

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

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

**TEMA:
DISEÑO DE UNA ANTENA PLANA COMPACTA PARA BANDA
DE ONDA MILIMÉTRICA.**

**AUTORES:
JONATHAN FABRICIO OÑA AYALA
JEFFERSON ALEXANDER YÉPEZ OLALLA**

**TUTOR:
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

Quito, agosto del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Jonathan Fabricio Oña Ayala y Jefferson Alexander Yépez Olalla, con documento de identificación N° 1720538907 y N° 1721256988, 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: “DISEÑO DE UNA ANTENA PLANA COMPACTA PARA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA”, 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.



Jonathan Oña

C.I. 1720538907



Jefferson Yépez

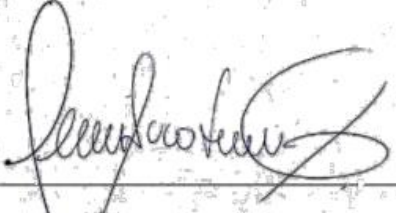
C.I. 1721256988

Quito, agosto del 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el artículo académico, “DISEÑO DE UNA ANTENA PLANA COMPACTA PARA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA” realizado por Jonathan Fabricio Oña Ayala y Jefferson Alexander Yépez Olalla, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2020



Lenin Wladimir Aucatoma Guamán

C.I. 171798583-0

DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicar primero a Dios que ha sido el pilar fundamental en mi vida, a mis padres Victor Yépez y Fanny Olalla, a mi prometida Adriana Román, a mi abuelito Jorge Yépez y a mi primo Jayron Chávez ya que cada día de esta etapa me brindaron su apoyo, su comprensión, con lo cual he podido superar todos los obstáculos.

Jefferson Yépez O.

Dedico este trabajo de tesis en primer lugar a Dios por sus bendiciones, por la fuerza de afrontar los retos que nos impone la vida, a mis Padres quienes con esfuerzo hicieron posible la culminación de una etapa más en mi vida, por la paciencia y la fe puesta en mí, por su amor incondicional y a mi hermano Javier que es mi ejemplo de lucha.

Jonathan Oña A.

Diseño de una Antena Plana Compacta para Banda de Onda Milimétrica.

Aucatoma Guamán Lenin
Wladimir

Ingeniería Electrónica
Docente Universidad Politécnica
Salesiana
Quito, Ecuador
laucatoma@ups.edu.ec

Oña Ayala Jonathan
Fabricio

Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica
Salesiana
Quito, Ecuador
jonaa@est.ups.edu.ec

Yépez Olalla Jefferson
Alexander

Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica
Salesiana
Quito, Ecuador
jyepezo@est.ups.edu.ec

Resumen– Este artículo describe el diseño de una antena plana compacta de banda ancha con frecuencia de ondas milimétricas a 60 GHz, estructurada por una lámina en forma de T que tiene como componente al bronce impreso sobre un sustrato Rogers Ro4350 (tm), y una lámina en forma de S conectado plano tierra de material tin. Se realizaron varias pruebas y optimizaciones en el software Ansys HFSS, cambiando las dimensiones geométricas y configurando materiales con diferente permitividad relativa en cada una de las capas de la antena resonante, obteniendo así cinco diseños que cumplen satisfactoriamente con los requerimientos deseados. En función de los resultados obtenidos, se determinó que el sistema radiante óptimo opera a una frecuencia de 60.00 GHz con un parámetro S11 de -22.9920 dB, un VSWR de 1.2330 dB, un ancho de banda de 2.54 MHz y una ganancia de 4.24 dB. Bajo estas condiciones se generan conclusiones acerca de cómo pueden cambiar los parámetros de dispersión como el patrón de radiación, el ancho de banda y la ganancia de acuerdo a las modificaciones efectuadas en los 5 diseños propuestos.

Palabras Claves– onda milimétrica, antena plana compacta, parámetros de radiación, patrón de radiación.

Abstract– This article describes the design of a compact broadband flat antenna with millimeter wave frequency at 60 GHz, consisting of a T-shaped strip with bronze as a component printed on a Rogers Ro4350 (tm) substrate, and a T-shaped strip connected ground plane of tin material. Several tests and optimizations were implemented in Ansys HFSS software, changing the geometric dimensions and configuring materials with different relative permittivity in each of the layers of the resonant antenna, obtaining five designs that satisfactorily meet the desired requirements. Based on the results obtained, it was determined that the most optimal radiant system operates at a frequency of 60.00 GHz with an S11 parameter of -22.9920 dB, a VSWR of 1.2330 dB, a bandwidth of 2.54 MHz and a gain of 4.24 dB. Under these conditions there are conclusions about how the dispersion parameters such as radiation pattern, bandwidth and gain, can change according to the modifications made in the 5 proposed designs.

Keywords– millimeter wave, compact flat antenna, radiation parameters, radiation pattern.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente gran parte del espectro radioeléctrico se encuentra saturado, especialmente en las zonas comprendidas entre 300 MHz y 3 GHz, debido al despliegue de los diferentes servicios de comunicaciones (radio, tv, telefonía celular, GPS, Wi-Fi, etc.) [1]. Situación que ha obligado a la exploración de nuevos rangos de frecuencia que pueden ser aprovechados para satisfacer la creciente demanda de radioenlaces con mayor capacidad. Dentro de este grupo de frecuencias a utilizarse se encuentra la banda de ondas milimétricas la cual comprende un rango de 1 a 10 mm, ubicándose en la porción del espectro de muy alta y extremadamente alta frecuencia EHF (Extremely High Frequency) la cual opera en la banda de 30 GHz a 300 GHz [2].

Particularmente la nueva generación de comunicaciones móviles 5G promete suministrar conexiones de alta capacidad y baja latencia apoyadas en el uso de bandas de ondas milimétricas [3]. En este sentido, el diseño de un sistema de radiación eficiente podría desempeñar un papel clave en el desarrollo de las comunicaciones de ultra-alta-velocidad puesto que ello contribuye a la mitigación de las pérdidas de propagación causadas por la absorción atmosférica en ondas milimétricas[4]. Bajo esta premisa, las antenas compactas planas resultan una alternativa viable puesto que ocupan poco espacio, son de bajo costo, de implementación e integración relativamente sencilla, ya que brindan la posibilidad de adaptarse a diferentes formas y pueden utilizarse en diversos escenarios para prácticas militares y civiles [5].

Examinando la literatura referente al diseño de antenas planas compactas; en [6], [7] y [8] se determina que se pueden conseguir antenas con un ancho de banda amplio. Sin embargo, en estas investigaciones únicamente han sido desarrolladas antenas para las bandas menores a 15 GHz. Considerando tales antecedentes, el presente trabajo propone el diseño de una antena compacta plana que opere en la banda superior a 30 GHz, tomando como referencia el modelo descrito en [8].

El sistema radiante será diseñado utilizando el método experimental, que consiste en optimizar las dimensiones de la antena de referencia hasta reubicar la frecuencia de resonancia en 60 GHz. Para tal efecto se empleará el software de simulación electromagnética HFSS (High-Frequency Structure Simulator), el cual permite obtener: la frecuencia de resonancia, parámetros S, ganancia y campos presentes en un sólido [9]. De este modo, se experimentará modificando las dimensiones de la antena y los materiales que la componen, hasta conseguir un modelo optimizado el cual se ajuste a los requerimientos deseados.

II. DISEÑO DE LA ANTENA

Mediante la variación de las dimensiones de la antena de referencia [8], se obtiene el sistema radiante a 60 GHz que se presenta en la Fig. 1, el cual está conformada por una lámina conductora en forma de T y una línea de alimentación microstrip dispuestas sobre un sustrato dieléctrico. En la parte posterior del sustrato se tiene una lámina en forma de S que se encuentra conectada a un plano de tierra. De acuerdo con la Fig. 1 es factible notar que la región superior de la tira en forma de T se ajusta dentro de un área rodeada por la parte superior de la tira en forma de S, mientras que, en la parte central de la antena, se observa que ambas tiras se superponen. Así también se puede visualizar que la excitación de la antena se efectúa considerando un puerto agrupado (lumped port) con una impedancia de 50 ohmios.

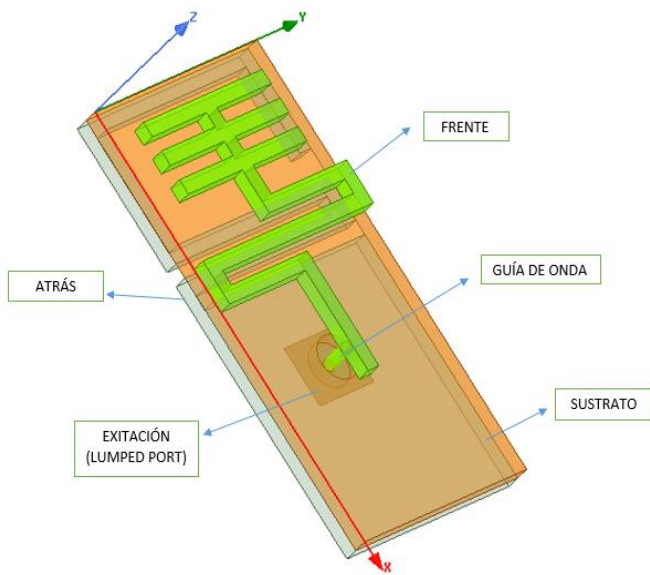


Fig. 1. Antena Plana Compacta.

El rendimiento de la capa de sustrato está determinada por su grosor y permitividad relativa (ϵ_r), mismo que incide en las pérdidas de radiación, ya que el campo eléctrico viaja por un medio de permitividad relativa donde sus líneas de campo se encuentran en un medio no homogéneo, lo que produce que la radiación no solo se confine en el medio dieléctrico, sino que también parte del campo radiado se propague en el aire [10].

En la Fig. 2 se presenta de forma separada las capas que estructuran a la antena, así como el detalle de las variables

utilizadas en la simulación. La parte frontal de la antena que consiste una tira metálica en forma de T, la cual es alimentada por una línea microstrip y un cilindro de radio K (que actúa como guía de onda) se muestra en la Fig. 2a. Por otro lado, en la Fig. 2b se observa que el sustrato posee una forma rectangular de dimensiones $1.5\text{mm} \times 3\text{mm}$, con una perforación cilíndrica de radio Z y profundidad K. Debajo del sustrato se encuentra una segunda capa metálica compuesta por una tira en forma de S y un plano de tierra, misma que se puede visualizar en la Fig. 2c.

La antena, el sustrato y la tierra están conectadas a través de un puerto asignado a una frecuencia de 60 GHz que se encuentra en la parte inferior de nuestro diseño, el cual tiene una superficie cuadrangular de 0.15mm de lado, tal y como se indica en la Fig. 2d.

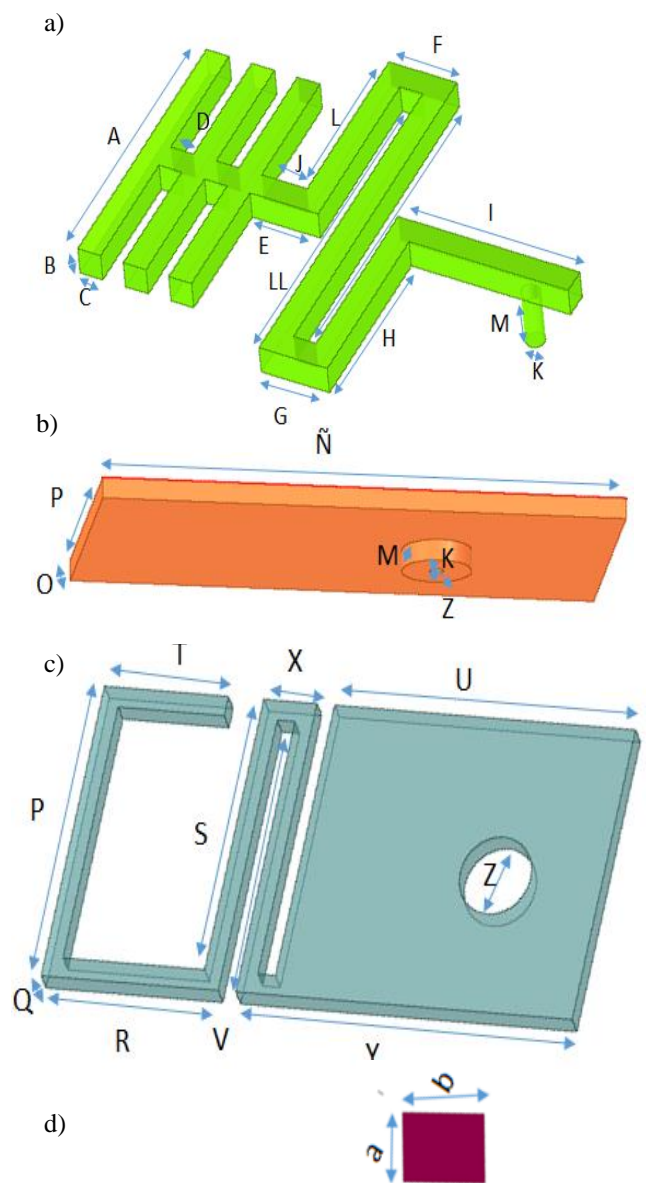


Fig. 2. Capas de la Antena Plana Compacta: a) Frente, b) Sustrato, c) Atrás, d) Puerto de excitación.

Una vez definidas las variables de experimentación (ver Fig. 2), la antena es modelada y simulada hasta obtener un diseño que centre su banda de operación en 60 GHz. De este modo se obtiene un primer diseño cuyas dimensiones se detallan en la Tabla 1. Los materiales seleccionados para este diseño son: “bronce” y “tin” para la parte frontal y posterior de la antena respectivamente; mientras que el sustrato elegido es el Rogers Ro4350 que posee una permitividad relativa de 3.66.

Tabla 1
MEDIDA DE LOS PARÁMETROS DE LA ANTENA
(Diseño 1).

Parámetros de la antena plana compacta							
Frente		Atrás		Sustrato		Lumped Port	
Variable	Medida (mm)	Variable	Medida (mm)	Variable	Medida (mm)	Variable	Medida (mm)
A	1.1	P	1.5	M	0.2	a	0.15
B	0.1	Q	0.1	Ñ	3	b	0.15
C	0.1	R	0.8	0	0.1		
D	0.1	S	1.5	P	1.5		
E	0.3	T	0.6	K(radio)	0.04		
F	0.2	U	1.7	Z(radio)	0.2		
G	0.2	V	1.4				
H	0.7	X	0.2				
I	0.7	Y	1.9				
J	0.2	Z(radio)	0.2				
L	0.8						
LL	1.4						
K(radio)	0.04						
M	0.2						

III. SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el objetivo de afinar la respuesta del primer diseño, se efectúan una serie de pruebas variando el tamaño de los parámetros K, Z, M y O de la Fig. 2, los cuales inciden directamente sobre la geometría del mecanismo de alimentación de la antena e influyen en sus características de adaptación. Por otro lado, se considera que las dimensiones restantes de la antena se mantienen constantes como se indica en la Tabla 1. En la Tabla 2 se han registrado las variaciones realizadas en los parámetros antes mencionados, determinándose así un total de 5 diseños que cumplen con las metas propuestas por esta investigación.

Tabla 2
MEDIDAS VARIABLES DE LOS 5 DISEÑOS
PROPUESTOS.

Variable	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4	Diseño 5
	Medida (mm)	Medida (mm)	Medida (mm)	Medida (mm)	Medida (mm)
K (radio)	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
Z (radio)	0.27	0.25	0.22	0.22	0.2
M	0.3	0.26	0.18	0.23	0.2
O	0.2	0.2	0.14	0.2	0.1

Del mismo modo, para los 5 diseños propuestos a la vez que se han modificado sus dimensiones se van alternando los materiales que los componen, empleando una variedad de sustratos con distinta permitividad relativa (ϵ_r) y metales de diferente conductividad (σ), tal y como se indica la Tabla 3. La variación de los materiales que constituyen a la antena permitirá evaluar cómo estos influyen en el rendimiento de la misma, tomando como referente los resultados del parámetro S11, el VSWR, diagrama de radiación y ganancia.

Tabla 3
PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES
DE DISEÑO.

Diseño	Material	Permitividad (ϵ_r)	σ (S/m)
Diseño 1	Frente de la antena	Bronce	10×10^6
	Sustrato	Rogers Ro4350	0
	Atrás de la antena	Tin	8.67×10^6
Diseño 2	Frente de la antena	Cobalto	10×10^6
	Sustrato	Sapphire	0
	Atrás de la antena	Lead	5×10^6
Diseño 3	Frente de la antena	Brass	15×10^6
	Sustrato	Krempe (tm)	0
	Atrás de la antena	Tin	8.67×10^6
Diseño 4	Frente de la antena	Copper	58×10^6
	Sustrato	Krempe (tm)	0
	Atrás de la antena	Sapphire	0
Diseño 5	Frente de la antena	Copper	58×10^6
	Sustrato	Sapphire	0
	Atrás de la antena	Tin	8.67×10^6

Cabe señalar que los cinco diseños planteados en esta investigación y que se presentan en las Tablas 2 y 3, son aquellos que mostraron un mejor desempeño, puesto que a la frecuencia de interés se consigue coeficientes de reflexión menores a los -20 dB, un VSWR entre 0 y 1.76 dB y un patrón de radiación con una ganancia cercana a los 4 dB.

A. Parámetro S11 o Coeficiente de reflexión

En la Fig. 3 se presentan las curvas del parámetro S11, correspondientes a los 5 diseños propuestos, mismos que han sido simulados a la frecuencia de 60 GHz en un rango comprendido entre 30 y 90 GHz. Los coeficientes de reflexión obtenidos se ubican por debajo de los -20 dB, lo cual representa una relación de 1/100 entre la potencia transmitida y la potencia reflejada por la antena, relación que garantiza un nivel adecuado de reflexión para el correcto funcionamiento de la misma [11].

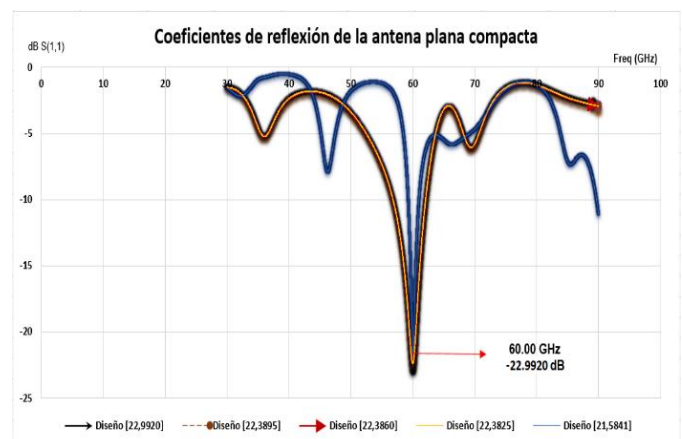


Fig. 3. Pérdidas de reflexión para cada diseño.

En la Fig. 4 se ha incluido un acercamiento de la Fig. 3 en un rango más pequeño de 55 a 65 GHz, el cual permite apreciar y evaluar de manera más detallada la respuesta del parámetro S11 de los modelos propuestos, en las cercanías de 60 GHz. En esta gráfica, se denotan mayores divergencias entre el primer y

quinto diseño en los que se consigue el menor y el mayor valor del parámetro S11 respectivamente, mientras que los diseños 2, 3 y 4 manifiestan un comportamiento bastante similar.

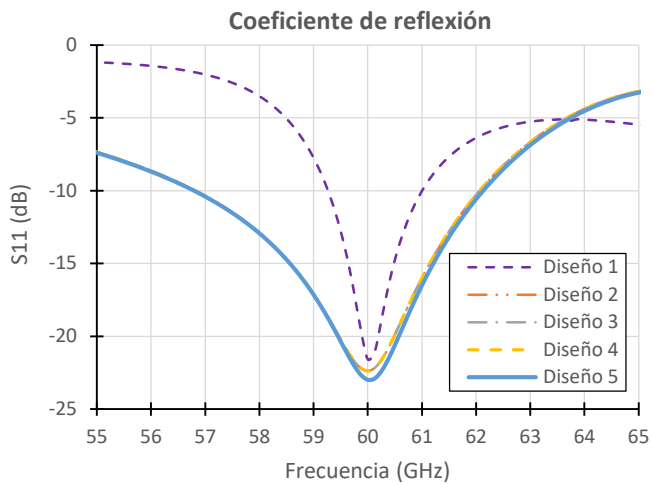


Fig. 4. Coeficiente de reflexión para los 5 diseños propuestos.

En la Tabla 4 se ha recopilado los resultados de los coeficientes de reflexión obtenidos a partir de la simulación de los 5 modelos presentados, en donde puede notarse que, a la frecuencia de 60 GHz, el parámetro S11 adquiere valores inferiores a los -21 dB alcanzando un mínimo de -22.99 dB con el quinto diseño.

Tabla 4
VALORES DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN.

	Freq (GHz)	S11 (dB)
Diseño 1	60.00	-21.5841
Diseño 2	60.00	-22.3895
Diseño 3	60.00	-22.3860
Diseño 4	60.00	-22.3825
Diseño 5	60.00	-22.9920

En la Tabla 5 se indican los valores del ancho de banda obtenidos, para cada uno de los diseños presentados, mismos que han sido determinados en el rango de frecuencias donde el coeficiente de reflexión toma un valor menor a -15 dB, ya que en estos puntos la relación entre la energía reflejada y energía transmitida es de aproximadamente 3/100 [12], lo cual garantiza que existan pérdidas por reflexión en el orden del 3%.

Tabla 5
VALORES DEL ANCHO DE BANDA.

	BW (GHz)
Diseño 1	0.9
Diseño 2	2.4
Diseño 3	2.44
Diseño 4	2.43
Diseño 5	2.54

Examinando los valores de las Tablas 4 y 5, es posible corroborar que el quinto diseño es el que presenta el menor coeficiente de reflexión y exhibe un ancho de banda más amplio alcanzado un valor de 2.54 GHz en un rango que va de 58.66 a 61.2 GHz, tal y como se muestra en la Fig. 5.

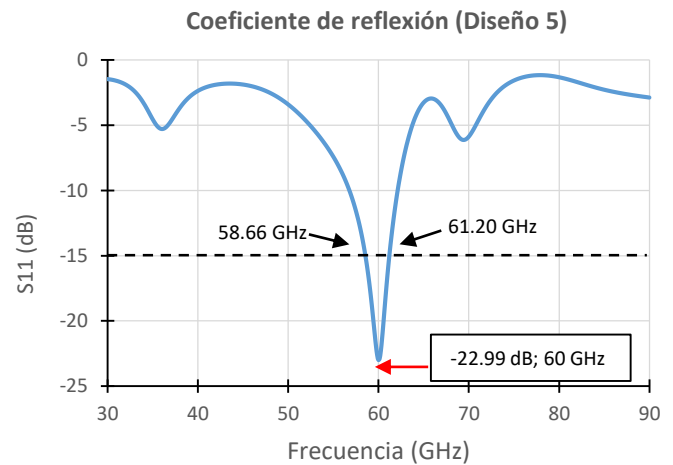


Fig. 5. Ancho de banda del diseño 5 de la antena plana compacta.

B. Relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR)

Para este parámetro, el objetivo es obtener valores de VSWR comprendidos entre 0 dB a 3 dB. Un valor de VSWR igual a 0 dB indica que existe un acoplamiento perfecto de impedancias entre la línea de transmisión y la antena; no obstante, un VSWR por encima de 1.76 dB hasta 3 dB se también considera aceptable, aunque hay que considerar que aún con 1.76 dB la onda incidente puede ir generando reflexiones y con ello interferencias que producen alteraciones en la amplitud de la señal transmitida [11].

En la Fig. 6 se presentan los valores del VSWR obtenidos para los cinco diseños planteados en un rango de 30 a 90 GHz. En esta figura se puede destacar que a partir del segundo diseño no se advierte una diferencia demasiado significativa respecto de los demás diseños, puesto que las curvas parecen estar superpuestas.

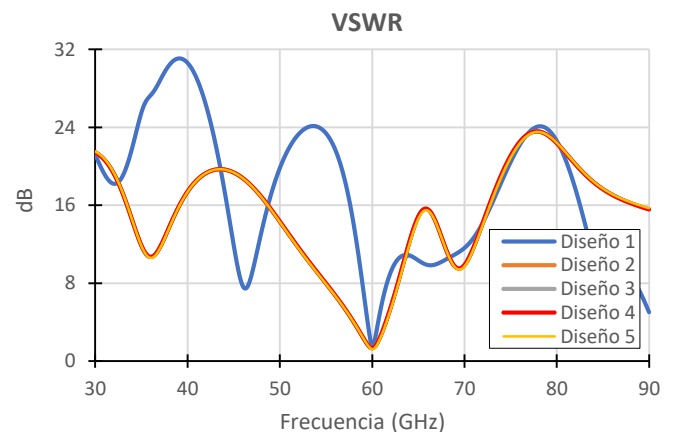


Fig. 6. VSWR de cada diseño de la antena plana compacta (30-90 GHz).

Considerando la proximidad de los valores de VSWR observados en la Fig. 6, se ha incluido una segunda gráfica, en la cual al reducir el rango de visualización y centrarlo a 60 GHz, permite evaluar las diferencias de VSWR entre los diseños planteados. Así, por ejemplo, en la Fig. 7 se identifica que el quinto diseño tiene el menor valor de VSWR, mientras que el primero presenta el máximo.

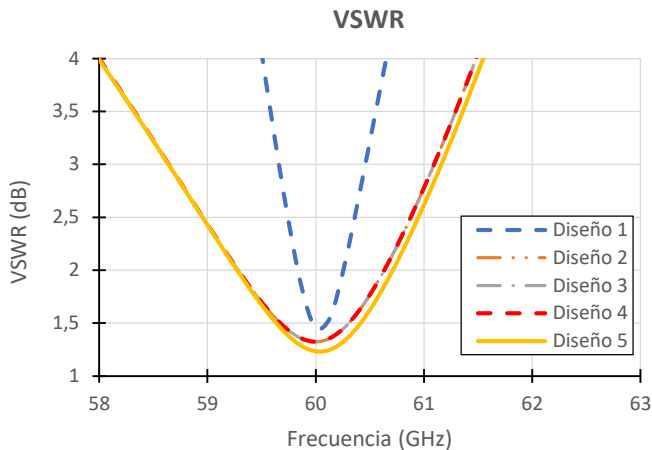


Fig. 7. VSWR de cada diseño de la antena plana compacta (58-63 GHz).

Por otro lado, en la Tabla 6 se muestran los resultados de VSWR simulados para cada diseño, así se determina que para la de frecuencia de 60 GHz se obtienen valores de VSWR inferiores a 1.76 dB. Como se observó previamente, no se identifica una diferencia significativa en el VSWR de los diseños 2, 3 y 4; sin embargo, con el diseño 5 se alcanza un VSWR mínimo de 1.23 dB, lo cual que indica que con este diseño el acoplamiento de impedancias con la línea de transmisión es el adecuado y se encuentra dentro de los objetivos de estudio.

Tabla 6
VALORES DE VSWR DE CADA DISEÑO.

	Freq (GHz)	VSWR (dB)
Diseño 1	60.00	1.4910
Diseño 2	60.00	1.3219
Diseño 3	60.00	1.3225
Diseño 4	60.00	1.3230
Diseño 5	60.00	1.2330

En la Fig. 8 se presenta la curva de VSWR obtenida para el quinto diseño, en donde es factible notar que a la frecuencia de 60 GHz este parámetro ha adquirido un valor de 1.2330 dB, el cual guarda mayor cercanía con la relación ideal de 1.

Entonces, en función de los datos presentados en las Tablas 4, 5 y 6 se confirma que el diseño 5 será el que presente menores pérdidas por reflexión y esto es un indicio de que el modelo se encuentra mejor adaptado. Esta información puede ser corroborada también por los resultados obtenidos en el parámetro S11 de la Fig. 4.

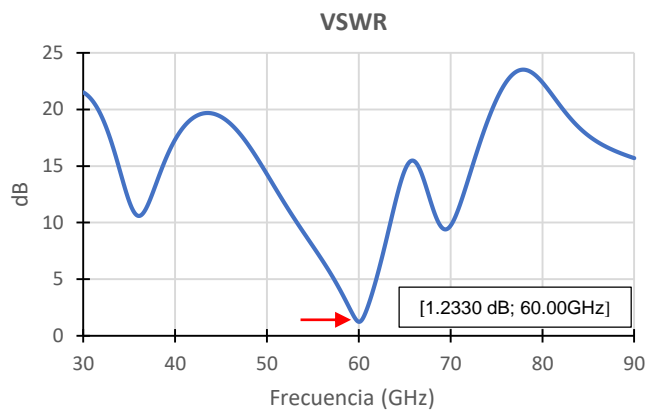


Fig. 8. Relación de onda estacionaria de voltaje del diseño 5 de la antena plana compacta.

C. Patrón de radiación

El patrón de radiación se define como una representación gráfica de las variables de radiación de una antena en función de un ángulo (θ ó ϕ) a una distancia lo suficientemente grande como para considerarse campo lejano [13]. A través de este diagrama se puede determinar el ancho de haz del lóbulo de radiación principal que es el ángulo comprendido entre los puntos de media potencia a -3dB y que permite estimar cuan directiva es una antena [14].

En la Fig. 9 se presenta el diagrama de radiación de los diseños propuestos, en el plano horizontal (donde $\phi=0^\circ$ y θ varía de 0° a 360°). En este diagrama se advierte que la radiación se concentra en la parte delantera de la antena y es mínima en la parte posterior de la misma. Así también se observa la presencia de un lóbulo de radiación principal; dos lóbulos secundarios y un nulo en la parte posterior de la antena. Comparando la forma de los diagramas obtenidos se determina que el quinto diseño presenta un lóbulo principal ligeramente más ensanchado que el de los demás diseños y la dirección de máxima radiación se localiza aproximadamente en $\theta=30^\circ$ en donde la ganancia toma un valor de 4.24 dB.

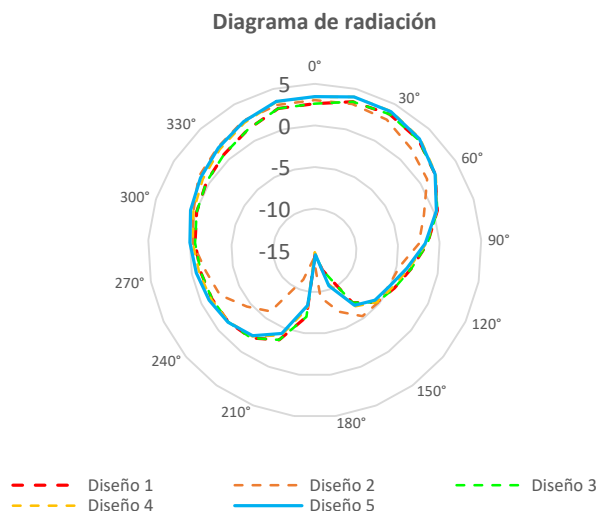


Fig. 9. Diagrama de radiación bidimensional de cada diseño de la antena plana compacta.

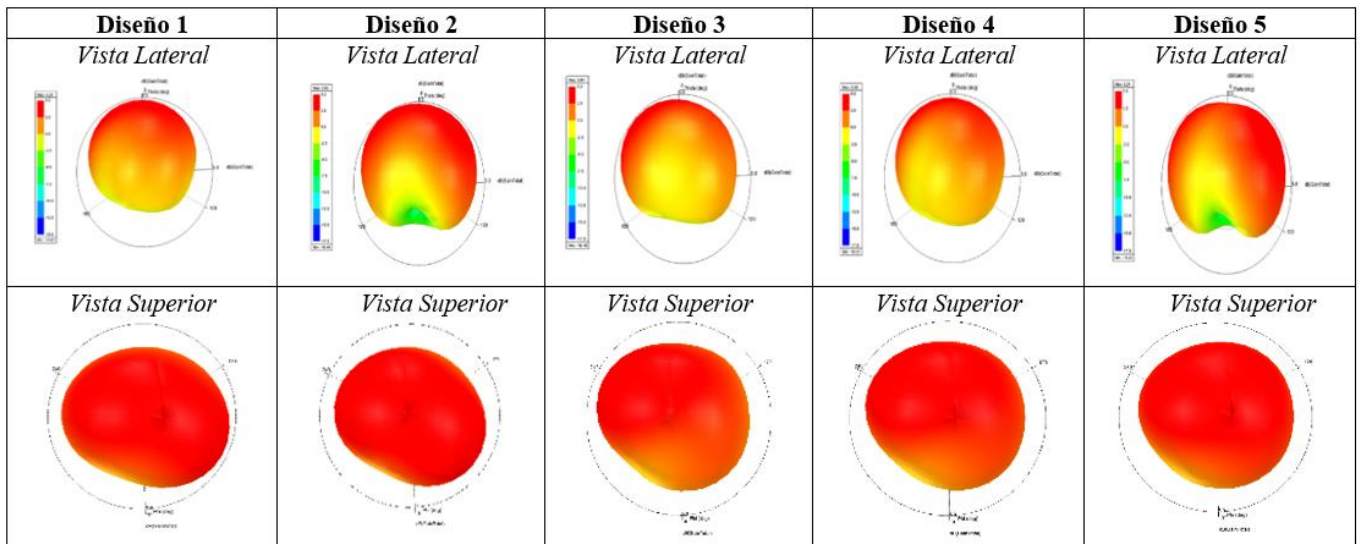


Fig. 10. Patrón de radiación simulado en HFSS en 3D de los 5 diseños propuestos.

En la Fig. 10 se presentan los diagramas de radiación 3D de la vista superior y lateral correspondiente a los cinco modelos propuestos, en donde se puede visualizar de manera detallada la forma del campo electromagnético radiado e identificar las zonas con mayor ganancia coloreadas en rojo y las de menor ganancia coloreadas en verde. De acuerdo con esta figura, puede notarse que el diseño 5 distribuye su máximo de radiación en una zona más amplia puesto que alcanza un ancho de haz de aproximadamente 90° .

Otro parámetro importante que permite evaluar las características de radiación es la ganancia, la cual establece una relación entre la potencia radiada por la antena en una dirección dada y la potencia radiada por una antena isotrópica ideal sin pérdidas [11].

En la Tabla 7 se detallan los valores de las ganancias obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en el software Ansys HFSS considerando las zonas de máxima y mínima radiación (adelante y atrás de la antena respectivamente). Como se puede apreciar en la Tabla 7, los valores de ganancia oscilan entre -16 dB y 4 dB, siendo el quinto diseño el que presenta una ganancia máxima de 4.24 dB.

Tabla 7
VALORES DE LA GANANCIA MÁXIMA Y MÍNIMA DE
LOS 5 DISEÑOS PROPUESTOS.

	Ganancia max (dB)	Ganancia min (dB)
Diseño 1	3.24	-15.20
Diseño 2	3.53	-16.45
Diseño 3	3.91	-15.18
Diseño 4	3.98	-16.01
Diseño 5	4.24	-14.81

IV. ANÁLISIS

La antena plana compacta presentada en este proyecto fue generada a partir de la modificación de una antena previamente diseñada para la banda de 1.5 a 2.5 GHz [8]. La técnica utilizada para reubicar la banda de operación dentro del rango de trabajo de las ondas milimétricas consiste en la reducción paramétrica de las dimensiones físicas de nuestra antena, sustentada por el criterio de que la frecuencia de una antena es inversamente proporcional a su tamaño [13]. De esta forma el modelo de referencia que inicialmente medía $18 \times 7.2 \times 0.254$ (mm), pasó a tener un tamaño de $3 \times 1.5 \times 0.3$ (mm).

En función de los resultados obtenidos al variar las dimensiones K, Z, M y O de la Fig. 2 y asignando diferentes materiales a cada una de las capas que componen a la antena, se presentan los 5 diseños que mejor se ajustan a las metas propuestas por esta investigación. En el caso del diseño 1 se observa que utilizando un sustrato (Rogers RO4350) con una permitividad relativa de 3.66, se genera un coeficiente de reflexión de -21.8 dB y un ancho de banda de alrededor de 900 MHz. Por otro lado, en los diseños 2, 3 y 4 al utilizar como sustrato el Sapphire ($\epsilon_r=10$) y Krempel Tm ($\epsilon_r=3.4$) a los 60 GHz se tienen un parámetro S11 con valores bastante cercanos que alcanzan -22.38 dB y un ancho de banda de 2.4 GHz. Finalmente, en el diseño 5, al emplear como sustrato al Sapphire ($\epsilon_r=10$) se producen un coeficiente de reflexión de -22 dB y se logra el mejor ancho de banda (2.54 GHz) puesto que la antena se encuentra mejor adaptada.

Debido a la presencia de la sonda de alimentación de radio K emulada por el cilindro que se muestra en la Fig. 2a, aparecen ciertas inductancias que deben ser contrarrestadas con el valor de capacitancia proporcionada por el material del sustrato y las placas metálicas en forma de S y T. Sin embargo, al incrementar el radio del cilindro, la inductancia decrece [15] y por ende no se anulan las cargas reactivas lo cual puede producir una desadaptación y por ende el incremento en el parámetro S11 y VSWR.

También se realizan pruebas utilizando diferentes combinaciones de materiales conductores para las capas superior e inferior al sustrato (lámina en forma de T y S respectivamente). Así por ejemplo en los diseños 1, 2, 3, 4 y 5 se emplean las combinaciones: bronce-tin, cobalto-lead, brass-tin, cobre-sapphire y bronce-tin respectivamente. En donde el diseño 5 es el que presenta los materiales de más alta conductividad (58×10^6 y 8.67×10^6 Siemens/m), parámetro que ejerce influencia sobre las características de radiación de la antena, puesto que la distribución de las líneas campo varía en función del valor de este parámetro y debido a ello se podría obtener una mejor ganancia.

Existen varias técnicas para incrementar el ancho de banda de una antena, como el aumento en el grosor del sustrato o mediante un diseño multicapa [15]. Sin embargo, estas técnicas no resultan aplicables dentro del contexto de este proyecto puesto que se requiere diseñar una antena compacta, es decir un modelo con el menor tamaño y grosor posible. Bajo este marco, determinamos que para conseguir un ancho de banda más amplio se requieren hacer modificaciones al modelo de antena microstrip convencional. Por ejemplo, mediante la inclusión de ranuras en un parche se puede lograr una respuesta multibanda con frecuencias de resonancia que se superponen, y ese es el mecanismo empleado por este proyecto para obtener una antena con un mayor ancho de banda ya que gracias a la forma plegada que tienen la capa superior e inferior (forma de T y S) de la antena se logra este acometido, especialmente en el quinto diseño.

V. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha demostrado mediante simulación el rendimiento de una antena plana compacta para la banda de ondas milimétricas, utilizando 5 variantes de diseño y en base a la experimentación se determina que el diseño 5 es el más óptimo al obtener una frecuencia de 60 GHz, un S11 (coeficiente de reflexión) de -22.992 dB y un VSWR de 1.2330 dB con lo que se produce una mejora del 6.523% en cuanto al coeficiente de reflexión y un 17.303% respecto al VSWR comparado con el diseño 1.

En el quinto diseño, las propiedades del sustrato como su forma rectangular de $3\text{mm} \times 1.5\text{mm}$, su espesor de 0.1mm y permitividad relativa de 10 influyen directamente en el ancho de banda de la antena. Sumado a ello, debido a la forma en T y S de las capas superior e inferior que estructuran a nuestra antena compacta y a la adecuada variación de las dimensiones del radio de la guía de alimentación ($K=0.04\text{mm}$ y $Z=0.2\text{mm}$), se logra un diseño óptimo el cual presenta un ancho de banda de 2.54 GHz y una ganancia de 4.24 dB con un diagrama de radiación directivo, que cuenta con un ancho de haz de 90° .

En altas frecuencias, a nivel de ondas milimétricas los circuitos y antenas se vuelven más sensibles a la variación de sus dimensiones, prueba de ello es que fue suficiente modificar centésimas de milímetro en las dimensiones detalladas en la Tabla 2, para producir un cambio sobre los niveles de adaptación y VSWR de los diferentes diseños propuestos.

- [1] J. G. Jiménez y M. P. S. Fernández, «Modelado y estudio de canales realistas en sistemas mmMIMO», p. 119.
- [2] N. K. Mallat, M. Ishtiaq, A. Ur Rehman, y A. Iqbal, «Millimeter-Wave in the Face of 5G Communication Potential Applications», *IETE Journal of Research*, pp. 1-9, ene. 2020, doi: 10.1080/03772063.2020.1714489.
- [3] «Espectro 5G. Posición de política pública de la GSMA», *5G Spectrum*, p. 12, jul. 2019.
- [4] M. E. Shorbagy, R. M. Shubair, M. I. AlHajri, y N. K. Mallat, «On the design of millimetre-wave antennas for 5G», en *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, nov. 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/MMS.2016.7803878.
- [5] M. Donelli, S. Menon, y A. Kumar, «Compact Antennas for Modern Communication Systems», *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2020, pp. 1-2, feb. 2020, doi: 10.1155/2020/6903268.
- [6] U. Rafique, H. Khalil, y S. Agarwal, «A Compact Planar Antenna for Super Wideband Applications», en *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall)*, Xiamen, China, dic. 2019, pp. 3256-3261, doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021605.
- [7] S. Hota, S. Baudha, B. B. Mangaraj, y M. Varun Yadav, «A novel compact planar antenna for ultra-wideband application», *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 34, n.º 1, pp. 116-128, ene. 2020, doi: 10.1080/09205071.2019.1689854.
- [8] R. Li, B. Pan, J. Laskar, y M. M. Tentzeris, «A Compact Broadband Planar Antenna for GPS, DCS-1800, IMT-2000, and WLAN Applications», *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 25-27, 2007, doi: 10.1109/LAWP.2006.890754.
- [9] O. Mrabet, «High Frequency Structure Simulator (HFSS) Tutorial», Accedido: jul. 16, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/3356546/High_Frequency_Structure_Simulator_HFSS_Tutorial.
- [10] J. Hernández, *Teoría de líneas de transmisión e ingeniería de micr ondas*. Mexicali, Baja California: Tomás Di Bella, 1999.
- [11] A. Kishk, «Fundamentals of Antennas», *Antennas for Base Stations in Wireless Communications*, p. 1, ene. 2009.
- [12] B. H. Bustamante Quizhpilema y S. V. Tatés Jordán, «Diseño de una antena modelo resonante para banda de onda milimétrica mediante el análisis de parámetros de dispersión», ene. 2020, Accedido: jul. 17, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18292>.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 2016.
- [14] Y. Huang y K. Boyle, *Antennas: From Theory to Practice*, First ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008.
- [15] G. Kumar y K. P. Ray, *Broadband Microstrip Antennas*. Artech House, 2003.