

**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 LA
ANTENA DIPOLO DE MEDIA ONDA EN LAS FRECUENCIAS DE 60, 67 Y
74 GHZ**

**AUTORES:
FAUSTO XAVIER LÓPEZ ORBEA
ISRAEL SEBASTIÁN DE LA TORRE TRUJILLO**

**TUTOR:
LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN**

Quito, julio del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

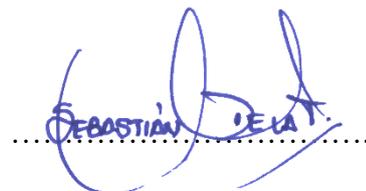
Nosotros, Fausto Xavier López Orbea e Israel Sebastián De La Torre Trujillo, con documentos de identificación N° 1721518999, N° 1715247787 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado **COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE LA ANTENA DIPOLO DE MEDIA ONDA EN 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.



Fausto Xavier López Orbea

C.C: 1721518999



Israel Sebastián De La Torre Trujillo

C.C: 1715247787

Quito, julio 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 Fausto Xavier López Orbea e Israel Sebastián De La Torre Trujillo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, julio de 2021



Ing. Lenin Wladimir Aucatoma Guamán

C.C: 1717985830

DEDICATORIA

A mi amada madre, quien con su infinito amor, basta sabiduría y apoyo incondicional supo siempre ayudarme de la mejor manera en los momentos más precisos, gracias a ella hoy estoy donde estoy, soy el hombre que soy y tengo todo lo que tengo, a quien me dedicó los mejores años de su vida con tal de verme triunfar y lograr la consecución de mis metas y objetivos, quien con sus consejos y ejemplo me motivó siempre a seguir adelante, a confiar en mí y a nunca darme por vencido; por todo esto y mucho más te estaré siempre eternamente agradecido mami.

Con amor tu hijo,
Fausto Xavier López Orbea

DEDICATORIA

Dedico todo el esfuerzo y constancia que representa este trabajo final a Dios quien me ha forjado a lo largo de toda esta historia. Ha permanecido a mi lado en cada batalla y ha sido cómplice de muchos sueños.

A mis padres Gustavo De la Torre y Rocío Trujillo, quienes con su amor me han dado todo y me han motivado a llegar muy lejos, a no dar menos que lo mejor y sobre todo a no rendirme nunca.

A mi hermano Juan Andrés De la Torre, quien es mis ganas, mi alegría, mi vida misma y mi todo. Es y será siempre mi motor para seguir adelante.

A mi tío Carlos Roberto Hidalgo, quien me ha apoyado de manera incondicional y ha sido parte de cada éxito en mi vida.

A todos mis amigos, porque han formado parte de cada ocurrencia y por hacer que las risas nunca falten en todo momento.

A esa persona especial, quien me ha acompañado con mucho cariño y me ha iluminado el día con una sonrisa.

Finalmente, me dedico esta nueva victoria como símbolo de amor propio y de que puedo llegar aún más lejos.

Israel Sebastián De la Torre Trujillo

AGRADECIMIENTO

Mi más grande y profundo agradecimiento a mis padres Gloria Yolanda Orbea Herrera y Fausto Iván Ramiro López León por todo el amor y apoyo recibido en cada momento de mi vida, quienes siempre me motivaron y han sido el pilar más importante para alcanzar los logros que he obtenido.

Agradezco también a mi hermano gemelo Pablo Alexander López Orbea con quien he compartido los mejores momentos y anécdotas de mi vida desde el preciso momento en que llegamos juntos a este mundo.

A mis tíos Patricio López y Argentina Chango y a mis primos Carla López, Patricio López y Harold López (el famoso requintista, ex-gordito ahora fitness, que con sus alegrías y ocurrencias alegra a quien tenga el placer de degustar una salchipapa con él) quienes me ayudaron cuando necesité realizar mis pasantías y desde entonces han sido un gran apoyo, y hemos compartido inolvidables y gratos momentos juntos, los llevo en el corazón.

A mi amigo, el ingeniero Lenin Aucatoma, quien como docente con gran vocación y tutor supo transmitirme sus conocimientos, y dirigir con gran sabiduría el desarrollo de este artículo.

A mis docentes, quienes aportaron con el conocimiento de ingeniería necesario para hoy estar culminando esta etapa, quienes con su exigencia me inculcaron siempre a esforzarme cada vez más, ahora comprendo el valor de la disciplina y constancia, gracias por haberme formado no solo como un ingeniero con gran conocimiento sino como un ingeniero con valores y principios.

A mis amigos y compañeros con quienes compartí grandes e inolvidables momentos, gracias por las gratas experiencias y lo aprendido durante nuestra carrera universitaria.

A mi compañero de titulación y amigo Israel De La Torre, quien con su constancia y carisma desarrollamos este estudio de forma eficiente y amena, aportando con buenas observaciones logrando que este estudio vaya más allá de lo planteado inicialmente.

Finalmente, a la Universidad Politécnica Salesiana por haberme brindado una educación de calidad, por haber sido mi segundo hogar y por todas las experiencias y momentos vividos durante toda mi formación profesional.

Fausto Xavier López Orbea

AGRADECIMIENTO

Quiero empezar agradeciendo a Dios por ponerme siempre en el momento y lugar correcto, por las enseñanzas de cada derrota y victoria.

A mis padres quienes han sido la fuente de inspiración para esta nueva meta cumplida. Sin su amor, sin su sacrificio, sin ustedes este triunfo no sería posible. Agradezco todas las madrugadas y desveladas en las cuales su cariño siempre estuvo presente, a que nunca me faltó algo pues con ustedes siempre lo tuve todo.

A mi hermano por brindarme su amor y enseñarme a valorar la vida a través de sus ojos.

A mis amigos, con los cuáles nos dimos la mano en clases y supimos salir adelante frente a cada proyecto, prueba o examen. Eve, Leo, Carlitos, Tony, Chino, China, Henry y Pollo gracias por su amistad incondicional y por la fortuna de compartir tantas experiencias.

Al Ing. Lenin Aucatoma, quien como profesional, tutor y amigo a sido increíble. Gracias por reconocer nuestros aciertos y por incentivarnos a mejorar y sobresalir siempre.

A la Ing. Verónica Soria, quien a través de sus enseñanzas ha sido parte de esta meta cumplida. Gracias por ser de igual manera una maestra y amiga extraordinaria.

A los docentes quienes me han permitido desarrollar destrezas y habilidades a lo largo de mi vida Universitaria, inculcando siempre mucho profesionalismo y valores como ser humano.

A mi compañero de titulación Fausto López, quien aportó con muchas ideas novedosas y gracias a esto pudimos llevar nuestra investigación al siguiente nivel.

Finalmente, a la Universidad Politécnica Salesiana, por brindarme una educación de excelencia en todo momento.

Israel Sebastián De la Torre Trujillo

Comparación de los parámetros de dispersión de la Antena Dipolo de Media Onda en las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz

Fausto Xavier López Orbea
Departamento de Ingeniería Electrónica
y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
flopezol@est.ups.edu.ec

Israel Sebastián De la Torre Trujillo
Departamento de Ingeniería Electrónica
y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
idel2@est.ups.edu.ec

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

Resumen— Este artículo presenta la comparación de los parámetros de dispersión de antenas dipolo de media onda. Se las diseñará de tal manera que presenten su frecuencia de resonancia en 60, 67 y 74 GHz, una vez logrado eso se las someterá a variaciones de sus materiales de construcción para analizar el impacto que se produce sobre sus parámetros de dispersión, patrón de radiación y frecuencia de resonancia pertenecientes a la banda de frecuencias extremadamente altas o banda de ondas milimétricas. Este estudio muestra las diferentes formas, combinación de materiales y parámetros de construcción que se emplearon en el modelamiento de cada antena. En los modelos sintonizados se evidencia que el aumento de la frecuencia de resonancia desde los 60 GHz hasta los 74 GHz causa una variación directamente proporcional en sus parámetros de dispersión, es decir, el desfase de VSWR y parámetro S(1,1) que hay entre los modelamientos sintonizados con respecto a los modelamientos correspondientes para cada frecuencia aumenta a medida que aumenta la frecuencia de resonancia.

Palabras Clave— Parámetros de dispersión, antena dipolo, media onda, frecuencia de resonancia.

Abstract— This article presents the comparison of the dispersion parameters of half wave dipole antennas. They will be designed in such a way that they present their resonance frequency at 60, 67 and 74 GHz, once this is achieved, they will be subjected to variations in their construction materials to analyze the impact that will be produced on their dispersion parameters, radiation pattern, and resonance frequencies belonging to the extremely high frequency band or millimeter wave band. This study shows the different forms, combination of materials and construction parameters that were used in the modeling of each antenna. In the tuned models it is evidenced that the increase in the resonance frequency from 60 GHz to 74 GHz causes a directly proportional variation in its dispersion parameters, this means, the VSWR phase shift and parameter S (1,1) that exist between the tuned models with respect to the corresponding models for each frequency increases as the resonant frequency increases.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la comunicación inalámbrica basada en tecnología 5G ha llamado la atención de investigadores, ya que va desde la comunicación de corto alcance hasta los enlaces de mediano y largo alcance. [1]

Las antenas de hilo están formadas por conductores, delgados, cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda. El tipo más común son las antenas de dipolo, estas antenas son las más sencillas de todas. El dipolo de media longitud de onda o antena de Hertz está conformada por un hilo conductor de longitud igual a media longitud de onda a la frecuencia de trabajo, con una separación en la mitad, en cuyo centro se coloca un generador o una línea de transmisión. [2]

Muchas de las bandas de ondas milimétricas se utilizan en radares de vehículo: el Ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones (MIC) de Japón y la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de Estados Unidos de América han asignado la banda de 76 GHz para este uso. [3]

La resistencia de radiación de una antena dipolo de media longitud de onda es de 73Ω y es también, la resistencia en los terminales de entrada debido a que, la corriente es máxima en estos terminales. La reactancia o parte imaginaria de la impedancia es igual a $j42.5 \Omega$ por lo tanto la impedancia total para una antena dipolo de media longitud de onda es igual a $Z_{in} = 73 + j42.5 \Omega$ [4]

Las antenas que se diseñaron para este estudio y posterior análisis de sus parámetros están compuestas por 2 conductores y un dieléctrico entre estos 2 conductores con una longitud igual a $\lambda/2$, de extremo a extremo; para las antenas dipolo se recomienda el uso de baluns, por lo que uno de los conductores se conecta al positivo del balun y el otro conductor se conecta al negativo del balun, sin embargo, también se podría utilizar un cable coaxial de 75 ohms de impedancia para conectar los brazos de la antena ya que su resistencia de radiación es $73 [\Omega]$. Se considera el diseño de 3 antenas para 60, 67 y 74 GHz de frecuencia de resonancia.

En este artículo se realiza la comparación de los parámetros de dispersión de antenas de hilo, específicamente antenas dipolo de media onda en el cual se analiza el problema que se da al diseñar antenas que operan en frecuencias extremadamente altas el cual es que, al trabajar con este tipo de frecuencias, los parámetros de dispersión y radiación de estas

antenas se comportan de manera diferente que en antenas que resuenan en frecuencias inferiores. De igual manera, el diseño de antenas que operan en este tipo de frecuencias no siguen los mismos criterios que se realiza al diseñar antenas de frecuencias más bajas ya que, por ejemplo, no sigue la regla que establece que a mayor frecuencia el tamaño de la antena es menor, es decir, el tamaño de la antena debería ser menor a medida que su frecuencia de resonancia aumenta.

En [5] se desarrollan 3 antenas microstrip resonantes en las frecuencias de 60, 67 y 74 [GHz] y en [6] se diseña una antena dipolo de media longitud de onda para aplicaciones Wi-Fi, en ambos casos se hace un estudio de los parámetros de dispersión. Estos 2 artículos se han tomado como punto de partida para poder desarrollar este estudio sobre el impacto de la variación de la frecuencia de resonancia sobre los parámetros de dispersión de antenas dipolo de media onda.

II. DISEÑO DE LAS ANTENAS

En la figura 1, se presenta el modelo general de una antena dipolo donde se visualizan las variables de cada parámetro de construcción.

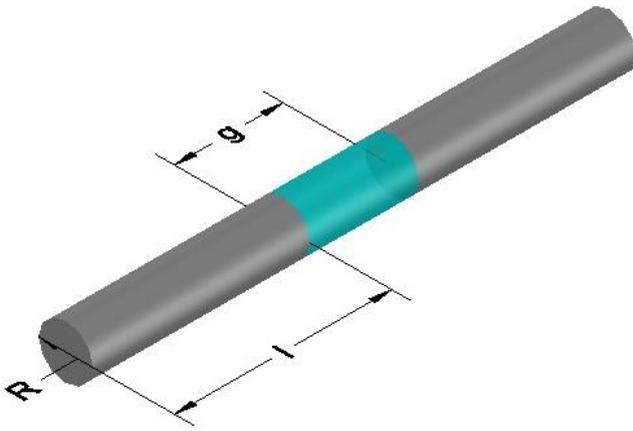


Fig. 1. Modelo Propuesto de Antena Dipolo

Se modelaron 3 antenas dipolo de media longitud de onda con frecuencias de resonancia de 60, 67 y 74 GHz respectivamente, en ANSYS HFSS, con distintos materiales tanto para los brazos conductores como para el dieléctrico presente entre ellos. Los brazos matemáticamente tienen una longitud

$$l = \frac{\lambda - 2g}{4} [m] \quad (1)$$

los cuales poseen un radio igual a

$$R = 0.0005\lambda [m]. [7] \quad (2)$$

Los brazos se conectan a la alimentación que se encuentra en el espacio que hay entre los 2 directores denominado como "g" cuyo valor se obtiene al reemplazar el valor del radio en la fórmula de la impedancia

$$|Z_0| = 120 \ln \left(\frac{g}{R} \right) [\Omega]. [8] \quad (3)$$

Donde "g" es el espacio entre los brazos y "R" el radio; al despejar "g" se obtiene

$$g = R e^{\frac{|Z_0|}{120}} [m]. \quad (4)$$

Mediante estas ecuaciones se obtuvieron las medidas especificadas en la Tabla I usando acero inoxidable como material para los brazos y aire como material del dieléctrico en el espacio "g". Al verificar sus frecuencias de resonancia, las cuales son aquellas donde se muestra el punto mínimo de las curvas de VSWR y parámetro S_{11} . Sin embargo, estas no eran las requeridas, por las que se tuvo que realizar ajustes en sus parámetros de construcción obteniendo así, de manera experimental, los valores mostrados en la Tabla I.

TABLA I. VALORES Y DIMENSIONES DE MODELOS MATEMÁTICOS DE ANTENA DIPOLO DE MEDIA ONDA.

Material del Conductor	Acero Inoxidable			
Aislante	Aire / Vidrio			
Frecuencia de resonancia esperada F_{RE} [GHz]	60	67	74	
Aire	Frecuencia de resonancia f_0 [GHz]	56,0600	62,2300	68,6100
Vidrio	Frecuencia de resonancia f_0 [GHz]	56,0700	62,4100	68,8900
	Lambda [mm]	5,00	4,48	4,05
	Longitud de Antena Dipolo de Media Onda L[mm]	2,50	2,24	2,03
	Gap g[mm]	0,0051	0,0045	0,0041
	Radio del Brazo R[mm]	0,0025	0,0022	0,0020
	Longitud de Brazo l[mm]	1,2475	1,1171	1,0115

Las antenas dipolo de media longitud de onda, $\frac{\lambda}{2}$, poseen un patrón de radiación omnidireccional el cual es muy característico ya que, se asemeja a un toroide con radio interior igual a 0. Las antenas dipolo desarrolladas se consideran como antenas simétricas ya que su alimentación se ubica en la mitad de la antena, lo cual causa que el campo magnético tenga su origen por la circulación de la corriente en el dipolo y alrededor del conductor en determinados instantes de tiempo, con la formación de valores máximos, mínimos y cero.

Esto genera ondas viajeras de campo magnético que viajan en direcciones opuestas y normales al dipolo, pero distribuidas en un plano perpendicular al campo eléctrico y en fase con el otro campo. [9]

En el simulador la interfaz de alimentación fue representada mediante un lumped port o puerto agrupado de $73[\Omega]$, el cual es un tipo de excitación que provee una fuente de campo electromagnético lo cual lo hace idóneo para la simulación de antenas ya que provee parámetros S, como el S_{11} . Además, un puerto agrupado es análogo a una fuente de corriente y también se puede usar para excitar líneas de transmisión de uso común. Los puertos agrupados también son útiles para excitar espacios de voltaje. Generalmente se aplican internamente al espacio de la solución.[10]

Se realizaron modelamientos para las frecuencias de resonancia de 60, 67 y 74 GHz variando los materiales de construcción tanto para los conductores como para el dieléctrico presente en el espacio "g" entre los brazos conductores, en la Tabla II se muestran los materiales utilizados con algunos de sus parámetros físicos.

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DE CONDUCCIÓN ELÉCTRICA DE MATERIALES EMPLEADOS EN LAS SIMULACIONES.

Material	Permitividad Relativa	Permeabilidad Relativa	Conductividad a Granel [siemens/m]
Acero Inoxidable	1	1	1100000
Oro	1	0.99996	41000000
Cobre	1	0.999991	58000000
Aluminio	1	1.000021	38000000
Vidrio	5.5	1	0

A. Diseño de Acero Inoxidable y Aire

En la Tabla III se presentan las medidas de cada componente de estas antenas, encontradas de manera experimental para que resuenen en las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz respectivamente presentando valores aceptables de VSWR y parámetro S_{11} .

TABLA III. DIMENSIONES DE MODELOS SINTONIZADOS DE ANTENA DIPLO DE MEDIA ONDA, CON AISLANTE DE AIRE EN FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE 60, 67 Y 74 GHz.

Material del Conductor	Acero Inoxidable		
Aislante	Aire		
Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	60,0000	67,0000	74,0000
Gap g[mm]	0,422	0,380	0,324
Radio del Brazo R[mm]	0,221	0,195	0,200
Longitud de Brazo l[mm]	0,720	0,650	0,600

B. Diseño de Acero Inoxidable y Vidrio

Según la fundamentación teórica realizada para la elaboración de este artículo no se encontró ningún estudio previo realizado con la experimentación de la variación del material dieléctrico presente entre los brazos conductores, se encontró que siempre se ha utilizado aire por lo que se decidió reemplazarlo por vidrio el cual tiene una permitividad relativa más alta que el aire.

La permitividad es un parámetro físico de los materiales que describe cuanto son afectados por un campo eléctrico, expresa la tendencia de un material a polarizarse causando que se anule internamente el campo proporcionalmente a la constante de permitividad. Para ver los efectos que provoca el uso de un material dieléctrico entre los brazos con mayor permitividad que el aire sobre los parámetros de dispersión de cada antena, se ha empleado un vidrio con una permitividad relativa igual a 5.5.

En los diseños donde se varió solo el material conductor se observó que el acero inoxidable fue el que mejor características presentó, es por ello que se lo eligió como material de los brazos en este modelamiento.

En la Tabla IV se presentan las medidas de cada componente de estas antenas sintonizadas de manera experimental para que resuenen en las frecuencias de 60, 67 y 74 GHz respectivamente presentando valores aceptables de VSWR y parámetro S_{11} .

TABLA IV. DIMENSIONES DE SINTONIZACIÓN PARA ANTENA DIPLO DE MEDIA ONDA, CON AISLANTE DE VIDRIO EN FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE 60, 67 Y 74 GHz.

Material del Conductor	Acero Inoxidable		
Aislante	Vidrio		
Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	60,000	67,0000	74,000
Gap g[mm]	1,200	1,082	0,998
Radio del Brazo R[mm]	0,480	0,43188	0,399
Longitud de Brazo l[mm]	0,498	0,44011	0,395

III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Desfase entre modelos matemáticos y modelos sintonizados.

El desfase entre modelos matemáticos y modelos sintonizados es el valor del ajuste que pertenece a la variación de las dimensiones de la antena correspondiente a cada modelo según su frecuencia de resonancia (f_0).

En la Tabla V, se visualiza una comparación de las dimensiones de los modelos matemáticos y de los modelos de sintonización. Se puede identificar el comportamiento del ajuste para el refinamiento de la antena, en altos valores de desfase.

TABLA V. PORCENTAJES DE DESFASE ENTRE MODELOS MATEMÁTICOS Y MODELOS SINTONIZADOS, PARA LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE 60, 67 Y 74 GHz.

		Gap g[mm]	Radio del Brazo R[mm]	Longitud de Brazo l[mm]	
Aire	60GHz	Valor matemático (VM)	0,0051	0,0025	1,2475
		Valor sintonizado (VS)	0,4220	0,2210	0,7200
		% de Desfase	8249,56%	8740,00%	42,28%
	67GHz	Valor matemático (VM)	0,0045	0,0022	1,1171
		Valor sintonizado (VS)	0,3800	0,1950	0,6500
		% de Desfase	8295,73%	8610,00%	41,82%
	74GHz	Valor matemático (VM)	0,0041	0,0020	1,0115
		Valor sintonizado (VS)	0,3242	0,2000	0,6000
		% de Desfase	7811,25%	9766,67%	40,68%
Vidrio	60GHz	Valor matemático (VM)	0,0051	0,0025	1,2475
		Valor sintonizado (VS)	1,200	0,480	0,498
		% de Desfase	23642,84%	19100,00%	60,10%
	67GHz	Valor matemático (VM)	0,0045	0,0022	1,1171
		Valor sintonizado (VS)	1,082	0,43188	0,44011
		% de Desfase	23805,74%	19190,64%	60,60%
	74GHz	Valor matemático (VM)	0,0041	0,0020	1,0115
		Valor sintonizado (VS)	0,998	0,399	0,395
		% de Desfase	24256,00%	19584,00%	60,95%

Al operar en las frecuencias de resonancia de 60, 67 y 74 GHz la antena no necesariamente se debe adaptar a las fórmulas matemáticas utilizadas de manera tradicional.

Las medidas de los modelos matemáticos y sintonizados reflejan el impacto de la frecuencia de resonancia de la siguiente manera:

- Al aumentar (f_0) el porcentaje de desfase disminuye en la longitud del brazo con respecto a modelos que contengan un aislante de aire. En el caso de los modelos que contengan un aislante de vidrio el porcentaje de desfase disminuye en la longitud del brazo.
- Además, se observa que al aumentar (f_0) las dimensiones de las antenas en modelos matemáticos y sintonizados tienden a reducir, cumpliendo así la teoría de antenas.
- Por otro lado, en el “Gap” y en el radio del brazo “R” no se identifica un comportamiento totalmente proporcional al aumentar o disminuir (f_0). Sin embargo, se observa que los valores de desfase son muy altos debido a que las dimensiones sintonizadas son muy grandes a comparación de las matemáticas.

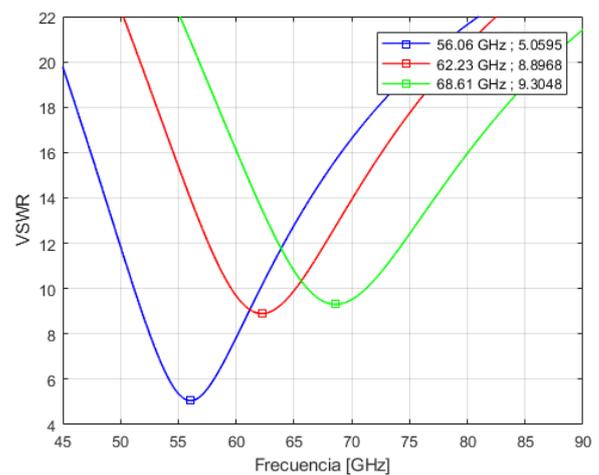
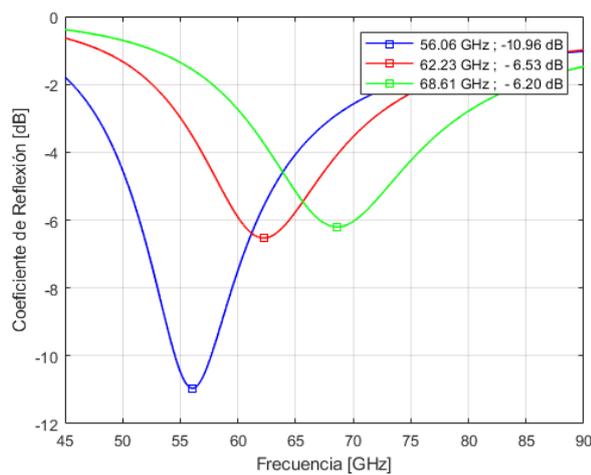
B. Impacto de la frecuencia de resonancia (f_0) en S_{11} y VSWR

ROE es la relación entre el voltaje de envío y el reflejado en la línea. Un VSWR de 1: 1 sucede cuando todas las partes del sistema de la antena concuerdan correctamente.[11]

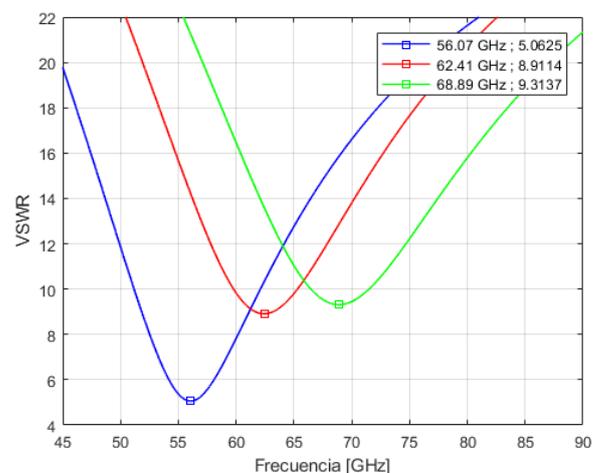
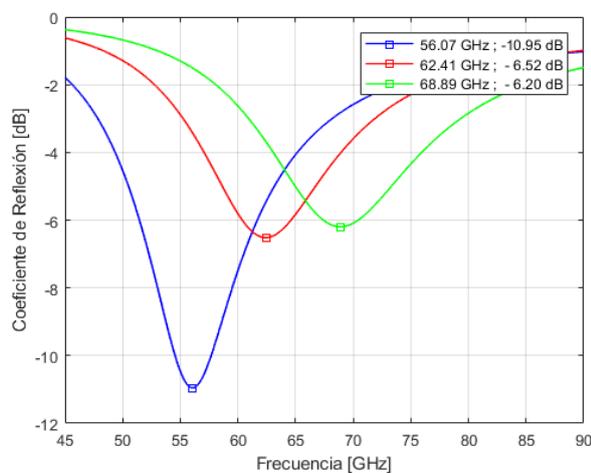
El valor VSWR 1.5: 1 denota un máximo de amplitud de onda estacionaria que es 1.5 veces mayor que el valor de onda estacionaria mínima. Cabe recalcar que los parámetros de dispersión de coeficiente de reflexión y VSWR están interrelacionados. Como regla general, una alta pérdida de retorno (S_{11}) da una mejor calidad del sistema. [12]

En la Figura 2 se puede visualizar el comportamiento de los parámetros de dispersión S_{11} (Coeficiente de Reflexión) y VSWR de los modelos matemáticos, tanto en diseños que poseen aislante aire como de vidrio. Se observa en todos los casos que en ninguno de estos parámetros de dispersión se cumplen los objetivos.

- Los modelos no se encuentran sintonizados a las frecuencias de resonancias (f_0) de 60, 67 y 74GHz.
- Los valores de VSWR son muy altos por lo cual la antena no tendrá un rendimiento óptimo. Estos deberían tener una especificación de $1 \leq \text{VSWR} \leq 1.5$.



(a)



(b)

Fig. 2. Coeficiente de reflexión S_{11} [dB] y VSWR de modelos a diferentes frecuencias de resonancia $f_0=60$ GHz, $f_0=67$ GHz, $f_0=74$ GHz, (a) Modelos matemáticos con aislante de aire, (b) Modelos matemáticos con aislante de vidrio.

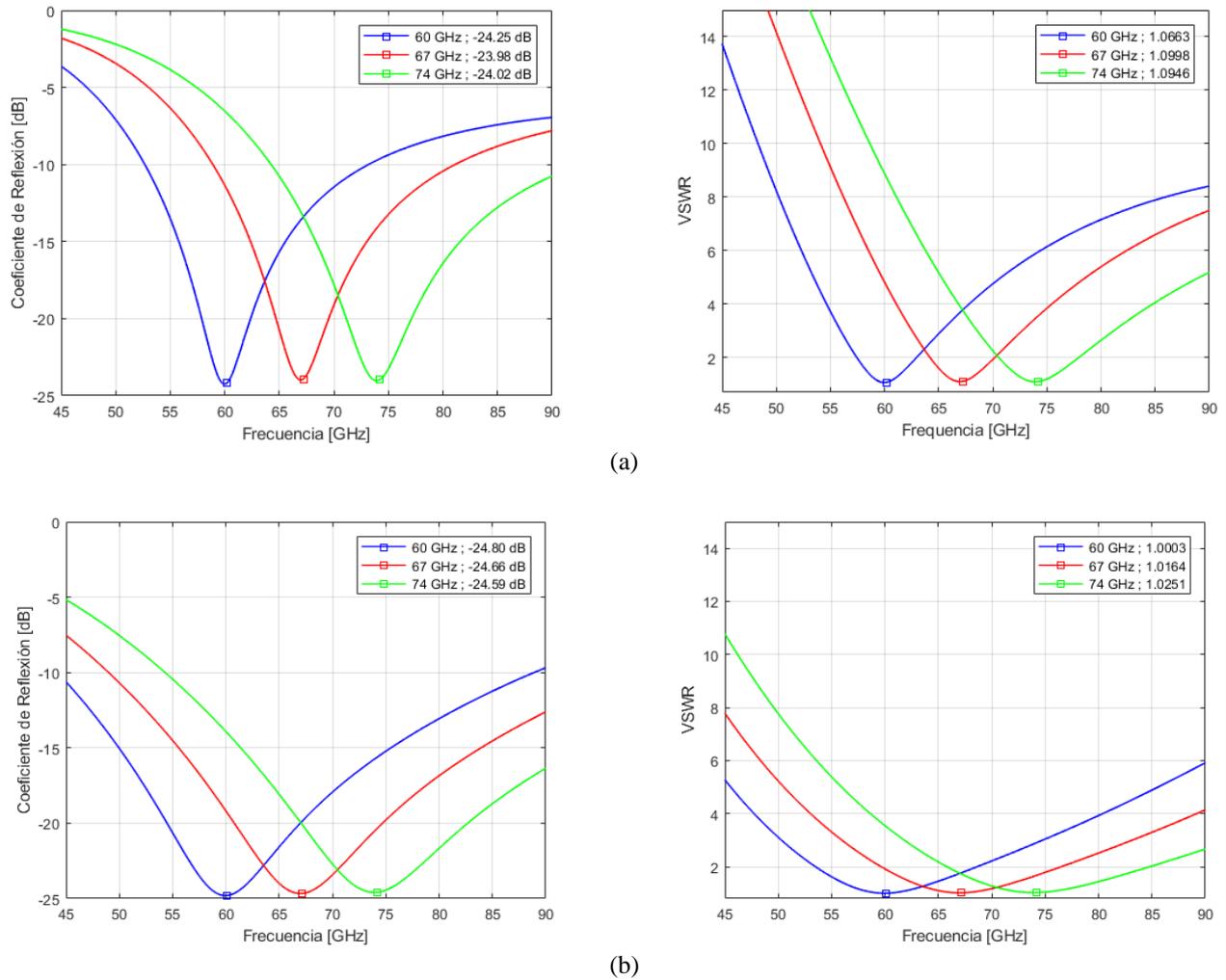


Fig. 3. Coeficiente de reflexión S_{11} [dB] y VSWR de modelos a diferentes frecuencias de resonancia $f_0=60$ GHz, $f_0=67$ GHz, $f_0=74$ GHz, (a) Modelos sintonizados con aislante de aire, (b) Modelos sintonizados con aislante de vidrio.

- En el caso del parámetro S_{11} se observan valores muy pequeños que se interpretan como altas pérdidas en el diseño.

Además, las gráficas obtenidas de los modelos matemáticos indican un comportamiento decreciente al ir aumentando la frecuencia de resonancia (f_0).

En la Figura 3, se muestran los resultados de los parámetros de dispersión S_{11} y VSWR de los modelos sintonizados. En este caso los parámetros de dispersión se encuentran ajustados a los objetivos de la investigación y se puede observar que:

- Los modelos propuestos mantienen una operación en frecuencias de resonancia de 60, 67 y 74GHz.
- Los valores de VSWR ≈ 1 acercándose prácticamente al comportamiento ideal de una antena dipolo de media onda.
- Se obtienen altas pérdidas de retorno (S_{11}), lo cual indica un mejor rendimiento para los diseños.

Se puede concluir que, las gráficas de los parámetros de dispersión S_{11} y VSWR correspondientes a los modelos sintonizados indican una parametrización lineal. Se puede ver que existe una tendencia al ir aumentando la frecuencia de resonancia (f_0) debido a que los valores tienen un cambio insignificante. Sin embargo esta tendencia a nivel de

dimensiones de refinamiento no es lineal como se puede observar previamente en la Tabla V.

En la Tabla VI se visualiza el valor del desfase obtenido en los parámetros de dispersión S_{11} , VSWR y frecuencia de resonancia (f_0). Además existe información del comportamiento de las impedancias Z_0 entre modelos matemáticos “MM” y modelos sintonizados “MS” respectivamente.

En la tabla VI se observa que:

- Los valores de desfase correspondientes a la frecuencia de resonancia oscilan entre 7 a 8%
- En el caso de S_{11} y VSWR se observa que al ir aumentando los valores de la frecuencia de resonancia el desfase aumenta de manera directa. En el caso de modelos que han sido realizados con diseño de vidrio alcanzan el mayor crecimiento.

TABLA VI. DESFASE DE PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE S(1,1) Y VSWR DE MODELOS MATEMÁTICOS “MM” Y SINTONIZADOS “MS”.

		Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	S ₁₁ [dB]	VSWR	Z ₀ [Ω]
Aire	(MM)	56,0600	-10,96	5,0595	153,68+j56,97
	(MS)	60,0000	-24,2500	1,0663	54.82-j4.25
	% Desfase	7,03%	121,35%	78,92%	-
	(MM)	62,2300	-6,53	8,8968	164,35+j56,82
	(MS)	67,0000	-23,9821	1,0998	55.14-j4.22
	% Desfase	7,67%	267,35%	87,64%	-
	(MM)	68,6100	-6,20	9,3048	172,13+j56,52
	(MS)	74,0000	-24,0233	1,0946	54.65-j4.68
	% Desfase	7,86%	287,35%	88,24%	-
Vidrio	(MM)	56,07	-10,95	5,0625	154,66+j55,92
	(MS)	60,0000	-24,8039	1,0003	65.09-j0.70
	% Desfase	7,01%	126,50%	80,24%	-
	(MM)	62,41	-6,52	8,9114	164,29+j53,14
	(MS)	67,0000	-24,6652	1,0164	64.94-j0.22
	% Desfase	7,35%	278,52%	88,59%	-
	(MM)	68,89	-6,20	9,3137	171,46+j51,57
	(MS)	74,0000	-24,5917	1,0251	64.88-j0.19
	% Desfase	7,42%	296,96%	88,99%	-

En la Tabla VII se observa valores de desfase en los parámetros de dispersión S₁₁, VSWR y frecuencia de resonancia (f_0) e información de las impedancias Z₀ de modelos sintonizados.

TABLA VII. DESFASE DE PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE S11 Y VSWR DE MODELOS SINTONIZADOS PARA LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE 60, 67 Y 74 GHz.

		S ₁₁ [dB]	VSWR	Z ₀ [Ω]
60GHz	Aire	-24,2500	1,0663	54.82-j4.25
	Vidrio	-24,8039	1,0003	65.09-j0.70
	% Desfase	2,28%	6,19%	-
67GHz	Aire	-23,9821	1,0998	55.14-j4.22
	Vidrio	-24,6652	1,0164	64.94-j0.22
	% Desfase	2,85%	7,58%	-
74GHz	Aire	-24,0233	1,0946	54.65-j4.68
	Vidrio	-24,5917	1,0251	64.88-j0.19
	% Desfase	2,37%	6,35%	-

Se observa que al aumentar la frecuencia de resonancia (f_0) de 60GHz a 67GHz existe un aumento en el desfase tanto en S₁₁ como en VSWR. En el caso de aumentar (f_0) de 67 GHz a 74GHz existe una pérdida en los valores de desfase.

Además se observa que los valores de reactividad de los modelos sintonizados que tienen un diseño con aislante de vidrio tienen un mejor rendimiento debido a que las cantidades se aproximan al cero.

C. Ancho de Banda (B_w)

El ancho de banda de una antena se describe como rango de frecuencias en las que la antena satisface una especificación de parámetro particular.

Generalmente se establece en términos de VSWR para consideraciones de ancho de banda y este se lo conoce como ancho de banda de impedancia. Las frecuencias inferior y superior que se ajustan al VSWR esperado, instauran la banda de frecuencia en la que la antena desempeña con la especificación. Una especificación generalmente adoptada es una VSWR 1.5: 1, lo que significa que el rango de frecuencias sobre el cual el VSWR es menor que 1.5 se elige el ancho de banda de operación.[13].

Se ha tomado en cuenta el corte generado con la especificación mencionada para obtener los anchos de banda (B_w) correspondientes a cada frecuencia de resonancia de los diseños propuestos.

En la Tabla 8 se visualiza los valores proporcionados a cada corte en los modelos sintonizados, manteniendo valores bajos de pérdida de retorno que incluso sobrepasan los -20 dB. En esta ocasión no se observan resultados en los modelos matemáticos debido a que estos no cumplen con los valores requeridos de VSWR.

TABLA VIII. ANCHOS DE BANDA CON LA ESPECIFICACIÓN DE VSWR 1.5:1 DE MODELOS SINTONIZADOS.

		Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	Frecuencia inferior f_{R1} [GHz]	Frecuencia superior f_{R2} [GHz]	Ancho de Banda de Operación B_w [GHz]	S ₁₁ [dB] $f_{R1}-f_{R2}$
Modelos sintonizados	Aire	60	58,35	61,77	3,42	-21,28
		67	65,23	68,86	3,63	-21,29
		74	71,79	76,28	4,49	-21,30
	Vidrio	60	55,54	65,33	9,79	-21,30
		67	62,02	72,87	10,85	-21,30
		74	68,42	80,58	12,16	-21,30

En la Figura 4 se puede visualizar la comparación de los anchos de banda de modelos sintonizados. Se observa que al ir aumentando la frecuencia de resonancia (f_0) de los modelos, el ancho de banda crece de forma progresiva.

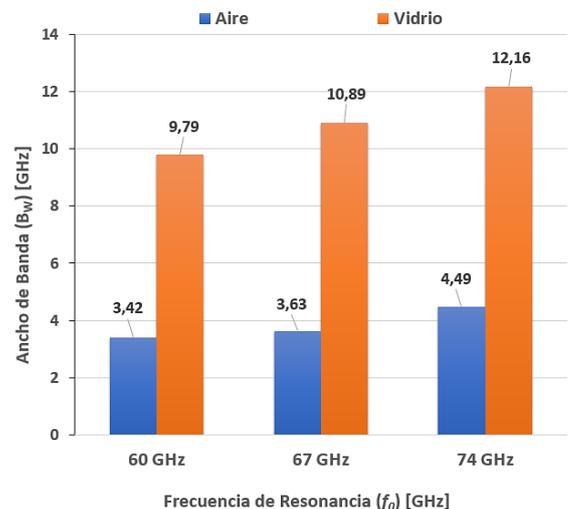


Fig. 4. Comparación de anchos de banda (B_w) de modelos sintonizados a diferentes frecuencias de resonancia $f_0=60$ GHz, $f_0=67$ GHz, $f_0=74$ GHz.

Se determina además que, el ancho de banda de operación de todas las antenas aumenta considerablemente en relación con las antenas diseñadas con un dieléctrico de vidrio, esto se puede apreciar en la figura 3 (b) donde se observa que las curvas de VSWR para las frecuencias de resonancia de 60, 67 y 74 GHz son mucho más abiertas que las curvas de VSWR para antenas con dieléctrico aire (figura 3 (a)).

En la Tabla IX se representa el desfase generado entre modelos sintonizados que corresponden a diseños con aislante de aire y vidrio. Se puede confirmar que al utilizar un aislante de vidrio el ancho de banda de operación (B_w) prácticamente duplica su valor de crecimiento, lo cual se traduce como un mejor rendimiento en este parámetro.

TABLA IX. DESFASE DE ANCHOS DE BANDA CON LA ESPECIFICACIÓN DE VSWR 1.5:1 DE MODELOS SINTONIZADOS.

	Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	Aire	Vidrio	% de Desfase
B_w [GHz]	60	3,42	9,79	186%
	67	3,63	10,85	199%
	74	4,49	12,16	171%

D. Patrón de Radiación

El Patrón de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función del espacio. Cabe recalcar que una antena irradia energía en todas las trayectorias, al menos hasta cierto punto, por lo que el patrón de la antena es en realidad tridimensional.[14].

En la Figuras 5 y 6, se representa en 2D y en 3D la comparación de los resultados de los patrones de radiación de modelos matemáticos y sintonizados respectivamente, con relación a las frecuencias de resonancia (f_0) de 60, 67 y 74 GHz.

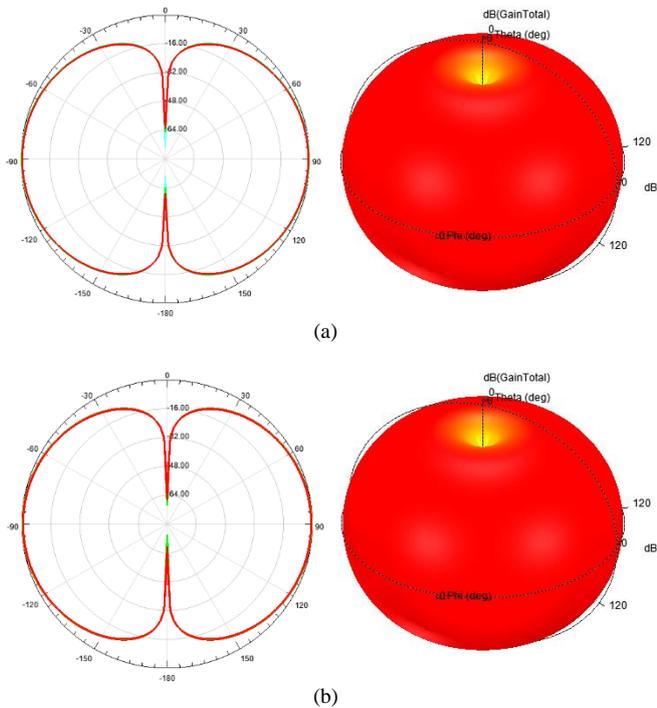


Fig. 5. Patrón de radiación, en 2D y 3D de modelos a diferentes frecuencias de resonancia $f_0=60$ GHz, $f_0=67$ GHz, $f_0=74$ GHz, (a) Modelo matemático con aislante de aire, (b) Modelo matemático con aislante de vidrio.

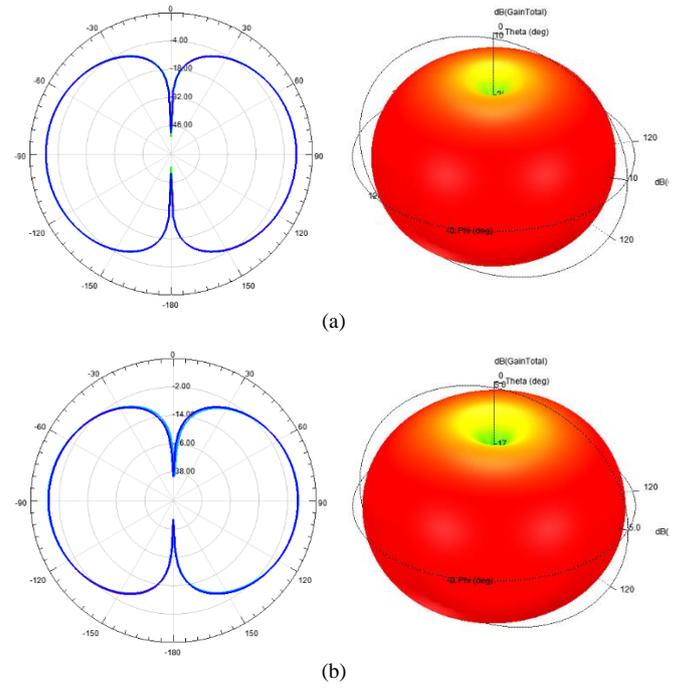


Fig. 6. Patrón de radiación, en 2D y 3D de modelos a diferentes frecuencias de resonancia $f_0=60$ GHz, $f_0=67$ GHz, $f_0=74$ GHz, (a) Modelo sintonizado con aislante de aire, (b) Modelo sintonizado con aislante de vidrio.

Se observa que la descripción gráfica se adhiere al comportamiento ideal, tomando así la forma de una “dona” en todas las situaciones. Una característica notoria que se puede ver es que al aumentar la frecuencia de resonancia (f_0) el corte bidimensional del plano E se expande de manera progresiva en todos los modelos, presentando una directividad máxima en 90° y -90° , 0dB en 0° y -180° del plano eléctrico.

En la Tabla X se describen los valores de ganancia máxima ($G_{M\acute{A}X}$) y ganancia mínima ($G_{M\acute{I}N}$) correspondiente a modelos matemáticos y modelos sintonizados respectivamente obtenidos mediante simulación.

TABLA X. GANANCIAS DE MODELOS MATEMÁTICOS Y DE MODELOS SINTONIZADOS.

		Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	$G_{M\acute{I}N}$ [dB]	$G_{M\acute{A}X}$ [dB]
Modelos matemáticos	Aire	56,0600	-73,4494	-0,3216
		62,2300	-64,0707	-0,5933
		68,6100	-63,1114	-0,7879
	Vidrio	56,0700	-61,5216	-0,3102
		62,4100	-73,8734	-0,5995
		68,8900	-67,1666	-0,7915
Modelos sintonizados	Aire	60,0000	-47,7868	2,0602
		67,0000	-53,5092	2,0607
		74,0000	-50,5002	2,0210
	Vidrio	60,0000	-39,3842	2,4369
		67,0000	-39,9524	2,6877
		74,0000	-42,1086	2,3985

Se puede observar que los valores obtenidos de los modelos matemáticos describen el comportamiento de un atenuador debido a que solo contemplan únicamente valores negativos. En el caso de los modelos sintonizados los diseños que corresponden al aislante de aire $G_{MAX} \approx 2$, mientras que en los diseños con aislante de vidrio encontramos valores de G_{MAX} que presentan una mejora con respecto a diseños que han sido realizados con aislante de aire.

E. Campo Eléctrico

Una de las características más importantes de las antenas es el campo eléctrico el cual representa la región del espacio que se modifica por la presencia de las cargas eléctricas que circulan por los elementos conductores de las antenas. En las figuras 7 y 8 se aprecian los campos eléctricos generados por los modelos matemáticos y sintonizados, respetivamente.

El campo eléctrico para cada antena presenta una orientación positiva, esto es evidente al observar en las figuras 7 (a, b) y 8 (a, b) que los vectores se orientan hacia afuera de las estructuras.

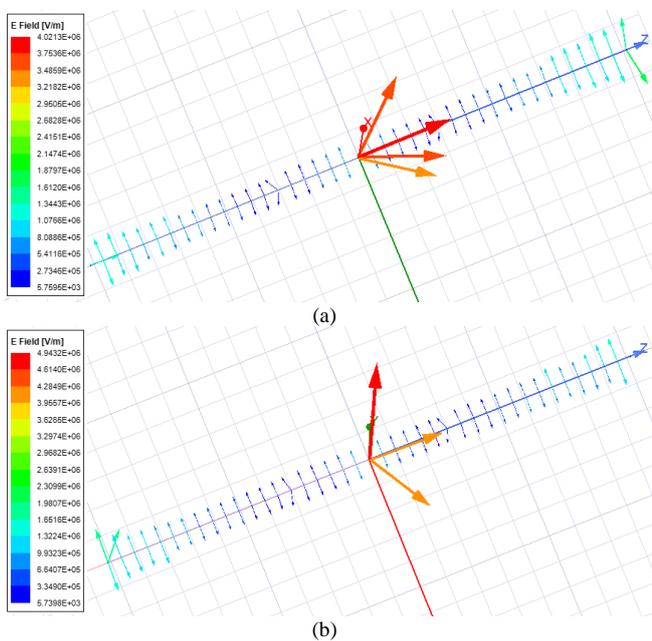


Fig. 7. Campo eléctrico de modelos a diferentes frecuencias de resonancia $f_0=60$ GHz, $f_0=67$ GHz, $f_0=74$ GHz, (a) Modelo matemático con aislante de aire, (b) Modelo matemático con aislante de vidrio.

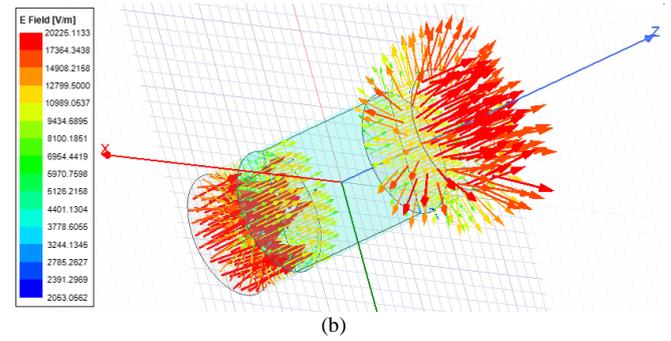
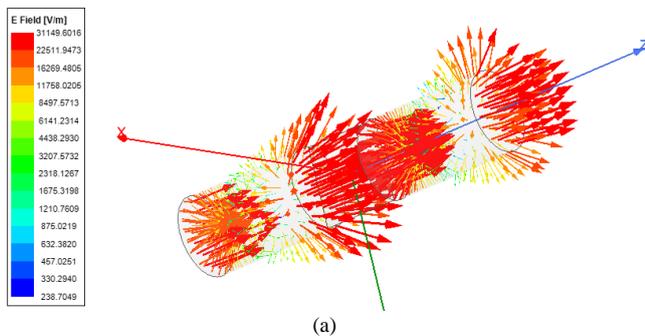


Fig. 8. Campo eléctrico de modelos a diferentes frecuencias de resonancia $f_0=60$ GHz, $f_0=67$ GHz, $f_0=74$ GHz, (a) Modelo sintonizado con aislante de aire, (b) Modelo sintonizado con aislante de vidrio. Valores de campo eléctrico de modelos matemáticos y sintonizados.

Se puede observar que para los modelos matemáticos el campo eléctrico es muy débil en la extensión de toda la estructura, este fue un motivo más por el cual fue necesario realizar un ajuste en sus parámetros de construcción.

Una vez realizado el ajuste como se observa en la figura 8, el campo eléctrico es mucho más fuerte lo que permite que las antenas irradien de mejor manera al operar en sus respectivas frecuencias de resonancia, además el campo eléctrico en el feeding gap “g”, es menor que en la antena que utiliza un dieléctrico de aire (figura 8 (a)), esto se debe a la permitividad del vidrio.

En la Tabla XI se describen los valores de campo eléctrico de modelos matemáticos y sintonizados respectivamente obtenidos mediante simulación.

TABLA XI. VALORES DE CAMPO ELÉCTRICO MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN MODELOS MATEMÁTICOS Y SINTONIZADOS A DIFERENTES FRECUENCIAS DE RESONANCIA.

		Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	E_{MIN} [V/m]	E_{MAX} [V/m]
Modelos matemáticos	Aire	56,0600	4,0732E+03	5,5288E+06
		62,2300	5,1833E+03	3,5648E+06
		68,6100	5,7595E+03	4,0213E+06
Modelos matemáticos	Vidrio	56,0700	2,2562E+02	4,0853E+06
		62,4100	5,0510E+03	4,2349E+06
		68,8900	5,7398E+03	4,9432E+06
Modelos sintonizados	Aire	60,0000	163,9151	34365,4883
		67,0000	238,7049	31149,6016
		74,0000	450,8905	34729,3906
	Vidrio	60,0000	1955,1416	18052,6191
		67,0000	110,0690	27697,4629
		74,0000	2053,0562	20225,1133

Aquí se logra apreciar de mejor manera la entrega irradiada de los campos eléctricos, es decir se visualiza el voltaje máximo y mínimo emitido por cada metro de la antena.

F. Variación de materiales para el modelo propuesto

En la Tabla XII se visualiza la comparación de los resultados previamente obtenidos de las dimensiones de

sintonización, con variaciones de diferentes materiales, las Tablas describen el comportamiento de los parámetros de dispersión según el conductor designado con respecto a las frecuencias de resonancia de 60, 67 y 74 GHz respectivamente.

Se puede visualizar que los valores de frecuencia de resonancia (f_0) y S_{11} aumentan en todos los casos, de menor a mayor de la siguiente forma: acero inoxidable, oro, cobre y aluminio. En el caso del VSWR al crecer el S_{11} los valores disminuyen de la siguiente forma: aluminio, cobre, oro, acero inoxidable, todos estos cambios se deben a que cada material tiene diferente permeabilidad y conductividad eléctrica, como se puede observar previamente en la Tabla I.

Además, se ha mencionado en el escrito que el estudio realizado se lo hizo con materiales de acero inoxidable debido a que este ofrece mejores características entre los metales ya mencionados. Dentro de sus componentes se puede encontrar níquel, cromo y bajo contenido de carbono.

TABLA XII. COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS DE DISPERSIÓN AL VARIAR EL MATERIAL DEL CONDUCTOR PARA LOS VALORES SINTONIZADOS EN UNA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE 60, 67 Y 74 GHz.

60GHz	Gap g[mm]	0.422			
	Radio del Brazo R[mm]	0.221			
	Longitud de Brazo l[mm]	0.72			
	Material del Conductor	Acero Inoxidable	Oro	Cobre	Aluminio
	Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	60.0000	60.3600	60.5400	60.7200
	S_{11} [dB]	-24.2500	-24.8261	-24.8527	-24.8925
	VSWR	1.0663	0.9977	0.9947	0.9901
67GHz	Gap g[mm]	0.38			
	Radio del Brazo R[mm]	0.195			
	Longitud de Brazo l[mm]	0.65			
	Material del Conductor	Acero Inoxidable	Oro	Cobre	Aluminio
	Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	67.0000	67.2050	67.4100	67.4100
	S_{11} [dB]	-23.9821	-24.2119	-24.4159	-24.4077
	VSWR	1.0998	1.0710	1.0461	1.0471
74GHz	Gap g[mm]	0.3242			
	Radio del Brazo R[mm]	0.2			
	Longitud de Brazo l[mm]	0.6			
	Material del Conductor	Acero Inoxidable	Oro	Cobre	Aluminio
	Frecuencia de Resonancia f_0 [GHz]	74.0000	74.4500	74.5000	74.6000
	S_{11} [dB]	-24.0233	-24.3365	-24.4552	-24.5512
	VSWR	1.0946	1.0557	1.0414	1.0299

IV. CONCLUSIONES

El impacto que provoca la variación de la frecuencia de resonancia, en el rango de 60 GHz a 74 GHz, de antenas dipolo de media onda sobre los parámetros de dispersión presenta una relación inversamente proporcional, ya que a medida que esta aumenta los valores de los parámetros de dispersión VSWR y S_{11} disminuyen en todos los casos.

Para una antena dipolo de media onda con dieléctrico de aire por cada 7 GHz de variación en su frecuencia de resonancia en promedio su VSWR se desfasa $\pm 3.519\%$ y su parámetro S_{11} se desfasa $\pm 1.289\%$. Para una antena dipolo de media onda con dieléctrico de vidrio por cada 7 GHz de variación en su frecuencia de resonancia en promedio su VSWR se desfasa $\pm 0.728\%$ y su parámetro S_{11} se desfasa $\pm 0.264\%$.

Al aumentar la frecuencia de resonancia (f_0) los anchos de banda de operatividad B_w aumentan de forma paulatina como se observa en la Tabla VIII, en el caso de los modelos que tienen un aislante de vidrio incluso duplican su valor de crecimiento, lo cual se traduce como un mejor rendimiento en este parámetro.

V. REFERENCIAS

- [1] N. Maletic *et al.*, "Experimental Evaluation of a 60 GHz Beamforming Solution with 32-Dipole Printed Array," *2019 49th Eur. Microw. Conf. EuMC 2019*, pp. 980–983, 2019, doi: 10.23919/EuMC.2019.8910720.
- [2] J. M. Huidobro, "Antenas de telecomunicaciones," *Rev. Digit. ACTA*, p. 16, 2013.
- [3] UIT, "Sistemas de radiocomunicaciones por ondas milimétricas para aplicaciones de sistemas de transporte inteligentes." 2009.
- [4] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. 2005.
- [5] W. L. Stutzman, *Antenna Theory and Design*. 2005.
- [6] L. E. Díaz Villacís, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA DETERMINAR LA RELACION DE ONDA ESTACIONARIA EN SISTEMAS BALANCEADOS DE LINEAS DE TRANSMISION," vol. 1, no. 3, p. 287, 1993.
- [7] F. Emilio Monachesi, Ana Maria Frenzel, Guillermo Chaile, Carrasco Agustín and A. G. López., "Conceptos Generales De Antenas," p. 20, 2011, [Online]. Available: http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf.
- [8] I. P. Ansys, "An Introduction to HFSS," *Rev. Lit. Arts Am.*, no. January, p. 542, 2020.
- [9] R. Dean Straw and N6BV, Eds., *The ARRL Antenna Book*, 21 st. USA, 2007.
- [10] S. Pongratz, "Understanding Cable & Antenna Analysis," pp. 1–12, 2017, [Online]. Available: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Technical-Notes/White-Paper/11410-00427F.pdf>.
- [11] MobileMark antenna solutions, "How Do You Specify The Bandwidth Of An Antenna?," 2021. <https://www.mobilemark.com/about/faq/how-do-you-specify-the-bandwidth-of-an-antenna/> (accessed Apr. 17, 2021).
- [12] J. D. K. and R. J. Marhefka, "White Paper on Antenna Patterns and Their Meaning," *Cisco Aironet Antennas and Accessories*, pp. 1–17, 2007, [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod_white_paper0900aecd806a1a3e.htm