

**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 DE APERTURA CON
POLARIZADOR PARA LA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA.**

**AUTORES:
FELIPE ELIAS ASIMBAYA POZO
CRISTIAN STEVEN CAMPAÑA LÓPEZ**

**TUTOR:
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

Quito, marzo del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Felipe Elias Asimbaya Pozo y Cristian Steven Campaña López, con documentos de identificación N° 171990332-8 y N° 172547323-3 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: “DISEÑO DE UNA ANTENA DE APERTURA CON POLARIZADOR PARA LA 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.



Felipe Elias Asimbaya Pozo

CI: 1719903328



Cristian Steven Campaña López

CI: 1725473233

Quito, marzo del 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el artículo académico, “DISEÑO DE UNA ANTENA DE APERTURA CON POLARIZADOR PARA LA BANDA DE ONDA MILIMÉTRICA” realizado por Felipe Elias Asimbaya Pozo y Cristian Steven Campaña López, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2020



Lenin Wladimir Aucatoma Guamán

CI: 1717985830

Diseño de una Antena de Apertura con Polarizador para la Banda de Onda Milimétrica

Aucatoma Guamán Lenin
Wladimir

Docente Universidad Politécnica
Salesiana

laucatoma@ups.edu.ec

Asimbaya Pozo Felipe
Elías

Universidad Politécnica
Salesiana

fasimbaya@est.ups.edu.ec

Campaña López Cristian
Steven

Universidad Politécnica
Salesiana

ccampaa@est.ups.edu.ec

Resumen— En el presente artículo se desarrolla el diseño de una antena de apertura con polarizador para operar en banda de onda milimétrica, específicamente a una frecuencia de 60 [GHz], además requiere cumplir ciertas especificaciones para su funcionamiento, tales como: coeficiente de reflexión (S11), mismo que determina la energía de pérdida en relación a la energía aprovechada por la antena, relación de onda estacionaria VSWR que determina un buen acople de los componentes y patrón de radiación que proporciona la forma en la que va a emitir energía el dispositivo. El diseño y simulación se realizó a través del software ANSYS HFSS que proporciona las herramientas necesarias para variar dimensiones y materiales de los componentes de la antena consiguiendo resultados favorables en el rango de 59-61 [GHz] siendo el mejor de ellos a una frecuencia de 60.334 [GHz] de donde parte un análisis y comparación con cuatro resultados más en relación a los parámetros mencionados.

Abstract— In this article, the design of an aperture antenna with polarizer to operate in a millimeter wave band, specifically at a frequency of 60 [GHz], is also required to meet certain specifications for its operation, such as: reflection coefficient (S11), which determines the loss energy in relation to the energy used by the antenna, VSWR standing wave ratio that determines a good coupling of the components and radiation pattern that provides the way in which the device will emit energy. The design and simulation was carried out through the ANSYS HFSS software that provides the necessary tools to vary dimensions and materials of the antenna components achieving favorable results in the range of 59-61 [GHz] being the best of them at a frequency of 60.334 [GHz] from which an analysis and comparison with four more results in relation to the mentioned parameters starts.

I. INTRODUCCIÓN

El evidente desarrollo tecnológico ha impulsado la nueva generación de comunicaciones móviles 5G para satisfacer la gran cantidad de servicios que demandan los terminales y usuarios [1] con el propósito de brindar una mayor tasa de transmisión de datos en el orden de los Gbps, no obstante esto también genera mayores problemas en cuanto a pérdidas de transmisión atenuando las señales, por esta razón en los últimos años la comunidad de investigación ha puesto mayor énfasis en el desarrollado para mejoras en el diseño de antenas para futuras redes 5G [2]. Un punto fundamental para el desarrollo de 5G es el déficit de bandas de frecuencia para comunicaciones móviles

incentivando nuevos estudios que determinaron la disponibilidad de la banda de frecuencia extremadamente alta (EHF) en el rango de 30 - 300 GHz, denominadas de onda milimétrica, cabe mencionar que es la banda más alta en la escala de radiofrecuencias [3].

El diseño de una antena de apertura consta principalmente de un slot o abertura en su estructura por donde es excitada a través de una guía de onda. Las antenas de apertura también son consideradas de tipo bocina que pueden ser piramidal o cónica, además que existen aperturas sobre planos conductores y también en aplicaciones como reflectores que proporcionan una mejora en las características de radiación, además brindan un ancho de banda amplio comparado con antenas de las mismas dimensiones tal como una microstrip [4].

La apertura en este tipo de antena es por donde fluyen las ondas electromagnéticas de tal manera que funciona como un recolector de la energía. Son implementadas comúnmente en frecuencias UHF o superiores, por esta razón estas antenas pueden ser utilizadas en frecuencias de onda milimétrica debido a que poseen también una alta ganancia que es un requisito primordial de los sistemas de transmisión de datos a alta velocidad [5]. Un parámetro propio de una antena de apertura es el aumento de ganancia con la frecuencia de funcionamiento que explicado de forma más precisa representa que la ganancia de la antena aumenta con el cuadrado de la frecuencia si la eficiencia de apertura es constante [6].

En base al prototipo de antena de apertura se integra un polarizador [7] diseñado de distintas formas para mejorar el rendimiento de la antena en cuanto a parámetro de reflexión y patrón de radiación, estos valores se ven mejorados debido a las características del material termoplástico como permeabilidad, pérdida tangencial y la distribución de las perforaciones [8], el polarizador está sometido a un régimen de prueba y error para observar el comportamiento de la antena de acuerdo a sus características, además las formas lineales se varían como el caso de la guía de onda rectangular que permite confinar de forma distinta el campo eléctrico y campo magnético con el

propósito de generar un patrón de radiación con una mayor directividad al momento en que la energía es radiada al espacio libre [9].

II. DISEÑO DE LA ANTENA

La antena de apertura está compuesta de 3 capas y un polarizador o también denominado atenuador como se observan en la figura 1 (c). El diseño original del atenuador parte de las siguientes medidas: altura = 11.92 mm, diámetro = 10.33 mm, $h = 0.97$ mm, $w1 = 0.87$ mm y $w2 = 0.83$ [7] y fueron modificadas de acuerdo a los resultados obtenidos en los modelos propuesto en el presente artículo, tomando valores para el diseño principal de: radio = 1.414 mm, altura = 1.2 mm, además, 3 ranuras una de 3.2 x 2.2 mm en el centro del cilindro, y dos laterales de 1.2 x 0.2 mm, mismas que tienen una profundidad del 0.8 mm, también posee dos bases cilíndricas que son introducidas en la antena a modo de acople con medidas de: radio = 0.1 mm y altura = 0.5 mm, el atenuador se simuló con material termoplástico RGD 240 que tiene una permitividad relativa (ϵ_r) de 2.9 y una pérdida tangencial de 0.01, medidas y constantes detalladas en Tabla I y Tabla III.

La estructura cuadrada de la antena parte de las siguientes dimensiones: $L = 20$ mm y una apertura de $x3 = 3.3$ mm y $y3 = 2$ mm [7], que del mismo modo se fueron modificando hasta que la capa de tierra obtuvo valores de: $L = 3.85$ mm, altura de 0.01 mm y está compuesta de aluminio con una permitividad relativa (ϵ_r) de 1.000021, en el centro de la capa se hace una apertura de 1.4 x 1.4 mm como se observa en la figura 1 (b), donde el dieléctrico es introducido con un acople de 0.2 mm. La capa de dieléctrico tiene un apertura de 1.2 x 1.2 mm y una altura de 0.1 mm compuesta de Rogers Ultralam 1217 TM con permitividad relativa (ϵ_r) de 2.17 y una pérdida tangencial de 0.0009, por último la apertura en general con todas la capas unidas hace una guía de onda principal de 1 x 1 mm con una altura de 0.4 mm como se observa en la figura 1 (a) compuesta de cobre con una permitividad relativa (ϵ_r) de 0.999991, como se muestra detalladamente los materiales y sus características en la Tabla III y las dimensiones de la apertura en la Tabla II.

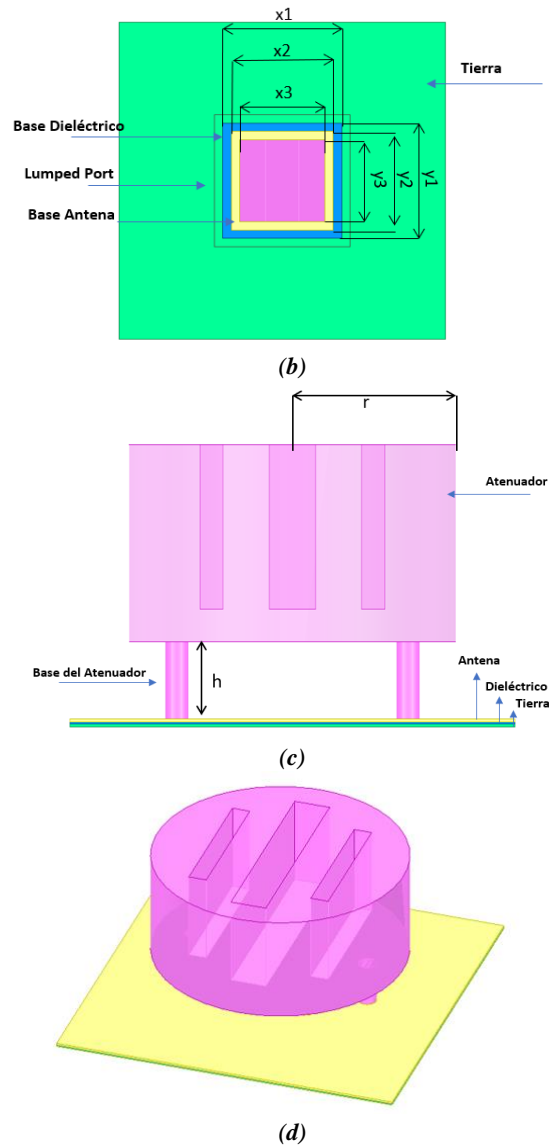
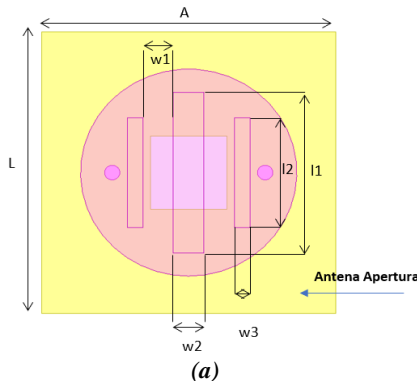


Figura 1. Prototipo de la Antena de Apertura con atenuador. (a)Vista Superior, (b)Vista Inferior, (c)Vista Frontal y (d)Vista Isométrica.

La antena de apertura tiene un puerto de excitación (Lumped Port) configurado a una frecuencia de 60 GHz y con una superficie de 1.6 x 1.6 mm como se observa en la figura 1 (b), que se encarga de conectar tanto la antena, dieléctrico y la tierra para simular dentro de una esfera de aire el funcionamiento en conjunto de la antena.

III. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Una vez realizadas varias pruebas con diferentes materiales como se muestra en la Tabla III y variando las dimensiones de la antena y sus diferentes elementos tal como se detalla en las Tabla I y Tabla II, se obtuvo 5 resultados con los parámetros más apropiados para el funcionamiento de la antena en banda de onda milimétrica que son: Parámetro S11 “Coeficiente de

reflexión”, VSWR “Relación de onda estacionario” y patrón de radiación, que están detallados en las figuras 2,4 y 5.

Tabla I

Medidas de las simulaciones y variaciones de los diseños propuestos.

Simulación 1			
	L (mm)	A (mm)	Grosor(mm)
Antena	3.85	3.85	0.04
Tierra	3.85	3.85	0.01
Dieléctrico	3.85	3.85	0.02
Atenuador	h (mm)	0.48	1.22
	r (mm)	1,4124	
	w1(mm)	0.4	-
			Profundidad (mm)
	w2 (mm) x l1 (mm)	0.4x2.2	1.02
w3 (mm) x l2 (mm)	0.2x1.5	1.02	
Simulación 2			
	L (mm)	A (mm)	Grosor (mm)
Antena	3.06	3.06	0.0468
Tierra	4	4	0.04
Dieléctrico	3.8	3.8	0.05
Atenuador	h(mm)	1	0.489
	r(mm)	1.4142	
	w1(mm)	0.6	0.78
			Profundidad (mm)
	W2 (mm) x l1 (mm)	0.2x1.9	-
w3 (mm) x l2 (mm)	0.4x-	-	
Simulación 3			
	L (mm)	A (mm)	Grosor(mm)
Antena	2.45	2.45	0.945
Tierra	3.6	3.6	0.4
Dieléctrico	3.85	3.85	0.9
Atenuador	h (mm)	0.46	1.3
	r (mm)	1,4124	
	w1(mm)	0.42	-
			Profundidad (mm)
	w2 (mm) x l1 (mm)	0.2x2.7	1.08
w3 (mm) x l1 (mm)	0.4x-	1.08	
Simulación 4			
	L (mm)	A (mm)	Grosor(mm)
Antena	3	3	0.945
Tierra	4	4	0.4
Dieléctrico	3.8	3.8	0.9
Atenuador	h (mm)	0.46	1
	r (mm)	1,4124	
	w1(mm)	0.6	-
			Profundidad (mm)
	w2 (mm) x l1 (mm)	0.2x2.7	0.78
w3 (mm) x l1 (mm)	0.4x-	0.78	
Simulación 5			
	L (mm)	A (mm)	Grosor (mm)
Antena	3.06	3.06	0.0468
Tierra	4	4	0.04
Dieléctrico	3.8	3.8	0.05
Atenuador	h(mm)	1	0.489
	r(mm)	1.4142	
	w1(mm)	0.5	0.78
			Profundidad (mm)
	w2 (mm) x l1 (mm)	0.2x2.7	-
w3 (mm) x l2 (mm)	0.4	-	

Tabla II

Medidas de las aperturas de cada diseño.

	Apertura [mm]					
	Apertura Tierra		Apertura Dieléctrico		Apertura Antena	
	x1	y1	x2	y2	x3	y3
Simulación 1	1.4	1.4	1.2	1.2	1	1
Simulación 2	1.4	1.4	1	1.2	1	0.7
Simulación 3	1.4	1.4	1	1.2	1	0.96
Simulación 4	1.4	1.4	1	1.2	1	1
Simulación 5	1.4	1.4	1	1.2	1	0.7

Tabla III

Materiales de Diseño y Características.

	Antena	Tierra	Dieléctrico	Atenuador
Simulación 1	Cobre	Aluminio	Rogers Ultralam 1227™	RGD240 Termoplastic (εr)=2.9 δ=0.001
			(εr)=2.17	
			δ=0.0009	
Simulación 2	Cobre	Aluminio	Taconic RF-60™	
			(εr)=6.15	
			δ=0.0028	
Simulación 3	Cobre	Aluminio	Rogers RO3006™	
			(εr)=6.15	
			δ=0.0025	
Simulación 4	Cobre	Aluminio	Poliestireno	
			(εr)=3.2	
			δ=0.001	
Simulación 5	Cobre	Aluminio	Rogers RO3006™	
			(εr)=6.15	
			δ=0.0025	

A. Coeficiente de reflexión de la antena (S1,1)

En la figura 2 se detalla los resultados obtenidos en el coeficiente de reflexión S1,1 por los 5 diseños simulados, donde se muestra la relación del parámetro S1,1 en [dB] vs la frecuencia en [GHz] aplicada al puerto o guía de onda, en el caso de la antena de apertura se realizó un análisis en el rango de 58GHz a 64GHz, debido a que son rangos que no han sido explotados comercialmente, siendo el objetivo de estudio 60 GHz o frecuencias cercanas ya que en la actualidad los estudios y prototipos diseñados de antenas para el funcionamiento en onda milimétrica son aplicados en frecuencias de 3-30GHz por diferentes empresas, también se busca adquirir una mayor tasa de transmisión con el aumento de frecuencia.

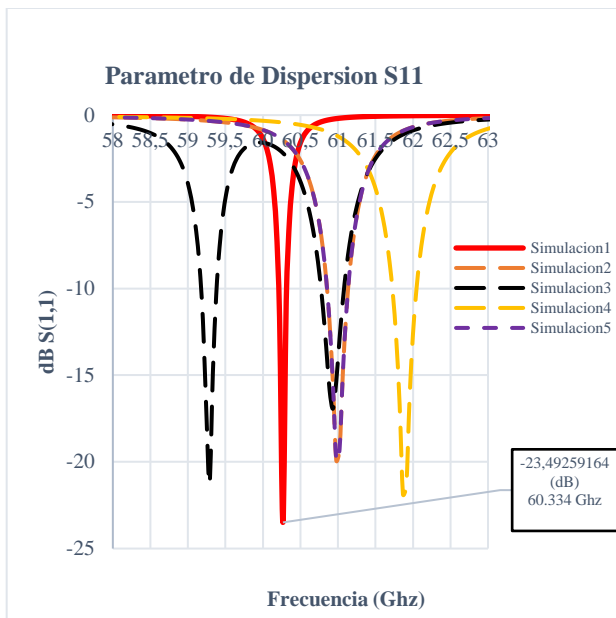


Figura 2. Coeficiente de Reflexión $S(1,1)$ de los diseños de la antena de apertura con atenuador

En la tabla IV se evidencia los valores máximos y mínimos del coeficiente de reflexión vs frecuencia de cada diseño, el cual debe estar por debajo de los -20 a -25dB debido a la relación entre la potencia de pérdida y la potencia recibida que generan una relación de 1/3000 [10].

Tabla IV.
Valores del coeficiente de reflexión.

	Freq (GHz)	$S_{1,1}$ (dB)
Diseño 1	60.334	-23.4925
Diseño 2	60.9333	-18.9447
Diseño 3	60.8	-20.661
Diseño 4	61.89	-21.8674
Diseño 5	60.9778	-19.9088

Se encontró también los diferentes anchos de banda permitidos para el funcionamiento de la antena por medio de la Tabla V, que fueron tomados a -15dB, como se visualiza en la figura 3, mismo que genera una relación de 1/1000 [10].

Tabla V.
Valores del ancho de banda.

	BW (MHz)
Diseño 1	70
Diseño 2	140
Diseño 3	140
Diseño 4	170
Diseño 5	130

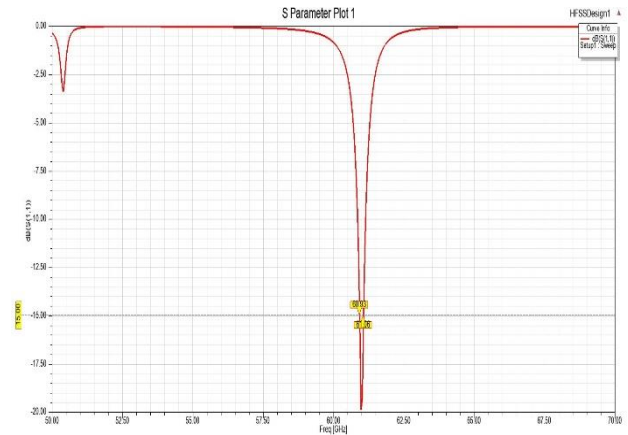


Figura 3. Ancho de Banda dado a partir de la gráfica del coeficiente de reflexión.

B. Relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR)

En el caso del VSWR “Relación de onda estacionaria”, muestra la función de acople entre la impedancia de la antena con la impedancia de la línea de transmisión, el VSWR requiere estar entre los valores de 1 a 1.5 dB para poder tener un acople correcto [11]. En la figura 4 se observan los valores de onda estacionaria VSWR que se obtuvieron en los diseños propuestos.

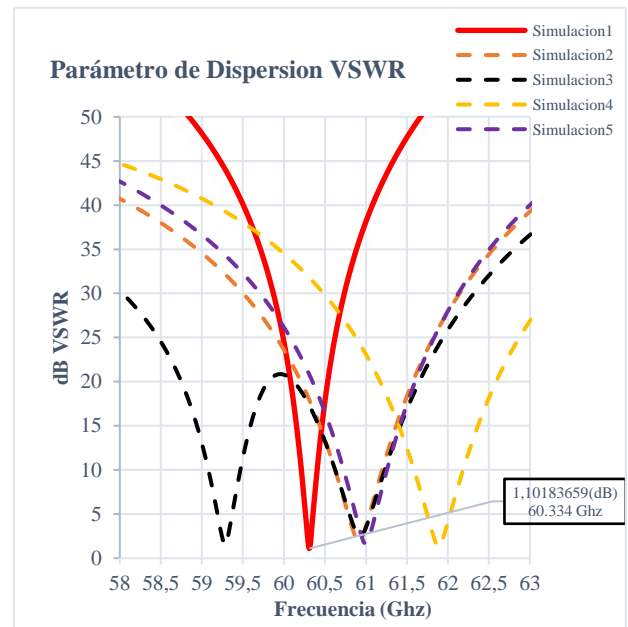


Figura 4. Relación de onda estacionaria VSWR de los diseños de la antena de apertura con atenuador

En la tabla VI se detalla los valores máximos y mínimos de VSWR vs Frecuencia dado por cada simulación, siendo tres de estos valores superiores al rango establecido de estudio de 1.5 necesario para obtener un buen acople de impedancias, no obstante, todos los valores se hallan dentro del máximo teórico aceptable que es 2.

Tabla VI.
Valores de VSWR de cada diseño.

	Freq (GHz)	VSWR (dB)
Diseño 1	60.334	1.1018
Diseño 2	60.9333	1.97
Diseño 3	60.8	1.61
Diseño 4	61.89	1.402
Diseño 5	60.9778	1.7615

C. Patrón de radiación

El patrón de radiación muestra el accionar del campo eléctrico radiante de la antena de apertura, mismo que es afectado por los diferentes cambios en los materiales, dimensiones de los elementos de la antena, además del atenuador de composición termoplástica RGD 240.[8], también se requiere un patrón de radiación por encima de los -3 dB para no generar patrones considerados nulos, en la figura 5 se presenta los patrones de radiación en 2D arrojados por cada diseño, donde en la simulación 1 se encuentra un modelo de patrón omnidireccional enfocando su máxima potencia en 90° y 270° y dos nulos a 0° y 180°, en la simulación 2 se visualiza un patrón de radiación directivo con la existencia de un lóbulo principal radiando a 0° y con dos lóbulos posteriores que generan nulos a 255° y 110°, mientras que en las simulaciones 3 y 4 se observa un patrón de radiación directivo con dos lóbulos posteriores y un nulo a 180°, por último en la simulación 5 se logra apreciar un patrón de radiación más directivo con un lóbulo principal a 0° y un lóbulo posterior generando un nulo a 250°, la ganancia máxima obtenida en los diferentes diseños de antena de apertura son visualizados en la Tabla VII.

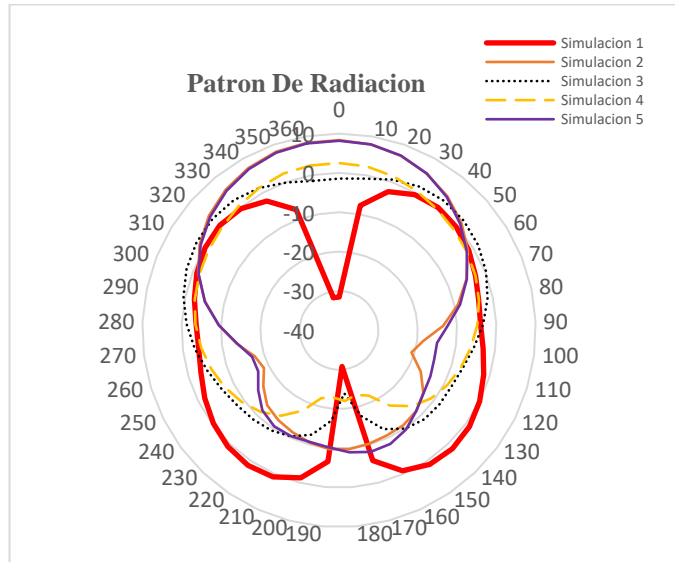


Figura 5. Patrón de radiación de los diseños de la antena de apertura.

Tabla VII.
Ganancia de la antena resonante

	Ganancia Max [dB]
Diseño 1	0.336
Diseño 2	2.03
Diseño 3	8.3382
Diseño 4	2.87
Diseño 5	8.1867

D. Funcionamiento en conjunto de la antena de apertura.

En la figura 6 se muestra el comportamiento de Lumped Port, aplicando un campo vectorial eléctrico (E) en el interior de la antena, interactuando con tierra, dieléctrico y atenuador que posee un radio 1.4142 mm dando una intensidad máxima de 28251 V/m, que se encuentra en los vértices de la antena debido al operar del atenuador, provocando la disminución del flujo eléctrico en la zona central de la antena, el mismo que varía de forma esférica con centro en las esquinas, disipando la energía conforme la apertura dada a la antena es modificada.

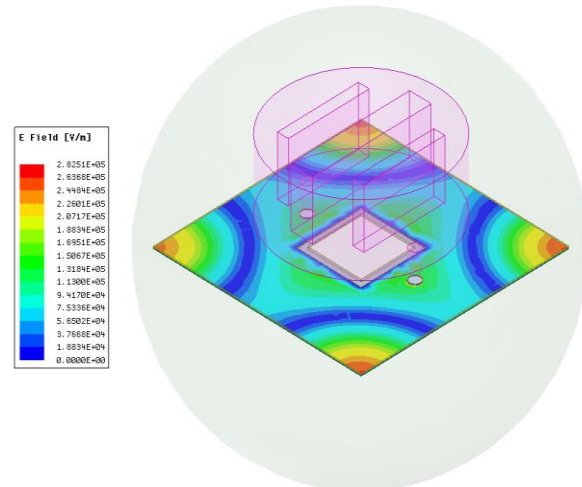


Figura 6. Flujo del campo vectorial eléctrico en la antena de apertura con atenuador.

E. Operación del Atenuador con material RGD 240

Para observar de manera más clara el funcionamiento del atenuador en los diseños propuestos de la antena de apertura, se muestra en la figura 7, un patrón de radiación de forma tridimensional obtenido en las simulaciones para así visualizar de forma más detallada la existencia de nulos y los diferentes lóbulos presentes en los diseños planteados.

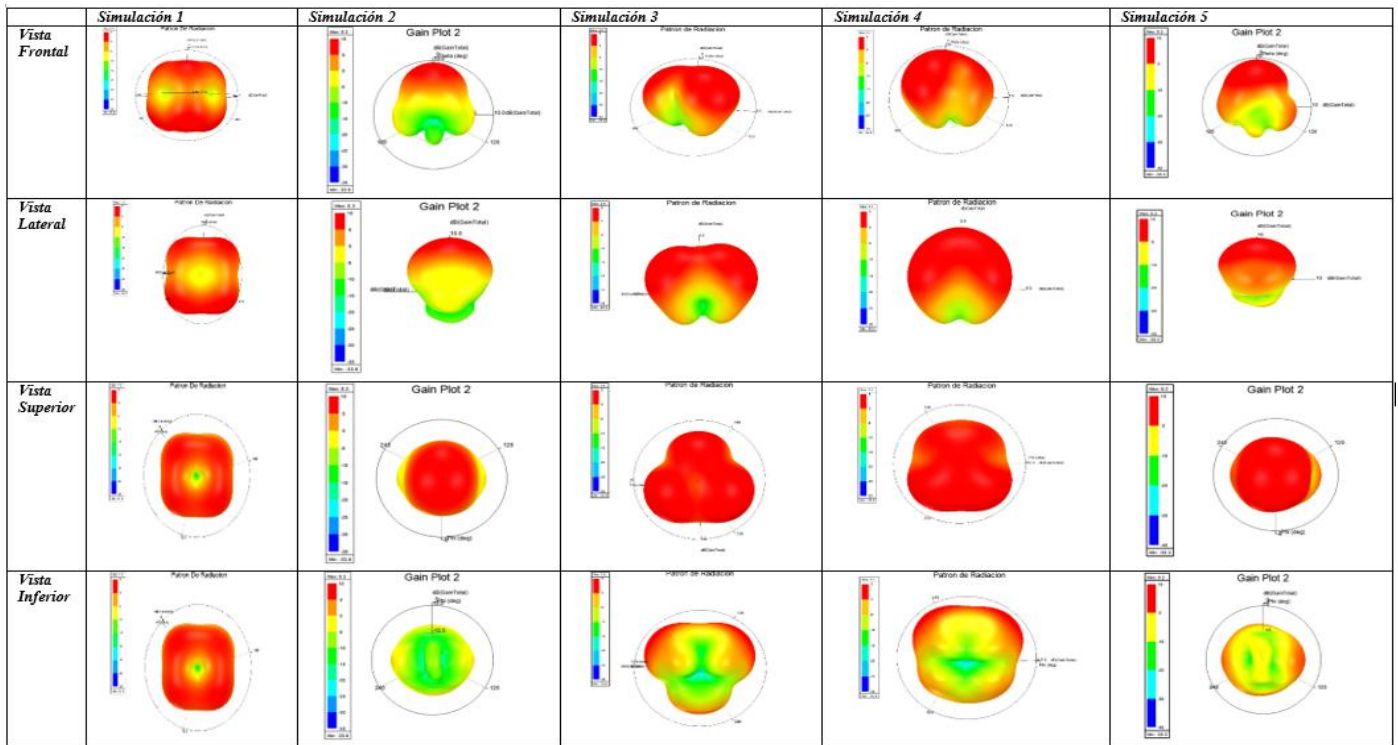


Figura 7. Patrón de radiación simulado en HFSS en 3D.

IV. ANÁLISIS

El material del dieléctrico es un componente que influye notablemente al momento de obtener los parámetros de la antena, Roger es un material que brinda buenos resultados en la banda de onda milimétrica, debido que posee una composición de cerámica de hidrocarburos laminado y un polímero termoestable cerámico compuesto, dando como resultado una variación en la permitividad dieléctrica [12], como se observa en la simulación 1 usando Rogers Ultralam 1227™ que tiene una permitividad relativa de 2.17 genera un coeficiente de reflexión de -23.4925 dB y Rogers RO3006™ con una permitividad relativa de 6.15 en las simulaciones 3 que genera un coeficiente de reflexión de -20.661 dB y en la simulación 5 de -19.9088 dB, indicando un comportamiento que mientras menor es la permitividad dieléctrica, el coeficiente de reflexión tiende a aumentar. En la simulación 2 se usa el material Taconic RF-60™ con una permitividad de 6.15 similar a Roger RO3006™ que provoca el aumento del coeficiente de reflexión a -18.9447dB debido al factor de disipación o pérdida tangencial que incrementa de 0.0025 (Roger RO3006) a 0.0028 (Taconic RF-60™), induciendo mayor dispersión de energía a través de la antena que genera pérdidas de reflexión.[13].

Para el diseño 1 de la antena de apertura, se encontró que a la frecuencia de 60,334 GHz la relación de la onda estacionaria (VSWR) es de 1.1018 dB lo que representa 0.05 de la reflexión de la onda por discontinuidad de impedancia, mientras que para

el diseño 4 la relación de la onda estacionaria (VSWR) es de 1.402 dB equivalente a 0.17, duplicando la reflexión debido a la composición de la antena escalonada o resonante que disminuye la transmisión del flujo eléctrico por medio de la asimetría del dieléctrico en comparación a la primera capa de la antena, tomando en consideración que si este valor tiende a 0 indica acople ideal [6],

En el diseño 1, la base de la antena posee una estructura uniforme como se observa en la figura 1 (c), es decir, las tres láminas por las que está compuesta tienen las mismas medidas en los ejes X Y, afectando el patrón de radiación generado, como se observa en la figura 7, esto se debe a que al implementar un modelo simétrico la conductividad de los materiales es similar en las tres capas por las que está compuesta la antena, formando un patrón de radiación omnidireccional, no obstante los diseños 2,3,4 y 5 poseen una estructura escalonada de las láminas, esto con el propósito de buscar un resonador de onda desde la parte inferior hacia la parte superior de la antena, afectando el patrón de radiación que debido a la interacción de los elementos de forma resonante generando la emisión de energía electromagnética de forma directa [14].

El polarizador está compuesto de un material denominado RGD 240 con una constante dieléctrica de 2.9, pérdida tangencial de 0.01 y la rugosidad en la fabricación es de 0.1 mm, el polarizador se propone para operar a una frecuencia

central de 60 [GHz] [7]. donde la variante más importante son los espacios entre las aberturas del atenuador w_1 y el grosor de las aberturas w_2 y w_3 como se observa en la figura 1 (a), dichas dimensiones se encuentran sobre la apertura de la antena generan ruido y afectan al flujo electromagnético como se visualiza en la figura 6 dispersando la energía hacia los bordes de la antena, generando la existencia de nulos y un desfase de frecuencia de 890 MHz como se obtuvo entre el diseño 3 a 60.08GHz al diseño 5 a 60,97GHz. [15]

El polarizador acoplado a la antena de apertura incide con mayor énfasis en el patrón de radiación y el campo eléctrico, debido que al estar obstaculizando el paso libre de las ondas electromagnéticas concentra de manera distinta la energía tal como se puede observar en la figura 6, provocando la existencia de lóbulos secundarios y la presencia de un lóbulo posterior de una dimensión considerable, por esta razón se generó un patrón omnidireccional en el diseño 1 y 4 patrones directivos en el resto de diseños, a su vez el polarizador afecta con menor grado de incidencia al coeficiente de reflexión $S(1,1)$ y VSWR debido a que actúa como un cuerpo reflectivo por su composición y densidad, los que generan una resistencia eléctrica disminuyendo el acople de la antena por la interacción con las láminas de cobre y aluminio que son materiales conductivos con el polarizador [9].

V. CONCLUSIONES

La frecuencia apropiada en la que debe operar la antena de apertura es a 60 GHz, sin embargo, conforme al análisis y simulaciones realizadas no se obtienen los resultados en los valores planteados para su óptimo funcionamiento, de tal manera que, el diseño 1 representa el modelo más apropiado donde se obtuvo un desplazamiento de frecuencia de 334 MHz por encima del valor propuesto, es decir un 0.556% más de la frecuencia central, dicho desplazamiento incrementando hasta 1.89 GHz en la simulación 4 que representa el 3.15% más de la frecuencia central, debido al dimensionamiento de la apertura, relacionando la ganancia con el cuadrado de la frecuencia [6], mismo que modifica la eficiencia de la apertura 0.556.

La antena de apertura con atenuador del diseño 1 muestra un patrón omnidireccional con una ganancia máxima de 0.33 dB con el lóbulo principal en 90° y 270° en Φ (Φ), sin embargo esta no es la mayor ganancia radiada de todos los diseños, pero si la óptima debido a que es el patrón con menor presencia de nulos los cuales se encuentran en rangos menores a -3 dB, como se visualiza en la figura 5, donde la mayor cantidad de nulos existentes se da en los patrones de radiación directivos debido a la incidencia del atenuador con el modelo escalonado o resonante planteado, ya que dispersa el campo eléctrico provocando la pérdida de potencia de radiación en los diseños.

- [1] H. Lv, P. Li, Q. Yan, and H. Zhang, "Energy-efficient multi-cell resource allocation in cognitive radio-enabled 5G systems," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2019, no. 1, 2019.
- [2] M. Abbas *et al.*, "Millimeter Wave Frequency Reconfigurable Antenna for 5G WLAN," *Proc. 21st Int. Multi Top. Conf. INMIC 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [3] K. Erdogan and H. A. Ilgin, "Analysis of Atmospheric Effects on Millimeter Wave Frequency Bands for Fifth Generation Mobile Networks," *ISMSIT 2018 - 2nd Int. Symp. Multidiscip. Stud. Innov. Technol. Proc.*, pp. 2–5, 2018.
- [4] A. F. Kaeib, N. M. Shebani, and A. R. Zarek, "Design and Analysis of a Slotted Microstrip Antenna for 5G Communication Networks at 28 GHz," *19th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. STA 2019*, pp. 648–653, 2019.
- [5] S. Sharma, Mainuddin, B. K. Kanaujia, M. K. Khandelwal, and S. Kumar, "Design of 4-element microstrip array of wideband reflector antenna with stable high gain characteristics," *Microsyst. Technol.*, vol. 3, 2018.
- [6] G. F. Hewitt, "Introduction and fundamentals," *HEDH Multimed.*, 2017.
- [7] K. X. Wang and H. Wong, "A wideband millimeter-wave circularly polarized antenna with 3-D printed polarizer," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 3, pp. 1038–1046, 2017.
- [8] H. Yi, S. W. Qu, K. B. Ng, C. H. Chan, and X. Bai, "3-D Printed Millimeter-Wave and Terahertz Lenses with Fixed and Frequency Scanned Beam," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 2, pp. 442–449, 2016.
- [9] M. J. Kim *et al.*, "One-step electrodeposition of copper on conductive 3D printed objects," *Addit. Manuf.*, vol. 27, no. November 2018, pp. 318–326, 2019.
- [10] D. M. Pozar, *MicroWave Engineering*, 4th Editio. United State of American, 2012.
- [11] R. Ulrich and S. C. Rashleigh, "Beam-to-fiber coupling with low standing wave ratio," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 14, p. 2453, 1980.
- [12] R. Felbecker, W. Keusgen, and M. Peter, "Estimation of permittivity and loss tangent of high frequency materials in the millimeter wave band using a hemispherical open resonator," *2011 IEEE Int. Conf. Microwaves, Commun. Antennas Electron. Syst. COMCAS 2011*, 2011.
- [13] P. Choudhary, D. Kaur, B. K. Kanaujia, and S. Dwari, "Triple-band frequency agile Monopole antenna using PIN diode for wireless communications," *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, vol. 0, pp. 4–7, 2017.
- [14] S. F. Jilani, O. P. Falade, T. Wildsmith, P. Reip, and A. Alomainy, "A 60-GHz ultra-thin and flexible metasurface for frequency-selective wireless applications," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 5, 2019.

- [15] A. M. Ali, M. El Atrash, S. R. Zahran, and M. A. Abdalla, "A low profile flexible circularly polarized antenna for wearable and WLAN applications," 2019 *IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Radio Sci. Meet. APSURSI 2019 - Proc.*, pp. 1603–1604, 2019.