



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE LA ANTENA
DIPOLO DOBLADA PARA LAS FRECUENCIAS DE 24.25, 25.8 Y 27.5 GHZ**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniera en Telecomunicaciones

AUTORAS: LIZBETH JOHANA CAIZA GUALOTUÑA

KATHERINE MICHELLE SANDOVAL LLAMBA

TUTOR: LENIN WLADIMIR AUCATOMA GUAMÁN

Quito-Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotras, Lizbeth Johana Caiza Gualotuña con documento de identificación N° 1751457159 y Katherine Michelle Sandoval Llamba con documento de identificación N° 1726427162; manifestamos que:

Somos las autoras y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 07 de marzo del año 2022

Atentamente,



Lizbeth Johana Caiza Gualotuña

1751457159



Katherine Michelle Sandoval Llamba

1726427162

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotras, Lizbeth Johana Caiza Gualotuña con documento de identificación No. 1751457159 y Katherine Michelle Sandoval Llamba con documento de identificación No. 1726427162, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del artículo académico: “Comparación de los parámetros de dispersión de la antena dipolo doblada para las frecuencias de 24.25, 25.8 y 27.5 GHZ”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 07 de marzo del año 2022

Atentamente,



Lizbeth Johana Caiza Gualotuña

1751457159



Katherine Michelle Sandoval Llamba

1726427162

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Lenin Wladimir Aucatoma Guamán con documento de identificación N° 1717985830, docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN DE LA ANTENA DIPOLO DOBLADA PARA LAS FRECUENCIAS DE 24.25, 25.8 Y 27.5 GHZ, realizado por Lizbeth Johana Caiza Gualotuña con documento de identificación N° 1751457159 y por Katherine Michelle Sandoval Llamba con documento de identificación N° 1726427162, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 07 de marzo del año 2022

Atentamente,



Ing. Lenin Wladimir Aucatoma Guamán, MSc
1717985830

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación se la dedico con todo mi amor, a mi mayor inspiración, mis padres Oswaldo y Roció, por ser los mejores padres del mundo, por brindarme su amor y apoyo incondicional en cada momento sea este bueno o malo y por sus valiosos consejos, que han guiado mis pasos y me ha permitido culminar mis estudios. A mis abuelitos por todo el apoyo que siempre me han brindado día día en el trascurso de cada etapa de mi carrera, a mi hermana y toda mi familia que han formado parte de este logro.

Lizabeth Johana Caiza Gualotuña

El presente artículo académico se lo dedico principalmente a mi amada abuelita Olimpia Pullopaxi(+), mis padres Clara Llamba y Mario Sandoval por inculcarme la costumbre que la familia es el pilar fundamental de cada logro que alcanzamos en nuestra vida y por enseñarme que una mujer con dedicación, esfuerzo y trabajo duro puede conseguir lo que quiere sin la necesidad de tener un hombre en su vida, a mis queridos hermanos y primos por darme ánimos y consejos para nunca rendirme y seguir adelante, gracias a toda mi familia hoy en día soy una persona segura de sí misma que puede lograr cumplir todos sus sueños con su apoyo incondicional.

Katherine Michelle Sandoval Llamba

AGRADECIMIENTO

Nuestro profundo agradecimiento a Dios por bendecirme y guiarnos en cada aspecto e instante a lo largo de nuestra carrera profesional y vida personal.

A nuestros padres por su apoyo y su amor incondicional que contribuyeron para que lo difícil sea más fácil para culminar con éxito esta etapa tan importante de mi vida.

A nuestro tutor por brindarnos su ayuda incondicional como guía y orientación durante la realización de este proyecto de investigación.

A cada uno de los docentes de la carrera de Telecomunicaciones que fueron partícipes de este proceso ya sea de manera directa o indirecta, por haber contribuido en nuestra formación profesional compartiéndonos sus amplios y sabios conocimientos.

Lizbeth Johana Caiza Gualotuña

Katherine Michelle Sandoval Llamba

Comparación de los parámetros de dispersión de la antena dipolo doblada para las frecuencias de 24.25, 25.8 y 27.5 GHz.

Caiza Gualotuña Lizbeth
Johana
Ingeniería en
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica
Salesiana
Quito, Ecuador
lcaizag@est.ups.edu.ec

Sandoval Llamba Katherine
Michelle
Ingeniería en
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica
Salesiana
Quito, Ecuador
ksandovall@est.ups.edu.ec

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

Resumen— El propósito de esta investigación es el análisis y comparación de los parámetros de dispersión de una antena dipolo doblada en las bandas de frecuencias de 24.25, 25.8 y 27.5 GHz, las mismas que fueron diseñadas y simuladas en el software ANSYS HFSS. Se construyó un modelo matemático a partir de sus fórmulas teóricas el mismo que se sometió a modificaciones en sus dimensiones físicas como: tamaño de brazos, dieléctrico, etc.; con el fin de sintonizar la frecuencia de resonancia obteniendo así un modelo ajustado para la comparación del desfase de los parámetros de dispersión que existe entre estos dos modelos. Se demostró en el modelo ajustado un VSWR que se aproxima a 1, además se visualizó que existe un mayor desfase en la frecuencia de 25.8 GHz cuando se trabaja con un dieléctrico de aire, este desfase corresponde al 276.96%. El desfase de la frecuencia de resonancia tanto para el dieléctrico de porcelana y aire fue aumentando conforme creció la frecuencia.

Palabras clave: Antena dipolo, desfase, frecuencia de resonancia, parámetros de dispersión.

Abstract— The purpose of this research is to carry out the analysis and comparison of the dispersion parameters of a bent dipole antenna in the 24.25, 25.8 and 27.5 GHz frequency bands, the same ones that were designed and simulated in the ANSYS HFSS software. A mathematical model was built from its theoretical formulas, which was subjected to modifications in its physical dimensions such as: size of arms, dielectric, etc., in order to tune the resonance frequency, thus obtaining an adjusted model for comparison of the gap in the dispersion parameters that exists between these two models. It was shown that in the adjusted model, an almost ideal VSWR was achieved, since it is close to 1, it was also visualized that there is a greater phase shift in the frequency of 25.8 GHz, when working with an air dielectric, since it gives as resulting in a phase shift of approximately 276.96% in the radius, it was shown that the dimensions of the dielectric, in some cases it is necessary to modify to tune the resonance frequency. The phase shift of the resonant frequency for both the porcelain and air dielectric increases as the frequency increases.

Keywords: Dipole antenna, phase shift, resonant frequency, scattering parameters.

I. INTRODUCCIÓN

La tecnología de quinta generación en los últimos años ha logrado sobresalir en la industria tecnológica gracias a las

altas velocidades y bajas latencias que manejan, sin embargo, su evolución ha conllevado a la saturación del espectro radioeléctrico generando que las comunicaciones inalámbricas opten por utilizar bandas milimétricas. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) se ha visto en la necesidad de añadir nuevos rangos de frecuencia en la IMT-2020 entre 24 a 86 GHz que se correlacionarán con los estándares de las redes (5G). [1]

Las ondas milimétricas son consideradas como un aporte para las conexiones de redes inalámbricas (5G), debido a las características que presenta, es indispensable el diseño de antenas más pequeñas para el despliegue de dichas redes, ya que poseen un ancho de banda mayor, lo cual permitirá tener mayor velocidad y mejor calidad de servicio. [2] El reducido tamaño que poseen las antenas admitirá el ingreso de más componentes en un mismo espacio, para lo cual es preciso tener una alta ganancia para disminuir las interferencias. [3] Se ha estudiado diversas arquitecturas, para el desarrollo de nuevas comunicaciones de ondas milimétricas, determinando que deben tomarse en cuenta varios requisitos rigurosos para la construcción de estas, se debe tener un patrón de radiación estable y un ancho de banda extenso. [4]

En [5] se demuestra que es necesario realizar ajustes al diseño matemático para que los parámetros de dispersión se acoplen a los ideales, ya que existe un desfase entre los modelos matemáticos y ajustados aproximadamente del 20.7% en su frecuencia, es decir, las dimensiones de la antena influyen en los parámetros de dispersión, esto se debe a que se trabaja en ondas milimétricas, mientras que en [6] se plantea el diseño de tres antenas donde se varía el material de los brazos y dieléctrico, el cual da como resultado que existe un mayor desfase en los parámetros de dispersión cuando se utiliza el material de aire, de forma similar [7] se diseña una antena dipolo doblado con el fin de aumentar su ancho de banda para mejorar el funcionamiento de su frecuencia de resonancia. Estas tres investigaciones abordan el estudio del comportamiento de los parámetros de dispersión, donde fueron sometidos a modificaciones que consiste en las variaciones del material y las dimensiones físicas de la antena las mismas que trabajan en bandas de ondas milimétricas y son simuladas en el software ANSY HFFS.

Por lo antes mencionado y por ser los parámetros de dispersión un factor que influye en el rendimiento de la antena, porque representan las pérdidas de transmisión y la ganancia, es importante estudiar y analizar su comportamiento, por lo cual se propone el diseño de antenas dipolo dobladas, que son sometidas a diferentes cambios

como: variación del material y modificaciones en las dimensiones físicas, dado que dichos cambios generan alteraciones en los parámetros de desempeño, se realiza una comparación de los parámetros de dispersión del modelo matemático y ajustado, también se analiza el desfase existente entre estos dos modelos, para lo cual se aplicará el método de elementos finitos al simular en el software

I. DISEÑO DE LA ANTENA

Se diseñó tres antenas dipolo plegadas que operan en las distintas frecuencias de trabajo de 24.25, 25.8 y 27.5 GHz, a partir de los datos matemáticos obtenidos en las fórmulas, se construye un modelo ajustado que es sometido a variaciones tanto en sus dimensiones físicas como en el material de los brazos y dieléctrico. La antena dipolo plegada está diseñada en el software HFSS, que se utiliza con el fin de optimizar el desfase de la frecuencia de resonancia y los parámetros de dispersión y utiliza el método de elementos finitos para las simulaciones. Los parámetros físicos que se toman en consideración son la longitud de los brazos (L), (l'), puerto de alimentación (S), la separación entre brazos (B) y el radio (R), como se observa en la Figura 1.

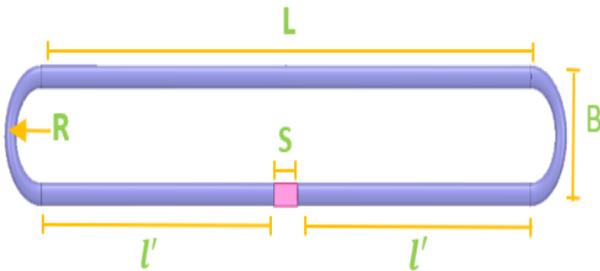


Fig1. Diseño de la Antena Dipolo doblada.

El polo principal (L), por lo general debe tener una dimensión igual a:

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad [6] \quad (1)$$

Los dos brazos que se encuentran paralelos al principal denotado (l') será un cuarto de longitud de onda, es decir medirán la mitad del polo (L).

$$l' = \frac{L-S}{2} \quad [6] \quad (2)$$

Los brazos (l') están separados en la parte central por un puerto de alimentación, que no debería superar a 0.02λ .

$$S \leq 0.02\lambda \quad [8] \quad (3)$$

La dimensión de la distancia de separación entre los brazos plegados no debe superar 0.05λ .

$$B \leq 0.05\lambda \quad [9] \quad (4)$$

En la ecuación (5), se presenta la fórmula para el cálculo del radio de los polos conductores, donde (S) es el tamaño del puerto de alimentación y Z_0 , representa la impedancia característica de la antena, en este caso por ser una antena dipolo doblada tendrá un valor fijo de 300Ω .

$$R = \frac{s}{e^{120} \frac{Z_0}{e^{120}}} \quad (5)$$

Para la simulación de los parámetros de dispersión, se establece un barrido en el rango de frecuencias de 10 a 38 GHz, con pasos de 0.25, 0.08 y 0.05 GHz, para las tres frecuencias de trabajo, este rango se encuentra desfasado en un 60 % de la frecuencia central, el mismo que se establece en el manual ANSYS HFSS, además se añade una caja de radiación con elementos ideales, para este estudio se utilizó la condición de límite de capa perfectamente adaptado (Perfectly Matched Layer, PML) para reducir las pérdidas generadas por agentes externos [10], como material se eligió el vacío dado que nos permite tener resultados más reales, finalmente para el esquema del patrón de radiación, se crea una configuración de radiación que consiste en la modificación de los ángulos de elevación y azimut, los mismos que están representados por las coordenadas esféricas phi (Φ) que realizará un barrido entre el rango de 0° a 90° y theta (θ) entre -180° a 180° , ese rango permite graficar todo el patrón de radiación en 2D y 3D en el software HFSS. Los parámetros podrán ser modificados dependiendo de la antena a simular, tanto las configuraciones para los parámetros de dispersión como para el patrón de radiación no serán sometidos a modificaciones cuando se trabaja en estas frecuencias.

A partir del modelamiento matemático se elaboró un modelo ajustado para las frecuencias de resonancia de 24.25, 25.80 y 27.50 GHz, las mismas que fueron sometidas a variaciones de dimensiones físicas y materiales del polo y dieléctrico. En la tabla I, se evidencia las características que presentan los diferentes tipos de materiales que se usaron tanto para los polos como para el dieléctrico.

Tabla I. Características de conducción eléctrica de los diferentes materiales tanto para los brazos y dieléctrico.

	PERMITIVIDAD RELATIVA	PERMEABILIDAD RELATIVA	CONDUCTIVIDAD (SIEMENS/CM)	
MATERIAL	CONDUCTOR ELÉCTRICO			
	Acero Inoxidable	1	1	1100000
	Hierro	1	4000	10300000
	PEC	1	1	1e+30
	Aluminio	1	1.000021	38000000
	Cobre	1	0.999991	58000000
	Oro	1	0.999996	41000000
	AISLANTES			
	Aire	1.0006	1.0000004	0
	Porcelana	5.7	1	0
PVC Plástico	2.7	1	0	
Vidrio	5.5	1	0	

A. DISEÑO DE LAS ANTENAS CON DIFERENTES MATERIALES

Para el diseño de la antena se utilizaron, materiales como: acero inoxidable, hierro, oro, aluminio, cobre y conductor

eléctrico perfecto (Perfect Electrical Conductor, PEC), uno de los materiales que se acopló mejor a la antena fue el acero inoxidable, pese a ser considerado un pésimo conductor eléctrico y térmico a comparación de los diferentes materiales simulados, dado que requieren de otros conductores para mejorar su conductividad, además que presenta una sensibilidad frente a los campos magnéticos debido a que es considerado un material paramagnético, sin embargo, es uno de los más utilizados debido a sus características que presenta como la resistencia a la corrosión. Los datos visualizados en las tablas II, III, IV, se obtuvieron a través de las fórmulas teóricas propuestas en la sección II para el modelo matemático, en el cual se tomó como referencia $\frac{\lambda}{2}$, para el brazo conductor principal, sin embargo para los brazos plegados que se encuentran opuestos a este, medirá $\frac{\lambda}{4} - \frac{s}{2}$, dado que al estar separados en la parte central por un puerto de alimentación los brazos ya no se consideran $\frac{\lambda}{4}$, como teóricamente se establece, mientras que para el modelo ajustado al ser sometido a variaciones los polos conductores, ya no cumplen con $\frac{\lambda}{2}$, dichos cambios se realizaron de manera experimental.

En la tabla II, se muestra que el material de acero inoxidable posee parámetros casi iguales que el PEC como es en el caso de la frecuencia de resonancia con el aire y porcelana que no tuvieron ningún problema al momento de ser ajustados.

Tabla II. Dimensiones físicas del modelo matemático y experimental de la antena dipolo plegada, con acero inoxidable, aislante de aire y porcelana para frecuencias de 24.25, 25.8 y 27.5 GHz.

		24.25 [GHz]	25.80 [GHz]	27.5 [GHz]	24.25 [GHz]	25.80 [GHz]	27.5 [GHz]
Polo conductor		Acero Inoxidable					
Dieléctrico		Aire			Porcelana		
Datos	Parámetro						
Matemático	F-resonancia [GHz]	19.92	21.12	22.6	20.04	21.20	22.65
Ajustado		24.25	25.8	27.5	24.25	25.8	27.5
Matemático	L [mm]	6.185	5.814	5.454	6.185	5.814	5.454
Ajustado		4.819	4.099	3.948	4.887	4.699	4.421
Matemático	l' [mm]	2.969	2.790	2.618	2.969	2.790	2.618
Ajustado		2.285	1.644	1.569	2.320	2.233	2.101
Matemático	R [mm]	0.036	0.034	0.032	0.036	0.034	0.032
Ajustado		0.060	0.130	0.098	0.036	0.070	0.067
Matemático	S [mm]	0.247	0.232	0.218	0.247	0.232	0.218
Ajustado		0.247	0.810	0.810	0.247	0.232	0.218
Matemático	B [mm]	0.618	0.581	0.545	0.618	0.581	0.545
Ajustado		0.618	0.581	0.545	0.618	0.581	0.545

Cuando se trabajó con el material de Hierro, se visualizó que dicho material también es adecuado para el diseño de la antena, pese a presentar una menor conductividad eléctrica. Al ser considerado como un material de metal permite que los campos magnéticos se ordenan de mejor manera dado que presenta una gran permeabilidad relativa de 4000, siendo considerado como un material ferromagnético.

Como se observa en la tabla III, los parámetros del material de hierro a diferencia del acero inoxidable y del PEC, en la frecuencia de resonancia con el aire y porcelana establece una

gran diferencia en sus resultados, dado que el hierro presenta una mayor permeabilidad a comparación de los dos materiales presentados.

Tabla III. Dimensiones físicas del modelo matemático y experimental de la antena dipolo plegada, con hierro, aislante de aire y porcelana para frecuencias de 24.25, 25.8 y 27.5 GHz.

		24.25 [GHz]	25.80 [GHz]	27.5 [GHz]	24.25 [GHz]	25.80 [GHz]	27.5 [GHz]
Polo conductor		Hierro					
Dieléctrico		Aire			Porcelana		
Datos	Parámetro						
Matemático	F-resonancia [GHz]	18.24	19.36	20.55	18.36	19.44	20.6
Ajustado		24.25	25.8	27.5	24.25	25.8	27.5
Matemático	L [mm]	6.185	5.813	5.454	6.185	5.813	5.454
Ajustado		4.425	4.373	4.078	4.458	4.259	4.073
Matemático	l' [mm]	2.969	2.790	2.618	2.969	2.790	2.618
Ajustado		1.865	2.070	1.930	1.851	1.891	1.849
Matemático	R [mm]	0.036	0.034	0.032	0.036	0.034	0.032
Ajustado		0.089	0.079	0.063	0.085	0.05	0.059
Matemático	S [mm]	0.247	0.232	0.218	0.247	0.232	0.218
Ajustado		0.695	0.232	0.218	0.756	0.476	0.375
Matemático	B [mm]	0.618	0.581	0.545	0.618	0.581	0.545
Ajustado		0.618	0.581	0.545	0.618	0.581	0.545

En la tabla IV, se presentan los parámetros del diseño de la antena con el material PEC, mismo que es considerado como un conductor ideal, por tal motivo se lo escogió como referencia, debido a que presenta mejor ajuste y rendimiento.

Tabla IV. Dimensiones físicas del modelo matemático y experimental de la antena dipolo plegada, con PEC, aislante de aire y porcelana para frecuencias de 24.25, 25.8 y 27.5 GHz.

		24.25 [GHz]	25.80 [GHz]	27.5 [GHz]	24.25 [GHz]	25.80 [GHz]	27.5 [GHz]
Polo conductor		PEC					
Dieléctrico		Aire			Porcelana		
Datos	Parámetro						
Matemático	F-resonancia [GHz]	19.92	21.16	22.6	20.04	21.24	22.7
Ajustado		24.25	25.8	27.5	24.25	25.8	27.5
Matemático	L [mm]	6.185	5.814	5.454	6.185	5.814	5.454
Ajustado		4.850	4.147	3.960	4.887	4.699	4.421
Matemático	l' [mm]	2.969	2.790	2.618	2.969	2.790	2.618
Ajustado		2.301	1.698	1.579	2.320	2.233	2.101
Matemático	R [mm]	0.036	0.034	0.032	0.036	0.034	0.032
Ajustado		0.069	0.129	0.097	0.035	0.070	0.067
Matemático	S [mm]	0.247	0.232	0.218	0.247	0.232	0.218
Ajustado		0.247	0.750	0.802	0.247	0.232	0.218
Matemático	B [mm]	0.618	0.581	0.545	0.618	0.581	0.545
Ajustado		0.618	0.581	0.545	0.618	0.581	0.545

II. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el modelo matemático que se obtuvo a través de las fórmulas teóricas anteriormente descritas en 1, 2, 3, 4 y 5, se

evidencia que la frecuencia de resonancia se encuentra desfasada, lo que conllevó a realizar un modelo ajustado mediante la aplicación del método experimental, que consiste en las variaciones en el punto de alimentación, radio y reducción de la antena, con el fin de analizar los cambios que se produce en los parámetros de dispersión y frecuencia de resonancia.

En esta investigación se busca obtener un S11 igual o por debajo de -20 dB, ya que se necesita que la mayor parte de la energía irradia en la antena [11] y que el VSWR se encuentre en el rango de 1 a 2, para tener una buena adaptación, porque si se alcanza una relación de onda estacionaria de 1 la adaptación sería de un 100%, mientras que si se logra un VSWR de 2 el acople sería en un 90%. [12]

A. Desfase de los componentes de construcción de la antena dipolo doblado del modelo matemático versus el modelo ajustado

Los parámetros de dispersión son fundamentales para el diseño, porque representan las pérdidas, la adaptación o el acoplamiento de la antena al sistema, es decir analizan el comportamiento eléctrico de las antenas, si bien se puede medir con cualquier frecuencia estos parámetros son más empleados en radiofrecuencias y en microondas, además varían según la frecuencia de trabajo. [13] Al momento de trabajar con las fórmulas matemáticas en las frecuencias de 24.25, 25.8 y 27.5 GHz, se evidencia que existe un desajuste en los parámetros y en la frecuencia a la cual resuena.

Para lograr los parámetros ideales es necesario modificar diversos parámetros de construcción en este caso sobresalieron el radio y el espacio del punto de separación(S) que fueron los que más se modificaron por ende presentaron altos desfases superando el 200%, en las frecuencias de 25.80 y 27.5GHZ como se evidencia en la figura 2. Estos desfases se deben, a que cuando se trabaja en frecuencias altas, la onda electromagnética al propagarse por el medio causa interferencias parásitas, lo que provoca un desfase de frecuencias y conlleva a realizar mayores ajustes en las dimensiones físicas de la antena.

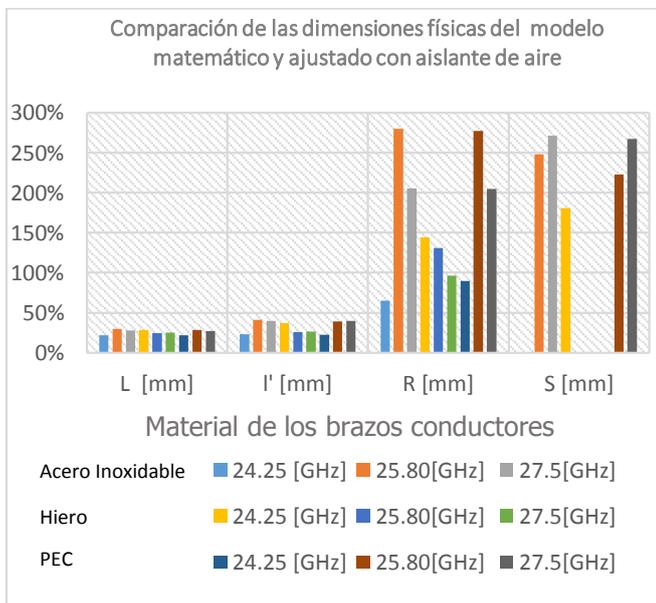


Fig2. Porcentaje de ajuste de dimensiones para 24.25, 25.8 y 27.5 GHz para la antena Dipolo doblada con aislante Aire

En la figura 3, se visualiza que el parámetro L, S y R tiene un mayor desfase cuando se trabaja con el hierro a una frecuencia de 24.25GHZ, además se observa que con el dieléctrico de porcelana en los diseños de acero inoxidable y PEC, no es necesario la modificación del parámetro S.

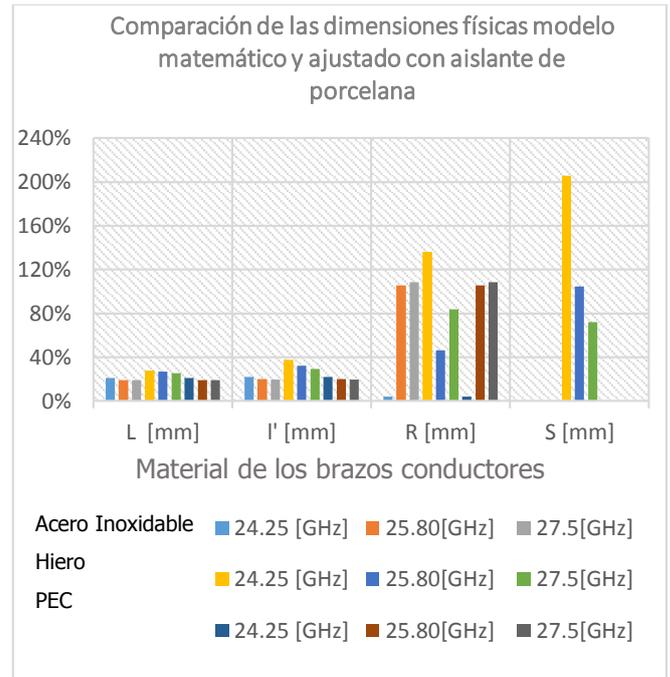


Fig3. Porcentaje de ajuste de dimensiones para 24.25, 25.8 y 27.5 GHz para la antena Dipolo doblada con aislante Porcelana

B. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN (S11) Y RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA (VSWR)

Se ha estudiado el modelo matemático antes y posterior a la variación del material tanto para el dieléctrico como para el polo conductor, se aprecia que los parámetros de dispersión y la frecuencia de resonancia, muestran cambios, esto se debe a las características intrínsecas que presentan los materiales, como: conductividad, aislamiento, temperatura, permeabilidad.

Se observa que la frecuencia de resonancia, se encuentra desfasada aproximadamente en un 21%, este desfase aumentará o disminuirá según el material que se utiliza, como en el caso del hierro, la desviación de frecuencia es mayor a comparación que cuando se trabaja con acero inoxidable y PEC, puesto que el desfase aumenta en un 14%, esto es porque presenta una menor conductividad y una mayor permeabilidad; de igual manera el coeficiente de reflexión y el VSWR se ven afectados cuando se cambia el material del dieléctrico (gap). Aquí se observa que los materiales que poseen una mejor característica del aislamiento eléctrico ayudan a mejorar el VSWR y el coeficiente de reflexión, porque las ondas incidentes no se reflejan en el medio, evitando que la energía se disipe en forma de calor.

Las figuras 4 y 5 muestran las gráficas comparativas de los parámetros de dispersión para cada modelo simulado con diferentes materiales como el acero inoxidable, hierro, PEC cada uno de estos se simuló con dos aislantes aire y la porcelana, que fueron sometidos al análisis para determinar si estos datos disminuyeron o aumentaron al modificar los valores de las dimensiones físicas de la antena.

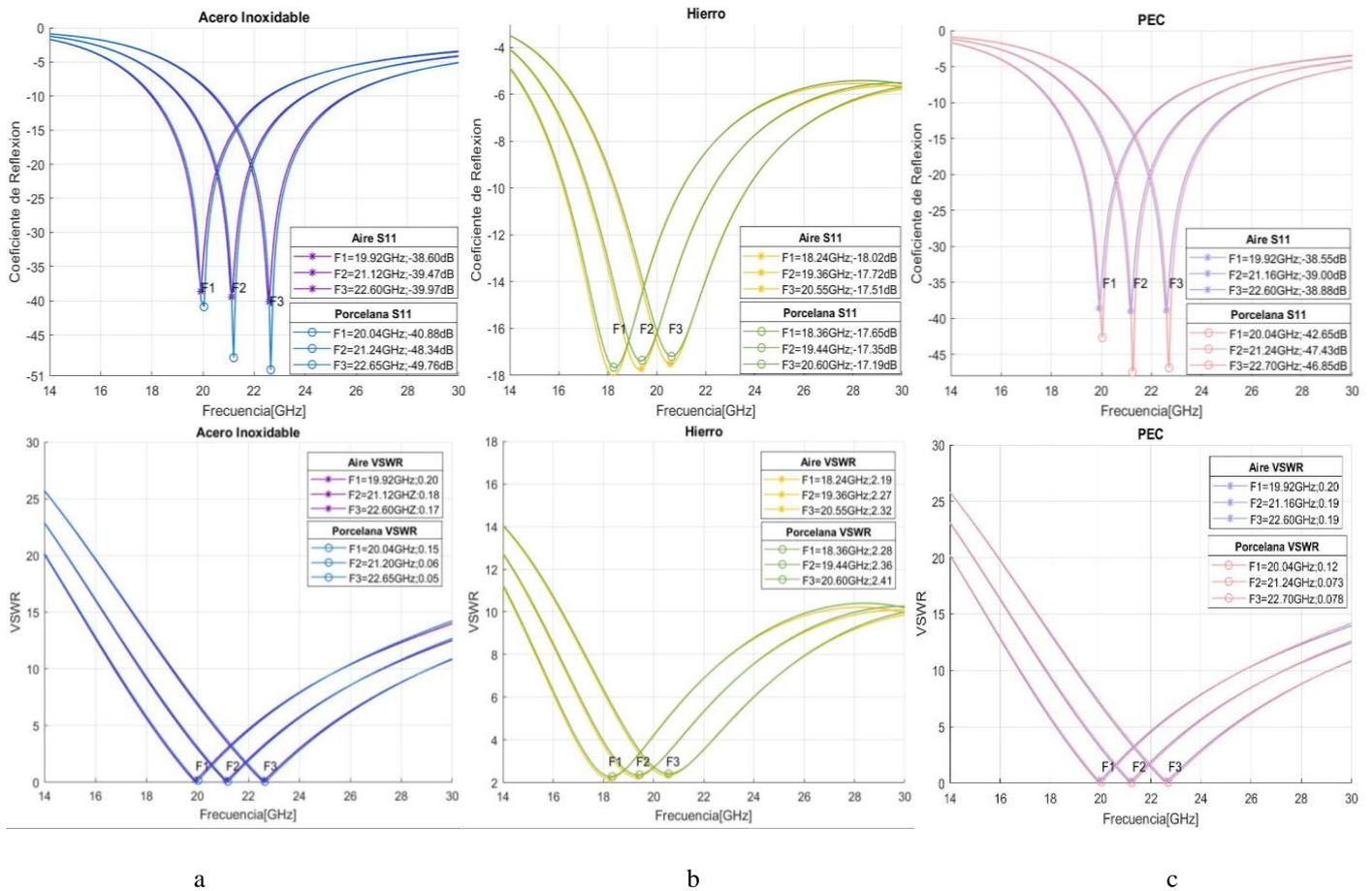


Fig. 4. S11 y VSWR del modelo matemático en las frecuencias de trabajo $f_1=24.25$ GHz, $f_2=25.8$ GHz, $f_3=27.5$ GHz, (a) Modelos con el conductor de acero inoxidable, aislante de aire y porcelana, (b) Modelos con el conductor hierro, aislante de aire y vidrio, (c) Modelo con el conductor de PEC aislante de aire y vidrio.

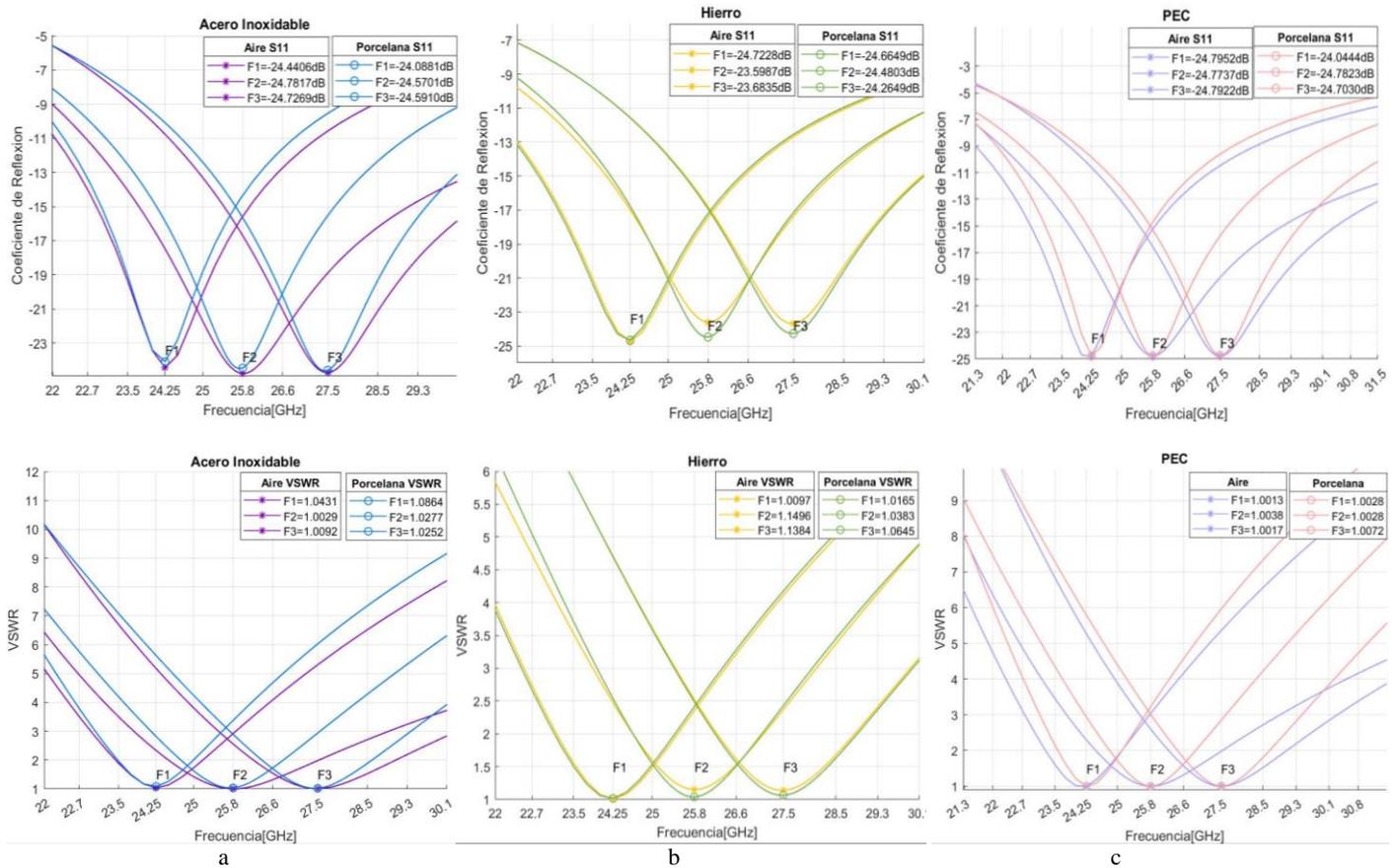


Fig. 5. S11 y VSWR del modelo experimental en las frecuencias de trabajo $f_1=24.25$ GHz, $f_2=25.8$ GHz, $f_3=27.5$ GHz, (a) Modelos con el conductor de acero inoxidable, aislante de aire y porcelana, (b) Modelos con el conductor hierro, aislante de aire y vidrio, (c) Modelo con el conductor de PEC aislante de aire y vidrio.

En el modelo ajustado cuando se trabaja con acero inoxidable se logra un VSWR idóneo, esto se debe a que se disminuyó la longitud de los brazos y se aumentó el tamaño del radio, es importante tomar en cuenta este último parámetro cuando se trabaja en frecuencias altas, ya que al reducir el tamaño de la antena lo que provoca es que la impedancia se modifique, por lo tanto, el radio debe subir debido al acoplamiento de variables capacitivas que se presenta en la interacción con los conductores. En las frecuencias de 25.80 y 27.50 GHz cuando se trabaja con el dieléctrico de aire es necesario modificar el tamaño de este, ya que al ser esta más grande, la onda reflejada es menor, por ende se tiene una mejor relación de onda estacionaria esto se debe a que a mayor frecuencia, existe más atenuación por lo cual se necesita un material cuya permitividad sea alta para que las pérdidas sean pequeñas, dependerá en gran parte de las características y tamaño del dieléctrico en el rendimiento de la antena, sin embargo, cuando se trabaja con porcelana este parámetro no se modifica, esto se debe a que el material presenta mejores propiedades aislantes a comparación del aire. Para poder ajustar y tener un mejor parámetro, se podría aumentar la dimensión de esta variable, puesto que cuando más grande es el S, el VSWR sube, pero también la frecuencia de resonancia se modifica ya que se desplaza a la izquierda lo que conlleva a reducir mucho más la longitud de los brazos para poder ajustar la frecuencia a la cual resuena la antena, además no se cumple con la fórmula 3 que se ha propuesto para el diseño del dipolo plegado, no obstante se podría modificar en el caso que se necesite tener antenas más pequeñas. De forma similar sucede con el PEC se toma como referente, ya que es un material con un conductor perfecto, con los materiales de cobre, aluminio y oro se tiene un comportamiento similar a estos dos materiales descritos, aunque el hierro presentó diferente comportamiento.

Cuando se emplea el hierro como material para los brazos conductores se denota que tiene un comportamiento diferente en los parámetros de dispersión a diferencia de los materiales de la figura 4 (a) y (c), esto se debe a la alta permeabilidad que posee el material, ya que el campo magnético o eléctrico que se genere, causará una perturbación en la onda lo que implica que exista pérdidas al momento de propagarse, por esta razón es importante tomar en cuenta las propiedades del conductor para que el campo electromagnético no cause perturbaciones al momento de propagarse. En el modelo matemático en el VSWR, se observa que se tiene un parámetro de dispersión que no cumple con el objetivo propuesto en este estudio, lo cual implicó que se modifique los parámetros físicos de la antena L, l', R, S, aquí se observa que en las frecuencias de 25.80 y 27.50 GHz no se debe modificar este último parámetro cuando se trabaja con aire, pese a que con el material de porcelana se vio en la necesidad de aumentar el tamaño del S, porque también se disminuye la longitud de los dos polos conductores l', lo que produce que el VSWR descienda, aunque para que la frecuencia se desplace a la derecha, es necesario reducir el brazo L, para sintonizar la frecuencia y ayudar a que el punto mínimo del VSWR baje, no obstante en el S11 se observa una variación mínima cuando se cambia estos valores.

Entre la comparación de los dos modelos, se puede rescatar que cuando se realiza el ajuste de la frecuencia es necesario rectificar algunos parámetros del diseño de la antena para poder sintonizar en las frecuencias requeridas y obtener los parámetros de dispersión propuestos, por ejemplo, cuando se reduce la longitud de los brazos, la frecuencia se desplaza a

la derecha, lo que permite que la frecuencia de trabajo sea sintonizada. Además, de permitir un mejor ajuste en los parámetros de desempeño, se observó que la permeabilidad de un material influye en el comportamiento de la antena dado que al simular con los diferentes materiales como el oro, cobre, aluminio, acero inoxidable, tuvieron un comportamiento similar al material PEC, que se ha tomado como referente por ser un material altamente conductivo, ya que tiene una permeabilidad similar a 1, mientras que el hierro tiene una permeabilidad de 400, denotando que se encuentra una mayor desviación en la frecuencia y en los parámetros de dispersión ideales.

En la tabla VI, se visualizan los valores que se obtuvo al trabajar con diferentes materiales tanto para el polo como para el dieléctrico, también se observa el desfase existente entre un modelo matemático versus el ajustado. En el VSWR se puede visualizar que el desfase es proporcional a la frecuencia, es decir cuando esta aumenta también lo hace el desfase, de igual forma sucede con el S11, sin embargo, cuando se trabaja con el material del hierro el desfase es menor a diferencia de otros materiales que poseen desfases altos. Cuando se utiliza el aire como aislante para el dieléctrico el desfase en los parámetros de dispersión es menor a comparación del aislante de porcelana.

Tabla VI. Desfase de los parámetros VSWR, S (1,1) del diseño matemático y experimental de la antena dipolo doblado.

	F [GHz]	VSWR			S (1,1) [dB]			
		Matemático	Ajustado	Desfase	Matemático	Ajustado	Desfase	
ACERO INOXIDABLE	Aire	24.25	0.204	1.043	411.07%	-38.60	-24.44	36.689%
		25.80	0.184	1.002	443.57%	-39.47	-24.71	37.223%
		27.5	0.174	1.009	479.33%	-39.97	-24.72	38.146%
	Porcelana	24.25	0.156	1.086	592.41%	-40.88	-24.08	41.083%
		25.80	0.066	1.027	1445.4%	-48.34	-24.57	49.172%
		27.5	0.056	1.025	1717.7%	-49.76	-24.59	50.585%
HIERRO	Aire	24.25	2.192	1.009	53.945%	-18.02	-24.72	37.161%
		25.80	2.270	1.149	49.376%	-17.72	-23.59	33.159%
		27.5	2.326	1.138	51.074%	-17.51	-23.68	35.230%
	Porcelana	24.25	2.289	1.016	55.592%	-17.65	-24.66	39.713%
		25.80	2.369	1.038	56.178%	-17.35	-24.48	41.032%
		27.5	2.416	1.064	55.941%	-17.19	-24.26	41.155%
PEC	Aire	24.25	0.205	1.001	387.96%	-38.55	-24.79	35.688%
		25.80	0.194	1.003	415.29%	-39.00	-24,77	36.485%
		27.5	0.340	1.001	407.44%	-38.88	-24,79	36.249%
	Porcelana	24.25	0.128	1.002	683.43%	-42.65	-24,04	43.631%
		25.80	0.073	1.002	1258.8%	-47.43	-24,78	47.755%
		27.5	0.078	1.007	1176.5%	-46.85	-24,70	47.281%

C. PATRÓN DE RADIACIÓN

Las propiedades de radiación son representadas en un diagrama gráfico, las mismas que medirán la intensidad de radiación de la antena en una frecuencia establecida en función de distintas direcciones del espacio, determinadas por los ángulos de phi y theta en coordenadas esféricas, con el

objetivo de determinar la ganancia de antena a través de las ondas electromagnéticas que están compuestas por los dos campos eléctrico y magnético. [14]

En la figura 6 se presenta el diagrama de radiación en 2D que tiene un corte bidimensional en el plano E y el patrón de radiación en 3D donde se observa que es omnidireccional parecido a una dona.

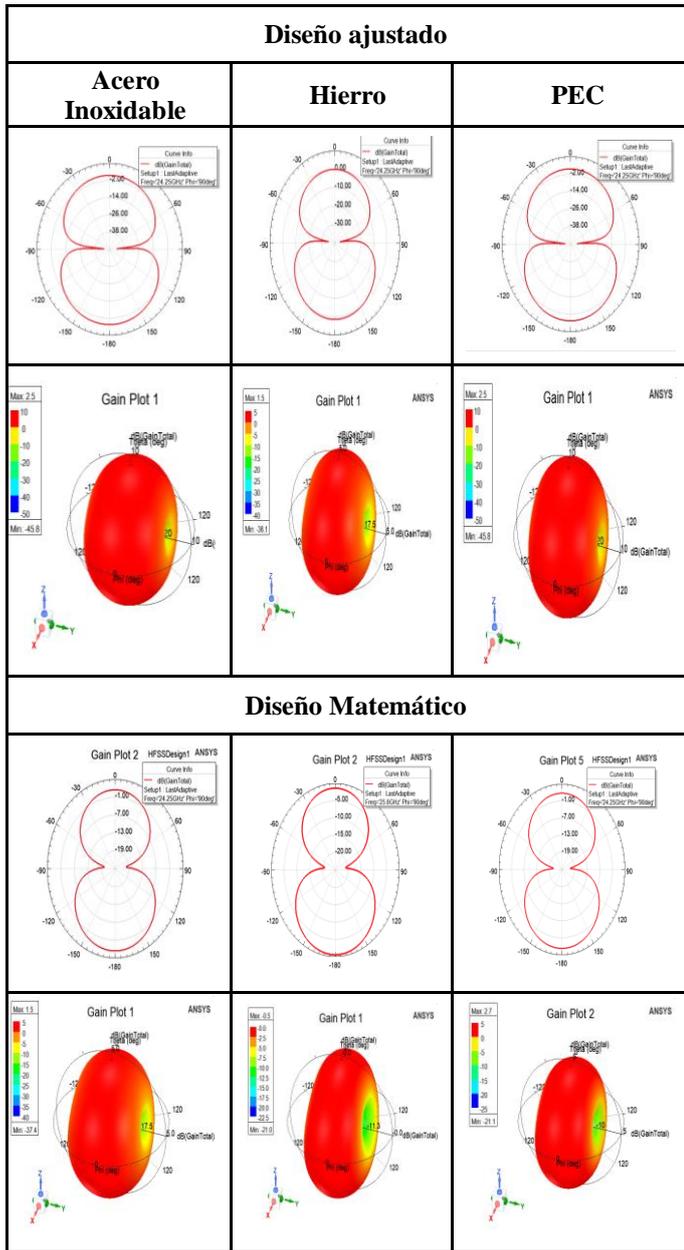


Fig6. Patrones de radiación del diseño ajustado en las frecuencias de 24.25, 25.8 y 27.5 GHz.

En la tabla VII, se exponen las ganancias máximas que se obtuvieron a través del software para los diferentes materiales simulados, cuando se trabaja con el material de hierro se tiene pérdidas en el modelo matemático mientras que en el ajustado ya se tiene una ganancia mayor a 1 dB, porque al modificar el tamaño del radio del polo conductor influye en la ganancia de la antena, cuando se tiene el PEC como material y un dieléctrico de porcelana en la frecuencia de 25.8 GHz presenta la mejor ganancia además tiene un desfase aproximado del 8% mientras que cuando se trabaja en una frecuencia de 24.5 GHz con el material de acero inoxidable y porcelana se tiene pérdidas en vez de ganancias, su desfase es igual del 8% con respecto al teórico.

Tabla VII. Ganancia máxima de los modelos matemático y experimental de la antena dipolo doblado.

		Matemático		Ajustado	
		Frecuencia de resonancia [GHz]	Ganancia máxima [dB]	Frecuencia de resonancia [GHz]	Ganancia máxima [dB]
ACERO INOXIDABLE	Aire	19.92	2.6	24.25	2.5
		21.12	2.6	25.8	2.7
		22.6	2.6	27.5	2.6
	Porcelana	20.04	2.6	24.25	2.4
		21.20	2.6	25.8	2.7
		22.65	2.6	27.5	2.7
HIERRO	Aire	18.24	-0.5	24.25	1.5
		19.36	-0.6	25.8	1.3
		20.55	-0.6	27.5	1.0
	Porcelana	18.36	-0.5	24.25	1.4
		19.44	-0.6	25.8	0.7
		20.6	-0.6	27.5	1
PEC	Aire	19.92	2.6	24.25	2.7
		21.16	2.6	25.8	2.7
		22.6	2.8	27.5	2.7
	Porcelana	20.04	2.6	24.25	2.6
		21.24	2.6	25.8	2.8
		22.7	2.6	27.5	2.7

III. CONCLUSIONES

Dentro del modelo matemático basado en las fórmulas teóricas, se evidencia un desajuste en la frecuencia de resonancia y parámetros de dispersión lo que implica realizar cierta variación en el polo y dieléctrico, con el fin de tener un modelo que se ajuste a los parámetros ideales. El desfase de la frecuencia de resonancia es aproximadamente del 21%, cuando se trabaja con los materiales de acero Inoxidable y PEC mientras que con el Hierro existe un mayor desfase llegando alcanzar aproximadamente un 33%.

Se ha verificado que el material PEC, para el brazo conductor es el que mejor se ajustó, dado que se obtuvo un VSWR ideal en 24.25 GHz, 25.80 GHz y 27.5 GHz, con un aislante de aire y porcelana tienen una media de 1, la onda que se refleja es casi nula, debido a la conductividad que presenta el material; además, su coeficiente de reflexión tiene pérdidas menores del 1% lo que permite una máxima transferencia de potencia.

Se evidenció que según se incrementa la frecuencia se reduce el tamaño de la antena, mientras que el radio del dipolo plegado aumenta en más del 100%, dichos datos se obtuvieron del análisis del desfase existente entre los dos modelos. También la variable (S), no cumple con la fórmula teórica, ya que para obtener los parámetros ideales fue necesario aumentar dicho valor sobrepasando el límite establecido.

IV. REFERENCIAS

- [1] ITU NEWS MAGAZINE, «Gestión del espectro para unas tecnologías que evoluciona,» de Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones 2019, Sharm El-Sheikh, 2019.

- [2] L. B. & G. S. Bhajantri, «A comprehensive survey on resource management in internet of things.,» *Journal of Telecommunications and Information Technology*, p. 27–43, 2020.
- [3] D. F. & A. L. Carrera, «La red 5G , ondas milimétricas y redes neuronales,» p. 1–8, 2021.
- [4] C. Y. Guang Hua, L. Ping, Hou-Xing Zhou y . H. Wei , «Microstrip Folded Dipole Antenna for 35 GHz MMW Communication,» *Hindawi*, vol. 2013, 2013.
- [5] F. X. López Orbea Y I. S. Torre Trujillo, *Comparación De Los Parámetros De Dispersión De La Antena Dipolo De Media Onda En Las Frecuencias De 60, 67 Y*, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2021.
- [6] K. M. Ortiz Guerra Y B. D. Villamar Arias, *Comparación De Los Parámetros De Dispersión De Una Antena Dipolo Para Las Frecuencias De 60, 67 Y 74 Ghz*, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2021.
- [7] E. A. & P. B. H. Ladino, «Diseño y simulación de una antena en frecuencia de microondas para la proyección de un radioenlace entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de los Andes,» 2018, p. 1–26.
- [8] E. A. Ladino Ordoñez Y B. H. Parra Ortega, *Diseño Y Simulación De Una Antena En Frecuencia De Microondas Para La Proyección De Un Radioenlace Entre La Universidad Católica De Colombia Y La Universidad De Los Andes*, Bogotá, 2018.
- [9] S. Das y A. K. Iyer, «Fully Printed and Electrically Small Folded Dipole with Inherent Matching,» *Antennas and Propagation IEEE Transactions*, vol. 69, n° 12, pp. 8914-8919, 2021.
- [10] S. Noghaniam, «Efficient and Accurate Simulation of Antenna Arrays in Ansys HFSS,» abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.padtinc.com/blog/efficient-and-accurate-simulation-of-antenna-arrays-in-hfss/>. [Último acceso: 20 diciembre 2021].
- [11] O. D. Ossa Molina, A. L. Forero Camen y C. Espinal Ramírez, «Efectos En El Coeficiente De Reflexión De Una Antena De Microcinta,» *EIA*, vol. 14, n° 28, pp. 85-97, 2017.
- [12] D. Hernandez Crespo, «Optimización de antenas Uda-Yagi,» *Doctoral dissertation, Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones*, 2018.
- [13] J. A. García Muñoz, «Diseño De Antena De Parche Monopulso A 2.45 Ghz,» *Universidad Politécnica De Cartagena*, 2018.
- [14] J. A. C. Zamora, «Fundamentos de Antenas,» *Electromagnetismo y Electronica*, 6 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://medium.com/introduccion-a-antenas/introducci%C3%B3n-a6bfa0529410>. [Último acceso: 25 diciembre 2021].