

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ESTUDIO DE RECONFIGURABILIDAD DE LAS
CARACTERÍSTICAS CIRCUITALES/RADIANTES EN
ESTRUCTURAS DE ANTENAS**

RECONFIGURACIÓN DEL ANCHO DE BANDA

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

JOEL SEBASTIAN CHICAIZA CAIZA

joel.chicaiza@epn.edu.ec

DIRECTOR: HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA

hernan.barba@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Joel Sebastian Chicaiza Caiza 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.



Joel Sebastian Chicaiza Caiza

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Joel Sebastian Chicaiza Caiza, bajo mi supervisión.



Hernán Vinicio Barba Molina

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.

Joel Sebastian Chicaiza Caiza

Hernán Vinicio Barba Molina

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios, mis padres Hugo Chicaiza y Marina Caiza y a mi hermana Tatiana Chicaiza quienes día a día me dieron el aliento y fuerza para seguir adelante a lo largo de mi vida académica que fue uno de mis mayores retos y me enseñó que todo esfuerzo con perseverancia y tenacidad permiten cumplir con cualquier objetivo planificado.

Los llevo siempre conmigo.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por guiarme con su divina sabiduría para que todo esto sea posible.

A mi familiares y seres queridos que estuvieron conmigo en las buenas y malas y nunca dejaron que me rendiera, por tal razón siempre fue persistir, insistir, resistir, pero nunca desistir.

Al Dr. Ing. Hernán Barba quien me dio la oportunidad de trabajar bajo su tutela e impartió parte de sus conocimientos y guía para hacer posible el siguiente trabajo.

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.....	3
1.4 MARCO TEÓRICO	4
1.4.1 PROPIEDADES DE ESTRUCTURAS RADIANTES	4
1.5 RECONFIGURABILIDAD DE ANTENAS	6
1.5.1 RECONFIGURACIÓN ELÉCTRICA	6
1.5.2 RECONFIGURACIÓN ÓPTICA.....	8
1.5.3 RECONFIGURACIÓN MECÁNICA	11
1.5.4 RECONFIGURACIÓN DE CAMBIO MATERIAL.....	13
1.5.5 COMPARATIVA ENTRE LAS TÉCNICAS DE RECONFIGURACIÓN.....	14
1.6 APLICACIONES PARA RECONFIGURACIÓN EN ANCHO DE BANDA	16
2 METODOLOGÍA.....	22
2.1 DISEÑO DE ANTENA <i>PATCH</i> CON ALIMENTACIÓN ACOPLADA POR RANURA.....	22
2.2 PROPUESTA DE RECONFIGURABILIDAD DEL ANCHO DE BANDA	28
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
3.1 RESULTADOS	30
3.2 CONCLUSIONES.....	38

3.3	RECOMENDACIONES	39
-----	-----------------------	----

RESUMEN

El presente proyecto presenta un estudio de reconfigurabilidad de las características circuitales/radiantes en estructuras radiantes en términos de ancho de banda, sus principales características, aplicaciones e implementación en sistemas de comunicación u otros.

Se presenta análisis teóricos, ecuaciones fundamentales, tablas y gráficas de simulaciones que permiten comprender la tecnología de reconfigurabilidad de antenas, además en los capítulos desarrollados se analiza y sustenta la importancia de contar dicha tecnología.

En el primer capítulo se resume conceptos básicos y fundamentales referentes a una antena, parámetros radiantes y físicos que la conforman y rápida introducción al concepto de reconfiguración.

El segundo capítulo incluye el proceso de diseño del modelo utilizado para realizar el análisis de reconfigurabilidad además de las condiciones de funcionamiento.

El tercer capítulo resume los resultados obtenidos y presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas del presente trabajo.

PALABRAS CLAVES: reconfigurabilidad, ancho de banda, ranuras, antena de parche, impedancia

ABSTRACT

This project presents a study of reconfigurability about radiant/circuit characteristics in radiant structures in terms of bandwidth, its main characteristics, applications and implementation in communication systems or others.

Theoretical analysis, fundamental equations, tables, and simulations are shown that allow to understand the antenna reconfigurability technology, also in the text, the importance of having such technology is analyzed and supported.

The first chapter summarizes basic and fundamental concepts regarding to an antenna, constitutive radiant and physical parameters, and a quick introduction to the concept of reconfiguration.

The second chapter includes the design process of the model utilized to perform the reconfigurability analysis as well as the operating conditions.

The third chapter summarizes the results obtained and shows conclusions and recommendations given in this work.

KEYWORDS: reconfigurability, bandwidth, slots, patch antenna, impedance

1 INTRODUCCIÓN

Las antenas forman parte fundamental de los sistemas de telecomunicaciones para transmisión o recepción de señales electromagnéticas. Pues irradian o concentran energía que viaja por el espacio libre y principalmente, están diseñadas para las comunicaciones inalámbricas como radiocomunicaciones, comunicaciones satelitales, comunicaciones móviles, entre otras [1].

Se clasifican en distintos tipos de acuerdo con su funcionalidad y forma. Entre las más reconocidas se encuentran las antenas de apertura, Yagi-Uda, lentes, reflectivas, etc. Básicamente, todas se ajustan a características como la ganancia, respuesta en frecuencia, área efectiva, intensidad de radiación. Éstas especifican el comportamiento de una antena para incluirlas en un sistema [2].

Los parámetros de antenas más importantes son los circuitales (impedancia, ancho de banda) y los radiantes (patrón de radiación, directividad, ganancia, polarización). Los mismos se evalúan en una banda de frecuencia acorde a la aplicación de la antena.

En la actualidad, para cumplir con los requerimientos de una aplicación no solo basta replicar u obtener parámetros adecuados. Sino más bien, ajustar las características circuital y radiante a las necesidades de la aplicación. Es así que, es posible explorar en el área de antenas reconfigurables [3].

La reconfigurabilidad en antenas es una técnica avanzada que mejora las capacidades de un sistema. Por tanto, pueden adaptarse a los requisitos cambiantes del sistema e incluso eliminar restricciones. Por ejemplo, las antenas reconfigurables en dispositivos inalámbricos ayudan a mejorar una conexión con interferencia.

La capacidad de alterar frecuencias operativas, polarizaciones, ancho de banda y patrones de radiación representa un desafío, ya que, no solo se debe cumplir con la funcionalidad de la antena sino también integrarla al sistema.

Por lo tanto, para llevar a cabo el proceso de reconfiguración en una estructura radiante, se ha investigado diferentes implementaciones. En [4]–[6], por ejemplo, se reporta variaciones de la frecuencia entre 3 GHz – 8 GHz, a través de los interruptores fotoconductores. Así mismo, se podría mencionar la utilización de interruptores MEMS, para aplicaciones donde se requiere tener una sola antena que se pueda reconfigurar dinámicamente para transmitir o recibir en múltiples bandas de frecuencia.

El enfoque de reconfiguración del ancho de banda permite implementaciones en sistemas 2G/3G/4G e IMT. Esto se logra a partir de elementos de polarización dual junto con una ranura y elementos parásitos que mejoran aún más el ancho de banda [7]. Por lo tanto, la reconfiguración del ancho de banda es importante, ya que, proporciona capacidades de ajuste en un rango de frecuencias.

En el presente trabajo de integración curricular se realizará un estudio de reconfigurabilidad del ancho de banda, donde se evaluará la efectividad de un modelo de antena. Dicho modelo permitirá ajustar el ancho de banda sobre una banda de frecuencias establecida para su diseño.

Se incluirá un detalle de las principales implementaciones, estructuras, modelamiento y simulación para finalmente analizar resultados.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar las características circuitales/radiantes en estructuras de antenas para reconfiguración de ancho de banda.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Presentar un breve resumen acerca de las implementaciones realizadas para la reconfiguración del ancho de banda en antenas.
2. Proponer una estructura tipo prueba de concepto que realice reconfiguración en ancho de banda.

3. Realizar el modelamiento y simulación de la estructura propuesta en un simulador electromagnético tridimensional.
4. Analizar los resultados obtenidos en la simulación.

1.3 ALCANCE

El trabajo tiene por objeto realizar el estudio de las características circuitales/radiantes en antenas para reconfiguración del ancho de banda.

En primer lugar, se revisará la literatura científica con el propósito de realizar un breve resumen que permita enfocar el objetivo planteado. Para ello, se investigará en revistas y procedimientos de conferencias especializadas en el campo y se rescatará aquellas implementaciones relevantes para el presente estudio.

Seguidamente, para establecer una estructura que ejemplifique la reconfiguración planteada, se evaluarán elementos como *slots* (rectangular/hueso), tipo de alimentación, arreglo de antenas; debido a que los mismos permiten ajustar el ancho de banda en un rango de frecuencias determinado.

Después, se realizará el modelamiento y simulación de la estructura con el *slot* o arreglo de antenas (de ser el caso). La estructura planteada debe contar con características circuitales y radiantes de reconfiguración en ancho de banda, además de la justificación del paso a paso del modelamiento de la estructura final o consideraciones al hacer uso de la teoría presentada en un principio.

Finalmente, al contar con la simulación de la estructura radiante, se presentará un análisis comparativo en función de los resultados obtenidos. Se determinarán cuáles han sido las principales características de la reconfiguración del ancho banda y la importancia que tendrá en implementaciones como comunicaciones móviles, RADAR, entre otras.

El presente proyecto no contempla la implementación de un producto final demostrable.

1.4 MARCO TEÓRICO

Las antenas son estructuras que generan ondas electromagnéticas las cuales, usualmente, son propagadas en el espacio libre. Las antenas tienen la propiedad de ser recíprocas, es decir, sus características circuitales y de radiación son iguales tanto para transmisión como para recepción.

Los parámetros más importantes que caracterizan a una antena son patrón de radiación, directividad, ganancia, polarización, impedancia y ancho de banda; estas características establecen la operabilidad de la antena con las condiciones necesarias para su implementación o aplicación [8].

1.4.1 PROPIEDADES DE ESTRUCTURAS RADIANTES

A continuación, se presentan conceptos básicos referentes a las propiedades de estructuras radiantes que caracterizan o definen su funcionamiento.

Patrón de radiación

El patrón de radiación determina la variación angular de potencia de radiación la cual guarda relación con la densidad de potencia y la distancia al punto de observación por lo cual representa una función de dichos parámetros, como lo indica la Figura 1.1 [8].

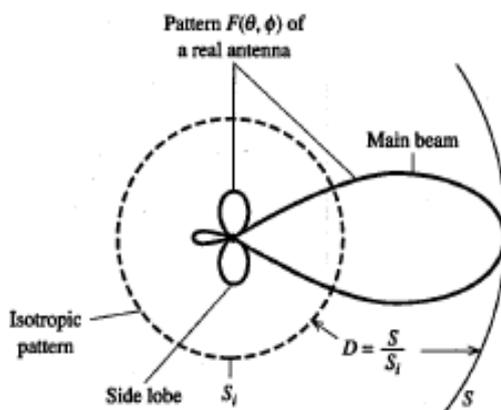


Figura 1.1. Patrón de radiación [8].

Directividad

Determina la densidad de potencia radiada por una antena en relación a la potencia radiada por una antena isotrópica, esto dado que una antena real no conserva una distribución isotrópica como se indica en la Figura 1.1 [8].

Ganancia

Determina qué tan afectada se ve la antena por las pérdidas. Mientras menor sea su afectación mayor será la ganancia y consecuentemente mientras mayor sean las pérdidas la ganancia será menor, por lo que guarda relación con la directividad y la cantidad de potencia radiada [8].

Polarización

Describe la naturaleza vectorial de los campos eléctricos radiados por una antena, es decir, da una descripción del lugar geométrico determinado por el extremo de los vectores de campo vectoriales en función del tiempo [8].

Impedancia

La impedancia en los terminales de una antena está compuesta por la disipación de potencia y la potencia almacenada en el campo cercano a la antena, debido a la propiedad de reciprocidad la impedancia es la misma tanto para transmisión y recepción [8].

Ancho de banda

El ancho de banda está representado como el rango de frecuencias que permite el desempeño adecuado de la antena o donde sus características presentan un adecuado desenvolvimiento en el sistema [8].

1.5 RECONFIGURABILIDAD DE ANTENAS

La reconfigurabilidad en antenas idealmente permite adecuar las características eléctricas o mecánicas de una antena o arreglo de antenas para modificar su operación en frecuencia, polarización, impedancia y ancho de banda, sin embargo, el desarrollo de los diseños en ocasiones puede tornarse en extremo complejo por las consecuentes propiedades (radiante/eléctricas) que requieren de precisión en el diseño.

Pero dado a las nuevas tecnologías que se tienen en la actualidad como se observa en [9], [10], las estructuras pueden lograrse a base de simuladores que reflejan un prototipo de la antena que brinde la posibilidad de evaluar la fabricación del diseño y comprobar la efectividad de éste, de modo que, para completar el diseño es conveniente definir una de las técnicas de reconfiguración que cumpla con las características impuestas para establecer correctamente el desenvolvimiento de la antena.

Las técnicas están definidas en cuatro categorías eléctrica, óptica, mecánica y cambio de material [11].

1.5.1 RECONFIGURACIÓN ELÉCTRICA

Esta técnica está basada en la implementación de interruptores que permiten la conexión y desconexión de partes de la antena para la distribución de corriente. Los sistemas microelectromecánicos de radio frecuencia (RF-MEMS) son un ejemplo de este tipo de reconfiguración y principalmente basan su diseño en el movimiento mecánico de los interruptores. Las principales ventajas al contar con reconfiguración RF-MEMS son bajo consumo de potencia y alto aislamiento, pero para determinadas aplicaciones la velocidad de conmutación resulta ineficiente [10].

Otro ejemplo de reconfiguración eléctrica está enfocado al uso de diodos PIN cuya velocidad de conmutación es de entre 1 ns y 100 ns, superior comparándolos con los RF-MEMS. También el uso de varactores a través de la variación de voltaje permite modificar la capacitancia de modo que se ajuste a las necesidades de reconfiguración de la antena. Los elementos de reconfigurabilidad eléctrica presentan alta eficiencia de reconfiguración, pero su diseño requiere de un diseño óptimo de redes de polarización.

La Figura 1.2 muestra el diseño de una antena que cuenta con interruptores RF-MEMS, compuesta por dos capas de substrato inferior y superior además existe espaciamiento entre ambas placas (substrato aire). En la capa inferior se encuentra el interruptor que al ser accionado en conjunto con el resto de la estructura produce que la frecuencia de resonancia se reajuste, ya que, la longitud de los brazos cambia al accionar el interruptor.

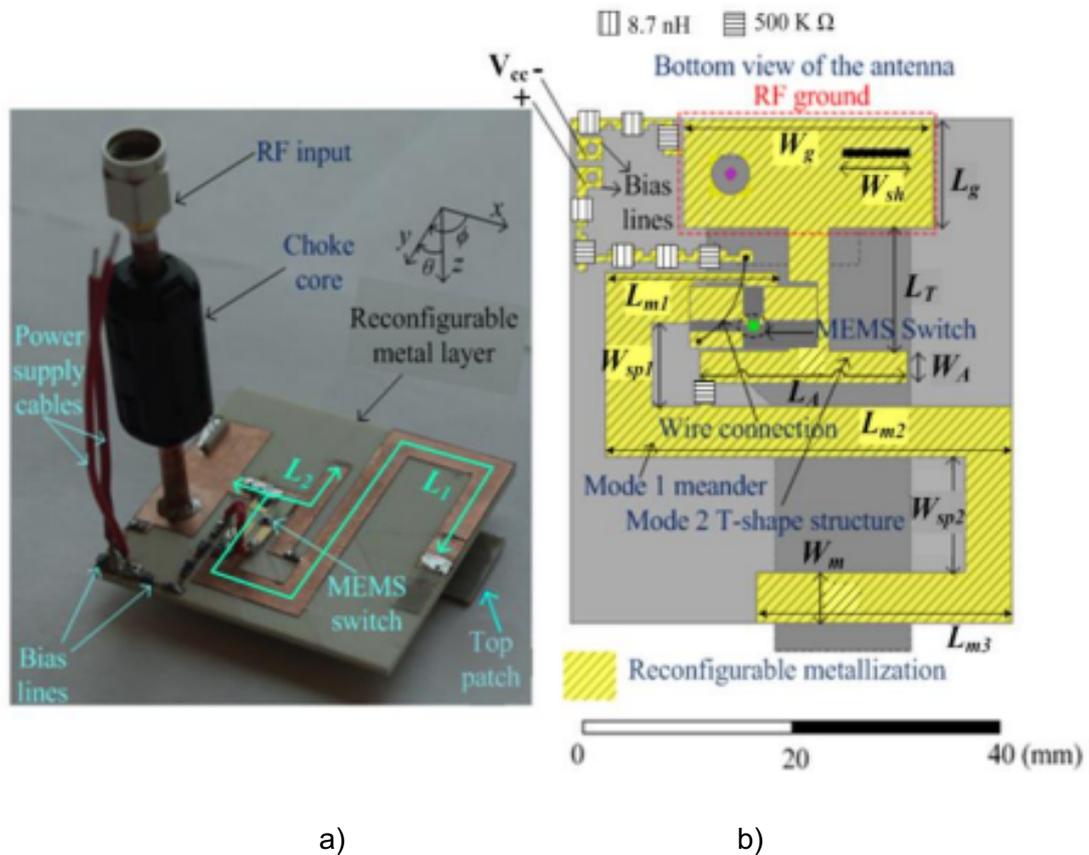


Figura 1.2. Antena con reconfiguración eléctrica. a) Fotografía del prototipo implementado. b) Modelo con sus diferentes partes constitutivas [11].

Cuando se acciona un extremo del interruptor uno de los brazos de la antena queda fijo dando como resultado el reajuste de la frecuencia de resonancia como se muestra en el coeficiente de reflexión de la Figura 1.3.

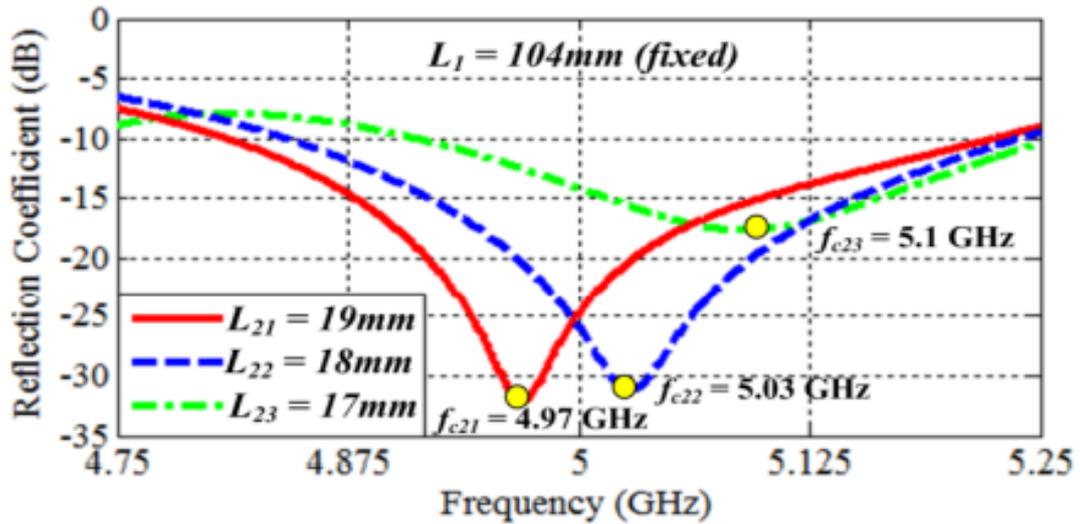


Figura 1.3. Coeficiente de reflexión de la antena con reconfiguración eléctrica [11].

1.5.2 RECONFIGURACIÓN ÓPTICA

En este tipo de reconfiguración se implementan dispositivos ópticos como los interruptores fotoconductores que son incorporados a la antena de forma que al ser sometidos a un rayo de luz logran conductividad a lo largo de la estructura. Integrar correctamente los elementos ópticos aún representa cierto grado de dificultad técnica en la práctica.

Por tal motivo, algunos diseñadores han optado por adecuar las condiciones del diseño de sus antenas para que únicamente se integre el interruptor, como se indica en la Figura 1.4, donde se implementó una antena circular anular con la integración de un interruptor de silicio para contar con reconfigurabilidad óptica donde la inserción de luz atraviesa al interruptor con un cable de fibra óptica.

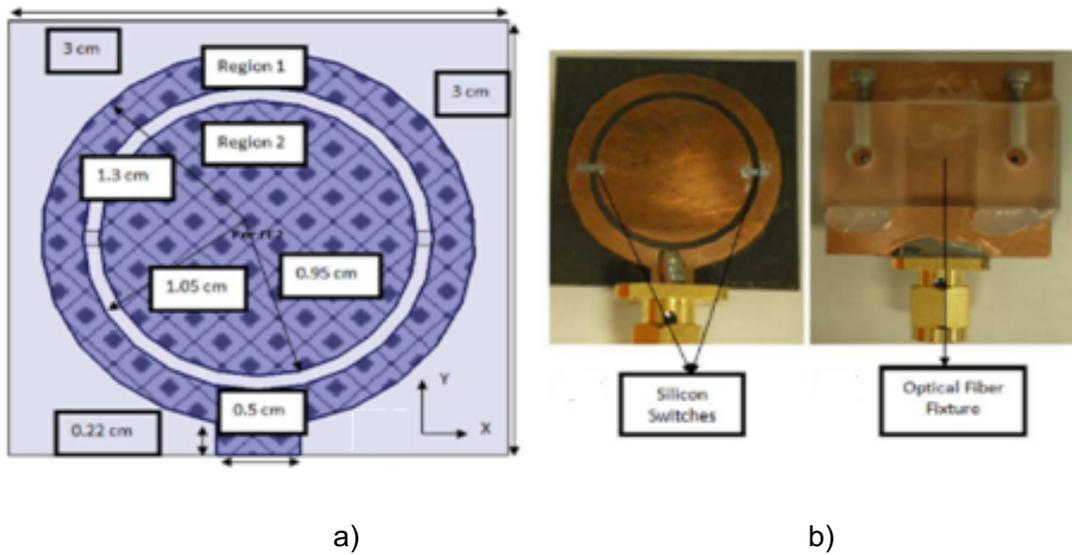
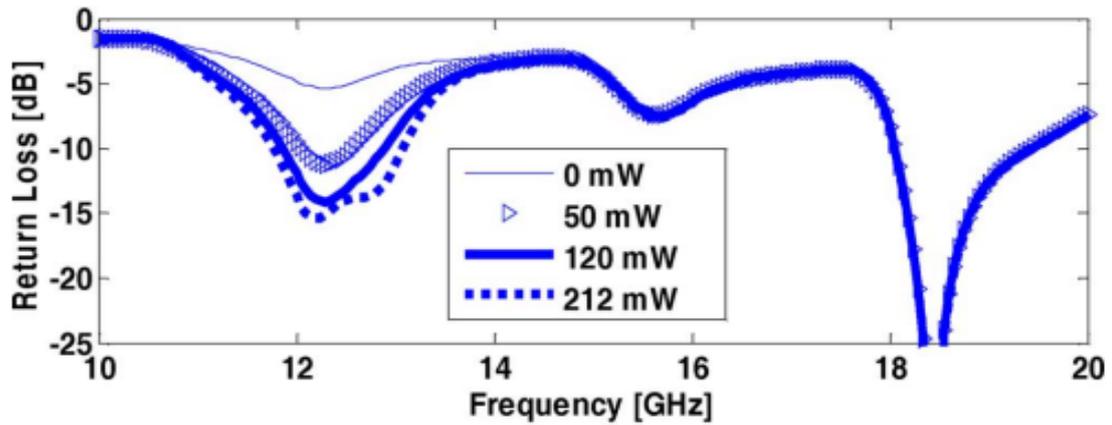
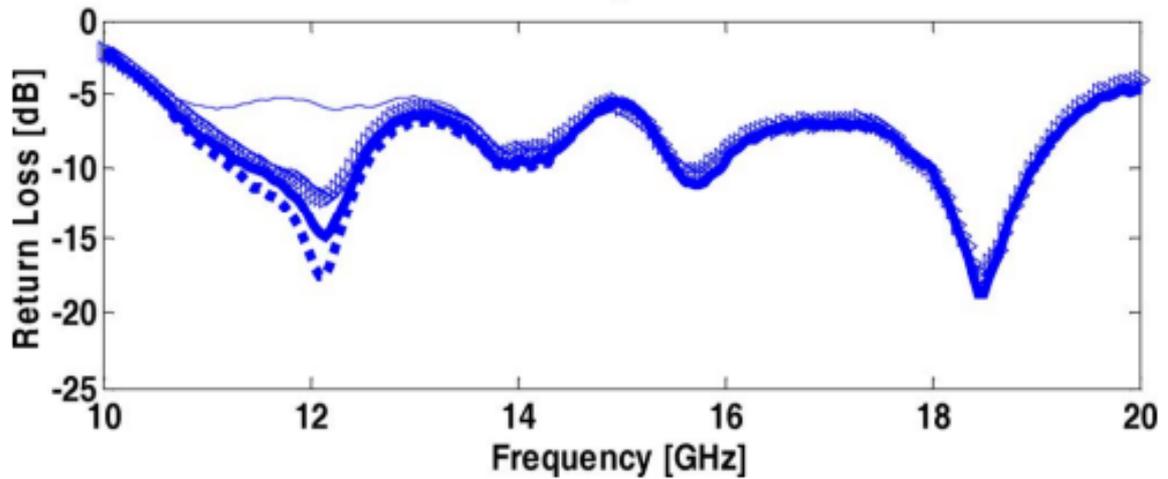


Figura 1.4. Antena con reconfiguración óptica. a) Modelo propuesto establecido con sus dimensiones. b) Fotografía del prototipo implementado [12].

Cuando se acciona el interruptor al no recibir luz a través del láser su estado es apagado, con lo cual únicamente la región del anillo circular es la que cuenta con alimentación, el valor de su resonancia está entre 18 GHz y 19 GHz. Cuando se activa el interruptor por incidencia de luz aparece una nueva frecuencia de resonancia en 12 GHz. Los resultados se indican en la Figura 1.5.



a)



b)

Figura 1.5. Coeficiente de reflexión de la antena con reconfiguración óptica. a) Coeficiente de reflexión simulado b) Coeficiente de reflexión medido [12].

En la Figura 1.6 se presenta el patrón de radiación de la antena reconfigurable por medios ópticos. Se nota que con el aumento de potencia en el láser también se da el aumento de conductividad en el interruptor, pero esto no generara variaciones en el patrón de radiación de la antena la cual es del tipo omnidireccional.

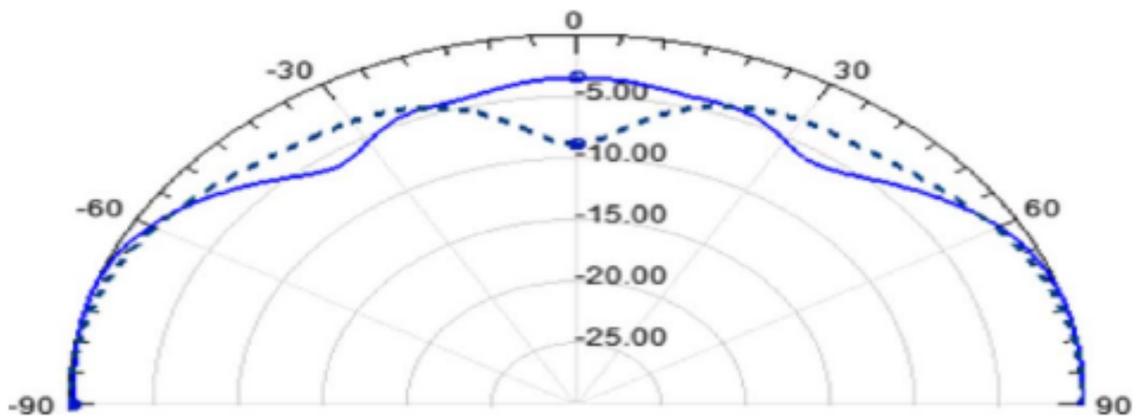


Figura 1.6. Patrón de radiación de la antena con reconfiguración óptica [12].

1.5.3 RECONFIGURACIÓN MECÁNICA

En este tipo de reconfiguración se utilizan elementos activos y sistemas de polarización en conjunto con el/los componentes de la antena que logran características de reconfiguración deseadas. Dado que se establece un sistema mecánico la flexibilidad es limitada y no es posible contar con características de multifuncionalidad [13].

Por ejemplo, en la antena cuyo modelo se muestra en la Figura 1.7, el efecto que produce la inclinación del plano de masa produce la variación de la constante dieléctrica del substrato. Este mecanismo permite el ajuste de las frecuencias operativas para hacer un uso adecuado del espectro. La Figura 1.7 indica el movimiento que tendrá el plano de tierra al desplazarse una determinada altura [14].

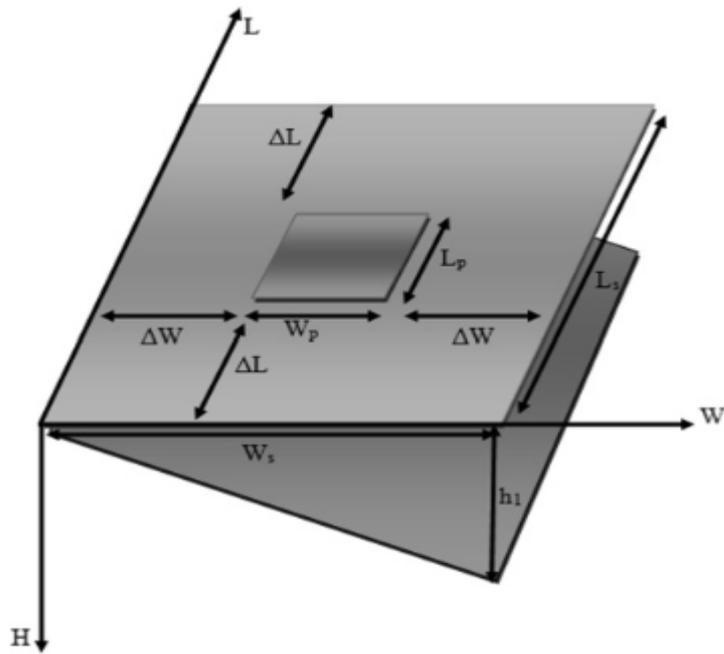


Figura 1.7. Antena con reconfiguración mecánica [14].

Cuando el plano de masa toma una altura de 3 mm produce sintonización a 4,4 GHz como se aparecía en la Figura 1.8. Con ello el proceso de selección y sintonización de frecuencias permitiría desarrollar un control dinámico de frecuencias operativas en sistemas de comunicación.

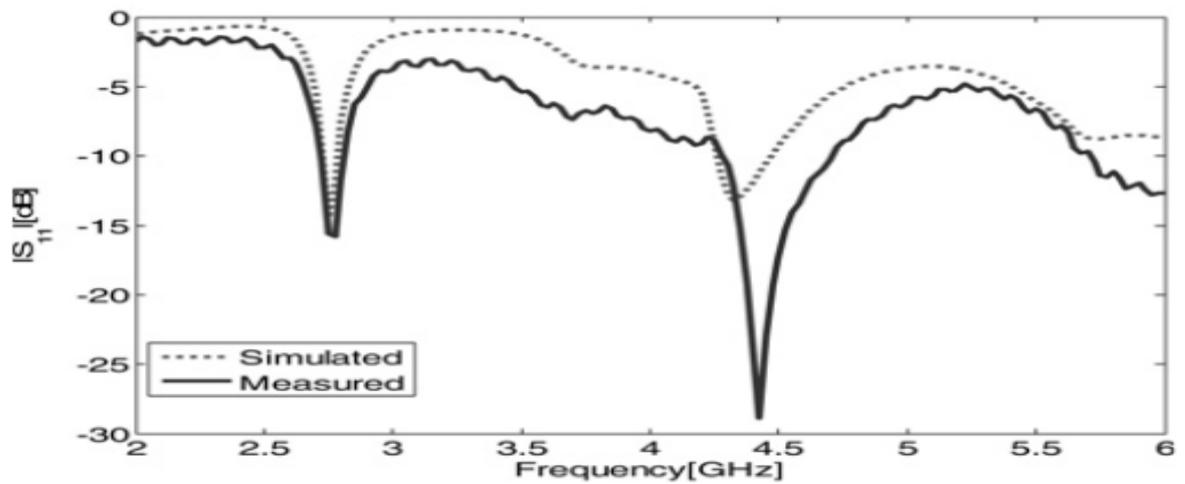


Figura 1.8. Coeficiente de reflexión de la antena con reconfiguración mecánica [14].

1.5.4 RECONFIGURACIÓN DE CAMBIO MATERIAL

Para este tipo de reconfiguración se aprovecha el cambio en las características del sustrato mediante el uso de materiales líquidos o ferritas que producen el cambio en la relación entre la permitividad y la permeabilidad. Un ejemplo de este tipo de reconfiguración son los cristales líquidos que pueden ser sometidos a una diferencia de potencial dando como resultado la modificación en la estructura interna del sustrato.

En el caso de las ferritas, para modificar su estructura, es necesario la presencia de campos eléctricos/magnéticos estáticos que logran alterar la permeabilidad relativa del material. Otro ejemplo es el uso de materiales inteligentes, que pueden adecuar las características del sustrato bajo el mismo principio. En las antenas con materiales inteligentes puede ocurrir el bombeo de fluidos en una estructura hueca de la antena dando como resultado que las características en la permeabilidad y permitividad de la antena adquieran propiedades únicas en el diseño planteado [13].

En la Figura 1.9 se presenta el diseño de una antena espiral cuadrada con una película delgada de dióxido de vanadio VO_2 , su fin es adecuar y minimizar las pérdidas además de mejorar la reconfiguración en frecuencia a través de filtros.

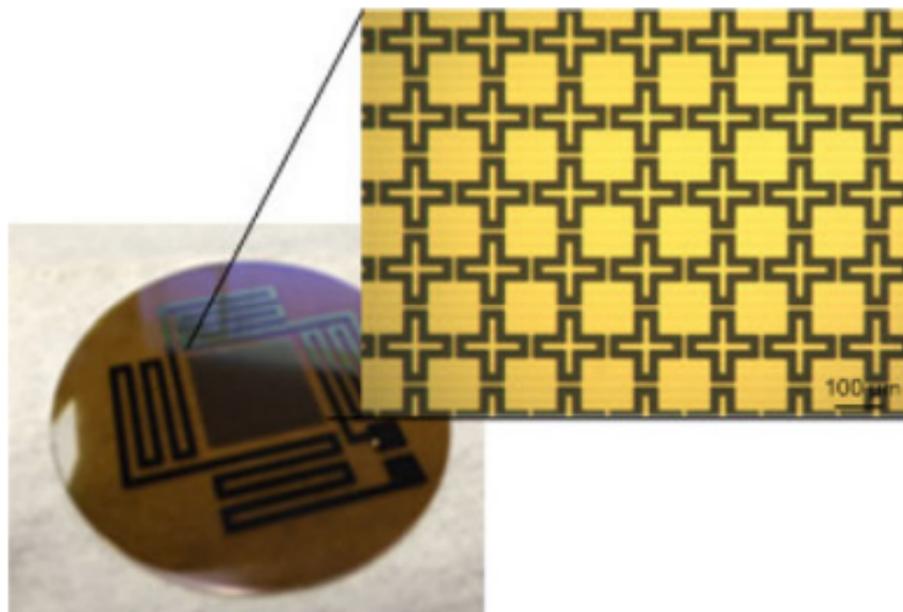


Figura 1.9. Antena con reconfiguración de cambio de material [15].

Los resultados obtenidos en la Figura 1.10, indican que la reconfiguración en frecuencia con la implementación del filtro produce un cambio en el ancho de banda ya que existe un leve desplazamiento que se debe a que la capa de dióxido de vanadio es susceptible a los cambios de temperatura.

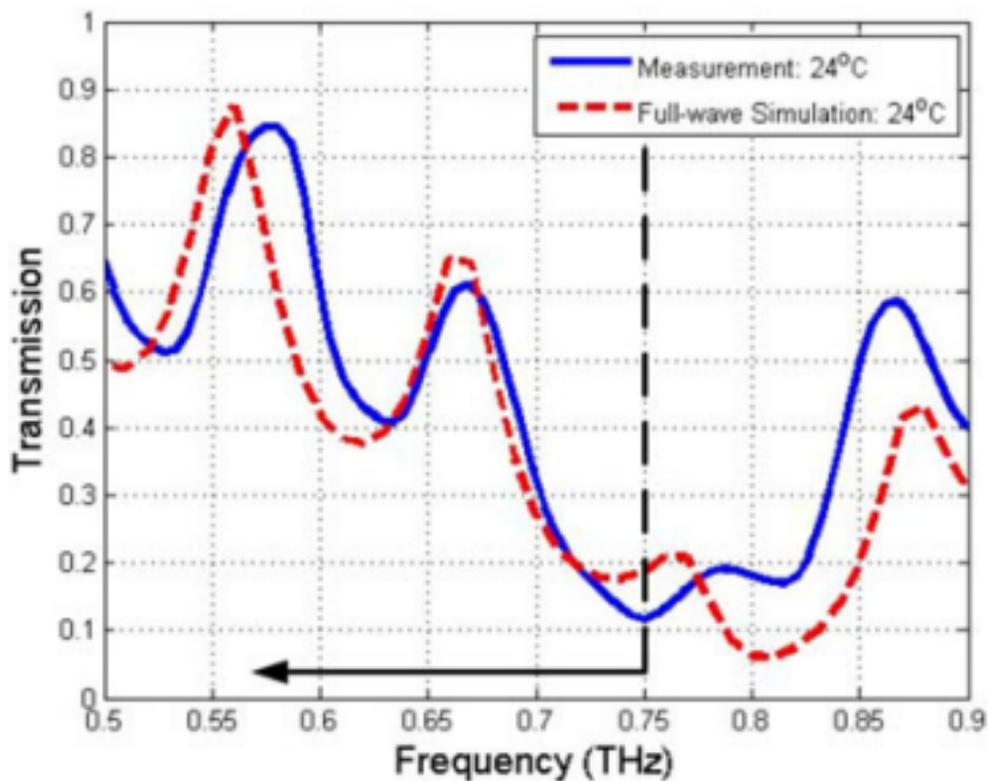


Figura 1.10. Coeficiente de transmisión de la antena con reconfiguración de cambio de material [15].

1.5.5 COMPARATIVA ENTRE LAS TÉCNICAS DE RECONFIGURACIÓN

Cada una de las técnicas de reconfiguración presenta ventajas o desventajas sobre otra, pero el objetivo sigue siendo el mismo: adecuar las características eléctricas/radiantes a las condiciones necesarias. En la actualidad la reconfiguración eléctrica es la más común en la propuesta de diseños dado a la alta eficiencia y facilidad de manejo, ya que, a comparación de otras técnicas, la implementación de interruptores es relativamente sencilla [16], [17].

En cuanto al uso de interruptores ópticos en una reconfiguración óptica se ha observado que su implementación no es del todo popular debido a que los sistemas ópticos presentan sistemas de activación complejos sumado el hecho de que el control de pérdidas todavía representa un reto en la estructura de diseños. La Tabla 1.1 presenta una comparativa de interruptores utilizados en reconfiguración eléctrica/óptica.

Tabla 1.1. Propiedades de Interruptores para reconfiguración eléctrica/óptica [13].

Interruptor	Voltaje [V]	Corriente [mA]	Potencia [mW]	Aislamiento	Perdidas [dB]	Tiempo [μs]
MEMS	20-100	0	0,05-0,1	Muy alto	0,05-0,2	1-200
Diodo PIN	3-5	3-20	5-100	Alto	0,3-1,2	$1-100 \times 10^{-6}$
Óptico (Si)	1,8-1,9	0-0,87	0-50	Alto	0,5-1,5	3-9

En la reconfiguración mecánica los diseños que muestran mejoras en sus características son limitados y en adición únicamente están definidas para realizar una sola función, por el contrario, en la reconfiguración por cambio de materiales la eficiencia es baja, ya que, adecuar correctamente las características del sustrato no asegura un desempeño óptimo. La Tabla 1.2 presenta un resumen de las ventajas y desventajas de las técnicas de reconfigurabilidad.

Tabla 1.2. Ventajas/desventajas técnicas de reconfigurabilidad [4], [13], [16]–[19].

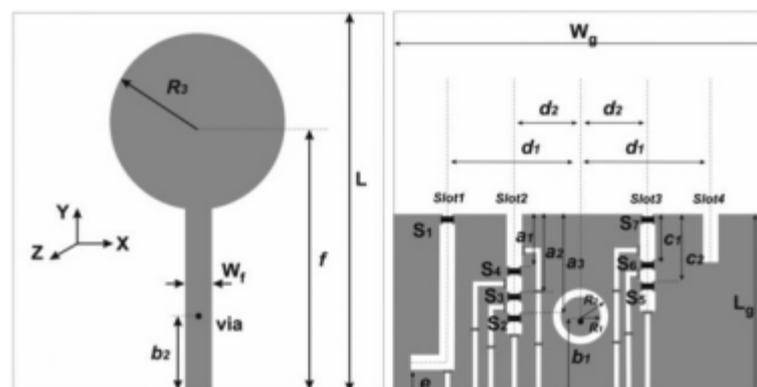
Técnica de reconfiguración	Ventajas	Desventajas
Eléctrica	- Fácil implementación - Bajo costo	- Estructura compleja - Uso de sistemas de polarización
Óptica	- No presenta distorsión por intermodulación	- Pérdidas significativas al sistema - Sistema mecánico de activación complejo
Mecánica	- No requiere de elementos activos	- Respuesta lenta - Utiliza fuente de poder
Cambio de material	- Estructura ligera	-Eficiencia baja -Aplicaciones limitadas

Cada técnica complementa limitaciones de diseño y la mejor técnica será aquella que mayor recubrimiento a dichas limitaciones presente. Por tanto, de acuerdo al fin del modelo desarrollado se evaluarán las condiciones de diseño para determinar la técnica de reconfigurabilidad a utilizar.

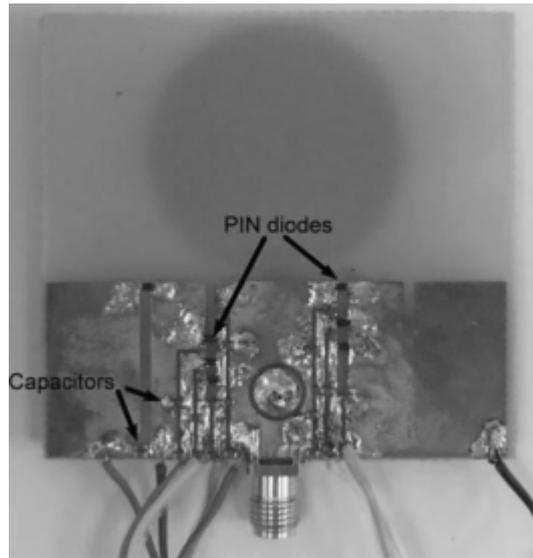
1.6 APLICACIONES PARA RECONFIGURACIÓN EN ANCHO DE BANDA

Algunas aplicaciones implementan la técnica de conmutación para adecuar inteligentemente el ancho de banda de una antena y su banda operativa. El objetivo principal está centrado en cambiar el ancho de banda a la banda o frecuencia requerida y no alterar alguna otra de las características radiantes, de esta forma se mantienen las mismas condiciones de rendimiento.

En la Figura 1.11 se detalla la estructura de una antena monopolar de disco con ranuras verticales y un anillo de ranuras en cortocircuito que está incorporado a su plano de masa. El fin de dicha antena es variar gradualmente el ancho de banda con la característica de mantener fijo la banda inferior y gradualmente variar la banda de frecuencia superior.



a)



b)

Figura 1.11. Antena monopolo para reconfiguración de ancho de banda. a) Diseño.
b) Estructura física [20].

El objetivo de las ranuras en el plano de masa son adecuar el rango de frecuencias como se observa en la Figura 1.12. Cada vez que aumenta la longitud de las ranuras se tiene incidencia en la frecuencia de resonancia para ajustar la banda operativa requerida.

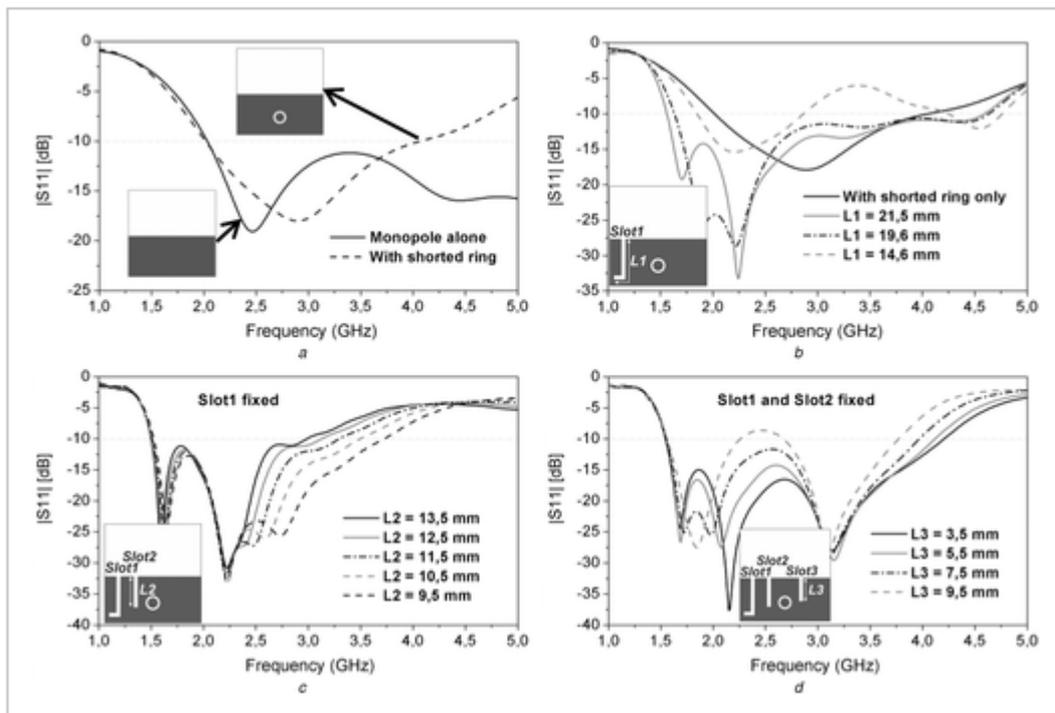
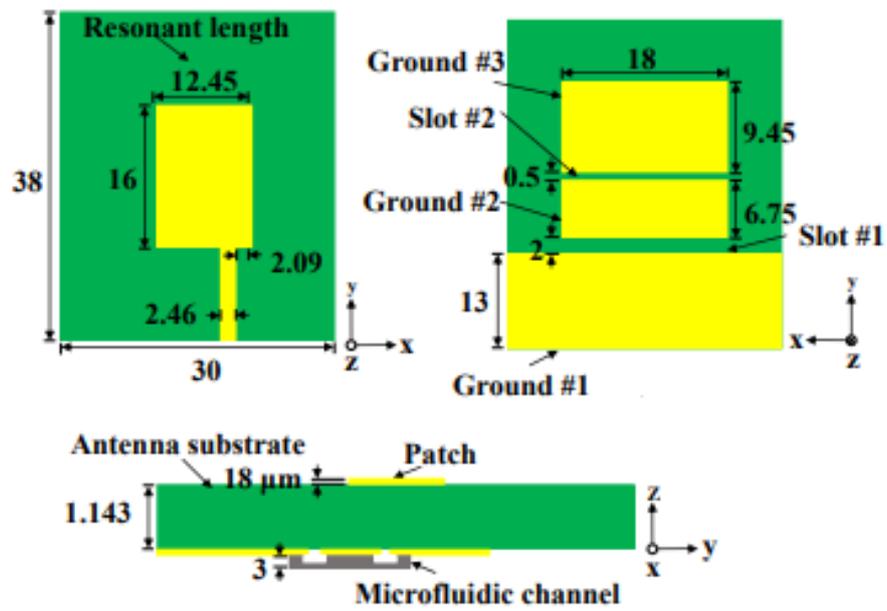
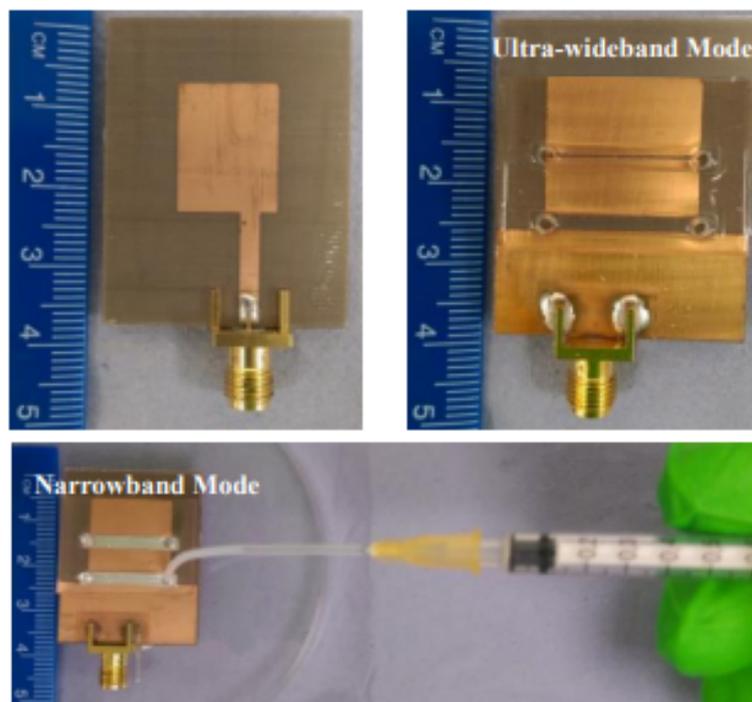


Figura 1.12. Parámetros S_{11} de la antena monopolo con variación en la longitud de las ranuras del plano de masa [20].

Otra aplicación de reconfiguración en ancho de banda se muestra en la Figura 1.13, en la cual se hace uso de metal líquido para cambiar la banda operativa donde el metal líquido actúa como un interruptor al conectar y desconectar áreas donde existen brechas eléctricas logrando que la estructura de la antena mejore el rendimiento en su banda operativa [21].



a)

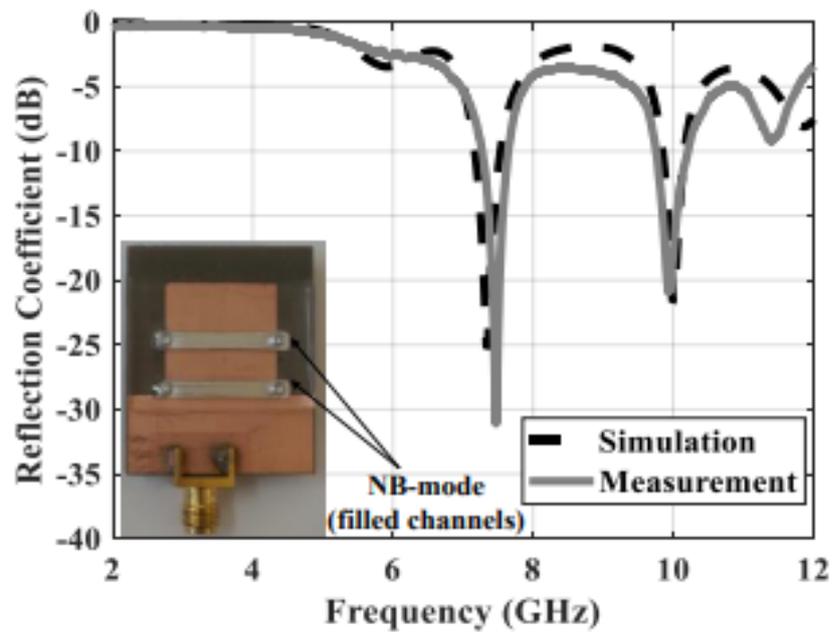


b)

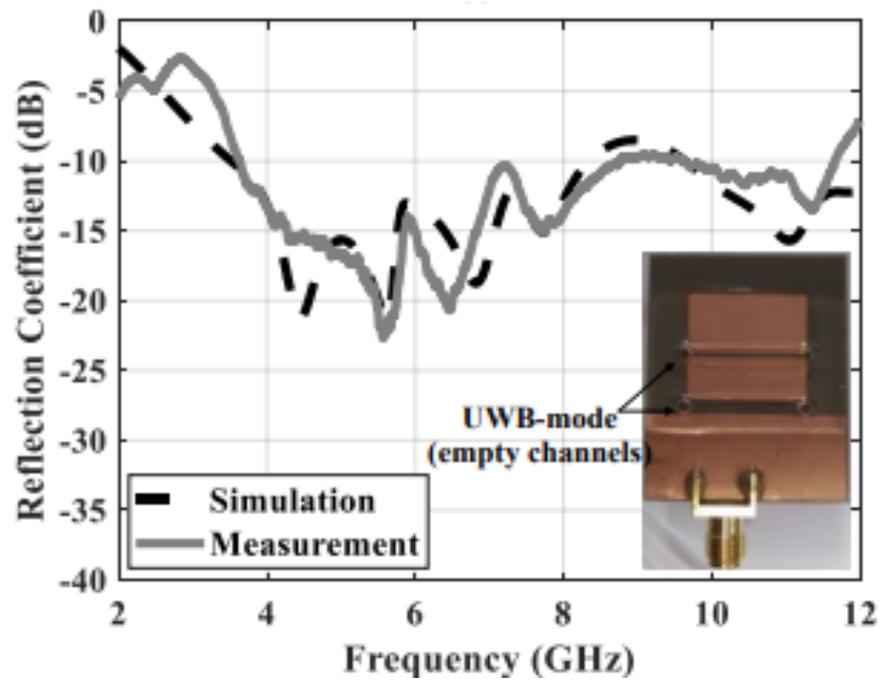
Figura 1.13. Antena monopolo de reconfiguración de ancho de banda con metal líquido.
a) Diseño. b) Estructura física [21].

El metal líquido es insertado en pequeñas bolsas el cual al ingresar conecta y desconecta los planos de masa produciendo un proceso de conmutación. El fin de insertar y retirar el metal líquido es contar con el control de la banda operativa, de modo que, al ingresar el líquido, la antena estará operativa en la banda estrecha como lo muestran los resultados en la Figura 1.14.

Específicamente las frecuencias donde existe resonancia serán 7,47 GHz y 7,34 GHz, para ajustar nuevamente la banda operativa se retira el líquido logrando operar entre 3,59 GHz a 11,69 GHz.



a)



b)

Figura 1.14. Parámetro S_{11} de antena con uso de metal liquido; a) en banda estrecha y; b) banda ultra ancha[21].

2 METODOLOGÍA

En esta sección se determina cuáles son los componentes que conforman la estructura completa de la antena, así como, el modelo que será planteado para lograr el proceso de reconfigurabilidad. En cada apartado se indican las dimensiones y ecuaciones que son utilizadas durante el modelamiento, simulación y leves modificaciones que surgieron para contar con resultados óptimos.

2.1 DISEÑO DE ANTENA PATCH CON ALIMENTACIÓN ACOPLADA POR RANURA

Para el proceso de diseño se utiliza una línea de transmisión *microstrip* de 50Ω , dado su facilidad de implementación. Únicamente resta determinar el ancho W que tendrá la línea para garantizar la impedancia requerida.

Debido a que se trata de una línea libre (sin ningún recubrimiento), es posible que las pérdidas de radiación sean elevadas y generen perturbaciones en los demás componentes de la antena, por lo tanto, para que las líneas de campo queden confinadas en el sustrato la permitividad relativa deberá ser grande.

Es así como el sustrato elegido para definir la línea de transmisión es el sustrato Rogers TMM 10 cuya permitividad relativa ϵ_{r1} es de 9,8 y el espesor h de 1,55 mm.

Las dimensiones de la línea *microstrip* se obtienen a través de la ecuación (2.1):

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \frac{W}{h} \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right\} \right] \frac{W}{h} \geq 2 \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde los coeficientes A y B se encuentran establecidos en las ecuaciones (2.2) y (2.3).

$$A = \frac{Z_c}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.2)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_c\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

El diseño utilizará el coeficiente A de la ecuación (2.2), por lo tanto, la relación W/h será menor a dos y será evaluado en una frecuencia de 3 GHz.

El valor del coeficiente A obtenido de la ecuación (2.2) es de 2,13 y al reemplazarlo en la ecuación (2.1) da como resultado una línea de transmisión cuyo ancho W_{linetx} corresponde a 1,51 mm.

La Figura 2.1 indica la estructura implementada bajo el dimensionamiento de las ecuaciones mostradas anteriormente. Las dimensiones a , b y L_{linetx} , por el momento, no son de interés para la descripción de la línea *microstrip*.

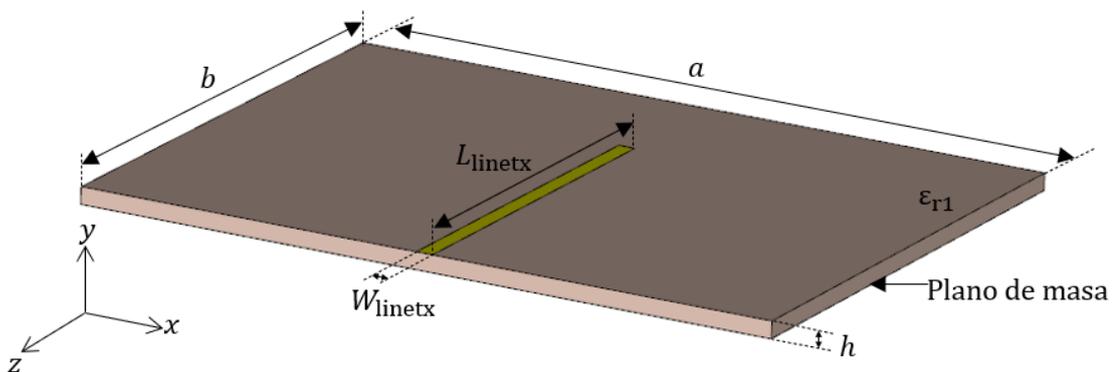


Figura 2.1. Línea de transmisión de 50 Ω .

La segunda parte consiste en definir la estructura del *slot* en el centro del plano de masa. El dimensionamiento del ancho del *slot* w_s es $\lambda/2$, pero debe ser ajustado aproximadamente ± 5 mm; la longitud del *slot* l_s puede ser de entre 3 mm y 5 mm, y tendrá un dimensionamiento rectangular. La estructura completa se muestra en la Figura 2.2.

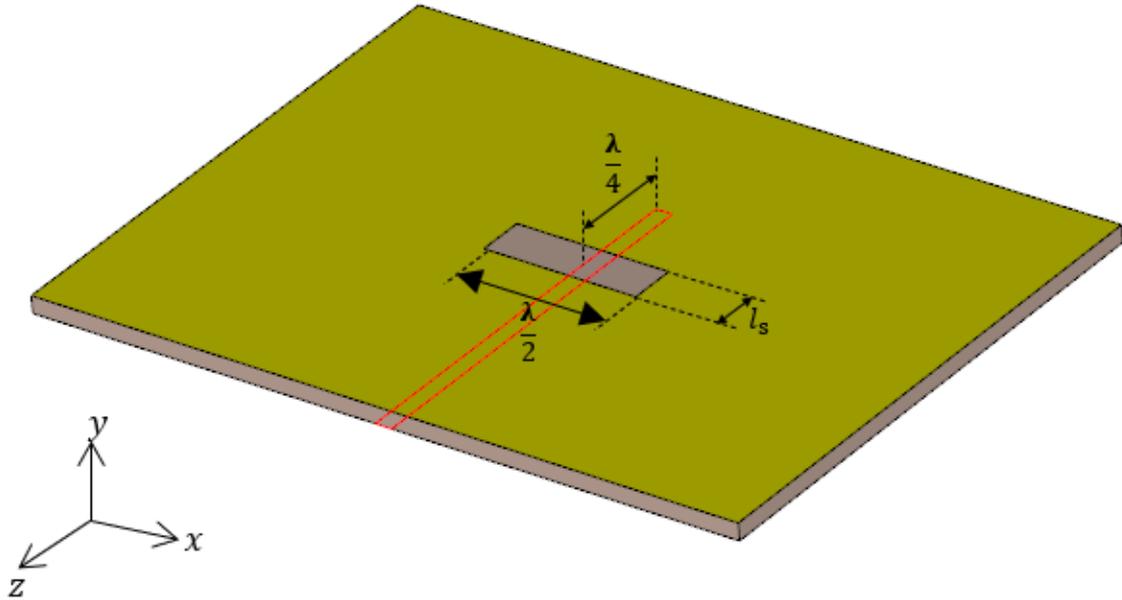
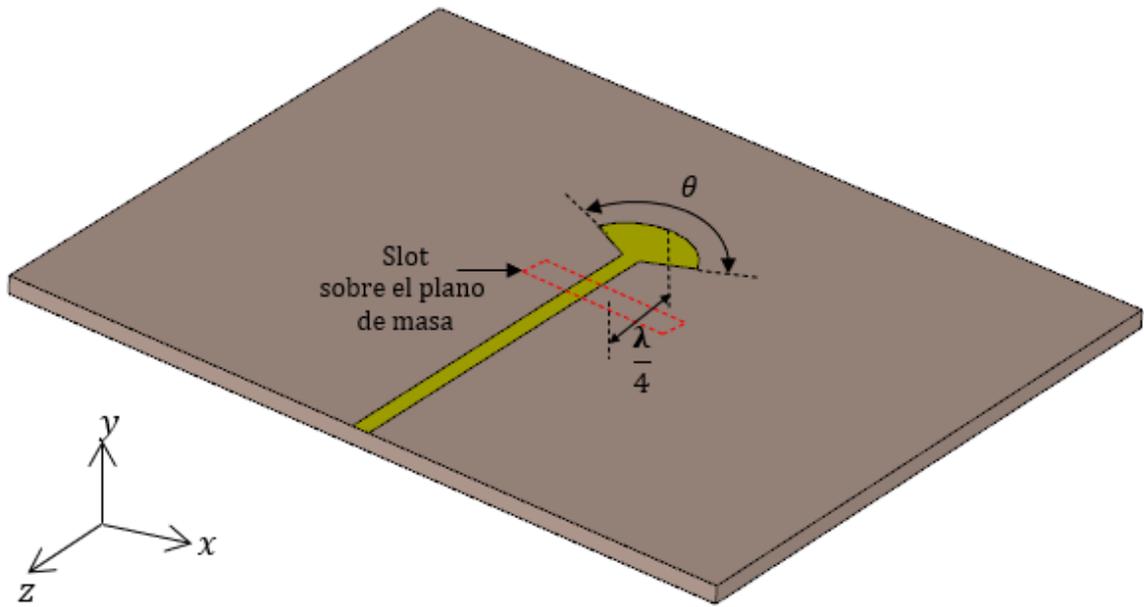


Figura 2.2. *Slot* sobre el plano de masa.

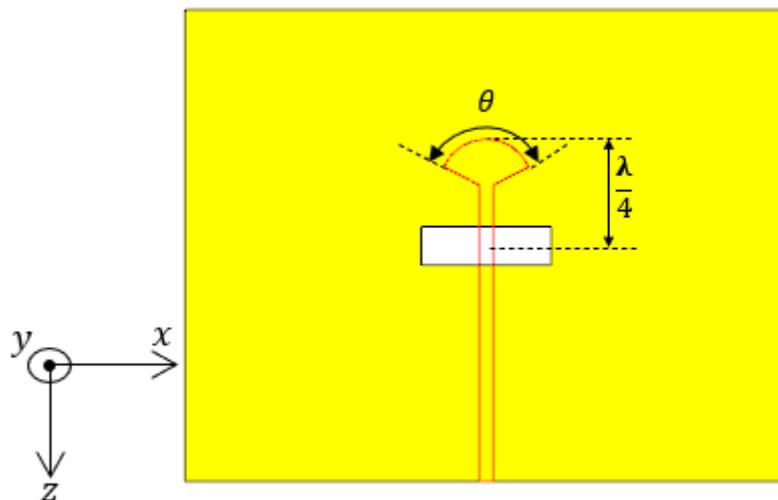
En esta parte del diseño debe existir una distancia aproximada $\lambda/4$ de longitud entre el centro del *slot* y el extremo superior de la línea de transmisión. La misma puede variar ± 3 mm sin que sobrepase en gran manera el dimensionamiento definido anteriormente.

Tras definir la distancia entre el *slot* y la línea de transmisión, resta por contar con el proceso que permitirá el análisis de reconfigurabilidad. El mismo será obtenido mediante la implementación de una corneta en el extremo superior de la línea *microstrip*, tal como se observa en la Figura 2.3.

Al variar el parámetro θ se amplía o reduce el ángulo de apertura de la corneta. Así también, la longitud entre la parte superior de la corneta y el *slot* de ser aproximadamente $\lambda/4$.



a)



b)

Figura 2.3. Estructura de corneta al final de la línea *microstrip* que excita el *slot*. a) Vista tridimensional. b) Vista frontal.

Luego sobre el plano de masa donde se encuentra el *slot* se modela la antena *patch*, la misma que utiliza el sustrato FR-4 de permitividad relativa ϵ_{r2} de 4,3 y mantiene el espesor de 1,55 mm.

Para establecer el dimensionamiento de la antena se hace uso de las ecuaciones (2.4) a la (2.8).

$$W = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.4)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0,33) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} + 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (2.6)$$

$$L = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{2} - 2\Delta L \quad (2.7)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{c_0}{f \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.8)$$

La Figura 2.4 indica como se encuentra definida la antena *patch* sobre el plano de masa.

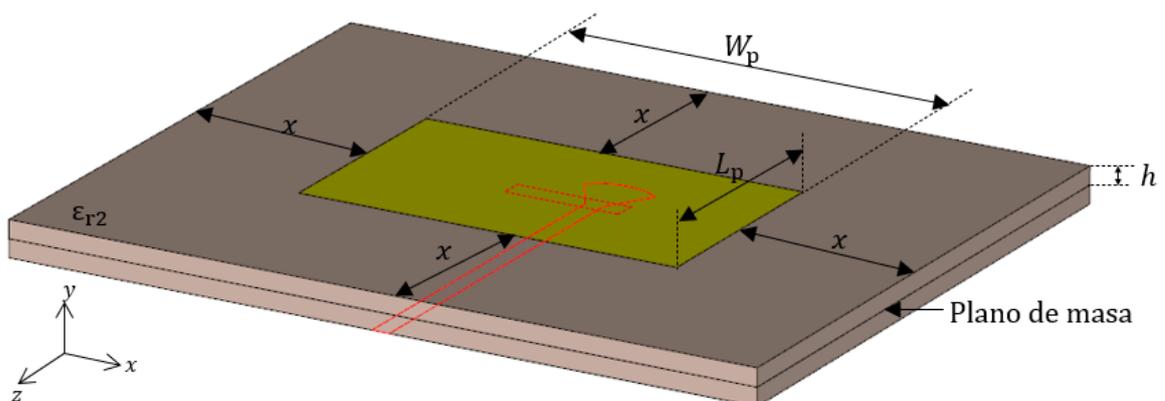


Figura 2.4. Estructura de antena *patch*.

También la estructura de la antena se sitúa a la misma distancia x del ancho W_p y largo L_p de la antena patch.

La Tabla 2.1 incluye las medidas de cada uno de los parámetros que se observan en las figuras anteriores.

Tabla 2.1. Dimensionamiento de la estructura completa.

Parámetro	Descripción	Medida [mm]
W_{linetx}	Ancho de la línea de transmisión	1,51,
L_{linetx}	Largo de la línea de transmisión	32,25
a	Ancho del substrato	64,98
b	Largo del susbtrato ⁷	51,07
h	Espesor del susbtrato	1,55
$\lambda/2$	Ancho del slot	15,01
l_s	Largo del slot	4,20
$\lambda/4$	Distancia entre slot y línea de transmisión	9,32
W_p	Ancho de la antena patch	32,94
L_p	Largo de la antena patch	19,30
x	Distancia entre W_p y L_p de antena patch	16

Con un ángulo de apertura cercano a 0° , se obtiene una línea de transmisión similar a la presentada en la Figura 2.1, al analizar el parámetro S_{11} se observa que a -10 dB el ancho de banda es muy reducido, como lo indica la Figura 2.5.

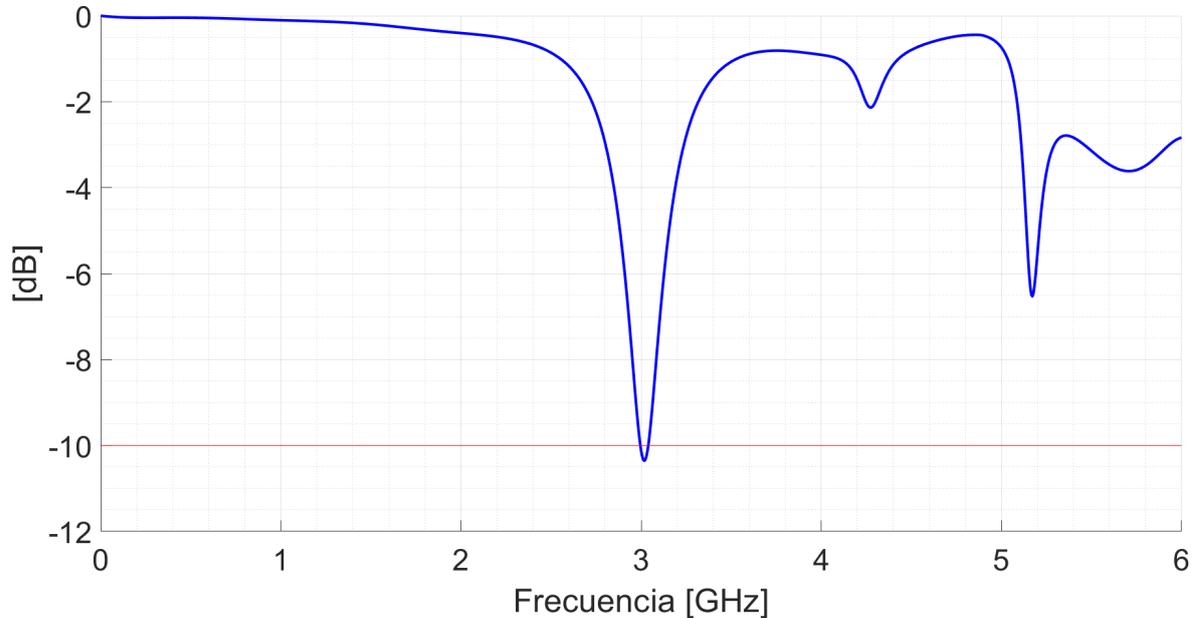


Figura 2.5. Parámetro S_{11} con ángulo de apertura de 0° .

Ahora el objetivo será evaluar si el ancho de banda puede incrementarse al probar distintos ángulos de apertura.

2.2 PROPUESTA DE RECONFIGURABILIDAD DEL ANCHO DE BANDA

Una de las propuestas para la reconfigurabilidad es la implementación de diodos en la estructura del *slot*, pero dada las limitaciones del simulador para realizar dicho proceso se optará por variar la apertura de la corneta definida en la línea *microstrip* como se indica en la Figura 2.3, de modo que, se evaluará si efectivamente la geometría de la línea de transmisión influye para contar con reconfigurabilidad del ancho de banda.

El proceso también tiene que garantizar que las demás características radiantes como directividad y diagrama de propagación y patrón de radiación no se vean afectadas al

modificar la apertura de la corneta pues el objetivo es lograr que el ancho de banda incremente o disminuya según sea el caso.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos en el proceso de simulación como gráficas y tablas que resumen la realización de distintas pruebas además de su análisis para comprobar si la propuesta de reconfigurabilidad cumple con el objetivo planteado y finalmente se incluyen las conclusiones y recomendaciones sugeridas.

3.1 RESULTADOS

El proceso de reconfigurabilidad del ancho de banda se estableció con la modificación de la línea de transmisión al definir una estructura en forma de corneta y a través de la variación de su ángulo de apertura, observar Figura 2.3.

Ahora al incrementar progresivamente el ángulo de la apertura de la corneta se obtienen los resultados mostrados en la Figura 3.1.

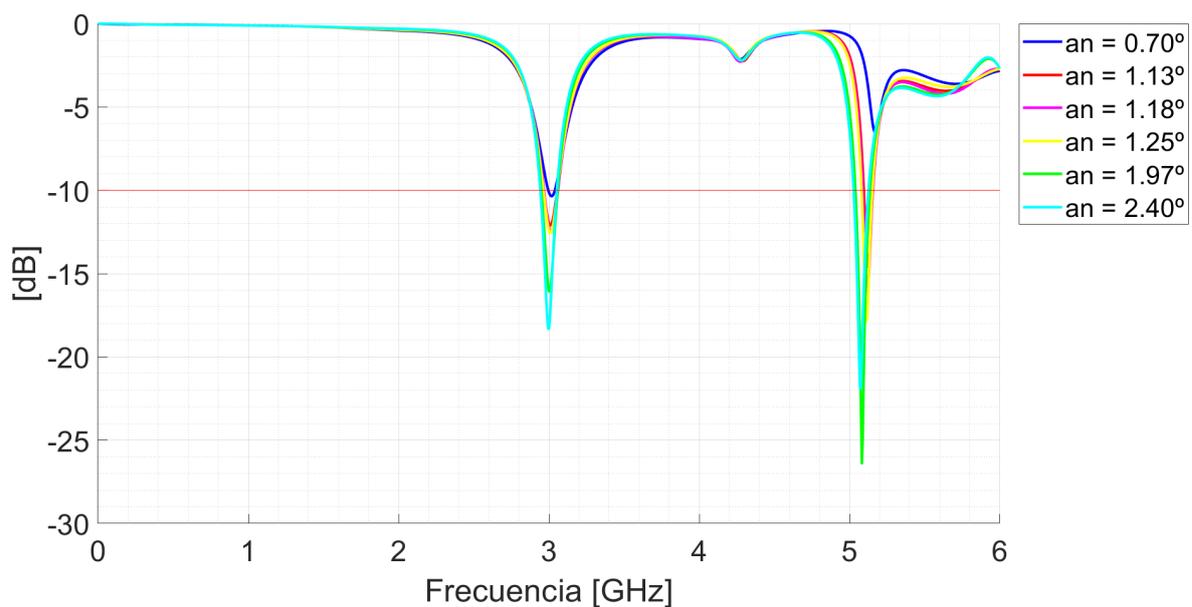


Figura 3.1. Parámetro S_{11} con barrido en el incremento del ángulo de apertura de la corneta de alimentación de la línea *microstrip*.

Se comprueba que efectivamente mientras mayor sea el ángulo de apertura de la corneta mayor será el ancho de banda. En la Tabla 3.1 se presenta un resumen detallado de los resultados obtenidos al variar el ángulo de apertura progresivamente.

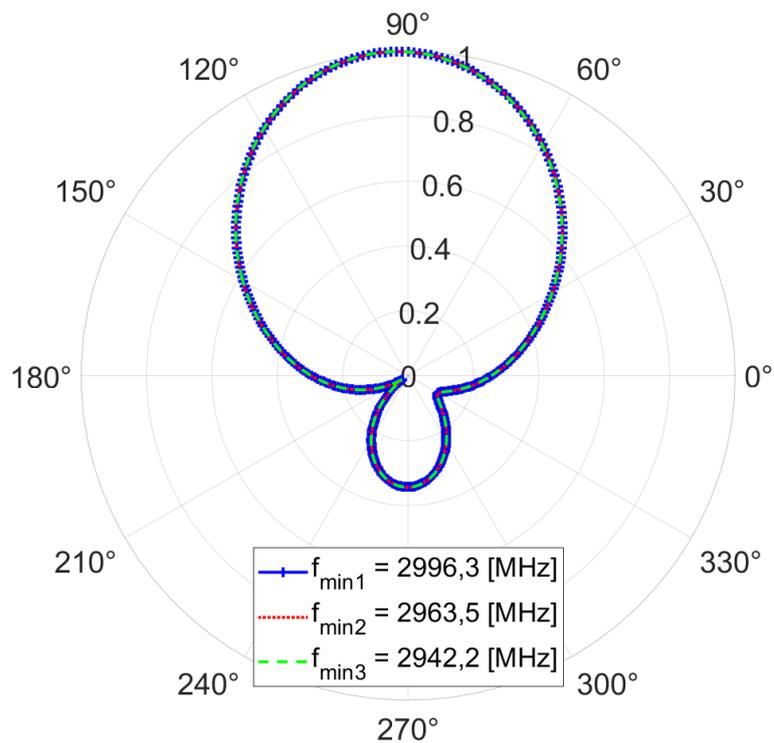
Tabla 3.1. Resultados de simulaciones realizadas.

No. Prueba	f_{min} [MHz]	f_c [MHz]	f_{max} [MHz]	BW [MHz]	Angulo [°]
1	2996,3	3008,00	3040,10	43,79	0,70
2	2995,6	3008,00	3043,50	47,87	0,71
3	2990,1	3008,00	3038,90	48,75	0,71
4	2990,8	3008,00	3041,90	51,07	0,72
5	2993,6	3001,00	3046,10	52,05	0,72
6	2989,2	3001,00	3049,30	60,09	0,72
7	2985,3	3001,00	3049,30	64,04	0,73
8	2982,1	3002,00	3049,10	66,94	0,88
9	2969,1	3001,00	3057,40	87,83	1,13
10	2967	3001,00	3060,90	93,93	1,18
11	2963,5	3001,70	3058,10	94,61	1,25
12	2959,6	3001,68	3057,70	98,10	1,34
13	2936,2	3011,00	3038,60	102,41	1,45
14	2933,6	3011,00	3073,10	103,43	1,60
15	2951,3	3011,00	3057,90	106,64	1,82
16	2949,5	3011,00	3058,40	108,89	1,97
17	2948,1	3011,00	3057,90	109,79	2,16
18	2943,6	3011,00	3053,80	110,17	2,25
19	2943,6	3011,00	3053,90	110,28	2,34
20	2942,6	3011,00	3053,00	110,39	2,40
21	2944,6	3011,00	3055,3	110,73	2,45
22	2941,1	3011,00	3051,8	110,75	2,51
23	2942,2	3011,00	3053,00	110,85	2,57

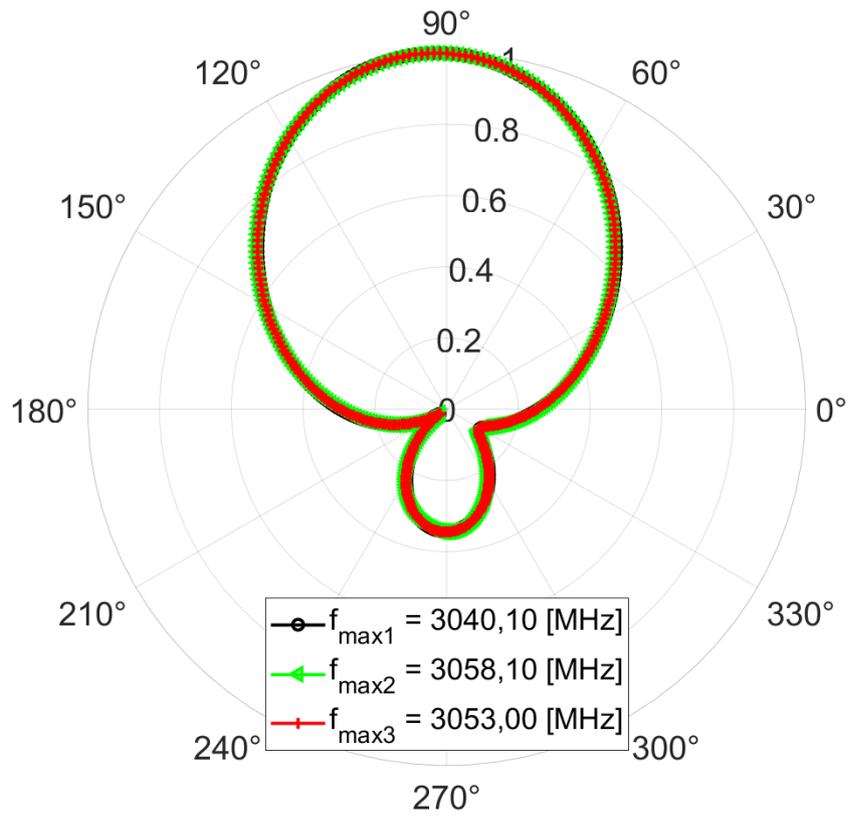
Como se observa existe una relación directa entre la apertura de la corneta y el ancho de banda, además el disminuir o aumentar el ángulo de apertura no afecta la frecuencia de resonancia.

Ahora se evaluará los gráficos de diagramas de radiación y se determinará que tan afectados se ven al variar el ángulo de apertura, dicho análisis estará centrado en las frecuencias máxima, mínima y frecuencia central.

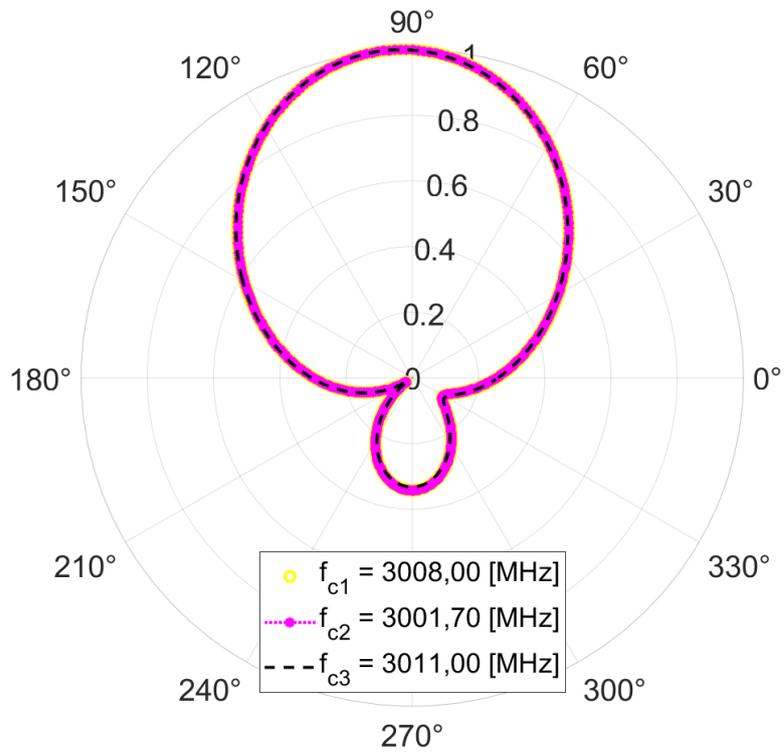
Se evaluará los valores de directividad, para las frecuencias determinadas anteriormente. En la Figura 3.2 y Figura 3.3, se indican los gráficos de diagrama de radiación normalizados en las frecuencias mínima, máxima, y central para tres pruebas de ejemplo de la Tabla 3.1.



a)

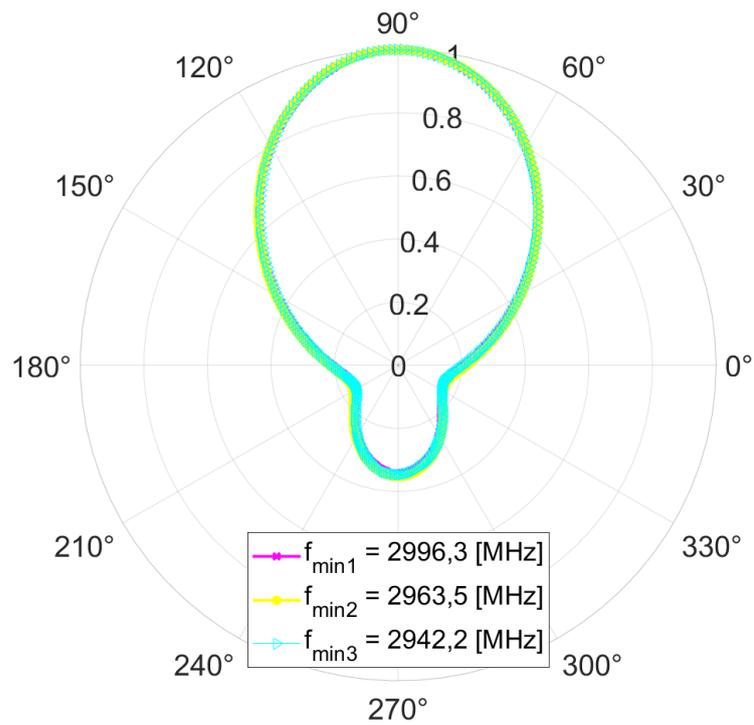


b)

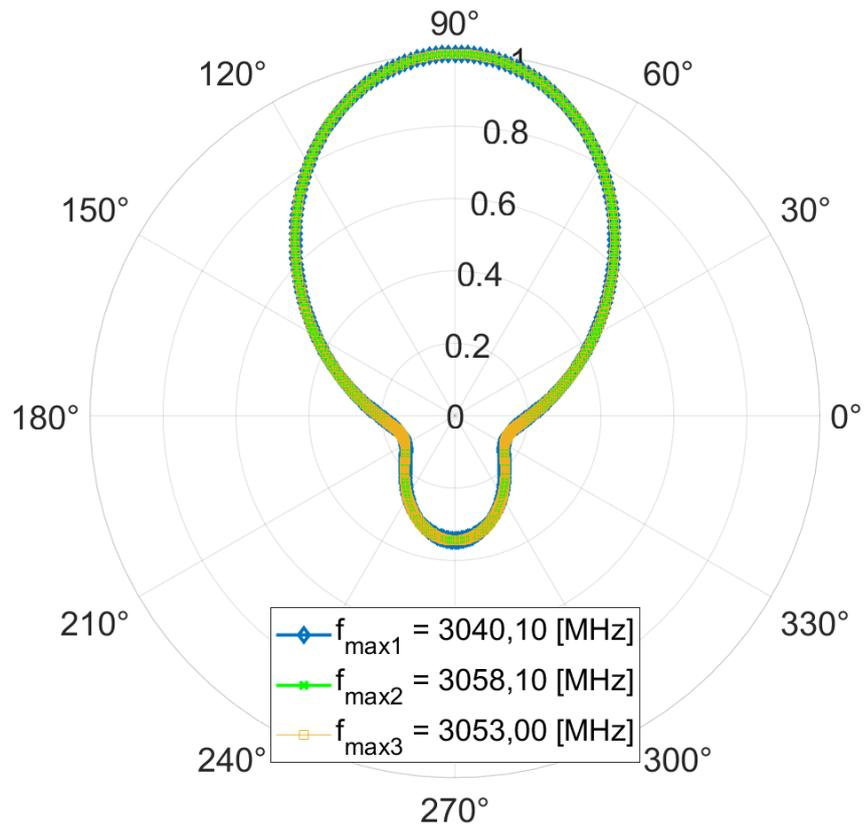


c)

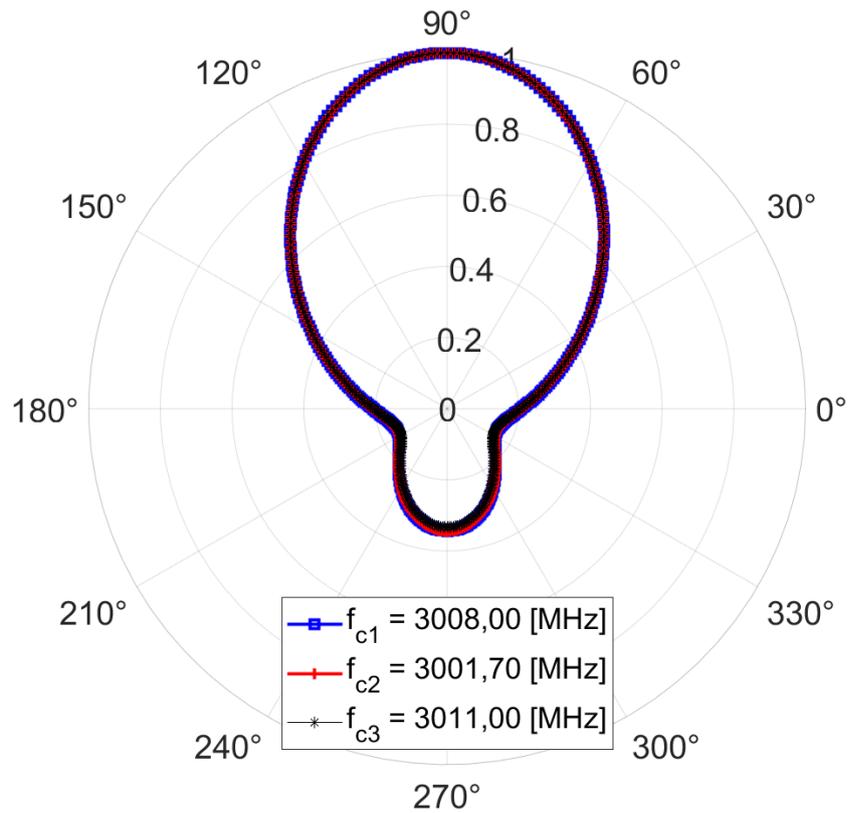
Figura 3.2. Diagramas de radiación de tres pruebas realizadas. Plano E a) Frecuencia mínima. b) Frecuencia máxima. c) Frecuencia central.



a)



b)



c)

Figura 3.3. Diagramas de radiación de tres pruebas realizadas. Plano H a) Frecuencia mínima. b) Frecuencia máxima. c) Frecuencia central.

La Tabla 3.2 presenta los valores de directividad obtenidos en cada una de las frecuencias donde se midió el ancho banda. Como se observa, tanto para las frecuencias mínimas, máximas y centrales, la directividad mantiene un valor aproximado de 7 dBi, por lo tanto, el hecho de variar la apertura de la corneta no influye en el valor de directividad de la antena.

Tabla 3.2. Resultados de directividad obtenida en cada una de las pruebas realizadas.

No. Prueba	Directividad f_{\min} [dBi]	Directividad f_{\max} [dBi]	Directividad f_c [dBi]
1	7,05	7,1	7,06
2	7,05	7,09	7,05
3	7,05	7,1	7,06
4	7,04	7,09	7,05
5	7,04	7,09	7,05
6	7,04	7,10	7,05
7	7,03	7,10	7,05
8	7,05	7,10	7,05
9	7,02	7,11	7,06
10	7,03	7,12	7,06
11	7,01	7,10	7,05
12	7,03	7,12	7,07
13	7,00	7,11	7,07
14	7,00	7,13	7,08
15	7,02	7,12	7,07
16	7,00	7,12	7,06
17	7,00	7,11	7,06
18	7,00	7,11	7,06
19	7,00	7,10	7,05
20	7,00	7,11	7,06
21	7,00	7,11	7,06
22	7,00	7,11	7,06
23	7,01	7,12	7,07

Finalmente, tras el análisis de cada uno de los resultados se comprobó que efectivamente el proceso de reconfigurabilidad a través de la estructura de corneta mediante la variación

del ángulo de apertura permite realizar el proceso de reconfigurabilidad del ancho de banda, además su diagrama de radiación y directividad no se ven alterados por dicho parámetro.

3.2 CONCLUSIONES

El estudio de las características radiantes/circuitales se cumplió en el presente proyecto debido a que se evaluó y comprobó el principal parámetro que garantiza contar con reconfigurabilidad, y es que, al alterar la característica física de la antena a través de la estructura en forma de corneta para reducir o ampliar el ancho de banda, no se vieron alterados los demás parámetros como los patrones de radiación que mantuvieron la misma forma en los diagramas de radiación y de igual manera su valor de directividad se mantuvo estable.

A través del resumen presentado se determinó no solo el cumplimiento de las características que confirman el proceso de reconfigurabilidad sino también se propuso la estructura modelo para la realización de pruebas de concepto.

En cada prueba y resultado se evaluó la efectividad de modificar la geometría de línea de alimentación mediante la variación del ángulo de apertura de la corneta donde se comprobó que al incrementarse también incrementaría el ancho de banda.

Para verificar que los patrones de radiación no presenten cambios significativos se obtuvieron las frecuencias máximas y mínimas donde se midió el ancho de banda, de modo que, al calcular los diagramas de radiación se validó que mantenían su forma entorno a dichas frecuencias y de igual manera el valor de directividad distintamente de la frecuencia mantiene un valor constante.

Finalmente, la estructura planteada representa otra novedosa forma de contar con reconfiguración en ancho de banda, pues se juntan dos ideas de reconfiguración como lo son el contar con una estructura con una forma geometría definida y hacer uso de ranuras, ya que, dichas alternativas están comprobadas y permiten establecer el ancho de banda

requerido. Uno de los posibles retos para el modelo planteado sea su implementación dada la extrema presión con la que se debe contar para visualizar los resultados simulados.

3.3 RECOMENDACIONES

Para no centrarse únicamente en una sola forma geométrica se sugiere probar distintas figuras como rectángulos, rombos círculos, etc., de modo que se analice si efectivamente un determinado grupo de figuras ayudan a contar con el proceso de reconfigurabilidad o incluso si mejoran los resultados que aquí se presentaron.

También se podría evaluar cual es la diferencia entre la permitividad de los substratos de la línea de transmisión y la antena *patch* dado que en el presente proyecto la permitividad del substrato de la línea era mayor a la del substrato de la antena y se podría analizarse que tan idénticos o distantes deben los valores de permitividad que garanticen contar con reconfigurabilidad en ancho de banda.

Adicional, se recomienda el estudio de un circuito activo de conmutación para la implementación de diferentes formas de corneta, el cual permita la reconfiguración de ancho de banda en una misma estructura radiante, como se propone en Figura 3.4.

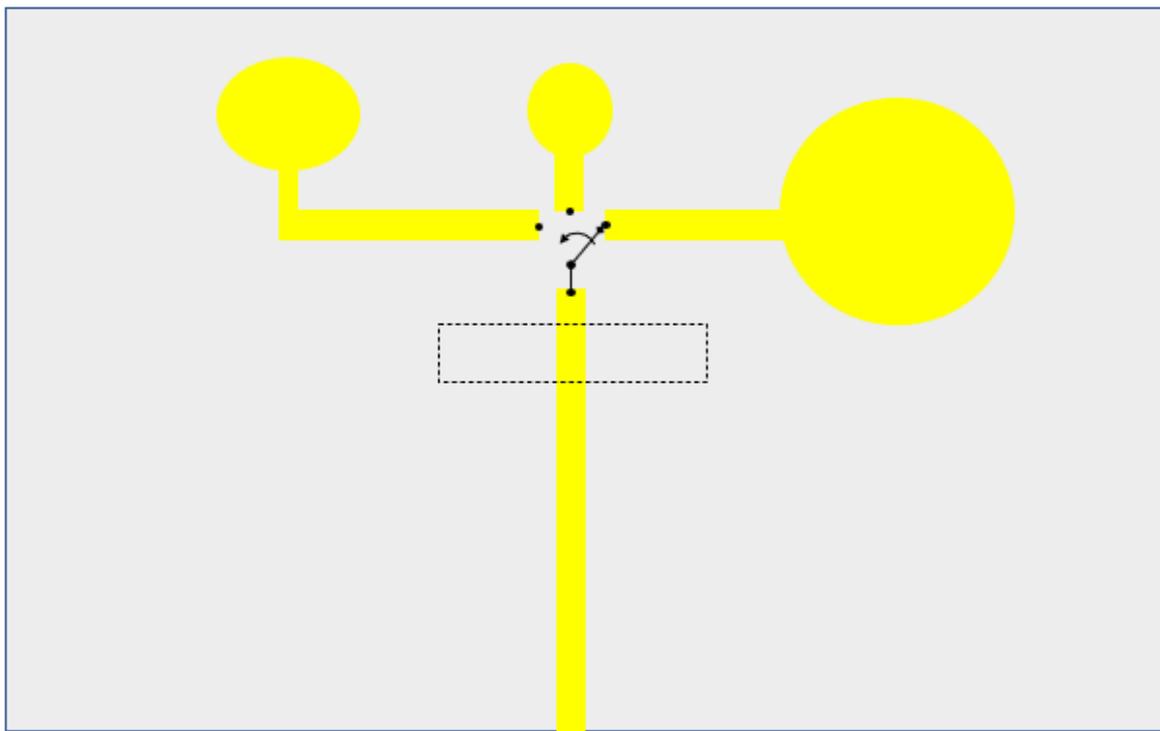


Figura 3.4. Modelo propuesto de circuito activo de conmutación con diferentes formas de corneta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. M. Huidobro, *Antenas de Telecomunicaciones*. 2013.
- [2] A. Cardama, L. Roca, M. Rius, J. Robert, and S. Blach, *Antenas*, Segunda. Valencia, 1998.
- [3] R. Haupt and M. Lanagan, "Reconfigurable Antennas," vol. 55, 2013.
- [4] J. Panagamuwa, A. Chauraya, and V. J., "Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, p. 1, 2006.
- [5] J. Kiriazi, H. Ghali, H. Ragaie, and H. Haddara, "Reconfigurable dual-band dipole antenna on silicon using series MEMS switches," *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. Dig.*, p. 1, 2003.
- [6] D. Roscoe, L. Shafai, A. Ittipiboon, M. Cuhaci, and R. Douville, "Tunable dipole antennas," *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, 1993.
- [7] Y. Cui, L. Wu, and R. Li, "Bandwidth Enhancement of a Broadband Dual-Polarized Antenna for 2G/3G/4G and IMT Base Stations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 12, pp. 1–2, 2018.
- [8] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*. 1981. doi: 10.1109/MAP.1981.27568.
- [9] Y. Tawk and C. Christodoulou, "A New Reconfigurable Antenna Design for Cognitive Radio".
- [10] J. Costantine, Y. Tawk, S. Barbin, and C. Christodoulou, "Reconfigurable Antenna: Design and Application".
- [11] A. Zohur, H. Mopidevi, D. Rodrigo, M. Unlu, L. Jofre, and B. A. Cetiner, "RF MEMS reconfigurable two-band antenna," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 72–75, 2013.
- [12] Y. Tawk, A. Albrecht, S. Hemmady, G. Balakrishnan, and C. Christodoulou, "Optically Pumped Frequency Reconfigurable Antenna Design," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 9, 2010.
- [13] R. Ojaroudi, Naser Jahanbakhsh, Haleh Al-Yasir, I Abdulkhaleq, Ahmed Abd-Alhameed, "Reconfigurable Antennas: Switching Techniques - A Survey," 2020.

- [14] J. Costantine and C. G. Tawk, Youssef Woodland, Jonathan Flaum, Noah Christodoulou, "Reconfigurable antenna system with a movable ground plane for cognitive radio," 2014.
- [15] V. Sanphuang, N. Ghalichechian, N. K. Nahar, and J. L. Volakis, "Reconfigurable THz Filters Using Phase-Change Material and Integrated Heater".
- [16] D. Zhao, L. Lan, Y. Han, F. Liang, Q. Zhang, and B. Wang, "Optically Controlled Reconfigurable Band-Notched UWB Antenna for Cognitive Radio Applications," 2014.
- [17] S. Zheng, X. Liu, and M. Tentzeris, "Optically controlled reconfigurable band-notched UWB antenna for cognitive radio system," 2014.
- [18] S. Mazlouman, A. Mahanfar, C. Menon, and R. Vaughan, "A review of mechanically reconfigurable antennas using smart material actuators," pp. 1076–1079.
- [19] R. Wang, M. Khan, M. Dickey, and J. Adams, "A compound frequency- and polarization- reconfigurable crossed dipole using multidirectional spreading of liquid metal," 2016.
- [20] A. Mansoul, F. Ghanem, M. R. Hamid, E. Salonen, and M. Berg, "Bandwidth reconfigurable antenna with a fixed lower and a variable upper limit," *IET Microwaves, Antennas Propag.*.
- [21] K. Y. Alqurashi *et al.*, "Liquid Metal Bandwidth Reconfigurable Antenna".