



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**ANÁLISIS DE LA GANANCIA DE UNA ANTENA DIPOLO DE MEDIA ONDA
PARA LA FRECUENCIA DE 2.4GHz**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: Alex Michael Oña Suntaxi

TUTOR: Carlos Augusto Cuichán Morales

Quito-Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alex Michael Oña Suntaxi con documento de identificación No.1723950166; manifiesto que:
Soy el autor responsable del presente trabajo; y, autorizo 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, 17 de julio del 2025

Atentamente,



Alex Michael Oña Suntaxi

1723950166

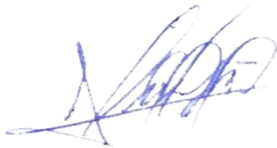
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DEL TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Alex Michael Oña Suntaxi con documento de identificación No.1723950166; expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del artículo académico: “Análisis de la ganancia de una antena dipolo de media onda para la frecuencia de 2.4GHz”, el cual ha sido desarrollado previo a la obtención del título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 17 de julio de 2025

Atentamente,



Alex Michael Oña Suntaxi

1723950166

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Augusto Cuichán Morales, con documento de identificación No. 1714389721, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE LA GANANCIA DE UNA ANTENA DIPOLO DE MEDIA ONDA PARA LA FRECUENCIA DE 2.4 GHZ, realizado por Alex Michael Oña Suntaxi con documento de identificación No. 1723950166, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 17 de julio del año 2025

Atentamente,



Ing. Carlos Augusto Cuichán Morales, MSc.
1714389721

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haber sido mi guía y fortaleza en cada etapa de este camino. Su presencia me dio paz en los momentos difíciles y confianza para seguir adelante.

A mis padres y a mi hermana, por su amor incondicional, por creer en mí siempre, y por ser el mayor ejemplo de esfuerzo y entrega. Gracias por estar a mi lado en cada paso de este proceso.

A mi enamorada, por su apoyo constante, su comprensión y por brindarme ánimo incluso en los momentos más exigentes. Su compañía fue fundamental para alcanzar esta meta.

A la memoria de mis abuelitos, cuyo amor y enseñanzas continúan vivos en mí. Aunque no estén físicamente, siento su presencia en cada logro que alcanzo.

A la universidad, por brindarme una formación académica sólida y un entorno que me permitió crecer tanto profesional como personalmente.

Y a mi tutor de tesis, por su orientación, compromiso y paciencia durante todo este proceso. Su guía fue clave en el desarrollo de este trabajo.

A todos ustedes, gracias por formar parte de este logro.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a quienes han sido parte fundamental de mi vida y de este camino.

A Dios, por brindarme la fuerza y el ánimo necesarios para continuar.

A mi familia, por su apoyo constante, su amor incondicional y por estar siempre presentes.

A quienes me acompañaron con cariño y paciencia en este proceso.

Y a la memoria de quienes ya no están, pero siguen vivos en mi corazón.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Abstract.....	2
1. Introducción	3
2. Metodología	4
2.1 Antena dipolo.....	4
2.1.1 Adaptaciones electromagnéticas y geométricas.....	5
2.1.2 Análisis de ganancia de los diseños teóricos.....	6
2.2 Implementación del modelo propuesto.....	7
2.3 Correlación de variables	10
2.3.1 Correlación de ganancia de la Alúmina con el radio, longitud y Gap	10
2.3.2 Correlación de ganancia de la Plástico con el radio, longitud y Gap	11
2.3.3 Correlación de ganancia de la Teflón con el radio, longitud y Gap	12
2.4 Diseño de cobre y alúmina	13
2.5 Diseño de Cobre y Plástico.....	14
2.6 Diseño de Cobre y Teflón.....	15
2.7 Proceso para determinación de errores	17
3. Resultados y Discusión	17
3.1 Gráficos de comparación de variación de errores en el dieléctrico Alúmina, plástico y teflón	19
3.2 Desfase promedio entre modelo teórico y sintonizado	20
4. Conclusiones	20
5. Referencias.....	21

RESUMEN

La antena dipolo se utiliza frecuentemente en sistemas inalámbricos, pero su comportamiento real puede diferir del modelo teórico por factores como condiciones ambientales, calidad de materiales, precisión de fabricación e interacción con estructuras cercanas. Esta discrepancia puede reducir su ganancia efectiva y afectar el rendimiento del sistema de comunicación. Por ello, resulta imprescindible un análisis que combine simulaciones y mediciones experimentales para optimizar su desempeño en la frecuencia de interés.

Este trabajo analiza la ganancia de una antena dipolo de media onda operando en la banda Wi-Fi (2,38 GHz–2,42 GHz), utilizando simulaciones en ANSYS HFSS y regresión lineal en RStudio. Se optimiza la ganancia según dimensiones clave (radio, longitud y gap) y los materiales de los brazos (aluminio, cobre, oro) y del dieléctrico en el gap (teflón, alúmina, plástico). Los resultados muestran una correlación superior al 97 % entre ganancia y dimensiones, y evidencian que el material de construcción influye significativamente en el comportamiento electromagnético.

Se obtienen modelos predictivos con valores de R^2 superiores al 97 %, lo que indica una alta capacidad explicativa. Además, el análisis revela que cambiar el material dieléctrico impacta la ganancia: a mayor permitividad, se reduce el desfase respecto a los valores teóricos simulados.

PALABRAS CLAVE:

Antena dipolo, ganancia, regresión lineal, ANSYS HFSS, materiales dieléctricos

ABSTRACT

The dipole antenna is frequently used in wireless systems, but its actual performance can differ from the theoretical model due to factors such as environmental conditions, material quality, manufacturing precision, and interaction with nearby structures. This discrepancy can reduce its effective gain and impact communication system performance. Therefore, it is essential to conduct an analysis that combines simulations and experimental measurements to optimize its performance at the frequency of interest.

This study analyzes the gain of a half-wave dipole antenna operating in the Wi-Fi band (2.38 GHz–2.42 GHz), using simulations in ANSYS HFSS and linear regression modeling in RStudio. Gain optimization is performed based on key dimensions (radius, length, and gap) and the materials of the antenna arms (aluminum, copper, gold) and the dielectric in the gap (PTFE, alumina, plastic). The results show a correlation exceeding 97 % between gain and physical dimensions and demonstrate that construction material significantly influences electromagnetic behavior.

Predictive models with R^2 values exceeding 97 % were obtained, indicating high explanatory power. Additionally, the analysis reveals that changing the dielectric material affects gain: higher permittivity reduces the phase shift relative to the simulated theoretical values.

KEYWORDS:

Dipole antenna, gain, linear regression, ANSYS HFSS, dielectric materials.

ANÁLISIS DE LA GANANCIA DE UNA ANTENA DIPOLO DE MEDIA ONDA PARA LA FRECUENCIA DE 2.4 GHz

Oña Suntaxi Alex Michael

Universidad Politécnica Salesiana, UPS, Quito, Ecuador

aonas1@est.ups.edu.ec

1. Introducción

Estar comunicados en la actualidad se ha vuelto parte de la cotidianidad, lo que en el pasado implicaba recorrer grandes distancias o esperar respuesta durante días, semanas e incluso meses; hoy en día estar interconectados está al alcance de la mayoría de la población a nivel nacional e incluso mundial; esto ha ocasionado un incremento de conexiones simultáneas lo que genera y aborda una problemática que debe resolverse de manera constante y llama la atención a varios investigadores debido a que la misma está basada en la tecnología de quinta generación o más conocida como 5G abarcando tanto eficacia, diseño, construcción y optimización de antenas en frecuencias como 2.4GHz lo cual reviste de importancia debido a su amplio uso en aplicaciones de comunicación inalámbrica tales como el Wi-Fi y Bluetooth, las cuales a menudo no logran satisfacer las necesidades de rendimiento y eficiencia [1] y actualmente las más utilizadas por diversos dispositivos electrónicos de varios hogares, trabajos, instituciones, entre otras.

Esta interacción entre usuarios y dispositivos se logra mediante antenas, esta es un dispositivo capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas del espacio [2] es decir esta es una interfaz entre el espacio libre y la línea de transmisión. Dependiendo de su propósito, frecuencia de operación, condiciones del entorno podemos mencionar diversos tipos de antena, entre las más utilizadas se encuentran antenas direccionales, parabólicas, de panel y antena dipolo, cada una de estas es adaptada a necesidades particulares como cobertura, ganancia o direccionalidad. Dentro de estos una de la más utilizada es la antena dipolo porque son fáciles de fabricar y reciben señales balanceadas [3], debido a que esta puede resonar a una frecuencia en particular y esto permite operar un diseño eficiente de una antena dipolo

Este análisis considera variables clave de diseño como las dimensiones físicas de la antena (radio, longitud y separación), el material conductor de los brazos (aluminio, cobre y oro) y el material dieléctrico en la separación (teflón, alúmina y plástico). Los resultados muestran que la ganancia de la antena presenta una fuerte correlación superior al 95% en la ganancia, con sus dimensiones geométricas, siendo la elección de materiales un factor que influye significativamente en el comportamiento

electromagnético. Se obtuvieron modelos predictivos con altos coeficientes de determinación ($R^2 > 95\%$), lo que confirma la fiabilidad de las simulaciones. Además, al variar el material dieléctrico, la ganancia se ve afectada dependiendo de la permitividad de cada material: a mayor permitividad, menor es la desviación entre los valores simulados y los valores teóricos de ganancia. Este enfoque proporciona una base sólida para la optimización del diseño de antenas en entornos reales de comunicación inalámbrica.

2. Metodología

Una antena dipolo en aplicaciones de comunicación inalámbrica emplea un rango de frecuencia de 2,38 GHz a 2,42GHz, para lo cual parte con simulaciones en el sistema ANSYS HFSS. En la figura 1 se observa, la estructura y diseño de antena dipolo para el análisis de frecuencias.

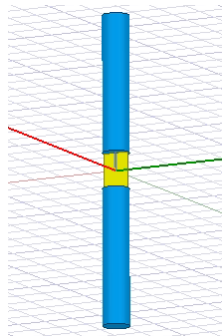


Fig 1. Modelo de antena dipolo

Para realizar el análisis de frecuencias de 2,38 GHz a 2,42GHz en primer lugar se inicia la elaboración de un modelo matemático que proporciona una visión completa y específica del comportamiento de la antena, para posteriormente llevarlo a un método experimental la cual conlleva medición y registro de datos en la plataforma ANSYS HFSS y posterior a RStudio. Finalizando con la evaluación del comportamiento de la antena dipolo en dicha frecuencia, así como la determinación de su ganancia.

2.1 Antena dipolo

Para la ejecución del presente análisis, parte de la realización de un modelo de antena dipolo simétrica en HFSS alimentada por un puerto lumped ubicado en el centro del conducto, el cual actúa como punto de excitación para la señal de alta frecuencia, se establece un gap, lo cual es un valor típico que permite una excitación eficiente sin perturbar la simetría del campo eléctrico, con la correcta elección de la Longitud y radio del conductor que influye directamente en la eficiencia de radiación y ganancia mediante simulación electromagnética y análisis estadístico. Para ello se aborda dos

partes esenciales el análisis de las adaptaciones electromagnéticas-geométricas y la simulación en el sistema ANSYS HFSS de forma teórica.

2.1.1 Adaptaciones electromagnéticas y geométricas

La antena dipolo de media onda creada con frecuencia de resonancia de 2.4GHz en ANSYS HFSS para validación de este estudio inicia con modificaciones tanto en sus materiales para brazos conductores, así como para el dieléctrico presente en ellos. En la tabla 1, se observan características en cuestión que permiten el uso de materiales aluminio, cobre y oro, por su permitividad relativa, así como su permeabilidad relativa.

Tabla 1. Características de conducción eléctrica de materiales empleados en las simulaciones

Materiales	Permitividad relativa	Permeabilidad relativa
Aluminio	1	1,000021
Cobre	1	0,999991
Oro	1	0,99996
Teflón	2.1	1
Plástico	2.7	1
Alúmina	9.2	1

Permitiendo el uso de dichos materiales para las adaptaciones electromagnéticas a su vez se emplea se realizan adaptaciones geométricas en dimensiones y material conductor para su óptimo funcionamiento, para la cual se aplica la ecuación 1 para hallar la longitud de onda donde c y f son la velocidad de propagación de la luz ($3*1000000000\text{m/s}$) y la frecuencia (Hz), respectivamente

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

La longitud de onda total (L) permite determinar el tamaño físico de una antena y asegurar su eficiencia en la transmisión, donde L es longitud de onda (m), λ es la distancia entre dos puntos equivalentes de ondas consecutivas metros (m) y f es frecuencia (Hz) (Ver ecuación 2)

$$L = \frac{\lambda}{f} \quad (2)$$

Tamaño del radio (r), permite determinar la longitud de la antena, asegurar su resonancia, optimizar la eficiencia y facilitar el cálculo para que esta pueda ser adaptada a la antena. Donde r es el tamaño del radio, λ es la distancia entre dos puntos equivalentes de ondas consecutivas, metros (m) (Ver ecuación 3).

$$r = \frac{\lambda}{1000} \quad (3)$$

El gap (g) permite determinar el espacio que existe entre los brazos conductores, donde g es gap (m) y L es longitud de onda (m). (Ver ecuación 4)

$$g = \frac{L}{200} \quad (4)$$

2.1.2 Análisis de ganancia de los diseños teóricos

Este análisis fue dividido en dos procesos independientes, el primero, enfocado en correlacionar la ganancia con variables físicas como la longitud de dipolo, el radio del conductor y el ancho del gap; el segundo, dirigido al estudio del impacto de VSWR y S11 y la ganancia. Para esto, se utilizan funciones estadísticas como cor() con método “Spearman”, permitiendo evaluar la relación monótona entre variables sin asumir una distribución lineal escrita, para ello se emplea el uso de las plataformas ANSYS HFSS Y RStudio, descritas a continuación:

ANSYS HFSS actúa como eje central ya que este permite la simulación de la antena a una frecuencia de 2.4GHz colocando las dimensiones de la longitud, radio, gap; así como sus materiales en brazos conductores y dieléctricos, este otorga una visión digital del modelado de la antena, así como sus valores de VSWR, S11 y la ganancia máxima en dBi que permite la interpretación de resultados y proporciona una guía en cuanto a la relación de las variables frecuencia, S11, VSWR y ganancia, la última a la cual se enfoca el presente trabajo.

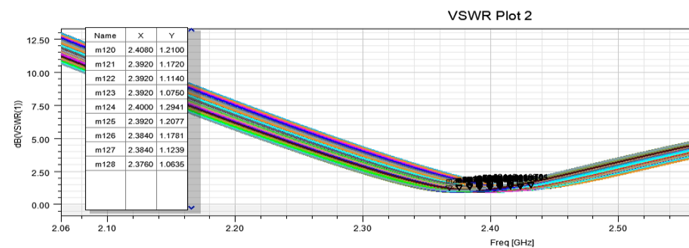


Fig. 2 VSWR vs Frecuencia

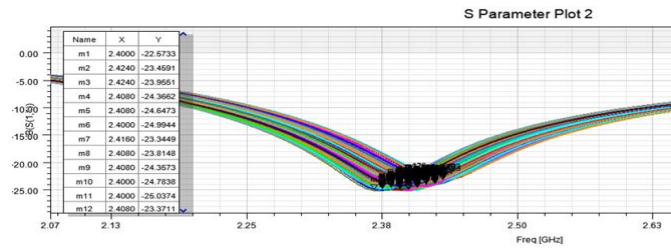


Fig.3. S11 vs Frecuencia

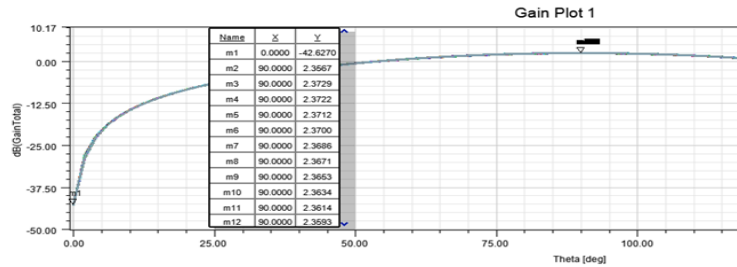


Fig 4. Ganancia en el punto máximo

Sistema RStudio se ocupa de cargar los datos obtenidos de las simulaciones y aplicar análisis de correlación de Spearman, pruebas de normalidad, análisis de varianza (ANOVA) y regresión lineal múltiple. Este sistema es el encargado de generar gráficos de dispersión, histogramas, diagramas de cajas y gráficos de valores sintonizados vs reales (matemáticos) para todas las variables que permite establecer correlaciones de la ganancia.

Una vez obtenidos los datos simulados, se exporta y analiza en RStudio, con el objetivo de evaluar la correlación estadística entre las variaciones de diseño y la ganancia obtenida. Se emplearon herramientas de análisis multivariable y regresión lineal para determinar la consistencia y validez de los resultados.

2.2 Implementación del modelo propuesto

La antena dipolo de media onda es diseñada y simulada utilizando el software ANSYS HFSS, partiendo de las dimensiones teóricas correspondientes a una frecuencia de operación de 2.4 GHz. Sin embargo, en la simulación inicial, los resultados muestran un desfase significativo respecto a la frecuencia, evidenciado por una frecuencia de resonancia fuera del rango deseado, un S11 superior a -10 dB, un VSWR elevado (mayor a 2) y una ganancia fuera del valor esperado para un dipolo $\lambda/2$, que típicamente se sitúa en torno a los 2.15 dBi. Estos resultados indican una inadecuada adaptación de impedancia y una baja eficiencia.

Como muestra de la desviación existente entre los valores teóricos calculados, en base a las ecuaciones de longitud de onda (ver ecuación 1) y cálculo del gap (ver ecuación

4) se realizan diseños de antenas alrededor de la frecuencia de resonancia en el rango deseado y se calcula el error relativo porcentual.

Un ejemplo se muestra en la tabla 2, así como también los errores relativos respecto a las simulaciones de estas misma. Considerando la ganancia de una antena dipolo en medio libre se toma como valor constante de 2.15dBi.

Tabla 2. Ejemplo de los datos obtenidos en el diseño de dipolos de media onda en el rango de 2.395-2.405 GHz y el error relativo en la ganancia en el material cobre.

Dimensiones Empleadas			Datos teóricos calculados		Datos prácticos obtenidos		Error Relativo al valor teórico
r [mm]	g [mm]	l [mm]	f [GHz]	G [dBi]	f [GHz]	G [dB]	%
1.25	0.312	31.25	2.395	2.15	3.6	1.835	17.16
1.25	0.312	31.25	2.396	2.15	3.6	1.835	17.16
1.25	0.312	31.27	2.397	2.15	3.6	1.809	18.85
1.25	0.312	31.27	2.398	2.15	3.6	1.809	18.85
1.25	0.312	31.25	2.399	2.15	3.6	1.835	17.16
1.25	0.312	31.25	2.400	2.15	3.6	1.835	17.16
1.25	0.312	31.22	2.401	2.15	3.6	1.992	7.93
1.24	0.312	31.22	2.402	2.15	3.6	1.791	20.05
1.24	0.312	31.20	2.403	2.15	3.6	1.791	20.05
1.24	0.312	31.20	2.404	2.15	3.6	1.870	14.97
1.24	0.311	31.17	2.405	2.15	3.6	1.870	14.97

En base a la tabla anterior el mejor diseño que establece los cálculos para los parámetros dimensionales en una antena dipolo a la frecuencia 2,4GHz la tabla 3:

Tabla 3. Cálculo de los parámetros dimensionales de la antena dipolo a la frecuencia 2.4 GHz en condiciones normales teóricas.

Parámetro	Símbolo	Valor típico	Unidad
Frecuencia	F	2,4	GHz
Radio del conductor	r	1,25	mm
Longitud total	L	62.5	mm
Gap	g	0,5	mm
Dipolo	l	31.25	mm

Con el fin de corregir estos desajustes, se procedió a ajustar o sintonizar la antena mediante la manipulación de variables físicas y materiales, incluyendo:

1. Dimensiones estructurales estos son:
 - a. Longitud del dipolo
 - b. Radio del conductor
 - c. Separación del gap central.
2. Material del dipolo
 - a. Aluminio
 - b. Cobre
 - c. Oro.
3. Material dieléctrico: como medio dieléctrico envolvente, con fines comparativos y de análisis del impacto de conductores como sustitutos en entornos simulados se toma en cuenta los siguientes:
 - a. Alúmina
 - b. Teflón
 - c. Plástico

Las simulaciones se centran en un rango estrecho de frecuencias, 2.39–2.403 GHz, para identificar las configuraciones que ofrecen mejor ganancia, mínima reflexión ($S_{11} < -15$ dB) y VSWR cercano a 1.5. A través del análisis de los distintos materiales, se pudo observar el efecto que tienen las propiedades electromagnéticas (permitividad, conductividad y permeabilidad) en el desempeño total de la antena. Para este fin se emplean 2000 valores.

En la tabla 4 se muestra un ejemplo de los diseños de antena obtenidos para la implementación de un modelo propuesto concretamente en el material Cobre para los brazos y el material Alúmina.

Tabla 4. Ejemplo de datos de diseños de antenas dipolo válidos.

ÍTEM	Dimensiones Empleadas			Datos Obtenidos Simulador			
	r [mm]	g [mm]	l [mm]	f [GHz]	VSWR	S11	G[dB]
1	2.05	4.1	23.85	2.397	1.539	-21.073	2.416
2	2.05	4.15	23.85	2.397	1.674	-20.460	2.416
3	2.05	4.2	23.85	2.397	1.691	-20.99	2.415
4	2.05	4.25	23.85	2.397	1.652	-21.138	2.413
5	2.1	4.1	23.85	2.397	1.420	-21.461	2.410
6	2.1	4.15	23.85	2.397	1.594	-20.826	2.407
7	2.1	4.2	23.85	2.397	1.553	-21.381	2.406
8	2.1	4.25	23.85	2.397	1.634	-21.526	2.405
9	2.15	4.1	23.85	2.397	1.461	-21.865	2.404
10	2.15	4.15	23.85	2.397	1.527	-21.206	2.403
11	2.15	4.2	23.85	2.397	1.577	-21.782	2.401
12	2.15	4.25	23.85	2.397	1.549	-21.930	2.400

2.3 Correlación de variables

2.3.1 Correlación de ganancia de la Alúmina con el radio, longitud y Gap

El término correlación es una medida estadística que indica que tan fuerte y en qué dirección están relacionadas dos variables cuantitativas [4], para analizar la correlación necesaria en el presente estudio.

La tabla 5 muestra los datos del coeficiente de correlación de Spearman obtenidos tras la compilación en RStudio con los datos simulados previamente en ANSYS HFSS para el material cobre con el dieléctrico alúmina donde se despliega cada parámetro importante como frecuencia, VSWR, S11 y ganancia en función de su radio, Gap y Longitud.

Tabla 5. Coeficiente de Correlación de Spearman cobre-alúmina

Factor	Frecuencia	VSWR	S11	Ganancia
Radio R	-0.02651894	-0.1783421	-0.4584544	-0.3187926
Gap g	0.006423058	0.4532225	-0.01142578	-0.0554499
Longitud <i>l</i>	-0.02170091	-0.4450142	-0.3427121	-0.8593477

Tras ello se procede a establecer la correlación de la ganancia a la que va enfocada este estudio, determinando que tanto la longitud como la ganancia presentan una correlación fuerte es decir, la ganancia depende totalmente de la longitud para crecer o decrecer en este tipo de dieléctrico (Alúmina) así mismo presenta una correlación leve frente a su radio, si bien existe una relación de estas variables estas no dependen al 100% la una de la otra para variar; por lo tanto la variación del radio no depende para que la ganancia aumente o disminuya respectivamente. Mientras que, con su gap, no existe ningún tipo de correlación de variables.

Adicionalmente los parámetros S11 tiene una correlación de débil a moderada en cuanto a su Radio, es decir que mientras el radio aumente por su correlación esta puede como no influir en su valor de S11. Mientras que para VSWR se establece una correlación de débil a moderada en cuando a su Gap, es decir que mientras el gap aumente esta puede presentar una correlación de débil a moderada.

2.3.2 Correlación de ganancia de Plástico con el radio, longitud y Gap

La tabla 6 muestra los datos del coeficiente de correlación de Spearman obtenidos tras la compilación en RStudio con los datos simulados previamente en ANSYS HFSS para el material cobre con el dieléctrico plástico teniendo en cuenta la frecuencia en la cual se aplica el estudio (2.4 GHz)

Donde se despliega cada parámetro importante tales como frecuencia, VSWR, S11 y ganancia en función de su radio, Gap y Longitud

Tabla 6. Coeficiente de Correlación de Spearman cobre-plástico

Factor	Frecuencia	VSWR	S11	Ganancia
Radio R	-0.02651894	-0.02715175	-0.02715175	-0.3187889
Gap g	0.006423058	-0.369126	-0.369126	-0.0558515
Longitud <i>l</i>	-0.02170091	-0.3103164	-0.3103164	-0.8593378

A partir de la tabla 6. Se establece una correlación fuerte entre la ganancia y longitud, esto quiere decir que mientras la longitud crezca, la ganancia va a crecer y viceversa para el material dieléctrico plástico. Sin embargo, con su radio presenta una correlación débil es decir esta puede ir variando, en ciertos casos podría crecer la ganancia junto con su radio o en determinado caso esta podría disminuir mientras el radio crece o mantenerse. Por último, se determina que no existe correlación entre la ganancia y el Gap.

Por otra parte, analizando el parámetro de S11 y VSWR se observa que tanto el Gap como la longitud presentan una correlación débil a moderada, es decir esta tiene una relación de variables entre el 30-50% es decir que únicamente cuando la longitud y Gap aumenten estos valores de S11 y VSWR podrían o no aumentar.

2.3.3 Correlación de ganancia de Teflón con el radio, longitud y Gap

La tabla 7 muestra los datos del coeficiente de correlación de Spearman obtenidos tras la compilación en RStudio con los datos simulados previamente en ANSYS HFSS para el material cobre con el dieléctrico teflón donde se despliega cada parámetro importante como frecuencia, VSWR, S11 y ganancia en función de su radio, Gap y Longitud

Tabla 7. Coeficiente de Correlación de Spearman cobre-teflón

Factor	Frecuencia	VSWR	S11	Ganancia
Radio R	-0.02651894	0.3199609	0.3199609	-0.3187926
Gap g	0.006423058	-0.4144742	-0.4144742	-0.0554499
Longitud <i>l</i>	-0.02170091	-0.4262589	-0.4262589	-0.8593477

Para determinar la correlación entre las tres variables dimensionales radio, gap y longitud, se observa el valor de -0.8593477 más cercano a 1 lo que nos asigna una correlación fuerte, es decir; tanto la ganancia como la longitud dependen una de la otra, por lo tanto, mientras la ganancia va a disminuir si la longitud disminuye y viceversa. Además, se establece una relación débil moderada en el radio. Por último, se determina que no existe correlación entre el Gap y la ganancia.

Realizando el análisis a los parámetros VSWR y S11 se determina que su longitud tiene correlación débil a moderada, es decir no influyen directamente una sobre la otra.

2.4 Diseño de cobre y alúmina

En la tabla 8 se representa el rango de medidas de cada componente de esta antena aplicadas en su simulación para la obtención de ganancia, para la simulación en ANSYS HFSS con brazos conductores de cobre y dieléctrico de alúmina.

Tabla 8. Dimensiones de modelos sintonizados de antena dipolo de media onda en un rango de frecuencia de 2.397 - 2.403GHz, presentando el rango de valores aceptados para la ganancia

Material conductor		Cobre	
Material dieléctrico	alúmina		
Parámetro	Símbolo	Rango Resultante	Unidad
Frecuencia	F	2.397 - 2.403	GHz
Radio del conductor	r	2.05 – 2.15	mm
Longitud total	L	47.7 – 47.8	mm
Gap	g	4.1 – 4.25	mm
Dipolo	l	23.85 - 23.90	mm

Para la obtención de ganancia se procede a implementar la ecuación del modelo otorgado por RStudio mediante la función lm() implementada en el sistema, este a su vez nos permite establecer una relación entre la variable dependiente (ganancia) y variables independientes (radio, longitud y gap) [5].

Donde r es el radio, g es el gap y l es la Longitud del dipolo, dicha ecuación permite identificar tanto predicciones como ganancia.

$$\begin{aligned}
 \text{Ganancia} = & 138.5788 - 50.3053 * r - 18.521 * g - 5.6938 * l + 6.0695 * r * g \\
 & + 2.1042 * r * l + 0.7756 * g * l - 0.2546 * r * g * l
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Tras la obtención de ganancias en base a la variación de radio, gap y dipolo se obtiene valores de ganancia teórica en base a la ecuación del modelo de regresión. Ver tabla 9

Tabla 9. Obtención de la ganancia teórica en base a la ecuación del modelo de ganancia

ITEM	Dimensiones Empleadas			Datos teóricos calculados	
	r [mm]	g [mm]	l [mm]	f [GHz]	G [dB]
1	2.05	4.1	23.85	2.412	2.421
2	2.05	4.15	23.85	2.406	2.419
3	2.05	4.2	23.85	2.406	2.418
4	2.05	4.25	23.85	2.406	2.417
5	2.1	4.1	23.85	2.406	2.415
6	2.1	4.15	23.85	2.406	2.413
7	2.1	4.2	23.9	2.40	2.399
8	2.1	4.25	23.9	2.4	2.398
9	2.15	4.1	23.9	2.4	2.396
10	2.15	4.15	23.9	2.394	2.396
11	2.15	4.2	23.85	2.4	2.405
12	2.15	4.25	23.85	2.406	2.404

2.5 Diseño de Cobre y Plástico

En la tabla 10 se representa medidas de cada componente de esta antena aplicadas en su simulación para la obtención de ganancia, para la simulación en ANSYS HFSS con brazo conductor de cobre y dieléctrico plástico.

Tabla 10. Dimensiones de modelos sintonizados de antena dipolo de media onda en un rango de frecuencia de 23.97- 2.403 GHz, presentando valores aceptados para la ganancia

Material conductor	Cobre		
Material dieléctrico	Plástico		
Parámetro	Símbolo	Rango-resultante	Unidad
Frecuencia	F	2.397 - 2.403	GHz
Radio del conductor	r	1.95 - 2.05	mm
Longitud total	L	47.7 - 47.8	mm
Gap	g	4.1 - 4.25	mm
Dipolo	l	23.85 - 23.9	mm

Para la obtención de ganancia se procede a implementar la ecuación del modelo de regresión otorgado por RStudio para el modelo de antena dipolo con brazos conductores de material cobre y dieléctrico plástico. (Ver ecuación 6)

Donde r es el radio, g es el gap y l es el dipolo, dicha ecuación permite identificar tanto predicciones como ganancia.

$$\begin{aligned}
 \text{Ganancia} = & 260,726 - 125,342 * r - 57,594 * g - 10,798 * l + 28,333 * r * g \\
 & + 5,240 * r * l + 2,408 * g * l - 1,185 * r * g * l
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Tras la obtención de ganancias en base a la variación de radio, gap y dipolo se obtiene valores de ganancia teórica. Ver tabla 11

Tabla 11. Obtención de ganancia teórica en base a ecuación de modelo de ganancia diseño cobre-plástico

ITEM	Dimensiones Empleadas			Datos teóricos calculados	
	r [mm]	g [mm]	l [mm]	f [GHz]	G [dB]
1	1.95	4.1	23.85	2.406	2.372
2	1.95	4.15	23.85	2.412	2.371
3	1.95	4.2	23.85	2.412	2.370
4	1.95	4.25	23.85	2.418	2.368
5	2	4.1	23.85	2.406	2.368
6	2	4.15	23.85	2.412	2.367
7	2	4.2	23.9	2.406	2.358
8	2	4.25	23.9	2.4	2.357
9	2.05	4.1	23.9	2.406	2.357
10	2.05	4.15	23.9	2.4	2.356
11	2.05	4.2	23.85	2.406	2.363
12	2.05	4.25	23.85	2.4	2.362

2.6 Diseño de Cobre y Teflón

En la tabla 12 se representa medidas de cada componente de esta antena aplicadas de en su simulación para la obtención de ganancia para la simulación en ANSYS HFSS con brazos conductores de cobre y dieléctrico teflón.

Tabla 12. Dimensiones de modelos sintonizados de antena dipolo de media onda en frecuencia 2.397 – 2.403GHz, presentando valores aceptados para la ganancia

Material conductor		Cobre	
Material dieléctrico	Teflón		
Parámetro	Símbolo	Valor típico	Unidad
Frecuencia	F	2.397 – 2.403	GHz
Radio del conductor	r	2.05 - 2.15	mm
Longitud total	L	47.7 - 47.8	mm
Gap	g	4.15 – 4.30	mm
Dipolo	l	23.85 – 23.9	mm

Para la obtención de ganancia se procede a implementar la ecuación del modelo otorgado por RStudio para el modelo de conductor cobre y dieléctrico teflón. (Ver ecuación 7) Donde r es el radio, g es el gap y l es el dipolo, dicha ecuación permite identificar tanto predicciones como ganancia

$$\begin{aligned}
 \text{Ganancia} = & -447,638 + 226,291 * r + 118,386 * g + 18,869 * l - 58,435 * r \\
 & * g - 9,485 * r * l - 4,961 * g * l + 2,448 * r * g * l
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Tras la obtención de ganancias en base a la variación de radio, gap y Longitud se obtiene valores de ganancia teórica. Ver tabla 13

Tabla 13. Obtención de ganancia teórica en base a ecuación de modelo de ganancia diseño cobre-teflón

ITEM	Dimensiones Empleadas			Datos teóricos calculados	
	r [mm]	g [mm]	l [mm]	f [GHz]	G [dB]
1	2.05	4.15	23.85	2.406	2.386
2	2.05	4.2	23.85	2.406	2.384
3	2.05	4.25	23.85	2.406	2.382
4	2.05	4.3	23.85	2.412	2.380
5	2.10	4.15	23.85	2.406	2.379
6	2.10	4.2	23.85	2.406	2.377
7	2.10	4.25	23.9	2.4	2.361
8	2.10	4.3	23.9	2.4	2.359
9	2.15	4.15	23.9	2.394	2.359
10	2.15	4.2	23.9	2.4	2.358
11	2.15	4.25	23.85	2.406	2.368
12	2.15	4.3	23.85	2.4	2.366

2.7 Proceso para determinación de errores

Se aplica la fórmula matemática para errores relativos porcentuales, así como los análisis de correlaciones de estos. (Ver ecuación 7)

$$\%Error\ relativo = \left| \frac{Valor\ real - valor\ teórico}{valor\ real} \right| * 100 \quad (7)$$

Donde valor teórico es el valor calculado mediante la ecuación del modelo por cada material dieléctrico para este estudio y valor real es el obtenido en la simulación del sistema ANSYS HFSS para el análisis de errores teóricos y simulados en relación de la ganancia donde se aplica ecuaciones de modelo de regresión por material para establecer una correlación de ganancia entre cada uno de sus parámetros (radio, longitud, gap, VSWR, S11 y frecuencia)

3. Resultados y Discusión

Tras la obtención de ganancias en base a la variación de radio, gap y dipolo se obtiene valores de las predicciones de la ganancia a partir de los modelos obtenidos, estos valores representan la ganancia teórica para el cálculo del error relativo, sintetizados en las siguientes tablas.

Tabla 14. Error relativo porcentual del modelo de regresión de ganancia con datos de diseño para el material de brazos conductores cobre y dieléctrico alúmina

MATERIAL	ITEM	Dimensiones Empleadas			G predicha [dB]	G simulada [dB]	Error relativo [%]
		r [mm]	g [mm]	l [mm]			
ALÚMINA	1	2.05	4.1	23.85	2.421	2.416	0.166
	2	2.05	4.15	23.85	2.42	2.416	0.166
	3	2.05	4.2	23.85	2.418	2.415	0.1242
	4	2.05	4.25	23.85	2.417	2.413	0.1657
	5	2.1	4.1	23.85	2.415	2.410	0.2074
	6	2.1	4.15	23.85	2.413	2.407	0.2493
	7	2.1	4.2	23.9	2.399	2.394	0.2089
	8	2.1	4.25	23.9	2.398	2.393	0.2089
	9	2.15	4.1	23.9	2.396	2.392	0.1672
	10	2.15	4.15	23.9	2.396	2.391	0.2091
	11	2.15	4.2	23.85	2.405	2.401	0.1666
	12	2.15	4.25	23.85	2.404	2.399	0.2084

Tabla 15. Error relativo porcentual del modelo de regresión de ganancia con datos de diseño para el material de brazos conductores cobre y dieléctrico plástico

MATERIAL	ITEM	Dimensiones Empleadas			G predicha [dB]	G simulada [dB]	Error relativo [%]
		r [mm]	g [mm]	l [mm]			
PLÁSTICO	1	1.95	4.1	23.85	2.372	2.399	1.125
	2	1.95	4.15	23.85	2.371	2.398	1.125
	3	1.95	4.2	23.85	2.370	2.397	1.126
	4	1.95	4.25	23.85	2.368	2.397	1.209
	5	2	4.1	23.85	2.368	2.395	1.127
	6	2	4.15	23.85	2.367	2.393	1.086
	7	2	4.2	23.9	2.358	2.385	1.132
	8	2	4.25	23.9	2.357	2.385	1.174
	9	2.05	4.1	23.9	2.357	2.384	1.132
	10	2.05	4.15	23.9	2.356	2.384	1.174
	11	2.05	4.2	23.85	2.363	2.390	1.129
	12	2.05	4.25	23.85	2.362	2.390	1.171

Tabla 16. Error relativo porcentual del modelo de regresión de ganancia con datos de diseño para el material de brazos conductores cobre y dieléctrico teflón

MATERIAL	ITEM	Dimensiones Empleadas			G predicha [dB]	G simulada [dB]	Error relativo [%]
		r [mm]	g [mm]	l [mm]			
TEFLÓN	1	2.05	4.15	23.85	2.386	2.416	1.241
	2	2.05	4.2	23.85	2.384	2.416	1.324
	3	2.05	4.25	23.85	2.382	2.415	1.366
	4	2.05	4.3	23.85	2.380	2.413	1.367
	5	2.10	4.15	23.85	2.379	2.410	1.286
	6	2.10	4.2	23.85	2.377	2.410	1.369
	7	2.10	4.25	23.9	2.361	2.395	1.419
	8	2.10	4.3	23.9	2.359	2.394	1.461
	9	2.15	4.15	23.9	2.359	2.393	1.420
	10	2.15	4.2	23.9	2.358	2.392	1.421
	11	2.15	4.25	23.85	2.368	2.404	1.497
	12	2.15	4.3	23.85	2.366	2.402	1.498

3.1 Gráficos de comparación de variación de errores en el dieléctrico Alúmina, plástico y teflón

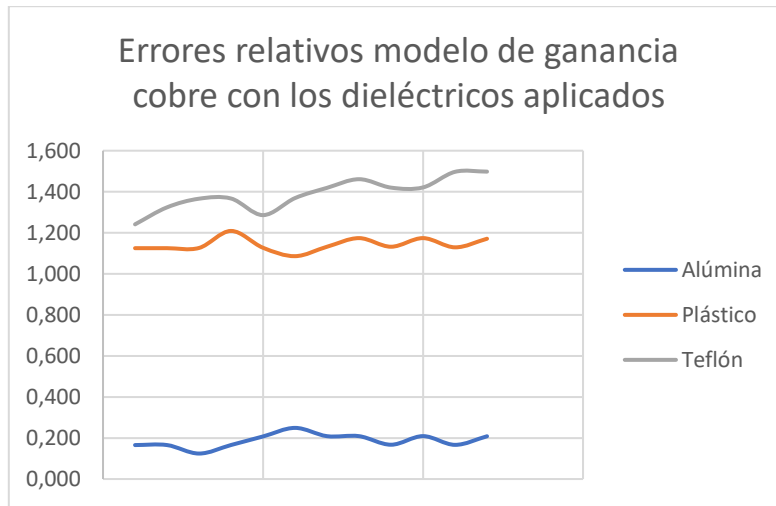


Fig.5 Gráfico de errores relativos en su modelo de regresión en base a la ganancia del material dieléctrico alúmina, plástico y teflón con brazos conductores de cobre

En la figura 5 se puede observar la comparación y compilación de errores de acuerdo a su material aplicado al mismo brazo conductor como característica que comparten las mismas, a simple vista se puede observar que tanto la gráfica del plástico y teflón están más próximas a una línea recta en comparación del material alúmina, por lo cual el error relativo es mucho menor para dichos materiales, debido a su permeabilidad y permitividad características propias del material dieléctrico teniendo en cuenta adicionalmente sus dimensiones

Como se puede observar la gráfica de la figura 5 de la muestra tomada, los errores relativos del modelo de regresión en cuanto a la ganancia en el material Cobre como brazo conductor y dieléctrico alúmina arrojan que los errores se encuentran en intervalos de $>0,10$ y $0,25<$ formando una simetría en la gráfica con respecto a la media en función a su error relativo, adicional que no representa un porcentaje de error constante, presenta máximos y mínimos, este tiene estrecha relación con las dimensiones empleadas para obtener la ganancia calculada y simulada respectivamente.

Así mismo se observa en base a la muestra tomada para el material de brazo conductor cobre y dieléctrico de plástico que los errores se encuentran en intervalos de $>1,220$ y $1,080<$ teniendo como valor medio entre $>1,120 - 0,180<$ respecto a la gráfica, no muestra errores simétricos visuales.

En el gráfico 5 se observa en base a la muestra tomada para el material de brazo conductor cobre y dieléctrico de teflón que trabaja con errores progresivos y en aumento, partiendo de valores $>1,2$. Además que la gráfica presenta sinusidad sin picos notorios lo que plantea errores en intervalos más estrechos y entre valores asignados muestra errores con diferencias mínimas. Se concluye adicionalmente que el error entre valor inicial y valor final cada vez es más amplio frente a sus valores iniciales.

3.2 Desfase promedio entre modelo teórico y sintonizado

A continuación, en la tabla 15, se demuestra el promedio de desfase entre diseño de modelos teóricos y sintonizados según ganancia en función del radio, ganancia y longitud del dipolo, donde r es radio, g es ganancia y l es la longitud del dipolo en la misma se puede identificar el desfase porcentual que representa en sus ganancias entre estos dos tipos de modelos con sus diferentes materiales dieléctricos teniendo en cuenta el cobre como brazo conductor de la antena dipolo.

Tabla 15. Desfase promedio entre diseño de modelo teórico y sintonizado según su ganancia en función de radio, ganancia y longitud

MATERIAL	Dimensiones Empleadas			G	G	Error relativo [%] promedio
	r [mm]	g [mm]	l [mm]	predicha promedio [dB]	simulada promedio [dB]	
ALÚMINA	2.10	4.18	23.87	2.391	2.404	0.160
PLÁSTICO	2.0	4.18	23.87	2.364	2.391	1.143
TEFLÓN	2.10	4.23	23.87	2.372	2.405	1.389

4. Conclusiones

El material cobre presentó el mayor valor de R^2 ajustado (0.95), indicando una alta capacidad del modelo para predecir el comportamiento real de la antena en condiciones normales. No obstante, el aluminio mostró menor error, lo que puede ser preferible en escenarios donde se requiere precisión repetible. Al cambiar el material del conductor dieléctrico se tuvo variación en el resultado de ganancia en la simulación.

Es posible predecir con alta precisión la ganancia de antenas dipolo de media onda mediante modelos de regresión lineal, utilizando variables geométricas como radio, gap y la longitud. Las simulaciones realizadas en ANSYS HFSS, combinadas con el análisis estadístico de RStudio, demostraron que la variabilidad de la ganancia puede

explicarse en más de un 95% para los materiales del dieléctrico que se usaron siendo el alúmina, plástico y teflón, con un dipolo de cobre.

Finalmente, los modelos de regresión propuestos diseñaron con alta precisión la ganancia en configuraciones de antenas con distintos materiales dieléctricos, los errores relativos porcentuales entre la ganancia predicha y la simulada son mínimos, en el caso de la alúmina con un promedio de error en torno al 0.19%. lo que indica una buena concordancia entre el modelo teórico y la simulación una vez sintonizada la antena en el material y dieléctricos propuestos.

5. Referencias

- [1] B. Bermeo, A. Masapanta, F. Nuñez. “Antena dipolo con tecnología microstrip para aplicaciones Wi-Fi con el estándar IEEE 802.11xx”. Proyecto de investigación. Instituto Superior Tecnológico Tsáchila, Santo Domingo, Ecuador.2024.
- [2] E. Monachesi, A. Frenzel, G. Chaile, A. Carrasco. “Conceptos Generales de Antenas”. Proyecto de investigación. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.2011.
- [3]S. Aráuz. “Análisis del cambio de material en el coeficiente de reflexión y VSWR en una antena dipolo de media onda en la banda de mmW”. Trabajo de titulación. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2022.
- [4]. C. Laguna. “Correlación y regresión lineal”. Diplomado en Salud Pública. Instituto de Aragón de Ciencias de la Salud. Zaragoza, España. 2014.
- [5]. Tusell, F. “Análisis de Regresión- Introducción teórica y práctica basada en R”.Libro, Bilbo, España.2011
- [6]. F. López, I. De la Torre. “Comparación de los parámetros de dispersión de la antena dipolo de media onda en las frecuencias de 60,67 y 74 GHz”. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2021.
- [7] H.Suquillo. “Comparación de los parámetros de una antena dipolo de media onda en la banda de 26 GHz”. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2022.
- [8]. P. Revathy, T. Ananth Kumar & R.S. Rajesh. “Designo f Highly Efficient Dipole Antenna using HFSS”. Universidad Manonmaniam Sundaranar, India, India. 2018.
- [9] M. Carollo. “Regresión lineal simple”.Proyecto de investigación Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia. 2011.

- [10] R. Chuqui, “Identificación de la estadística de canales inalámbricos 5G de onda milimétrica”. Tesis. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador. 2022.
- [11] R. Arboleda, C. Sosa. “Performance Analysis of Dipole Antenna, Applications:A literatura review”. Proyecto de Investigación. Universidad Estatal Cavite, Cavite, Filipinas.2024.
- [12] C.a. Balanis. “Antenna Theory: Analysis and Design”, 3rd ed. 2005
- [13] A. Granero. “Diseño, construcción y medida de prototipos docentes de antenas: las antenas dipolo”, Trabajo fin de grado. Escuela Técnica Superior de ingenieros de telecomunicación, Madrid, España.2019
- [14] J. Mosquera, St. Cevallos. “Diseño de una antena dipolo doblado con material grafeno en dos frecuencias de la banda de onda milimétrica”. Trabajo de Titulación. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.2023