

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS DE LA ALIMENTACIÓN DE UNA ANTENA TIPO PATCH ACOPLADA POR RANURA A 2,4 GHz

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

JENIFFER LEONELA RUALES MORÁN

DIRECTOR: DR.-ING. HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA

CODIRECTOR: DRA. SORAYA LUCÍA SINCHE MAITA

Quito, Mayo 2022

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Jeniffer Leonela Ruales Morán, bajo nuestra supervisión.

Dr.-Ing. Hernán Vinicio Barba Molina
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Dra. Soraya Lucía Sinche Maita
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Jeniffer Leonela Ruales Morán, declaro bajo juramento que el trabajo 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.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

JENIFFER LEONELA RUALES MORÁN

DEDICATORIA

El presente trabajo de Titulación Dedico a mi hija Bianca Alessia Jarrin Ruales ya que ha sido mi más grande inspiración para poder culminar mi carrera Universitaria. A mis padres que han sido mi más grande apoyo para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, por el amor comprensión y apoyo en toda mi carrera profesional.

Agradezco al Doctor Hernán Barba por su tiempo, dedicación y paciencia para el desarrollo de este proyecto de titulación.

Agradezco de manera especial a la Doctora Soraya Sinche, por su disposición para ser Codirectora del presente trabajo de Titulación.

A mis amigos que me dejan momentos vividos inolvidables.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	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 ALCANCE	2
1.3 ANTENA <i>PATCH</i>	3
1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ANTENA <i>PATCH</i>	4
1.3.2 TIPOS DE ALIMENTACIÓN	4
1.3.3 POLARIZACIÓN DE ANTENAS <i>PATCH</i>	6
1.3.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LAS ANTENAS <i>PATCH</i>	9
2 METODOLOGÍA.....	14
2.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA ANTENA <i>PATCH</i>	14
2.1.1 DISEÑO DE ANTENA <i>PATCH</i> CON CONECTOR COAXIAL	14
2.1.2 DISEÑO CON SUSTRATO DUROID 5880.....	15
2.1.3 DISEÑO CON SUSTRATO TMM10.....	18
2.1.4 DISEÑO CON SUSTRATO FR4	21
2.1.5 ELECCIÓN DE SUSTRATO	23
2.1.6 DISEÑO DE LA ANTENA <i>PATCH</i> CON ALIMENTACIÓN CON ACOPLAMIENTO POR RANURA	24
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30

3.1	VARIACIÓN DEL PARÁMETRO n EN LA RANURA.....	30
3.2	VARIACIONES DE POSICIÓN DE RANURA	43
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
4.1	CONCLUSIONES.....	55
4.2	RECOMENDACIONES	56
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se presenta un análisis de una antena tipo *patch* con acoplamiento por ranura a 2,4 GHz. En el primer capítulo se realiza un breve resumen de una antena *patch*, en donde se indica tipos de alimentación, características y métodos de análisis.

El segundo capítulo detalla la metodología para el análisis de la antena. Mediante variación de las características geométricas y eléctricas del sustrato se selecciona el que se utilizará. Para esta sección se realiza el diseño de la antena *patch* con alimentación mediante conector coaxial a 2,4 GHz, con tres diferentes tipos de sustratos, Duroid 5880, TMM10 y FR4. En base a los resultados obtenidos, se selecciona el mejor sustrato junto con el dimensionamiento del elemento radiante (parche). Luego, se realiza el diseño de la antena tipo *patch* con acoplamiento por apertura a 2,4 GHz, utilizando las dimensiones del elemento radiante antes calculado. Se indica el dimensionamiento de la ranura en base a un parámetro n que modifica las dimensiones de ésta.

En el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante la modelación de la antena tipo *patch* acoplada por ranura en CST Studio Suite, para diferentes dimensiones de ranura al variar el parámetro n que toma valores de 1 a 20. Con los resultados obtenidos se toma la dimensión de la ranura con las mejores características y se realiza las simulaciones de la antena cambiando la ubicación de la ranura en 10 diferentes posiciones con respecto a la posición inicial diseñada.

En el cuarto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de titulación.

PALABRAS CLAVE: Antena patch, alimentación por ranura, CST Studio Suite.

ABSTRACT

This work presents an analysis of an aperture coupled patch antenna at 2.4 GHz. Chapter one provides a brief description of a patch antenna, feeding types, characteristics and analysis methods.

Chapter two describes the methodology for the analysis of the antenna. The selection of the substrate to be utilized is done by varying the geometric and electrical characteristics. This process utilizes the design of a patch antenna at 2.4 GHz fed by a coaxial line. Three types of substrates are probed for this purpose: Duroid 5880, TMM10, and FR4. Based on the obtained results that substrate which shows the best performance is selected along with dimension of the radiating element (patch) are selected. Then, the design of the patch antenna with an aperture coupling at 2.4 GHz is carried out using the dimensions of the previously calculated radiating element. The dimensioning of the slot is indicated based on a parameter n which modifies the slot dimensions.

Chapter three shows the results obtained by modeling the slot-coupled patch antenna in CST Studio Suite for different slot dimensions by varying the parameter n which takes values from 1 to 20. With the obtained results, the slot dimension, with the best characteristics, is assumed and the antenna simulations are performed by changing the slot location in 10 different positions with respect to the initial designed position.

Chapter four shows conclusions and recommendations of this work.

KEYWORDS: Patch antenna, Slot feeding, CST Studio Suite.

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos que permite comunicarse a un dispositivo de forma inalámbrica es la antena. Estos componentes pasivos deben permitir interconexiones eficientes, es decir, deben presentar estructuras sencillas y de bajo costo para que la comunicación pueda realizarse de manera confiable entre cualquier número de dispositivos inalámbricos.

Una de las antenas que cumple con estas características es la antena *patch* debido a su fácil fabricación; por ende, es muy utilizada en aplicaciones inalámbricas. En la actualidad se han propuesto variaciones geométricas en su estructura para garantizar diferentes aplicaciones vinculadas con polarización y eficiencia [1].

Uno de los puntos sensibles en el diseño de una antena *patch* es la alimentación. Se han propuesto diferentes configuraciones para lograr un buen compromiso entre facilidad de fabricación y buen desempeño de la antena. Las configuraciones de alimentación son líneas de transmisión, coaxial, acoplamiento por ranura y acoplamiento por proximidad tal como se muestra en la Figura 1.1 [2].

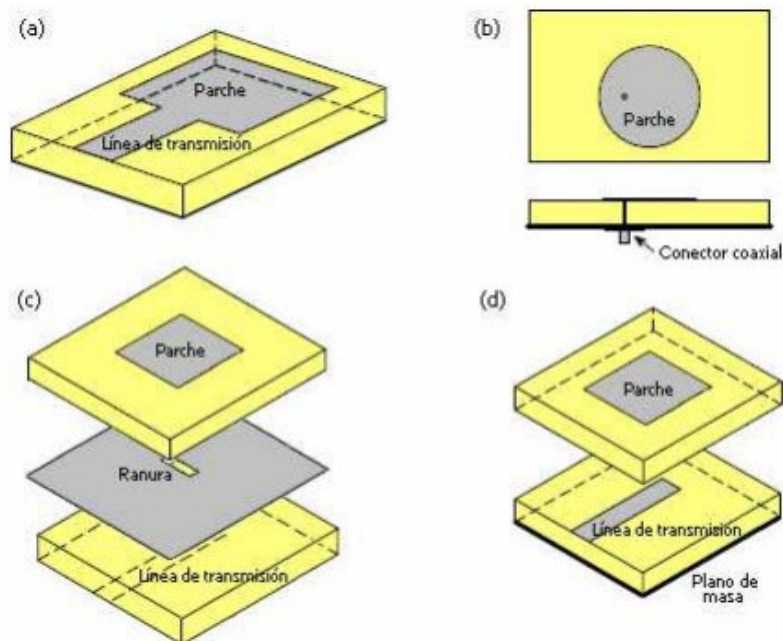


Figura 1.1 Alimentación de la antena *patch*, (a) línea de transmisión, (b) coaxial, (c) acoplamiento por ranura, y (d) acoplamiento por proximidad [2].

La alimentación por acoplamiento por ranura presenta algunas ventajas, incluyendo, buena adaptación de impedancia de la alimentación de la antena y más ancho de banda, además, se evitan problemas mecánicos para conectar la *patch* con su red de alimentación [3].

Desde el punto de vista de versatilidad, una antena *patch* acoplada por ranura se presenta como una adecuada solución en tecnologías inalámbricas al ser un dispositivo común entre las diferentes tecnologías.

El presente trabajo de titulación propone el estudio de la alimentación acoplada por ranura de una antena tipo *patch* para tecnologías inalámbricas operando en la banda de 2,4 GHz con bajos requerimientos de ancho de banda. Para lo cual se utilizará simulaciones electromagnéticas tridimensionales con la herramienta CST Studio Suite.

El estudio propuesto marcará el inicio de la utilización de antenas adaptivas, permitiendo en un futuro proponer implementaciones únicas que funcionen de una manera eficiente en las diferentes tecnologías inalámbricas.

1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo de titulación es:

- Analizar la alimentación de una antena tipo *patch* acoplada por ranura por medio de simulaciones tridimensionales electromagnéticas a 2,4 GHz.

Los objetivos específicos de este trabajo de titulación son:

- Describir los tipos de alimentaciones más comunes para una antena *patch*.
- Diseñar la antena *patch* con acoplamiento por apertura para una frecuencia de 2,4 GHz.
- Simular la antena *patch* diseñada en CST Studio Suite para una frecuencia de 2,4 GHz variando los parámetros geométricos de su estructura.
- Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones conforme el estudio paramétrico.

1.2 ALCANCE

En el presente trabajo de titulación se realizará el estudio de la alimentación de una antena *patch* de la forma acoplada por apertura utilizando la herramienta de simulación CST Studio Suite, con el fin de conocer la relación que guardan las características circuitales y radiantes de la antena ante cambios geométricos de su estructura cuando la antena opera a 2,4 GHz.

En primer lugar, se describirá de manera general las características de las antenas *patch* y los tipos de alimentación más comunes.

Posteriormente, se realizará el diseño de la antena, sustentado con un procedimiento teórico que implica la elección de los sustratos al igual que el procedimiento para la determinación de las dimensiones de la estructura para una frecuencia de operación de 2,4 GHz, ancho de banda mínimo de 20 MHz y acoplamiento a una alimentación de impedancia característica 50 Ohm.

Se realizará el modelado tridimensional y simulación de la antena *patch* acoplada por apertura en la herramienta de simulación CST Studio Suite. Los parámetros relacionados a la geometría de la apertura serán variados para poder analizarlos en función del *VSWR*.

Finalmente, se presentará como resultado un análisis paramétrico de la estructura de alimentación de la antena con el fin de evaluar su campo de utilización contrastando las necesidades de las tecnologías inalámbricas.

1.3 ANTENA PATCH

En esta sección se estudiará la antena *patch*, se describirán sus características, tipos de alimentación y métodos de análisis.

Las antenas *patch* o "*microstrip* son antenas planas las cuales son diseñadas a partir de líneas de transmisión, estas antenas son muy versátiles cuando se refiere a frecuencia de resonancia, polarización, patrón e impedancia" [4].

Estas antenas son utilizadas en aplicaciones en donde se requiere un tamaño pequeño y peso liviano tales como aplicaciones aeronáuticas, aplicaciones espaciales, satelitales, misiles de gran rendimiento, aplicaciones de identificación por radio frecuencia o *RFID* [4].

Desventajas

- Baja eficiencia de la antena, pudiendo mejorarla con la modificación en su estructura.
- Baja potencia ya que son elaboradas en tecnología impresa.
- Ancho de banda estrecho.
- Alto valor en el factor de calidad *Q*, ya que es inversamente proporcional al ancho de banda.

Ventajas

- Fácil adaptación debido a su estructura plana, dimensiones pequeñas y peso liviano.

- Para su fabricación no se requiere de muchos materiales, esto hace que su costo no sea elevado.
- Puede soportar diferentes tipos de polarización tales como lineal o elíptica.
- Es compatible con diseños MMIC (*Monolithic Microwave Integrated Circuits*) [5].

1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ANTENA *PATCH*

La antena *patch* se encuentra estructurada como se observa en la Figura 1.2. Contiene un plano de masa sobre el cual se encuentra un sustrato. El sustrato se elige de acuerdo a su constante dieléctrica que se encuentra en el rango de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. En el diseño es recomendable utilizar sustratos gruesos con baja constante dieléctrica, ya que esto mejora la eficiencia y el ancho de banda.

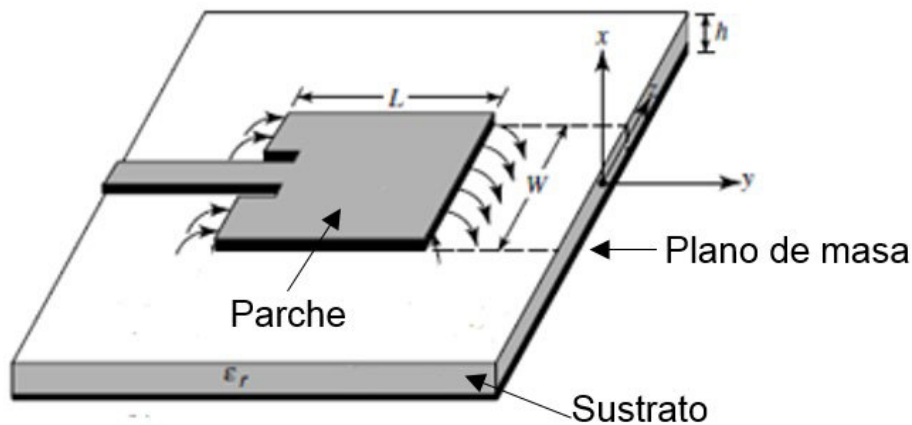


Figura 1.2 Estructura de una antena *patch* [6].

El parche consiste en una muy delgada lámina metálica, colocada en un sustrato de un espesor h colocado sobre el plano de masa. La estructura tipo parche puede tener diferentes formas, siendo las más utilizadas las rectangulares y circulares ya que su diseño y fabricación es sencillo.

1.3.2 TIPOS DE ALIMENTACIÓN

Uno de los aspectos importantes en el diseño de la antena consiste en la alimentación. Los tipos de alimentación más utilizados son: alimentación por línea *microstrip*, con cable coaxial, acoplamiento por apertura y proximidad como se muestra en la Figura 1.1.

a) Alimentación por línea *microstrip* (Figura 1.1 a)

La alimentación por línea *microstrip*, trata de una línea que se encuentra insertada en el elemento radiante (parche).

Este tipo de alimentación es de fácil modelación y fabricación. Una desventaja es que si se aumenta el grosor del sustrato aumenta la probabilidad de excitar ondas superficiales y, por ende, radiación indeseada; lo que limita el ancho de banda y el acoplamiento. Esta es la causa por la que su rendimiento sea deficiente.

Los métodos de alimentación basados en inserción de la línea *microstrip* son:

- Conectando la línea de transmisión directamente en un borde del parche (Figura 1.3 a). Este método implica necesariamente la transformación de impedancia la cual puede ser realizada, por ejemplo, con una línea adicional que opere como un transformador de un cuarto de longitud de onda.
- Conectando la línea en un borde con inserciones en el parche (Figura 1.3 b). Mediante la profundidad de inserción en el parche se modifica el acoplamiento de impedancia.

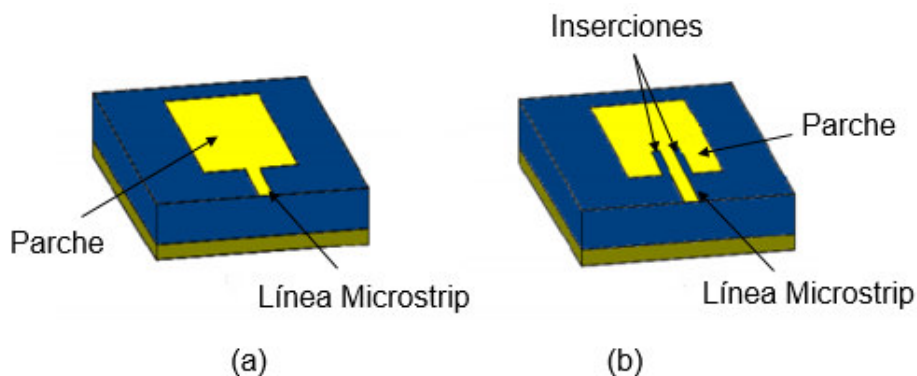


Figura 1.3 Tipos de inserción por línea *microstrip* para la alimentación de una antena *patch*: (a) conexión directa en el parche y (b) conexión con inserciones en el parche [7].

b) Alimentación por cable coaxial (Figura 1.1 b)

La alimentación por cable coaxial, consiste en conectar al elemento radiante de la antena (parche) un conductor interno de un cable coaxial y el conductor externo del cable conectarlo al plano de masa de la antena. La posición del conector coaxial determina la impedancia característica que se utiliza para su diseño.

En la práctica, el conductor interno del cable coaxial debe soldarse al elemento radiante, por lo que debe perforarse el sustrato; esto ocasiona dificultad en la manufactura de la

antena para sustratos gruesos. De igual manera, es necesario crear un espacio en el plano de masa para que éste no se cortocircuite con el conductor interno del coaxial.

c) Alimentación de acoplamiento por proximidad (Figura 1.1 d)

La alimentación de acoplamiento por proximidad tiene acoplamiento electromagnético. Consta de dos sustratos separados mediante una línea *microstrip*, sobre un plano de masa. Este método establece un ancho de banda angosto y una ventaja es que la antena se puede optimizar por separado, es decir, el sustrato que contiene el parche, debería utilizar sustratos con permitividad baja y más gruesos, mientras que el sustrato que contiene la línea *microstrip* debería utilizar sustratos con permitividad alta y delgados, todo esto para mejorar las características de la antena.

d) Alimentación por acoplamiento de apertura (Figura 1.1 c)

Este tipo de alimentación tiene un ancho de banda estrecho, su estructura consiste en dos sustratos divididos por un plano de masa, en donde se tiene una ranura rectangular en el plano de masa, que sirve para aislar la red de alimentación que se encuentra ubicada en la parte inferior.

Es importante tomar en cuenta para el diseño, un sustrato grueso con constante dieléctrica baja en el lado del radiador; y un sustrato delgado con constante dieléctrica alta en donde se encuentra la línea *microstrip*.

Para mejorar la estructura y características de la antena *patch* con alimentación por acoplamiento de apertura, se puede hacer variaciones en el ancho de la línea *microstrip* y variaciones de longitud y posición en la ranura.

1.3.3 POLARIZACIÓN DE ANTENAS *PATCH*

La polarización electromagnética indica la orientación del vector de campo eléctrico en una dirección determinada en un intervalo de tiempo. La variación de dirección y sentido del campo traza un lugar geométrico visto desde la antena en modo transmisión que es el que define el tipo de polarización.

Existen diferentes tipos de polarización los cuales son:

- Polarización lineal: cuando el lugar geométrico trazado en el tiempo es una recta. Ésta puede ser horizontal o vertical. Un ejemplo de polarización lineal causada por dos componentes de campo eléctrico ortogonales entre sí y con la misma fase se observa en la Figura 1.4.

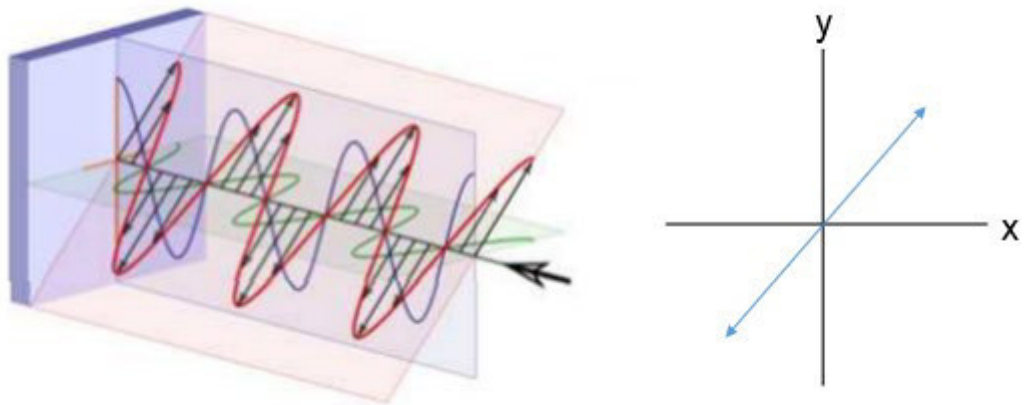


Figura 1.4 Polarización lineal de la onda electromagnética [7].

Toda antena *patch* que se alimente en su eje de simetría magnético (por medio de línea *microstrip*, por coaxial o por cualquier método que mantenga su eje de simetría) presenta polarización lineal. Otro ejemplo de antenas *patch* con polarización lineal se muestra en Figura 1.5, en la cual se observa un arreglo de antenas *patch* con única línea de alimentación y un divisor de potencia tipo *T Junction*.

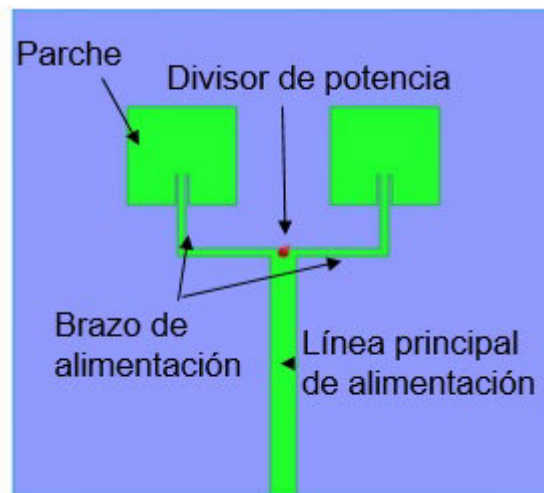


Figura 1.5 Ejemplo de polarización lineal en arreglo de antenas *patch* con alimentación mediante línea *microstrip* [8].

- Polarización circular: cuando el lugar geométrico trazado en el tiempo es una circunferencia. Esto ocurre cuando las componentes de campo se encuentran en cuadratura de fase y tienen igual amplitud. La polarización puede ser derecha o izquierda dependiendo del sentido de giro como se observa en la Figura 1.6.

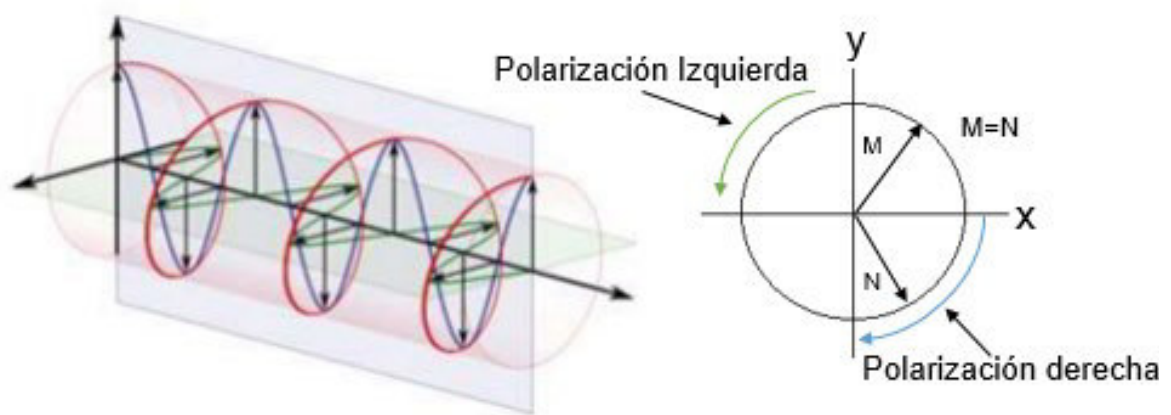


Figura 1.6 Polarización circular de la onda electromagnética [7].

Para que las antenas *patch* puedan tener polarización circular, se modifica el parche en sus esquinas o también se puede alimentar con dos puertos como se observa en la Figura 1.7.

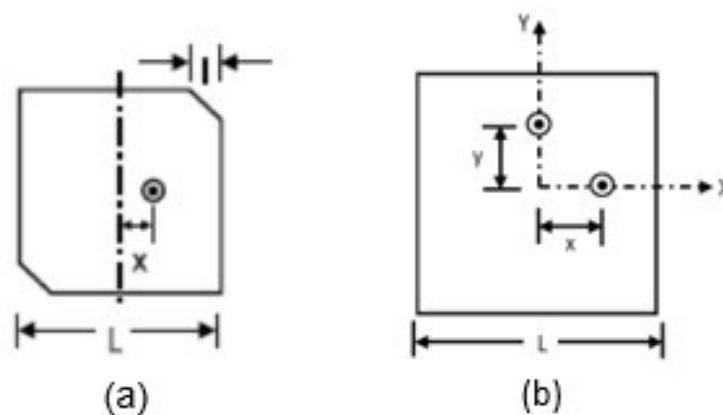


Figura 1.7 Ejemplos de estructuras de parche con polarización circular, (a) con modificación en sus bordes y (b) con alimentación con dos puertos [7].

- Polarización elíptica: el lugar geométrico que se traza sobre el plano en el tiempo es una elipse. El sentido de giro del vector de campo eléctrico denotará giro en sentido horario (*clockwise CW*) u anti-horario (*counter clockwise CCW*). Un ejemplo de polarización elíptica se observa en la Figura 1.8.

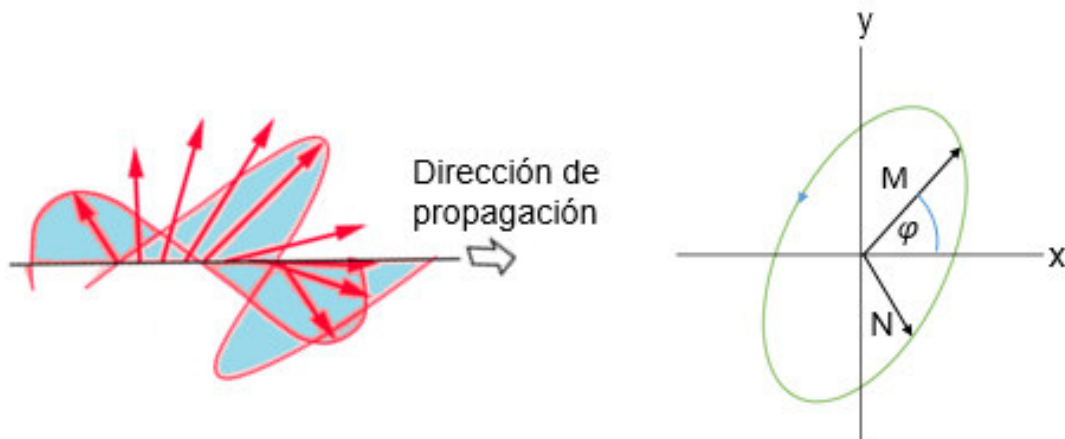


Figura 1.8 Polarización elíptica de la onda electromagnética.

1.3.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LAS ANTENAS *PATCH*

Para analizar las antenas *patch* existen diferentes métodos, como se indica en la Figura 1.9. Los más utilizados son: método de cavidad, de línea de transmisión y la onda completa, siendo el modelo de línea de transmisión el más fácil y el que brinda una buena estructura física a pesar de no ser tan preciso.

Modelo de línea de transmisión

El modelo de línea de transmisión es un modelo empírico fácil de realizar el cual consiste en analizar a la antena *patch* mediante una matriz de dos ranuras que radian, como se puede observar en la Figura 1.10. Las ranuras tienen un ancho W y una altura h separadas a una distancia L .

La antena tiene dimensiones finitas en los bordes y por consiguiente presenta componentes de campo eléctrico que no están confinadas en la estructura de la antena. Estos campos producen el “incremento” de la longitud eléctrica del parche por medio de las dos ranuras radiantes (*fringing effects* – efectos de borde). La cantidad de éstos depende de las dimensiones del parche y del espesor del sustrato.

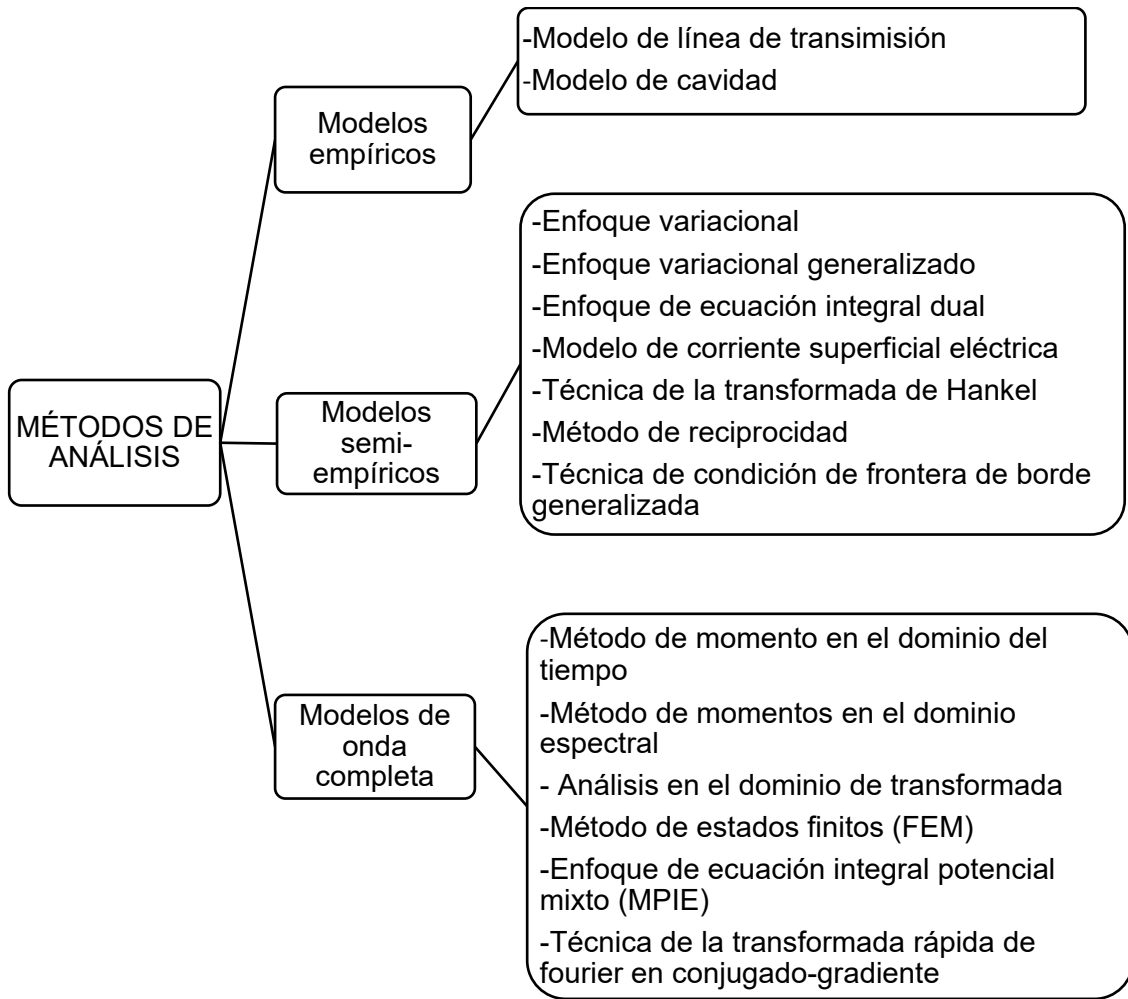


Figura 1.9 Métodos de análisis de las antenas *microstrip* [10].

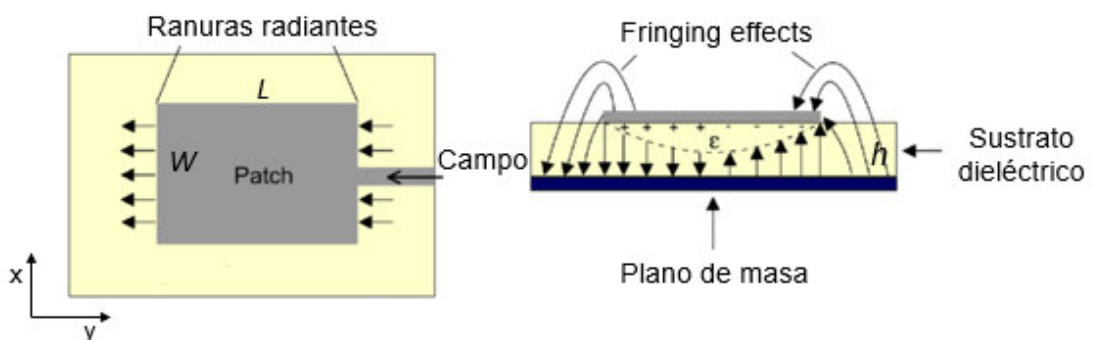


Figura 1.10 Ranuras radiantes y *fringing effects* (efectos de borde) de antena *patch*.

Los *fringing effects* tienen relación entre la longitud del parche y la altura del sustrato, cuando $L/h \gg 1$ son mínimos, pero influyen en la resonancia de la antena.

La ecuación (1.1) permite el cálculo de la permitividad eléctrica efectiva, la cual combina la permitividad del aire y del sustrato. En la expresión, h es el espesor del sustrato y W es el ancho del parche. La permitividad eléctrica efectiva se encuentra dentro del rango $1 < \epsilon_{\text{eff}} < \epsilon_r$.

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (1.1)$$

El modelo de línea de transmisión presenta buen comportamiento cuando la longitud es pequeña, pero cuando el ancho de la antena es mayor a su longitud la eficiencia disminuye de gran manera, todo esto se debe a los efectos de borde.

Diseño de la antena patch

En el diseño de la antena *patch* se debe considerar 3 parámetros importantes

- Frecuencia de operación (f)
- Permitividad eléctrica del sustrato (ϵ_r)
- Espesor del sustrato (h)

Luego de especificar los parámetros que se requieren para realizar el diseño de la antena *patch*, se procede a calcular las dimensiones de la antena que se observan en la Figura 1.11. En primer lugar, se calcula el ancho efectivo del parche por medio de la ecuación (1.2).

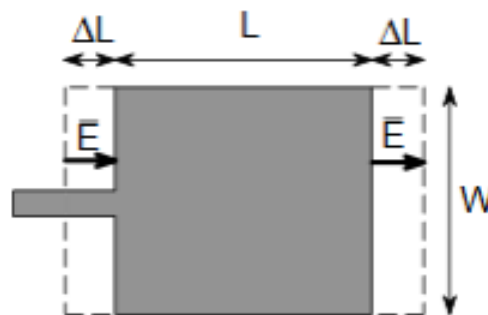


Figura 1.11 Dimensiones de diseño de la antena *patch* [11].

$$W = \frac{c_0}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1.2)$$

Se calcula la permitividad eléctrica con la ecuación (1.1), luego para calcular la longitud real de la antena *patch* se procede a calcular la extensión ΔL con la ecuación (1.3).

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (1.3)$$

Cuando se obtiene el valor de ΔL se calcula el valor de la longitud L de la antena *patch* utilizando la ecuación (1.4).

$$L = \frac{1}{2f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (1.4)$$

Impedancia de entrada

El modelo de línea de transmisión establece la impedancia de entrada mediante el circuito equivalente de la Figura 1.12, en donde se observa las configuraciones circuitales de las dos ranuras radiantes que se forman entre el parche y el plano de masa las cuales se encuentran separadas por una distancia L . Las ranuras presentan admitancias complejas, cada una de ellas representada por la ecuación (1.5) [6].

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \quad (1.5)$$

Dónde: G es conductancia y B susceptancia.

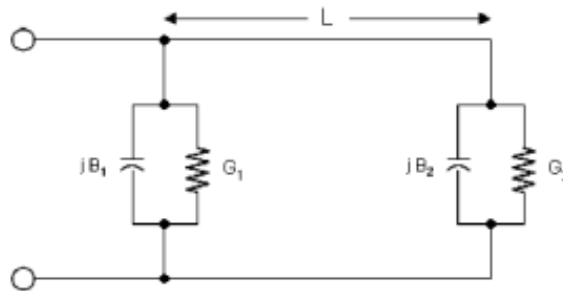


Figura 1.12 Circuito del modelo de línea de transmisión para las dos ranuras radiantes de la antena *patch*.

Si se cumple la condición:

$$\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{10}$$

Para calcular la conductancia y susceptancia se utilizan las ecuaciones (1.6) y (1.7), respectivamente.

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad (1.6)$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda} [1 - 0,636 \ln(k_0 h)] \quad (1.7)$$

Donde: $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$

En el circuito del modelo de línea de transmisión, se observa que las admitancias de las ranuras son iguales, y si la separación de las aperturas es la mitad de la longitud de onda efectiva, las susceptancias de la apertura se suman, por lo tanto se obtiene que $Y_T = Y_1 + Y_2 = G_1 + jB_1 + G_1 - jB_1 = 2G_1$.

En base al resultado obtenido, la resistencia de entrada de la antena está dada por la ecuación (1.8).

$$R_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad (1.8)$$

Utilizando el modelo de análisis de expansión se reduce a la ecuación (1.9).

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (1.9)$$

Cálculo del punto de alimentación

El punto de alimentación se encuentra situado en la mitad del ancho del parche W (eje de simetría magnético). A lo largo de la longitud L se situará el punto óptimo para y_0 , que se lo calcula con la ecuación (1.9), donde $R_{in}(y=y_0)$ es la impedancia característica del cable coaxial. $R_{in}(y=y_0)$ se denomina impedancia de transición que sirve para acoplar la impedancia del alimentador coaxial con la impedancia de entrada de la antena. La impedancia de transición se calcula con la ecuación (1.10) [12].

$$R_{in}(y = 0) = \sqrt{R_{in}(y = y_0) \times Z_\alpha} \quad (1.10)$$

Donde Z_α es la impedancia de la antena que se calcula con la ecuación (1.11), W y L son los valores de longitud del parche y ϵ_r es la constante dieléctrica para cualquier sustrato.

$$Z_\alpha = 90 \times \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \times \left(\frac{W}{L} \right)^2 \quad (1.11)$$

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en la elaboración del presente trabajo en donde se toma en cuenta la frecuencia de operación de 2,4 GHz y la alimentación de la antena *patch*.

2.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA ANTENA *PATCH*

Para el dimensionamiento de la antena *patch* primero se realiza la elección del sustrato a utilizar y el dimensionamiento del parche.

Para la elección del sustrato se realiza un análisis experimental en donde se diseña una antena *patch* con alimentación coaxial utilizando 3 tipos de sustrato con dos diferentes espesores. Seguidamente, se optimiza cada uno de estos diseños para obtener la frecuencia de resonancia adecuada para el diseño y así poder determinar cuál sustrato es el más óptimo para utilizar en la antena.

2.1.1 DISEÑO DE ANTENA *PATCH* CON CONECTOR COAXIAL

Para el diseño de la antena *patch* con alimentación coaxial se realiza el cálculo de los parámetros mostrados en la Figura 2.1. Este diseño ayuda a determinar cuál tipo de sustrato es el más óptimo para utilizar en el diseño de la antena con acoplamiento por ranura con una impedancia característica de 50Ω a una frecuencia de 2,4 GHz.

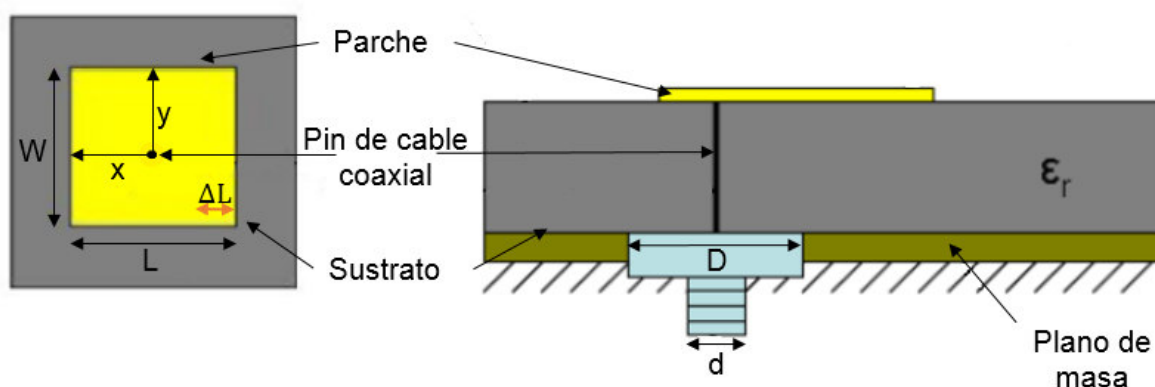


Figura 2.1 Parámetros de antena *patch* con alimentación por cable coaxial [13].

1. Se obtiene el ancho efectivo del parche utilizando una frecuencia de 2,4 GHz con la ecuación (1.2)
2. La permitividad eléctrica efectiva se obtiene con la ecuación (1.1), en donde h es el espesor del sustrato utilizado y W el ancho efectivo calculado en el paso 1.

3. Se calcula la extensión de la longitud ΔL utilizando la fórmula indicada en la ecuación (1.3).
4. Con el valor obtenido en el paso 2 se procede a calcular la longitud L del parche, con la ecuación (1.4).
5. Para el cable coaxial se utiliza un conector SMA (*Sub-miniature version A*) el cual presenta una impedancia característica de 50Ω con operación hasta 18 GHz.
6. Con la ecuación (1.9) se calcula el punto de alimentación, reemplazando los valores calculados con las ecuaciones (1.10) y (1.11)

$$50 = 164,384 \times \cos^2 \left(\frac{\pi}{40,495} y_0 \right)$$

$$y_0 = 12,717 \text{ mm}$$

7. Finalmente se calcula el tamaño del plano de masa con las ecuaciones (2.1) y (2.2), es importante aclarar que el tamaño del plano de masa está directamente relacionado con el espesor del sustrato ya que la radiación de la antena se genera por el campo entre el borde del parche y el plano de masa [14].

$$L_G = 6h + L \tag{2.1}$$

$$W_G = 6h + W \tag{2.2}$$

2.1.2 DISEÑO CON SUSTRATO DUROID 5880

Sustrato de tipo compuesto que tiene una tangente de pérdidas de 0,0009, que está compuesto por microfibras orientadas al azar dando como resultado una singular uniformidad, permitiendo un gran rango de frecuencia, al igual que presenta gran resistencia a solventes y reactivos. Sus propiedades se muestran en la Tabla 2.1 [15].

Tabla 2.1 Propiedades del sustrato Duroid 5880 [15].

Propiedades	Duroid 5880
Constante dieléctrica	2,2
Espesores de sustrato [mm]	1,575;3,175
Conductividad térmica [W/m/K]	0,2
Densidad [gm/cm ³]	2,2
Absorción de humedad [%]	0,02

Características

- Pérdida eléctrica mínima para material de *PTFE* reforzado

- Baja absorción de humedad
- Isotrópico
- Propiedades eléctricas uniformes en un rango amplio de frecuencia

Aplicaciones

- Antenas de banda ancha de aerolíneas comerciales
- Circuitos de microondas y circuitos *stripline*
- Aplicaciones de ondas milimétricas
- Sistemas militares de radar
- Sistemas guía de misiles
- Antenas de radio digital punto a punto

Simulación de la antena diseñada

La Figura 2.2 muestra la estructura de la antena modelada en la herramienta CST Studio Suite, con las dimensiones calculadas en la Tabla 2.2 siguiendo el procedimiento de la sección 2.1.1, para h_1 y h_2 .

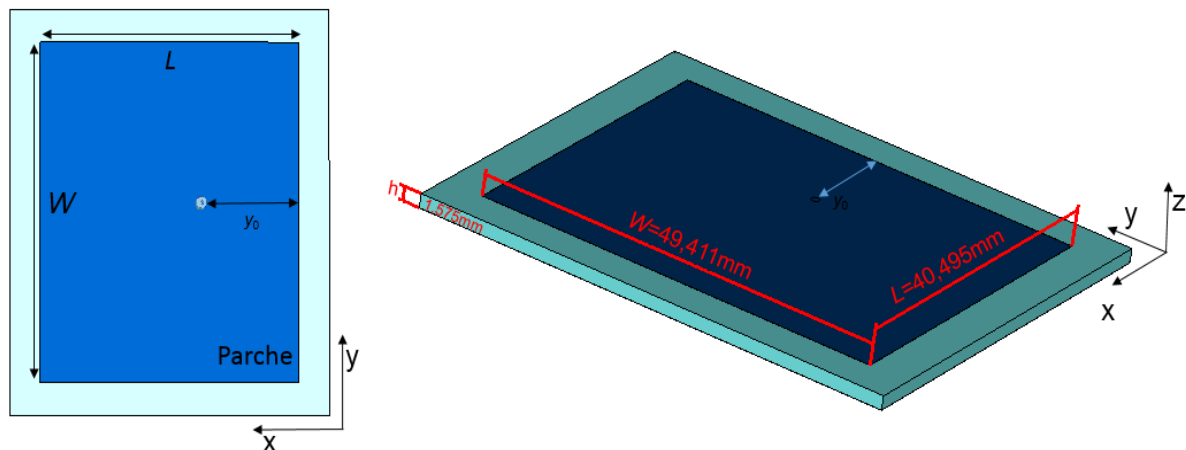


Figura 2.2 Antena *patch* con alimentación coaxial modelada en CST Studio Suite con sustrato Duroid 5880 ($h = 1,575$ mm), vista superior y vista tridimensional.

En la Tabla 2.2 se observan los valores calculados siguiendo los pasos descritos en la sección 2.1.1 utilizando una frecuencia de operación de 2,4 GHz y sustrato Duroid 5880 para un $h_1 = 1,575$ mm y $h_2 = 3,175$ mm.

Tabla 2.2 Dimensiones calculadas para una antena *patch* con alimentación por cable coaxial utilizando sustrato Duroid 5880 ($\epsilon_r = 2,2$).

Descripción	Parámetros	Unidad	$h_1 = 1,575 \text{ mm}$	$h_2 = 3,175 \text{ mm}$
Ancho del <i>patch</i>	W	mm	49,411	49,411
Permitividad efectiva	ϵ_{eff}	-	2,11	2,051
Extensión de la longitud L	ΔL	mm	0,821	1,659
Longitud del <i>patch</i>	L	mm	40,495	46,959
Posición del conector coaxial	y_0	mm	12,717	13,974
Longitud del plano de masa	L_G	mm	49,945	66,009
Ancho del plano de masa	W_G	mm	58,861	68,461

En la Tabla 2.3 se encuentran los valores que se modifican para obtener los resultados de la Figura 2.3. Al variar la posición y_0 mejora el acoplamiento de la antena, obteniéndose un S_{11} para h_1 de $-22,384 \text{ dB}$ y para h_2 de $-20,329 \text{ dB}$, para mejorar su frecuencia de resonancia se modifica la longitud L del parche hasta tener una resonancia a $2,4 \text{ GHz}$.

Tabla 2.3 Valores obtenidos al optimizar la antena *patch* con alimentación por cable coaxial con sustrato Duroid 5880 en CST Studio Suite.

Descripción	Parámetros	Unidad	$h_1 = 1,575 \text{ mm}$	$h_2 = 3,175 \text{ mm}$
Longitud del <i>patch</i>	L	mm	40,095	39,009
Posición del conector coaxial	y_0	mm	13,717	9,974
Ancho de banda en $S_{11} = -10 \text{ dB}$	BW	MHz	31,5	86,6

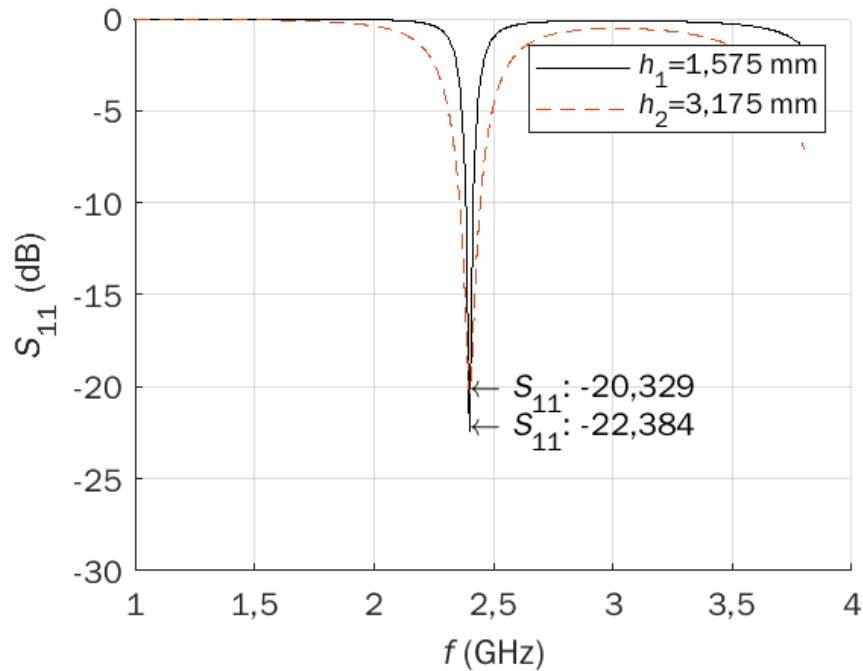


Figura 2.3 Parámetros S_{11} obtenidos mediante la optimización de la antena *patch* con alimentación por cable coaxial utilizando sustrato Duroid 5880 en CST Studio Suite para $h_1 = 1,575$ mm y $h_2 = 3,175$ mm.

2.1.3 DISEÑO CON SUSTRATO TMM10

Las propiedades eléctricas (ver Tabla 2.4) y mecánicas de los sustratos TMM10 combinan muchos de los beneficios de los sustratos *PTFE* tanto cerámicos como tradicionales. Los sustratos TMM10 tienen un coeficiente térmico y baja constante dieléctrica, típicamente menos de 30 ppm°C. Además, la conductividad térmica de los laminados TMM10 es aproximadamente el doble que la de los sustratos tradicionales de *PTFE* y cerámica, lo que facilita la eliminación del calor y no se ablanden ante éste [16].

Tabla 2.4 Propiedades de sustrato TMM10.

Propiedades	TMM10
Constante dieléctrica	9,2
Espesor [mm]	1,524 - 3,75
Conductividad térmica [W/m/K]	0,76
Densidad [gm/cm ³]	-
Absorción de humedad [%]	0,09 – 0,2

Características

- Resiste a la afluencia y el flujo en frío.
- Coeficiente de expansión térmica adaptado al cobre.

- Reduce el daño al material durante los procesos de fabricación y ensamblaje.
- Puede reemplazar los sustratos de dióxido de aluminio.

Aplicaciones

- Circuitos de RF y microondas.
- Amplificadores y combinadores de potencia.
- Filtros y acopladores.
- Sistemas de comunicación por satélite.
- Antenas de sistemas de posicionamiento global.
- Antenas *patch*.
- Lentes y polarizadores dieléctricos.
- Probadores de chips.

Simulación de la antena diseñada

En la Figura 2.4 se observa la antena modelada en la herramienta de CST Studio Suite para un sustrato TMM10 de espesor 1,524 mm, con los valores obtenidos en la Tabla 2.5, estos se calcularon mediante los pasos de la sección 2.1.1.

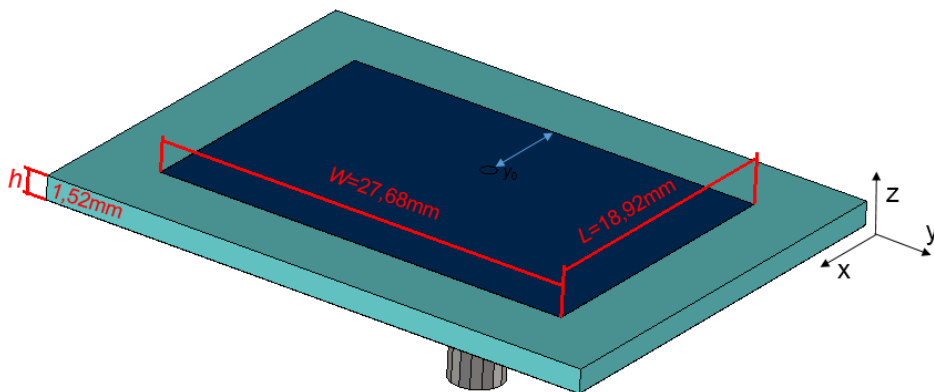


Figura 2.4 Antena modelada en CST Studio Suite con las dimensiones de la Tabla 2.6 para $h = 1,524$ mm con sustrato TMM10.

Al realizar la simulación se obtuvo cierto desfase por lo que se mejoró esto mediante parametrización, variando los parámetros de la Tabla 2.6, al variar se obtuvo para el diseño con espesor h_1 un $S_{11} = -14,004$ dB, mientras que para el espesor h_2 se obtuvo un $S_{11} = -24,69$ dB como se observa en Figura 2.5.

Tabla 2.5 Dimensiones calculadas para una antena *patch* con alimentación con coaxial utilizando sustrato TMM10 ($\epsilon_r = 9,2$).

Descripción	Parámetros	Unidad	$h_1 = 1,524 \text{ mm}$	$h_2 = 3,175 \text{ mm}$
Ancho del <i>patch</i>	W	mm	27,675	27,675
Permitividad efectiva	ϵ_{eff}	-	8,281	7,76
Extensión de la longitud L	ΔL	mm	0,821	1,3262
Longitud del <i>patch</i>	L	mm	20,318	19,7838
Posición del alimentador coaxial	y_0	mm	7,4076	7,2505
Longitud del plano de masa	L_G	mm	29,462	38,8338
Ancho del plano de masa	W_G	mm	36,819	46,725

Tabla 2.6 Valores obtenidos al optimizar la antena *patch* con alimentación con cable coaxial con sustrato TMM10 en CST Studio Suite.

Descripción	Parámetros	Unidad	$h_1=1,524 \text{ mm}$	$h_2=3,175 \text{ mm}$
Longitud del <i>patch</i>	L	mm	18,925	17,6938
Posición del alimentador coaxial	y_0	mm	6,4076	5,2505
Ancho de banda en $S_{11} = -10 \text{ dB}$	BW	MHz	16,1	62,5

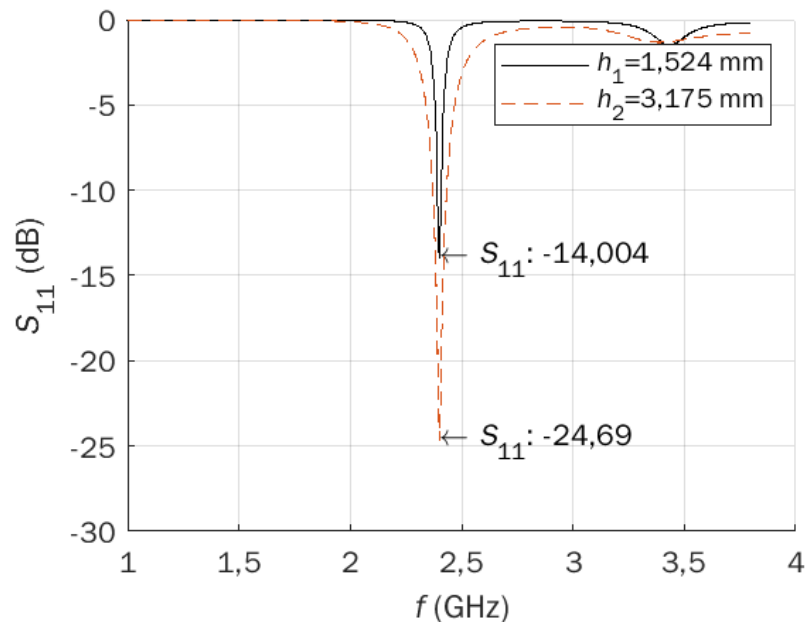


Figura 2.5 Parámetros S_{11} obtenidos mediante simulación con $h_1 = 1,524 \text{ mm}$ y $h_2 = 3,175 \text{ mm}$ para sustrato TMM10.

2.1.4 DISEÑO CON SUSTRATO FR4

El sustrato FR4 es un material de resina compuesta, utilizado en PCBs (*Printed Circuit Boards*), que se compone de capas de fibra de vidrio impregnadas con resina epóxica y otros materiales, los cuales le proveen de propiedades, eléctricas mecánicas y térmicas [17].

Tabla 2.7 Propiedades de sustrato FR4.

Propiedades	FR4
Constante dieléctrica	4,7
Espesor [mm]	1,5 - 3,2
Conductividad térmica [W/m/K]	0,29
Densidad [gm/cm ³]	1,8 - 1,95
Absorción de humedad [%]	0,1

Características

- Resiste al fuego.
- Buena relación resistencia-peso.
- No absorbe el agua.
- Soporta altas cargas mecánicas.
- Buena capacidad de aislamiento en medio seco o húmedo.
- Las propiedades eléctricas y mecánicas son buenas para tarjetas multicapa.

Aplicaciones

- Se utiliza en la producción de tarjetas electrónicas.
- Creación de prototipos electrónicos.
- Transformadores.
- Relés de sistemas eléctricos.

Simulación de la antena diseñada

En la Figura 2.6 se observa la antena modelada en CST Studio Suite con las dimensiones de la Tabla 2.8, para un tamaño de grosor de sustrato de 3,2 mm.

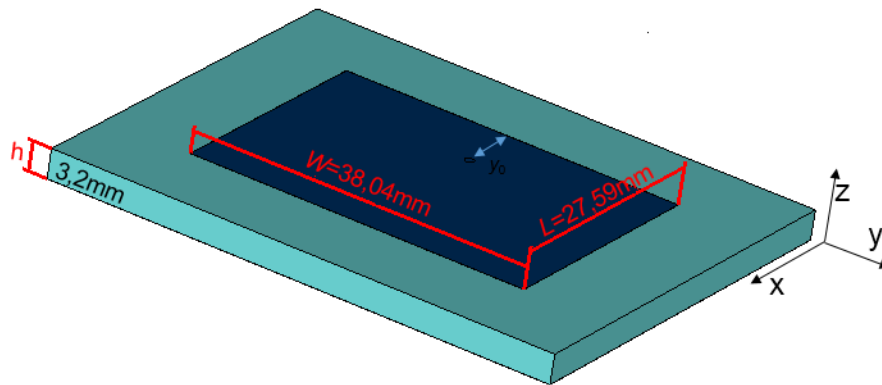


Figura 2.6 Antena modelada en CST Studio Suite con las dimensiones de la Tabla 2.8 para $h = 3,2$ mm con sustrato TMM10.

En la Tabla 2.8, se observan los valores calculados mediante los pasos de la sección 2.1.1, para dos diferentes tamaños de espesor los cuales son $h_1 = 1,5$ mm y $h_2 = 3,2$ mm, al obtener los parámetros S_{11} al simular en CST Studio Suite se procede a optimizarlos para obtener los mejores resultados a 2,4 GHz.

Tabla 2.8 Dimensiones para una antena *patch* con alimentación con cable coaxial utilizando sustrato FR4 calculados.

Descripción	Parámetros	Unidad	$h_1=1,5$ mm	$h_2=3,2$ mm
Ancho del <i>patch</i>	W	mm	38,036	38,036
Permitividad efectiva	ϵ_{eff}	-	4,1	3,899
Extensión de longitud L	ΔL	mm	0,821	1,326
Longitud del <i>patch</i>	L	mm	29,48	28,739
Posición del conector coaxial	y_0	mm	9,788	9,542
Longitud del plano de masa	L_G	mm	38,48	47,9398
Ancho del plano de masa	W_G	mm	47,036	57,236

En la Tabla 2.9, se observan los parámetros optimizados para lograr el mejor acoplamiento posible a una frecuencia de resonancia de 2,4 GHz, cuyos parámetros obtenidos se observan en la Figura 2.7 para h_1 se obtuvo un valor de $S_{11} = -34,232$ dB un ancho de banda de 65,3 MHz, mientras que para h_2 , se obtuvo un valor de $S_{11} = -15,539$ dB y un ancho de banda de 89,5 MHz.

Tabla 2.9 Valores obtenidos al optimizar la antena *patch* con alimentación con cable coaxial con sustrato FR4 en CST Studio Suite.

Descripción	Parámetros	Unidad	$h_1=1,5$ mm	$h_2=3,2$ mm
Longitud del <i>patch</i>	L	mm	28,88	27,589
Posición del alimentador coaxial	y_0	mm	6,788	7,542
Ancho de banda en $S_{11}=-10$ dB	BW	MHz	65,3	89,5

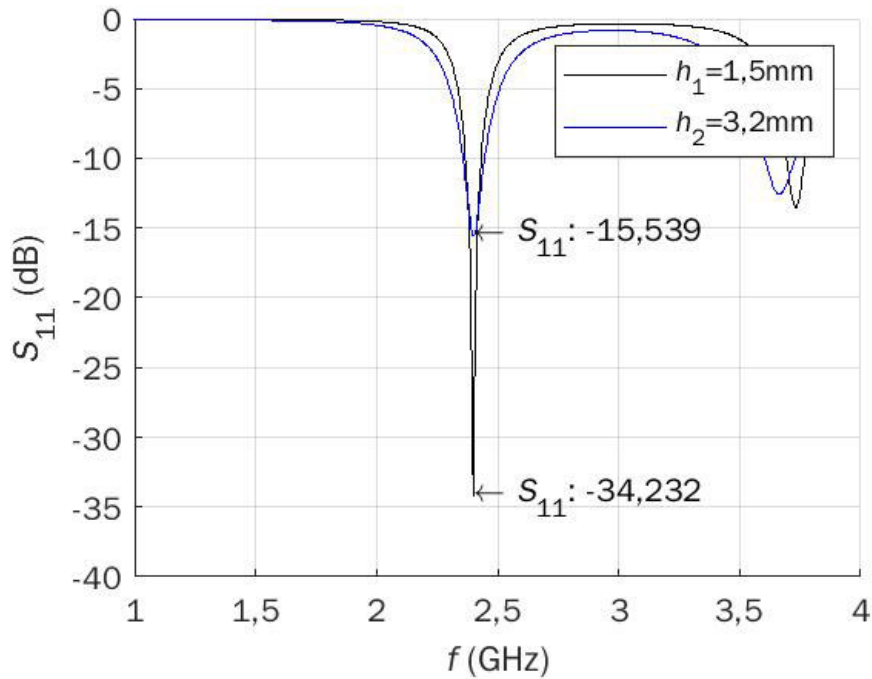


Figura 2.7 (a) Antena modelada en CST Studio Suite con las dimensiones de la Tabla 2.6 para $h = 1,524$ mm (b) Parámetros S_{11} obtenidos mediante simulación con $h_1 = 1,524$ mm y $h_2 = 3,2$ mm.

Al realizar la simulación se obtuvo cierto desfase por lo que se mejoró esto mediante parametrización, variando los parámetros de la Tabla 2.6. Para el diseño con espesor h_1 se obtuvo un valor de $S_{11} = -34,232$ dB, mientras que para el espesor h_2 se obtuvo un valor de $-S_{11} = -15,539$ dB como se observa en la Figura 2.7.

2.1.5 ELECCIÓN DE SUSTRATO

La antena *patch* con acoplamiento por ranura utiliza dos tipos de sustratos. Es importante tomar en cuenta que el sustrato de baja constante dieléctrica aumenta el ancho de banda de la antena, y el espesor del sustrato interfiere en el acoplamiento de la energía desde la línea de alimentación *microstrip* al radiador de la antena [18].

El sustrato en donde se encuentra la alimentación afecta al ancho de banda que puede obtener la antena. Se necesita entonces un material con constante dieléctrica alta y que su espesor sea menor al sustrato que contiene el parche, debido a que el campo electromagnético generado por la capa de alimentación está limitado dentro de ella misma, siendo así que las capas de sustrato no son mutuamente excluyentes [18].

Sustrato entre el plano de masa y la estructura del parche

En base los diseños realizados de las antenas *patch* con alimentación con cable coaxial simulados en CST Studio Suite, la Tabla 2.10 muestra un resumen de los resultados obtenidos en términos de adaptación (S_{11}) y ancho de banda.

Tabla 2.10 Características obtenidas mediante simulaciones en CST Studio Suite.

Sustrato	Duroid 5880		TMM10		FR4	
	1,575	3,175	1,524	3,175	1,5	3,2
Esesor mm	1,575	3,175	1,524	3,175	1,5	3,2
S_{11} dB	-22,384	-20,329	-14,007	-24,69	-34,23	-15,53
Ancho de banda MHz $S_{11} = -10$ dB	31,5	86,6	16,1	62,5	19,4	89,5

Se observa que el sustrato Duroid 5880 con un espesor de 3,175 mm es el más adecuado para la realización de la antena ya que presenta un ancho de banda de 86,6 MHz y una adaptación de la frecuencia de operación dada por el parámetro S_{11} de - 20,329 dB.

Sustrato de la alimentación de la línea microstrip

El sustrato elegido para el diseño de la antena *patch* con acoplamiento por ranura en la parte donde se encuentra la línea *microstrip* es el sustrato TMM10, con una constante dieléctrica de 9,2 y un espesor de 1,524 mm. Se elige este sustrato ya que, como se mencionó anteriormente, es necesario utilizar un sustrato con una constante dieléctrica elevada y espesor delgado. Esto se debe a que el campo electromagnético se encuentra limitado por la línea de alimentación.

2.1.6 DISEÑO DE LA ANTENA *PATCH* CON ALIMENTACIÓN CON ACOPLAMIENTO POR RANURA

En la Figura 2.8 se observa la antena *patch* con acoplamiento por apertura con cada uno de sus parámetros. Para realizar el diseño de la antena se utilizan 2 tipos de sustrato, tomando en cuenta que se debe usar sustratos con diferente permitividad ya que esto ayuda a mejorar las características de acoplamiento y la eficiencia de la antena.

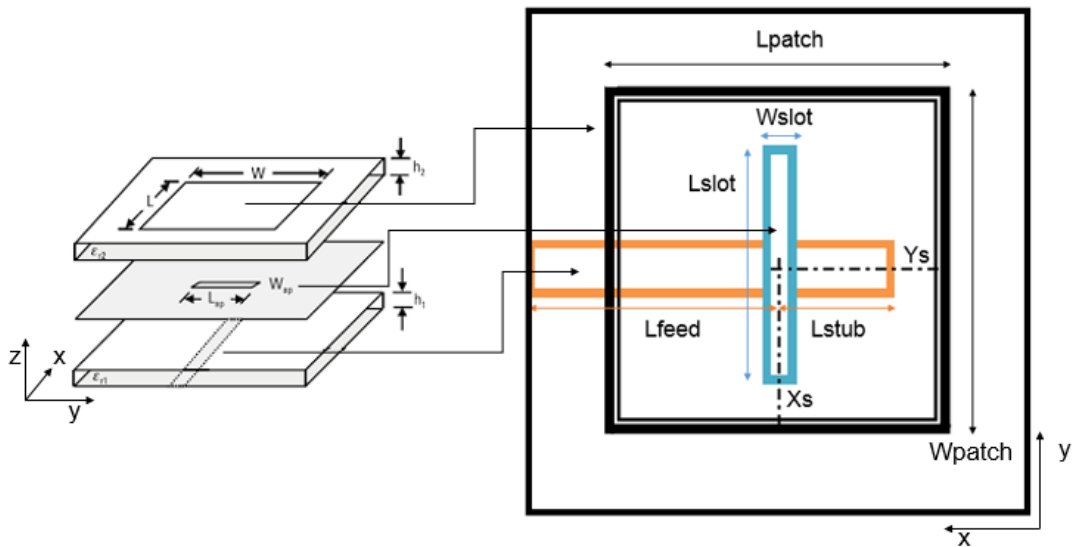


Figura 2.8 Parámetros de una antena *patch* con acoplamiento por apertura [3].

Para el diseño de la antena *patch* con acoplamiento por apertura se dimensionará los siguientes parámetros: la línea *microstrip*, dimensionamiento del parche y por último el dimensionamiento del *slot* o ranura.

Dimensionamiento de la línea de alimentación

La Figura 2.9 muestra la línea de alimentación que tiene que encontrarse en ángulo recto con el centro de la ranura para obtener máximo acoplamiento. La línea tiene un terminal de circuito abierto llamado *stub* que se extiende desde el centro de la ranura hasta la terminación de la línea de alimentación abierta, para sintonizar el exceso de reactancia en el acoplamiento de la ranura. Su longitud es generalmente menor a $\lambda/4$ [18].

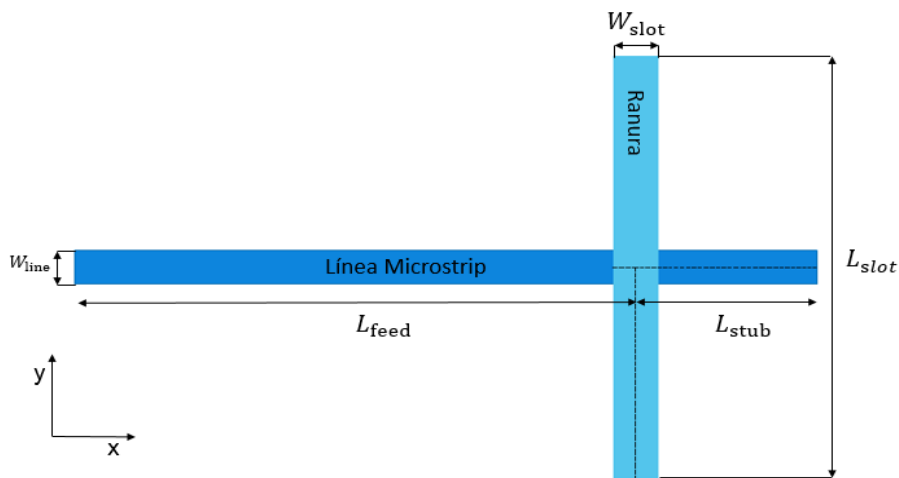


Figura 2.9 Línea de alimentación en la antena *patch* con acoplamiento por ranura [3]

L_{feed} es la longitud entre la apertura y el puerto de alimentación a la misma. La impedancia de la apertura Z_{slot} y la impedancia de entrada vista en el puerto Z_{in} se calculada mediante la ecuación (2.3).

$$Z_{\text{in}} = Z_C \frac{Z_{\text{slot}} + jZ_C \tan(\beta L_{\text{feed}})}{Z_C + jZ_{\text{slot}} \tan(\beta L_{\text{feed}})} \quad (2.3)$$

Donde:

Z_C : Impedancia característica

Z_{slot} : Impedancia de la apertura

$\beta = 2\pi / \lambda_0$: Constante de propagación

λ_0 : Longitud de onda en el espacio libre

Cuando $Z_C = Z_{\text{slot}}$, independiente de la longitud de la línea Z_{in} , ésta siempre será igual a Z_{slot} y Z_{in} será periódica en $\lambda/2$. Por lo tanto, la impedancia de entrada en la alimentación de la Figura 2.7 será siempre la impedancia de la ranura. Si L_{feed} que se calcula con la ecuación (2.4), es $\lambda/2$ entonces impedancia será de 50 Ω .

$$L_{\text{feed}} = \frac{\lambda}{2} = \frac{c_0}{2 \times f \times \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.4)$$

Para que la antena presente una resonancia a 2,4 GHz es necesario que L_{stub} sea igual a $\lambda/4$. Esto es por la característica de la línea de transmisión que indica que a un cuarto de longitud de onda las impedancias se invierten. El circuito abierto sería un cortocircuito, lo que resulta en voltaje igual a 0 y corriente máxima, lo que no contribuye a la impedancia.

$$L_{\text{stub}} = \frac{\lambda}{4} = 10,859 \text{ mm}$$

El ancho de la línea de alimentación W_{ine} se calcula mediante la herramienta *Impedance Calculation* de CST Studio Suite utilizando los datos indicados en la Figura 2.10, para una impedancia de 50 Ω , lo que da como resultado $W_{\text{ine}} = 1,5569 \text{ mm}$.

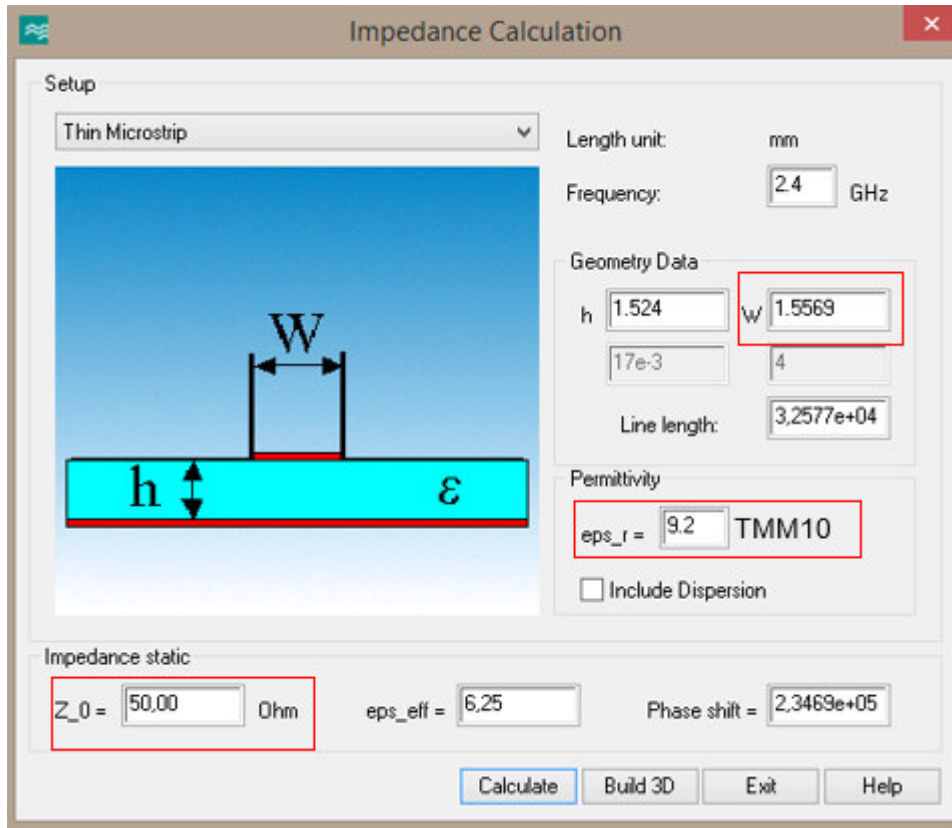


Figura 2.10 Calculo de W_{line} con CST Studio Suite.

Dimensionamiento de la patch

La parte superior de la antena se encuentra conformada por el parche que determina la frecuencia de resonancia, impedancia, ancho de banda y la radiación respectivamente. La longitud L controla la frecuencia de resonancia de la antena. El ancho W tiene repercusión en la respuesta de impedancia y acoplamiento de la antena.

Para su dimensionamiento se ha tomado el sustrato Duroid 5880 con un espesor de 3,175 mm, obteniendo las siguientes dimensiones:

$$L_{patch} = 40,095 \text{ mm}$$

$$W_{patch} = 49,411 \text{ mm}$$

Dimensionamiento de la ranura

La ranura o *slot* determina el acoplamiento entre la línea de alimentación y el parche. La ranura más utilizada es de forma rectangular ya que es la que ayuda de mejor manera al acoplamiento que otras ranuras y su elaboración es la más sencilla de realizar. Los tipos de ranuras que son comúnmente utilizados se pueden observar en la Figura 2.11 [19].

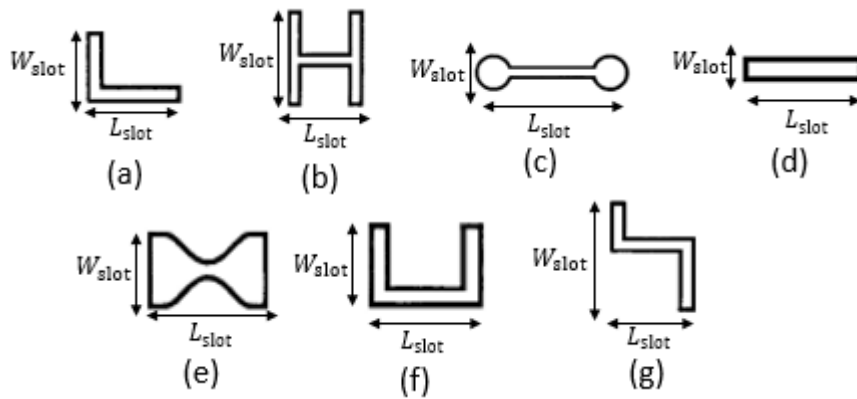


Figura 2.11 Formas de ranura para antena *patch* con acoplamiento por ranura: (a) en forma de L, (b) forma de H, (c) *Dog bone*, (d) rectangular, (e) *Bowtie*, (f) forma de U, (g) Forma de S [18].

Las dimensiones de la ranura también pueden afectar la resistencia de entrada y la frecuencia de resonancia. Cuando se aumenta la longitud de la ranura, también aumenta la resistencia de entrada, sin embargo afecta inversamente a la frecuencia de resonancia, es decir, que la frecuencia de resonancia disminuye al aumentar la longitud de la ranura [3].

Un problema ocurre cuando se desea aumentar el acoplamiento entre la ranura y la alimentación ya que aumenta la radiación entre la ranura y la alimentación, por ende, estas antenas tienen una buena relación delante-atrás.

Se utiliza la relación de onda estacionaria *VSWR* y una variable independiente *n* para poder facilitar el dimensionamiento de la ranura [3].

Para obtener un *VSWR* < 2, se tiene la ecuación (2.5)

$$L_{\text{slot}} = W_{\text{feed}} + n \times h \quad (2.5)$$

Dónde: *h* es el grosor del sustrato TMM10.

El ancho de la ranura denominado *W_slot* afecta al nivel de acoplamiento desde la línea de alimentación hasta el parche, generalmente la relación entre la longitud de la ranura *L_slot* y el ancho de la ranura se mantiene típicamente como 10:1, como se observa en la ecuación (2.6) [19].

$$W_{\text{slot}} = \frac{L_{\text{slot}}}{10} \quad (2.6)$$

Dimensiones de los sustratos de la antena

Las dimensiones acotadas de la antena son las dimensiones del plano de masa y los sustratos de la antena los cuales afectan en el rendimiento de la antena en las regiones

más cercanas a la antena. Estas dimensiones son largo L_g y ancho W_g que se calculan con la ecuación (2.7) y (2.8) [18].

$$L_g = 6h + W \quad (2.7)$$

$$W_g = 6h + L \quad (2.8)$$

Donde:

h : es el espesor del sustrato (Duroid 5880)

W : ancho del parche

L : largo del parche

Entonces las dimensiones obtenidas para el plano de masa es $L_g = 59,145$ mm y $W_g = 68,461$ mm.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones realizadas en CST Studio Suite, utilizando el diseño de la antena realizado en el Capítulo 2, variando los parámetros de la ranura de la antena, primero en función de un parámetro n ya establecido en el Capítulo 2 y después variando la posición de la ranura para determinar, que posición y dimensión son los adecuados para el funcionamiento de la antena.

En la Figura 3.1 se muestra la estructura de la antena diseñada, con los valores que se mantendrán fijos los cuales se observan en la Tabla 3.1.

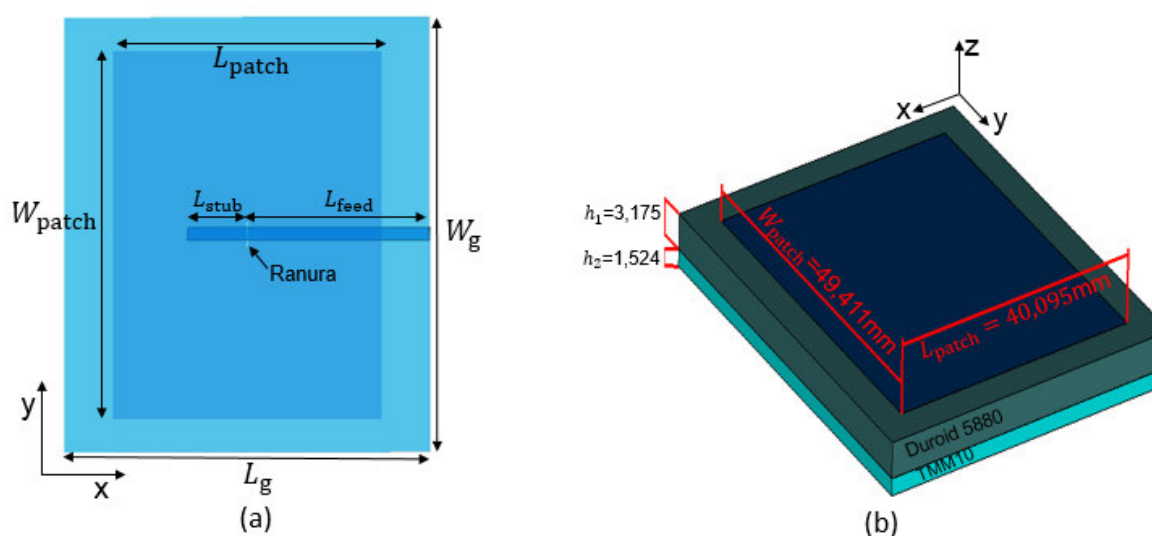


Figura 3.1 Estructura de la antena *patch* con acoplamiento por ranura con dimensiones fijas en CST Studio Suite, (a) vista frontal, (b) vista lateral.

Tabla 3.1 Parámetros de la antena *patch* con acoplamiento por apertura.

Parámetros	Dimensiones mm
Espesor sustrato Duroid 5880 (h_1)	3,175
Espesor sustrato TMM10 (h_2)	1,524
Ancho de <i>patch</i> (W_{patch})	49,411
Longitud de <i>patch</i> (L_{patch})	40,095
Ancho de sustratos y plano de masa (W_g)	58,555
Longitud de sustratos y plano de masa (L_g)	49,239
Ancho de la línea <i>microstrip</i> (W_{line})	1,5569
Longitud de la línea <i>microstrip</i> (L_{line})	32,5779

3.1 VARIACIÓN DEL PARÁMETRO n EN LA RANURA

En CST Studio Suite se procede a realizar la simulación de la antena diseñada con las variaciones de n que toma un valor de $1 \leq n \leq 10$. Los valores de ancho y longitud de la

ranura se muestran en la Tabla 3.2, los cuales se calcularon en base a las ecuaciones (2.5) y (2.6) vistas en la sección 2.1.6. En la Figura 3.2 se observa la estructura inferior de la antena, y el plano de masa el cual se encuentra acoplado con la línea *microstrip*.

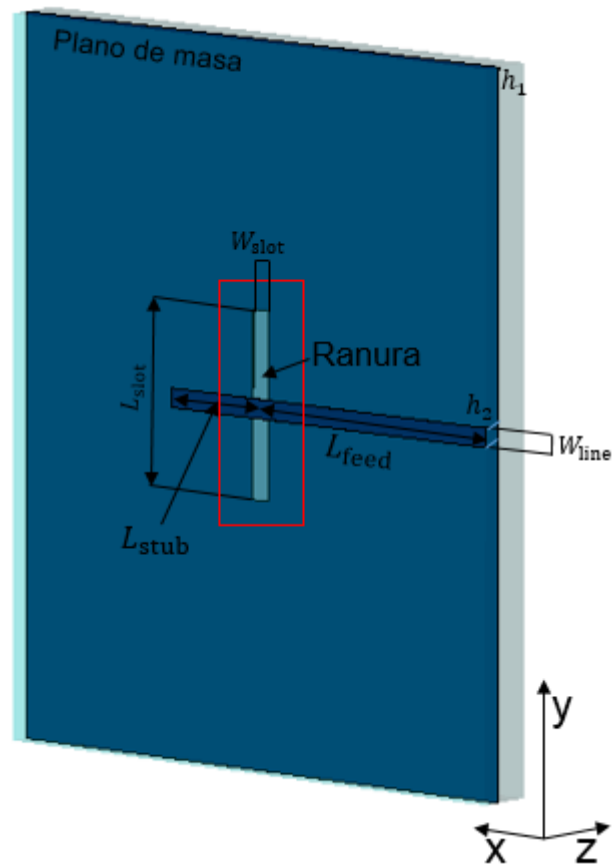


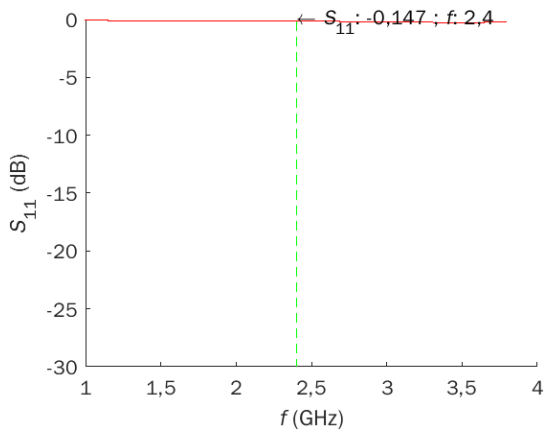
Figura 3.2 Estructura de la antena *patch* acoplada por ranura vista inferior.

Tabla 3.2 Parámetros de la ranura en función de n .

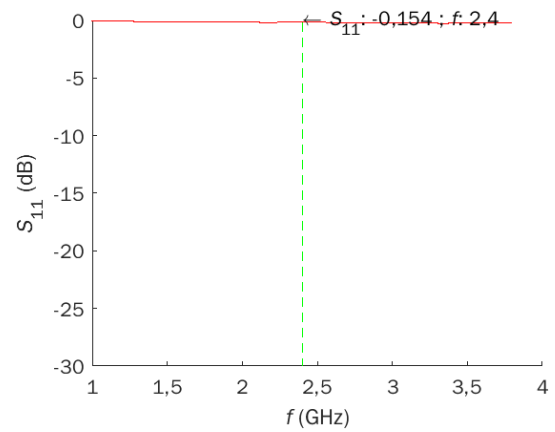
n	L_{slot} mm	W_{slot} mm
1	3,0809	0,30809
2	4,6049	0,46049
3	6,1289	0,61289
4	7,6529	0,76529
5	9,1769	0,91769
6	10,7009	0,107009
7	12,2249	1,22249
8	13,7489	1,37489
9	15,2729	1,52729
10	16,7969	1.67969

Parámetros S_{11}

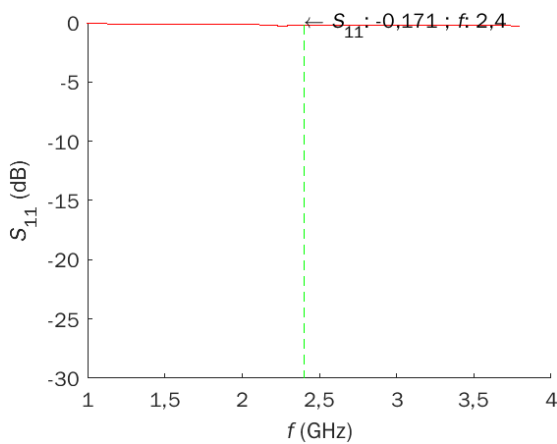
Para la simulación de la antena diseñada se varia el valor de n el cual modifica directamente las dimensiones de la ranura, en la Figura 3.3 (a) se muestran los parámetros S_{11} obtenidos para una frecuencia de 2,4 GHz y $n = 1$ se obtiene un valor de $-0,147$ dB, lo que indica que la antena se encuentra totalmente desacoplada. En las gráficas se puede observar que mientras las dimensiones de la ranura aumentan la antena poco a poco se va acoplando, llegando a un valor máximo de $-27,017$ dB, como se observa en la Figura 3.3 (i), a una frecuencia de 2,201 GHz, para un valor de $n = 9$ siendo este el valor más óptimo obtenido con las dimensiones diseñadas. Cabe recalcar que no se obtiene una frecuencia de 2,4 GHz, ya que al variar las dimensiones de la ranura esta tiene un desplazamiento de 199 MHz, esto se puede optimizar disminuyendo la longitud del *patch*.



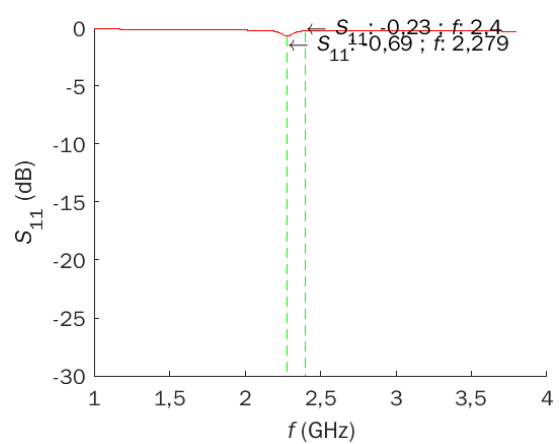
(a)



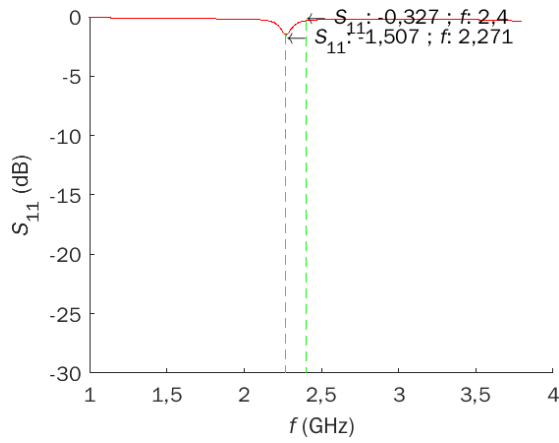
(b)



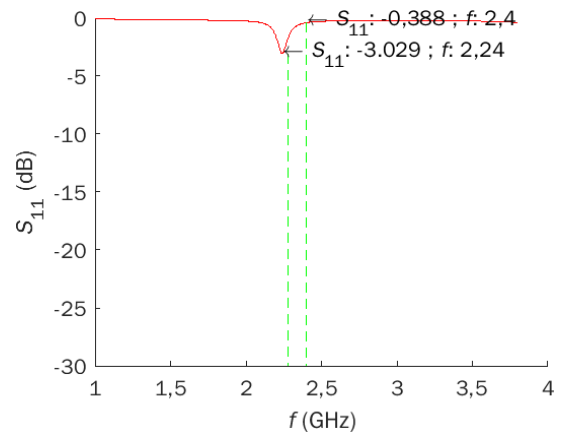
(c)



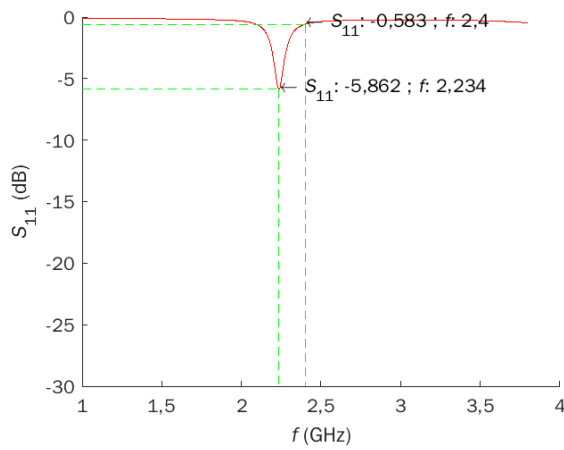
(d)



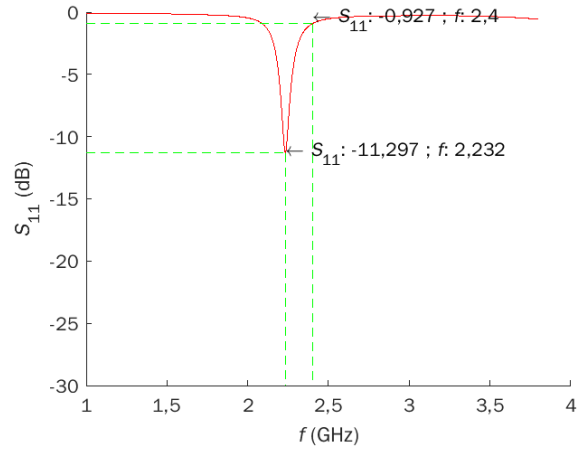
(e)



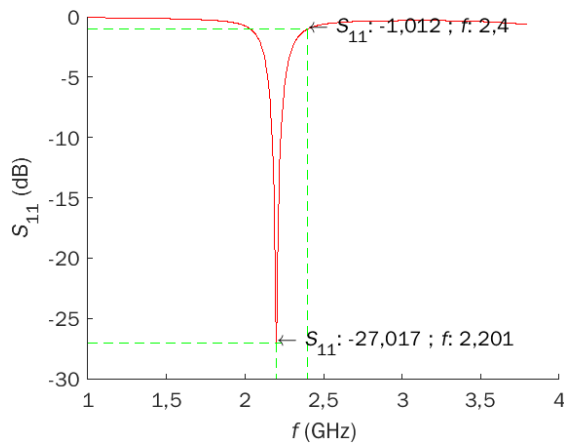
(f)



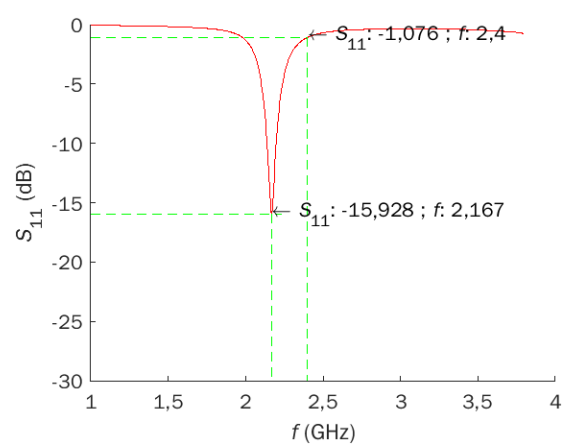
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 3.3 Parámetros S_{11} simulado en CST Studio Suite para (a) $n = 1$, (b) $n = 2$, (c) $n = 3$, (d) $n = 4$, (e) $n = 5$, (f) $n = 6$, (g) $n = 7$, (h) $n = 8$, (i) $n = 9$, (j) $n = 10$.

En la Figura 3.4, se observa el comportamiento de la antenna cuando se varía n tomando un valor desde 1 hasta 20, cuando n toma un valor muy pequeño como 1, la antenna se encuentra desacoplada totalmente, mientras que si aumenta su valor la antenna va teniendo un valor óptimo para su funcionamiento, en nuestro caso el mejor valor para n es 9, dando un resultado de $-27,017$ dB, para una frecuencia de 2,201 GHz, si n sigue aumentando su valor la antenna va perdiendo su eficiencia.

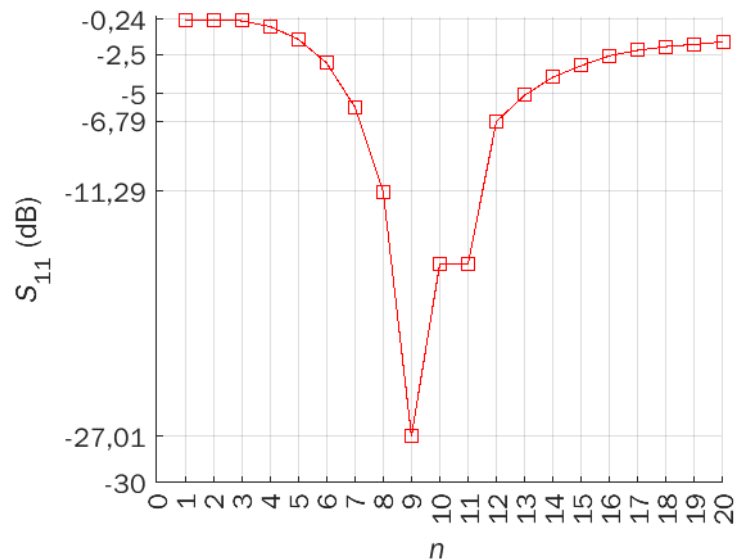


Figura 3.4 Factor n vs S_{11} cuando n toma valores de 1 a 20

Frecuencia

En la Figura 3.5 se observa el comportamiento de la frecuencia de trabajo de la antenna al variar el parámetro n obteniendo valores que van desde 2,1004 GHz hasta 3,472 GHz. Se puede observar que mientras más pequeñas son las dimensiones de la ranura la frecuencia aumenta exponencialmente, cuando n toma valores desde 3 hasta 20 la frecuencia se mantiene en un rango de frecuencia adecuado.

Ancho de Banda BW

El ancho de banda de la antenna obtenido a -10 dB, se encuentra en el rango de $8 \leq n \leq 10$, obteniendo para $n = 8$ un ancho de banda de 19,03 MHz, para $n = 9$ un ancho de banda de 55,59 MHz y para $n = 10$ un ancho de banda de 59,25 MHz, para los valores fuera de este rango no se obtuvo un ancho de banda ya que la antenna se desacopla, es decir si la ranura es muy pequeña la antenna no trabaja eficientemente, al igual que si es muy grande un valor óptimo para su funcionamiento es $n = 9$ que como se observa en la Tabla 3.2 toma valores de $L_{\text{slot}} = 15,2729$ mm y $W_{\text{slot}} = 1,52729$ mm.

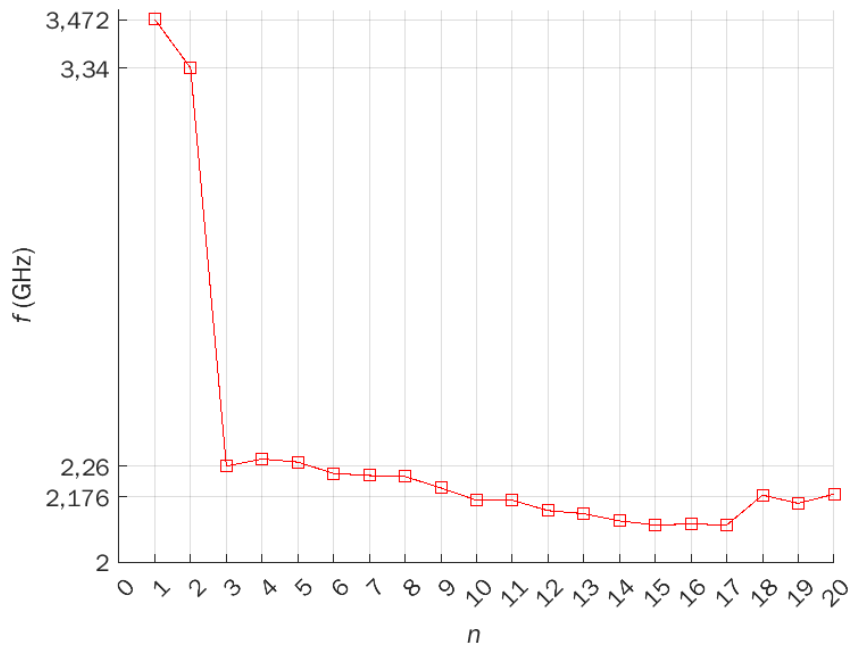


Figura 3.5 Factor n vs f .

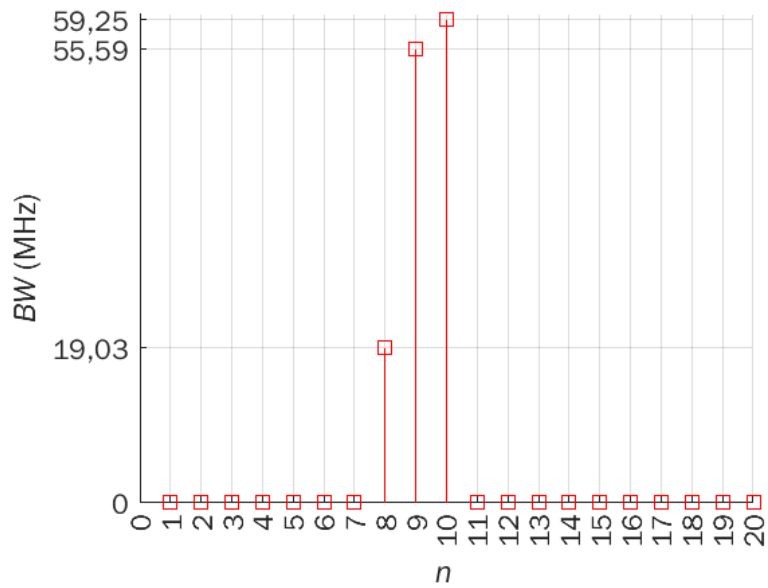
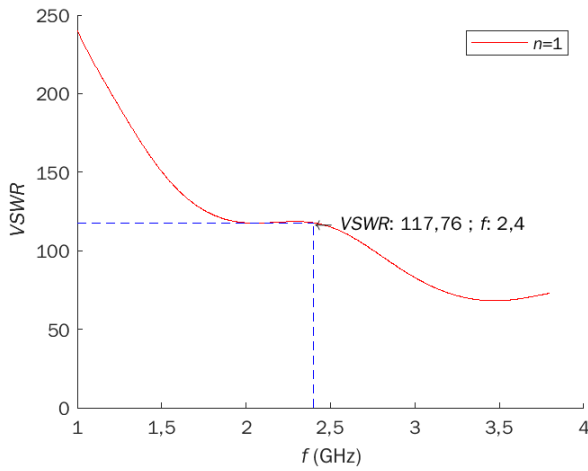


Figura 3.6 Ancho de Banda (BW) a 10 dB cuando n toma valores de 1 a 20.

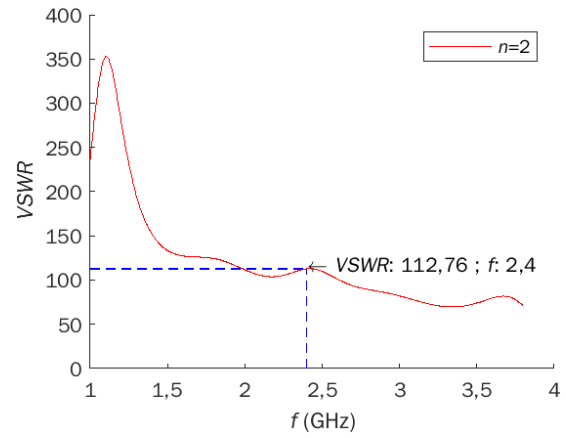
VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

En la Figura 3.7 se muestra el $VSWR$, obtenido cuando n toma un valor de $1 \leq n \leq 10$, se puede observar el comportamiento de la antena conforme se aumenta el tamaño de n , el $VSWR$ va disminuyendo hasta obtener un valor mínimo de $VSWR$ de 1,093 cuando $n = 9$ como se observa en la Figura 3.7 (i), mientras que el valor más alto se obtiene cuando

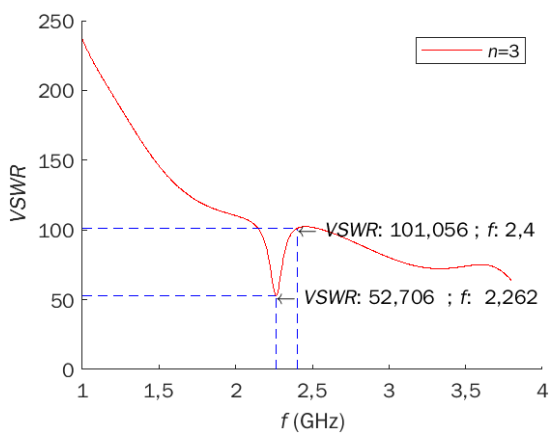
$n = 1$, con un valor de *VSWR* igual a 117,76 a una frecuencia de 2,4 GHz como se puede apreciar en la Figura 3.7 a.



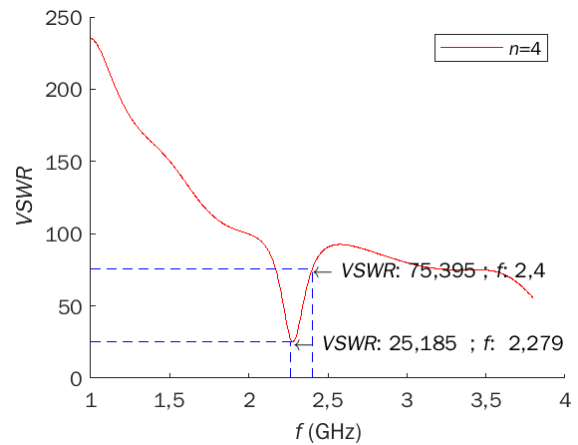
(a)



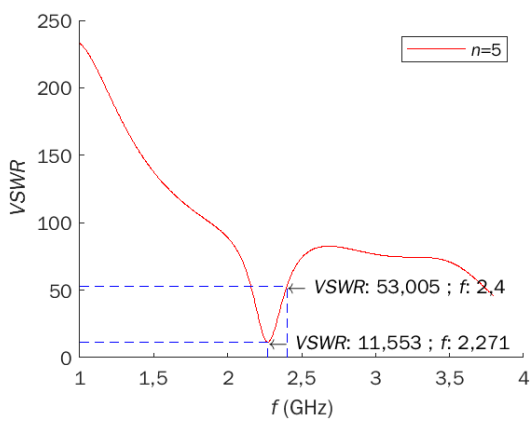
(b)



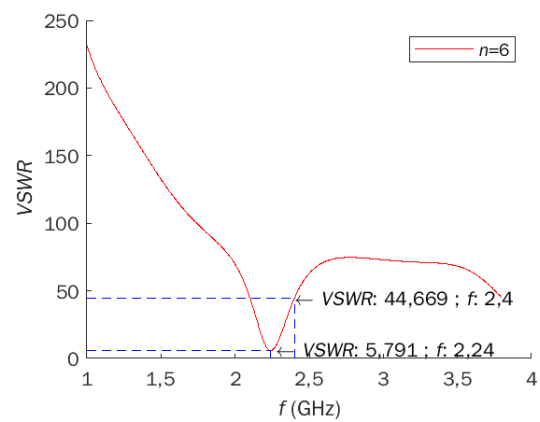
(c)



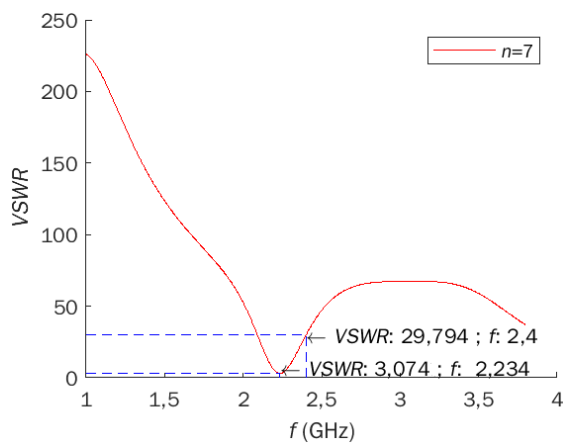
(d)



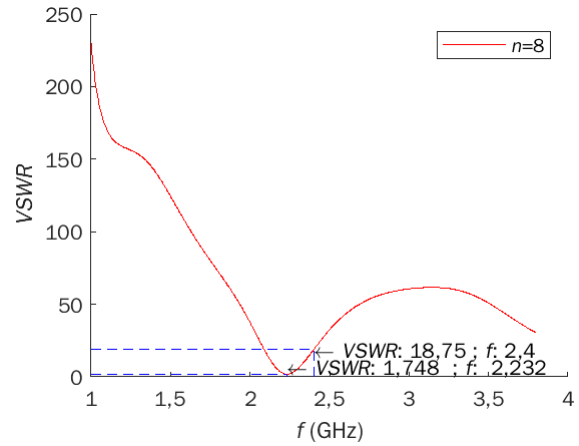
(e)



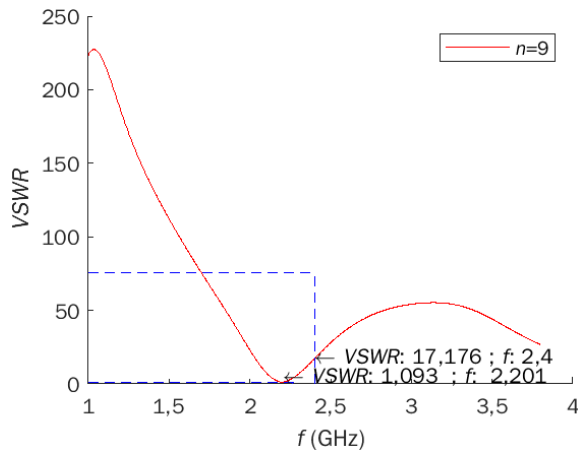
(f)



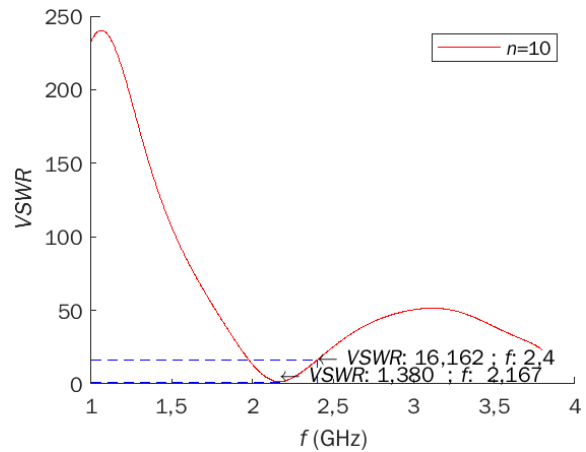
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 3.7 VSWR cuando (a) $n = 1$, (b) $n = 2$, (c) $n = 3$, (d) $n = 4$, (e) $n = 5$, (f) $n = 6$, (g) $n = 7$, (h) $n = 8$, (i) $n = 9$, (j) $n = 10$.

En la Figura 3.8 se observa más a detalle como infiere el tamaño de la ranura para VSWR cuando n toma valores $1 \leq n \leq 20$, los valores tomados en la Figura 3.8 son los valores más óptimos que se obtiene en la simulación, aunque estos no se encuentran a 2,4 GHz, indicando que la antena no es eficiente como un radiador, en la gráfica se aprecia que en efecto el menor valor que toma es cuando $n = 9$ mientras que el mayor valor se encuentra cuando $n = 1$.

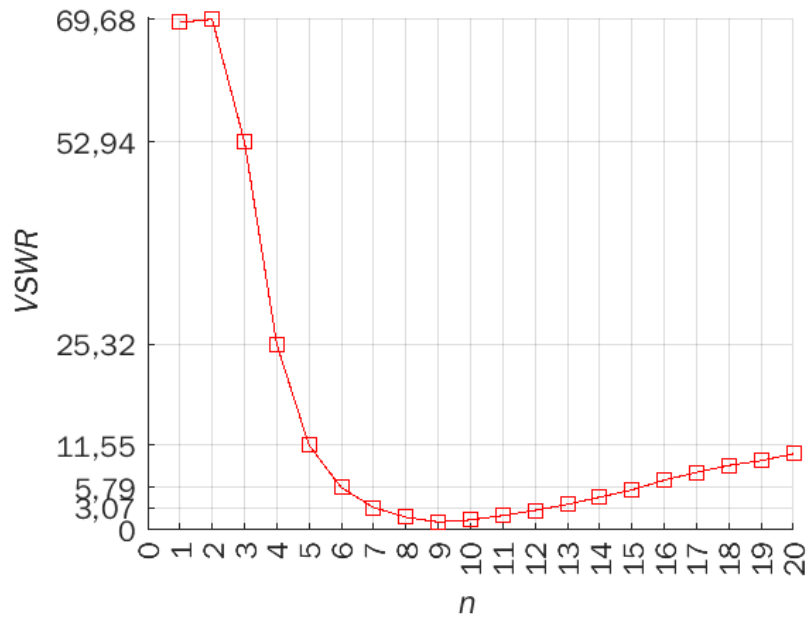
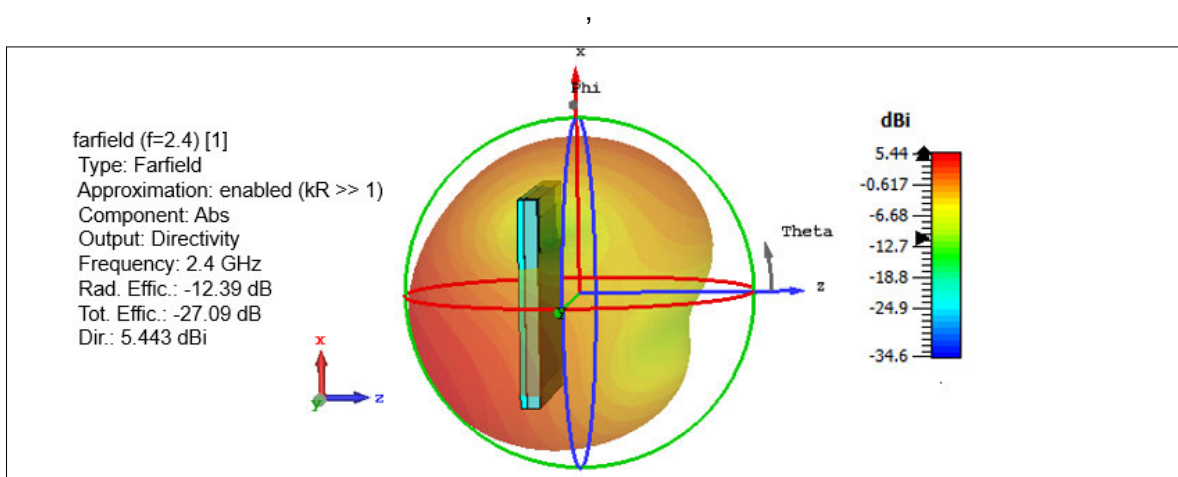


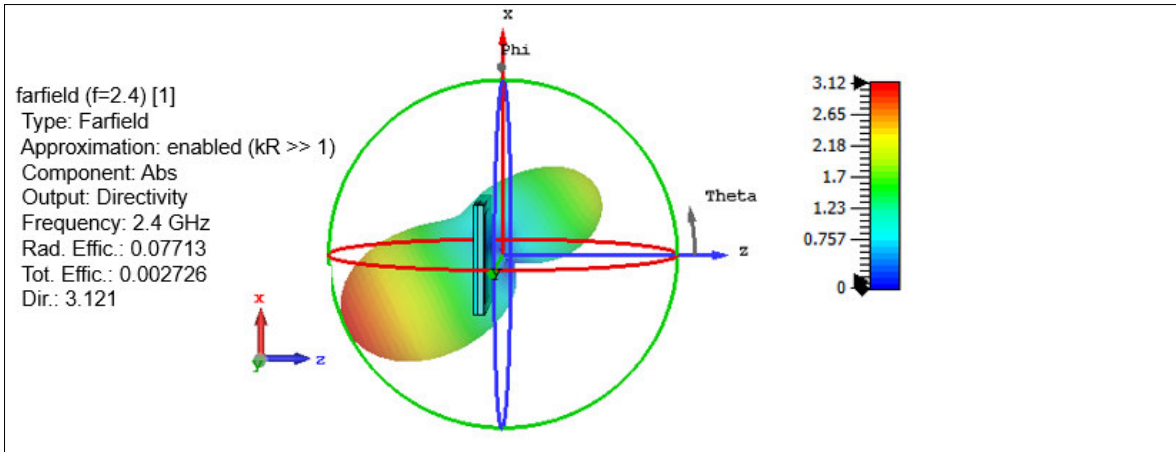
Figura 3.8 VSWR vs Factor n

Directividad

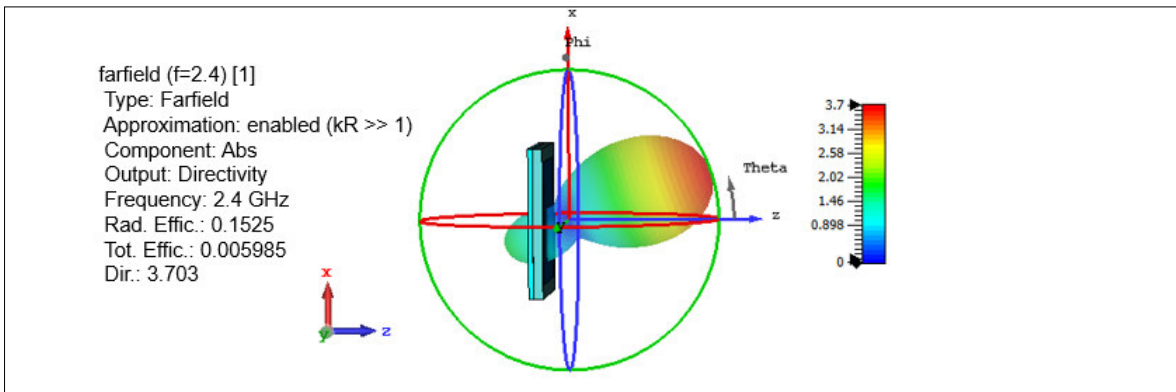
En la Figura 3.9 se observan las gráficas de directividad de la antena diseñada que se obtuvieron en CST Studio Suite, para $n = 1$ la antena radia en todas las direcciones como se observa en Figura 3.9 (a) obteniendo una directividad de 5,443 dBi, mientras que aumenta el tamaño de la ranura la antena va siendo más directiva, cuando $n=2$ se observan dos lóbulos ver Figura 3.9 (b) con una directividad de 3,121 dBi. Desde $n \geq 4$ la antena es directiva obteniendo una directividad de 5,269 dBi cuando n toma un valor de 10.



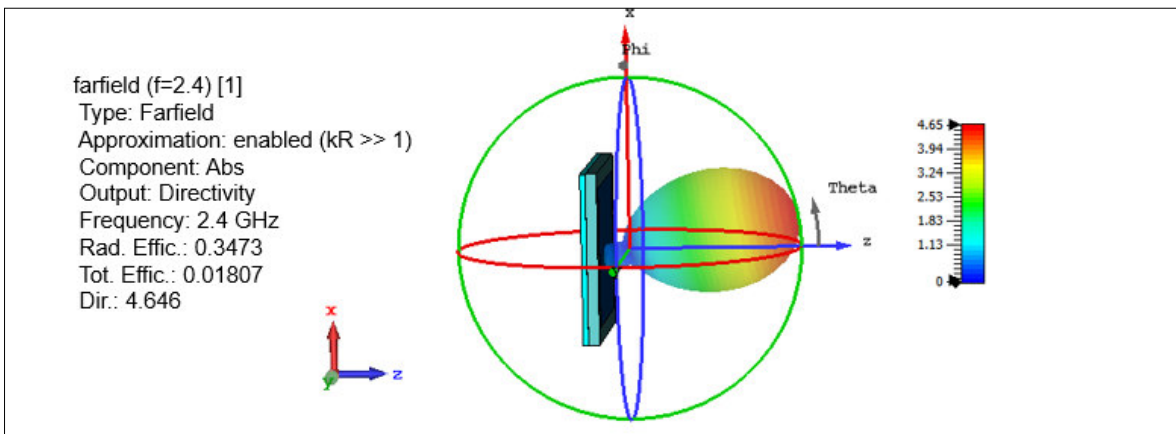
(a)



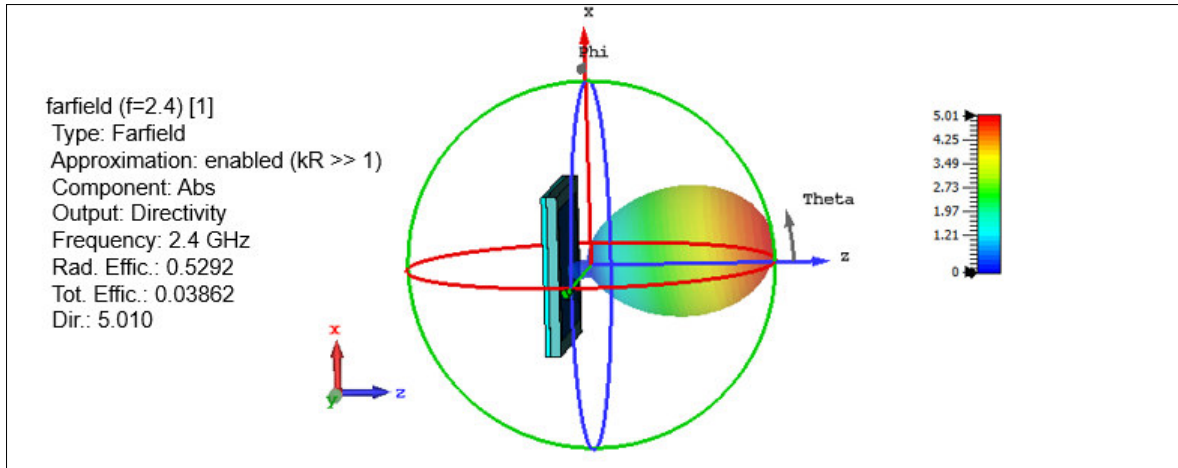
(b)



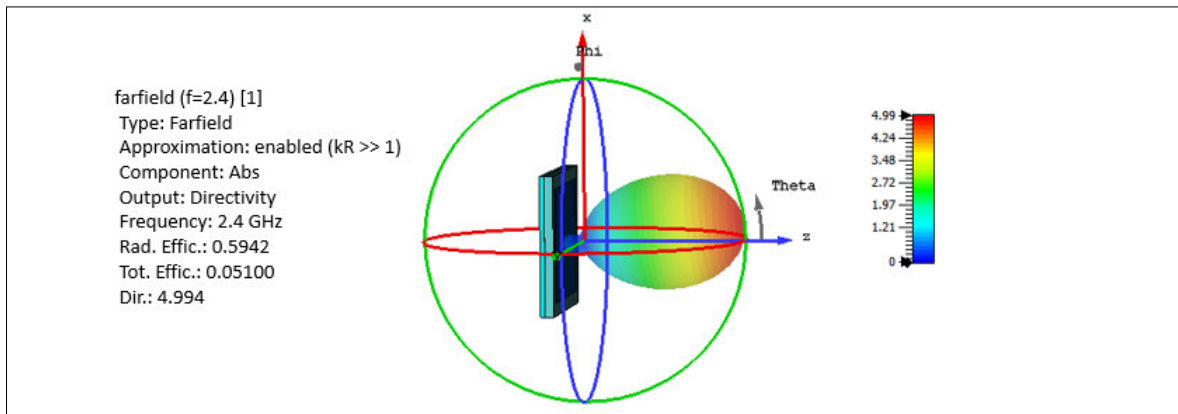
(c)



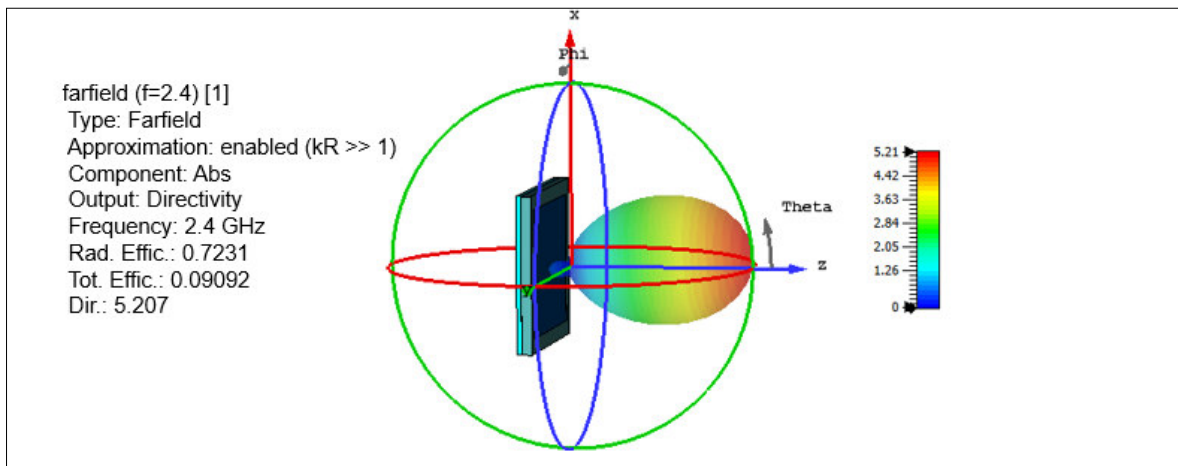
(d)



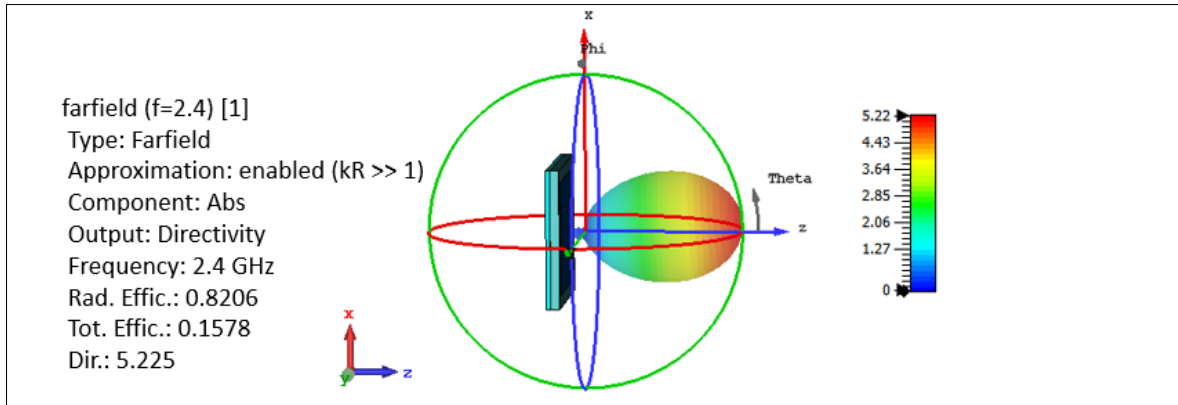
(e)



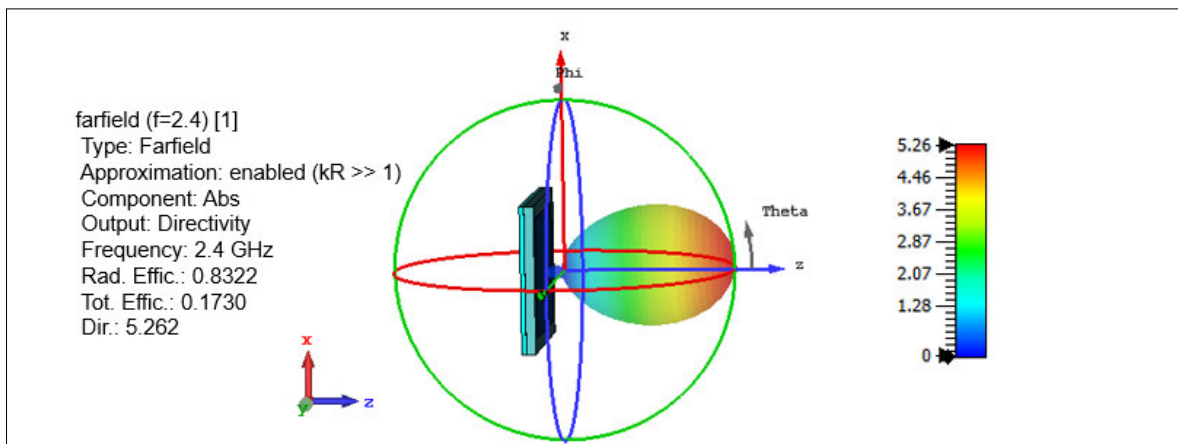
(f)



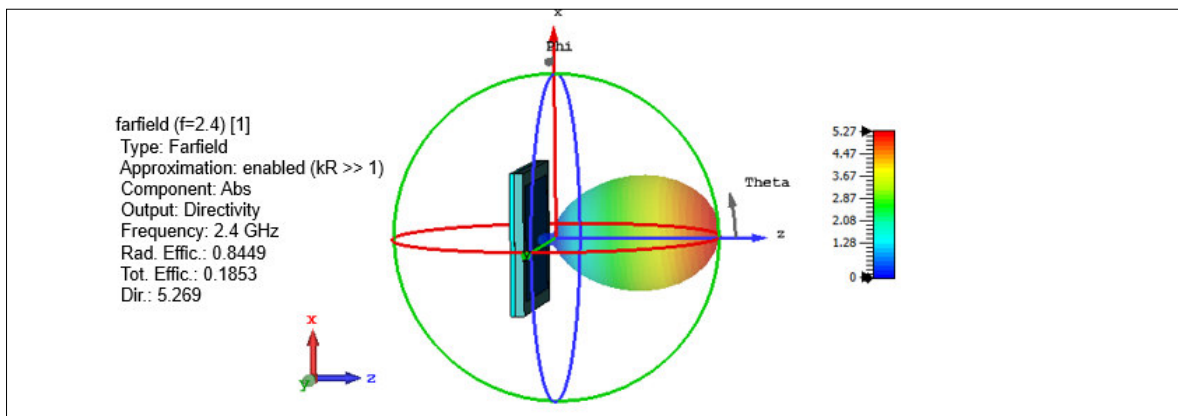
(g)



(h)



(i)



(j)

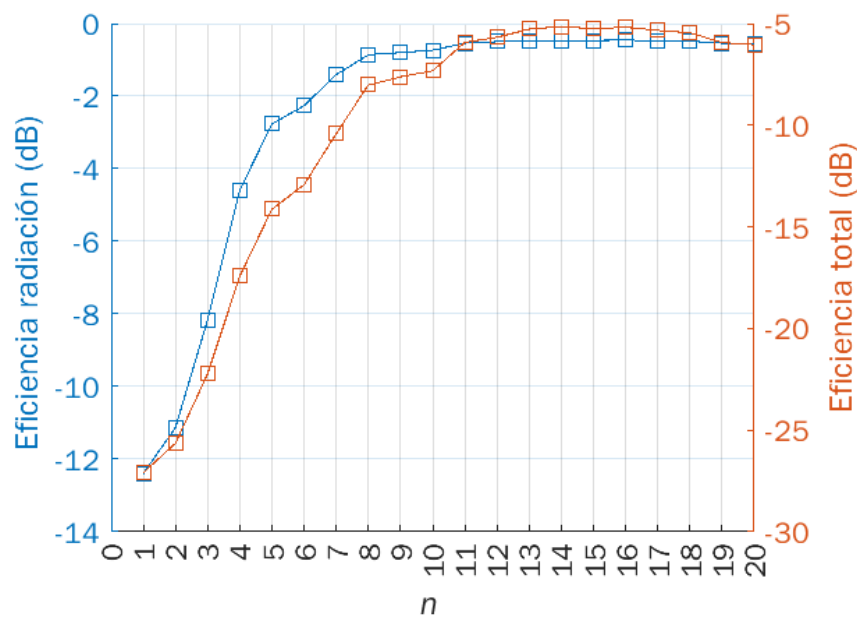
Figura 3.9 Directividad de la antena cuando (a) $n = 1$, (b) $n = 2$, (c) $n = 3$, (d) $n = 4$, (e) $n = 5$, (f) $n = 6$, (g) $n = 7$, (h) $n = 8$, (i) $n = 9$, (j) $n = 10$.

Características de la antena

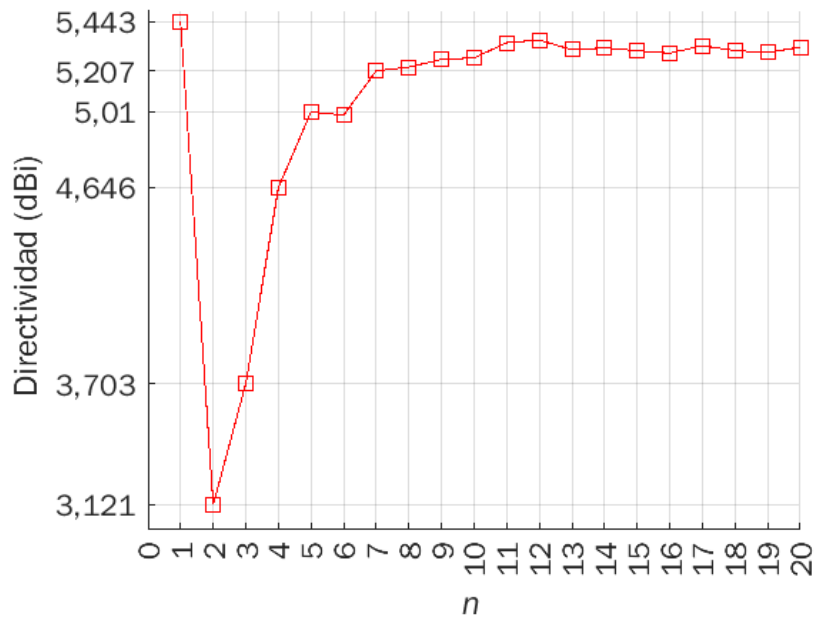
En la Figura 3.10 se tiene las gráficas de las características de la antena en la Figura 3.10 (a) se tiene la eficiencia de radiación de la antena en el eje y izquierdo, mientras que en el eje y derecho se encuentra la eficiencia total. Por ende mientras mayor es el tamaño de la ranura disminuye su eficiencia de radiación analizando cuando n toma valores de 1 a 20. En el rango de 10 a 20 la eficiencia no varía en gran magnitud.

En la Figura 3.10 (b) se observa la directividad de la antena en función del factor n cuando n va tomando valores de 1 a 20, se observa claramente que cuando $n = 9$ la directividad es mayor a 5.

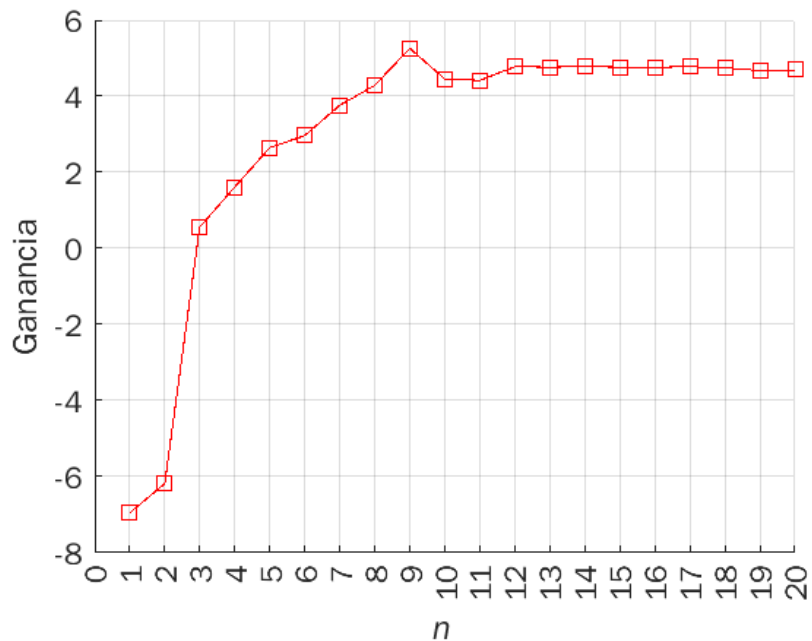
Para la Figura 3.10 (c) se tiene la gráfica de la ganancia en función del factor n . La máxima ganancia cuando $n = 9$, obteniendo un valor de 5,26 dBi, también se puede apreciar que conforme aumenta el valor de n la ganancia de la antena se mantiene constante.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10 Gráficas de (a) Eficiencia de radiación y eficiencia total (b) directividad y (c) ganancia, en función del factor n .

3.2 VARIACIONES DE POSICIÓN DE RANURA

En la Tabla 3.3 Características de la antena *patch* acoplada con ranura. Se tienen los valores cuando n toma valores de $1 \leq n \leq 10$ para realizar el proceso de variación de posición de la ranura se toma las dimensiones de la ranura cuando n es 9, ya que se

obtuvieron excelentes características de $S_{11} = -27,017$ dB, Directividad = 5,262 dBi, y un BW = 55,588 MHz.

Tabla 3.3 Características de la antena *patch* acoplada con ranura.

n	Frecuencia GHz	S_{11} dB	Directividad dBi	BW MHz
1	3,4724	-0,250	5,443	0
2	3,3408	-0,249	3,121	0
3	2,26	-0,329	3,703	0
4	2,280	-0,690	4,646	0
5	2,2712	-1,507	5,010	0
6	2,2404	-3,029	4,994	0
7	2,2348	-5,862	5,207	0
8	2,2320	-11,297	5,225	19,027
9	2,2012	-27,017	5,262	55,588
10	2,1676	-15,928	5,269	59,250

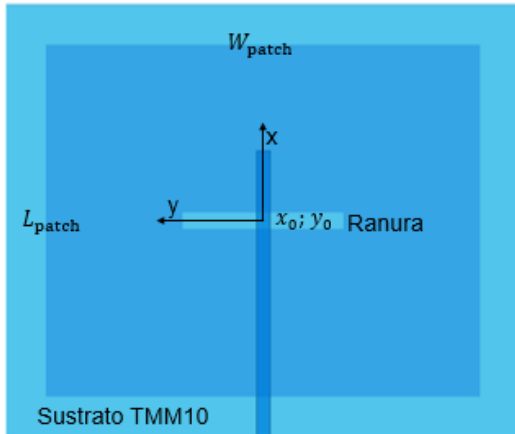
Para variar la posición se toman los valores de la Tabla 3.1 y las dimensiones de la ranura para $n = 9$, son $L_{\text{slot}} = 15,2729$ mm y $W_{\text{slot}} = 1,5727$ mm.

En la Tabla 3.4 se observan los valores que toman (x ; y) tomando como referencia que la posición inicial es la tomada de la sección 2.1.6, se toma un referencial de $x = 0$ y $y = 0$, y desde estos valores se va cambiando la posición tomando valores aleatorios, para así analizar el comportamiento de la antena si variamos la posición.

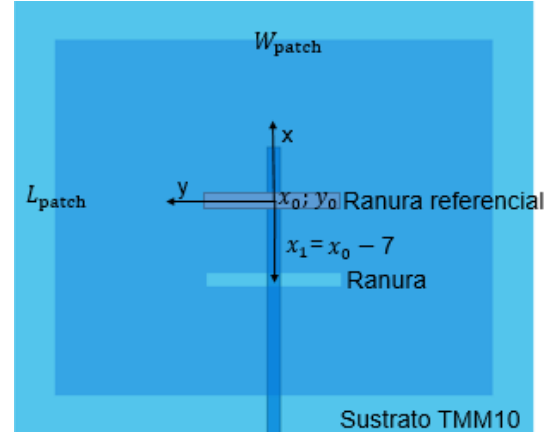
Tabla 3.4 Valores de posición tomados por la ranura.

Posición	x	y
1	0	0
2	-7	0
3	-19	0
4	7	0
5	19	0
6	0	17
7	0	-17
8	19	-17
9	19	17
10	-19	17
11	-19	-17

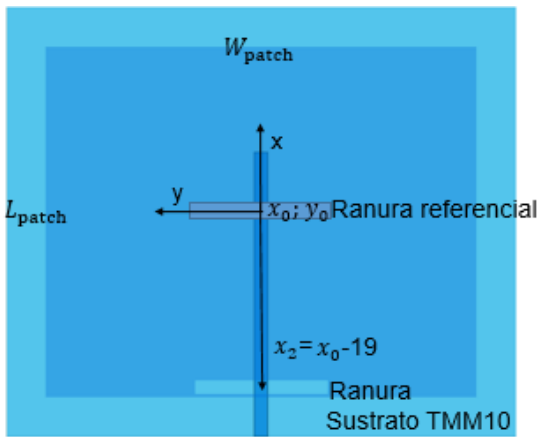
En la Figura 3.11 se observa la vista inferior de la antena simulada y el plano de masa en donde se encuentra la ranura, se muestran las diferentes posiciones de la ranura en base a una ranura referencial inicial, la ranura se posiciona en 10 diferentes lugares para así poder analizar el comportamiento de la antena cuando la ranura cambia su posición.



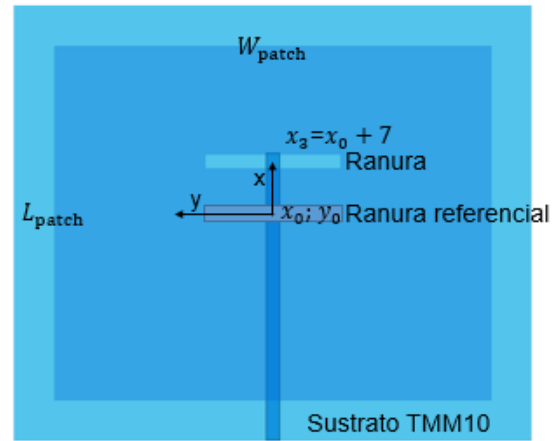
(a)



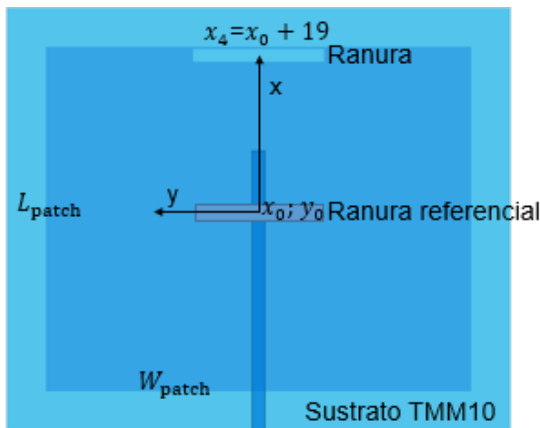
(b)



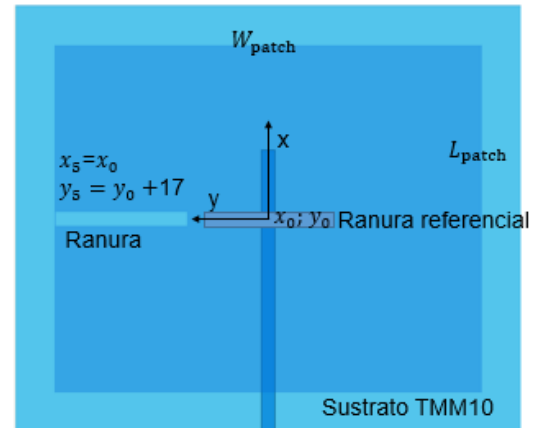
(c)



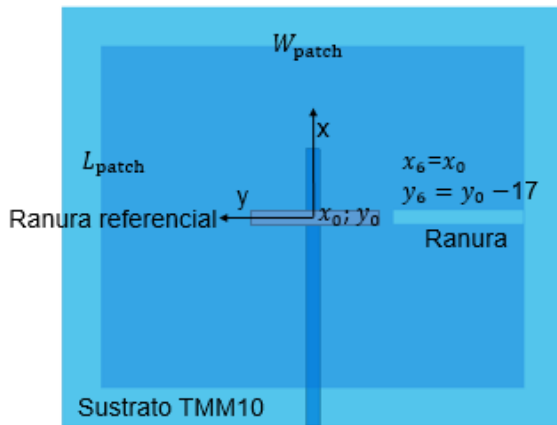
(d)



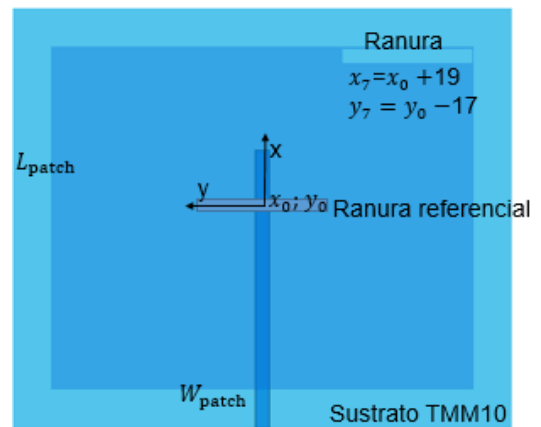
(e)



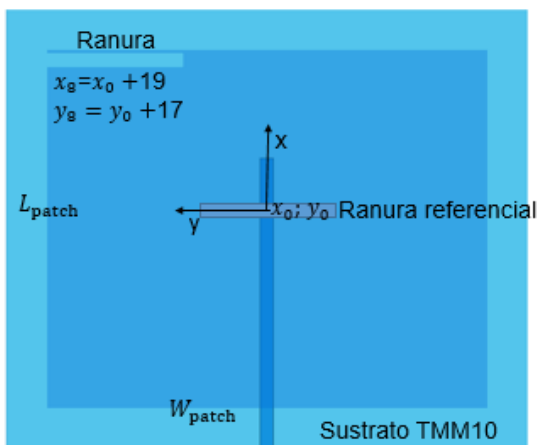
(f)



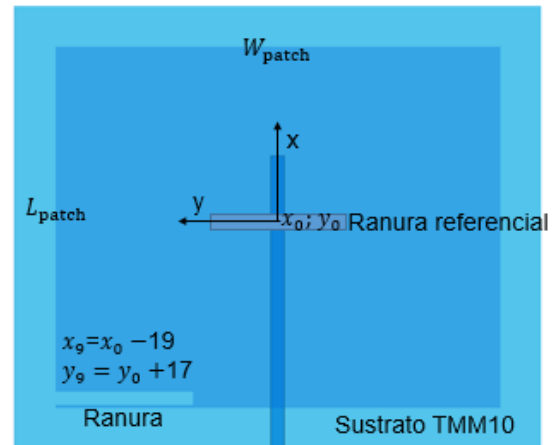
(g)



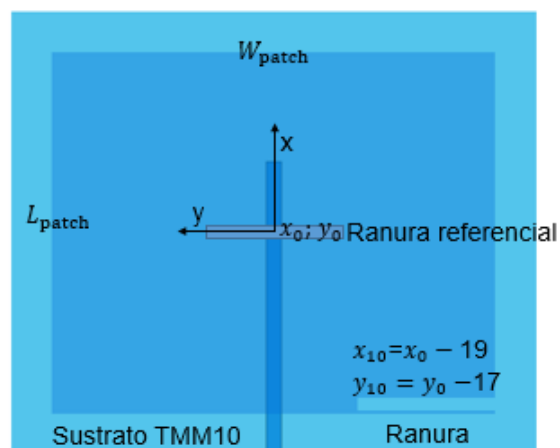
(h)



(i)



(j)



(k)

Figura 3.11 Variaciones de posición de la ranura con referencia a un punto inicial.

Parámetros S_{11}

En la Figura 3.12 se observan los parámetros S_{11} obtenidos al simular la antena en el software CST Studio Suite, variando las posiciones de la ranura, cuando la ranura se mueve a lo largo de la línea de alimentación se va desacoplando, poco a poco, si la ranura se mueve en la parte negativa del eje x posición de la Figura 3.11 (b) se obtiene un valor de $S_{11} = -7,725$ dB. Si se mueve a la posición de Figura 3.11 (c) se obtiene un $S_{11} = -0,249$ dB, cuando toma posiciones que no se encuentran a lo largo de la línea S_{11} toma valores prácticamente nulos.

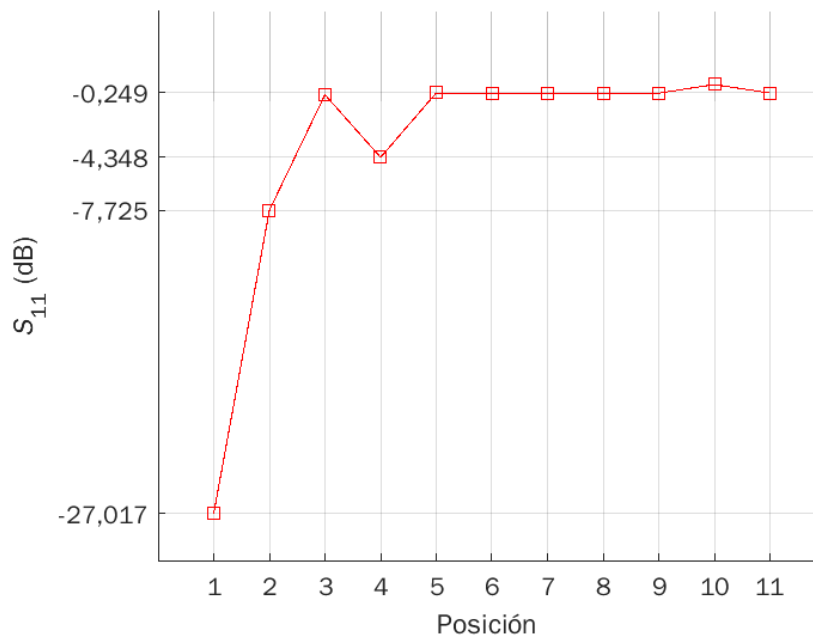


Figura 3.12 Parámetros S_{11} de antena *patch* con acoplamiento por apertura al variar la posición de la ranura.

Frecuencia

En la Figura 3.13, se observa como varía la frecuencia al cambiar la posición de la ranura en las posiciones de 1 a 3, la frecuencia se encuentra en un rango adecuado conforme al diseño requerido de 2,4 GHz. Al tomar la posición 4, la frecuencia de resonancia es de 3,8 GHz, para las posiciones 5 a 11 la frecuencia de resonancia se encuentra entre 3,4 GHz a 3,46 GHz.

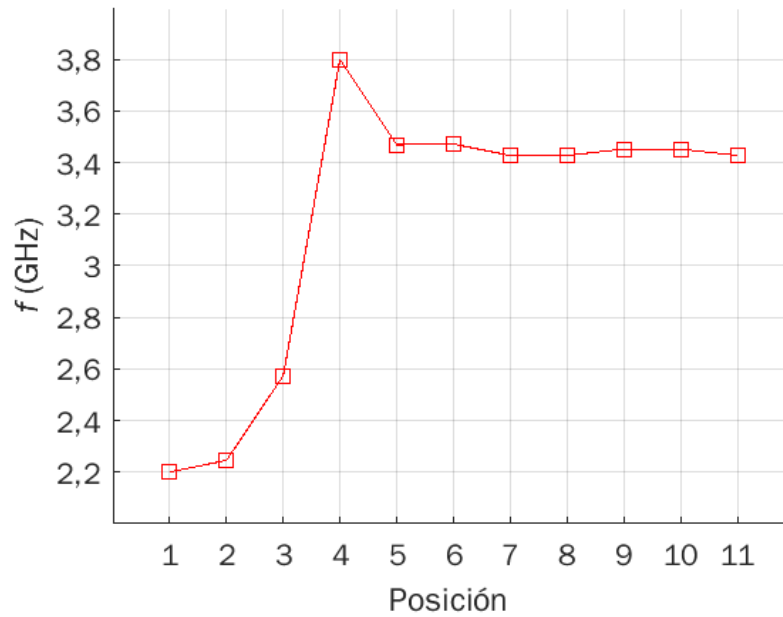


Figura 3.13 Gráfica de la frecuencia en función de la posición de la ranura.

Ancho de banda (BW)

El ancho de banda a -10 dB únicamente se obtiene en la posición inicial ya que conforme la ranura va cambiando su posición, se va desacoplando poco a poco hasta perder completamente el acoplamiento por lo que no se pudo obtener un mejor valor en ancho de banda para el funcionamiento de la antena.

VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

En la Figura 3.14 se observa la gráfica de VSWR en función de la posición que va tomando la ranura, los cambios son notables por lo que la antena pierde acoplamiento entre más se aleje del centro.

Directividad

En la Figura 3.15 se observan los gráficos de directividad en 3D obtenidos en el software CST Studio Suite, observando que conforme la antena va tomando diferentes posiciones la antena se vuelve menos directiva como cuando toma la posición 4, que se obtiene una directividad de 3,111 dBi, como se puede observar en la Figura 3.15 (d).

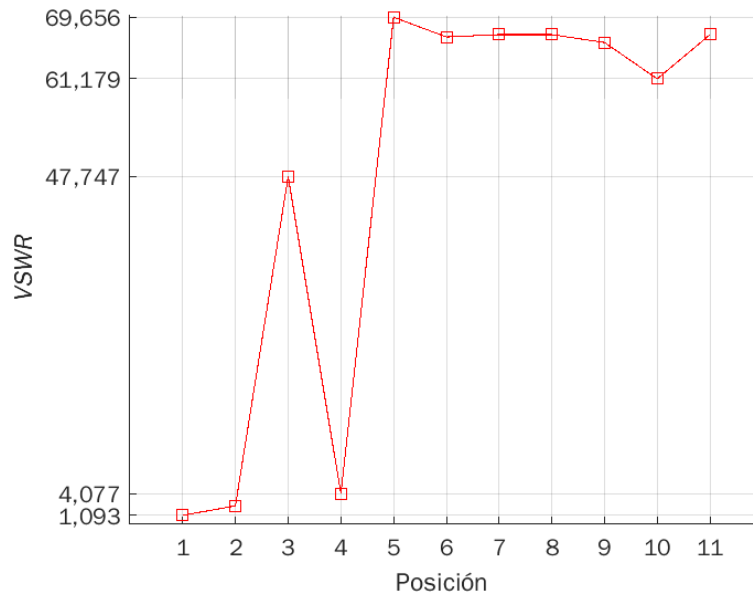
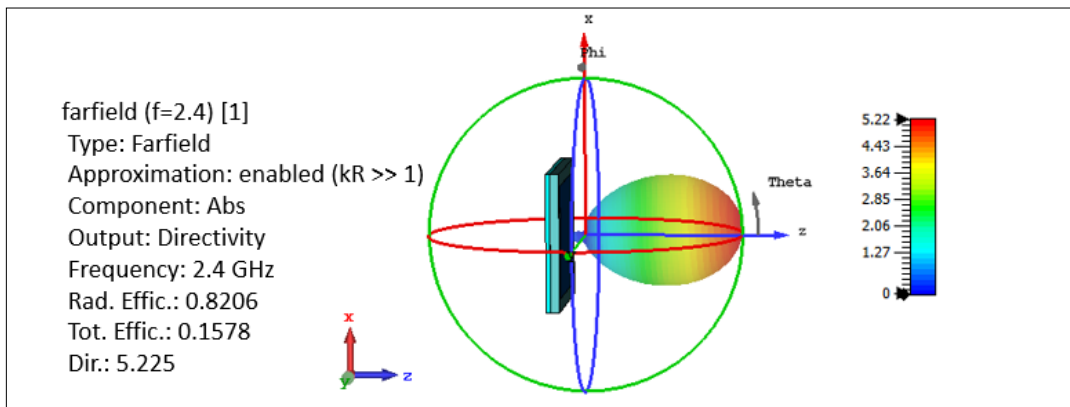
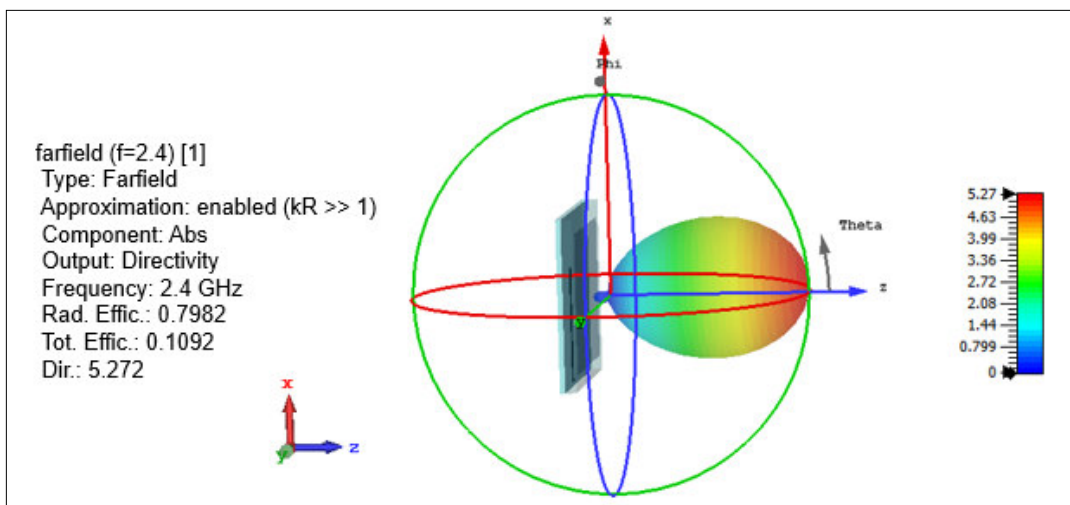


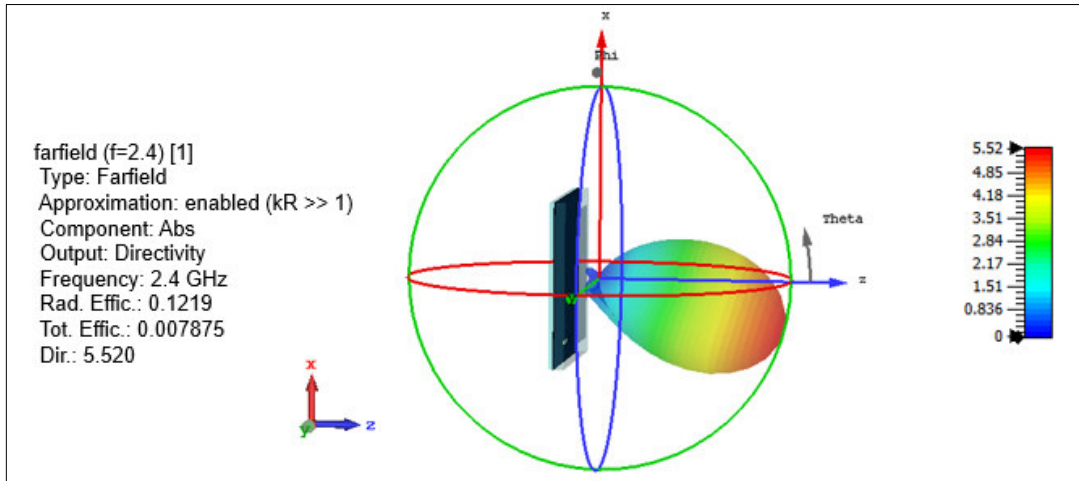
Figura 3.14 VSWR vs Posición.



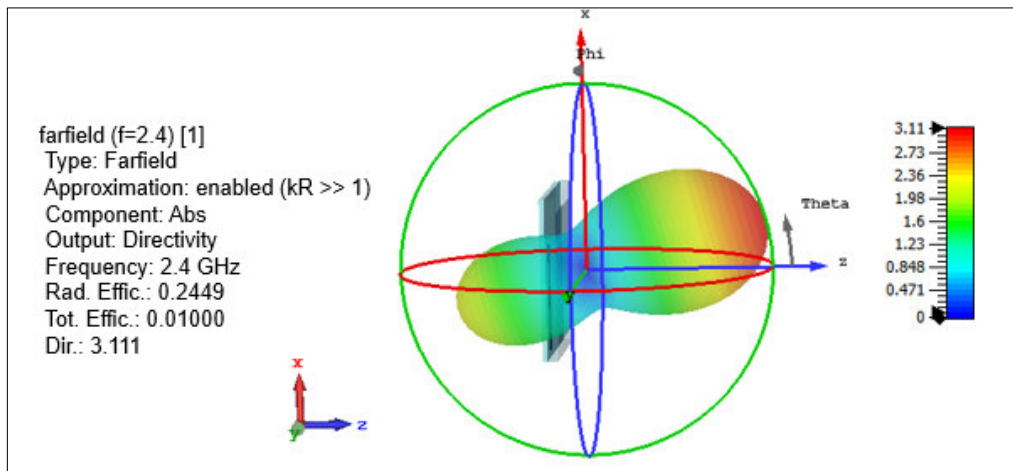
(a)



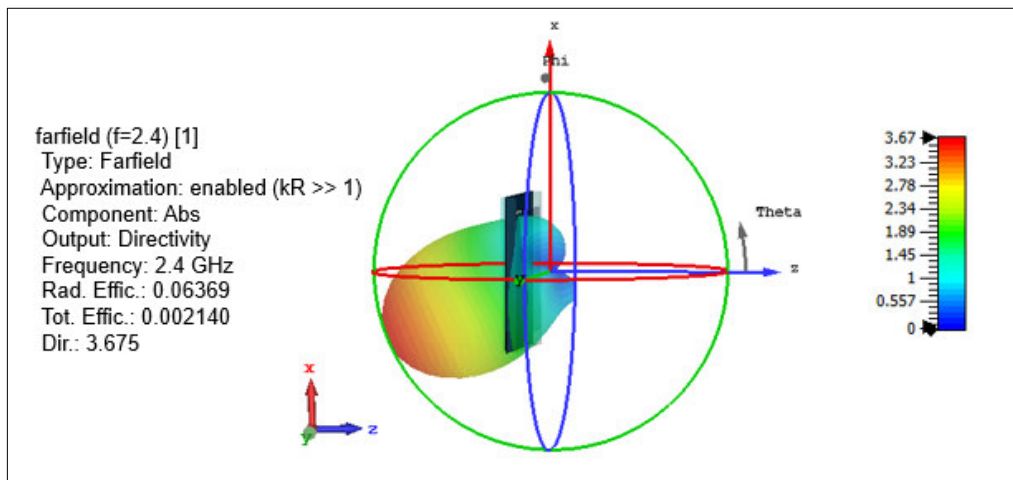
(b)



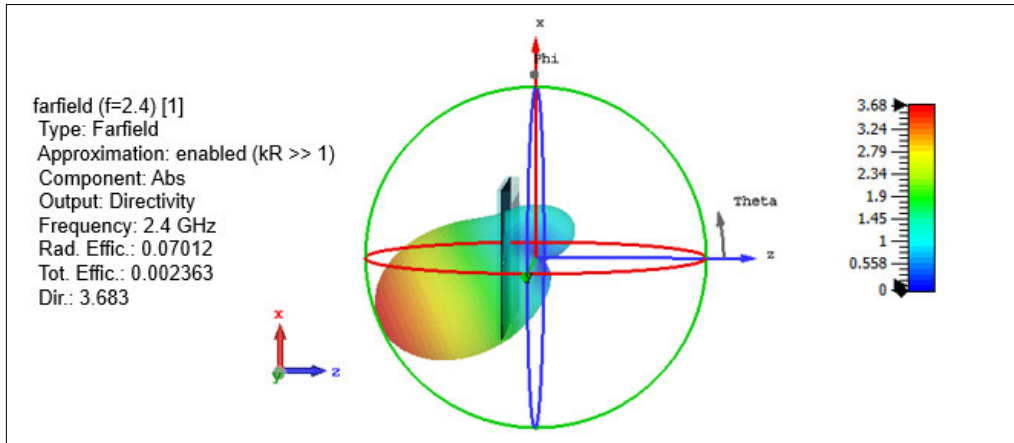
(c)



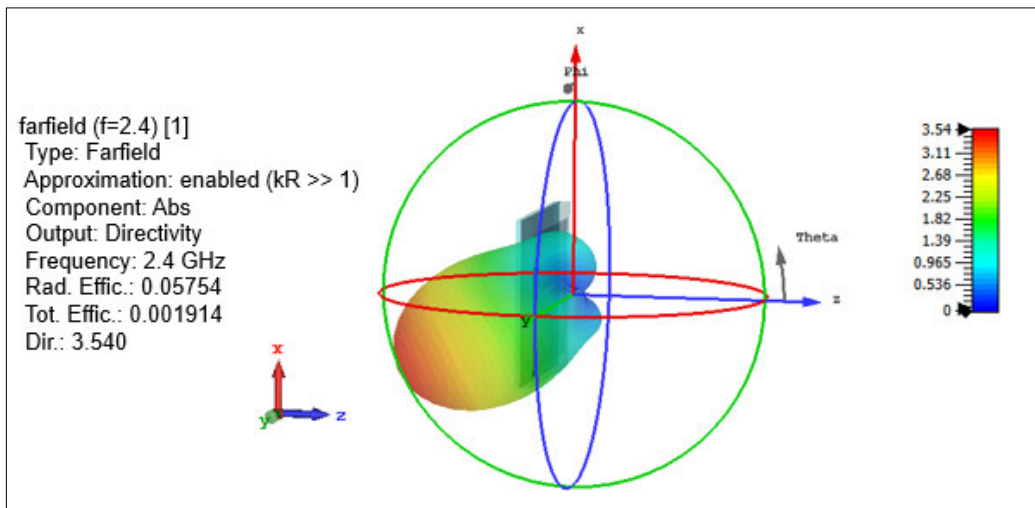
(d)



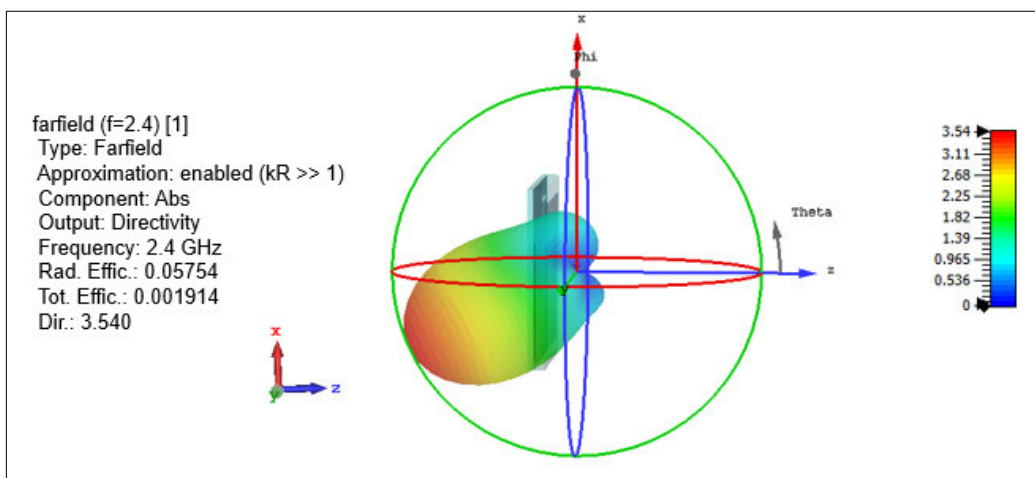
(e)



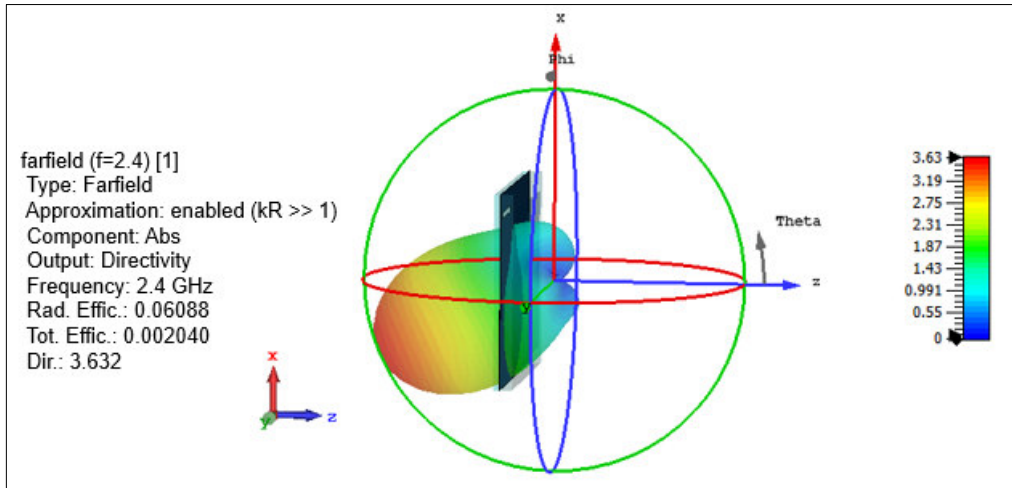
(f)



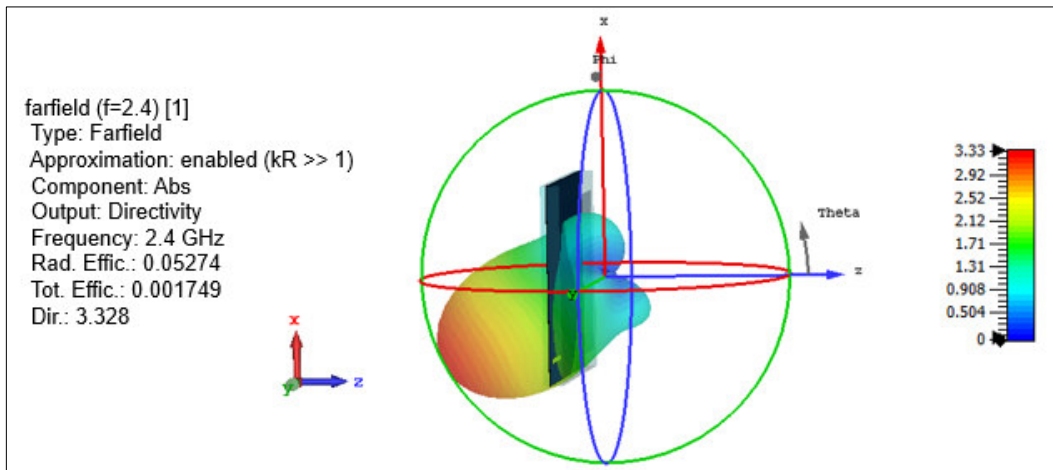
(g)



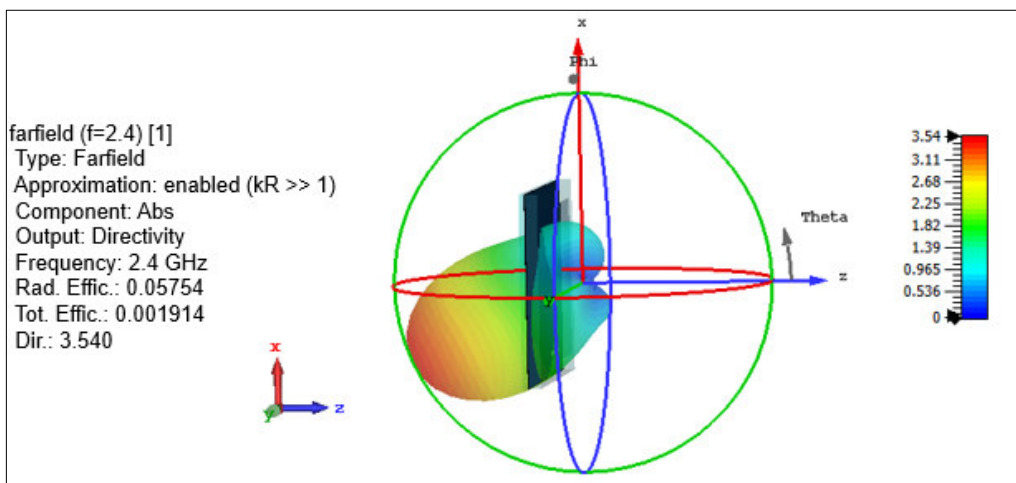
(h)



(i)



(j)

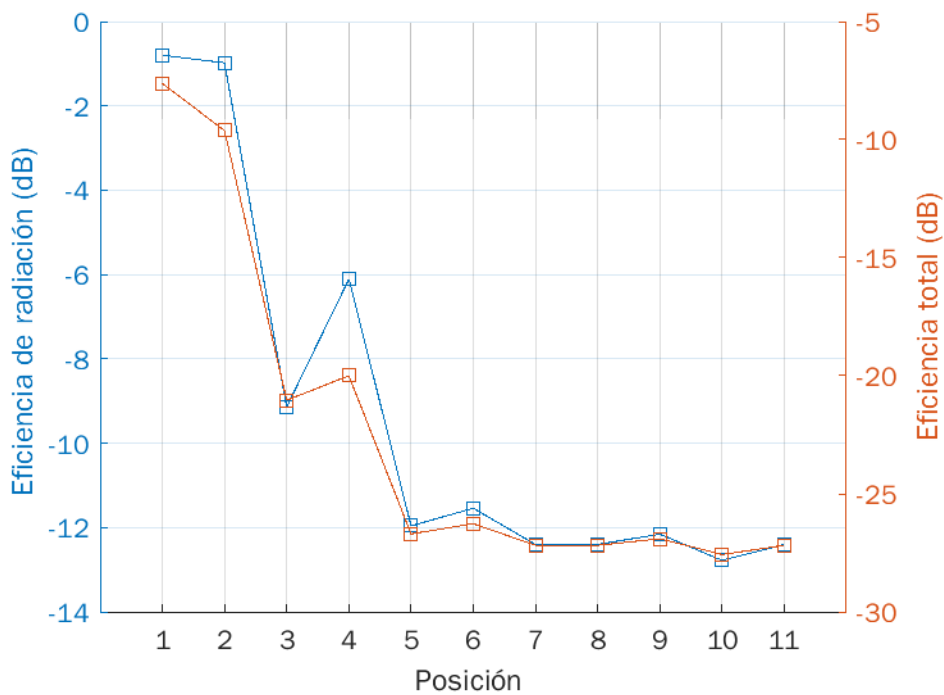


(k)

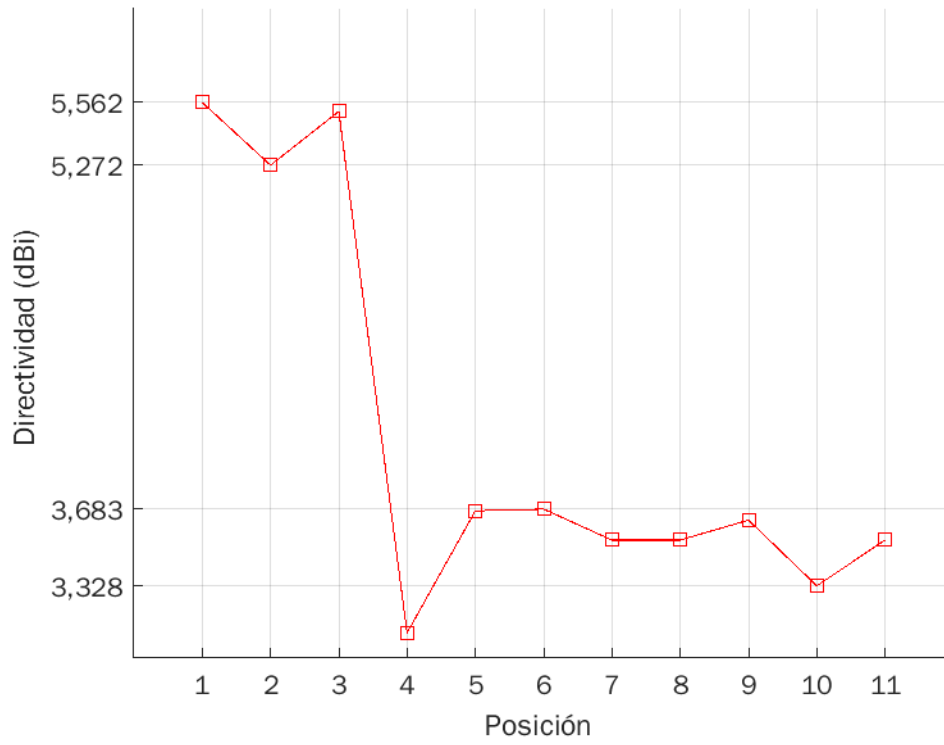
Figura 3.15 Directividad de la antena al variar la posición.

Características de la antena

En la Figura 3.15 se observan las características de funcionamiento de la antena, obtenidas, en Figura 3.15 se observa la gráfica de la eficiencia de radiación en el eje y izquierdo y en el eje y derecho se observa la gráfica de la eficiencia total, se puede decir que mientras varia la posición de la ranura la eficiencia disminuye drásticamente, obteniendo un valor mínimo de eficiencia en la posición 10 que se puede observar en la Figura 3.11 (j) de $-12,778$ dB mientras que la eficiencia máxima se obtiene en la posición 1. En la Figura 3.15 (b), se observa la gráfica de directividad en función de la posición indicando que la directividad, en la posición 1 es la mayor, y cuando varían las posiciones la antena se vuelve menos directiva perdiendo eficacia. Esto se demuestra en la Figura 3.15 (c) de la ganancia en función de la posición obteniendo bajas ganancias al variar la misma.



(a)



(b)

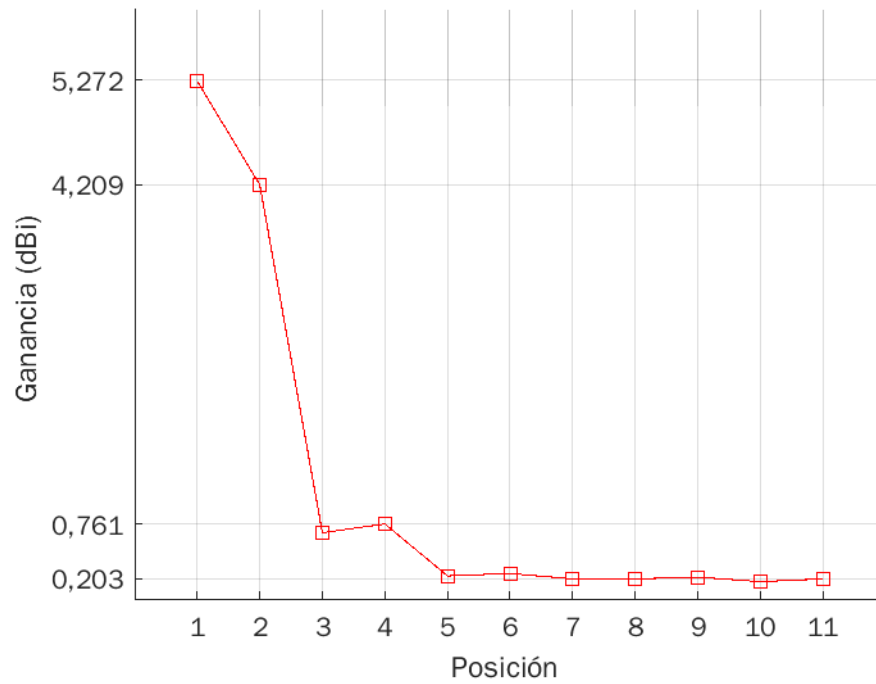


Figura 3.16 Características de la antena *patch* acoplada por ranura al variar la posición de la ranura (a) Eficiencia de radiación, (b) Directividad y (c) Ganancia.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta sección presenta las conclusiones derivadas del presente trabajo. Asimismo, se presentan algunas recomendaciones que pueden ser tomadas en cuenta en trabajos futuros.

4.1 CONCLUSIONES

Se realizó un análisis paramétrico de la estructura de la antena *patch* mediante el diseño de una antena con alimentación por medio de cable coaxial, para tres diferentes sustratos Duroid 5880, TMM10 y FR4; y para dos diferentes espesores, respectivamente. De este análisis, el sustrato Duroid 5880 es el que, en primera instancia, proporcionó mejores características de funcionamiento de la antena en términos de adaptación y ancho de banda.

Se realizó el diseño de la antena *patch* con acoplamiento por apertura, a 2,4 GHz, utilizando los sustratos Duroid 5880 con un espesor de 3,175 mm y TMM10 con un espesor de 1,524 mm.

Se simuló la antena *patch* con acoplamiento por apertura en el software CST Studio Suite, variando la dimensión de una ranura rectangular, cuyo tamaño se dimensionó en función de un parámetro n , el cual tomó valores de 1 a 20, siendo el que proporcionó mejores características para el funcionamiento de la antena el que tuvo las dimensiones de ranura longitud 15,2729 mm y ancho 1,5729 mm.

Adicional, se investigó los efectos que tenía el posicionamiento de la ranura respecto al elemento radiante. Se observó mediante simulación que la mejor posición es cuando la ranura se ubica posicionada cuando los centros geométricos tanto de la ranura como del parche coinciden.

Este trabajo expone un análisis que sirve como referencia para futuras propuestas que requieran, por ejemplo, implementar y/o analizar diferentes técnicas de reconfigurabilidad de ancho de banda. La utilización de una ranura, de manera especial en estructuras planares, además brinda flexibilidad en dichas estructuras, en tanto que ésta está separada (de manera circuital) del componente radiante de la antena.

Se concluye que, a pesar de haber sido abordado para una frecuencia en particular, los resultados obtenidos pueden ser escalados a otras frecuencias de interés particular.

4.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la implementación del diseño presentado para poder analizar el comportamiento de la antena en la realidad, mediante mediciones de adaptación y características de radiación.

Se recomienda realizar el análisis de la antena con diferentes formas de ranura para analizar el comportamiento de la antena, y compararlas con el diseño realizado.

En el presente trabajo se realizó un estudio con tres tipos de sustratos. Se recomienda ampliar el análisis con más dieléctricos. Esto dará una mejor idea del comportamiento de la alimentación por ranura en término de dimensiones y formas de la misma.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. N. O. Nuñez, "Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas.," Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2019.
- [2] I. T. Reyes, "Aplicación de las superficies de alta impedancia al diseño de antenas de hilo de bajo perfil," *Proyecto final de carrera, Universidad Carlos III de Madrid*, 2008.
- [3] I. Khuda, K. Raza, S. Akhtar H. A. Naqvi., "On the Design of Electromagnetically Coupled Microstrip Antenna," *Asian Journal of Engineering, Sciences & Technology*, March 2014.
- [4] J. J. Galvis Rincón, G. H. Vargas Álvarez, and others, "Construcción de una antena Patch Multibanda de 2.4 ghz y 5 ghz," 2019.
- [5] M. G. Ortega Muñoz, "Implementación de un set de atenuadores y filtros de alta frecuencias utilizando tecnología MMIC y Microstrip para el Laboratorio de Comunicaciones y Microondas en la FIE-ESPOCH.," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2018.
- [6] C. Balanis, C. A, "Antenna Theory Analysis and Design,' 3rd ed., JohnWiley& Sons," 2005.
- [7] F. J. Roig Díaz, "Diseño de una antena de parche de banda ancha con polarización circular," 2015.
- [8] A. Balduz Bertol, "Diseño de dos arrays de antenas en tecnología plana con polarización lineal y circular a 60 GHz," 2017.
- [9] V. J. Villar Etxeondo, "Diseño antena microstrip de ranura y antena de parche con geometría fractal," 2012.
- [10] S. D. Martínez Campo, R. M. Jiménez Bermudez, and others, "Análisis de la simulación del patrón de radiación en una antena tipo parche," 2013.
- [11] J. M. Nieto Escribano, "Diseño de un array de antenas parche con alimentación en serie a 60GHz," 2018.
- [12] A. S. Moreno Escobar, "Evaluación mediante simulación de dos arreglos de antenas tipo parche en banda S para aplicaciones de un sistema radar," Quito, 2018.
- [13] Á. Cortés Domínguez, "Antenas microstrip de alta directividad mediante superestratos." 2020.

- [14] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip antenna design handbook*. Artech house, 2001.
- [15] T. Rovensky, A. Pietrikova, I. Vehec, and M. Kmec, "Measuring of dielectric properties by microstrip resonators in the GHz frequency," in *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2015, pp. 192–196.
- [16] X. Sha, "Sensitivity of Dispersion Characteristics of a Sandwiched Coplanar Waveguide at 0-70 GHz to Changes of Device Dimensions."
- [17] A. F. Giraldo Muñoz, "Diseño, fabricación y caracterización de antenas tipo parche elaboradas a partir de adhesivos conductivo sobre sustrato FR4," 2016.
- [18] I. L. Hernández, "Arreglo de antena de microcinta acoplado por ranura.," *Telemática*, vol. 14, no. 1, pp. 39–53, 2015.
- [19] D. M. Pozar, "A review of aperture coupled microstrip antennas: History, operation, development, and applications," *University of Massachusetts at Amherst*, 1996.

ORDEN DE EMPASTADO