

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**TÉCNICAS PARA MEJORAR EL ANCHO DE BANDA EN ANTENAS
TIPO PARCHE**

**ANTENA TIPO PARCHE EN DOBLE SUSTRATO PARA MEJORAR
EL ANCHO DE BANDA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

KEVIN JOSÉ RAMÍREZ GONZÁLEZ

kevin.ramirez01@epn.edu.ec

DIRECTOR: DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ

veronica.navarro@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2023

CERTIFICACIONES

Yo, KEVIN JOSÉ RAMÍREZ GONZÁLEZ declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

KEVIN JOSÉ RAMÍREZ GONZÁLEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por KEVIN JOSÉ RAMÍREZ GONZÁLEZ, bajo mi supervisión.

DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

KEVIN JOSÉ RAMÍREZ GONZÁLEZ

DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis queridos padres, abuelos y hermanos, quienes siempre me han brindado su amor incondicional y apoyo constante en cada paso de mi vida académica y personal. Este logro no habría sido posible sin su amor y respaldo incondicional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial a mis queridos padres, cuyo esfuerzo y sacrificio han sido fundamentales para que pudiera llegar hasta este ansiado momento en mi vida académica. También quiero expresar mi gratitud a mis hermanos y familiares que estuvieron siempre a mi lado, brindándome su apoyo incondicional en cada paso que di. Sin su presencia, este logro no habría sido posible. A todos ellos, les dedico este trabajo con profundo cariño y agradecimiento.

Además, quiero expresar mi sincero agradecimiento a mis amigos y compañeros, quienes han sido una parte invaluable de mi experiencia académica y personal. A lo largo de varios años compartiendo momentos y desafíos juntos, pude aprender mucho de ellos y enriquecer mi formación tanto en lo académico como en lo humano.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 ANTENA PARCHE	3
1.4.2 ESTRUCTURA DE LA ANTENA.....	3
1.4.3 TIPOS DE ALIMENTACIÓN	4
1.4.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	6
1.4.5 ANCHO DE BANDA	8
1.4.6 TÉCNICAS PARA AUMENTAR ANCHO DE BANDA	9
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 DISEÑO DE LA ANTENA PARCHE BASE	12
2.1.1 ANTENA PARCHE CON ALIMENTACIÓN COAXIAL (MODELO BASE)....	16
2.1.2 TÉCNICAS APLICADAS EN LA ANTENA PARA MEJORA DEL ANCHO DE BANDA	18
2.2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL MODELO 3D.....	22
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
3.1.1 ANTENA PARCHE CON ALIMENTACIÓN COAXIAL.....	26

3.1.2	ANTENA PARCHE CON SUSTRATO MÁS GRUESO	29
3.1.3	ANTENA PARCHE CON DOBLE SUSTRATO Y GAP DE AIRE	33
3.1.4	ANTENA PARCHE CON DOBLE CAPA DE DIFERENTE SUSTRATO Y GAP DE AIRE.....	36
3.1.5	COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS TÉCNICAS.....	40
3.2	IMPLEMENTACIÓN.....	42
3.2.1	PLA 2 mm.....	43
3.2.2	PLA 4 mm.....	46
3.3	CONCLUSIONES.....	51
3.4	RECOMENDACIONES	52
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

RESUMEN

La optimización del ancho de banda es fundamental en el diseño de antenas parche para mejorar su rendimiento en comunicaciones inalámbricas. Este trabajo se enfoca en explorar diversas técnicas para aumentar el ancho de banda desde el punto de vista de adaptación de antenas parche mediante la modificación de su estructura y características.

El primer capítulo presenta el objetivo general, objetivos específicos y alcance del estudio, además del marco teórico sobre antenas parche. Se describen su estructura, tipos de alimentación y métodos de análisis, incluyendo el modelo de línea de transmisión y el modelo de cavidad resonante. También se aborda la importancia del ancho de banda y se introducen técnicas para mejorarlo.

La metodología se detalla en el segundo capítulo, incluyendo el diseño de la antena parche base y las técnicas aplicadas para mejorar su ancho de banda. Se exploran incrementos en la altura del sustrato, el uso de doble capa de sustrato y gap de aire, y doble capa de diferente sustrato y gap de aire. También se aborda el proceso de optimización del modelo 3D de la antena.

El tercer capítulo presenta los resultados de las técnicas aplicadas en la antena parche. Se analizan los desempeños de distintas modificaciones y se realiza una comparación exhaustiva del rendimiento en términos de ancho de banda. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones encontradas derivadas de los resultados obtenidos.

PALABRAS CLAVE: antenas parche, ancho de banda, adaptación, técnicas de mejora, sustrato.

ABSTRACT

Bandwidth optimization is essential in the design of patch antennas to improve their performance in wireless communications. This work focuses on exploring various techniques to increase the bandwidth from the perspective of patch antenna adaptation through modifications of its structure and characteristics.

The first chapter introduces the general objective, specific objectives, and scope of the study, along with the theoretical framework on patch antennas. Their structure, feeding types, and analysis methods, including the transmission line model and the resonant cavity model, are described. The importance of bandwidth and techniques for its enhancement are also introduced.

The methodology is detailed in the second chapter, covering the design of the base patch antenna and the applied techniques to improve its bandwidth. Enhancements in substrate height, the utilization of double substrate layers with air gaps, and different substrate layers with air gaps are explored. The 3D model optimization process is also discussed.

The third chapter presents the results of the applied techniques on the patch antenna. The performances of different modifications are analyzed, and a comprehensive comparison of their bandwidth performance is conducted. Finally, the conclusions and recommendations derived from the obtained results are presented.

KEYWORDS: patch antennas, bandwidth, adaptation, enhancement techniques, substrate.

1 INTRODUCCIÓN

Las antenas son elementos fundamentales en el campo de las comunicaciones inalámbricas, ya que posibilitan la transmisión y recepción de señales. Existen diversas clases de antenas, cada una con características y usos particulares. Dentro de las antenas más populares, se encuentra la antena de tipo parche, la cual destaca por su tamaño reducido, ligereza y excelentes prestaciones de radiación.

Una de las limitaciones más importantes de estas antenas es su ancho de banda estrecho. Para superar esta limitación existen diversas técnicas que se pueden aplicar, tales como la técnica de doble capa de sustrato [1], la técnica de parche con perturbaciones [2], la técnica de tapas de resonancia [3], y la técnica de segmentación [4]. Al aplicar estas técnicas, se puede ampliar el ancho de banda de la antena, lo que permite mejorar su capacidad para transmitir y recibir señales.

La implementación de estas técnicas para mejorar el ancho de banda en las antenas tipo parche es relativamente sencilla en algunos casos. Sin embargo, en otros casos, puede ser necesario ajustar el diseño de la antena y realizar pruebas para optimizar su rendimiento.

En este trabajo, se explorará la técnica de doble sustrato para aumentar el ancho de banda de antenas tipo parche. Esta técnica consiste en agregar una segunda capa de sustrato debajo de la antena. La adición de la capa de sustrato adicional tiene el efecto de desplazar la frecuencia de resonancia de la antena. Esto requiere un proceso de optimización en la estructura de la antena con el objetivo de lograr un aumento en su ancho de banda.

La aplicación de la técnica de doble sustrato en las antenas parche presenta un gran potencial para abordar las limitaciones actuales y mejorar el rendimiento en términos de adaptación y ancho de banda. Esto abre oportunidades para optimizar sistemas de comunicación inalámbrica en diversas áreas, incluyendo redes de telefonía móvil, sistemas de comunicación satelital, WLAN y otras aplicaciones críticas de nuestra sociedad actual.

A lo largo de este trabajo, se llevarán a cabo simulaciones utilizando herramientas de simulación electromagnética 3D para evaluar el rendimiento de la antena parche con doble sustrato. Se analizarán los parámetros clave (ganancia, directividad) de la antena, como su ancho de banda y diagrama de radiación. También se comparará el rendimiento de la antena con doble sustrato con el de las antenas parche convencionales sin aplicar la técnica mencionada.

1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo de integración curricular es:

Implementar por medio de un simulador electromagnético la técnica de doble capa de sustrato para el incremento del ancho de banda en una antena tipo parche que opera a la frecuencia de 5.8 GHz.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de este trabajo de integración curricular son:

1. Realizar el diseño y simulación de una antena tipo parche de referencia a una frecuencia de operación de 5.8 GHz.
2. Aplicar técnicas basadas en sistemas multicapa para mejorar el ancho de banda de una antena tipo parche.
3. Analizar los resultados simulados del modelo de la estructura simple y la estructura modificada.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo de integración curricular se enfoca en la simulación y análisis de la técnica de doble sustrato para mejorar el ancho de banda de adaptación de una antena tipo parche que opera a la frecuencia de 5.8 GHz utilizando el sustrato Rogers RO4003C.

En primer lugar, se realizará una descripción de los conceptos, características y proceso de diseño de las antenas tipo parche.

En la fase de diseño y usando el sustrato anteriormente mencionado se definirán las dimensiones de la antena y se realizará la implementación por medio de un software de simulación electromagnético 3D.

Posteriormente se realizarán las modificaciones necesarias en la estructura modelada aplicando el criterio de doble sustrato.

Finalmente, en la fase de análisis de resultados se estudiarán los resultados de las simulaciones de la estructura simple y con las modificaciones para encontrar el punto óptimo de funcionamiento de la antena. Se utilizará el parámetro S_{11} como indicador para determinar si se ha mejorado el ancho de banda de adaptación.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 ANTENA PARCHE

El origen de las antenas *microstrip* data de 1953, cuando se propuso la tecnología *microstrip* para alimentar una agrupación de elementos de una antena que estaban impresos en un sustrato dieléctrico. Es importante destacar que, en ese entonces, la antena impresa no consistía en los parches que se conocen actualmente, sino en cuernos planos acampanados. En 1972, Munson presentó la primera antena parche en un simposio, seguida poco después por la presentación de variantes en la geometría de la antena, como la antena rectangular y la antena parche circular presentada por Howell. Además, surgieron diferentes métodos de análisis para este tipo de antenas, tales como el modelo de línea de transmisión, el de cavidad y el de dominio espectral [5].

Las antenas *microstrip* o también llamadas antenas parche, son un tipo de antenas usadas para operar comúnmente en la región de microondas debido a su simplicidad, eficiencia y bajo costo de construcción. En este sentido, este tipo de antenas se han vuelto muy populares para su uso en aplicaciones donde se requiera una antena discreta y de tamaño reducido, como por ejemplo en dispositivos portátiles [5]. A continuación, se presentan las principales ventajas y desventajas de este tipo de antenas.

Ventajas

- Bajo perfil
- Conformabilidad: pueden ser dobladas para adaptarse a superficies curvas.
- Discreción: son muy poco intrusivas.

Desventajas

- Posible reducción en la eficiencia de radiación en comparación con otras antenas.
- Ancho de banda pequeño.
- La eficiencia y el ancho de banda dependen significativamente de la permitividad y el espesor del sustrato.

1.4.2 ESTRUCTURA DE LA ANTENA

La antena tipo parche se compone de varias capas como se observa en la Figura 1.1. La capa superior de la antena es el parche radiante, el cual es generalmente una placa plana metálica con una forma cuadrada, rectangular, circular, elíptica, triangular, etc. La elección de la geometría depende de las necesidades específicas de la aplicación y de la frecuencia para la cual se requiere la antena.

Debajo del parche se encuentra una capa dieléctrica compuesta de un sustrato de una altura h , la cual proporciona un aislamiento eléctrico entre el parche y el plano de tierra. La capa inferior es el plano de tierra, que es una placa metálica plana que se coloca cerca de la antena para completar el circuito eléctrico [5]. Para algunas aplicaciones se agrega una capa de material conductor debajo del plano de tierra para mejorar el rendimiento de la antena.

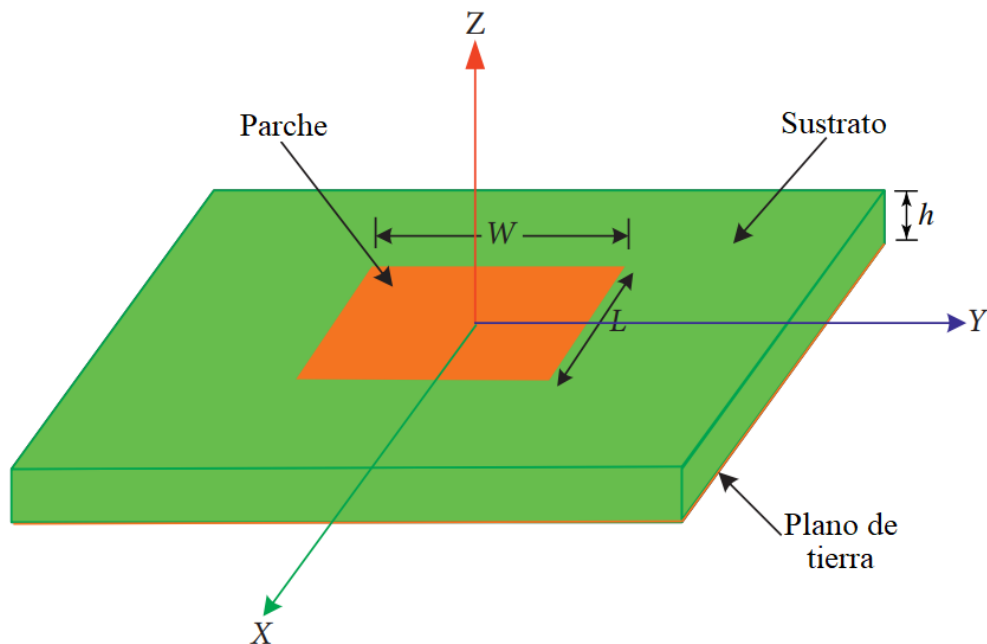


Figura 1.1. Estructura de la antena parche rectangular [6].

En el caso de una antena tipo parche rectangular, se suele encontrar que su longitud L está dentro del rango de $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$, donde λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre.

El sustrato es un elemento importante dentro de la estructura de la antena, de forma general se sabe que el sustrato permite separar el plano de masa y el parche de la antena. Cada sustrato cuenta con características propias que dependen del material del que está hecho, existen varias opciones de materiales con una constante dieléctrica que generalmente se ubica en el rango de $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ [7].

1.4.3 TIPOS DE ALIMENTACIÓN

Además de la geometría, el tipo de alimentación es un aspecto importante en la antena. La alimentación se puede realizar de varias formas, comúnmente se suele realizar mediante un cable coaxial o una línea *microstrip* como se observa en la Figura 1.2. Cada tipo de alimentación tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección de la alimentación depende de la aplicación específica y del diseño de la antena.

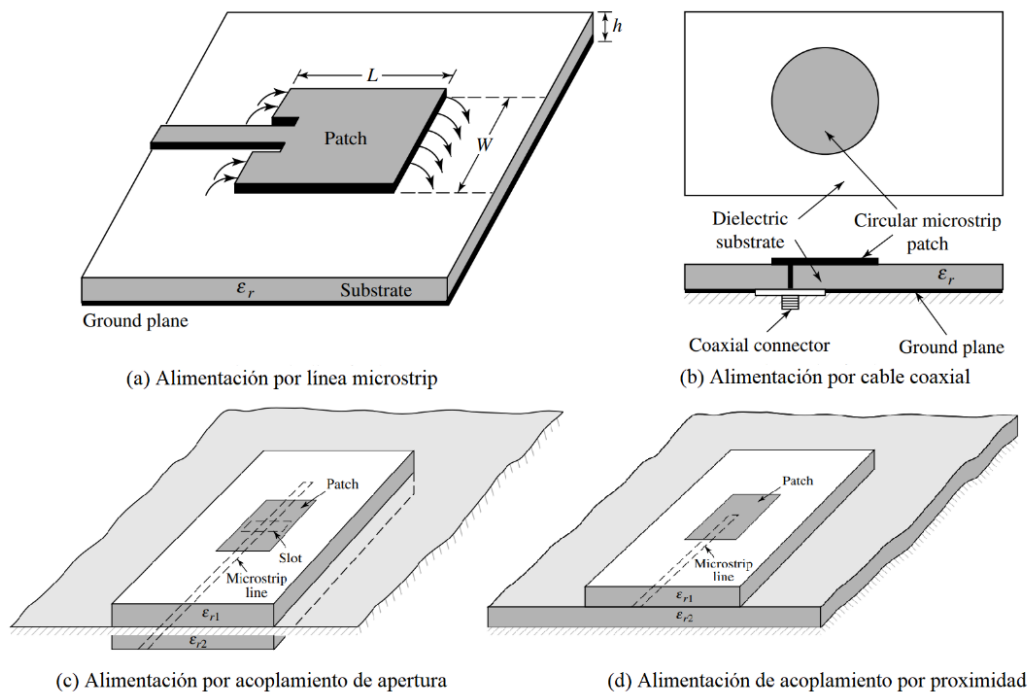


Figura 1.2. Alimentaciones típicas para antenas *microstrip* [7].

a) Alimentación por línea *microstrip* (Figura 1.2 a)

Esta se realiza a través de una tira conductora que se conecta al parche radiante. Es fácil de implementar y, en el caso de la estructura con inserción, la adaptación y el modelado se pueden controlar mediante la posición de inserción.

Por otro lado, en el caso de la estructura sin inserción, la adaptación y el modelado pueden ser más complejos debido a la falta de control directo sobre la posición de inserción. No obstante, se debe tener en cuenta que a medida que aumenta el espesor del sustrato, también incrementa la presencia de ondas superficiales y radiación de alimentación espuria, lo cual reduce el ancho de banda disponible para diseños prácticos, el cual suele oscilar entre el 2% y el 5% [7].

b) Alimentación por cable coaxial (Figura 1.2 b)

Por otro lado, en la alimentación por cable coaxial implica la conexión del conductor interno del coaxial al parche y el conductor externo al plano de tierra. Este tipo de alimentación es fácil de implementar, y a diferencia de la alimentación *microstrip* con este método se tiene baja radiación espuria. Sin embargo, este tipo de alimentación también tiene un ancho de banda limitado y su modelado puede ser más complicado, especialmente en sustratos de mayor espesor [7].

Tanto la línea de alimentación *microstrip* como la alimentación coaxial presentan asimetrías inherentes que generan modos de orden superior, lo que a su vez puede provocar radiación de polarización cruzada. Con el fin de superar algunos de estos problemas, se introdujo la técnica de alimentación por acoplamiento de apertura y de proximidad.

c) Alimentación por acoplamiento de apertura (Figura 1.2 c).

En esta técnica se utilizan dos sustratos separados por un plano de masa. En el sustrato inferior se coloca una línea de alimentación *microstrip* que se acopla a la placa mediante una ranura en el plano de masa que separa los dos sustratos, con esto se logra una disposición que permite optimizar de manera independiente el mecanismo de alimentación y el elemento radiante.

Se utilizan materiales dieléctricos de alta y baja constante dieléctrica para los sustratos inferior y superior, respectivamente. El plano de masa que separa los sustratos también tiene la función de aislar la alimentación del elemento radiante y reducir la interferencia de la radiación espuria, lo que contribuye a la creación de patrones claros y una polarización más pura [7].

Para este diseño, se pueden ajustar los parámetros eléctricos del sustrato (constante dieléctrica, pérdida del material y espesor del sustrato), el ancho de la línea de alimentación, el tamaño y posición de la ranura para optimizar el diseño. El control de la eficiencia en transmisión y recepción de la antena se logra controlando el ancho de la línea de alimentación y la longitud de la ranura.

d) Alimentación de acoplamiento por proximidad (Figura 1.2 d).

Con este tipo de alimentación es posible conseguir un mayor ancho de banda (hasta un 13 por ciento) de las cuatro técnicas descritas. Sin embargo, su fabricación es algo más difícil que las otras técnicas. Para controlar la capacidad de la antena para transmitir y recibir señales con la máxima eficiencia posible se puede ajustar la extensión del manguito de alimentación y la relación ancho/línea de la placa [7].

1.4.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Existen numerosos enfoques de análisis para las antenas de *microstrip*, siendo los más destacados el modelo de línea de transmisión y el modelo de cavidad resonante. El modelo de línea de transmisión es el más sencillo y ofrece una buena comprensión física, aunque es menos preciso y tiene dificultades para modelar el acoplamiento. Por su parte, el modelo

de cavidad es más preciso, pero también más complejo, aunque ofrece una buena comprensión física y puede ser utilizado con éxito para modelar el acoplamiento.

1.4.4.1 Modelo de línea de transmisión

El modelo de línea de transmisión se utiliza para analizar la estructura y el comportamiento de una antena *microstrip*, considerando que esta puede ser vista como una línea de transmisión. En la Figura 1.3 se presenta el circuito equivalente de un parche rectangular usando este modelo, en la cual se representa la antena como dos ranuras paralelas, separadas por una línea de transmisión de baja impedancia (Z_c) de longitud determinada (L) y muestra la conexión entre el parche y el punto de alimentación a través de la línea de transmisión.

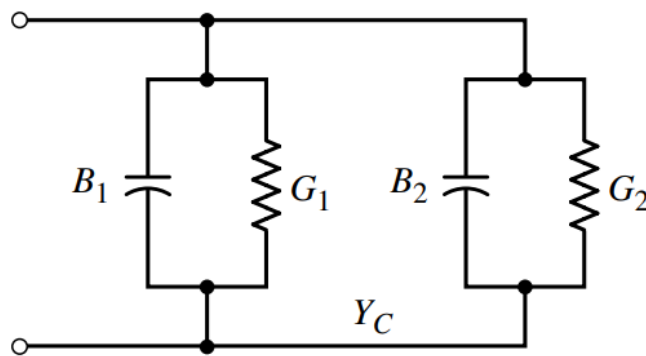


Figura 1.3. Circuito equivalente del modelo de línea de transmisión del parche rectangular [7].

En el modelo de línea de transmisión, el circuito equivalente basado en el modelo de línea de transmisión, los elementos B_1 , B_2 , G_1 , G_2 y Y_C que forman el circuito equivalente, tienen un significado específico. B_1 y B_2 representan las susceptancias en cada ranura de la antena, mientras que G_1 y G_2 son las conductancias de las ranuras y están relacionadas con la admitancia. Por otro lado, Y_C representa la admitancia de la línea de transmisión que conecta las dos ranuras y está relacionada con la longitud y la impedancia característica de la línea. En conjunto, estos elementos del circuito equivalente se utilizan para analizar y modelar el comportamiento electromagnético de la antena parche rectangular, permitiendo la evaluación de parámetros eléctricos clave como la impedancia de entrada, la ganancia y el ancho de banda.

1.4.4.2 Modelo de cavidad resonante

La antena *microstrip* comparte características con una cavidad dieléctrica cargada y tiene resonancias de orden superior. Se pueden encontrar de manera más precisa los campos

normalizados dentro del sustrato dieléctrico (entre el parche y el plano de tierra) al tratar esa región como una cavidad delimitada por conductores eléctricos (arriba y abajo) y paredes magnéticas (para simular un circuito abierto) a lo largo del perímetro del parche.

Este modelo es una aproximación que produce una impedancia de entrada reactiva (cuyo valor puede ser cero o infinito en la resonancia) y no genera energía. Sin embargo, si se considera que los campos reales son similares a los producidos por este modelo, el patrón computado, la admitancia de entrada y las frecuencias resonantes se comparan bien con las mediciones [7].

Como se observa en la Figura 1.4, cuando la antena se energiza, la carga se distribuye en la superficie superior e inferior del parche y en la superficie del plano de tierra, regulado por dos mecanismos atractivo y repulsivo que generan densidades de corriente correspondientes en las superficies inferior y superior del parche.

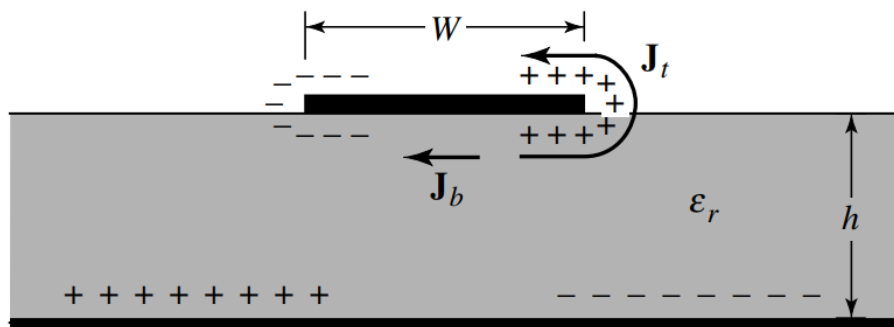


Figura 1.4. Distribución de carga y densidad de corriente en una antena *microstrip* [7].

Dado que la relación altura-ancho de la mayoría de los *microstrip* prácticos es muy pequeña, el mecanismo atractivo tiene mayor influencia y la mayoría de la concentración de carga y flujo de corriente se encuentra debajo del parche. Una pequeña cantidad de corriente fluye alrededor de los bordes del parche y llega a su superficie superior, lo que produce componentes tangenciales de campo magnético [7]. Para considerar la radiación que se produce a través de las paredes laterales de la cavidad, se introduce un mecanismo de pérdida. Además, se tiene en cuenta la pérdida efectiva del *microstrip* mediante la introducción de una tangente de pérdida efectiva con el fin de reducir su eficiencia.

1.4.5 ANCHO DE BANDA

El ancho de banda de la antena tipo parche se puede definir determinando los límites de frecuencia en los que la relación de onda estacionaria (SWR) alcanza su valor máximo. Esto supone que la línea de transmisión que se conecta al parche está completamente adaptada a la frecuencia de resonancia, lo que significa que la impedancia característica

Z_0 es igual a la impedancia de carga R , sin tener en cuenta la inductancia de la sonda. El ancho de banda se calcula por medio de la Ecuación 1.1.

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \times 100$$

Ecuación 1.1. Ancho de banda porcentual [7].

En esta definición, f_r representa la frecuencia de resonancia de impedancia del parche, mientras que f_1 y f_2 son las frecuencias baja y alta, respectivamente, en ambos lados de la frecuencia de resonancia en las que la relación de onda estacionaria (SWR) es igual a un valor prescrito S .

1.4.6 TÉCNICAS PARA AUMENTAR ANCHO DE BANDA

El ancho de banda es un parámetro importante en las antenas, ya que determina la capacidad de la antena para recibir o transmitir señales en un rango de frecuencias determinado. Para el caso de las antenas tipo parche como se mencionó en secciones anteriores presenta un ancho de banda estrecho, y en algunos casos de aplicación específica, se requiere un ancho de banda más amplio para cumplir con los requisitos. A continuación, se describen las técnicas presentadas en la Figura 1.5, utilizadas para aumentar el ancho de banda de este tipo de antenas.

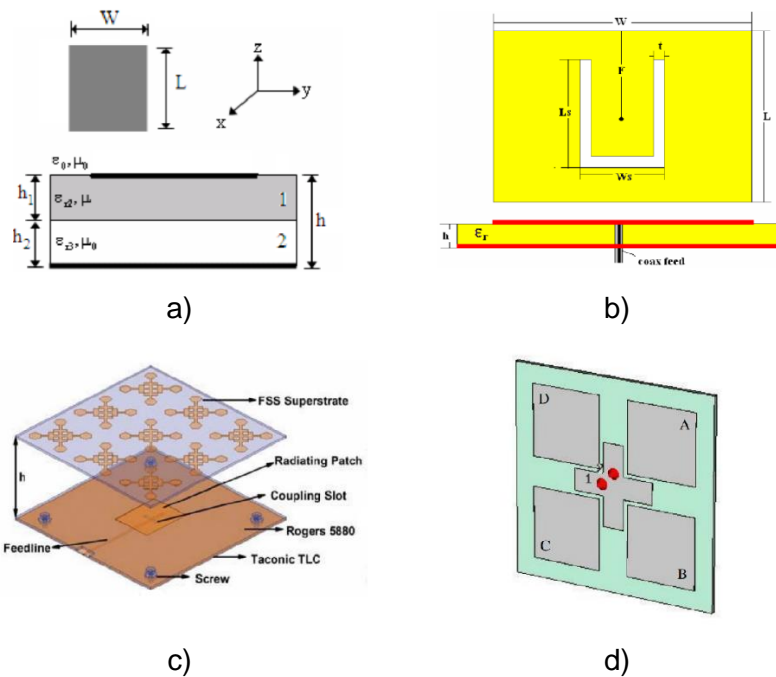


Figura 1.5. Técnicas para aumentar el ancho de banda en antenas tipo parche; a) Técnica de doble capa de sustrato [1]; b) Técnica de parche con perturbaciones [2]; c) Técnica de tapas de resonancia [3]; d) Técnica de segmentación [4].

a) Técnica de doble capa de sustrato

Esta técnica consiste en colocar una segunda capa de sustrato encima de la capa original como se observa en la Figura 1.5 a), lo que da lugar a una configuración de doble capa. La segunda capa se utiliza para modificar la constante dieléctrica efectiva ($\epsilon_{eff} = \epsilon_r \epsilon_0$) de la estructura de la antena y, por lo tanto, para aumentar su ancho de banda [1].

Como ventaja de esta técnica se tiene que es de fácil implementación y no se requiere modificación alguna en la geometría de la antena. Por otro lado, como desventaja se presenta que es difícil de diseñar correctamente, ya que la capa superior puede afectar la impedancia y el diagrama de radiación de la antena.

b) Técnica de parche con perturbaciones

Como se observa en la Figura 1.5 b), esta técnica se basa en la adición de pequeñas perturbaciones en el parche radiante de la antena. Estas perturbaciones actúan como resonadores adicionales y aumentan el ancho de banda de la antena. Estas perturbaciones pueden tener varias formas, incluyendo ranuras, cortes, discontinuidades, etc. La ubicación y la forma de estas perturbaciones se pueden optimizar mediante simulación y pruebas experimentales para lograr los mejores resultados de ancho de banda y eficiencia de la antena [2].

La principal ventaja de esta técnica es que es fácil de implementar y puede proporcionar un ancho de banda considerablemente mayor que otras técnicas. Sin embargo, la adición de las perturbaciones puede afectar negativamente la impedancia y el diagrama de radiación de la antena, lo que requiere una cuidadosa optimización del diseño.

c) Técnica de tapas de resonancia

La técnica de tapas de resonancia consiste en agregar dos o más capas de material dieléctrico sobre el plano de tierra de la antena parche como se observa en la Figura 1.5 c). Estas tapas actúan como resonadores adicionales y aumentan el ancho de banda de la antena [3].

d) Técnica de segmentación

En la Figura 1.5 d) se presenta la técnica de segmentación la cual se basa en la división del parche radiante de la antena en varias partes, lo que crea resonadores adicionales y aumenta el ancho de banda del elemento radiante. Cada segmento actúa como una antena individual, y su combinación produce un ancho de banda más amplio que el de una antena parche convencional [4].

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se expone la metodología empleada para el diseño y optimización de una antena parche con el propósito de mejorar su rendimiento en términos de ancho de banda de adaptación aplicando la técnica propuesta en el presente documento.

El proceso comienza con la creación del diseño inicial de la antena parche (modelo base), el cual se fundamenta en las consideraciones de diseño detalladas en la Tabla 2.1. Estas consideraciones engloban aspectos como las dimensiones de la antena, las características del sustrato a utilizarse y la forma geométrica de la estructura.

Tabla 2.1. Requerimientos de la antena parche.

Frecuencia	5.8 GHz
Impedancia de entrada	50 Ω
Tipo de alimentación	Coaxial
Tipo de conector	SMA hembra

El diseño del modelo base se realiza siguiendo los principios teóricos y las ecuaciones que describen su comportamiento. Una vez concluido el diseño, se procede a su modelado y simulación empleando un software de simulación electromagnética. Esta etapa permite evaluar el desempeño de la antena en términos de coeficiente de reflexión, directividad y ancho de banda, entre otros parámetros cruciales.

A partir de los resultados obtenidos, se efectuarán las modificaciones necesarias en el diseño de la antena con el fin de alcanzar un ancho de banda de adaptación mejorado. Este enfoque sistemático e iterativo asegura el cumplimiento de los objetivos planteados y la obtención de una antena con un rendimiento óptimo en el ancho de banda de adaptación.

Para el diseño se ha considerado la utilización del sustrato Rogers RO4003C debido a su reconocido rendimiento y eficiencia en el diseño de antenas parche. Este sustrato exhibe propiedades dieléctricas altamente favorables, lo que lo convierte en una opción óptima para el diseño de la antena. Sus prestaciones dieléctricas estables y su eficiente rendimiento en términos de pérdidas y eficiencia son características destacadas del sustrato Rogers RO4003C.

La Tabla 2.2 proporciona un desglose de las propiedades específicas de este sustrato que serán utilizadas como referencia durante todo el proceso de diseño y optimización de la antena.

Tabla 2.2. Propiedades del sustrato Rogers RO4003C [8].

Constante dieléctrica	3.55
Tan δ	0.0021
Espesor estándar	0.203 mm 0.305 mm 0.406 mm 0.508 mm 0.813 mm 1.524 mm

2.1 DISEÑO DE LA ANTENA PARCHE BASE

En el proceso de diseño teórico de la antena parche, se utiliza el modelo de línea de transmisión. Emplear el modelo de línea de transmisión, simplifica el análisis teórico de la antena y proporciona una base sólida para el diseño y la optimización. Mediante este enfoque teórico, es posible calcular parámetros claves como la longitud y el ancho de la antena, así como determinar la ubicación del punto de alimentación y las dimensiones del sustrato.

En el diseño de antenas parche, la constante dieléctrica efectiva es un parámetro crucial que describe las propiedades dieléctricas aparentes del sustrato utilizado. Esta constante tiene en cuenta el efecto de las características dieléctricas del sustrato y su impacto en la propagación de las ondas electromagnéticas a través de la antena.

La Ecuación 2.1 proporciona la expresión matemática para calcular la constante dieléctrica efectiva, teniendo en cuenta los parámetros relevantes del sustrato y su geometría.

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Ecuación 2.1. Constante dieléctrica efectiva [7].

Debido a los efectos de borde, el parche de la antena aparenta ser más grande que sus dimensiones físicas reales. A lo largo de la longitud del parche, este se extiende en ambos extremos por una distancia ΔL como se muestra en la Figura 2.1 [7].

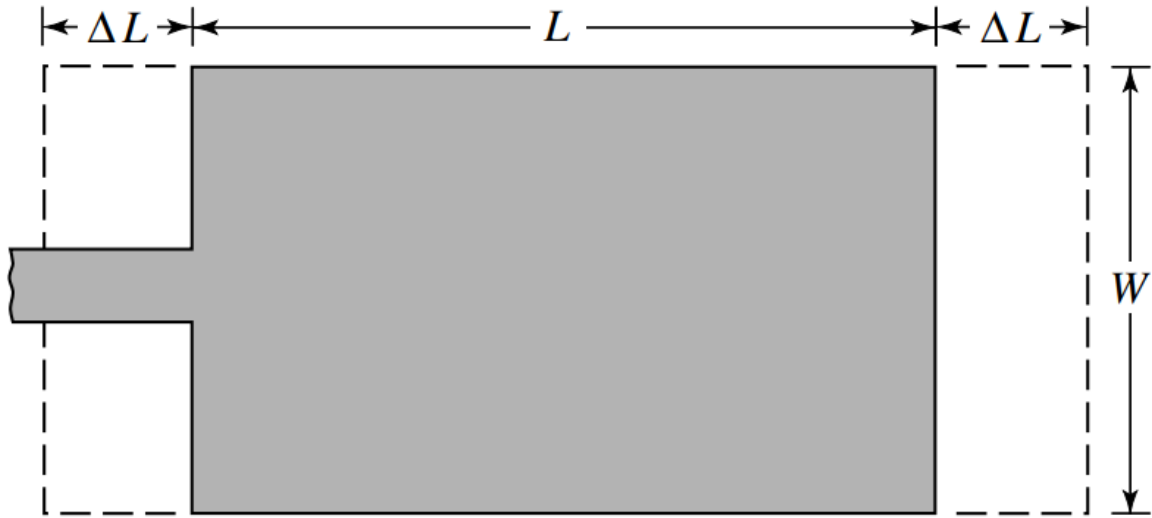


Figura 2.1. Vista superior del parche de la antena [7].

Esta extensión está determinada por la constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} y la relación entre el ancho y la altura (W/h) [7]. La Ecuación 2.2 proporciona una relación aproximada ampliamente utilizada para calcular esta extensión adicional.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

Ecuación 2.2. Razón de variación en la longitud del parche y su espesor [7].

Debido a la extensión del parche en ΔL en cada lado [7], la longitud efectiva del parche se calcula a partir de la Ecuación 2.3.

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L$$

Ecuación 2.3. Longitud efectiva del parche [7].

Adicionalmente, para el modo dominante TM_{010} [7], la frecuencia de resonancia se calcula por medio de la Ecuación 2.4.

$$f_r = \frac{c}{2L_{\text{eff}}\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}$$

Ecuación 2.4. Frecuencia de resonancia de la antena [7].

Finalmente, el ancho del parche adecuado para lograr una radiación eficiente se puede calcular a partir de la Ecuación 2.5.

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Ecuación 2.5. Ancho del parche *microstrip* [7].

Con las expresiones anteriores, se inicia el proceso de diseño correspondiente, que implica reemplazar los valores de los requisitos específicos de la antena mostrados en la Tabla 2.1 en las ecuaciones.

Para comenzar, se determina el valor del ancho del parche. En la Ecuación 2.5, se sustituyen los valores de la frecuencia requerida (5.8 GHz) y la constante dieléctrica del sustrato (3.55). Esto permite calcular el ancho óptimo del parche necesario para la resonancia deseada y el funcionamiento adecuado de la antena.

$$W = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{2(5.8 * 10^9 \text{ Hz})} \sqrt{\frac{2}{3.55 + 1}}$$

$$W = 17.146 \text{ mm}$$

Después de determinar el ancho del parche, el siguiente paso es encontrar el valor de la longitud del parche. Para ello, se utiliza la Ecuación 2.1, la cual permite calcular la constante dieléctrica efectiva.

$$\epsilon_{reff} = \frac{3.55 + 1}{2} + \frac{3.55 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{0.41 \text{ mm}}{17.146 \text{ mm}} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon_{reff} = 3.399$$

Luego, por medio de la Ecuación 2.4, se obtiene L_{eff} (longitud efectiva):

$$L_{eff} = \frac{3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2(5.8 * 10^9 \text{ Hz})\sqrt{3.399}}$$

$$L_{eff} = 14.027 \text{ mm}$$

Posteriormente con la Ecuación 2.2, se encuentra el valor de ΔL (variación de la longitud del parche):

$$\frac{\Delta L}{0.41 \text{ mm}} = 0.412 \frac{(3.399 + 0.3) \left(\frac{17.146 \text{ mm}}{0.41 \text{ mm}} + 0.264 \right)}{(3.399 - 0.258) \left(\frac{17.146 \text{ mm}}{0.41 \text{ mm}} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.196 \text{ mm}$$

Finalmente, se remplazan los valores correspondientes en la Ecuación 2.3 y se encuentra el valor de la longitud del parche.

$$14.027 \text{ mm} = L + 2(0.196 \text{ mm})$$

$$L = 14.027 \text{ mm} - 0.392 \text{ mm}$$

$$L = 13.635 \text{ mm}$$

Para cumplir con las consideraciones de diseño, se opta por utilizar un parche cuadrado, lo que implica que las dimensiones W y L sean iguales. En este caso, la variable L juega un papel crucial en la frecuencia de operación de la antena, mientras que W afecta a la adaptación. Para simplificar el proceso de diseño y optimización, se establece que W tenga el mismo valor que L . A partir de este valor común, se lleva a cabo el proceso de optimización para asegurar un rendimiento óptimo de la antena.

Con los valores W y L calculados, se procede a determinar las dimensiones del plano de masa de la antena; para lo cual se toman en cuenta las expresiones dadas en las Ecuación 2.6 y Ecuación 2.7.

$$L_g = 6h + L$$

Ecuación 2.6. Longitud del plano de masa [7].

$$W_g = 6h + W$$

Ecuación 2.7. Ancho del plano de masa [7].

Remplazando los valores correspondientes en las anteriores ecuaciones se encuentra que:

$$L_g = 6h + L$$

$$L_g = 16.095 \text{ mm}$$

Como se mencionó con anterioridad, al ser una estructura cuadrada se iguala el ancho de la estructura al largo. Por lo cual no es necesario su cálculo.

Por último, resulta de vital importancia determinar con precisión la posición óptima del punto de alimentación en el parche. Para lograr esto, se utilizan las ecuaciones 2.8 y 2.9, que permiten calcular las impedancias de la antena y, a partir de ellas, determinar la posición óptima del punto de alimentación. Estas ecuaciones son fundamentales para asegurar una correcta adaptación de la antena y un rendimiento óptimo en términos de impedancia de entrada y respuesta de frecuencia.

$$Z_o = \sqrt{Z_{in} * Z_a}$$

Ecuación 2.8. Impedancia de transición [7].

$$Z_a = 90 * \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{W}{L}\right)^2$$

Ecuación 2.9. Impedancia de la antena [7].

Con los valores calculados anteriormente se reemplaza en las ecuaciones y se encuentra lo siguiente:

$$Z_a = 90 * \frac{(3.55)^2}{3.55 - 1} \left(\frac{17.146 \text{ mm}}{13.635 \text{ mm}}\right)^2$$

$$Z_a = 703.35 \Omega$$

$$R_{in}(y = 0) = \sqrt{50 \Omega * 703.35 \Omega}$$

$$R_{in}(y = 0) = 187.53 \Omega$$

Para el cálculo del punto de alimentación se hace uso de la expresión:

$$R_{in}(y = y_o) = R_{in}(y = 0) \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_o\right)$$

Ecuación 2.10. Posición de la alimentación [7].

Reemplazando los valores correspondientes se obtiene que:

$$50 \Omega = 187.53 * \cos^2 \left(\frac{\pi}{13.635 \text{ mm}} y_o\right)$$

$$\frac{50 \Omega}{187.53} = \cos^2 \left(\frac{\pi}{13.635 \text{ mm}} y_o\right)$$

$$\frac{\pi}{13.635 \text{ mm}} y_o = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50 \Omega}{187.53 \Omega}} \right)$$

$$y_o = 4.46 \text{ mm}$$

2.1.1 ANTENA PARCHE CON ALIMENTACIÓN COAXIAL (MODELO BASE)

En base a las dimensiones calculadas, se procede a realizar el modelado de la estructura en el software de simulación electromagnético. En la Figura 2.2, se puede ver la representación de la estructura y de las variables que se utilizarán en el modelado con el software de simulación 3D.

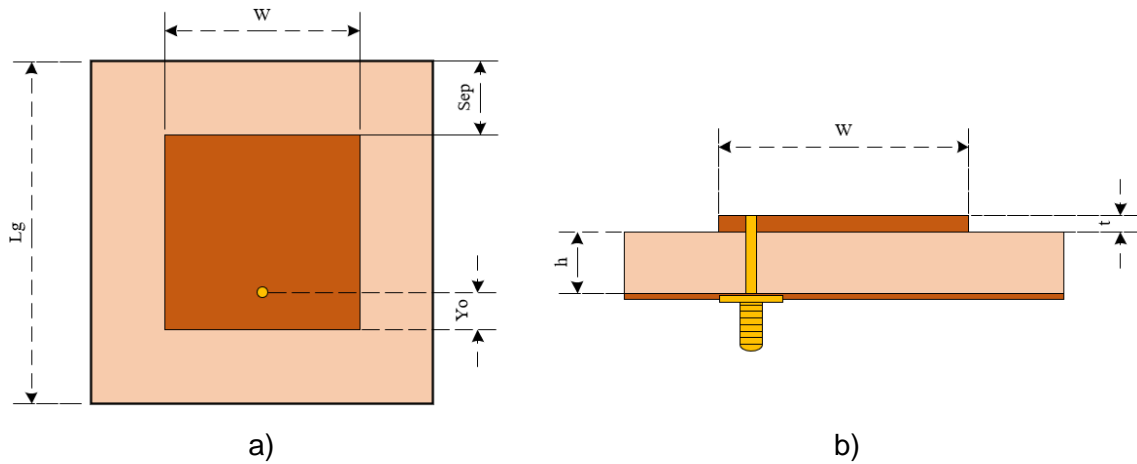


Figura 2.2. Esquema y variables de la antena base a modelar; a) Vista superior de la antena parche; b) Vista transversal de la antena parche.

Las dimensiones teóricas (valores iniciales) de la estructura se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Dimensiones de la antena parche base diseñada.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
W	Ancho del parche	17.146
L	Longitud del parche	13.635
$W_g = L_g$	Dimensiones del plano de masa	16.095
h	Espesor del sustrato	0.41
t	Espesor del conductor	0.035
y_o	Posición del punto de alimentación	4.46

Al realizar el modelado del conector coaxial, es necesario utilizar las medidas exactas del conector, definidas por el fabricante. En la Tabla 2.4 se presenta las dimensiones usadas para el modelado del conector coaxial.

Tabla 2.4. Dimensiones del conector coaxial.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
r_e	Radio del dieléctrico (conductor externo)	1.395
r_c	Radio del conductor de cobre	0.405

2.1.2 TÉCNICAS APLICADAS EN LA ANTENA PARA MEJORA DEL ANCHO DE BANDA

2.1.2.1 Incremento de la altura del sustrato

Con base en la estructura inicial, se realizan las modificaciones pertinentes cambiando el espesor del sustrato como se observa en la Figura 2.3. En este caso, se utiliza el mismo sustrato (Rogers RO4003C), pero se aumenta el espesor a un valor mayor al original. Esto se hace con el objetivo de evaluar cómo afecta este cambio en la adaptabilidad y el ancho de banda de la antena.

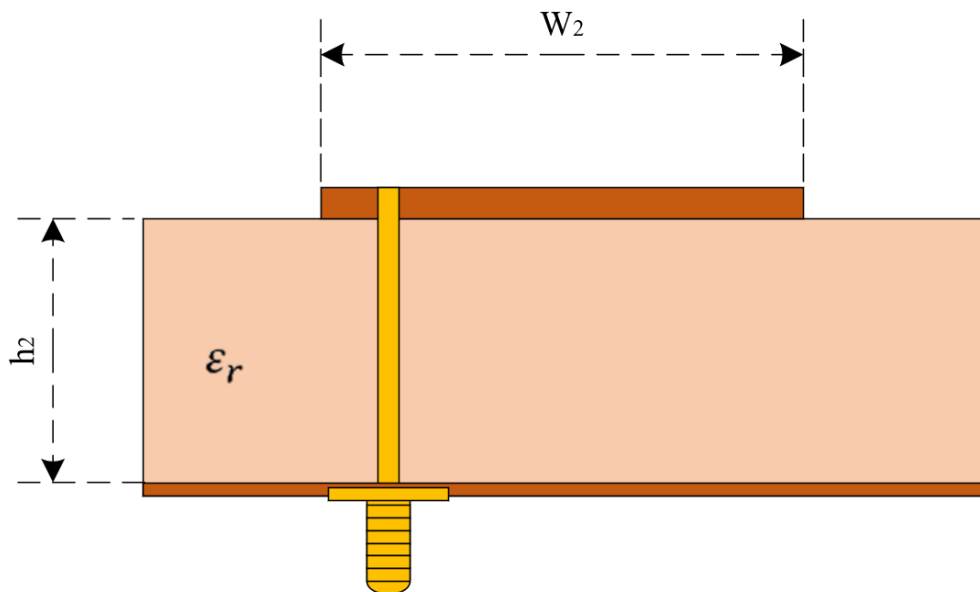


Figura 2.3. Esquema de la antena parche con doble sustrato.

Cuando se incrementa el espesor del sustrato de Rogers RO4003C de 0.41 mm a 1.524 mm, se evidenciarán cambios significativos en el ancho de banda de la antena. En general, se puede esperar que el ancho de banda aumente a medida que se incrementa el espesor del sustrato. Esto se debe a que el cambio en el espesor afecta las propiedades dieléctricas del sustrato, lo cual a su vez influye en la resonancia y la respuesta en frecuencia de la antena [7].

Es importante tener en cuenta que, al realizar este cambio en el espesor del sustrato, se deben recalculan las dimensiones de la antena para asegurar su adaptabilidad a la frecuencia de operación deseada, en este caso, 5.8 GHz. El cambio en el espesor afectará a las dimensiones de la antena (longitud y ancho), y es necesario ajustar estas dimensiones para mantener una adaptación óptima a la frecuencia deseada. Recalculando cada uno de los parámetros tenemos que:

- El ancho se determinó a través de la fórmula:

$$W = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{2(5.8 * 10^9 \text{ Hz})} \sqrt{\frac{2}{3.55 + 1}}$$

$$W = 17.146 \text{ mm}$$

- La constante dieléctrica efectiva se obtuvo mediante la Ecuación:

$$\epsilon_{reff} = \frac{3.55 + 1}{2} + \frac{3.55 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1.524 \text{ mm}}{17.146 \text{ mm}} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon_{reff} = 3.162$$

- Realizando el cálculo de la longitud efectiva se obtiene:

$$L_{eff} = \frac{3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2(5.8 * 10^9 \text{ Hz})\sqrt{3.162}}$$

$$L_{eff} = 14.54 \text{ mm}$$

- Calculando la variación ΔL se encontró que:

$$\frac{\Delta L}{1.524 \text{ mm}} = 0.412 \frac{(3.162 + 0.3) \left(\frac{17.146 \text{ mm}}{1.524 \text{ mm}} + 0.264 \right)}{(3.162 - 0.258) \left(\frac{17.146 \text{ mm}}{1.524 \text{ mm}} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 0.7152 \text{ mm}$$

- Al igualar los resultados obtenidos en la Ecuación 2.3, se encontró el valor de L.

$$14.54 \text{ mm} = L + 2(0.7152 \text{ mm})$$

$$L = 13.11 \text{ mm}$$

- Asimismo, se aproximaron las dimensiones del plano de masa de la estructura de la antena utilizando la Ecuación 2.6.

$$L_g = 6(1.524 \text{ mm}) + 13.11 \text{ mm}$$

$$L_g = 22.254 \text{ mm}$$

- Por último, para asegurar una adaptación adecuada, se calculó la posición del punto de alimentación:

$$Z_a = 90 * \frac{(3.55)^2}{3.55 - 1} \left(\frac{17.146 \text{ mm}}{13.11 \text{ mm}} \right)^2$$

$$Z_a = 760.81 \Omega$$

$$R_{in}(y = 0) = \sqrt{50 \Omega * 703.35 \Omega}$$

$$R_{in}(y = 0) = 195.04 \Omega$$

- Finalmente,

$$50 \Omega = 195.04 \Omega * \cos^2 \left(\frac{\pi}{13.11 \text{ mm}} y_o \right)$$

$$\frac{50 \Omega}{195.04 \Omega} = \cos^2 \left(\frac{\pi}{13.11 \text{ mm}} y_o \right)$$

$$\frac{\pi}{13.11 \text{ mm}} y_o = \cos^{-1} \left(\sqrt{\left(\frac{50 \Omega}{195.04 \Omega} \right)} \right)$$

$$y_o = 4.33 \text{ mm}$$

En la Tabla 2.5 se presenta el resumen de las dimensiones calculadas de forma teórica para la antena parche con doble sustrato.

Tabla 2.5. Dimensiones de la antena parche con doble sustrato.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
W_2	Ancho del parche	17.146
L_2	Longitud del parche	13.11
$W_g = L_g$	Dimensiones del plano de masa	22.254
h_2	Espesor del sustrato	1.524
Sep	Diferencia entre L_g y L	0.7152
y_o	Posición de la alimentación	4.33

2.1.2.2 Doble capa de sustrato y gap de aire

La siguiente modificación propone una estructura que hace uso de un doble sustrato y añade una capa de aire en el espacio intermedio con se observa en la Figura 2.4. Esta propuesta implica emplear el sustrato Rogers RO4003C con una altura de 0.762 mm en cada capa, lo que suma un total de 1.524 mm, separadas por un gap de aire.

El objetivo principal de esta capa de aire es reducir la permitividad efectiva de la antena. Mediante esta modificación, se busca optimizar el rendimiento de la antena y maximizar su capacidad de transmitir y recibir señales de manera eficiente.

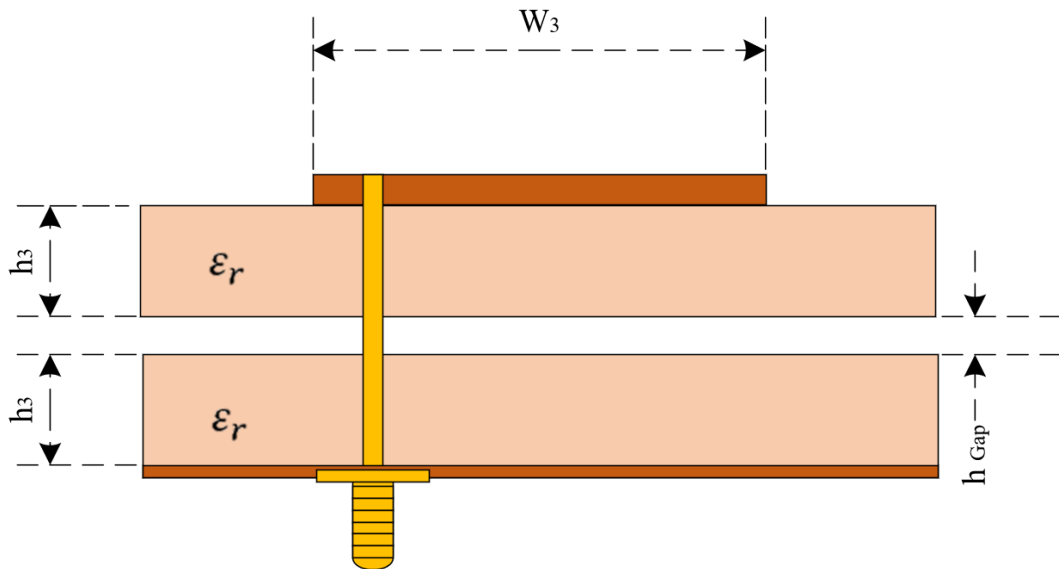


Figura 2.4. Esquema de la antena parche con Gap de aire y doble sustrato.

La adición de una capa de aire para separar los sustratos ofrece diversas ventajas. En primer lugar, al introducir una capa de aire entre los sustratos, se crea un dieléctrico de baja constante, lo que contribuye a reducir las pérdidas dieléctricas y mejorar la eficiencia de la antena [7]. Además, la capa de aire actúa como un aislante eléctrico, evitando acoplamientos no deseados entre las capas del sustrato [9].

2.1.2.3 Doble capa de diferente sustrato y gap de aire

Con el objetivo de profundizar en la mejora del rendimiento y la eficiencia de la antena, se plantea la incorporación de capas de sustratos diferentes. Esta propuesta consiste en utilizar una estructura de antena que incluye múltiples capas con sustratos distintos, manteniendo entre estas capas un gap de aire, tal como se ilustra en la Figura 2.5. En este diseño, se empleará el sustrato Rogers RO4003C, con un espesor de 1.524 mm, en una de las capas; mientras que en la otra capa se utilizará el sustrato FR4, con un espesor de 1.5 mm.

La combinación de los sustratos Rogers RO4003C y FR4 tiene como objetivo principal aprovechar las propiedades dieléctricas de cada uno de ellos. El sustrato RO4003C se caracteriza por su alta constante dieléctrica y baja pérdida de energía, lo cual lo convierte en una opción ideal para lograr una mejor transmisión de señales. Por otro lado, el sustrato

FR4 es más económico y ampliamente utilizado en la fabricación de circuitos impresos, aunque tiene una constante dieléctrica y pérdida de energía ligeramente mayores.

La utilización conjunta de ambos sustratos busca lograr un equilibrio adecuado entre la eficiencia y la adaptabilidad de la antena.

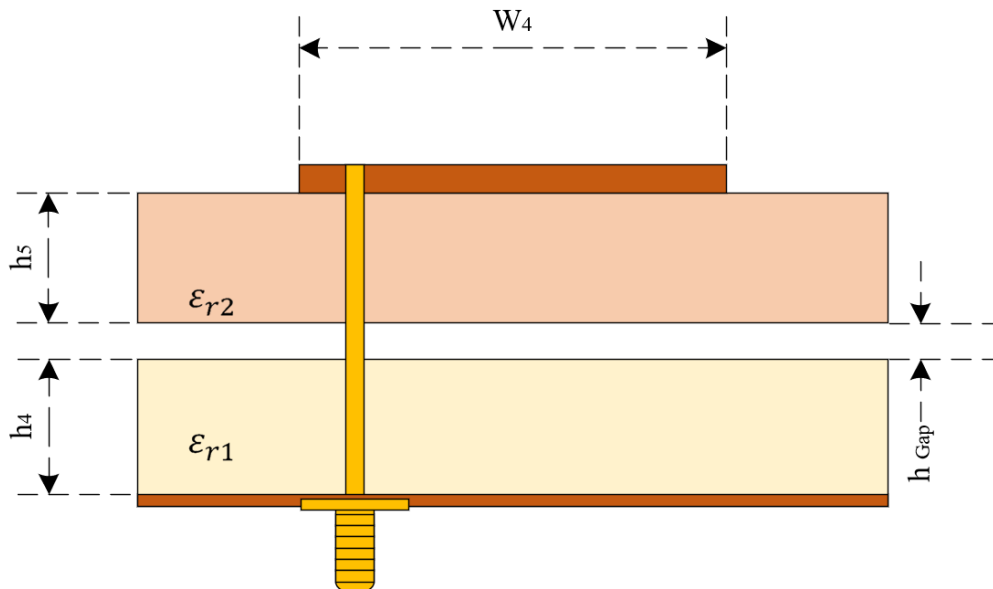


Figura 2.5. Esquema de la antena parche con Gap de aire y doble sustrato.

En la Tabla 2.6 se presenta las características del sustrato FR4.

Tabla 2.6. Propiedades del sustrato FR4 [10].

Constante dieléctrica	4.7
Tan δ	0.02
Espesor	1.5

2.2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL MODELO 3D

Una vez que la estructura ha sido modelada correctamente en el software de simulación electromagnética, se inicia el proceso de análisis de esta. Sin embargo, es importante tener en cuenta aspectos adicionales relacionados con el software de simulación, como el tipo de barrido utilizado, los rangos de frecuencia y el tamaño de paso.

En la Tabla 2.7 se detallan las configuraciones utilizadas para analizar cada uno de los modelos.

Tabla 2.7. Parámetros de configuración del software para el análisis.

Tipo de barrido	Interpolación/Discreto
Frecuencia mínima	5.1 GHz
Frecuencia máxima	6.5 GHz
Tamaño de paso	0.001 GHz

El objetivo de este proceso es obtener resultados precisos y confiables que permitan evaluar el rendimiento de la estructura. Para ello, se seleccionan cuidadosamente los parámetros de simulación, como el tipo de barrido que permite explorar diferentes frecuencias, y los rangos y tamaños de paso adecuados para obtener una representación exhaustiva de los resultados. Estas consideraciones en el software de simulación son fundamentales para garantizar la robustez y la validez de los análisis realizados en el proceso de optimización del modelo 3D.

Una vez establecidos estos parámetros, es fundamental abordar el proceso de simulación del modelo y la necesaria optimización de las dimensiones de la antena parche. El objetivo es obtener los mejores resultados en términos de adaptación y ancho de banda en la estructura simulada. Para lograrlo, se sigue el diagrama de flujo presentado en la Figura 2.6.

Este diagrama de flujo proporciona una guía paso a paso para el proceso de análisis de la antena. Se inicia con la simulación del modelo inicial y se evalúa su desempeño en términos de adaptación y ancho de banda. A partir de estos resultados, se procede a ajustar y modificar las dimensiones de la antena parche de manera iterativa, buscando obtener mejoras en los parámetros de interés.

Este proceso de optimización se repite hasta lograr los mejores resultados posibles en la adaptación y el ancho de banda de la estructura simulada. Cada ajuste realizado se evalúa mediante simulaciones sucesivas, permitiendo identificar y corregir posibles deficiencias en el diseño.

Siguiendo este enfoque metodológico, se asegura un proceso de optimización efectivo y sistemático, orientado a obtener una antena parche con un rendimiento óptimo en términos de adaptación y ancho de banda.

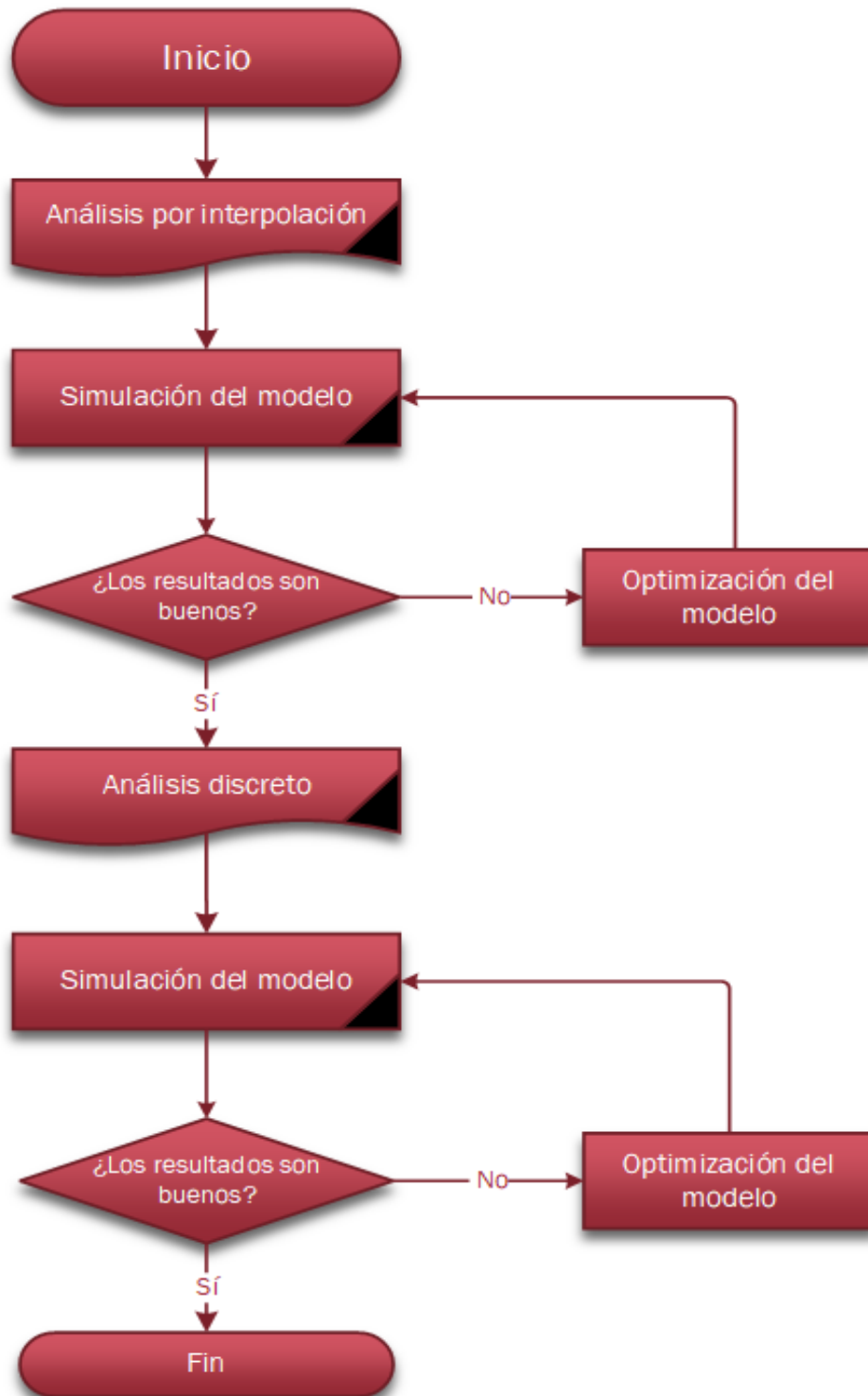


Figura 2.6. Proceso de análisis del modelo.

En relación con el proceso de optimización de las dimensiones de la antena, se toma como base la Figura 2.6, la cual establece las pautas a seguir. Es importante destacar que este proceso se aplica específicamente a una antena parche cuadrada, lo cual implica que, al realizar modificaciones en las dimensiones, solo se altera una variable (W o L).

Siguiendo este enfoque, se utiliza la Figura 2.7 como base para la optimización de las dimensiones del parche de la antena. Se evalúa el rendimiento del modelo inicial en términos de adaptación y ancho de banda, y se realizan ajustes en las dimensiones del parche, manteniendo constante una variable mientras se varía la otra. Esto permite explorar el impacto individual de cada dimensión en los parámetros de interés.

Es importante destacar que la optimización de la posición del punto de alimentación no se aborda en la Figura 2.7, ya que se centra exclusivamente en las dimensiones del parche. Para optimizar la posición del punto de alimentación, se deben realizar ajustes adicionales y considerar otros criterios específicos.

Una vez realizadas las modificaciones, se lleva a cabo una nueva simulación para evaluar los resultados obtenidos. Este proceso iterativo se repite hasta encontrar las dimensiones óptimas que maximicen tanto la adaptación como el ancho de banda de la antena parche cuadrada.

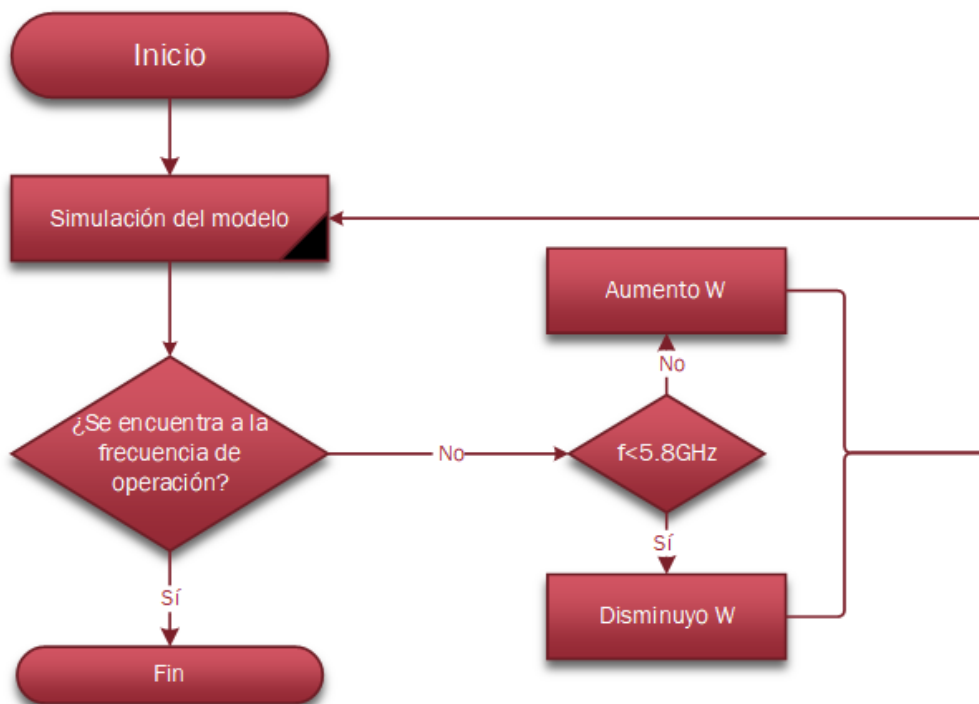


Figura 2.7. Proceso de optimización de la estructura modelada.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Utilizando los modelos 3D generados en el software de simulación se lleva a cabo un análisis de las estructuras en un rango de frecuencia específico. En este caso, se realiza un análisis de frecuencias que abarca desde 5.1 GHz hasta 6.5 GHz, con el objetivo de lograr una visualización óptima de los resultados que se examinarán en las secciones posteriores.

Además, se implementa una estrategia basada en el diagrama presentado en la Figura 2.6. En primer lugar, se realiza un análisis preliminar utilizando interpolación para el barrido de frecuencias con el propósito de reducir los tiempos de simulación. Una vez que se obtienen resultados satisfactorios, se procede a llevar a cabo un análisis discreto para obtener gráficas altamente precisas y detalladas. Esta secuencia de análisis se emplea con el fin de garantizar la exactitud y confiabilidad de los resultados obtenidos.

3.1.1 ANTENA PARCHE CON ALIMENTACIÓN COAXIAL

En el caso del modelo representado en la Figura 3.1, se procede a determinar las dimensiones óptimas utilizando los valores calculados por medio del diseño analítico y siguiendo el esquema de análisis ilustrado en la Figura 2.6. En el cual se implementa un modelo iterativo que tiene como objetivo optimizar la estructura y asegurar su correcto funcionamiento.

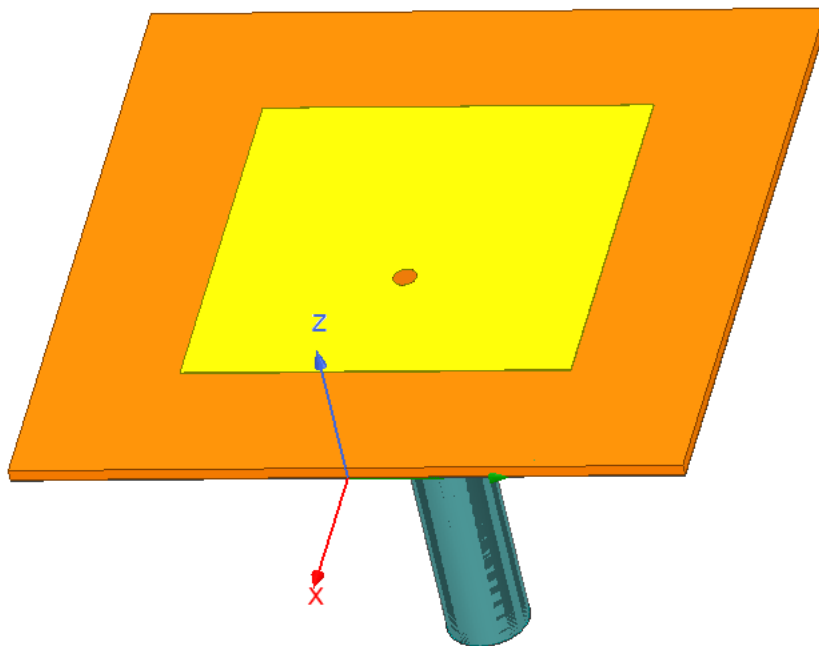


Figura 3.1. Antena parche base modelada.

A través de este proceso, se logran identificar las dimensiones ideales del modelo, las cuales se detallan en la Tabla 3.1. Estas dimensiones se obtienen en base a los resultados del análisis y representan las características óptimas para que la estructura cumpla con las expectativas planteadas en este estudio.

Tabla 3.1. Dimensiones de la antena parche base diseñada.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
$W = L$	Longitud del parche	13.512
$W_g = L_g$	Dimensiones del plano de masa	23.312
h	Espesor del sustrato	0.41
y_o	Posición de la alimentación	4.8
$Sep = \Delta L$	Diferencia entre L_g y L	4.9

Con estas dimensiones, se logró obtener los resultados óptimos en cuanto a resonancia de la estructura y ancho de banda como se muestra en la gráfica del parámetro S_{11} presentado en la Figura 3.2. Además, gracias al modo en que está realizada la simulación se obtienen los puntos de corte a -10 dB para realizar el cálculo del ancho de banda.

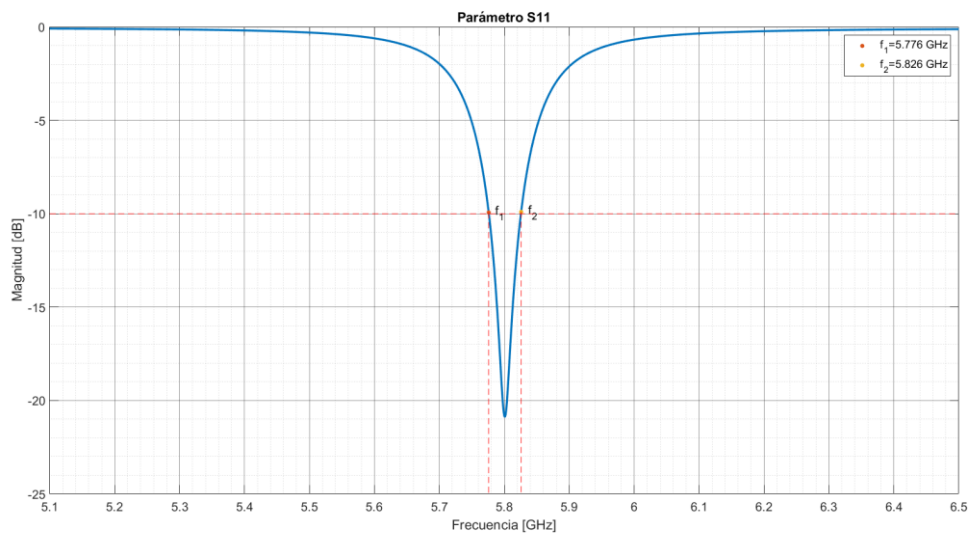


Figura 3.2. Parámetro S_{11} .

Calculando el ancho de banda porcentual por medio de la Ecuación 1.1, se obtiene que:

$$BW = \frac{5.826 - 5.776}{5.8} \times 100$$

$$BW = \frac{0.05}{5.8} \times 100$$

$$BW = 0.86 \%$$

En esta estructura se obtiene un ancho de banda muy bajo, esto debido al pequeño grosor del sustrato usado.

Adicionalmente, la Figura 3.3 presenta el diagrama de radiación polar normalizado y un gráfico tridimensional que muestra la ganancia de la antena en dB. El gráfico tridimensional de la ganancia proporciona una representación visual de cómo la energía se distribuye en el espacio tridimensional alrededor de la antena.

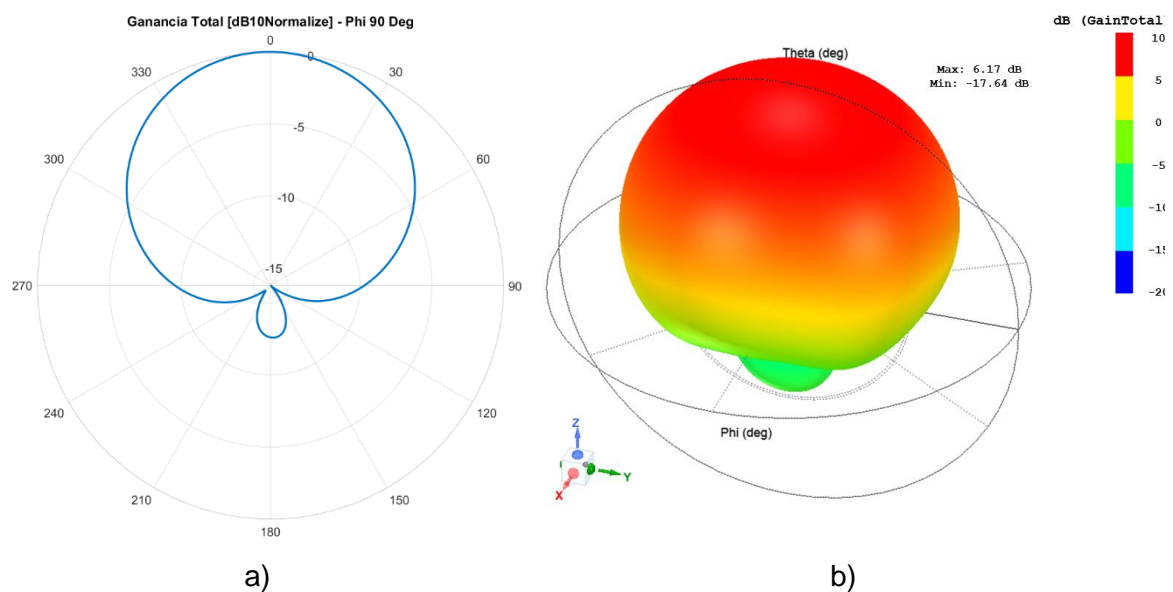


Figura 3.3. a) Diagrama de radiación polar; b) Ganancia Total en 3D.

Se observa una forma característica similar a una manzana, que es típica de las antenas parche. Esta forma refleja la distribución de la energía radiada por la antena en diferentes direcciones en el espacio, lo cual es una característica distintiva de las antenas parche.

Estas visualizaciones son de gran utilidad para comprender el rendimiento radiante de la antena y permiten identificar las zonas de mayor radiación y la dirección óptima de la antena. Además, al analizar el lóbulo de radiación en ambas representaciones, se puede obtener información valiosa para el diseño y la optimización de la antena, asegurando que se cumplan los requisitos de adaptación y directividad en la frecuencia de operación deseada.

Adicionalmente, en la Figura 3.4 se presenta la gráfica de la directividad de la antena en los principales cortes: $\phi = 0$, $\phi = 90$. Esta gráfica permite comprender la distribución de la energía radiada por la antena en diversas direcciones.

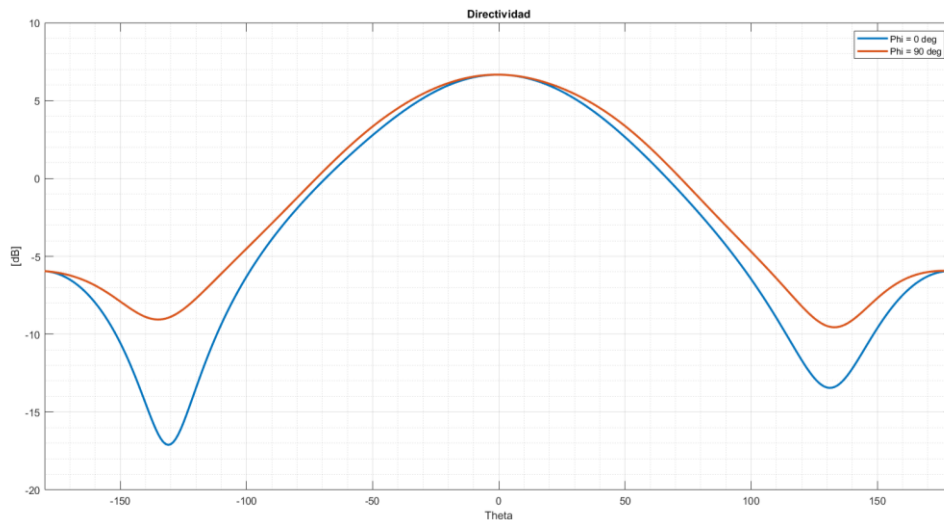


Figura 3.4. Directividad.

Los resultados obtenidos revelan la directividad en cada plano y brindan información significativa sobre la capacidad de la antena para enfocar o dirigir su radiación hacia una dirección específica, los cuales son muy buenos.

Además, obteniendo la eficiencia de radiación de la antena se determina que esta presenta una eficiencia del 89%. Esta eficiencia indica que aproximadamente el 89% de la potencia eléctrica suministrada a la antena se convierte en energía radiada, lo cual es un resultado muy bueno considerando el poco ancho de banda de la antena debido al pequeño grosor del sustrato.

3.1.2 ANTENA PARCHE CON SUSTRATO MÁS GRUESO

Al igual que en el modelo base, una vez se determinan las dimensiones adecuadas para el modelo representado en la Figura 3.5, se procede a realizar un análisis de la estructura. En este caso, se enfoca en el parámetro S_{11} para evaluar el nivel de adaptación a la frecuencia de diseño establecida.

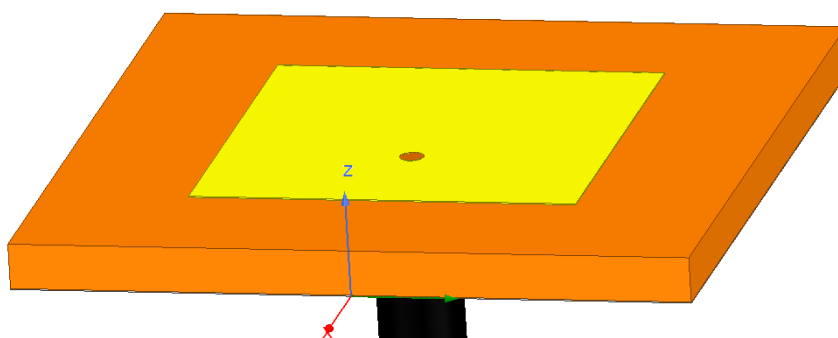


Figura 3.5. Antena parche con sustrato más grueso.

A través del proceso de optimización de la estructura, se logran identificar las dimensiones óptimas de los parámetros que permiten que el modelo alcance su mejor desempeño. Estas dimensiones se detallan en la Tabla 3.2, representando las características clave que deben ser consideradas para obtener el rendimiento deseado.

Tabla 3.2. Dimensiones de la antena parche con doble sustrato.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
$W = L$	Longitud del parche	12.91
$W_g = L_g$	Dimensiones del plano de masa	22.71
h	Espesor del sustrato	1.524
y_o	Posición de la alimentación	4.3
$Sep = \Delta L$	Diferencia entre L_g y L	4.9

Mediante la representación gráfica del parámetro S_{11} en la Figura 3.6, se aprecia un claro incremento en el ancho de banda de la estructura. Además, se observa que la antena sigue adaptándose correctamente a la frecuencia de operación específica (5.8 GHz).

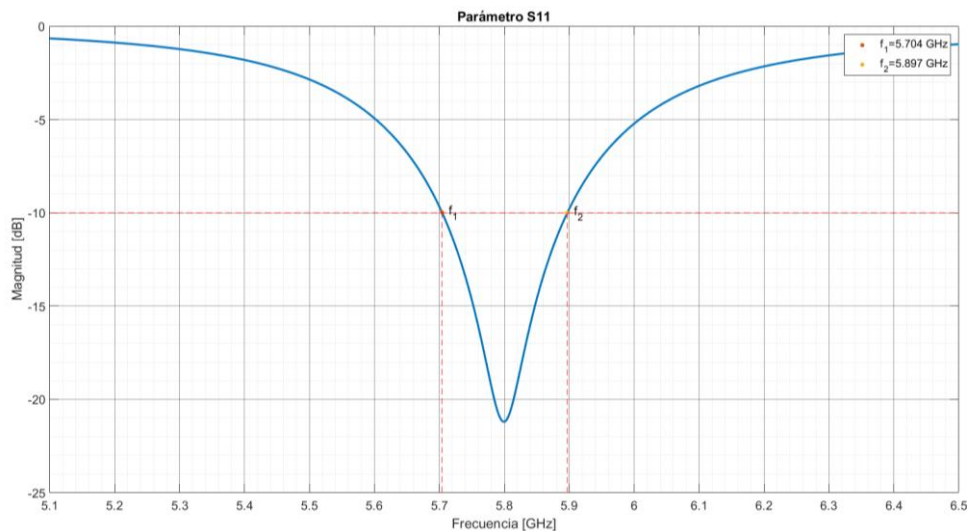


Figura 3.6. Parámetro S_{11} .

Calculando el correspondiente ancho de banda porcentual de la estructura se tiene que:

$$BW = \frac{5.897 - 5.704}{5.8} \times 100$$

$$BW = \frac{0.193}{5.8} \times 100$$

$$BW = 3.3 \%$$

El ancho de banda calculado refleja claramente el aumento porcentual respecto a la antena parche base, en términos de frecuencia se pasa de 50 MHz a 193 MHz de ancho de banda desde el punto de vista de adaptación, lo cual representa un aumento de casi cuatro veces.

Al aplicar la técnica, se introduce un segundo sustrato con dimensiones específicas. Sin embargo, a pesar de esta modificación en la estructura, la directividad de la antena sigue manteniendo la misma forma característica observada en la configuración original como se observa en la Figura 3.7.

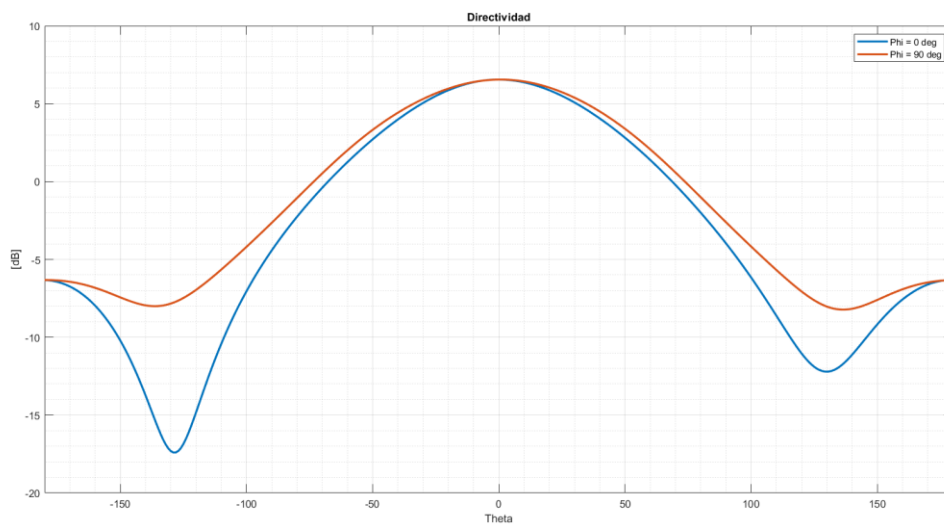


Figura 3.7. Directividad.

A pesar de los cambios en las dimensiones y la inclusión del segundo sustrato, la forma general de la directividad se mantiene. Esto significa que la energía radiada por la antena sigue distribuyéndose de manera similar a la estructura original, con la presencia del lóbulo de radiación característico.

En la Figura 3.8 se presentan dos gráficas, la primera representa el diagrama de radiación en el corte de Phi a 90 grados de la ganancia total normalizada y la segunda es la correspondiente gráfica en 3D de la ganancia de la antena parche con el sustrato aumentado.

Al analizar la imagen, se puede apreciar la forma característica de la radiación, tanto en la gráfica polar como en la 3D, que se mantiene consistente con la estructura original de la antena parche.

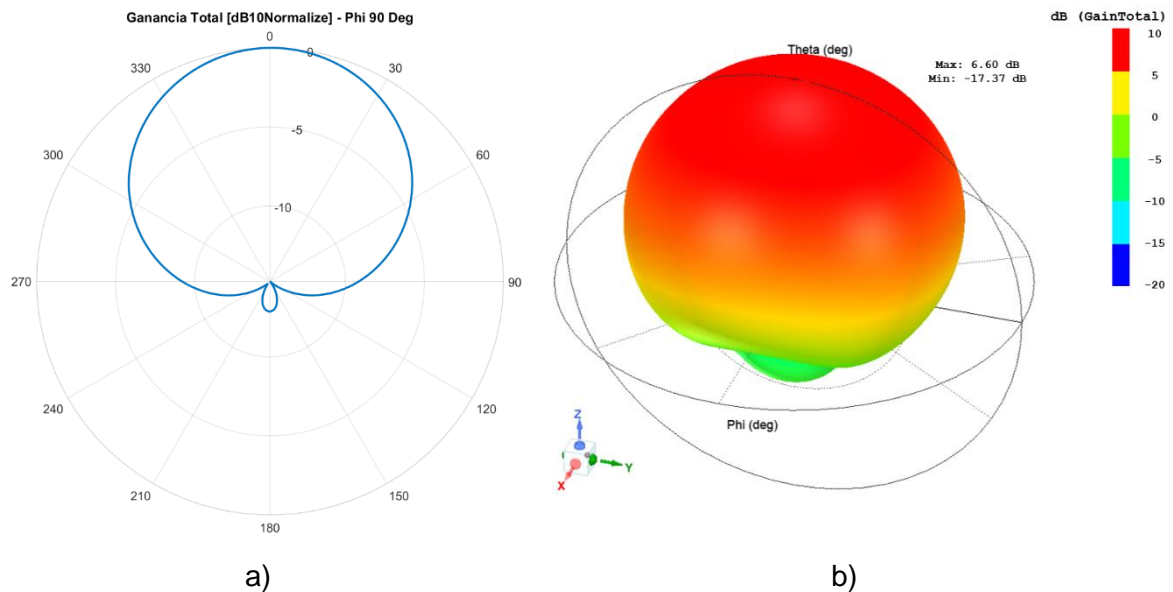


Figura 3.8. a) Diagrama de radiación polar; b) Ganancia Total en 3D.

Como se observa en la figura anterior, la radiación de la antena parche con sustrato más grueso se ha vuelto más amplia en comparación con la estructura original. Además, se observa un aumento en el valor máximo de la ganancia, el cual es de 6.60 dB, mientras que en la estructura original era de 6.17 dB.

Este aumento indica que la antena parche con doble sustrato tiene una capacidad de radiación más amplia, lo que implica una cobertura más extensa en el espacio. Esta mejora puede ser beneficiosa en aplicaciones donde se requiere una mayor cobertura angular, como en sistemas de comunicación de amplia área o en aplicaciones de detección y rastreo.

Respecto a la eficiencia de radiación de esta estructura, se ha obtenido una eficiencia cercana al 100%, lo que indica que toda la potencia eléctrica suministrada a la antena se convierte en energía radiada.

Este aumento significativo en la eficiencia de radiación puede atribuirse al incremento del sustrato, lo cual favorece la posibilidad de permitir una mejor distribución del campo eléctrico a lo largo de la estructura de la antena, lo que resulta en una mayor eficiencia de radiación. Al tener un mayor volumen de material dieléctrico, la antena puede lograr una mayor acumulación y concentración de energía, lo que se traduce en una mayor eficiencia.

Es importante mencionar que otros factores, como el diseño del parche, las dimensiones de la antena y los sustratos de alta calidad, también pueden contribuir al aumento en la eficiencia de radiación. La optimización de estos aspectos, en combinación con la

configuración de doble sustrato, puede haber jugado un papel clave en el logro de una eficiencia de radiación cercana al 100%.

3.1.3 ANTENA PARCHE CON DOBLE SUSTRATO Y GAP DE AIRE

En el caso de este modelo en particular, se realiza un análisis completo de la estructura únicamente a través de simulaciones, ya que no se ha llevado a cabo un diseño teórico. Por lo tanto, se utilizan las dimensiones optimizadas de la estructura con sustrato aumentado.

Basándonos en estas dimensiones y considerando el resultado obtenido en la Figura 3.4, se realizan los cambios necesarios en el modelo, teniendo en cuenta la estructura de la antena presentada en la Figura 3.9. Para este caso, se sigue el proceso de optimización de las dimensiones del modelo según se indica en el diagrama de la Figura 2.7.

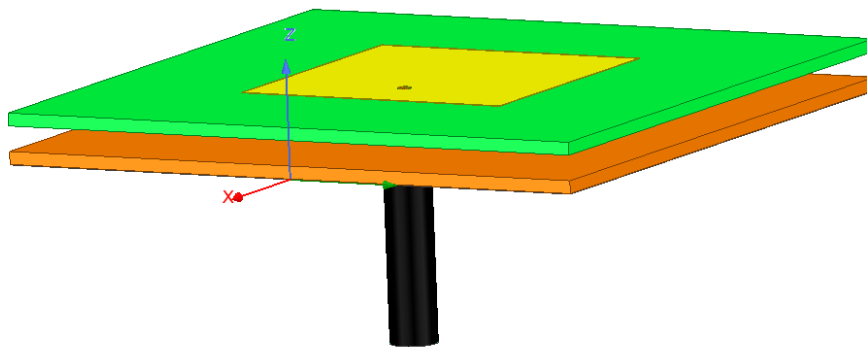


Figura 3.9. Antena parche con doble sustrato y gap de aire.

En la Tabla 3.3 se presentan los valores correspondientes a las dimensiones de la antena parche con doble sustrato y un espacio de separación de aire (Gap).

Tabla 3.3. Dimensiones de la antena parche.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
$W = L$	Longitud del parche	17.02
$W_g = L_g$	Dimensiones del plano de masa	37.02
$h_3 = h_4$	Espesor del sustrato Rogers RO4003C	0.762
Gap_{aire}	Espesor del Gap de aire	1.5
y_o	Posición de la alimentación	4.1
$Sep = \Delta L$	Diferencia entre L_g y L	10

Además, se debe tener en cuenta la importancia de la posición del punto de alimentación, ya que esta variable influye directamente en la adaptación de la antenna. Sin embargo, no es posible establecer un comportamiento fijo para esta variable, ya que su efecto varía dependiendo de las dimensiones específicas de la antenna. Por lo tanto, para cada modelo, se ha tratado de variar la posición del punto de alimentación alrededor del valor calculado en el análisis teórico.

En la Figura 3.10 se presenta el parámetro S_{11} de la y se obtiene los puntos de frecuencia a -10 dB para el posterior cálculo del ancho de banda porcentual.

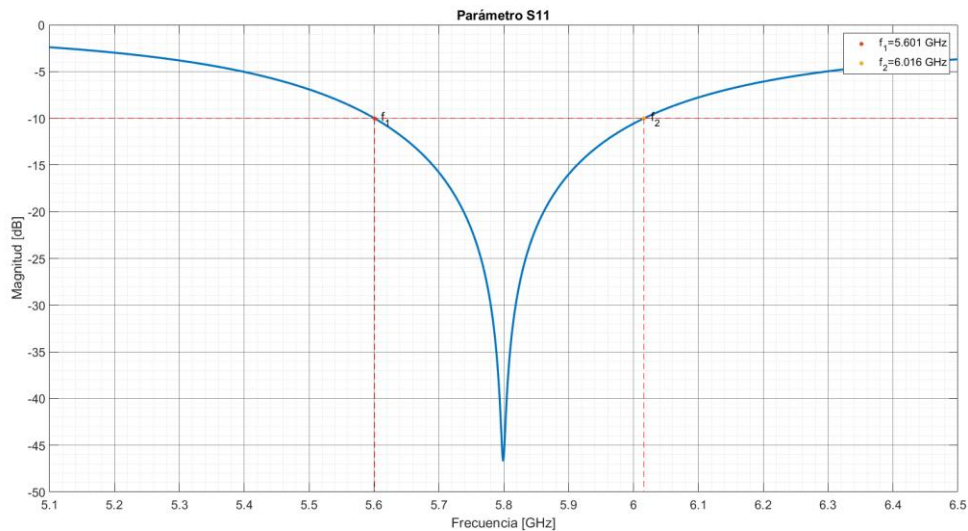


Figura 3.10. Parámetro S_{11} .

Calculando el ancho de banda porcentual de la estructura:

$$BW = \frac{6.016 - 5.601}{5.8} \times 100$$

$$BW = \frac{0.415}{5.8} \times 100$$

$$BW = 7.15 \%$$

En la Figura 3.11 se presentan los resultados de la directividad en los dos cortes mencionados anteriormente. Se observa que esta nueva estructura exhibe una mayor directividad en comparación con las dos estructuras anteriores. La directividad medida es de 8.2 dB, mientras que las antenas anteriores presentaban un valor cercano a los 6 dB.

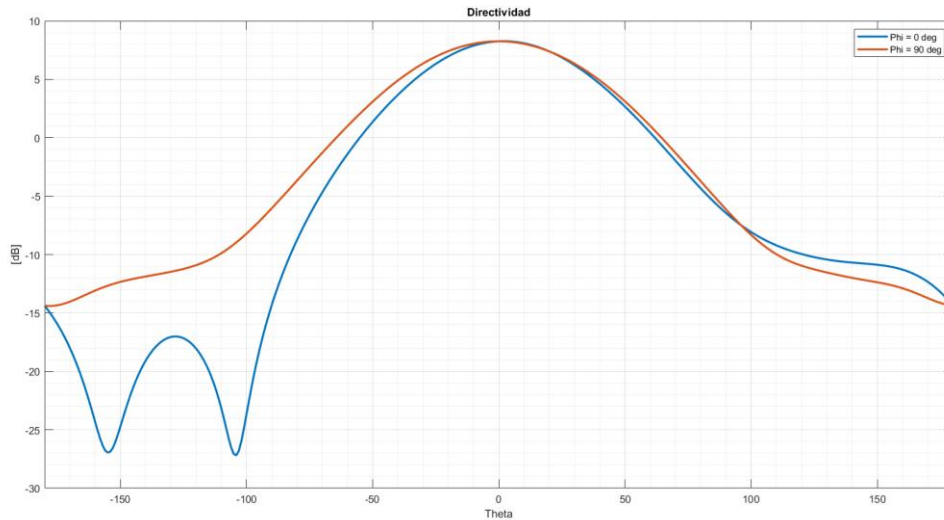


Figura 3.11. Directividad.

Este aumento en la directividad indica que la antena parche con doble sustrato y el gap de aire de 1.5 mm entre ellos ha logrado concentrar y dirigir la radiación en una dirección específica con mayor eficiencia. Este resultado es prometedor, ya que una mayor directividad implica un mejor enfoque de la radiación en la dirección deseada, lo cual es beneficioso en muchas aplicaciones.

En la Figura 3.12 se presenta el gráfico de la ganancia en 2D y 3D de la antena en dónde se puede apreciar que, a pesar de mantener la misma forma característica, la radiación de la antena ha experimentado un aumento en tamaño en comparación con las estructuras anteriores. Este aumento en tamaño se refleja en el valor de la ganancia total, el cual alcanza un valor de 8.31 dB.

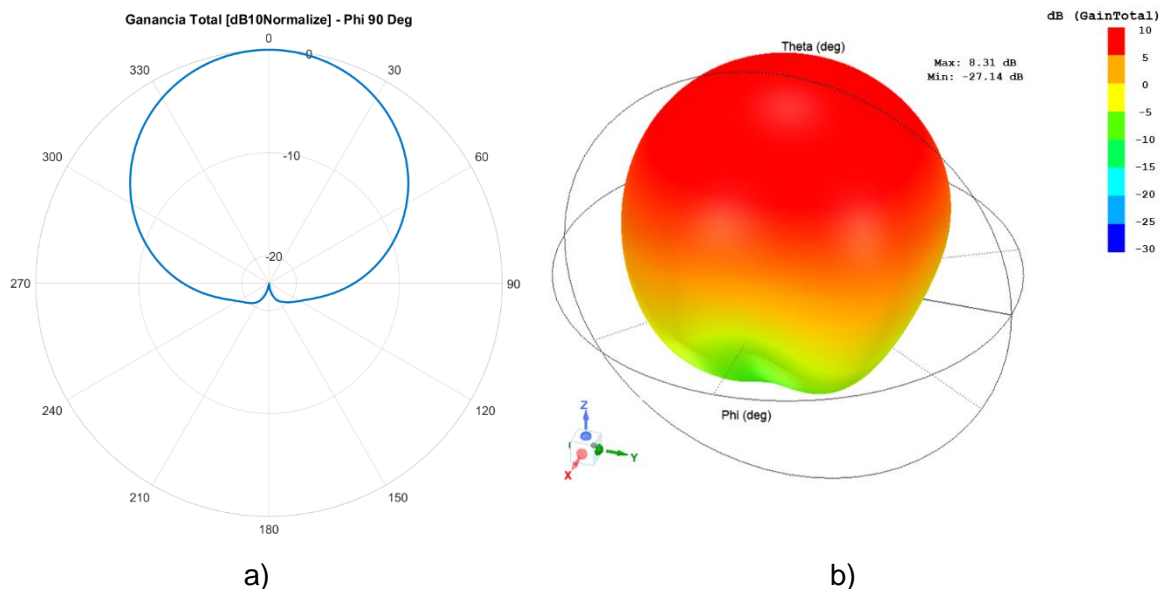


Figura 3.12. a) Diagrama de radiación polar; b) Ganancia Total en 3D.

Adicionalmente, en esta estructura, se ha logrado una eficiencia de radiación cercana al 100%, lo que indica que toda la potencia eléctrica suministrada a la antena se convierte en energía radiada. Este resultado excepcional de eficiencia de radiación puede atribuirse a la combinación de factores inherentes a esta configuración específica. El uso de sustratos de alta calidad proporciona características dieléctricas óptimas, lo que minimiza las pérdidas y maximiza la transferencia de energía dentro de la antena. Además, la inclusión del gap entre los sustratos permite una mejor distribución del campo eléctrico y una mayor concentración de energía radiada.

La estructura con gap y los sustratos ha logrado optimizar la transferencia de energía y minimizar las pérdidas en la antena, lo que se traduce en una eficiencia cercana al 100%. Este resultado es altamente deseable en el diseño de antenas, ya que garantiza que la mayor parte de la potencia eléctrica suministrada se convierta en energía radiada efectiva.

3.1.3.1 Cálculo de la constante dieléctrica efectiva del modelo

Con la estructura correctamente optimizada es posible realizar una estimación del valor de la constante dieléctrica efectiva de la estructura, considerando que se añadió el GAP de aire para separar los sustratos. Para esto, se hace uso de la Ecuación 2.2.

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}$$

Remplazando los valores de la Tabla 3.3, se tiene que:

$$\frac{10 \text{ mm}}{3.024 \text{ mm}} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{17.02 \text{ mm}}{3.024 \text{ mm}} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{17.02 \text{ mm}}{3.024 \text{ mm}} + 0.8 \right)}$$

Despejando la constante dieléctrica se encuentra que:

$$\epsilon_{reff} = 0.32993$$

La constante dieléctrica juega un papel importante en el rendimiento de la antena. Los resultados muestran que una constante dieléctrica más baja, encontrada en el diseño actual, se relaciona con mejores resultados en términos de adaptación y ancho de banda.

3.1.4 ANTENA PARCHE CON DOBLE CAPA DE DIFERENTE SUSTRATO Y GAP DE AIRE

En este modelo, la estructura de la antena presenta una altura total considerablemente mayor en comparación con las demás estructuras ($h_{total} = 4.524 \text{ mm}$) como se observa

en la Figura 3.13. Considerando que un aumento en el espesor del sustrato generalmente conlleva a mejores resultados en términos de ancho de banda, también puede complicar la adaptación de la antena en sí. Por lo tanto, para esta estructura en particular, se sigue un enfoque donde se comienza variando la posición del punto de alimentación para lograr una adaptación adecuada para luego optimizar la longitud del parche.

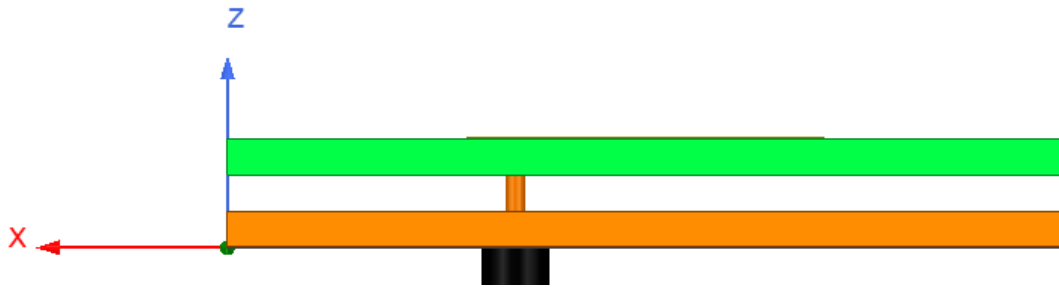


Figura 3.13. Vista lateral de la antena parche modelada.

En la Tabla 3.4 se presentan las dimensiones resultantes de la estructura optimizada, considerando los ajustes realizados en la posición del punto de alimentación y la longitud del parche.

Tabla 3.4. Dimensiones de la antena parche base diseñada.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
$W = L$	Longitud del parche	14.9
$W_g = L_g$	Dimensiones del plano de masa	34.9
h_4	Espesor del sustrato Rogers RO4003C	1.5
h_5	Espesor del sustrato FR4	1.524
Gap_{aire}	Espesor del Gap de aire	1.5
y_o	Posición de la alimentación	2
$Sep = \Delta L$	Diferencia entre L_g y L	10

En la Tabla 3.4 se puede observar que la posición del punto de alimentación se encuentra en proximidad cercana al borde del parche de la antena. Durante el proceso de optimización, se encontraron valores que lograron una adaptación aún mejor por debajo de esta posición, pero no se consideraron debido a las dificultades prácticas que surgirían si fuese construida de manera artesanal.

En la Figura 3.14 se presentan los resultados del parámetro S_{11} de la antena simulada aplicando la técnica de la sección y los puntos a -10 dB para el cálculo del ancho de banda.

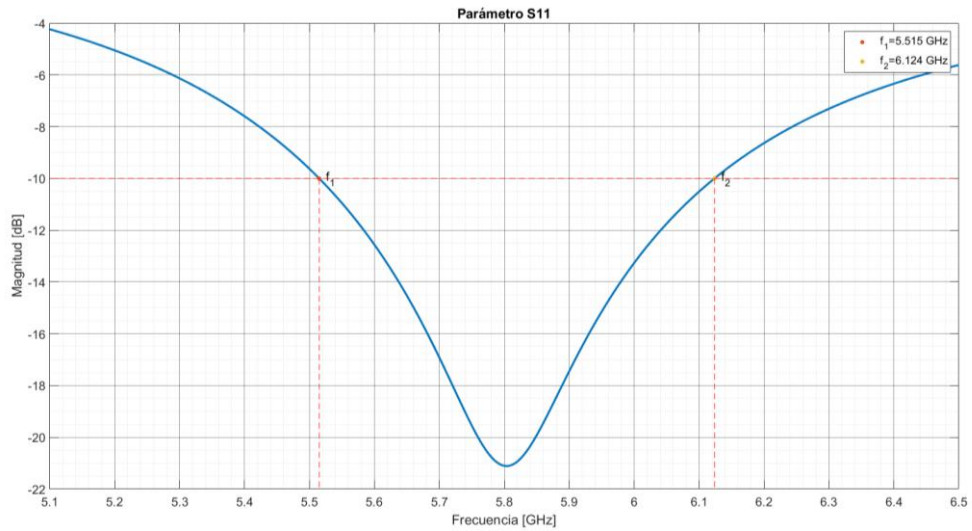


Figura 3.14. Parámetro S_{11} .

Calculando el ancho de banda porcentual de la estructura:

$$BW = \frac{6.124 - 5.515}{5.8} \times 100$$

$$BW = \frac{0.609}{5.8} \times 100$$

$$BW = 10.5 \%$$

En la Figura 3.15 se presenta la gráfica de la directividad la cual sigue siendo favorable, aunque el valor máximo de la directividad ha disminuido a aproximadamente 7 dB. Sin embargo, se han obtenido resultados satisfactorios en cuanto al ancho de banda.

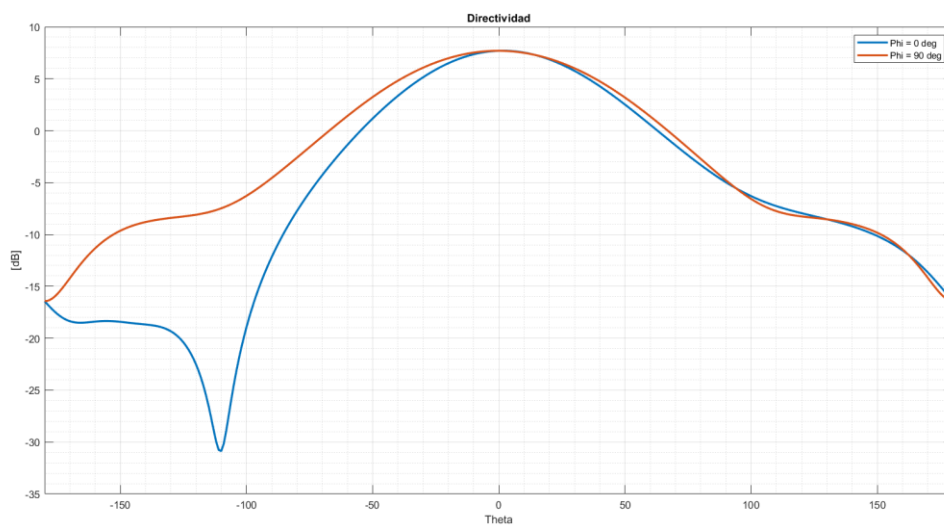


Figura 3.15. Directividad.

A pesar de la reducción en el valor máximo de la directividad, esta aún se mantiene en un nivel aceptable, lo que sugiere que la antena conserva su capacidad para enfocar y dirigir la radiación en una dirección específica.

La incorporación del sustrato FR4 y el aumento en el espesor de los sustratos han tenido un impacto en las características de la antena, pero en general se ha mantenido una buena directividad y se han obtenido resultados favorables. Estos hallazgos respaldan la efectividad de la modificación realizada en la estructura de la antena y la validez de utilizar diferentes sustratos en conjunto con un gap de aire.

En la Figura 3.16, se puede observar que, aunque el valor máximo de la ganancia ha disminuido a 7.73 dB, la forma de la radiación se mantiene consistente con la modificación anterior. Esta consistencia en la forma de la radiación indica que la antena sigue siendo capaz de irradiar energía en una dirección específica, aunque con una amplitud ligeramente menor en comparación con la estructura anterior.

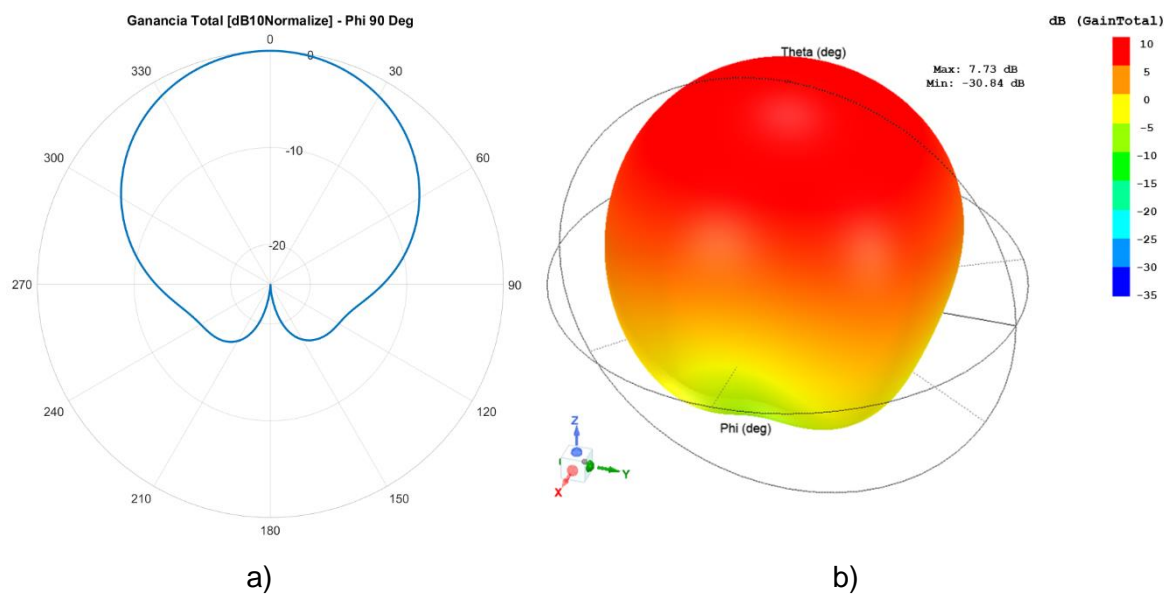


Figura 3.16. a) Diagrama de radiación polar; b) Ganancia Total en 3D.

A pesar de la reducción en el valor máximo de la ganancia, es relevante resaltar que la forma distintiva de la radiación se mantiene.

En esta configuración particular, se ha logrado una eficiencia de radiación cercana al 99%, lo que señala que el 99% de la potencia eléctrica suministrada a la antena se convierte en energía radiada. La disminución de la eficiencia puede atribuirse a las propiedades dieléctricas inherentes a los sustratos empleados. Aunque los sustratos FR4 y Rogers son ampliamente utilizados en aplicaciones de antenas, sus características dieléctricas pueden

variar en cierta medida. Esta variación puede influir en la distribución del campo eléctrico y las pérdidas dieléctricas, lo que a su vez afecta la eficiencia de radiación.

Es importante destacar que, a pesar de la leve disminución en la eficiencia de radiación, una eficiencia del 99% sigue siendo excepcionalmente alta y refleja una conversión muy efectiva de la potencia eléctrica en energía radiada. Esta eficiencia es comparable a las obtenidas en las modificaciones anteriores y demuestra que la configuración con dos sustratos diferentes y un gap de aire continúa siendo eficaz para maximizar la eficiencia de radiación de la antena.

3.1.4.1 Cálculo de la constante dieléctrica efectiva del modelo

Una vez optimizado la estructura se realiza el cálculo de la constante dieléctrica con el fin de poder contrastarla con la de la anterior estructura.

Remplazando los valores de la Tabla 3.4 en la Ecuación 2.2, se tiene que:

$$\frac{10 \text{ mm}}{4.524 \text{ mm}} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{14.9 \text{ mm}}{4.524} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{14.9 \text{ mm}}{4.524 \text{ mm}} + 0.8 \right)}$$

Despejando la constante dieléctrica efectiva, se encuentra que:

$$\varepsilon_{\text{reff}} = 0.36585$$

Este valor permite contrastar los resultados, ya que con un valor menor de permitividad efectiva la antena tiende a tener mejores resultados de ancho de banda y esto sumado con la altura total del nuevo sustrato hace que la estructura consiga los resultados presentados en el parámetro S_{11} de la Figura 3.14.

3.1.5 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS TÉCNICAS

La realización de un análisis comparativo entre las diferentes técnicas y la estructura original de la antena parche es de vital importancia para evaluar y comprender el impacto de cada modificación en el rendimiento de la antena. Este análisis nos permite determinar qué modificaciones han mejorado o afectado el ancho de banda de la antena, lo cual es un factor crucial en la transmisión y recepción eficiente de señales.

Para tener una visión más completa y apreciar el aumento del ancho de banda en las diferentes configuraciones de la antena parche, se presenta en la Figura 3.17 una gráfica conjunta de todos los parámetros S_{11} superpuestos. En esta gráfica, cada curva representa una configuración específica, desde la estructura base hasta la última modificación con doble capa de sustratos y gap de aire.

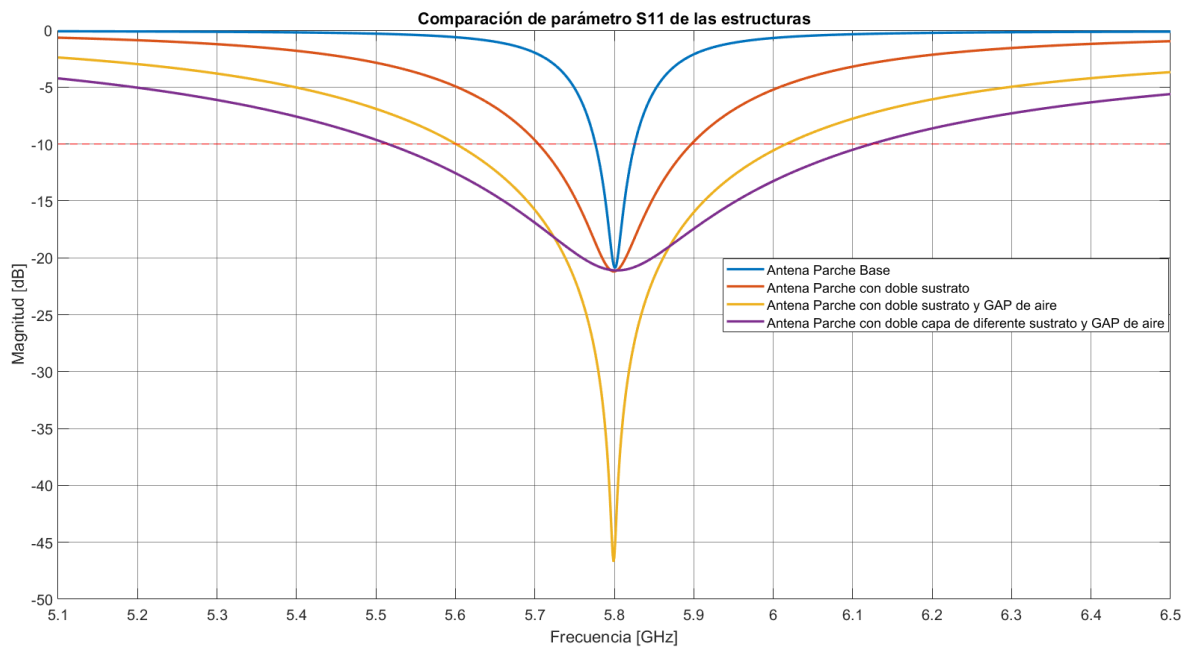


Figura 3.17. Comparación del parámetro S_{11} de cada técnica.

Al superponer estas curvas, se puede observar claramente cómo el ancho de banda se ha ampliado en cada configuración sucesiva. Esta representación visual brinda una comparación directa y permite apreciar de manera más efectiva la mejora progresiva del ancho de banda de la antena a medida que se aplican las modificaciones.

En la Tabla 3.5 se presenta un resumen de los parámetros obtenidos para la antena parche base y las respectivas modificaciones realizadas.

Tabla 3.5. Resumen de parámetros obtenidos de las antenas parche.

Estructura	Simulación			
	Ancho de banda [MHz]	S_{11} [dB]	Directividad [dB]	Eficiencia [%]
Antena parche base	50	-20.82	6.66	89
Primera técnica (3.1.2)	193	-21.19	6.55	100
Segunda técnica (3.1.3)	415	-41.73	8.26	100
Tercera técnica (3.1.4)	609	-21.08	7.69	99.29

Al examinar estos valores, se pueden identificar que las modificaciones han logrado ampliar el ancho de banda desde el punto de vista de adaptación de la antena. A medida que se aplicaron diferentes técnicas de modificación a la estructura de la antena parche, se observó un progresivo aumento en el ancho de banda. Desde el ancho de banda inicial de 50 MHz, las mejoras fueron significativas, llegando hasta los 609 MHz (aproximadamente 12 veces el ancho de banda inicial).

3.2 IMPLEMENTACIÓN

Como un complemento adicional a este trabajo, se lleva a cabo el diseño y la posterior construcción de una estructura de antena parche utilizando PLA como sustrato. La elección de este sustrato se basa en el hecho de que la antena se construirá mediante una impresora 3D que utiliza PLA como material.

Dado este contexto, en la etapa inicial del modelado de la estructura, es importante considerar la definición del material en el software de simulación 3D. En este proceso, se deben tener en cuenta los valores específicos asociados al PLA, los cuales se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Características del filamento PLA [11].

Constante dieléctrica	2.6
Tan δ	0.031

Estos valores son esenciales para asegurar una representación precisa y realista del material en el software de simulación 3D, lo cual resulta crucial para obtener resultados confiables durante la fase de diseño y simulación de la antena. Luego, durante el proceso de construcción de la antena, es fundamental considerar el modo de impresión por capas utilizado por la impresora 3D. En este caso, se emplea un patrón de impresión en zigzag para cada capa, y se utiliza un relleno del 100%, tal como se muestra en la Figura 3.18.

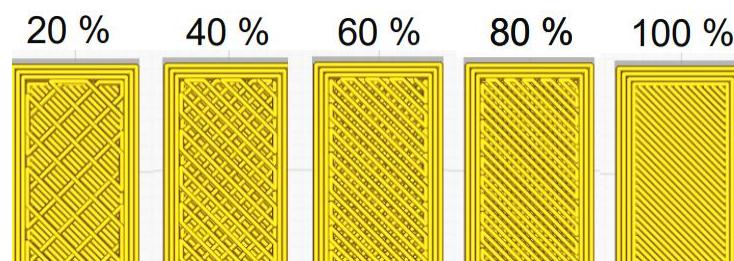


Figura 3.18. Vista del patrón Zigzag en función del porcentaje de relleno [12].

3.2.1 PLA 2 mm

Como primer paso, es necesario crear el modelo base de la antena parche para luego compararlo con la estructura que aplica la técnica de doble sustrato. Para esto, se realiza el diseño teórico de la antena de manera similar a lo que se explicó en el capítulo anterior.

Una vez obtenidos los valores necesarios, se procede al modelado de la estructura de la antena parche y se inicia el proceso de optimización. Durante este proceso se consideró el aumento de ΔL para compensar posibles variaciones durante la construcción de la antena, dado que el sustrato puede experimentar cambios en su rendimiento debido al calentamiento durante la impresión. Como resultado de este proceso, se encuentran las dimensiones óptimas que se detallan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Dimensiones de la antena parche base diseñada.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
$W = L$	Longitud del parche	14.84
$W_g = L_g$	Dimensiones del plano de masa	34.84
h	Espesor del sustrato PLA	2
y_o	Posición de la alimentación	4
$Sep = \Delta L$	Diferencia entre L_g y L	10

En la Figura 3.19 se presenta el parámetro S_{11} obtenido mediante simulación y los puntos de frecuencia a -10 dB.

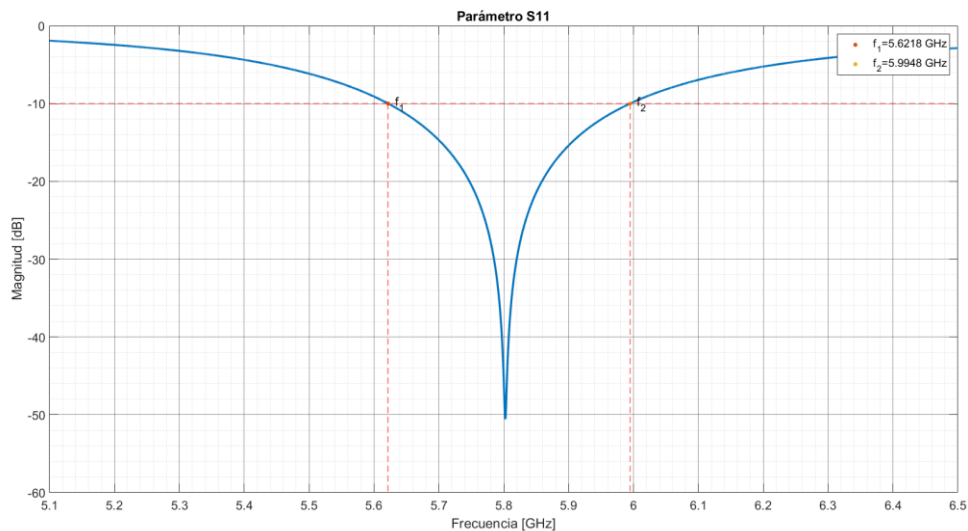


Figura 3.19. Parámetro S_{11} .

Es evidente que la antena está adecuadamente adaptada a la frecuencia de operación de 5.8 GHz, como se puede apreciar en el valor de -50 dB. Esta adaptación es de suma importancia, ya que garantiza un rendimiento óptimo de la antena en la frecuencia deseada.

Es importante destacar que, aunque el valor de adaptación pueda disminuir durante la implementación práctica, el hecho de tener un valor inicial tan bajo (-50 dB) nos brinda una garantía de que la antena seguirá funcionando de manera efectiva incluso si hay algunas variaciones. Esto nos brinda tranquilidad y confianza en el comportamiento consistente y confiable de la antena en diversas situaciones.

Posteriormente, se realiza el cálculo del ancho de banda porcentual de la antena parche base.

$$BW = \frac{5.9948 - 5.6218}{5.8} \times 100$$

$$BW = \frac{0.373}{5.8} \times 100$$

$$BW = 6.43 \%$$

Con un ancho de banda inicial del 6%, que se encuentra dentro del rango típico de las antenas parche (generalmente entre el 5%), se puede esperar que, al aplicar la técnica de doble sustrato, este valor se incremente aproximadamente al doble.

En la Figura 3.20 se presenta el diagrama de radiación y el campo eléctrico radiado.

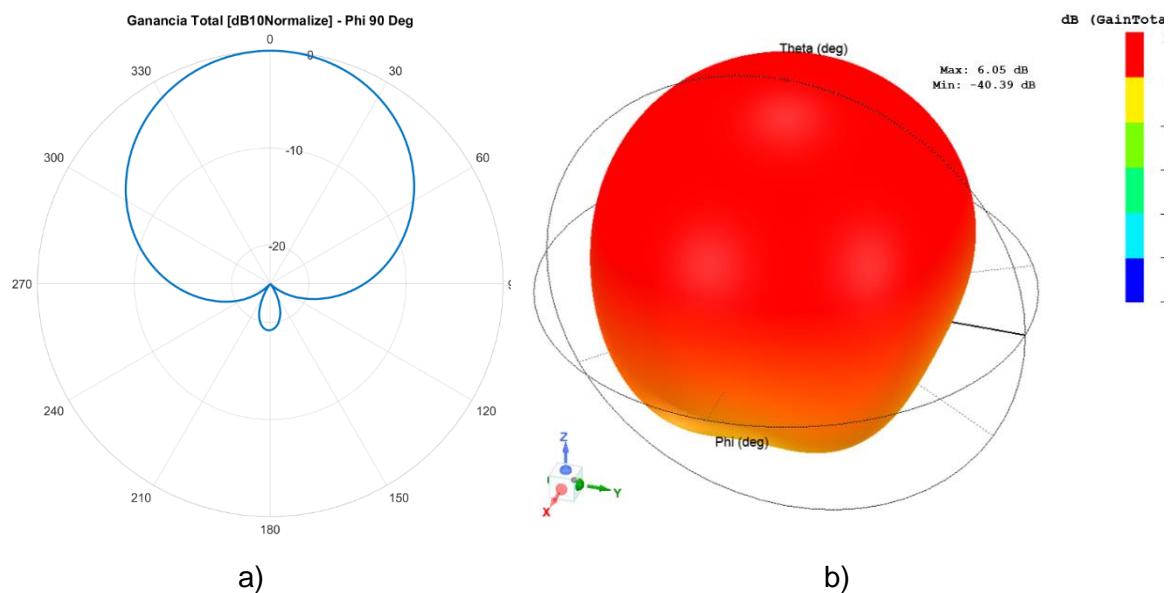


Figura 3.20. a) Diagrama de radiación polar; b) Ganancia Total en 3D.

Con base en estos resultados, se procede a llevar a cabo la construcción de la antena parche utilizando la estructura 3D modelada con el software de simulación. En este modelo, se agregan surcos guía para ubicar de forma exacta las posiciones tanto del parche como del punto de alimentación de la antena. Una vez completado esto, el modelo se exporta en formato IGES y luego se convierte a STL, que es el formato aceptado por la impresora 3D. Utilizando este último formato, se imprime la estructura, es decir, el sustrato.

Luego de obtener la estructura impresa, se continúa con el proceso de construcción. Se utiliza cobre adhesivo para colocar el parche y el plano de tierra en su lugar correspondiente. Posteriormente, se suelda el conector coaxial SMA tipo hembra a la estructura.

Antes de llevar a cabo las mediciones, es importante realizar un análisis de continuidad en la antena utilizando un multímetro. Esto asegura que la estructura de la antena se haya construido correctamente y que no existan problemas de conexión. La antena parche construida se muestra en la Figura 3.21, ilustrando el aspecto final del montaje.

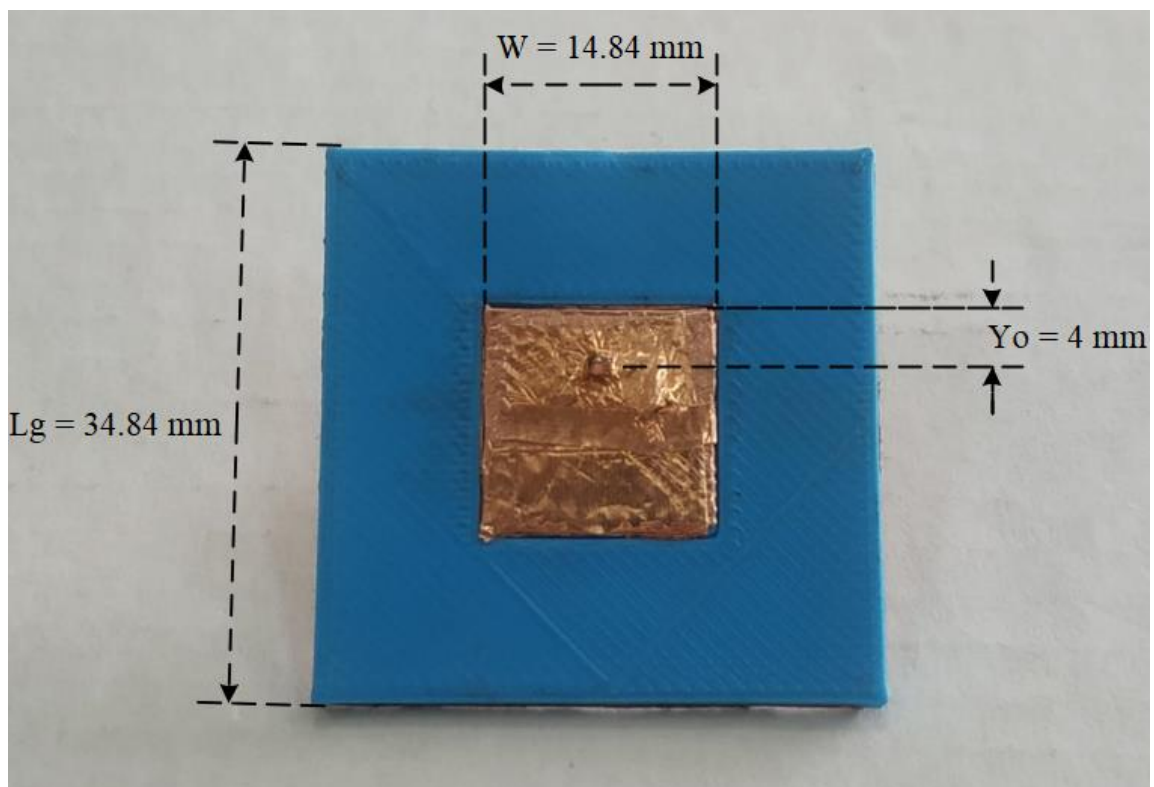


Figura 3.21. Antena parche base construida.

Finalmente, se realiza la medición del parámetro S_{11} de la antena con la ayuda de un analizador de espectros del laboratorio. Una vez que se obtiene la gráfica del parámetro

S_{11} se procede a exportarlo con formato s1p de tal forma de poder graficarlo por medio de Matlab. En la Figura 3.22 se presenta el parámetro S_{11} y los puntos a -10 dB.

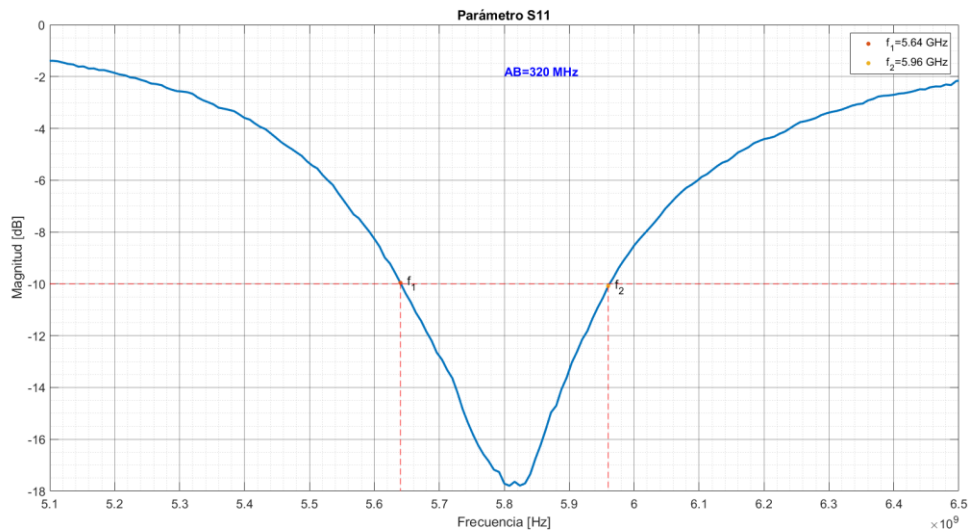


Figura 3.22. Estimación de puntos de frecuencia a -10 dB del parámetro S_{11} .

En la figura anterior, se puede apreciar que la antena está adaptada a la frecuencia de operación con un valor de -18 dB. Como se mencionó previamente, es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar durante la implementación práctica, especialmente en términos de la magnitud en dB en la frecuencia de operación. Sin embargo, a pesar de esta variación, el valor obtenido (-18 dB) sigue siendo bastante satisfactorio, lo que indica que la estructura construida funciona de manera adecuada. Este resultado confirma que la antena es capaz de operar eficientemente en la frecuencia deseada y cumple con los requisitos de adaptación establecidos.

3.2.2 PLA 4 mm

Al aplicar la técnica de doble sustrato al modelo base de la antena, es decir, aumentando el espesor del sustrato a 4 mm, se lleva a cabo un recálculo de las dimensiones de la antena. A partir de estos nuevos cálculos, se procede a optimizar los valores para obtener las dimensiones óptimas de la antena parche, las cuales se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Dimensiones de la antena parche base diseñada.

Variable	Descripción	Dimensiones [mm]
$W = L$	Longitud del parche	14.685
$W_g = L_g$	Dimensiones del plano de masa	34.685
h	Espesor del sustrato PLA	4
y_o	Posición de la alimentación	2
$Sep = \Delta L$	Diferencia entre L_g y L	10

Estas dimensiones son el resultado de un proceso de optimización que permite lograr un rendimiento óptimo en la antena, considerando el aumento del espesor del sustrato y sus efectos en el desempeño general.

En la Figura 3.23 se presenta el gráfico del parámetro S_{11} en base a las dimensiones de la Tabla 3.8 aplicado a la antena parche.

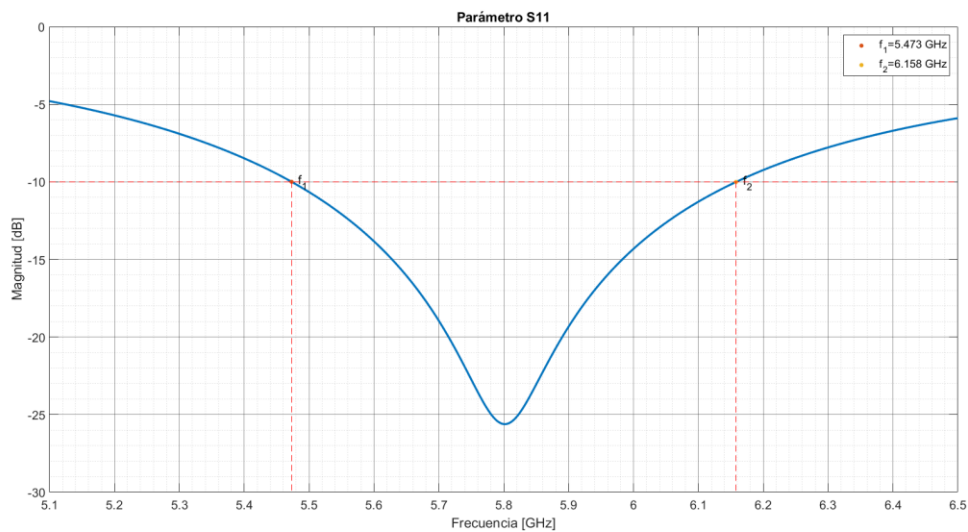


Figura 3.23. Parámetro S_{11} .

Como se observa el ancho de banda obtenido con la técnica es significativamente mayor que el de la estructura original. Y como tal, se verifica cómo la técnica funciona de buena forma, esto por medio de simulación.

Además, el resultado obtenido es altamente satisfactorio, ya que se ha logrado un valor bajo de -25 dB. Este valor refleja la calidad de la adaptación de la antena y nos brinda la confianza de que la implementación funcionará de manera óptima.

Con los puntos encontrados se realiza el cálculo del ancho de banda porcentual de la antena parche con doble sustrato.

$$BW = \frac{6.158 - 5.473}{5.8} \times 100$$

$$BW = \frac{0.685}{5.8} \times 100$$

$$BW = 11.81 \%$$

Este resultado de ancho de banda es altamente satisfactorio, ya que muestra una mejora significativa en comparación con el valor inicial. El ancho de banda ha pasado de aproximadamente el 6% a casi el 12%, lo que representa un aumento notable. Esta mejora demuestra la efectividad de la técnica aplicada y confirma que la antena ha logrado una mayor capacidad para operar en un rango más amplio de frecuencias.

La Figura 3.24 muestra la representación gráfica de la ganancia en 2D y 3D.

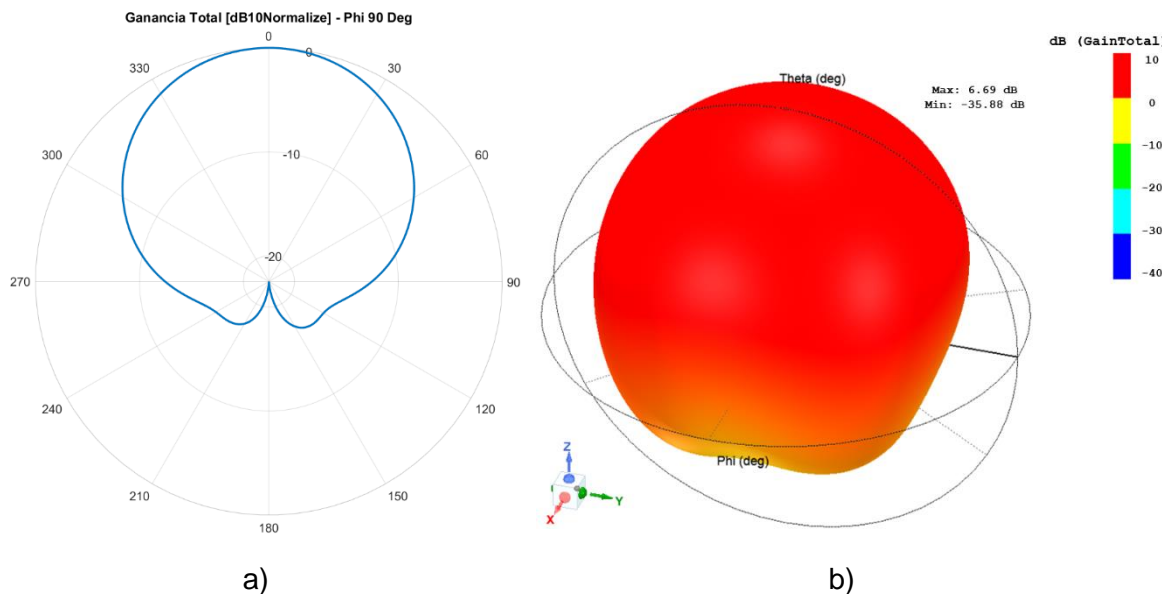


Figura 3.24. a) Diagrama de radiación polar; b) Ganancia Total en 3D.

Con base en este resultado, se procede a llevar a cabo la construcción de la antena. Al igual que en la sección anterior, se comienza marcando guías en la estructura para una mejor colocación del cobre adhesivo y la alimentación coaxial. Luego, se exporta el modelo en formato IGES y se convierte a STL para cargarlo en la impresora 3D.

Es importante verificar el modo de impresión y el llenado de la estructura antes de imprimir, para asegurarse de que estén correctamente definidos. Esto es crucial para evitar problemas en la funcionalidad de la antena. Un incorrecto modo de impresión o llenado

podría ocasionar variaciones significativas en los parámetros eléctricos del sustrato, tal como se definen en la Tabla 3.6, lo cual podría afectar los resultados esperados.

La antena parche construida, aplicando la técnica de doble sustrato, se muestra en la Figura 3.25. Esta imagen ilustra el aspecto final de la antena, después de llevar a cabo el proceso de construcción y montaje.

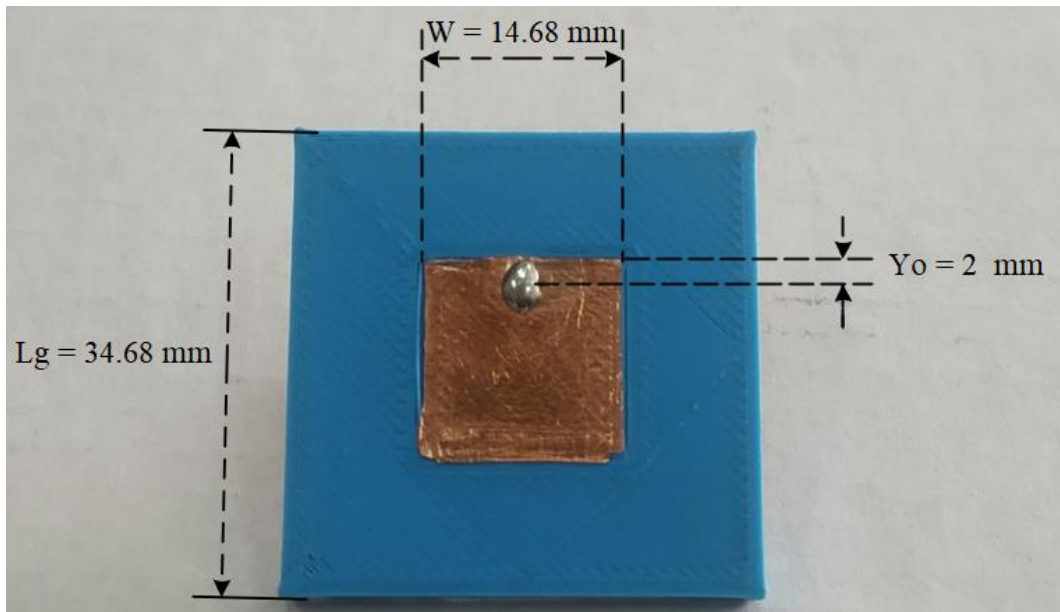


Figura 3.25. Antena parche con doble sustrato.

Realizando las mediciones de la antena por medio del analizador de espectros, se consigue la gráfica del parámetro S_{11} presentado en la Figura 3.26.

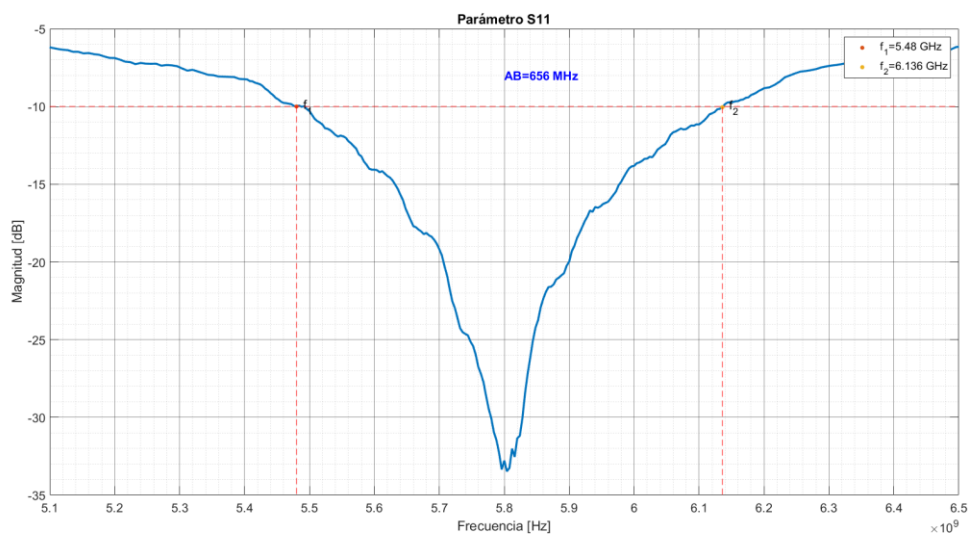


Figura 3.26. Estimación de puntos de frecuencia a -10 dB del parámetro S_{11} .

Como se observa en la Figura 3.26 el ancho de banda conseguido (656 MHz) es similar al que se obtuvo por medio del análisis por simulación (685 MHz), además, se obtiene una buena adaptación de la antena a la frecuencia de operación.

En la Figura 3.27 se presenta una comparación de los parámetros S_{11} obtenidos en las antenas construidas.

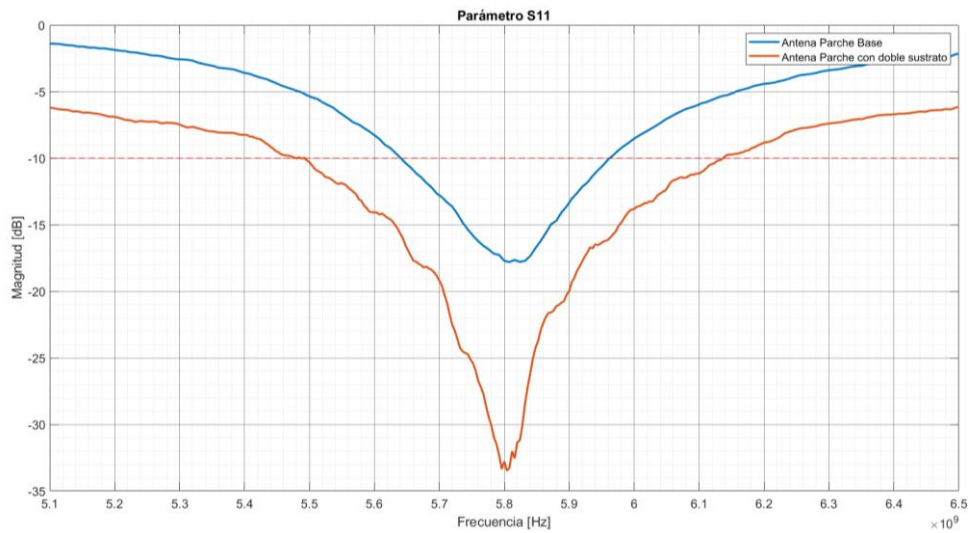


Figura 3.27. Estimación de puntos de frecuencia a -10 dB del parámetro S_{11} .

Como se observa en la figura anterior, el ancho de banda es aproximadamente el doble; se aprecia una buena adaptación de la antena con la técnica aplicada llegando a un valor cercano a los -35 dB.

En la Figura 3.28 se presentan las antenas construidas con una vista lateral para la visualización de la diferencia de la altura del sustrato.

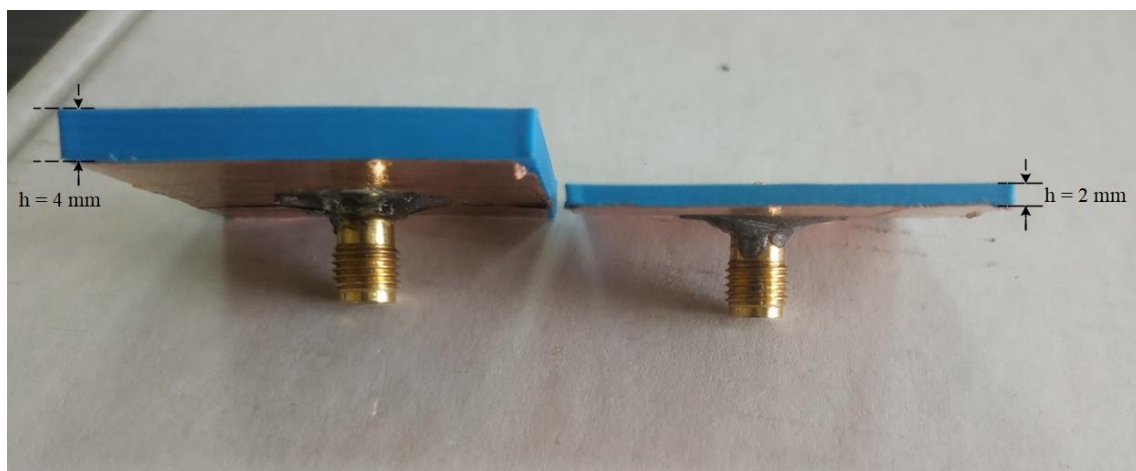


Figura 3.28. Antena parche con doble sustrato y antena parche base.

Además, es importante comparar los resultados tanto en las simulaciones como los obtenidos mediante medición, en la Tabla 3.9 se detallan estos valores, con su respectivo porcentaje de error.

Tabla 3.9. Resumen de valores de anchos de banda calculados.

Estructura	Simulación	Implementación	Error relativo [%]
	Ancho de banda [MHz]	Ancho de banda [MHz]	
Antena Parche	373	320	14.21
Antena Parche con Doble sustrato	685	656	4.23

La tabla anterior revela el impacto significativo de la técnica de doble sustrato en el ancho de banda de la antena. La antena base, sin la aplicación de la técnica, muestra un ancho de banda de 373 MHz, mientras que con la implementación de la técnica de doble sustrato se logra ampliar este valor a 685 MHz. Esta mejora sustancial demuestra la efectividad de la técnica en el aumento del ancho de banda de la antena.

Es relevante resaltar que los resultados obtenidos tanto en la simulación como en la implementación muestran una alta precisión y concordancia. Esto se debe en parte a la buena definición de los parámetros del sustrato y al uso de un modelo de análisis de la antena riguroso y preciso. Gracias a esto, se logran obtener resultados muy cercanos entre la simulación y la implementación práctica de la antena.

3.3 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos han demostrado la efectividad de las diversas técnicas de mejora de ancho de banda aplicadas. En comparación con la estructura base, se ha logrado un incremento significativo en el ancho de banda de adaptación, pasando del 6% al 12%. Además, se ha observado una mejora en la adaptación de la antena a la frecuencia de operación, con valores de S_{11} en un rango aceptable.

El análisis comparativo entre las simulaciones y las implementaciones prácticas ha revelado una alta precisión y concordancia, lo que demuestra la validez y confiabilidad de los modelos de simulación utilizados. Esto ha permitido obtener resultados cercanos entre la simulación y la implementación, con bajas tasas de error.

En términos de directividad, se ha observado que las modificaciones realizadas en la estructura de la antena no han afectado significativamente la forma característica de la

radiación, lo que indica que la antena sigue siendo capaz de concentrar y dirigir la energía radiada de manera efectiva.

Las dimensiones del parche de la antena parche juegan un papel crucial en la determinación de la frecuencia de operación. Al variar las dimensiones del parche, es posible ajustar la frecuencia de resonancia de la antena y lograr la operación deseada. Es importante realizar un análisis detallado y exhaustivo de las dimensiones del parche para garantizar una frecuencia de operación precisa y controlada.

El punto de alimentación de la antena parche tiene un impacto significativo en su adaptación. Variar la posición del punto de alimentación permite ajustar y mejorar la adaptación de la antena a la frecuencia de operación deseada. Se recomienda realizar pruebas y simulaciones para determinar la posición óptima del punto de alimentación que proporcione una adaptación óptima en la antena.

La simulación electromagnética desempeña un papel fundamental en el diseño y optimización de antenas parche. Permite predecir y evaluar el rendimiento de la antena antes de su implementación práctica, lo que ahorra tiempo y recursos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los resultados de simulación son aproximaciones y puede haber diferencias entre los resultados simulados y los resultados reales. Se recomienda realizar validaciones experimentales para verificar los resultados obtenidos en la simulación.

3.4 RECOMENDACIONES

La aplicación de doble sustrato ha demostrado ser efectiva para mejorar el rendimiento de las antenas parche. Se recomienda investigar y evaluar el uso de diferentes combinaciones de sustratos con propiedades dieléctricas específicas para obtener un rendimiento óptimo en términos de ancho de banda, adaptación y directividad.

La optimización de las dimensiones es crucial para lograr un rendimiento mejorado de la antena. Se sugiere realizar estudios detallados para determinar las dimensiones óptimas de acuerdo con los requisitos específicos de la aplicación, considerando tanto las dimensiones del parche como la posición del punto de alimentación.

Aunque se ha observado una concordancia satisfactoria entre las simulaciones y las implementaciones prácticas, es recomendable realizar más validaciones experimentales para corroborar y verificar los resultados obtenidos. Esto ayudará a tener una mayor confianza en la precisión de los modelos de simulación y en la efectividad de las técnicas aplicadas.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Neto, A. D'Assunção, C. F. L. Vasconcelos, and M. Albuquerque, "Wave Concept Iterative Procedure Analysis of Patch Antennas on Nanostructured Ceramic Substrates," *Adv. Electromagn.*, vol. 2, Feb. 2014, doi: 10.7716/aem.v2i3.195.
- [2] M. Uzer, D. Uzer, N. Yilmaz, and S. S. Gultekin, "Bandwidth modeling of U-slot rectangular microstrip antennas with artificial neural networks," *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, pp. 559–563, Jan. 2012.
- [3] N. Muhammad, H. Umair, Z. Islam, Zarkhitab, I. Rashid, and F. Bhatti, "High Gain FSS Aperture Coupled Microstrip Patch Antenna," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 64, pp. 21–31, May 2016, doi: 10.2528/PIERC16022102.
- [4] D. Pinchera and F. Schettino, "A dual-polarized parasitic patch antenna for MIMO systems," Jan. 2009.
- [5] J. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, Fourth Edition. McGraw-Hill Professional, 2007.
- [6] W. Wang, Y. Wang, S. Lou, S. Zhang, and Y. Zhou, "Effect of Ground Plane Deformation on Electrical Performance of Air Microstrip Antennas," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2020, p. 4029780, 2020, doi: 10.1155/2020/4029780.
- [7] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Edition | Wiley. Wiley, 2016.
- [8] Rogers Corporation, "RO4000 Laminates RO4003C and RO4350B - Data Sheet," [En línea]. Disponible en: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b—data-sheet.pdf>. (accessed Jun. 29, 2023).
- [9] "Characteristics of Air as an Insulator - In Compliance Magazine." <https://incompliancemag.com/article/characteristics-of-air-as-an-insulator/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [10] Laminated Plastics, "FR-4," [En línea]. Disponible en: <https://laminatedplastics.com/fr-4.pdf>. (accessed Jun. 29, 2023).

- [11] U. Hasni, R. Green, A. V. Filippas, and E. Topsakal, "One-step 3D-printing process for microwave patch antenna via conductive and dielectric filaments," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 61, no. 3, pp. 734–740, Mar. 2019, doi: 10.1002/MOP.31607.
- [12] P. Dunaj, S. Berczyński, K. Miadlicki, I. Irska, and B. Niesterowicz, "Increasing damping of thin-walled structures using additively manufactured vibration eliminators," *Materials (Basel)*., vol. 13, no. 9, May 2020, doi: 10.3390/MA13092125.