecuencia se debe calcular la Z_T , utilizando las fórmulas (9) (10) [7]:

Impedancia de la antena (Z_A)

$$Z_A = 90 * \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r - 1} * \left(\frac{L_p}{W_p}\right)^2 \quad (9)$$

Donde:

Z_A : Impedancia de la antena

L_p : Longitud del parche.

W_p : Ancho del parche.

ϵ_r : Permitividad Relativa

Impedancia total (Z_T)

$$Z_T = \sqrt{Z_A * Z_o} \quad (10)$$

Donde:

Z_T : Impedancia total de la antena

Z_A : Impedancia de la antena

Z_o : Impedancia de entrada de la antena

En la figura 2 se visualiza el diseño de la línea de transmisión donde se aprecia la forma, debido al acople de la impedancia de entrada con la impedancia total de la antenna, para su correcto funcionamiento para alta frecuencia.

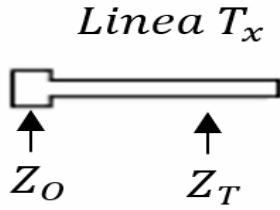


Fig. 2. Modelo 2D de la línea de transmisión

Para la lámina curva se partió de la teoría de las antenas convencionales con polarización circular “CP”, como la antena helicoidal, puesto que tienen una forma similar a una espiral o de solenoide, nuestra antena diseñada trabaja con polarización circular derecha, por lo tanto, la lámina curva nace del cálculo del diámetro con la ecuación (11) [7]:

$$D = \lambda/\pi \quad (11)$$

Donde:

D : Diámetro de la antena
 λ : Longitud de onda

En cuanto a la altura ($H_{cilindro}$) del brazo que conecta la lámina curva con la línea de transmisión, tiene un valor menor en comparación con la longitud de onda de la frecuencia de diseño [3], por lo tanto, este valor se lo puede interpretar así:

$$h < \lambda$$

Donde:

h : altura del cilindro

Tomando como referencia el valor de la longitud de onda, se realizó tres variaciones en la altura como se visualiza en la tabla 1, debido a que con esta variación se determina cual es el valor de “ h ” que ajusta los resultados en cada frecuencia de resonancia.

TABLA 1. VALORES DE LA ALTURA “ h ” Y LONGITUD DE ONDA PARA 60, 67 Y 74 GHz.

Frecuencias [GHz]	60	67	74
Longitud de onda [mm]	5	4.47	4.05
Valores de referencia para la altura “ h ”			
Cercanos a λ [mm]	4.9	4.3	3.9
Medianamente lejano a λ [mm]	2.5	2.23	2.025
Lejano a λ [mm]	0.5	0.4	0.2

A partir de los datos obtenidos con fórmulas matemáticas, se realizó los diseños para las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz, modificando las dimensiones y materiales de cada una, haciendo un ajuste hasta obtener un valor de referencia del VSWR, el cual deberá estar en un rango entre 1 a 1.5 y para los parámetros de coeficiente de reflexión $S(1,1)$ en valores inferiores a -20 dB. Debido a que este valor representa las

pérdidas de retorno, es decir, la relación entre la potencia reflejada y la potencia aplicada en el punto de entrada [8]. Para el patrón de radiación, se tiene como objetivo que no existan lóbulos posteriores o laterales y que tenga alta ganancia. El diseño de cada una de las antenas fue realizado utilizando el software “ANSYS HFSS”, los elementos que conforman de manera general la antena en cada diseño se muestran en las Figura 3:

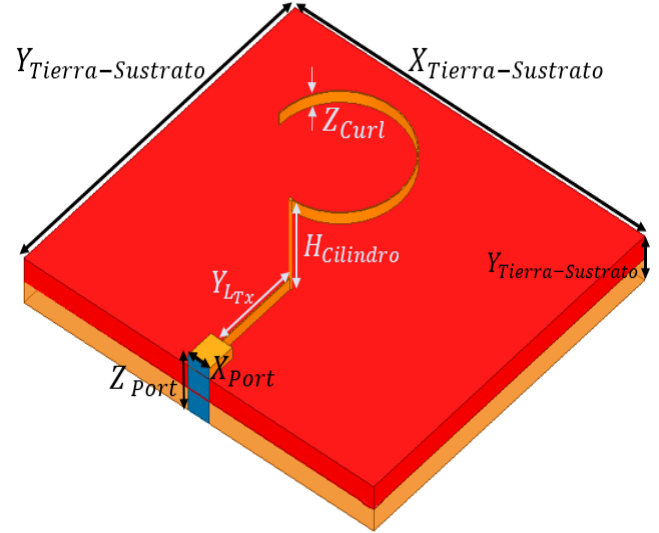


Fig. 3. Diseño general de la antena de lámina curva para 60, 67 y 74 GHz.

Para realizar el diseño de la antena se tomó en cuenta los elementos que la conforman: tierra, sustrato, punto de excitación, línea de transmisión y lámina curva. Estos elementos fueron simulados en el software “Ansys HFSS” con las dimensiones previamente calculadas, para luego ajustarlas conforme a los resultados obtenidos de los parámetros de dispersión. El cálculo de las dimensiones de la línea de transmisión se realizó con la herramienta “LineCalc” del software ADS, donde se proporcionó datos como: permitividad relativa del sustrato, la frecuencia de trabajo e impedancia de la antena. Ambos programas trabajan por separado debido a que el software ADS facilita únicamente las dimensiones de referencia de la línea de transmisión y el software “Ansys HFSS” permite simular y obtener los resultados para su respectivo análisis.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Dentro del proceso de simulación se tomó en cuenta 3 tipos de diseños. El primer diseño se realizó con los datos obtenidos con fórmulas matemáticas en cada frecuencia, el segundo se ajustó los valores matemáticos de las dimensiones hasta alcanzar los valores de objetivo de investigación en las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz y por último se realizó una variación en los materiales del dieléctrico y los conductores para observar cómo afecta la frecuencia de resonancia en cada elemento de la antena con su respectivo material. Para el primer y segundo diseño el material utilizado para la línea de transmisión, lámina curva y tierra fue cobre y para el sustrato se utilizó fibra de vidrio.

A. Impacto de la frecuencia en las curvas de los parámetros S y VSWR para la frecuencia de 60, 67 y 74 GHz.

En las figuras 4 y 5, se muestra el comportamiento de los parámetros $S(1,1)$ y VSWR respectivamente en función al

aumento en frecuencia, donde los puntos mínimos de cada curva indican los resultados en la frecuencia de resonancia para cada parámetro. En la figura 4, se observa que el valor del parámetro S no presenta un cambio significativo y no tiene una linealidad a medida que aumenta la frecuencia, porque se mantiene en valores de -24 dB.

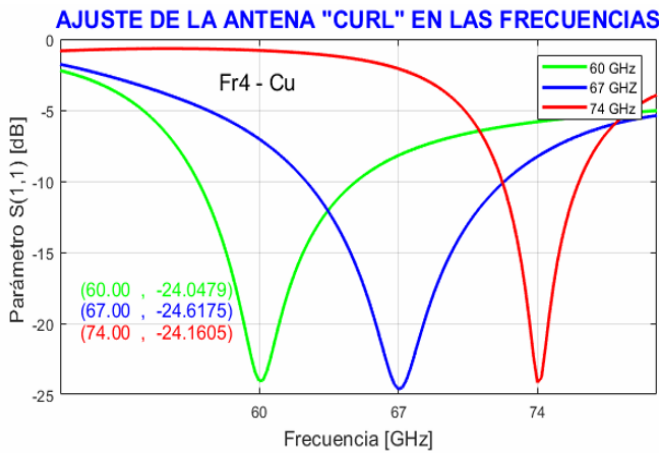


Fig. 4. Curva del parámetro $S_{1,1}$ con sus puntos mínimos para la frecuencia de 60, 67 y 74 GHz

En la figura 5, se observa que los valores de VSWR se encuentran en un rango de 1 a 1.5, por lo tanto, la antena tiene una buena eficiencia de transmisión energética desde el punto de excitación hacia la lámina curva para las tres frecuencias.

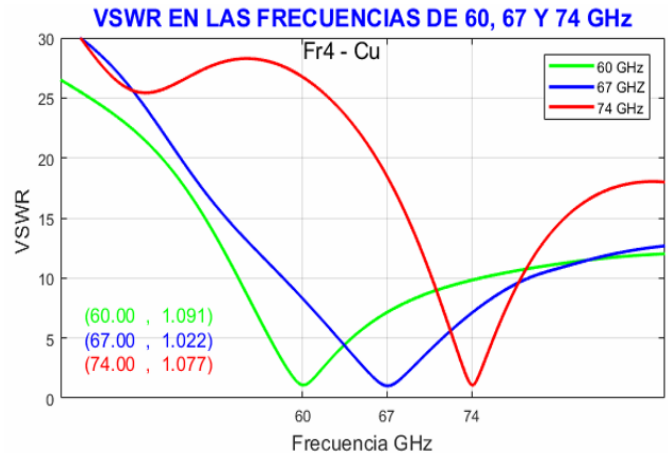


Fig. 5. Curva del parámetro VSWR con sus puntos mínimos para la frecuencia de 60, 67 y 74 GHz

En la tabla 2 se observa las dimensiones matemáticas y ajustadas de cada elemento que conforman la antena en cada frecuencia de resonancia.

TABLA 2. DIMENSIONES MATEMÁTICAS Y AJUSTADAS PARA LAS FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHz

Elemento	Dimensiones (mm)	60 GHz		67 GHz		74 GHz		Material
		Matemático	Ajustado	Matemático	Ajustado	Matemático	Ajustado	
Línea Tx	X zin	0.14237	0.2362	0.123599	0.2739	0.108555	0.0844	Cobre
	Y zin	0.2	0.3	0.124	0.11	0.11	0.11	
	Z zin	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
	X Ltx	0.000873	0.00853	0.004449	0.009622129	0.00382	0.003144304	
	Y Ltx	0.800704	0.905	0.728676	0.715574417	0.660333	0.895223877	
	Z Ltx	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Lámina curva	H cilindro	0.5	0.810056579	0.4	0.841	0.2	0.194602273	
	R cilindro	0.1	0.01135	0.08	0.017999	0.05	0.0989	
	Z curl	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Tierra	X Tierra	3.7037	3.852514959	3.3167	3.6	3.003	3.5	
	Y Tierra	2.0405	3.556789	1.8273	2.8	1.6544	2.6	
	Z Tierra	0.1085	0.2	0.0972	0.2	0.088	0.2	
Sustrato	X sustrato	3.7037	3.852514959	3.3167	3.6	3.003	3.5	Fr-4 Epoxy
	Y sustrato	2.0405	3.556789	1.8273	2.8	1.6544	2.6	
	Z sustrato	0.1085	0.2	0.0972	0.2	0.088	0.2	
Punto de excitación	X port	0.14237	0.2362	0.2739	0.2739	0.108555	0.0844	
	Z port	0.317	0.5	0.2944	0.5	0.276	0.5	

B. Resultados obtenidos al variar la altura "h" para la frecuencia de 60, 67 y 74 GHz.

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos al variar el valor de "h", y se observa cómo cambian los parámetros de acuerdo con la lejanía del valor "h" al valor de lambda. De acuerdo con los resultados obtenidos, se realiza un ajuste

tomando uno de esos valores de "h" como referencia, siendo el valor de "h lejano a lambda" de la tabla 1 el parámetro utilizado para realizar el respectivo ajuste. Elegimos el valor de "h lejano a lambda" debido a que los resultados en frecuencia son más cercanos a las frecuencias de resonancia de estudio, con valores de frecuencia de 51.12, 65.7 y 69.01 GHz.

TABLA 3. RESULTADOS CON DIFERENTES VALORES DE "h" PARA 60, 67 Y 74 GHz

RESULTADOS DE LOS VALORES DE H			
FRECUENCIA	60 GHz	67 GHz	74 GHz
h cercano a λ	Resultados en Frecuencia		
	65.42	53.19	55.9
	Resultados de S _{1,1}		
	-14.29	-16.13	-29.35
	Resultados de VSWR		
	3.39	2.73	0.5917
h medianamente lejano λ	Resultados en Frecuencia		
	66.62	45.83	47.83
	Resultados de S _{1,1}		
	-16.43	-20.03	-12.04
	Resultados de VSWR		
	2.63	1.73	4.43
h lejano a λ	Resultados en Frecuencia		
	51.12	65.700	69.010
	Resultados de S _{1,1}		
	-38.765	-11.4631	-10.236
	Resultados de VSWR		
	0.2003	4.7573	5.5253

C. Análisis del funcionamiento de cada diseño utilizando diferentes materiales.

En la tabla 4 se observa los cambios en los materiales con sus respectivas permitividades relativas en cada elemento de la antena, que se utilizaron para establecer que materiales son los que mejor se adaptan a los resultados objetivo.

TABLA 4. MATERIALES UTILIZADOS PARA CADA ELEMENTO DE LA ANTENA PARA LAS FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHz

	Elemento	Material	ϵ_r
CAMBIO 1	Línea de transmisión	Aluminio	1
	Lámina curva		
	Tierra		
	Sustrato	Baquelita	4.8
CAMBIO 2	Línea de transmisión	Oro	1
	Lámina curva		
	Tierra		
	Sustrato	Porcelana	5.7

En la tabla 5 se muestra los resultados obtenidos en base a los cambios de materiales para cada frecuencia de resonancia, sin embargo, a medida que aumenta la permitividad relativa, la frecuencia tiende a decrecer. Para los parámetros S, en el cambio 1 se observa que para la frecuencia de 60 GHz tiene un valor de -36.4676 dB y luego tiende a aumentar la relación de potencia entre las frecuencias de 67 y 74 GHz, con un valor de parámetro S de -10.5345 dB y -10.0144 dB respectivamente.

Por último, a medida que la frecuencia y la permitividad relativa aumentan, el VSWR tiene una linealidad creciente y no se encuentra en el rango de 1 a 1.5, por lo que fue necesario escoger un material adecuado con una menor permitividad relativa, que permita llegar a los valores objetivo.

TABLA 5. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO DIFERENTES MATERIALES EN LAS FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHz.

RESULTADOS				
VARIABLES		60 GHz	67 GHz	74 GHz
CAMBIO 1	Frecuencia	50.87	65.18	68.09
	Parámetro S (1,1) [dB]	-36.4672	-10.5345	-10.0144
	VSWR	0.2609	5.3265	5.6783
CAMBIO 2	Frecuencia	50.25	64.28	66.64
	Parámetro S (1,1) [dB]	-20.542	-8.6812	-10.9765
	VSWR	1.6369	6.7089	5.0487

D. Comparación de los resultados obtenidos con dimensiones matemáticas y ajustadas de las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz.

En las Tabla 6 se observa los resultados matemáticos y ajustados en cada frecuencia de resonancia con los materiales de cobre y fibra de vidrio.

TABLA 6. RESULTADOS MATEMÁTICOS VS AJUSTADOS PARA LAS FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHz

	60 GHz	67 GHz	74 GHz
RESULTADOS MATEMÁTICOS			
FRECUENCIA	51.12	65.700	69.010
PARÁMETROS S (1,1) [dB]	-38.7650	-11.4631	-10.236
VSWR	0.2003	4.7573	5.5253
RESULTADOS AJUSTADOS			
FRECUENCIA	60.000	67.000	74.000
PARÁMETROS S (1,1) [dB]	-24.0479	-24.6175	-24.1605
VSWR	1.0915	1.022	1.0774

Para la frecuencia de 60 GHz el coeficiente de reflexión matemático y ajustado se encuentran en el rango objetivo de menores a -20 dB, sin embargo, de acuerdo a los ajustes realizados notamos que valores inferiores a -25 dB del coeficiente de reflexión, provocan que el VSWR tenga valores cercanos a cero y cuando el coeficiente de reflexión tiene valores superiores a -20 dB, el VSWR tiende a incrementarse; para las frecuencias de 67 y 74 GHz los valores de coeficiente de reflexión matemáticos se encuentran lejos del rango objetivo, por lo tanto, fue necesario realizar un ajuste; por último, para el VSWR los valores ajustados se encuentran en el rango de 1 a 1.5 llegando casi al acople perfecto de 1.

E. Análisis de los patrones de radiación de las dimensiones matemáticas y ajustadas para las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz.

En las figuras 6, 7, 8 se muestran las gráficas en 2D de los patrones de radiación matemático y ajustado en el plano H (corte de $\phi=0^\circ$), donde se identifica el lóbulo con mayor potencia de radiación conocido como lóbulo principal y las zonas con menos intensidad de potencia denominados lóbulos posteriores, de igual manera nos permite conocer la ganancia de la antena y realizar una comparación entre ambos patrones en cada frecuencia, para identificar como afecta los ajustes en la forma del patrón de radiación.

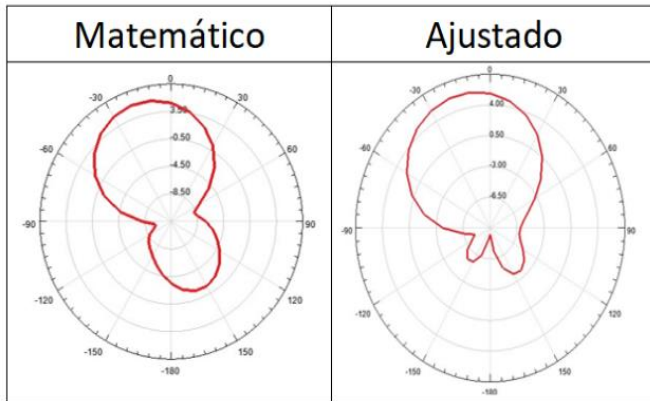


Fig. 6. Gráfica del patrón de radiación matemático y ajustado en el plano H a 60 GHz.

En la figura 6 se muestran los lóbulos del patrón de radiación matemático y ajustado en el plano H, para la antena de 60 GHz donde se determina que conforme se realiza el ajuste en frecuencia, el lóbulo principal del patrón ajustado mantiene la misma dirección que el patrón matemático, ya que, ambos patrones se encuentran direccionados a un ángulo de 340° , además, el patrón matemático presenta un lóbulo posterior con una radiación de -1.6575 dB en un ángulo de 150° , mientras que el patrón ajustado presenta dos lóbulos posteriores, de los cuales el lóbulo posterior izquierdo presenta radiación de -5.5641 dB en un ángulo de 210° y el lóbulo posterior derecho posee una radiación de -3.7208 dB, por último, el patrón de la antena ajustada tiene un lóbulo principal con una ganancia de 5.6676 dB en un ángulo 340° , mientras que el patrón de radiación matemático presenta una ganancia de 5.44 dB en un ángulo de 340° , siendo el patrón de radiación ajustado el que mejor ganancia posee.

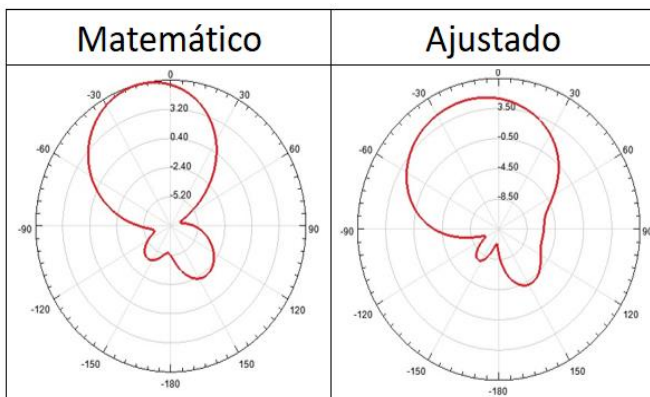


Fig. 7. Gráfica del patrón de radiación matemático y ajustado en el plano H a 67 GHz.

En la figura 7 se muestra los lóbulos de cada patrón de radiación matemático y ajustado respectivamente. Para la

antena de 67 GHz en el plano H, esta gráfica se identifica que para el patrón matemático, el lóbulo principal tiene una ganancia de 5.97 dB en un ángulo de 346° , mientras que el patrón de radiación ajustado tiene una ganancia total de 5.1966 dB direccionado en un ángulo de 344° , esto indica que en el patrón ajustado hubo una variación en la dirección del lóbulo principal, con un desfase de 2° , y su ganancia fue menor en comparación a la ganancia del patrón matemático, además, se observa en ambos patrones que a medida que la frecuencia de resonancia aumenta el lóbulo posterior izquierdo va reduciendo su magnitud, y el lóbulo posterior derecho va aumentando en magnitud y varía su dirección.

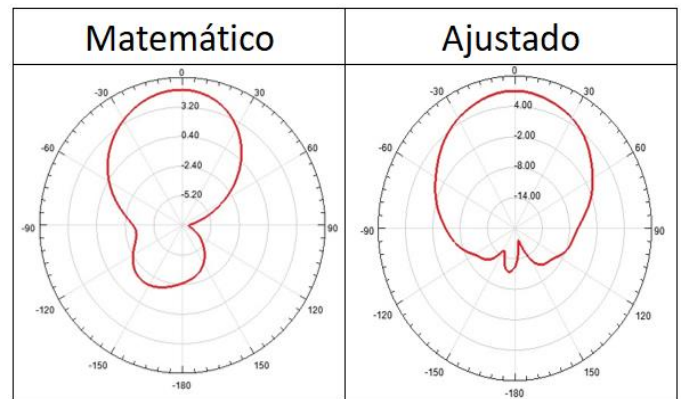


Fig. 8. Gráfica del patrón de radiación matemático y ajustado en el plano H a 74 GHz.

En la figura 8, se observa los lóbulos del patrón de radiación matemático y ajustado para la antena de 74 GHz, en estas gráficas se observa que ambos patrones matemático y ajustado se direccionan a 0° y tienen un solo lóbulo posterior; el lóbulo posterior matemático tiene mayor magnitud en comparación al lóbulo posterior del patrón ajustado; para finalizar, la ganancia del patrón matemático es de 4.8342 dB mientras que del patrón ajustado tenemos una ganancia de 7.0932 dB.

F. Impacto de la frecuencia en los patrones de radiación ajustados para la frecuencia de 60, 67 y 74 GHz.

En las figuras 6, 7 y 8 se observa los patrones de radiación ajustados, donde existe una variación en la forma del patrón de radiación a medida que la frecuencia aumenta de 60 a 74 GHz y se puede notar que disminuye la cantidad de lóbulos posteriores de 2 a 1, además a medida que la frecuencia aumenta, la dirección de la antena pasa de 340° a 0° , es decir existe un cambio de la dirección del patrón de radiación hacia la derecha.

G. Análisis del porcentaje del ajuste de las dimensiones matemáticas y ajustadas en las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz.

En la tabla 7 se observa los porcentajes de ajuste entre las dimensiones matemáticas y ajustadas para cada frecuencia, siendo la línea de transmisión la que presenta un mayor porcentaje de ajuste, ya que, aumentando la frecuencia se afecta directamente el ajuste de las dimensiones de cada elemento, por consiguiente, se aumentó o se disminuyó estas dimensiones para alcanzar los valores objetivo en cada frecuencia de resonancia.

TABLA 7. PORCENTAJE DE AJUSTE ENTRE DIMENSIONES MATEMÁTICAS Y AJUSTADAS DE LA ANTENA DE LÁMINA CURVA A 60, 67 Y 74 GHz

FRECUENCIAS (GHz)		60	67	74
Elemento	Dimensiones (mm)	Porcentaje de ajuste (%)		
Línea Tx	Xzin	65.9	121.6	22.3
	Yzin	50	11.1	0
	Zzin	0	0	0
	X Ltx	877.1	116.3	17.7
	Y Ltx	13.02	1.8	35.6
	Z Ltx	0	0	0
Lámina curva	H cilindro	62.01	110.3	2.7
	R cilindro	88.6	77.501	97.8
	Z curl	0	0	0
Tierra	X Tierra	4.02	8.54	16.5
	Y Tierra	74.3	53.2	57.2
	Z Tierra	84.3	105.8	127.3
Sustrato	X sustrato	4.02	8.54	16.5
	Y sustrato	74.3	53.2	57.2
	Z sustrato	84.3	105.8	127.3

En la tabla 8 y figura 9 se muestran los porcentajes de ajuste promedio de cada elemento de la antena de acuerdo con los porcentajes obtenidos en la tabla 7, donde la línea de transmisión tuvo un mayor ajuste en comparación a los demás elementos de la antena con un 167.67% de ajuste promedio para la frecuencia de resonancia de 60 GHz. Los siguientes elementos con un ajuste promedio de más del 50% están la tierra y el sustrato con porcentajes de ajuste promedio de 66.99% para la frecuencia de 74 GHz, para finalizar la lámina curva presenta un 62.58% de ajuste promedio en la frecuencia de 67 GHz.

TABLA 8. PORCENTAJE DE AJUSTE PROMEDIO ENTRE DIMENSIONES MATEMÁTICAS Y AJUSTADAS DE LA ANTENA DE LÁMINA CURVA A 60, 67 Y 74 GHz

Frecuencias (GHz)	60	67	74
Elemento	Porcentaje de ajuste promedio (%)		
Línea Tx	167,67	41,82	12,58
Lámina curva	50,22	62,58	33,49
Tierra	54,21	55,84	66,99
Sustrato	54,21	55,84	66,99

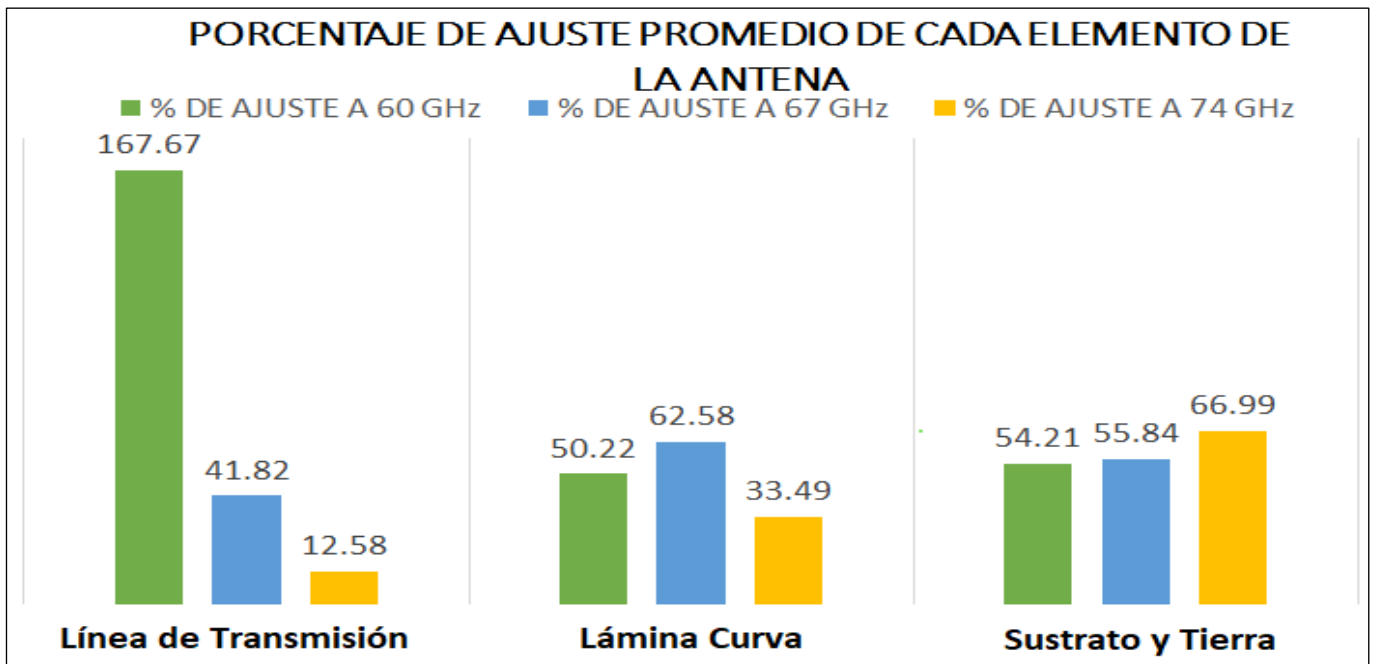


Fig. 9. Porcentaje promedio de ajuste de cada elemento de la antena para las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz

IV. CONCLUSIONES

El diseño de la línea de transmisión tuvo un rol importante, gracias a las dimensiones obtenidas por la herramienta "LineCalc", estas dimensiones fueron de referencia para el posterior ajuste de las mismas, obteniendo un acople casi perfecto con valores de VSWR de 1.0915 para 60 GHz, 1.022 para 67 GHz y 1.0774 para 74 GHz, trabajando con una impedancia de 50 ohmios, cabe destacar que hubo un ajuste promedio entre las dimensiones matemáticas y ajustadas de 167% en la línea de transmisión para la antena de 60 GHz.

Se determinó que los mejores materiales para el diseño de la antena son: cobre y fibra de vidrio, ya que, la permitividad relativa está directamente relacionada con el desplazamiento en frecuencia, debido a que, si aumenta el valor de la permitividad relativa, el valor de los resultados en frecuencia

disminuye en 1.6%, también se consideró usar oro y aluminio para los conductores porque tienen el mismo valor de permitividad, pero se eligió cobre por su costo y disponibilidad en el mercado.

Para la lámina curva se evidenció que la frecuencia tiene un impacto significativo en sus dimensiones, ya que, a medida que la frecuencia aumenta, el porcentaje de ajuste de la lámina curva aumenta de 50.22% a 62.58% esto representa un aumento de 12.36% entre los valores de frecuencia de 60 y 67 GHz mientras que entre 67 y 74 GHz hubo una disminución del porcentaje de ajuste de 29.09%, además la dimensión en Z de la lámina curva a medida que aumenta la frecuencia se mantiene constante en su valor, por lo que no fue necesario un ajuste de esa medida, determinando así que no existe una proporcionalidad en el ajuste de cada elemento de la antena.

Los patrones de radiación a medida que aumenta la frecuencia sus lóbulos posteriores disminuyen en número, y la ganancia de los patrones de radiación ajustados son de 5.66 dB para la antena de 60 GHz, 5.1966 dB para 67 GHz y 7.0932 dB para 74 GHz, en comparación con las ganancias de los patrones matemáticos que son de 5.44 dB para 60 GHz, 5.97 dB para 67 GHz y 4.8342 dB para 74 GHz, donde se destaca la antena de 74 GHz, ya que, tiene un aumento en su ganancia de 46.73%.

V. REFERENCIAS

- [1] A. Ulloa, "Estudio de la tecnología 5G y el impacto que tendrá en el país," pp. 10-16, 2018.
- [2] UIT. Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Conferencia mundial de radiocomunicaciones 2019", Itu.int, 2019. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.14-2019-PDF-S.pdf. [Accessed: 11- Mar- 2021].
- [3] H. Nakano, "Low-profile natural and metamaterial antennas," Tokyo: Andreas C. Cangellaris, Series Editor, 2016, pp. 223-229.
- [4] A. Lorenzo, "Construcción de un arreglo de antenas helicoidales en la banda S para una estación terrena," pp. 32-35.
- [5] H. Nakano, "A Curl Antenna," pp. 1570, Noviembre 11, 1993.
- [6] U. Farooq, "Design and Analysis of Dual band Microstrip Antenna for Millimeter Wave Communication Applications," pp. 608, Julio 1, 2020.
- [7] L. Stutzman, "Antenna Theory and Design," pp. 225-229, 2013.
- [8] R. Hernandez, "Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4 ghz y 5.8 ghz", pp 14-32, Mayo, 2008
- [9] H. Nakano, "Axial ratio of a curl antenna," pp. 488-490, Diciembre, 1997.
- [10] H. Nakano, "Electromagnetically coupled curl antenna," pp. 1003-1004, Junio, 1997.
- [11] H. Nakano, "External-excitation curl antenna," pp. 3969-3976, Noviembre, 2011.
- [12] A. Ortigosa, "Desarrollo de una antena radar a 77ghz para automoción,", Noviembre 15, 2013.
- [13] K. Hirose, "An Outer-Fed Spiral Antenna Array Radiating a Circularly Polarized Conical Beam," Febrero 10, 2000.
- [14] K. Gavilanez, "Diseño e implementación de una antena plana con control de fase utilizando la matriz de butler para aplicaciones radar de corto alcance," 2017.
- [15] Y. Rodriguez, "Diseño de un arreglo de antenas para la Quinta Generación de las comunicaciones en la banda de 73 GHz," Santa Clara, 2016.
- [16] J. Bravo, "La comunicación Inalambrica a través de la banda de los 60 GHz," Agosto, 2016.
- [17] M. Julen, "Evaluación de antena parche a 77 GHz en presencia de un radomo," Enero, 2019.
- [18] B. Sánchez, "Arreglo de Antenas de Microtira para Aplicaciones Satelitales," Agosto, 2018.
- [19] L. Zhang, "Millimeter-Wave Wideband Circularly Polarized Antenna Array Using SIW-Fed S-Dipole Elements," IEEE, 2019.