

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

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

**TEMA:  
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE UNA  
ANTENA DIPOLO PARA LAS FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHZ**

**AUTORES:  
KAROLAIN MISHHELL ORTIZ GUERRA  
BRIAN DAVID VILLAMAR ARIAS**

**TUTOR:  
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

**Quito, junio del 2021**

## Cesión de derechos de autor

Nosotros, Karolain Mishell Ortiz Guerra y Brian David Villamar Arias, con documentos de identificación N° 1724756422, N° 1714397526 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 intitulado COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO PARA LAS 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.

.....

Karolain Mishell Ortiz Guerra

C.C: 1724756422

.....

Brian David Villamar Arias

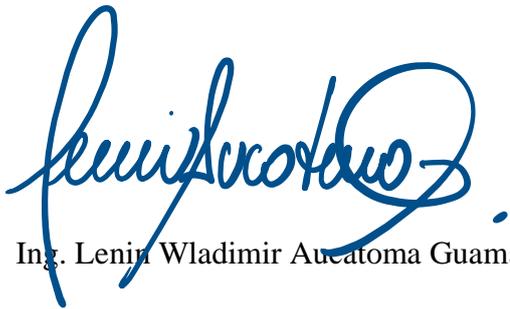
C.C:1714397526

Quito, junio del 2021

### **Declaratoria de coautoría del docente tutor**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO PARA LAS FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHZ realizado por Karolain Mishell Ortiz Guerra y Brian David Villamar Arias, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, junio de 2021



Ing. Lenin Wladimir Aucatoma Guamán

C.C: 1717985830

# COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE UNA ANTENA DIPOLO PARA LAS FRECUENCIAS DE 60, 67 Y 74 GHZ.

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

Ortiz Guerra Karolain  
Mishell  
Ingeniería Electrónica  
Universidad Politécnica  
Salesiana  
Quito, Ecuador  
kortizg1@est.ups.edu.ec

Villamar Arias Brian David  
Ingeniería Electrónica  
Universidad Politécnica  
Salesiana  
Quito, Ecuador  
bvillamar@est.ups.edu.ec

**Resumen—**En el siguiente artículo académico se realizará la comparación de los parámetros tanto teóricos como de ajuste del diseño de tres antenas tipo dipolo doblado, mismas que trabajan en la banda de ondas milimétricas (mmW), a frecuencias de 60, 67 y 74 GHz respectivamente. A partir de las fórmulas generales de las antenas dipolo, se logró determinar los parámetros de la estructura para el modelamiento de dichas antenas; donde a partir del cálculo teórico se obtuvo las dimensiones generales para el diseño de la antena dipolo doblada y se encontró un desfase en frecuencia aproximadamente del 20.7% en cada una de las antenas respecto a los valores de ajuste realizados en la simulación, este desfase se debe a la alta frecuencia de trabajo. Junto con el software ANSYS HFSS se realizó un ajuste en las dimensiones de longitud que componen a cada una de las antenas para obtener y analizar sus distintos parámetros de dispersión, que permita la comparación de estos, para así alcanzar el mejoramiento de cada una de las antenas anteriormente mencionadas. Realizando la comparación entre los valores teóricos y valores de ajuste, se obtuvo que para la antena de 60 GHz sus valores teóricos fueron de una frecuencia de 47.1 GHz con una longitud de resonancia del dipolo de 2.5 mm, y con sus valores de ajuste se obtuvo una frecuencia de 60 GHz y una longitud de resonancia del dipolo de 1.872 mm, para la antena de 67 GHz sus valores teóricos fueron de 52.35 GHz con una longitud de resonancia del dipolo de 2.2388 mm, y con sus valores de ajuste se obtuvo una frecuencia de 67.05 GHz y una longitud de resonancia del dipolo de

1.6822 mm, finalmente para la antena de 74 GHz sus valores teóricos fueron de 57.75 GHz con una longitud de resonancia del dipolo de 2.027 mm, y con sus valores de ajuste se obtuvo una frecuencia de 73.95 GHz y una longitud de resonancia del dipolo de 1.52204 mm. Para lograr alcanzar la frecuencia de trabajo requerida para el diseño propuesto, se requiere de varios ajustes en cada una de las antenas dipolo doblado. Dicho ajuste hace referencia a una reducción en la longitud del dipolo resonante, esta variación permite modificar la frecuencia de trabajo de cada una de las antenas anteriormente mencionadas.

**Palabras clave:** Antena dipolo, doblada, frecuencia resonante, ondas milimétricas, parámetros de dispersión

**Abstract—**In the following academic article, the comparison of both the theoretical and adjustment parameters of the design of three bent dipole antennas will be carried out, which work in the millimeter wave band (mmW), at frequencies of 60, 67 and 74 GHz, respectively. From the general formulas of the dipole antennas, it was possible to determine the parameters of the structure for the modeling of said antennas; where from the theoretical calculation the general dimensions for the design of the bent dipole antenna were obtained and a frequency offset of approximately 20.7% was found in each of the antennas with respect to the adjustment values made in the simulation, this offset is It is due to the high frequency of work. Together

with the ANSYS HFSS software, an adjustment was made in the length dimensions that make up each of the antennas to obtain and analyze their different dispersion parameters, which allow their comparison, to achieve the optimization of each of the antennas. antennas mentioned above. Making the comparison between the theoretical values and adjustment values, it was obtained that for the 60 GHz antenna its theoretical values were of a frequency of 47.1 GHz with a resonance length of the dipole of 2.5 mm, and with its adjustment values it was obtained a frequency of 60 GHz and a dipole resonance length of 1.872 mm, for the 67 GHz antenna its theoretical values were 52.35 GHz with a dipole resonance length of 2.2388 mm, and with its adjustment values a frequency of 67.05 GHz and a dipole resonance length of 1.6822 mm, finally for the 74 GHz antenna its theoretical values were 57.75 GHz with a dipole resonance length of 2.027 mm, and with its adjustment values a frequency of 73.95 GHz and a dipole resonance length of 1.52204 mm. It was determined that to achieve the working frequency required for the proposed design, it requires several adjustments in each bent of the dipole antennas. This adjustment refers to a reduction in the length of the resonant dipole, this variation allows modifying the working frequency of each of the previous antennas.

**Keywords:** Dipole antenna, folded, resonant frequency, millimeter waves, dispersion parameters.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la investigación aplicada en el campo de las ondas milimétricas, se ha convertido en parte importante para el estudio de las comunicaciones inalámbricas; en donde existe un campo amplio de anchos de banda en frecuencias elevadas, de entre 30GHz hasta 300GHz en la banda de EHF. [1] La onda milimétrica al tener una longitud de onda de 1 a 10 milímetros comparte las características espectrales tanto de las ondas de microondas como la del infrarrojo lejano, por tal motivo se

ha visto conveniente estudiar dichas ondas para la creación de la nueva tecnología 5G, lo que demandaría velocidades de transmisión más altas incrementando el tráfico de datos, proporcionando baja latencia y anchos de banda en el orden de los gigabits. [2]

El presente artículo se centra en el estudio de un dipolo doblado, por lo tanto, se requiere partir desde el dipolo más simple también conocido como dipolo de  $\frac{1}{2}$  onda. [3] La antena que fue diseñada para el estudio y posterior análisis del presente artículo está formada por dos conductores de longitud  $l$ , que se unen en sus extremos, uno de estos conductores se encuentra abierto en la parte central y conectado a la línea de transmisión. Dicha antena posee una resistencia de radiación de 292 ohm, esta característica hace que sea útil con líneas de transmisión de impedancia de 300 ohm. [3]

Se han revisado diseños previos como es el caso de la antena dipolo plegada para 35 GHz [4] , es decir, en bandas inferiores a las planteadas en este estudio, además, los análisis previamente realizados ubican una sola frecuencia de resonancia como objetivo de modelamiento de este tipo de antena.

En este trabajo se busca identificar el impacto de la variación de la frecuencia de resonancia en el modelamiento de la antena dipolo doblado, ubicando tres frecuencias de referencia como son: 60, 67 y 74 GHz, con esta variación, se pretende identificar los ajustes necesarios que se deben hacer a los modelos que definen esta antena para lograr los objetivos planteados con respecto a los parámetros de dispersión.

## II. DISEÑO DE LA ANTENA

Se modelaron tres antenas con frecuencias de 60, 67 y 74 GHz respectivamente. El diseño de la antena dipolo doblado parte de su forma básica al calcular su longitud de onda  $\lambda$  (lambda). Como se observa en la figura 1, la antena consta de un conductor de longitud  $L$ , dos conductores de longitud  $l'$ , mismos que se unen al conductor

principal en sus extremos, separados por su punto de alimentación  $S$  y siendo  $B$ , la distancia de separación entre sus líneas de transmisión. [4]

Las antenas fueron sometidas a diferentes análisis dentro del software Ansys HFSS mediante fórmulas matemáticas detalladas en el apartado 3. Por ser una antena tipo dipolo doblado requiere una resistencia de radiación de  $292 \Omega$ . [3]

Esta resistencia de radiación se utilizó tanto en las simulaciones teóricas como de ajuste, para obtener así un buen acople de impedancias.

### A. DISEÑO DE LA ANTENA PARA 60, 67 Y 74 GHZ

En la figura 1 se muestra un modelo del diseño general de la antena dipolo doblado para las distintas antenas. Para cada una de ellas, se hicieron varias simulaciones con distintos materiales para saber cuál sería el más apto para el funcionamiento y optimización de estas.

Cabe recalcar que la forma de la antena dipolo doblado se mantiene para las tres frecuencias, lo que cambia son las dimensiones de longitud para cada una de ellas, como se puede observar en la tabla 2.

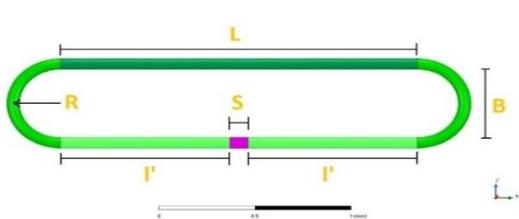


Figura 1. Diseño de la Antena Dipolo doblada.

Al ser dipolo de media onda ( $\lambda/2$ ), su patrón de radiación se asemeja al de un radiador isotrópico por tal motivo se escogió una esfera de aire con permitividad relativa  $\epsilon_r = 1.0006$ , [5], para la propagación de las ondas electromagnéticas.

Las antenas fueron excitadas mediante un puerto agrupado (lumped port), el cual es una línea de integración que indica el camino del campo

eléctrico con el fin de llegar a las frecuencias de trabajo establecidas. [6]

### III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el diseño del dipolo doblado con frecuencias de 60, 67 y 74 GHz, se aplicó las ecuaciones descritas a continuación: 1, 2, 3, 4, 5,6: [4]; [5].

Longitud de onda

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Longitud de resonancia del dipolo

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Longitud de los dipolos doblados

$$l' = \frac{\lambda}{4} \quad (3)$$

Radio de la antena dipolo

$$\text{Relación} : \frac{d}{\lambda} \quad (4)$$

Separación en el punto de alimentación de la antena.

$$S \leq 0.02\lambda \quad (5)$$

Separación entre las dos líneas de transmisión

$$B \leq 0.05\lambda \quad (6)$$

En la tabla 1 se puede observar los tres modelos diferentes para cada frecuencia de resonancia mediante el cálculo de las fórmulas propuestas con anterioridad. Obteniendo como resultado los valores teóricos y las medidas de ajuste realizadas a cada elemento de la antena y distancias que complementan a la misma permitiendo alcanzar los niveles de  $S(1,1)$ , VSWR, patrón de radiación y campo eléctrico como objetivo de investigación para el alcance de las frecuencias de trabajo requeridas

**Tabla 1.** Valores teóricos y de ajuste de la antena dipolo doblado con diferentes frecuencias de 60, 67 y 74 GHz respectivamente.

Dimensiones / Frecuencias		Dipolo doblado a 60 GHz		Dipolo doblado a 67 GHz		Dipolo doblado a 74 GHz	
Nombre	Sim.	Dimensión Teórico [mm]	Dimensión Ajuste [mm]	Dimensión Teórico [mm]	Dimensión Ajuste [mm]	Dimensión Teórico [mm]	Dimensión Ajuste [mm]
Longitud de onda del dipolo	$\lambda$	5	3.744	4.4776	3.3644	4.054	3.04408
Longitud de resonancia del dipolo.	L	2.5	1.872	2.2388	1.6822	2.027	1.52204
Longitud de los dipolos doblados	$l'$	1.25	0.936	1.1194	0.8411	1.01351	0.76102
Radio de la antena dipolo.	R	0.075 3/8	0.07	0.055 1/4	0.053	0.046 3/16	0.05
Separación en el punto de alimentación de la antena.	S	0.1	0.1	0.08955	0.08955	0.0811	0.0811
Separación entre las dos líneas de transmisión	B	0.25	0.25	0.22388	0.22388	0.2027	0.2027

## A. FRECUENCIA DE RESONANCIA

Como se puede observar en la tabla 1, se realizaron ajustes en las medidas de longitud del dipolo resonante, ya que con los valores teóricos obtenidos mediante cálculos matemáticos no cumplían con las frecuencias de trabajo requeridas ni con sus parámetros S11, y VSWR.

Se tuvo que disminuir la longitud del dipolo resonante  $L$ , en consecuencia, se redujo la longitud de los dipolos doblados  $l'$ , manteniéndose en igual proporción los parámetros  $R, S$  y  $B$ . Mencionando lo anterior, al modificar la longitud del dipolo resonante, se modificara su frecuencia de trabajo y en consecuencia sus parámetros de dispersión; teniendo en cuenta que la relación de  $L = \lambda/2$  ya no se cumple dejando así de ser un dipolo resonante.

En la tabla 2 se encuentran los valores de frecuencia obtenidos mediante las simulaciones realizadas a partir de los valores en la tabla 1. Como se puede observar el resultado obtenido mediante fórmulas matemáticas hace que las

frecuencias de 47.1, 53.35 y 57.75 GHz no cumplan con el objetivo de la investigación.

De igual manera se puede observar que al realizar los ajustes mencionados las frecuencias de 60, 67.05 y 73.95 GHz cumplen con el propósito del mismo.

**Tabla 2.** Valores teóricos y de ajuste de frecuencia obtenidos mediante simulación.

	Frecuencia 60 [GHz]	Frecuencia 67 [GHz]	Frecuencia 74 [GHz]
Valor teórico simulado	47.1	52.35	57.75
Valor ajuste simulado	60	67.05	73.95
Comparación desfase teórico	21.5%	21.8%	21.9%
Comparación desfase ajuste	0%	0.07%	0.067%

Al realizar los ajustes en la dimensión del dipolo resonante y los dipolos doblados para la antena de 60 GHz se observó una reducción del 25.12% con respecto a su dimensión calculada (teórica), para la antena de 67 GHz se obtuvo una reducción del 24.86% y finalmente para la antena de 74 GHz, se redujo en un 24.91%, de tal manera que esta variación es creciente mientras

sube la frecuencia de resonancia en un margen observable de alrededor del 1%.

En la figura 2 se observa la variación que existe entre la frecuencia de resonancia teórica y de ajuste, este desfase indica el punto donde los picos de S11 y VSWR son más altos, llegando a obtener mejores resultados al ajustar las dimensiones de la antena.

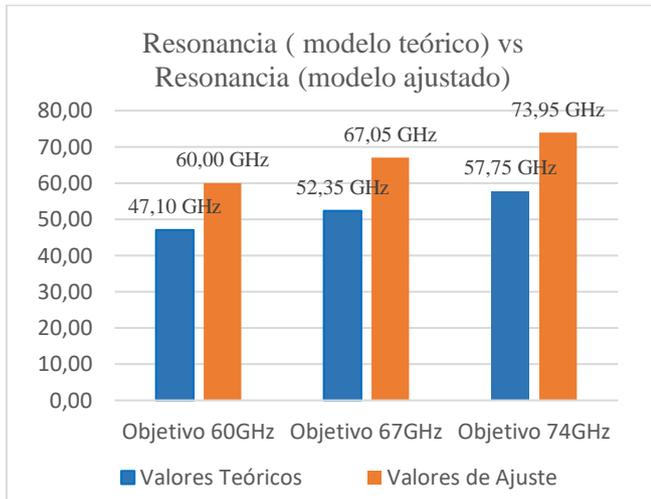


Figura 2. Representación de frecuencias de los valores teóricos vs valores de ajuste.

Al realizar una comparación entre los valores de la tabla 2 se observa que la antena dipolo doblado, para la frecuencia de 60 GHz, existe un desfase del 21.5% en el valor pico de las curvas de S(1,1) y VSWR, con un desfase de 12.9 GHz con respecto a la frecuencia central requerida; para la frecuencia de 67 GHz existe un desfase en del 21.8%, con una reducción de 14.65 GHz, con respecto a la frecuencia central requerida, y, finalmente para la frecuencia de 74 GHz existe un desfase del 21.9%, disminuyendo 16.45 GHz con respecto a la frecuencia requerida. Cabe recalcar que estos valores de frecuencia se obtuvieron a través de las simulaciones utilizando los valores de diseño teórico presentados anteriormente.

Se observa que a medida que la frecuencia se incrementa, el valor de los picos tanto de S11 como de VSWR, se desfasan en proporción directa, es decir, cuando aumenta la frecuencia, aumenta el porcentaje de desfase.

## B. PARÁMETROS VSWR Y S(1,1)

El parámetro VSWR se encuentra en un rango de 1 a 2, donde 1 representa acoplamiento ideal y 2 es el valor máximo permitido. Se estableció 1.5 como objetivo de investigación, ya que es el valor máximo que en la práctica pueden soportar los distintos dispositivos para una mejor transmisión dentro de los sistemas de telecomunicaciones. [7]

Para el estudio de altas frecuencias, el parámetro S(1,1) se encuentra entre -10 a -30 dB, [8] sin embargo para lograr alcanzar los objetivos de este estudio, se tomó en cuenta un valor aproximado o menor a -20 dB, representando las pérdidas de retorno con una relación de 1/100, de lo que se transmite por la antena respecto a lo perdido en ella.

En la tabla 3 se muestran los resultados de los parámetros de coeficiente de reflexión directa S(1,1) y relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR), tanto teóricos como de ajuste para cada una de las tres frecuencias de análisis. Para el diseño de la antena dipolo doblado con frecuencias radiantes de 60, 67 y 74 GHz respectivamente se puede observar que los valores teóricos simulados y obtenidos en la tabla 4, no cumplen con las características para lograr alcanzar las frecuencias establecidas.

Tabla 3. Valores teóricos y de ajuste de los parámetros S(1,1), VSWR de cada una de las antenas.

	VSWR	S (1,1) [dB]	Frecuencia
Teórico	0.6461	-28.5946	60 [GHz]
Ajuste	1.2093	-23.1604	
Desfase	0.5632	-54.342	
Teórico	0.3101	-34.9682	67 [GHz]
Ajuste	1.0211	-24.6255	
Desfase	0.711	-10.3427	
Teórico	0.2092	-38.3847	74 [GHz]
Ajuste	1.0108	-24.713	
Desfase	0.8016	-13.6717	

En las figuras 3 y 4 se puede observar el parámetro de dispersión S(1,1) y VSWR

respectivamente, del diseño de las tres antenas dipolo doblado, simuladas a partir de sus valores teóricos.

### C. MATERIALES DEL MODELO PROPUESTO

A partir de los valores de ajuste, se realizaron varias simulaciones con materiales distintos para cada una de las frecuencias, con el fin de comprobar si el aumento o disminución de las características de conductividad y permitividad de los distintos materiales afectan directamente a los parámetros de dispersión de cada una de las antenas en las tres frecuencias analizadas.

En la tabla 4, se puede observar los distintos materiales escogidos por sus características de conducción eléctrica, permeabilidad y conductividad, para la simulación de la antena dipolo doblado a 60 GHz.

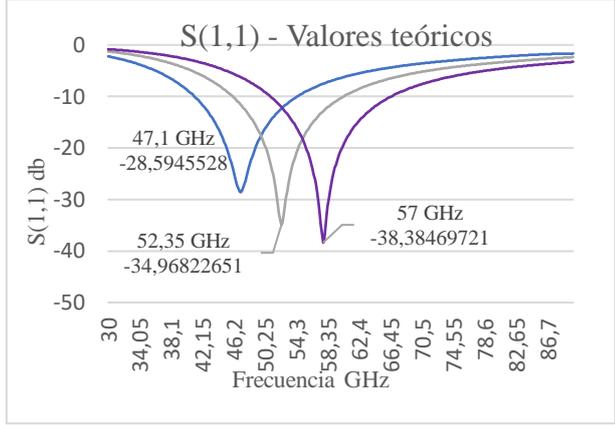


Figura 3. Parámetros de dispersión S(1,1) de las tres antenas, simuladas con sus valores teóricos.

En la figura 3 se observa un patrón decreciente en el parámetro de dispersión S(1,1) con los valores teóricos, indicando que a mayor frecuencia la cantidad de potencia reflejada respecto a la cantidad de potencia aplicada en el puerto disminuye.

Tabla 4. Características de conducción eléctrica de los distintos materiales para la antena dipolo doblado a 60 GHz.

MATERIAL	Au	Al	Fe	PEC
L [mm]	1.872	1.872	1.872	1.872
l' [mm]	0.936	0.936	0.936	0.936
R [mm]	0.07	0.07	0.07	0.07
S [mm]	0.1	0.1	0.1	0.1
B [mm]	0.25	0.25	0.25	0.25
FRECUENCIA [GHz]	59.85	60	54.3	60
VSWR	1.3386	1.2093	2.666	1.3116
S(1,1) [dB]	-22.280	-23.160	-16.34	-22.475
PERMITIVIDAD	1	1	1	1
PERMEABILIDAD	0.9999	1.00002	4000	1
CONDUCTIVIDAD [S/m]	41E6	38E6	10.3E6	1E 30

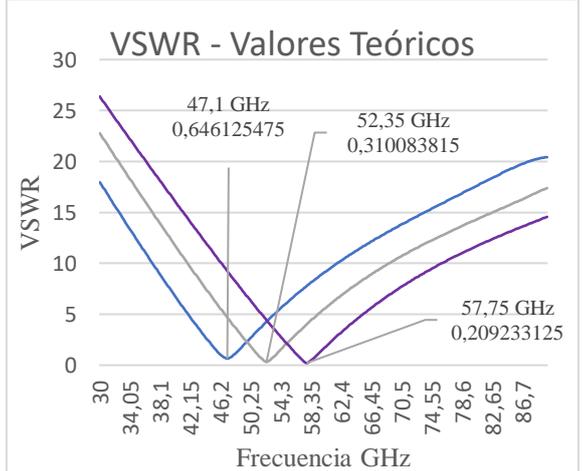


Figura 4. Parámetros VSWR de las tres antenas, simuladas con sus valores teóricos.

En la figura 4, se observa que a mayor frecuencia el VSWR va disminuyendo, además de que estos valores teóricos para cada una de las antenas se alejan de forma descendente al valor de 1, por lo tanto, no existe acoplamiento de impedancias en ninguna de estas antenas.

El material que resultó ser apropiado para el diseño de la antena dipolo doblada, con frecuencia resonante de 60 GHz fue el aluminio, con el cual se obtuvo un VSWR igual a 1.2093 y un coeficiente de reflexión S(1,1) igual a -23.1604 dB. Esto se debe también a las características que posee dicho material, el aluminio posee una alta conductividad eléctrica, gran reflectividad y es estable en un medio como el aire, favoreciendo así a la interacción de la antena y su sistema radiante.

Como se observa en las tablas 5 y 6, para el diseño de las antenas dipolo doblado con frecuencias resonantes de 67 y 74 GHz, se estableció que el PEC (Conductor Eléctrico

Perfecto), mismo que actúa como material ideal, cumple con las características apropiadas para llegar a sintonizar en las frecuencias requeridas, además de la consecución de los valores de parámetros de dispersión objetivo; con un VSWR de 1.0211 y coeficiente de reflexión  $S(1,1)$  igual a -24.6255 dB para la antena de 67 GHz, y con un VSWR de 1.0108 y coeficiente de reflexión  $S(1,1)$  igual a -24.713 dB para la antena de 74 GHz.

**Tabla 5.** Características de conducción eléctrica de los distintos materiales para la antena dipolo doblado a 67 GHz.

MATERIAL	Au	Al	Fe	PEC
L [mm]	1.682	1.682	1.682	1.682
l' [mm]	0.841	0.841	0.841	0.841
R [mm]	0.053	0.053	0.053	0.053
S [mm]	0.08955	0.08955	0.08955	0.08955
B [mm]	0.22388	0.22388	0.22388	0.22388
FRECUENCIA [GHz]	66.9	66.9	59.55	67.05
VSWR	0.9487	0.8923	2.7886	1.0211
$S(1,1)$ [dB]	-25.263	-25.7918	-15.963	-24.6255
PERMITIVIDAD	1	1	1	1
PERMEABILIDAD	0.99996	1.00002	4000	1
CONDUCTIVIDAD [S/m]	41 E6	38 E6	10.3 E6	1 E 30

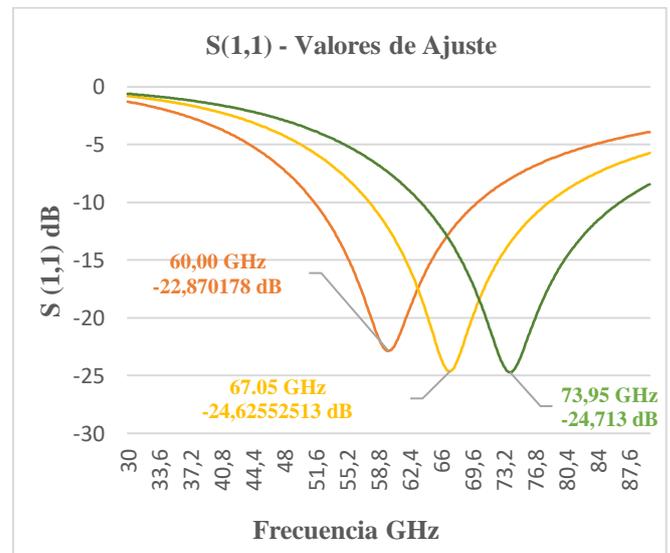
**Tabla 6.** Características de conducción eléctrica de los distintos materiales para la antena dipolo doblado a 74 GHz.

MATERIAL	Au	Al	Fe	PEC
L [mm]	1.52204	1.52204	1.52204	1.5220
l' [mm]	0.76102	0.76102	0.76102	0.7610
R [mm]	0.05	0.05	0.05	0.05
S [mm]	0.08811	0.08811	0.08811	0.0881
B [mm]	0.2027	0.2027	0.2027	0.2027
FRECUENCIA [GHz]	73.8	78.3	65.7	73.95
VSWR	1.0276	0.9641	2.84	1.0108
$S(1,1)$ [dB]	-24.5707	-25.123	-15.807	-24.713
PERMITIVIDAD	1	1	1	1
PERMEABILIDAD	0.99996	1.00002	4000	1
CONDUCTIVIDAD [S/m]	41 E6	38 E6	10.3 E6	1 E 30

El coeficiente de reflexión se relaciona directamente con la permeabilidad dado que en las tablas 4, 5 y 6 se puede observar el aumento del coeficiente de reflexión  $S(1,1)$  a medida de que la permeabilidad aumenta. En cuanto la permitividad se mantiene constante para cada material.

Con lo que respecta a la frecuencia de resonancia, los picos de las curvas tanto de  $S(1,1)$  como de VSWR, se desfasan a la izquierda con respecto a la frecuencia central cuando el material posee una permeabilidad muy elevada como es el caso del hierro en las tres simulaciones realizadas.

En las figuras 5 y 6 se puede observar el parámetro de dispersión  $S(1,1)$  y VSWR respectivamente, del diseño de las tres antenas dipolo doblado, simuladas a partir de los ajustes realizados. Estos ajustes corresponden a una variación de las dimensiones de la antena, tomando como material el aluminio para la frecuencia de 60 GHz y el PEC para las frecuencias de 67 y 74 GHz.



**Figura 5.** Parámetros de dispersión  $S(1,1)$  de las tres antenas, simuladas con sus valores de ajuste.

En la figura 5 se puede observar que al ajustar las dimensiones de la longitud del dipolo resonante de cada antena, el parámetro de dispersión  $S(1,1)$  es igual a -22.8701 para 60 GHz, -24.6255 dB para 67.05 GHz y -24.713 dB para 74 GHz, por lo tanto  $S(1,1)$  no tiene un patrón de cambio brusco con respecto a las medidas teóricas presentadas en la figura 3, al contrario se mantiene aproximado entre sus valores independientemente si baja o sube la frecuencia. Si se observa nuevamente que hay una disminución del valor de  $S(1,1)$  mientras la frecuencia de resonancia crece.

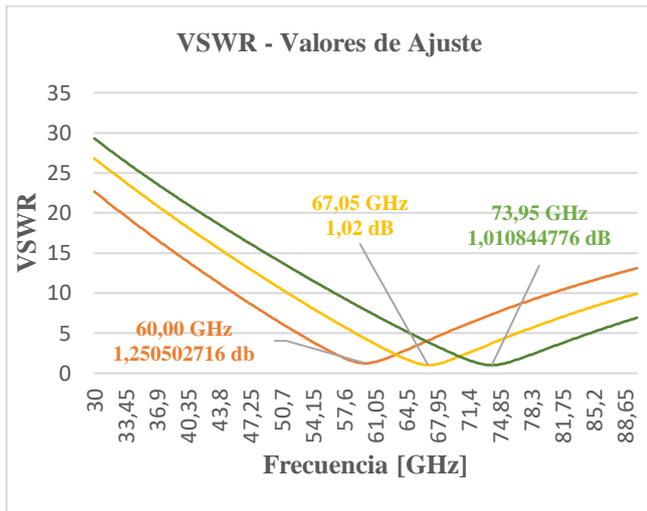


Figura 6. Parámetros VSWR de las tres antenas, simuladas con sus valores de ajuste.

En la figura 6 el parámetro VSWR, para las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz tienen valores de 1.2093, 1.0211 y 1.0108 respectivamente. Al comparar con los valores teóricos mostrados en la figura 4 se puede observar que el ajuste es necesario para tener buen acople de impedancias; los valores de VSWR para las tres antenas se mantienen próximos entre ellos indistintamente si la frecuencia baje o suba.

#### D. PATRÓN DE RADIACIÓN

El diagrama o patrón de radiación de una antena, es una representación gráfica de las características de radiación de esta, en función de todas las direcciones en el espacio. [8] Tratándose de una antena dipolo, se buscará encontrar un patrón de radiación omnidireccional partiendo de los valores de ajuste que mejor se adapten a cada diseño.

En las figuras 7 y 8, se presenta el patrón de radiación con un corte bidimensional del diagrama de radiación en el plano E [9].

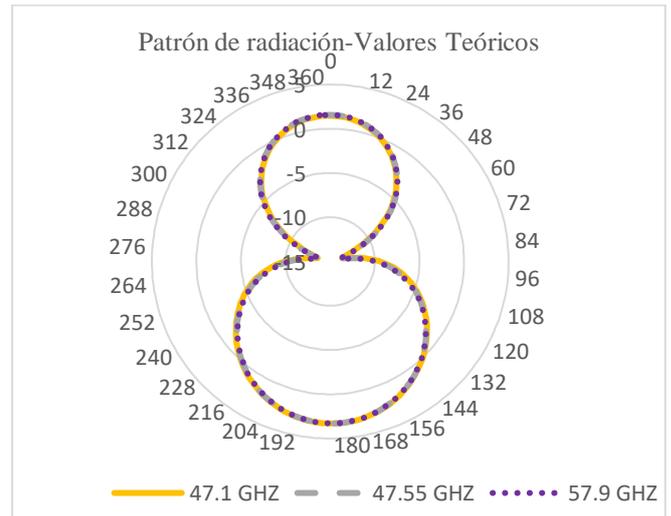


Figura 7. Patrón de radiación, simuladas con sus valores teóricos.

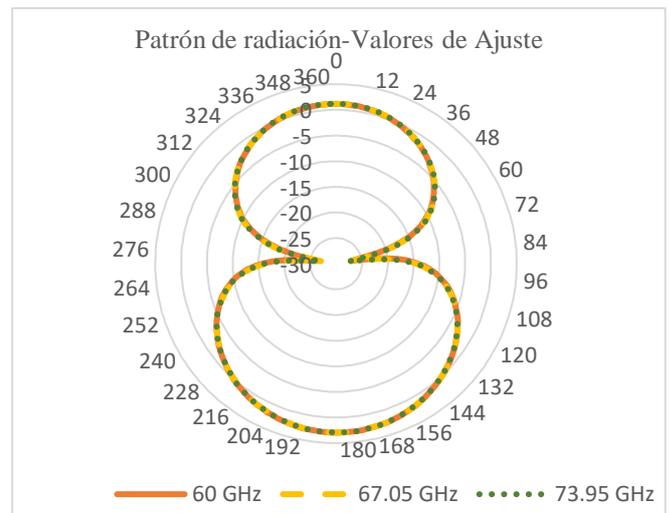


Figura 8. Patrón de radiación, simuladas con sus valores de ajuste

De los resultados presentados en las gráficas se observa que mediante los ajustes se incrementa el espacio de radiación electromagnética de la antena, presentando lóbulos más anchos en el plano E.

Con respecto a los resultados de ganancia máxima, se presentan los valores obtenidos para cada frecuencia de resonancia en la tabla 7.

Tabla 7. Ganancia de cada diseño de las antenas dipolo doblado a varias frecuencias

Diseño	Ganancia máxima [dB]
60 GHz	3.0
67 GHz	3.0
74 GHz	2.9

En la figura 9 se presentan los patrones de radiación en 3D, de cada uno de los diseños analizados en el presente artículo, con ganancias máximas de 3 dB y 2.9 dB para cada una de las antenas, con frecuencias radiantes de 60, 67 y 74 GHz respectivamente, dado que al ser una antena dipolo doblada su patrón de radiación es omnidireccional, es decir que irradia toda su potencia uniformemente en todas las direcciones y por lo tanto es ligeramente directiva. [10]

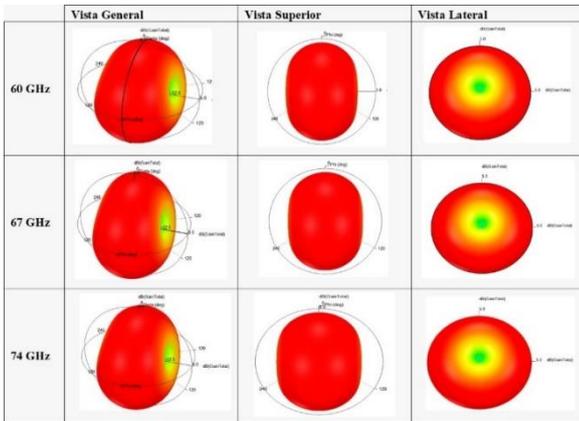


Figura 9. Patrones de radiación en 3D de cada una de las antenas dipolo doblado.

### E. CAMPO ELÉCTRICO.

Dentro de las características principales de las antenas se encuentra su campo eléctrico, mismo que representa una región del espacio, que se modifica por la presencia de una carga eléctrica. Se puede observar en las figuras 10, 11 y 12 el campo eléctrico simulado del diseño del dipolo doblado con sus valores teóricos y sus valores de ajuste.

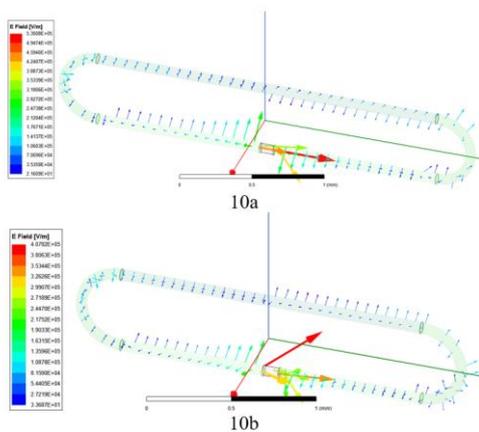


Figura 10. Campo eléctrico de la antena de 60 GHz con sus (10a) valores teóricos, (10b) valores de ajuste.

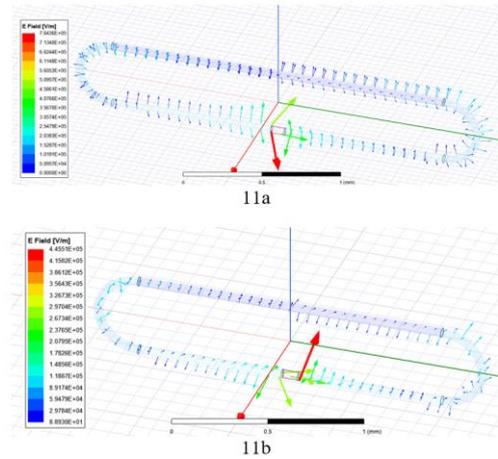


Figura 11. Campo eléctrico de la antena de 67 GHz con sus (11a) valores teóricos, (11b) valores de ajuste.

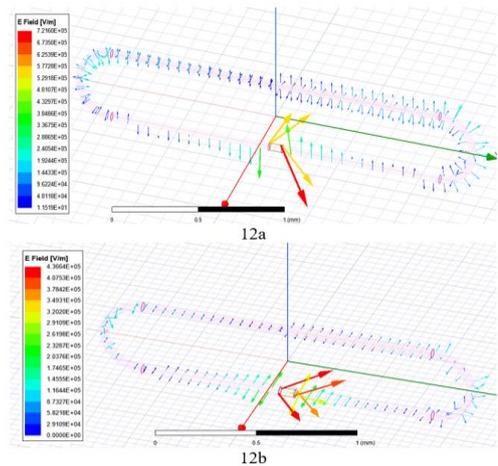


Figura 12. Campo eléctrico de la antena de 74 GHz con sus (12a) valores teóricos, (12b) valores de ajuste.

Basándonos en las figuras 10(a, b); 11(a, b); y 12(a, b) de cada una de las antenas, con las frecuencias radiantes requeridas tanto para la parte teórica como de ajuste, podemos observar que la carga que se emite a través de la intensidad de campo eléctrico de las antenas es positiva, debido a que la misma genera un campo eléctrico hacia afuera de la estructura. [11]

Adicionalmente, se confirma que, en las partes más alejadas de cada una de las antenas, es decir en los dobleces, la intensidad de campo se reduce, esto se debe a que el campo eléctrico disminuye rápidamente cuando la distancia aumenta respecto de la fuente que lo genera [12], es decir que existirá más concentración del campo eléctrico, en el punto de alimentación y

cerca del mismo, como se puede observar en cada una de las antenas.

Finalmente haciendo una comparación entre los campos eléctricos de la antena teórica y la antena de ajuste, se observa que la intensidad de campo en las simulaciones teóricas es mayor que la intensidad de campo de las simulaciones de ajuste.

**Tabla 8.** Valores del campo eléctrico teórico y de ajuste.

Frecuencia	Campo eléctrico teórico máximo [V/m]	Campo eléctrico de ajuste máximo [V/m]
60 GHz	5.3008 E+05	4.0782 E+05
67 GHz	7.6436 E+05	4.4551 E+05
74 GHz	7.2160 E+05	4.3664 E+05

Al comprar los valores de la tabla 8, se puede observar que la antena dipolo doblada teórica tiene mayor campo eléctrico que la antena de ajuste, debido a que la frecuencia teórica es menor a la frecuencia de ajuste; por lo tanto, se obtiene que a menor frecuencia de resonancia la intensidad de campo aumenta, pero a medida que la frecuencia de resonancia va aumentando la intensidad de campo disminuye.

#### IV. CONCLUSIONES

Al realizar el diseño de cada antena para su posterior simulación, se observa que es necesario hacer ajustes en las dimensiones de cada una de ellas con respecto a la longitud de resonancia del dipolo y la longitud de los dipolos doblados, debido a que estas medidas afectan directamente a la frecuencia de resonancia de cada una de las antenas. En promedio de las tres antenas, se hizo una reducción del 24.96% en las dimensiones mencionadas con anterioridad, debido a que su desfase de frecuencia teórico promedio es del 21.7%, mientras que al realizar los ajustes en los parámetros mencionados y simularlos con los valores prácticos se obtiene un desfase de frecuencia promedio del 0.045%, determinando que las antenas llegaron a las frecuencias requeridas con las medidas actualizadas.

Se comprueba que, mediante la teoría de antenas, la frecuencia es inversamente proporcional al

tamaño y diseño de estas. Lo que respecta a la antena dipolo doblada a 60 GHz se escogió un conductor de 3/8 de diámetro, para la antena dipolo doblada a 67 GHz se escogió un conductor de 1/4 de diámetro, finalmente para la antena dipolo doblada a 74 GHz se escogió un conductor de 3/16 de diámetro, por lo tanto, a medida que las frecuencias iban aumentando sus dimensiones se iban reduciendo.

Analizando las distintas simulaciones con diferentes materiales para el diseño de la antena dipolo doblado a 60 GHz, se puede concluir que tanto el aluminio como el PEC, cumplen con las características requeridas para funcionamiento del diseño propuesto. Poniendo como prioridad el aluminio debido a que su VSWR igual a 1.2093 dB es menor al del material PEC, aproximándose a 1 siendo el valor ideal, mientras que el parámetro S(1,1) aumenta en potencia con respecto al material PEC, con un valor de -23.1604 dB. Dentro del diseño de la antena dipolo doblado a 67GHz, se tiene que, al realizar la simulación con diferentes materiales, el oro, aluminio y PEC se aproximan a la frecuencia de resonancia requerida, por consiguiente, el PEC es el único material que cumple con el parámetro VSWR siendo 1.0211, mientras que los otros dos valores son menores a 1, con S(1,1) igual a -24.6225 db. Finalmente, para el diseño de la antena dipolo doblada a 74 GHz se consideró el material PEC y el Oro que cumplían con la aproximación de los requerimientos, y dentro de la selección se descartó el Oro dado que tenía un desfase en la frecuencia de resonancia notable a comparación del PEC, por lo tanto el PEC se consideró como el material ideal, debido a que sus resultados cumplen con los parámetros establecidos, con VSWR igual a 1.0108 y S(1,1) de -24.713 db.

#### V. REFERENCIAS

- [1] J. N. Valera, «Tecnología 5G, Cuarta Revolución Industrial y Nuevo Orden Mundial,» 30 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.conclusion.com.ar/internet/tecnologia-5g-cuarta-revolucion->

- industrial-y-nuevo-orden-mundial/06/2019/. [Último acceso: 25 Febrero 2020].
- [2] F. M. Mekuria y L. M. Mfupe, «Spectrum Sharing for Unlicensed 5G Networks,» IEEE Wirel-Commun. Netw. Conf. WCZNC, vol. 2019, p. 1–5, 2019.
- [3] M. N. O. Sadiku, «Antennas,» de Elements of Electromagnetics., New York, Oxford university press, 2007, pp. 588-632.
- [4] G. Hua, C. Yang, P. Lu, H.-X. Zhou y W. Hong, «Microstrip Folded Dipole Antenna for 35 GHz MMW Communication,» Hindawi, vol. 2013, n° 603654 , 2013.
- [5] O. E. A. LADINO y O. B. H. PARRA, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA EN FRECUENCIA DE MICROONDAS PARA LA PROYECCIÓN DE UN RADIOENLACE ENTRE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA Y LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, BOGOTÁ, 2018.
- [6] National Taipei University of Technology, Wave Ports and Lumped Terminals, 2017.
- [7] S.R.Bhongale, «Mg-Nd-Cd Ferrite as Substrate for X-Band Microstrip Patch Antenna,» Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 499, n° 165918, 2019.
- [8] I. J. C. Colombo, «Análisis y mediciones de los parámetros de dispersión o Scattering parameters en un cuádrupolo o en una red de n puertos ( multipolo),» UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL , vol. FACULTAD REGIONAL TUCUMÁN, pp. 35-40, 2012.
- [9] M. B. Pérez y I. G. Ruiz, «Interpretación de parámetros y especificaciones de antenas para Compatibilidad Electromagnética (EMC),» Centro Nacional de Metrología, CENAM, n° 76246, pp. 14-16, 2009.
- [10] Antenna theory, «La antena de dipolo plegado,» 02 Febrero 2020. [En línea]. Available: [view-source:https://www.antenna-theory.com/spanish/antennas/foldeddipole.php](https://www.antenna-theory.com/spanish/antennas/foldeddipole.php). [Último acceso: 08 Marzo 2020].
- [11] L. A. Rela, «Campo eléctrico; representación mediante líneas,» de Electricidad y Electrónica, Ciudad de autónoma de Buenos Aires, Saavedra 789. C1229ACE, 2010, p. 12.
- [12] GRUPO PANDORA S.A., «Campos Eléctricos y Magnéticos de 50 Hz,» 02 Septiembre 2001. [En línea]. Available: [https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/ree\\_unesa\\_cem\\_2001.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/ree_unesa_cem_2001.pdf).
- [13] M. Ferrando y A. Valero, Introducción. Parámetros de Antenas, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2017.
- [14] C. M. E. N. Pedro Belmonte, «Es seguro para la salud el 5G,» Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2019/09/es-seguro-para-la-salud-el-5g.pdf>. [Último acceso: 17 Septiembre 2020].
- [15] DOE PEC Working Group, White Papers on Materials for Photoelectrochemical Water Splitting, 2013.