

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:
DISEÑO DE UNA ANTENA DIPOLO MAGNETO ELÉCTRICA PARA
ONDAS MILIMÉTRICAS EN 5G**

**AUTOR:
ANTHONY EDUARDO SANTOS MORENO**

**TUTOR:
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

Quito, julio del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Anthony Eduardo Santos Moreno, con documento de identificación N° 1719581835, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “DISEÑO DE UNA ANTENA DIPOLO MAGNETO ELÉCTRICA PARA ONDAS MILIMÉTRICAS EN 5G.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, 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 mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Anthony Eduardo Santos Moreno

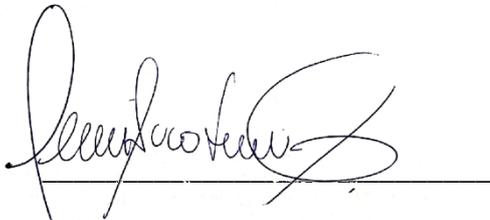
CI: 1719581835

Quito, julio 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 DIPOLO MAGNETO ELÉCTRICA PARA ONDAS MILIMÉTRICAS EN 5G” realizado por Anthony Eduardo Santos Moreno, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2020



Lenin Wladimir Aucatoma Guamán

CI: 1717985830

DEDICATORIA

El presente artículo tiene dedicatoria especialmente a Dios, a mis Padres, Eduardo Santos (+) e Irma Moreno por su inalcanzable esfuerzo y trabajo para seguir adelante en este trayecto llamado vida, a mi hermano por ser ese motor de impulso para lograr los objetivos trazados durante este tiempo, igualmente a mis familiares, amigos y personas que de una u otra forma fueron, son y serán importantes en mi vida, solo puede decir Dios le pague por toda la consideración, paciencia y las palabras de aliento que ayudaron hacer esto posible.

“Todo ESFUERZO, por más duro que sea el camino, al final tiene su RECOMPENSA”

Anthony Eduardo Santos Moreno.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios primeramente por la vida, la salud que es lo primordial para seguir adelante, a mi Padre por todas las enseñanzas y valores que hasta hoy en día me ayudan a comprender y asimilar mejor la vida, a mi Madre por sus enseñanzas de tenacidad, fuerza y determinación ante las adversidades de la vida, a mi hermano por estar siempre en los momentos alegres y tristes, a mis Tíos Julio, Rita, Guadalupe por su apoyo incondicional, de igual forma agradezco de manera especial al Ing. Lenin Aucatoma por ser eje en todo este proceso, sus consejos, y sobretodo su amistad.

Anthony Eduardo Santos Moreno.

Diseño De Una Antena Dipolo Magneto Eléctrica Para Ondas Milimétricas En 5G

1rs Aucatoma Guamán Lenin Wladimir
Ingeniería Electrónica
Docente Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
laucatoma@ups.edu.ec

2nd Santos Moreno Anthony Eduardo
Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
asantosm2@est.ups.edu.ec

Resumen

En el siguiente artículo se presenta el diseño de una antena dipolo magneto eléctrica para la banda de onda milimétrica en la frecuencia de 60 GHz, mediante el software ANSYS HFSS, medio donde a través de parámetros de diseño se determina el diseño idóneo en el cual se procede a hallar el coeficiente de reflexión, Relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR) y el patrón de radiación con la finalidad de realizar el proceso de optimización. La antena que se ha propuesto tiene valores que optimizan su utilización para la banda de onda milimétrica referentes a -22.27 dB para el parámetro S11, un VSWR de 1.34 y un patrón de radiación con ganancia máxima de 4.20 dB.

Palabras Clave: Antena Dipolo Magneto Eléctrica, patrón de radiación, 5G, Ondas milimétricas.

Abstract

This article presents the design of an electric magneto dipole antenna for the millimeter wave band at the frequency of 60 GHz, by means of the ANSYS HFSS software, a medium in which the design coefficient is used to find the coefficient of Reflection, Stationary Voltage Wave Ratio (VSWR) and the radiation pattern in order to perform the optimization process and look for the best design for the millimeter waveband. The antenna that has been proposed has values that optimize its use for the millimeter waveband referring to -22.27 dB for parameter S11, a VSWR of 1.34 dB, and a radiation pattern with a maximum gain of 4.20 dB.

Key words: Magneto Electric Dipole Antenna, radiation pattern, 5G, Millimeter waves.

I. INTRODUCCIÓN

La tecnología 5G abre un nuevo campo de investigación donde se propone obtener un sin número de aplicaciones para la vida cotidiana como: la integración diferentes sistemas inalámbricos como Wi-Fi, sistemas de corto alcance con redes de sensores inalámbricos, Wireless sensor networks (WSN), comunicaciones entre máquina - máquina (M2M)[1], para tal efecto 5G opera en la banda de onda milimétrica, destacando la banda de 60 GHz donde la miniaturización de los componentes de las antenas, la posibilidad de utilización excesiva de frecuencia[2] y un costo mínimo en el proceso de fabricación[3], hacen de esta un campo de investigación y de trabajo idóneo para crear nuevas alternativas de operación en los diferentes campos de tecnología.

Las antenas dipolo están formadas de dos elementos metálicos rectilíneos los cuales se encargan de transportar la energía electromagnética y están ubicados en el terminal de una línea de transmisión[4], por otro lado existe variaciones de la antena dipolo como: la antena dipolo magneto eléctrica [5], está conformada por cuatro elementos metálicos rectangulares y un patch con un cilindro cóncavo en forma de L [6], estos cuatro elementos forman los dos dipolos tanto eléctrico y magnético. Se escoge la antena dipolo magneto eléctrica por su alta eficiencia y alta ganancia en la banda de onda milimétrica, ancho de banda amplio y estructuras moldeables que facilitan el diseño de la misma [7]. En [2], se hace énfasis en las distancias que deben tener entre cada uno de los elementos que conforman los dipolos y la sonda en forma de L para una excitación uniforme de la antena dipolo magneto eléctrica.

La antena dipolo magneto eléctrica permitirá aportar a los procesos de investigación de sistemas radiantes en banda de onda milimétrica debido a las características que posee los dipolos y la facilidad de diseño e implementación [6], En la sección II, se muestra el diseño de una antena dipolo magneto eléctrica determinando características de tamaño y diseño haciendo énfasis en las dimensiones h_p , h_D correspondientes al patch principal y los dipolos que componen la antena, cabe recalcar que en la sección III se muestra la simulación y resultados obtenidos de la antena dipolo magneto eléctrica finalizando así con la sección IV y V donde se hace énfasis en el análisis y las conclusiones obtenidas respectivamente

II. DISEÑO DE LA ANTENA

En la figura 1 se muestra el diseño esquemático de la antena dipolo magneto eléctrica, el sistema radiante está compuesto por un patch con un cilindro como fuente principal (b) de la composición de la antena, cuatro dipolos (c) una tierra (d), un dieléctrico (a), vinculado al concepto de ayuda a la disipación de energía logrando así una armonía entre todos los elementos que componen esta antena, con la finalidad de tener una frecuencia de trabajo de 60 GHz.

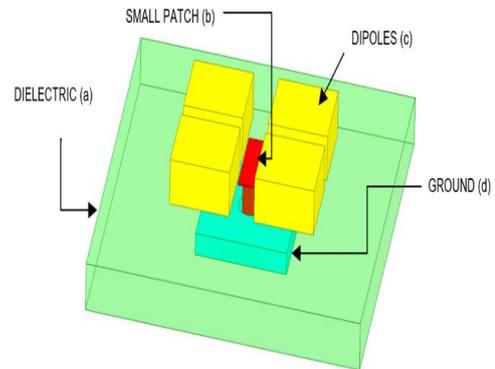


Figura 1. Antena Dipolo Magneto Eléctrica.

En la figura 2 se observa como está compuesta la fuente principal de la antena donde se destaca la fuente de excitación de la antena (1), el cilindro cóncavo (2), que forma una L con el patch principal (3), su estructura es netamente de oro, como elemento principal con una permitividad igual a 1 el cual por sus propiedades de conductividad interactúa con los demás elementos que componen la antena para llegar a los parámetros de trabajo en la banda de ondas milimétricas.

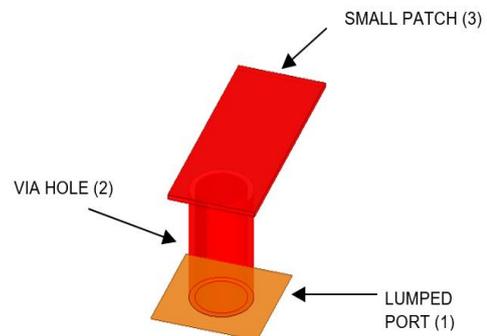


Figura 2. Composición del small patch.

La fuente principal está compuesta por un patch de 0.6 mm de largo y 0.245 mm de ancho, cabe recalcar que la altura del small patch será un parámetro fundamental que resaltar en este artículo porque tiene mayor incidencia en los

parámetros de diseño como son: el parámetro S11, VSWR y patrón de radiación.

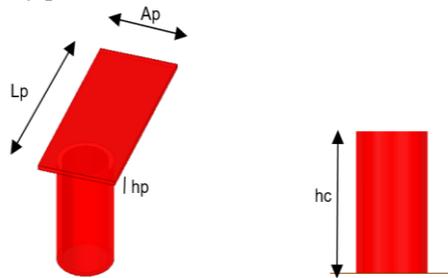


Figura 3. Medidas del small patch.

En la figura 4 se destaca las dimensiones que posee cada elemento que compone la antena dipolo magneto eléctrica, visto desde la parte superior (1) y la parte lateral de los elementos, en los cuales se aprecia las alturas que posee los dipolos (2), dieléctrico (3) y tierra (4).

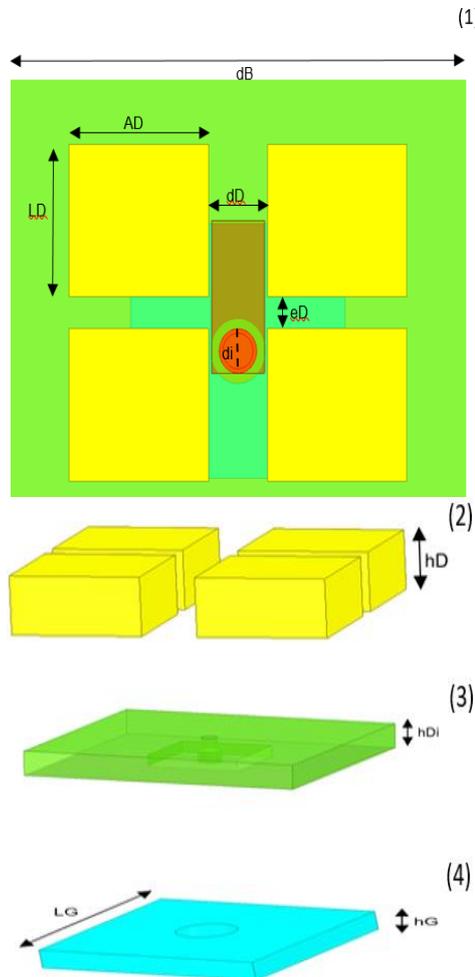


Figura 4. Acotaciones de la estructura de la antena Magneto Eléctrica Dipolo.

En la tabla 1 se referencia a las medidas utilizadas en el diseño tanto acotaciones y separaciones que tiene la antena dipolo magneto eléctrica.

Tabla 1. Medidas del diseño de la Antena Dipolo Magneto Eléctrica.

Diseño				
Partes	Símbolo	Descripción	Medida [mm]	
Dieléctrico	dbDi	distancia de la base	3	
	hDi	altura dieléctrico	0.3	
Dipolo	LD	largo dipolo	0.6	
	AD	ancho	0.65	
	hD	altura	0.285 1	
Small Patch	Patch	Lp	largo patch	0.6
		Ap	ancho patch	0.245
		hp	altura patch	0.011 9
	Cilindro	di	diámetro cilindro	0.175
hc		altura cilindro	0.3	
Tierra	LG	largo tierra	1	
	hG	altura tierra	0.138	
Separaciones	dD	distancia entre dipolos	0.275	
	eD	distancia menor entre dipolos	0.125	

III. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

El funcionamiento de la antena dipolo magneto eléctrica mediante el software ANSYS HFSS establece parámetros de diseño con la finalidad de que la antena trabaje a la frecuencia de 60 GHz, se observa en la tabla 2 las diferentes simulaciones realizadas donde se destaca la variación de los parámetros hD y hp. Se usa la frecuencia de 60 GHz debido a que la exploración y estudio de frecuencias más altas es necesario para que la tecnología se renueve cada día, teniendo así un espectro de frecuencias amplio para llevar acabo un sin número de aplicaciones [6], esto explica el rango de análisis entre 50 GHz hasta 70 GHz además la banda que oscila entre 3 GHz A 40 GHz conocida también como banda SHF esta comercialmente explotada por los servicios inalámbricos[7]. Se observa los cinco mejores diseños que muestran los resultados del parámetro S11 que está entre los -15 dB y -24 dB, como alcance de investigación se colocó un valor de -20 dB. Por medio de las simulaciones realizadas se observa que -20 dB es un valor de referencia para que la antena pueda trabajar en la banda de onda milimétrica, constituye una

relación de potencia radiada vs potencia disipada 1/1000[4], un VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) que es la relación de voltaje máximo vs voltaje mínimo que se medirá a lo largo de la línea de transmisión [8], esta se encuentra entre 1 y 2 dB, estableciendo un valor máximo de 1.5 dB debido a que es el valor máximo que puede soportar los equipos transmisores y así obtener un error mínimo y una mejor optimización en las comunicaciones[9] para estas antenas, el patrón de radiación que posee ganancia sobre los -3 dB bajo la línea máxima de la antena.

En la tabla 2 se observa los parámetros de cada diseño realizado con sus respectivas variaciones, donde se observa las dimensiones del dieléctrico, dipolo, patch y la tierra de la antena dipolo magneto eléctrica, además del material que posee cada uno de los elementos antes mencionados.

Tabla 2. Medidas del diseño1.

Simulación 1				
Nombre	Parámetros			Material
Dieléctrico	dbDi(largo)	dbDi(ancho)	hDi	Be_O
	3 mm	3mm	0.3mm	
Dipolo	LD	AD	hD	Cobre
	0.6mm	0.65mm	0.286m	
Patch	Lp	Ap	hp	Oro
	0.6mm	0.245 mm	0.0115m	
	di	hc		
	0.175m	0.3mm		
tierra	LG(largo)	LG(ancho)	hG	Plata
	1mm	1mm	0.138m	

Tabla 3. Medidas del diseño2.

Simulación 2				
Nombre	Parámetros			Material
Dieléctrico	dbDi(largo)	dbDi(ancho)	hDi	Be_O
	3 mm	3mm	0.3mm	
Dipolo	LD	AD	hD	Cobre
	0.6mm	0.65mm	0.283m	
Patch	Lp	Ap	hp	Oro
	0.6mm	0.245 mm	0.0119 mm	
	di	hc		
	0.175m	0.3mm		

tierra	LG(largo)	LG(ancho)	hG	Plata
	1mm	1mm	0.138m	

Tabla 4. Medidas del diseño3.

Simulación 3				
Nombre	Parámetros			Material
Dieléctrico	dbDi(largo)	dbDi(ancho)	hDi	Be_O
	3 mm	3mm	0.3mm	
Dipolo	LD	AD	hD	Cobre
	0.6mm	0.65mm	0.285m	
Patch	Lp	Ap	hp	Oro
	0.6mm	0.245 mm	0.01189 mm	
	di	hc		
	0.175m	0.3mm		
tierra	LG(largo)	LG(ancho)	hG	Plata
	1mm	1mm	0.138m	

Tabla 5. Medidas del diseño4.

Simulación 4				
Nombre	Parámetros			Material
Dieléctrico	dbDi(largo)	dbDi(ancho)	hDi	Be_O
	3 mm	3mm	0.3mm	
Dipolo	LD	AD	hD	Cobre
	0.6mm	0.65mm	0.285m	
Patch	Lp	Ap	hp	Oro
	0.6mm	0.245 mm	0.0119 mm	
	di	hc		
	0.175m	0.3mm		
tierra	LG(largo)	LG(ancho)	hG	Plata
	1mm	1mm	0.138m	

Tabla 6. Medidas del diseño5.

Simulación 5				
Nombre	Parámetros			Material
Dieléctrico	dbDi(largo)	dbDi(ancho)	hDi	Be_O
	3 mm	3mm	0.3mm	
Dipolo	LD	AD	hD	Cobre
	0.6mm	0.65mm	0.2851 mm	
Patch	Lp	Ap	hp	Oro

B. Relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR)

En la figura 7 se muestra un VSWR que tiene un valor de 1.3403 dB en la frecuencia de 60 GHz, este valor oscila entre 1 dB y 2 dB, cabe decir que si VSWR fuera igual a uno pierde 3 dB dando como resultado una pérdida del 50 % de potencia de transmisión.

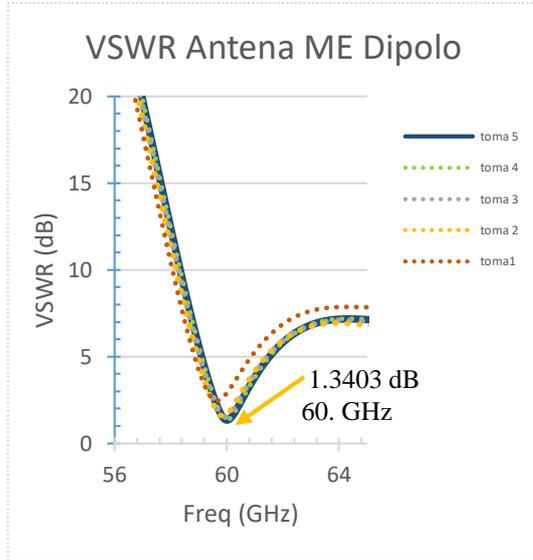


Figura 7. VSWR de cada diseño de la antena.

En la tabla 9 se puede observar los valores de VSWR obtenidos en cada diseño, se aprecia que los valores van desde 2.44 dB hasta 1.34 dB. Donde el valor idóneo que cumple con los parámetros de diseño es el correspondiente al diseño 5.

Tabla 9. Valores de VSWR de cada diseño.

	Freq (GHz)	VSWR
Diseño 1	59.64	2.4449
Diseño 2	59.68	2.3545
Diseño 3	59.91	1.9405
Diseño 4	60.04	1.5151
Diseño 5	60.00	1.3403

C. Patrón de radiación

En la figura 8 se aprecia el lóbulo de radiación de cada uno de los diseños con un corte a Phi(Φ) igual a 0°, cabe señalar que cada diseño esta sobre los -3 dB.

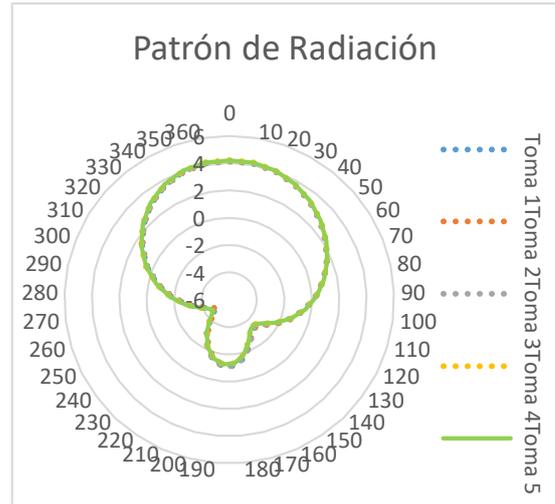


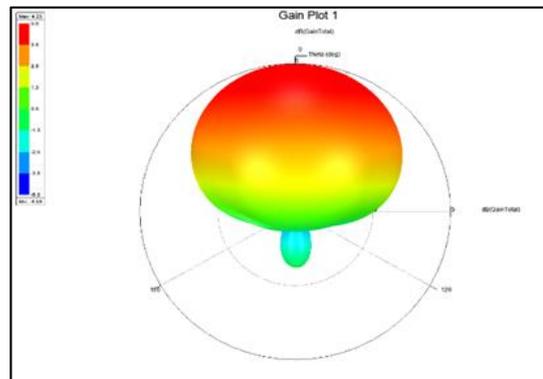
Figura 8. Patrón de Radiación de la antena.

En la tabla 10 se detalla los valores de ganancia máximos y mínimos de la antena dipolo magneto eléctrica obtenidos del patrón de radiación de cada diseño realizado.

Tabla 10. Ganancia Max y Min de la antena dipolo magneto eléctrica.

	Ganancia max [dB]	Ganancia min[dB]
Diseño 1	4.16	-1.15
Diseño 2	4.12	-1.25
Diseño 3	4.13	-1.13
Diseño 4	4.15	-1.25
Diseño 5	4.20	-1.33

En la figura 9 se observa el patrón de radiación obtenido de cada diseño simulado de la antena dipolo magneto eléctrica, se toma una sola grafica ya que el patrón de radiación tiene variaciones casi imperceptibles en forma, pero si perceptibles en ganancia para todos los diseños.



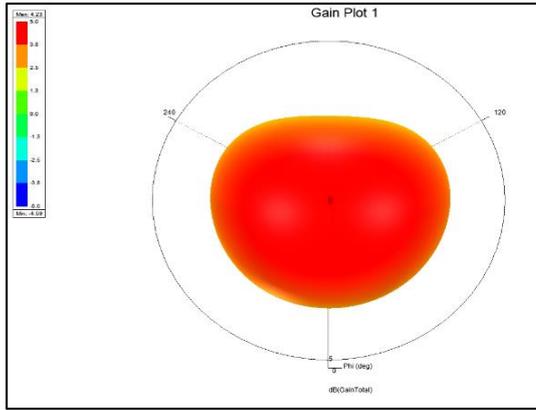


Figura 9. Lóbulos de radiación de cada diseño de la antena Dipolo Magneto Eléctrica.

D. Campo eléctrico generado desde el Patch de la Antena

En la figura 10 se muestra el campo vectorial eléctrico (E) generado desde el patch desplegándose hacia toda la antena. Donde se distingue como la mayor cantidad de potencia emana desde el patch principal hacia los dipolos los cuales hacen que la energía se mantenga entre ellos y las pérdidas de potencia que se observa de color azul al disiparse la energía.

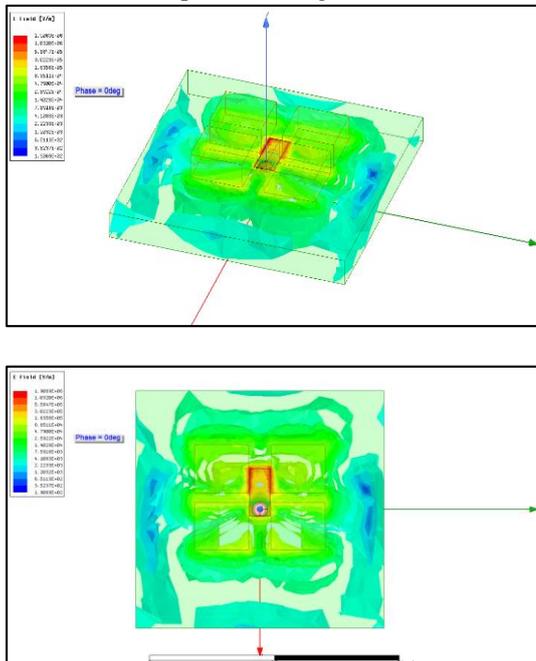


Figura 10. Comportamiento del Campo Eléctrico en la antena dipolo magneto eléctrica.

IV. ANÁLISIS

Referente al diseño se realizó diferentes variaciones, en los cuales se varió medidas en la altura y el tipo de material a utilizarse para el dieléctrico, llegando así a los 5 mejores diseños, en los cuales el factor determinante para lograr que la antena trabaje en la banda de onda milimétrica

a 60 GHz, fue la variación de medida en el parámetro (hp) referente al patch de excitación y el parámetro (hD) correspondiente a los dipolos que componen la antena, los materiales utilizados fueron idénticos en los diferentes diseños. Se utilizó para la topología de la antena materiales como oro para la fuente de excitación que es el patch en forma de L como se muestra en la figura 2 con una permitividad de 0.99996, para los dipolos se utilizó el cobre con una permitividad de 0.99991, plata como material para la tierra con permitividad de 0.9998 y Be₀ para el dieléctrico de la antena, este último debido a su permitividad de 6.15, permite aumentar la capacidad de control de potencia [10] que irradia la antena dipolo magneto eléctrica.

La variación geométrica realizada principalmente en los campos hp y hD referentes a la altura del patch principal y la altura de los dipolos respectivamente, establece que el rango de operación de la antena magneto eléctrica se ajuste a los 60 GHz, ya que se encontró un patrón a seguir, donde consistía en reducir gradualmente la medida del parámetro hp hasta un valor de 0.119 mm y aumentar el parámetro hD hasta un valor de 0.2851 mm como se muestra en la tabla 1, por otra parte se probó varios materiales en los cuales la variación más significativa que se obtuvo es la selección del material para el dieléctrico de la antena magneto eléctrica, en que se destaca el material FR4_epoxy con una permitividad de 4.4 generaba una ganancia por debajo de los -20dB, infería en el valor del VSWR dando como resultado un valor que sobrepasaba el valor máximo de 1.5 dB y un patrón de radiación con ganancia por debajo de los -3 dB requeridos, para corregir y llegar a los valores requeridos se utilizó como material dieléctrico el Be₀ (óxido de berilio), muestra valores de ganancia iguales a -22.27 dB como se demuestra en la figura 5, un valor de 1,34 dB para el VSWR que se visualiza en la figura 7 y un patrón de radiación con una ganancia de 4.20 dB.

En la tabla 9 se muestra los diferentes resultados obtenidos de VSWR, donde el diseño 5 con una frecuencia de 60.00 GHz y con un valor de VSWR igual a 1.34 dB es considerado como el mejor resultado, para obtener el valor VSWR depende de la variación del parámetro hp del patch que conforma el acople de impedancia, la disminución de medida en el parámetro hp condujo a que el valor de VSWR sea el deseable en el rango de 1 a 2 dB, se recalca que el cilindro que forma parte del acople de impedancia se mantuvo con el mismo valor como se observa en la tabla 1.

Los cuatro elementos metálicos forman los dos dipolos de la antena en este sentido se comparten como dipolos eléctricos y magnéticos conjuntamente con el acople de impedancias en forma de L, donde el efecto que producen en la antena se advierte en la figura 10, donde el campo eléctrico fluye alrededor de los dos dipolos, generándose desde el acople de impedancias en dirección unidireccional [2], las corrientes eléctricas y magnéticas equivalentes están desfasadas 90° en diferencia de fase, igual en fuerza y ortogonales entre sí, lo que resalta el funcionamiento como una antena complementaria [6], cabe decir que en los diseños realizados el comportamiento del campo eléctrico varía solo en la potencia generada mas no en la dirección que toma el mismo.

V. CONCLUSIONES

Se determinó que el diseño 5 es el modelo idóneo para la antena dipolo magneto eléctrica donde se obtuvo una ganancia de -22.2701 dB y un ancho de banda de 1270 MHz, y que se ajusta a una frecuencia de trabajo de 60GHz, cumpliendo con los parámetros requeridos para trabajar en la banda de onda milimétrica, para lograr que la antena trabaje a la frecuencia de 60 GHz se modificó los parámetros hD y hp referentes a los dos dipolos y el patch de excitación como se muestra en la tabla 2, iniciando con un valor variación de 0.286 mm para hD y 0.115 mm para hp hasta culminar con 0.2851 mm para hD y 0.119 mm para hp. Analizando el comportamiento de cómo se irradia la energía de forma unidireccional, obteniendo un campo eléctrico horizontal y un campo magnético vertical, esto se lo aprecia de una mejor manera en la figura 10 donde se puede observar la incidencia y el comportamiento del campo eléctrico en la antena.

Los diferentes diseños realizados determinan que los componentes cruciales para llegar al diseño que trabaje en la banda de onda milimétrica son el patch de excitación y los dipolos que la conforman, ya que al cambiar y ajustar sus medidas a valores pequeños en el caso del patch y valores altos en el caso de los dipolos se observa el afinamiento de la antena para trabajar a 60 GHz, , cabe recalcar que los elementos tomados como materiales para la composición de la antena, en el caso del oro, el cobre y la plata son materiales con una conductividad alta, no obstante el costo de implementación del oro en relación con los otros materiales conductores es elevado pero con la gran diferencia que garantiza una conductividad y resistencia del material para trabajar en cualquier

tipo de condiciones. Por otro lado, el elemento que tiene mayor impacto en la antena es el Óxido de berilio (Be₀) con una permitividad de 6.8, el cual se utilizó como material para el dieléctrico.

REFERENCIAS

- [1] R. G. Perea Tamayo, "5G: UNA NUEVA GENERACIÓN PARA UNA NUEVA SOCIEDAD 5G: A new generation for a new society Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional," *Hamut'ay*, vol. 1, no. 1, pp. 2–6, 2014.
- [2] Z. Guo, H. Tian, X. Wang, and Y. Ji, "Wide-bandwidth, high-gain, low-temperature cofired ceramic magneto-electric dipole antenna and arrays for millimeter wave radio-over-fiber systems," *Photonics Res.*, vol. 2, no. 4, p. B40, 2014.
- [3] A. Valero-nogueira, F. Vico, and D. Sanchez-escuderos, "Diseño de una DRA Alimentada por Ranura y Guía de Ondas Coplanar mediante la Teoría de Modos Característicos a 60GHz en Tecnología LTCC," no. April 2015, 2014.
- [4] F. Emilio Monachesi, Ana Maria Frenzel, Guillermo Chaile, Carrasco Agustín and A. G. López., "Conceptos Generales De Antenas," p. 20, 2011.
- [5] K. Luk and H. Wong, "A New Wideband Unidirectional Antenna Element," *Int. J. Microw. Opt. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 35–44, 2006.
- [6] M. Li and K. Luk, "Wideband Magneto-Electric Dipole Antenna for 60-GHz Millimeter-Wave Communications," vol. 63, no. 7, pp. 3276–3279, 2015.
- [7] D. M. Pozar, *MICROWAVE ENGINEERING*, Fourth Edi. United States, 2012.
- [8] J. P. Dunsmore, "Introduction to Microwave Measurements," *Handb. Microw. Compon. Meas.*, pp. 1–65, 2012.
- [9] S. R. Bhongale, "Mg-Nd-Cd Ferrite as Substrate for X-Band Microstrip Patch Antenna," *J. Magn. Magn. Mater.*, p. 165918, 2019.
- [10] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays Electrical engineering, antennas and propagation*. 1995.