

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias  
en Electrónica y Telecomunicaciones**

---

**Diseño de una antena de microcinta reconfigurable con  
polarización lineal o circular para sistemas de  
comunicaciones inalámbricas**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Jesús Ángel Ortiz Martínez**

Ensenada, Baja California, México

2015

Tesis defendida por

**Jesús Ángel Ortiz Martínez**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. José Luis Medina Monroy**

Director del Comité

**Dra. María del Carmen Maya Sánchez**

**Dr. Arturo Velázquez Ventura**

**Dr. Salvador Villarreal Reyes**

**Dr. Héctor Manuel Escamilla Taylor**



---

**Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo**

Coordinador del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

---

**Dr. Jesús Favela Vara**

Director de Estudios de Posgrado

*Jesús Ángel Ortiz Martínez © 2015*

*Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor*

Resumen de la tesis que presenta **Jesús Ángel Ortiz Martínez**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Altas Frecuencias.

### **Diseño de una antena reconfigurable con polarización lineal o circular para sistemas de comunicaciones inalámbricas**

Resumen aprobado por:

---

Dr. José Luis Medina Monroy  
Director de Tesis

En los últimos años se ha incrementado la necesidad de contar con dispositivos móviles cada vez más pequeños y con mayor capacidad de transferencia de datos. Además, en aplicaciones de dispositivos móviles ocurren desvanecimientos de la señal debido a la polarización de las antenas. Debido a esto, surge la necesidad de contar con una sola antena que pueda reconfigurarse de manera automática para cubrir diferentes estándares de comunicaciones y diversas aplicaciones, permitiendo a la vez reducir el espacio que ocupa la antena en el dispositivo. Resulta conveniente reconfigurar la polarización de las antenas, para cambiar de una polarización lineal a una circular y viceversa. La polarización circular es menos sensible a los desvanecimientos que la polarización lineal, pero se tienen pérdidas en la señal que acortan la distancia del enlace. En este trabajo de tesis se presenta el diseño de una antena de microcinta reconfigurable con capacidad de cambiar la polarización entre cuatro estados de polarización diferentes, con aplicación en sistemas de comunicaciones inalámbricos que operan en la banda ISM de 2.4 a 2.483 GHz. En esta banda se cubren diferentes estándares de dispositivos de comunicación inalámbrica como Wi-Fi (802.11b,g,n), Bluetooth (802.15.1), ZigBee (802.15.4), RFID (18000-4) y en algunas aplicaciones satelitales. Se propone una estructura de antena reconfigurable basada en un parche cuadrado, al cual se le trunca un par de esquinas opuestas para lograr la polarización circular. Para cambiar la polarización de la antena se emplean cuatro diodos PIN, que modifican la topología y el punto de alimentación del parche para lograr los 4 estados de polarización (RHCP, LHCP, VLP y HLP). El control de la polarización se realiza desde una PC mediante el software MATLAB, a través de un microcontrolador Arduino Nano que alimenta a 4 reguladores de voltaje y que encienden o apagan a los diodos PIN de la antena. El diseño y análisis de la antena y sus circuitos se hicieron empleando un sustrato FR4 y utilizando el software de análisis electromagnético en 3D CST Microwave Studio 2012®. La antena resultante es pequeña (74x65 mm), de bajo costo y de bajo consumo de potencia al utilizar simultáneamente 3 diodos PIN encendidos. Los resultados obtenidos proporcionan pérdidas por retorno menores a -10 dB en la banda de 2.45GHz, y una relación axial menor a 3 dB en las polarizaciones circulares.

Palabras clave: **Antena reconfigurable, polarización, relación axial, polarización cruzada, diodo PIN.**

Abstract of the thesis presented by **Jesús Ángel Ortiz Martínez**, as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in electronics and telecommunications with orientation in high frequency.

**Design of a reconfigurable antenna with linear or circular polarization for wireless communication systems.**

Abstract approved by:

---

Dr. José Luis Medina Monroy  
Thesis Advisor

In recent years it has been increased the need of small mobile devices with a high data transfer capability. Furthermore, in mobile device applications signal fadings due to antenna polarization occur. Due to this, is necessary to have a single antenna that can be reconfigured automatically to cover different communications standards and various applications, allowing a space reduction of the antenna on the device. It is convenient to reconfigure the antenna polarity to change from a linear to a circular polarization and viceversa. However, circular polarization is less sensitive to fading than linear polarization, but have signal loss that reduce the link distance. In this thesis work, the design of a reconfigurable microstrip antenna capable of changing the polarization from four different polarization states, with applications in wireless communication systems operating in the ISM band from 2.4 to 2.483 GHz is presented. In this band different standards of wireless communication devices such as Wi - Fi (802.11b,g,n), Bluetooth (802.15.1), ZigBee (802.15.4), RFID (18000-4), and some satellite applications are covered. A reconfigurable antenna structure based on a square patch is proposed, which consist of a pair of opposite truncated corners to achieve circular polarization. To change the antenna polarization four PIN diodes are used, which change the topology and the feed point of the patch to achieve one of the four states of polarization (RHCP, LHCP , VLP and HLP). The polarization control is performed from a PC using the MATLAB software, through a microcontroller Arduino Nano that provides 0 or 5V to four voltage regulators that turn on and off the four PIN diodes of the antenna. The design and analysis of the antenna and its circuits, were made on a FR4 substrate and using the electromagnetic analysis software 3D CST Microwave Studio 2012®. The resulting antenna is small (74x65 mm), with low cost and have low power consumption by using simultaneously 3 PIN diodes (30mA max). Results provide return losses below -10 dB at 2.45GHz band, and axial ratio less than 3 dB in the circular polarization states.

**Keywords: Reconfigurable antenna, polarization, axial ratio, cros-polarization, PIN diode.**

## Dedicatoria

*A mis padres Felipe y Juana, a mi hermano Adrián y a mi novia Nohely.*

## Agradecimientos

A mis padres Felipe y Juana, por siempre brindarme su apoyo incondicional y traerme a esta etapa de mi vida a la que sin ellos no hubiera podido llegar. Les estaré siempre agradecido.

A mi hermano Adrián por siempre estar ahí para hacerme compañía en las desveladas.

A mi novia Nohely que me brindó el apoyo y motivación necesarios para completar este trabajo de tesis.

A mi director de tesis, el Dr. José Luis Medina Monroy, por dirigir acertadamente este trabajo de tesis, compartir sus conocimientos conmigo, por su paciencia, sus consejos y el gran compromiso que tuvo durante todo este trabajo de tesis.

A los miembros de mi comité de tesis: Dra. Carmen Maya, Dr. Arturo Velázquez, Dr. Salvador Villarreal y Dr. Héctor Escamilla, por sus consejos y recomendaciones tan acertadas que ayudaron a que se completara este trabajo de tesis.

Al CONACYT y CICESE por el apoyo económico de la colegiatura y manutención, sin el cual este trabajo no hubiera sido posible.

Al personal de CICESE por siempre atender oportunamente y con amabilidad.

A mis amigos de la maestría: Rafael, Julio, Alfredo, Fernanda, Victor, Reinaldo y Armando por sus consejos, apoyo y compañía tanto en los momentos de diversión y risas como en los difíciles.

## Tabla de contenido

<b>Resumen español</b> .....	ii
<b>Resumen inglés</b> .....	iii
<b>Dedicatorias</b> .....	iv
<b>Agradecimientos</b> .....	v
<b>Lista de figuras</b> .....	vi
<b>Lista de tablas</b> .....	vii
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	1
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivos.....	7
1.2.1 Objetivo general .....	7
1.2.2 Objetivos particulares.....	7
1.3 Estructura de la tesis .....	8
<b>Capítulo 2. Fundamentos y parámetros de antenas</b> .....	9
2.1 Introducción .....	9
2.2 Definición y tipos de antenas.....	9
2.2.1 Definición de antena.....	9
2.2.2 Tipos de antena.....	9
2.2.2.1 Antena de alambre .....	9
2.2.2.2 Antena de apertura .....	10
2.2.2.3 Antena de microcinta .....	11
2.2.2.4 Antena reflectora .....	11
2.2.2.5 Antenas de lente.....	12
2.2.2.6 Agrupaciones de antenas.....	13
2.2.2.7 Antenas reconfigurables .....	13
2.3 Parámetros de antenas .....	14
2.3.1 Impedancia.....	14
2.3.2 Directividad.....	15

2.3.3 Eficiencia .....	16
2.3.4 Ancho de banda .....	16
2.3.5 Ganancia .....	16
2.3.6 Regiones de campo .....	17
2.3.7 Patrón de radiación .....	17
2.3.8 Polarización .....	18
2.3.8.1 Definición .....	18
2.3.8.2 Polarización lineal .....	19
2.3.8.3 Polarización circular .....	19
2.3.8.4 Polarización elíptica .....	20
2.3.9 Relación axial .....	21
2.3.10 Cros-polarización .....	21
2.3.11 Factor de pérdidas por polarización .....	22
2.3.11 Efecto de borde .....	22
2.3.12 Métodos de análisis .....	23
<b>Capítulo 3. Metodología del diseño de la antena .....</b>	<b>24</b>
3.1 Introducción .....	24
3.2 Diagrama de flujo de la metodología del diseño .....	24
3.3 Elección de la frecuencia de operación de la antena .....	26
3.4 Elección del sustrato .....	26
3.5 Elección del interruptor de RF .....	27
3.6 Elección de la topología de la antena .....	30
3.7 Cálculo de las dimensiones del parche .....	30
3.8 Análisis electromagnético del parche cuadrado .....	31
3.8.1 Optimización de las dimensiones del parche .....	31
3.8.1.1 Optimización del punto de alimentación .....	32
3.8.1.2 Optimización del largo del parche .....	33
3.8.1.2.1 Optimización del punto de alimentación .....	34
3.8.2 Análisis del parche con esquinas truncadas .....	35
3.8.2.1 Optimización de las dimensiones del parche con las esquinas truncadas .....	39
3.9 Diseño de la red de alimentación en la parte posterior del parche .....	41
3.9.1 Diseño de la red de alimentación en el sustrato grueso .....	41

3.9.1.2 Cálculo de la línea de $50 \Omega$ en el sustrato grueso .....	41
3.9.1.3 Topologías propuestas con el sustrato grueso .....	42
3.9.2 Diseño de la red de alimentación en el sustrato delgado.....	44
3.9.2.1 Cálculo de la línea de $50 \Omega$ en el sustrato delgado .....	45
3.9.2.2 Topología propuesta de la red de alimentación con el sustrato delgado .....	46
3.10 Diseño del circuito de alimentación para los diodos PIN.....	48
3.11 Optimización de las dimensiones del parche de la antena .....	51
3.11.1 Polarización lineal horizontal sin circuitos de alimentación.....	51
3.11.2 Polarización circular de mano derecha sin circuitos de alimentación .....	53
3.11.3 Polarización lineal vertical sin circuitos de alimentación .....	54
3.11.4 Polarización circular de mano izquierda sin circuitos de alimentación.....	55
3.12 Optimización de las dimensiones de la antena .....	57
3.13 Diseño final de la antena de polarización reconfigurable .....	61
3.13.1 Parche radiador frontal.....	62
3.13.3 Vista lateral de la antena.....	63
3.13.4 Vista posterior de la antena reconfigurable.....	64
3.13.4.1 Alimentación de la antena .....	64
3.13.4.2 Circuito de alimentación de los diodos PIN .....	66
3.14 Resultados de las diferentes configuraciones de polarización.....	69
3.14.1 Polarización lineal horizontal HLP .....	70
3.14.2 Polarización circular de mano derecha RHCP .....	74
3.14.3 Polarización lineal vertical VLP .....	78
3.14.4 Polarización circular de mano izquierda LHCP .....	83
3.15 Elección del microcontrolador para el control de la polarización.....	87
3.16 Diseño de los reguladores de voltaje .....	88
3.17 Programa para elegir el estado de polarización .....	90
3.18 Sistema completo de la antena con polarización reconfigurable .....	91
<b>Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados .....</b>	<b>93</b>

<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	97
5.1 Introducción .....	97
5.2 Conclusiones generales .....	97
5.2 Aportaciones.....	99
5.3 Recomendaciones y trabajo futuro.....	100
<b>Lista de referencias bibliográficas</b> .....	102
Apendice 1. Hoja de datos del diodo PIN MA4AGBLP912 .....	106
Apendice 2. Código del programa en MATLAB para el control de la polarización.....	110

## Lista de figuras

Figura 1. Geometría de la antena reconfigurable propuesta por (G. Monti et al, 2009).	4
Figura 2. Diseño de antena reconfigurable (G. Beddeleem et al, 2008).	5
Figura 3. Diseño de la antena propuesto por (Fukusako et al, 2003).	6
Figura 4. Diseño de la antena propuesto por (Seongmin et al, 2012).	7
Figura 5. Antenas de alambre: a) Dipolo b) Lazo c) Helicoidal	10
Figura 6. Antenas de apertura: a) Bocina piramidal b) Bocina circular c) guía de onda rectangular (modificado de Balanis, 2005, pag. 5)	10
Figura 7. Antenas de parche a) circular y b) rectangular.	11
Figura 8. Antenas reflectoras: a) Alimentación frontal, b) Cassegrain c) Reflector de esquina (modificada de Balanis, 2005, pág. 8).	12
Figura 9. Configuraciones típicas de antenas de lente (modificado de Balanis, 2005, pág. 8).	13
Figura 10. Regiones de campo de la antena (Balanis, 2005, pág. 34).	17
Figura 11. Representación tridimensional del patrón de radiación de una antena y sus planos E y H (Cardama et al, 2002, pág. 20).	18
Figura 12. Polarización lineal de los campos eléctricos y magnéticos (Nave C.R., 2000).	19
Figura 13. Polarización circular (Nave C.R., 2000).	20
Figura 14. Polarización elíptica (Nave C.R., 2000).	21
Figura 15. Efecto de borde en un parche de microcinta.	23
Figura 16. Diagrama a bloques del proceso de diseño de la antena reconfigurable.	25
Figura 17. Circuito utilizado para efectuar el análisis de los parámetros del diodo PIN.	28
Figura 18. Parámetro S11 del diodo PIN en encendido (línea sólida) y apagado (línea punteada).	29
Figura 19. Parámetro S21 del diodo PIN en encendido (línea sólida) y apagado (línea punteada).	29
Figura 20. Parche cuadrado con dimensiones LxL analizado en CST.	32
Figura 21. Parámetro S11 resultante de la variación fina del valor del parámetro Feed.	33

Figura 22. Parámetro S11 resultante de la segunda variación de L en pasos de 0.1mm. .....	34
Figura 23. Triángulo rectángulo equilátero resuelto para obtener el valor de CPH. ....	37
Figura 24. Parche con truncaciones en las esquinas.....	37
Figura 25. Parámetro S11 del análisis del parche con CPH= 16.6 mm. ....	38
Figura 26. Relación axial del parche con las esquinas truncadas y CPH=16.6 mm. ...	39
Figura 27. Parámetro S11 del análisis número 16. ....	40
Figura 28. Relación axial del análisis número 16. ....	40
Figura 29. Ventana de la herramienta LineCalc en el software ADS. ....	42
Figura 30. Ventana de la herramienta LineCalc del software ADS para el sustrato delgado.....	45
Figura 31. Vista de la geometría diseñada para conectar el puerto.....	46
Figura 32. Otro ángulo de la vista de la geometría en donde va conectado el puerto. ....	47
Figura 33. Vista de la red de alimentación del parche. ....	47
Figura 34. Acercamiento de la red de alimentación del parche. ....	48
Figura 35. Esquemático utilizado en ADS para el diseño del stub a tierra.....	49
Figura 36. Parámetro S11 (línea sólida) y S21 (línea punteada) del stub a tierra. ....	49
Figura 37. Diagrama esquemático en ADS para el diseño de los filtros de alimentación de los diodos PIN. ....	50
Figura 38. Parámetro S11 (línea sólida) y S21 (línea punteada) del filtro de alimentación de los diodos PIN. ....	50
Figura 39. Parámetro S11 de la polarización lineal horizontal sin circuitos de alimentación. ....	52
Figura 40. Relación axial de la polarización lineal horizontal sin circuitos de alimentación. ....	52
Figura 41. Parámetro S11 de la polarización circular de mano derecha sin circuitos de alimentación. ....	53
Figura 42. Relación axial de la polarización circular de mano derecha sin circuitos de alimentación. ....	54
Figura 43. Parámetro S11 de la polarización lineal vertical sin circuitos de alimentación. ....	54
Figura 44. Relación axial de la polarización lineal vertical sin circuitos de alimentación. ....	55

Figura 45. Parámetro S11 de la polarización circular de mano izquierda sin circuitos de alimentación. ....	56
Figura 46. Relación axial de la polarización circular de mano izquierda sin circuitos de alimentación. ....	56
Figura 47. Parámetro S11 de los análisis 6(línea sólida), 12(línea rayada) y 18 (línea punteada). ....	58
Figura 48. Relación axial de los análisis 6(línea sólida),12(línea rayada) y 18 (línea punteada). ....	58
Figura 49. Parámetro S11 del análisis con las dimensiones L=29.5mm, CPH=17.5mm y Feed=6.3mm. ....	59
Figura 50. Relación axial del análisis con las dimensiones L=29.5mm, CPH=17.5mm y Feed=6.3mm. ....	60
Figura 51. Parámetro S11 resultante de la optimización de la antena en polarización RHCP. ....	61
Figura 52. Relación axial resultante de la optimización de la antena en polarización RHCP. ....	61
Figura 53. Vista frontal de la antena.....	62
Figura 54. Acercamiento de la esquina superior derecha del parche. ....	63
Figura 55. Vista lateral derecha de la antena.....	63
Figura 56. Acercamiento de la vista lateral derecha de la antena.....	64
Figura 57. Vista de la parte posterior de la antena reconfigurable.....	64
Figura 58. Vista del pad para colocar el conector coaxial SMA de RF en el puerto de la antena.....	65
Figura 59. Vista completa de la red de alimentación del parche.....	65
Figura 60. Acercamiento de la ramificación de las líneas de alimentación de la antena. ....	66
Figura 61. Vista del stub común y los filtros de los diodos PIN 1 y PIN 2.....	67
Figura 62. Acercamiento del pad del capacitor de 10,000 pF con tamaño 0201. ....	67
Figura 63. Stub a tierra del diodo PIN 3 que se conecta al parche frontal.....	68
Figura 64. Acercamiento de los “vías” que pasan al lado del parche y alimentan al diodo PIN 3.....	68
Figura 65. Vista de los pads por donde se introduce la DC para los reguladores de voltaje. ....	69
Figura 66. Parámetro S11 de la polarización lineal horizontal. ....	71

Figura 67. Relación axial de la polarización lineal horizontal. ....	71
Figura 68. Ganancia de la polarización lineal horizontal. ....	72
Figura 69. Densidad de corriente de la polarización lineal horizontal. ....	73
Figura 70. Patrón de radiación en el plano H (a) y en el plano E (b) de la polarización lineal horizontal. ....	73
Figura 71. Patrón de radiación en 3D de la polarización lineal horizontal. ....	74
Figura 72. Parámetro S11 de la polarización circular de mano derecha RHCP. ....	75
Figura 73. Relación axial de la polarización circular de mano derecha RHCP. ....	75
Figura 74. Ganancia de la polarización circular de mano derecha RHCP. ....	76
Figura 75. Densidad de corriente de la polarización circular de mano derecha RHCP. ....	77
Figura 76. Patrón de radiación en el plano H (a) y en el plano E (b) de la polarización RHCP. ....	77
Figura 77. Patrón de radiación en 3D de la polarización circular de mano derecha RHCP. ....	78
Figura 78. Parámetro S11 de la polarización lineal vertical VLP. ....	79
Figura 79. Relación axial de la polarización lineal vertical VLP. ....	80
Figura 80. Ganancia de la antena en polarización lineal vertical VLP. ....	81
Figura 81. Densidad de corriente de la polarización lineal vertical VLP. ....	81
Figura 82. Patrón de radiación en el plano H (a) y en el plano E (b) de la polarización lineal vertical. ....	82
Figura 83. Patrón de radiación en 3D de la polarización lineal vertical VLP. ....	83
Figura 84. Parámetro S11 de la polarización circular de mano izquierda LHCP. ....	84
Figura 85. Relación axial de la polarización circular de mano izquierda LHCP. ....	85
Figura 86. Ganancia de la antena en polarización circular de mano izquierda LHCP. ....	85
Figura 87. Densidad de corriente de la polarización circular de mano izquierda LHCP. ....	86
Figura 88. Patrón de radiación en el plano H (a) y en el plano E (b) de la polarización LHCP. ....	87
Figura 89. Patrón de radiación en 3D de la polarización circular de mano izquierda LHCP. ....	87
Figura 90. Vista frontal del Arduino Nano (izquierda) y vista posterior (derecha). ....	88
Figura 91. Diagrama del regulador de voltaje propuesto por el fabricante. ....	89

Figura 92. Placa del circuito impreso diseñado para los 4 reguladores de voltaje. (a) PCB de las pistas, (b) Vista del montaje de los componentes. ....	90
Figura 93. Ventana realizada en el software MATLAB para el cambio de polarización de la antena. ....	91
Figura 94. Configuración final del sistema de la antena con polarización reconfigurable. ....	92
Figura 95. Parámetro S11 de las polarizaciones. HLP ( _ ), LHCP ( - - - ), VLP ( . . . ) y RHCP ( -.-.-).....	96

## Lista de tablas

Tabla 1. Pérdidas entre las principales combinaciones de polarizaciones. ....	22
Tabla 2. Características del sustrato elegido. ....	27
Tabla 3. Topologías propuestas con el sustrato grueso.....	44
Tabla 4. Tabla de verdad de las configuraciones de los diodos PIN para obtener las diferentes polarizaciones .....	70

# Capítulo 1. Introducción

---

Las redes de comunicaciones inalámbricas de la siguiente generación, deberán satisfacer velocidades y tasas de transmisión cada vez mayores en diversas aplicaciones y medios de propagación. Al emplear antenas con elementos múltiples es posible mejorar tanto la tasa como la velocidad de transmisión. La técnica de diversidad emplea antenas múltiples para mejorar la recepción de señales, suprimiendo el efecto de multi-trayectorias, el cual ocurre en medios dispersos debido al hecho que la señal transmitida se refleja, dispersa y refracta muchas veces en la trayectoria entre el transmisor y el receptor. Debido a la dispersión en el medio, se presentan réplicas de la señal original en función del tiempo, las cuales provocan interferencia que deterioran la señal recibida (G. Monti, et al, 2009). Las técnicas de diversidad espacial que emplean antenas con elementos múltiples o MIMO, representan una alternativa para mejorar la señal recibida. Otra alternativa de solución es utilizar antenas reconfigurables con polarización variable.

Para efectuar la comunicación, los componentes pueden contar con antenas de ultra ancho de banda, con diferentes antenas las cuales se conectan empleando interruptores, o bien mediante antenas multibanda con capacidad de operar en diferentes bandas de frecuencia (Beddeleem, et al, 2008). Las antenas reconfigurables juegan un papel muy importante en los sistemas de comunicaciones modernos. La capacidad de poder cambiar la polarización de la antena representa una de las características más atractivas en sistemas de transmisión digital multimedia, donde es posible conmutar de una polarización lineal ya sea vertical VLP u horizontal HLP a una circular del tipo RHCP o LHCP (Fukusako, et al, 2003).

En general, la mayoría de las antenas radian energía electromagnética en polarización lineal o circular. La polarización en una antena es una consideración muy importante cuando se elige una antena. La mayoría de los sistemas de comunicaciones utilizan antenas con polarización lineal (vertical u horizontal) o circular. El plano del campo eléctrico determina la polarización u orientación de la onda de radiofrecuencia.

En una antena polarizada circularmente, el plano de polarización rota de manera circular haciendo una revolución completa durante un período de la onda. Si la rotación

se realiza en el sentido de las manecillas del reloj, la polarización se llama circular de mano derecha (RHCP). Si la rotación es en sentido contrario a las manecillas del reloj, la polarización se conoce como circular de mano izquierda (LHCP).

Una onda polarizada circularmente radia energía tanto en el plano horizontal como en el vertical, así como en todos los planos intermedios. La diferencia entre el pico máximo y mínimo, se llama radio axial y se especifica generalmente en decibeles (dB). Si el radio axial es cercano a 0 dB, se dice que la antena está polarizada circularmente. Si el radio axial es mayor a 1 ó 2 dB, se dice que la antena está polarizada elípticamente.

Una antena polarizada linealmente radia en un plano el cual contiene la dirección de propagación. Una antena polarizada linealmente se encuentra polarizada verticalmente cuando su campo eléctrico es perpendicular a la superficie de la Tierra. Un ejemplo de estas antenas son las torres transmisoras de FM. Por otro lado, las antenas polarizadas horizontalmente, tienen su campo eléctrico paralelo a la superficie de la Tierra.

La polarización vertical es más utilizada cuando se desea transmitir una señal de radio en todas direcciones como sucede con los teléfonos celulares. Hoy en día, la mayoría de las comunicaciones de dos vías cuyo rango de frecuencia se encuentra por encima de los 30 MHz emplea polarización vertical.

La polarización horizontal se utiliza generalmente para la transmisión de televisión en países como Estados Unidos, esto en parte se debe a que la mayoría del ruido causado por el hombre tiene una polarización vertical.

La polarización circular es ampliamente utilizada en comunicaciones móviles y satelitales. Esto se debe a que la polarización de un sistema de comunicación polarizado linealmente puede rotar mientras la señal pasa a través de anomalías en la ionósfera. Además, las diferencias geométricas de la posición de la Tierra con respecto del satélite, hacen que la señal varíe mientras el satélite se mueve, haciendo que la señal en polarización lineal se atenúe considerablemente, mientras que en la polarización circular se mantiene la señal constante.

## 1.1 Antecedentes

Las antenas reconfigurables juegan un papel clave en los sistemas de telecomunicaciones modernos. Contar con la capacidad de cambiar bandas de frecuencia, polarización o la dirección del patrón de radiación, representa una característica muy atractiva. En particular, en las telecomunicaciones espaciales, la polarización dual o circular de las antenas se prefiere sobre la polarización lineal, gracias a su mejor comportamiento cuando se propaga en la atmósfera.

Por ejemplo, en los sistemas de transmisión multimedia, se requiere tener capacidad de cambiar de una polarización lineal a circular, ya sea de mano izquierda o derecha. De manera similar, en las comunicaciones móviles el empleo de antenas con diversidad de polarización es fundamental para reducir pérdidas en la señal.

Debido a su bajo costo, poco peso, y facilidad de fabricación, las antenas de microcinta son los mejores candidatos para lograr esta reconfigurabilidad.

Por lo general, las antenas rectangulares de microcinta exhiben polarizaciones lineales, sin embargo, se han realizado diversas propuestas para lograr la polarización circular en ellas, así como también un buen desempeño en doble banda.

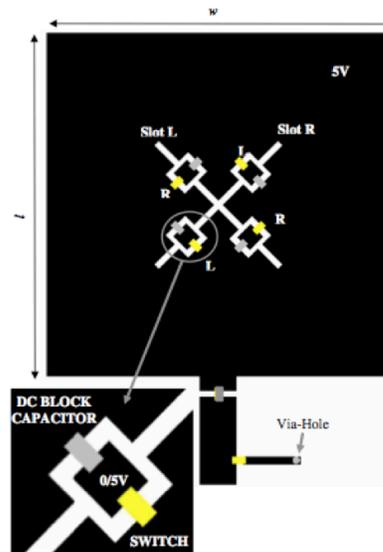
Para lograr la reconfigurabilidad de una antena, se han propuesto un gran número de soluciones que permiten conseguir una diversidad tanto de frecuencia como de polarización. Algunas de estas soluciones emplean diodos PIN, que al encender y apagar una antena de ranura rectangular pueden alcanzar una operación en dos bandas de frecuencia (Yang F, et al, 2001). Otra alternativa recientemente utilizada para la reconfigurabilidad de frecuencia y/o polarización son los MEMS (Liu, et al, 2005).

Por otro lado, para lograr una diversidad de polarización, se propone una línea de alimentación reconfigurable con el fin de cambiar la polarización de la antena entre polarización circular de mano derecha y polarización circular de mano izquierda.

La polarización circular puede ser generada por diferentes tipos de antenas planares que emplean una sola alimentación, como pueden ser los parches cuadrados con esquinas truncadas o parches circulares con cortes. Sin embargo, estos tipos de

antenas generalmente operan a una sola frecuencia o dentro de muy poco ancho de banda. Este problema se puede abordar de diferentes maneras; una de ellas mediante una antena diseñada para dos frecuencias, en la cual una frecuencia trabaja en polarización circular y la otra en polarización lineal (C.W. Su, et al, 2005).

Una antena diseñada con polarización reconfigurable es la propuesta por (G. Monti, et al, 2009), en donde se presenta una antena que consiste en un parche cuadrado con dos ranuras diagonales en forma de cruz, como se muestra en la figura 1. Esta antena utiliza dos pares de interruptores con el fin de obtener una reconfigurabilidad tanto de polarización como de frecuencia.

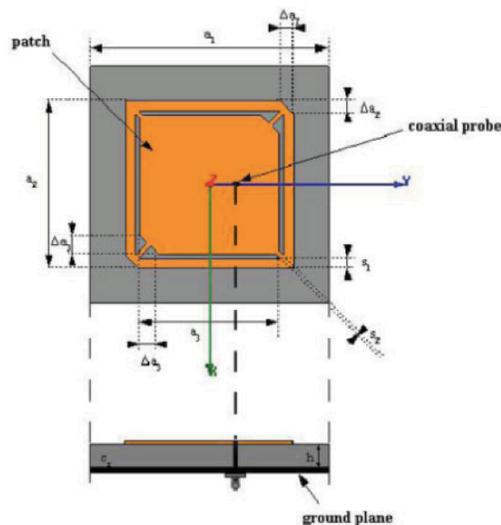


**Figura 1. Geometría de la antena reconfigurable propuesta por (G. Monti et al, 2009).**

Por otro lado, se ha desarrollado un diseño atractivo que garantiza una diversidad de frecuencia y polarización de manera simultánea (Chung K., et al, 2006). Esta antena consiste en un parche rectangular con una ranura en forma de “U” y con esquinas truncadas, en donde un interruptor de rf se encarga de encender y apagar la ranura, proporcionando una reconfigurabilidad en frecuencia. Además, la antena cuenta con tres interruptores adicionales que se utilizan para encender y apagar las esquinas truncadas, necesarias para proveer de una reconfigurabilidad de polarización.

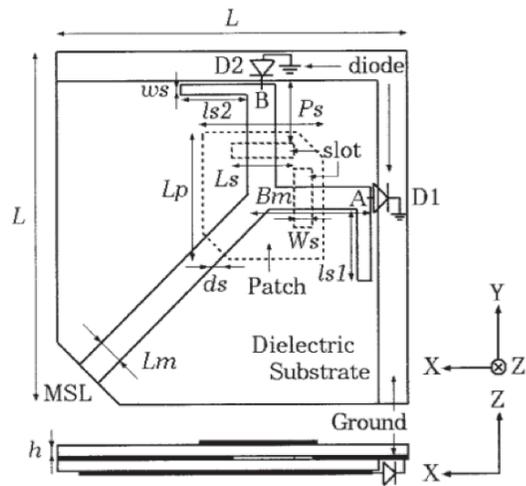
Otro trabajo de investigación en el tema de antenas reconfigurables es el desarrollado por G. Beddeleem et al, (2008). En este trabajo se presenta una antena

compacta de frecuencia dual diseñada para lograr una polarización circular con dos polarizaciones opuestas (LHCP y RHCP), una para cada frecuencia. La geometría de la antena es cuadrada como se puede apreciar en la figura 2, y está fabricada sobre un sustrato de Duroid. Esta antena mostró una ganancia de 6.46 dB en la frecuencia más baja de 2.3 GHz y 7.14 dB en la frecuencia más alta de 3.9 GHz, con una eficiencia teórica de aproximadamente 91% en las dos bandas.



**Figura 2. Diseño de antena reconfigurable (G. Beddeleem et al, 2008).**

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes maneras de alcanzar la reconfigurabilidad deseada. Otra alternativa fue la propuesta (Fukusako, et al, 2003), cuya estructura se muestra en la figura 3. Esta consiste de una línea de alimentación de microcinta, un plano de tierra con dos ranuras, y un parche radiante. La línea de alimentación se bifurca en dos ramas para permitir que la polarización cambie al abrir o cerrar la terminación de la línea, empleando un par de diodos en configuración en anti paralelo. El diseño propuesto presenta un cambio de polarización entre la polarización circular de mano derecha y la circular de mano izquierda, consiguiendo una discriminación mayor a 30 dB entre las polarizaciones.



**Figura 3. Diseño de la antena propuesto por (Fukusako et al, 2003).**

Otra alternativa de antena reconfigurable reciente es la propuesta por (Seongmin, et al, 2012), la cual se muestra en la figura 4. Esta antena tiene dos caras, en donde, la cara superior consiste de un parche cuadrado con las esquinas truncadas, un conductor triangular y un diodo PIN mostrado en la figura 4a. En la cara inferior se tiene una ranura en forma de cruz diagonal grabada en el plano de tierra como se muestra en la figura 4b. Debido a que la ranura del plano de tierra está en forma de cruz diagonal, las frecuencias resonantes de cada sentido de polarización disminuyen aproximadamente 41% para la polarización circular de mano derecha (RHCP) y 38% para la polarización circular de mano izquierda (LHCP). Alternando los estados de encendido y apagado del diodo PIN, se reconfigura el sentido en el cual la polarización ocurre sin tener degradaciones en las características de radiación.

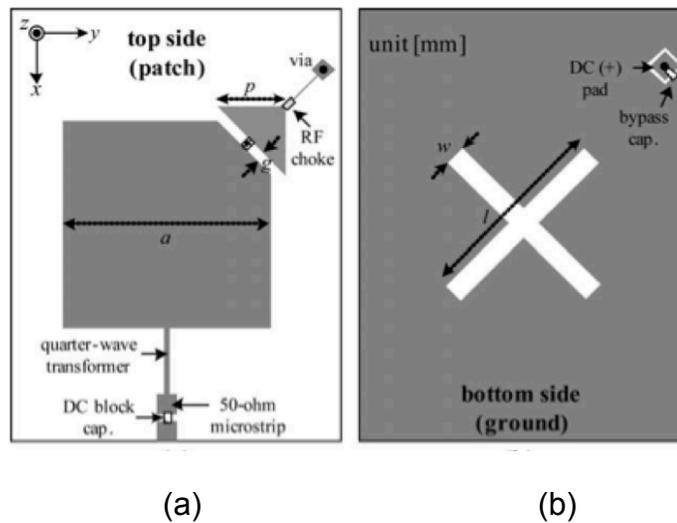


Figura 4. Diseño de la antena propuesto por (Seongmin et al, 2012).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de tesis es: investigar y diseñar una antena reconfigurable con polarización variable (lineal o circular) para aplicación en sistemas de comunicaciones inalámbricos.

### 1.2.2 Objetivos particulares

Los objetivos particulares de este trabajo de tesis son:

- Investigar diferentes topologías de antenas reconfigurables y proponer una estructura que permita cambiar la polarización entre 4 polarizaciones distintas: Lineal horizontal (HLP), lineal vertical (VLP), circular de mano derecha (RHCP) y circular de mano izquierda (LHCP).
- Proponer una geometría para los circuitos de conmutación basados en interruptores de diodos PIN, que permitan cambiar la polarización de la onda electromagnética.
- Diseñar, analizar y optimizar la antena empleando programas de computadora adecuados para efectuar el análisis electromagnético de la estructura radiante, incluyendo las redes de alimentación y filtros necesarios para efectuar el cambio de polarización.

- Diseñar un circuito que permita cambiar la polarización de la antena de manera automática desde una PC a través de un microcontrolador.

### **1.3 Estructura de la tesis**

Este trabajo de tesis se encuentra organizado de la siguiente manera: En el capítulo 2, se presentan los aspectos teóricos en donde se mencionan los diferentes tipos de antenas que existen dependiendo de su geometría, y se describen los principales parámetros que caracterizan a una antena, haciendo énfasis en la definición de la polarización.

En el capítulo 3 se proporciona la metodología propuesta para realizar el diseño y análisis electromagnético de la antena con polarización reconfigurable, desde el cálculo de las dimensiones iniciales del parche, hasta el diseño de filtros y redes de alimentación de los diodos PIN. Se menciona también la razón de cambio de un substrato grueso por uno más delgado para la cara posterior de la antena donde se encuentran las redes de alimentación de los diodos PIN y el puerto del conector coaxial. Se presentan resultados del análisis electromagnético de la antena para cada una de las 4 polarizaciones, donde se muestra el comportamiento de los parámetros más importantes como sus pérdidas por retorno, relación axial, ganancia y patrón de radiación. Se incluyen resultados del análisis de la antena incluyendo el diseño y análisis de los circuitos de alimentación de los diodos PIN. Se describe el circuito y el método de control para efectuar el cambio de polarización, el cual utiliza un microcontrolador Arduino Nano y se controla mediante un programa realizado en el lenguaje de programación MATLAB para el control desde una PC.

En el capítulo 4 se presenta una discusión de los resultados obtenidos, resumiendo las características obtenidas y el comportamiento presentado en las diferentes polarizaciones.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones finales de este trabajo de tesis, resaltando las aportaciones del mismo. Por último, se proporcionan algunas recomendaciones para trabajos futuros en esta línea de investigación.

## **Capítulo 2. Fundamentos y parámetros de antenas**

---

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se proporcionan los conceptos teóricos relacionados con el tema de antenas, donde se presentan los diferentes tipos de antenas y los parámetros más importantes que las caracterizan. En primer término, se presenta la definición de antena, así como las diferentes clasificaciones y tipos de antenas que existen de acuerdo a su geometría. Posteriormente se definen las características más importantes de las antenas, y se mencionan los principales métodos de análisis electromagnético.

### **2.2 Definición y tipos de antenas**

#### **2.2.1 Definición de antena**

En la literatura existen diferentes definiciones de antena. Comenzando por la definición de la IEEE (IEEE Std.145-1983) que las define como “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas”. Por otro lado, John Kraus (1988) define a una antena como “una estructura asociada con la región de transición entre una guía de onda y el espacio libre y viceversa”, el cual hace hincapié en las etapas de propagación que tiene la energía electromagnética al pasar entre un transmisor y un receptor y la manera en que se acoplan los medios. De estas definiciones se puede decir que una antena es un dispositivo diseñado para radiar y recibir ondas electromagnéticas a través de un medio.

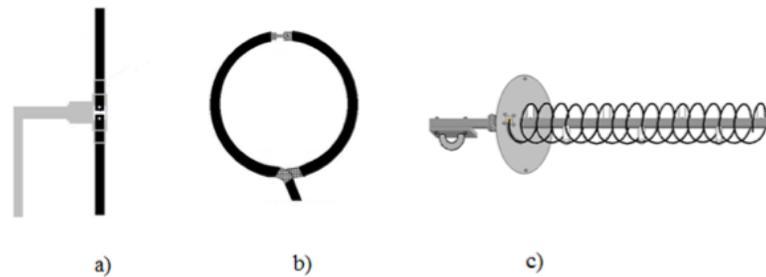
#### **2.2.2 Tipos de antena**

En este apartado se presentan diferentes tipos de antena, las cuales se clasifican dependiendo de su geometría y sus características.

##### **2.2.2.1 Antena de alambre**

Las antenas de alambre son las más comunes, ya que se pueden encontrar en automóviles, edificios, aviones, etc. Dentro de las antenas de alambre, existen diversas

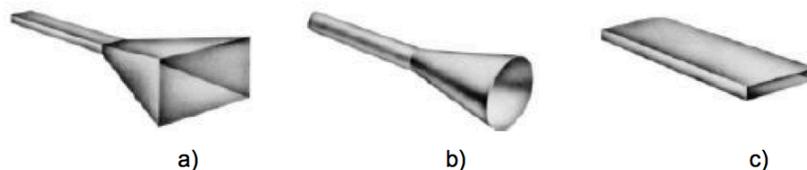
formas como los dipolos, las de lazo cerrado (loop), y las helicoidales, las cuales se muestran en la figura 5. Este tipo de antenas se caracterizan por construirse con hilos conductores que soportan las corrientes que dan origen a los campos radiados (Balanis, 2005).



**Figura 5. Antenas de alambre: a) Dipolo b) Lazo c) Helicoidal**

### 2.2.2.2 Antena de apertura

Las antenas de apertura se emplean comúnmente para sistemas con frecuencias mayores, así como en aplicaciones aeroespaciales. Entre ellas se encuentran las antenas de bocina o de corneta cónica y piramidal, siendo la más común para frecuencias de microondas la antena de guía de onda rectangular. Una característica de estas antenas es que pueden recubrirse con un material dieléctrico de baja atenuación, que las protege de las condiciones ambientales, para que tengan un mayor tiempo de vida útil (Balanis, 2005). En la figura 6 se muestran algunos tipos de antenas de apertura.



**Figura 6. Antenas de apertura: a) Bocina piramidal b) Bocina circular c) guía de onda rectangular (modificado de Balanis, 2005, pag. 5)**

### 2.2.2.3 Antena de microcinta

Las antenas de microcinta consisten de un parche metálico grabado en una cara de un sustrato dieléctrico, con un plano de tierra en la cara opuesta. El parche puede tener distintas formas, pero los más populares son los rectangulares y circulares. Este tipo de antenas es de bajo perfil, son fácilmente adaptables a superficies planas y no planas y son económicas y sencillas de fabricar utilizando la tecnología de circuitos impresos. Este tipo de antenas pueden montarse en la superficie de aviones, naves espaciales, misiles, vehículos y teléfonos móviles (Balanis, 2005), adaptándose a superficies planas o curvas. En la figura 7 se muestran dos ejemplos de antenas de microcinta; una circular y una rectangular.

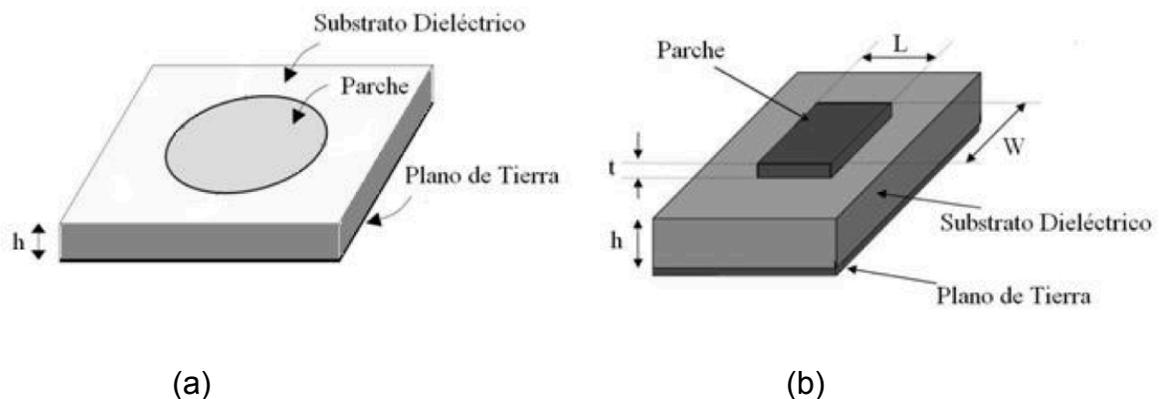
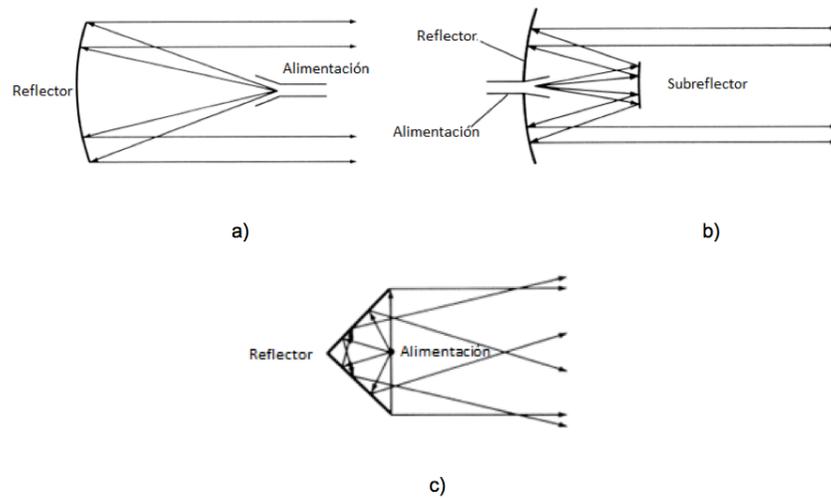


Figura 7. Antenas de parche a) circular y b) rectangular.

### 2.2.2.4 Antena reflectora

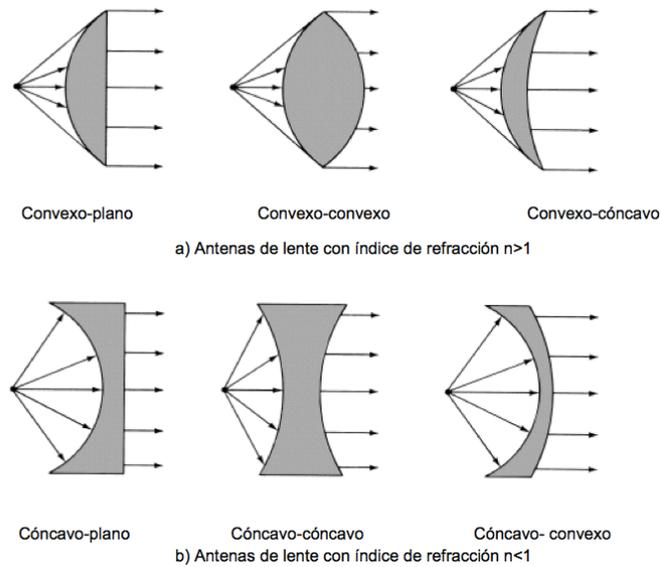
Las antenas reflectoras están formadas por dos partes principales: un elemento reflector y la antena que por lo general se sitúa en el foco de receptor. Estas antenas surgieron debido a la necesidad de establecer comunicaciones a gran distancia como por ejemplo recibir señales del espacio exterior o de satélites de comunicaciones. En esta clasificación se encuentra el reflector parabólico con alimentación frontal (de punto focal), con alimentación Cassegrain que cuenta con un segundo reflector, la de foco desplazado y la del reflector de esquina (Kraus, 1988), las cuales se pueden apreciar en la figura 8.



**Figura 8. Antenas reflectoras: a) Alimentación frontal, b) Cassegrain c) Reflector de esquina (modificada de Balanis, 2005, pág. 8).**

### 2.2.2.5 Antenas de lente

Las antenas de lente tienen la capacidad de transformar varias formas de energía divergente que viaja en el medio, a ondas planas para su recepción. Es necesario seleccionar de manera apropiada el material de los lentes y la forma de éstos (convexo, cóncavo o plano), considerando también su índice de refracción para su buen funcionamiento. Este tipo de antenas se utiliza mayormente a frecuencias altas, ya que a frecuencias bajas el tamaño de los elementos es demasiado grande lo que aumenta el costo considerablemente (Cardama et al., 1998). En la figura 9 se presentan algunos tipos de antenas de lente con índice de refracción  $n > 1$  y otras con  $n < 1$ .



**Figura 9. Configuraciones típicas de antenas de lente (modificado de Balanis, 2005, pág. 8).**

### 2.2.2.6 Agrupaciones de antenas

Una agrupación de antenas es un conjunto de antenas que se combinan para lograr características de radiación que no pueden lograrse con un solo elemento. Estas agrupaciones se utilizan para aumentar la directividad y la ganancia de la antena y pueden estar conformadas por cualquier tipo de antenas de los tipos que se presentaron anteriormente. Entre las más comunes se encuentran las agrupaciones de parche, la antena Yagi-Uda, de abertura, etc. (Balanis, 2005)

### 2.2.2.7 Antenas reconfigurables

Las antenas reconfigurables tienen la capacidad de cambiar sus características de operación a través de diferentes métodos, los cuales pueden ser eléctricos, mecánicos u ópticos (Tawk, 2011). Estas antenas se clasifican dependiendo de la característica o parámetro en las que se reconfiguran, ya sea de polarización, fase, patrón de radiación o frecuencia de operación.

En las antenas reconfigurables, resulta importante considerar tanto el método como el dispositivo de conmutación que se utiliza para realizar la reconfiguración de la antena, teniendo en cuenta la frecuencia de operación de la antena, con el fin de elegir el dispositivo y su tamaño. Algunos de los dispositivos conmutadores o interruptores de RF más comunes son: los diodos PIN (P type –intrinsic –N type), los dispositivos MEMS (Micro Electro Mechanical System), los transistores BJT y FET, los diodos varactores, y los interruptores electromecánicos.

Las antenas reconfigurables son muy versátiles en aplicaciones como sistemas MIMO, RFID, Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, radares automotrices, antenas inteligentes, etc., ya que lo que se pretende con estas antenas es mantener el desempeño del sistema bajo diferentes demandas de operación. Además, las antenas reconfigurables permiten disminuir el tamaño del dispositivo en el que se utilicen, debido a que una sola antena reconfigurable puede cumplir la función que de otra manera tuviera que cumplir más de una antena.

## 2.3 Parámetros de antenas

En esta sección se presentan las definiciones de los principales parámetros que caracterizan una antena, como son: la impedancia, la directividad, la eficiencia, ancho de banda, la ganancia, regiones de campo, patrón de radiación, polarización, relación axial, cros-polarización, efectos de borde, y por último se mencionan de manera breve los métodos de análisis electromagnético que se utilizan para diseñar antenas.

### 2.3.1 Impedancia

La impedancia de una antena se define con respecto a su puerto de entrada, en donde la impedancia de entrada  $Z_A$  se define como la relación de voltaje-corriente en dicho punto y tiene un comportamiento complejo como se muestra en la ecuación (1) (Cardama, et al., 1998).

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (1)$$

en donde:  $Z_A$  es la impedancia de la antena,  $R_A=R_r+R_L$  es la resistencia de la antena, dada como la suma de  $R_r$  que es la resistencia de radiación y  $R_L$  la correspondiente a las pérdidas resistivas.  $X_A$  es la reactancia de la antena.

Considerando que la antena radia energía, se tiene una pérdida en el espacio libre. Entonces se puede representar la potencia radiada en términos de la resistencia de radiación y la corriente inducida como se muestra en la ecuación (2).

$$P_{radiada} = I^2 R_r \quad (2)$$

Resulta necesario considerar las pérdidas en el conductor, la cual se representa mediante la resistencia de pérdidas óhmicas  $R_\Omega$ . Entonces la potencia entregada es la suma de la potencia radiada y la de pérdidas como se puede apreciar en la ecuación (3):

$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_{pérdidas} = I^2 R_r + I^2 R_\Omega \quad (3)$$

### 2.3.2 Directividad

La directividad de una antena se define como la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena, a una intensidad radiada promedio sobre todas las direcciones, en donde el promedio de la intensidad radiada, es igual a la potencia de entrada en la antena dividida por 4. De una manera más simple, se puede decir que la directividad considera la potencia en la dirección de máxima radiación (Balanis, 1997).

$$D_{ir} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (4)$$

$$D_{max} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (5)$$

donde,  $D_{ir}$  es la directividad,  $D_{max}$  es la directividad máxima,  $U$  es la radiación,  $U_{max}$  es la radiación máxima (en Watts) y  $P_{rad}$  es la potencia de entrada (en Watts).

### 2.3.3 Eficiencia

Debido a que existen pérdidas en la antena, no toda la potencia entregada por el transmisor a la antena será radiada hacia el espacio libre. Por esta razón se debe definir un factor de rendimiento de la antena, llamado eficiencia  $\eta_l$ , que se obtiene de la relación de la potencia radiada entre la potencia entregada (Cardama, et al., 1998), dada por la ecuación 6:

$$\eta_l = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad (6)$$

### 2.3.4 Ancho de banda

Las antenas tienen la limitación de poder operar de manera satisfactoria dentro de un intervalo de frecuencias, por lo general angosto, debido a sus limitantes geométricas y de construcción. A este intervalo se le conoce como ancho de banda (BW) y es el intervalo de frecuencias en donde la antena no sobrepasa límites establecidos. Este ancho de banda se puede representar como la relación entre el intervalo de frecuencias en el que se cumplen las especificaciones requeridas y la frecuencia central de operación, pudiéndose expresar en forma porcentual como se presenta en la ecuación (7) (Cardama, et al., 1998).

$$\%BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \times 100 \quad (7)$$

### 2.3.5 Ganancia

La ganancia de la antena en una dirección dada, se define como la relación de la intensidad en esa dirección, con respecto a la intensidad de radiación que puede ser obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de manera isotrópica (Balanis, 2005), como se muestra en la ecuación (8):

$$G = 4\pi \frac{\text{intensidad de radiación}}{\text{potencia total de entrada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (8)$$

Existe una relación entre la ganancia y la directividad, y difieren en que la directividad se relaciona con la potencia radiada, mientras que la ganancia se relaciona

con la potencia entregada a la antena. El factor que relaciona a la ganancia y a la directividad es la eficiencia de la antena como se puede apreciar en la ecuación (9):

$$G = \eta_1 D \quad (9)$$

### 2.3.6 Regiones de campo

El espacio que rodea a una antena esta subdividido usualmente en tres regiones separadas empleando diferentes criterios. La primera región es el campo cercano reactivo donde los campos reactivos son los que predominan, la segunda región es el campo cercano radiante o zona de Fresnel donde predominan los campos radiantes, mientras que en la tercera región se tiene la región de campo lejano o zona de Fraunhofer, que es donde la distribución del campo angular, es independiente de la distancia a la antena. Estas tres regiones se muestran en la figura 10 (Balanis, 2005). La distancia del campo lejano se obtiene como  $R_2=2D^2/\lambda$ , donde  $D$  es la dimensión máxima de la antena y  $\lambda$  la longitud de onda.

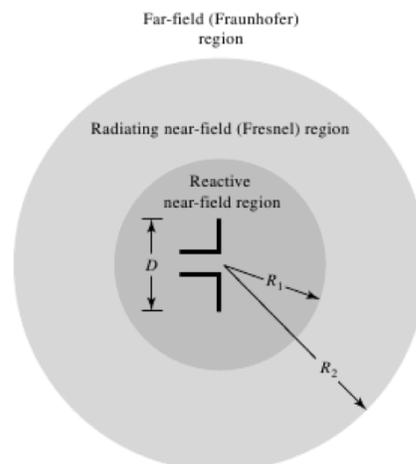
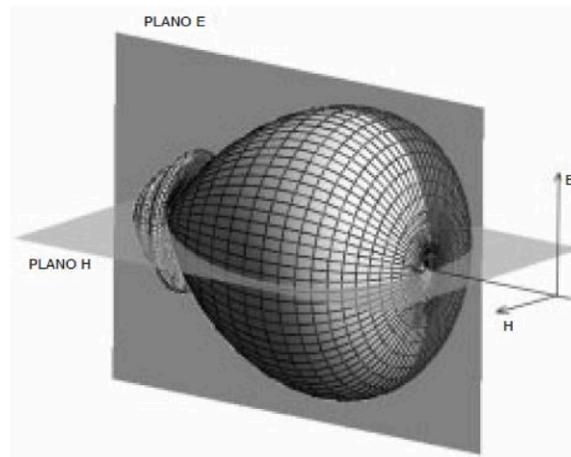


Figura 10. Regiones de campo de la antena (Balanis, 2005, pág. 34).

### 2.3.7 Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena, se define como una función matemática ó representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de

coordenadas en el espacio. Algunas de estas propiedades son la potencia de la densidad de flujo, la intensidad de radiación, la fuerza del campo, la directividad, la fase o la polarización. El diagrama de radiación se puede representar en forma tridimensional, el cual está constituido por los planos E y H, como se puede apreciar en la figura 11, donde el plano E representa la dirección de máxima radiación del campo eléctrico en dicha dirección. De manera similar, el plano H está formado por la dirección de máxima radiación del campo magnético en dicha dirección. Los dos planos son perpendiculares entre sí y su intersección determina una línea que define la dirección de máxima radiación de la antena. El diagrama de radiación también se puede representar en dos dimensiones, lo cual permite observar los detalles en antenas muy directivas (Cardama, A., et al, 2002).



**Figura 11. Representación tridimensional del patrón de radiación de una antena y sus planos E y H (Cardama et al, 2002, pág. 20).**

## 2.3.8 Polarización

### 2.3.8.1 Definición

La polarización de una onda radiada se define como: “la propiedad de una onda electromagnética que describe la dirección variante en el tiempo y la magnitud relativa del vector de campo eléctrico”. Específicamente, “es la figura trazada por el extremo del vector en un punto fijo en el espacio, y el sentido en el que se traza en función del

tiempo a lo largo de la dirección de propagación”. Dicho de una manera sencilla, la polarización es la curva trazada por el extremo del vector del campo eléctrico en función del tiempo, donde dicho campo debe poder observarse a lo largo de la dirección de propagación (Krauss, 2002).

### 2.3.8.2 Polarización lineal

Las ondas radiadas por una antena se encuentran polarizadas linealmente en un punto dado en el espacio, cuando el vector de campo eléctrico en ese punto está orientado a lo largo de toda la onda y en cada instante de tiempo (Nave C. R., 2000). La polarización lineal se puede lograr si el vector de campo eléctrico o magnético posee un solo componente, o bien dos componentes ortogonales con la misma fase o con múltiplos de  $180^\circ$ , como se puede apreciar en la figura 12.

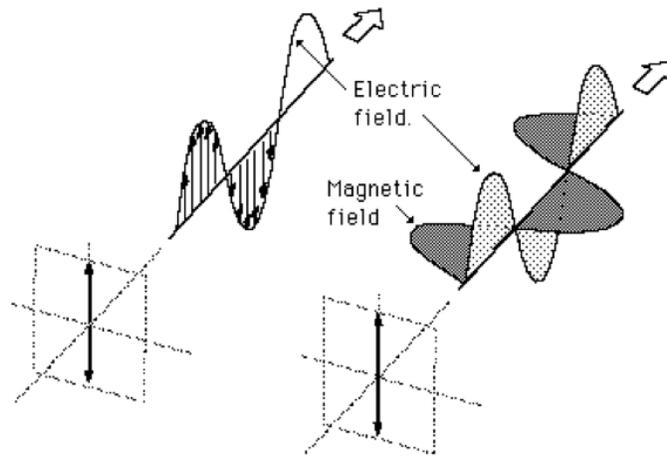


Figura 12. Polarización lineal de los campos eléctricos y magnéticos (Nave C.R., 2000).

### 2.3.8.3 Polarización circular

Las ondas radiadas por una antena se encuentran polarizadas circularmente en un punto dado, cuando el vector de campo eléctrico o magnético traza en ese punto, un círculo en función del tiempo. En la figura 13 se puede observar una onda polarizada circularmente, donde los componentes eléctricos cambian conforme se propaga la onda

y el campo eléctrico gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. Existen algunas condiciones necesarias y suficientes para obtener una polarización circular: El campo debe tener dos componentes ortogonales lineales en donde los dos componentes tienen la misma magnitud y un desfaseamiento entre sí en múltiplos de  $90^\circ$ . Existen dos casos de polarización circular: la RHCP y la LHCP. Considerando la convención de la fuente, en la RHCP el campo eléctrico rota en sentido de las manecillas del reloj, mientras que en la LHCP rota en sentido contrario.

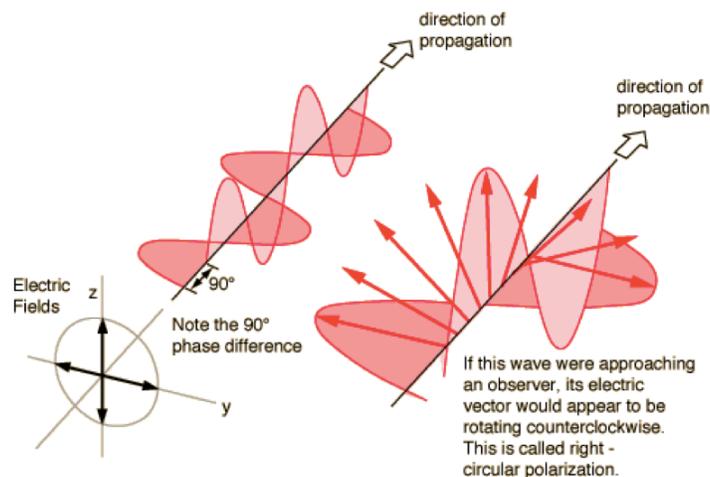
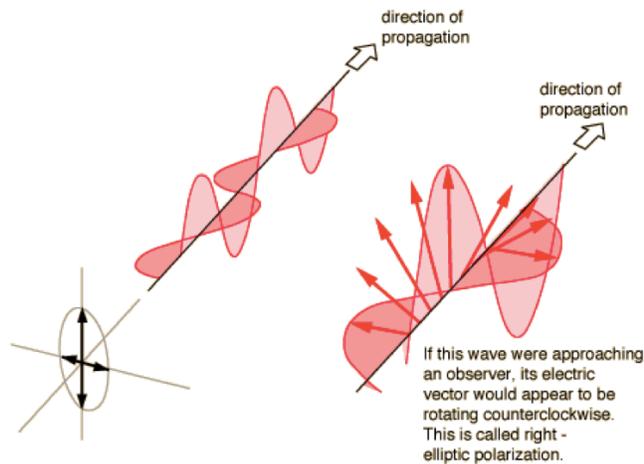


Figura 13. Polarización circular (Nave C.R., 2000).

#### 2.3.8.4 Polarización elíptica

Las ondas radiadas por una antena se encuentran polarizadas elípticamente cuando la punta del vector de campo eléctrico traza una forma elíptica en el espacio, como se muestra en la figura 14. En varios instantes de tiempo, el vector de campo cambia constantemente en función del tiempo, de tal manera que describe la forma de una elipse. El sentido de la rotación se determina al emplear las mismas reglas que en la polarización circular. Las condiciones para que la onda se encuentre polarizada elípticamente son: El campo debe tener dos componentes ortogonales, de igual o diferente magnitud; si los dos componentes no son de la misma magnitud, la diferencia de fase entre ellos no puede ser  $0$  o múltiplos de  $180^\circ$ , porque sería lineal. Cuando los dos componentes son de la misma magnitud, la diferencia de fase no puede estar en

múltiplos de  $90^\circ$ , porque entonces sería una polarización circular. Cabe mencionar que la polarización circular es un caso especial de la polarización elíptica.



**Figura 14. Polarización elíptica (Nave C.R., 2000).**

### 2.3.9 Relación axial

La relación axial es la relación entre dos componentes ortogonales del campo eléctrico. Esta relación se emplea comúnmente en antenas que cuentan con polarización circular, en donde la relación axial tiende a degradarse al alejarse del haz principal de la antena.

La relación axial de una antena es un parámetro de especial importancia para las antenas que cuentan con polarización circular, ya que como condición para que se considere que una antena está polarizada circularmente, su relación axial en la dirección de propagación debe ser menor o igual a 3 dB, siendo idealmente de 0 dB.

### 2.3.10 Cros-polarización

La cros-polarización representa a la polarización ortogonal con respecto a la polarización en cuestión. Por ejemplo, si los campos de una antena están polarizados horizontalmente, la cros-polarización en este caso es la polarización vertical. En el caso de las polarizaciones circulares, la cros-polarización de cada una es la de sentido

opuesto, siendo la cros-polarización de la polarización circular de mano derecha, la de mano izquierda y viceversa.

Este término surge porque una antena nunca está polarizada 100% en un modo único (lineal, circular, etc.). Por lo que en algunas ocasiones se presentan dos patrones de radiación diferentes; el patrón de la co-polarización que es la componente de la polarización deseada y el patrón correspondiente a la cros-polarización.

### 2.3.11 Factor de pérdidas por polarización

El factor de pérdidas por polarización se debe a las pérdidas que ocurren entre las diferentes polarizaciones. En la tabla 1 se proporcionan las principales combinaciones de estas pérdidas, teniendo las mayores pérdidas cuando las polarizaciones son ortogonales entre sí (color rojo o 30 dB), medias cuando se trata entre las lineales con circulares (amarillo o 3 dB) y nulas cuando se trata de la misma polarización (verde o 0dB).

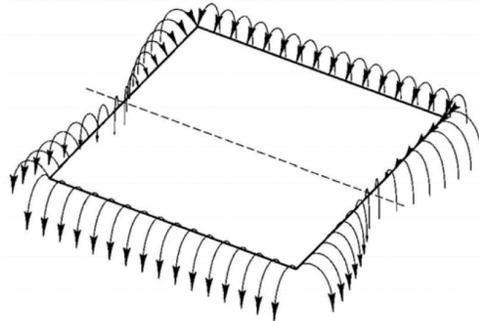
Tabla 1. Pérdidas entre las principales combinaciones de polarizaciones.

Polarización	Horizontal	Vertical	RHCP	LHCP
Horizontal	0 dB	30 dB	3 dB	3 dB
Vertical	30 dB	0 dB	3 dB	3 dB
RHCP	3 dB	3 dB	0 dB	30 dB
LHCP	3 dB	3 dB	30 dB	0 dB

### 2.3.11 Efecto de borde

El efecto de borde que ocurre en una antena se debe a la extensión de los campos, tanto en el largo como en el ancho de los parches. Esta extensión depende de las dimensiones del parche  $W$  y  $L$ , del espesor del dieléctrico  $h$  y de la constante dieléctrica relativa  $\epsilon_r$ . Cuando se tiene una relación  $L/h \gg 1$ , el efecto de borde se minimiza pero es necesario considerarlo para el cálculo de la frecuencia de resonancia

de la antena. En la figura 15 se puede apreciar la manera en que se extienden los campos por este efecto.



**Figura 15. Efecto de borde en un parche de microcinta.**

### **2.3.12 Métodos de análisis.**

Para analizar las antenas de microcinta existen diferentes métodos que se pueden dividir en dos categorías principales (Nieto,2012).

En el primer grupo se tienen los métodos de análisis que se basan en ecuaciones que aproximan el comportamiento de la antena, siendo en este grupo considerados los métodos como el de líneas de transmisión y el método de cavidad.

En el segundo grupo, los métodos de análisis electromagnético utilizan las ecuaciones de Maxwell ya sea en forma diferencial o en forma integral y se utilizan diversos métodos numéricos que encuentran la solución haciendo una discretización de la estructura. Algunos de los métodos que están en este grupo son: el Método de Momentos (MoM), el Método de Elementos Finitos (FEM), el Método de Dominio Espectral (SDM), y el método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD).

De estos métodos, el más utilizado en la literatura y que se utiliza en este trabajo de tesis para diseñar la antena, es el método de línea de transmisión debido a su sencillez y a que ofrece una buena aproximación. Para realizar el análisis electromagnético de la antena y su optimización, se emplea el método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD) implementado en el software CST (Computer Simulation Technology).

## **Capítulo 3. Metodología del diseño de la antena**

---

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se describe paso a paso la metodología propuesta para diseñar una antena con polarización reconfigurable. Se inicia este capítulo mostrando un diagrama de flujo que ilustra el proceso de diseño de la antena con polarización reconfigurable correspondiente a este trabajo de tesis. Se muestran resultados del análisis electromagnético de antenas encontradas en la literatura con polarización reconfigurable. Posteriormente se establece cada uno de los parámetros de la antena, desde el sustrato utilizado, hasta el cálculo de las longitudes y anchos del parche y líneas de alimentación y filtros. Por último, se presentan los resultados del análisis electromagnético de la antena propuesta, haciendo hincapié en los parámetros que se consideran más importantes para este trabajo, como son las pérdidas por retorno, la relación axial, la ganancia y el patrón de radiación.

### **3.2 Diagrama de flujo de la metodología del diseño**

En esta sección se presenta un diagrama a flujo de la metodología propuesta para diseñar una antena con polarización reconfigurable. El primer paso en la metodología es el establecer la frecuencia de operación de la antena. Enseguida se elige el sustrato a utilizar. Posteriormente se realiza el cálculo de las dimensiones de un parche cuadrado inicial y se continúa con el diseño de las líneas de alimentación y los filtros para alimentar a los diodos PIN.

Es necesario mencionar que en cada etapa, después del cálculo de alguna dimensión de la antena, se realiza una optimización para obtener una respuesta más cercana a los requerimientos de la antena a diseñar objeto de este trabajo de tesis.

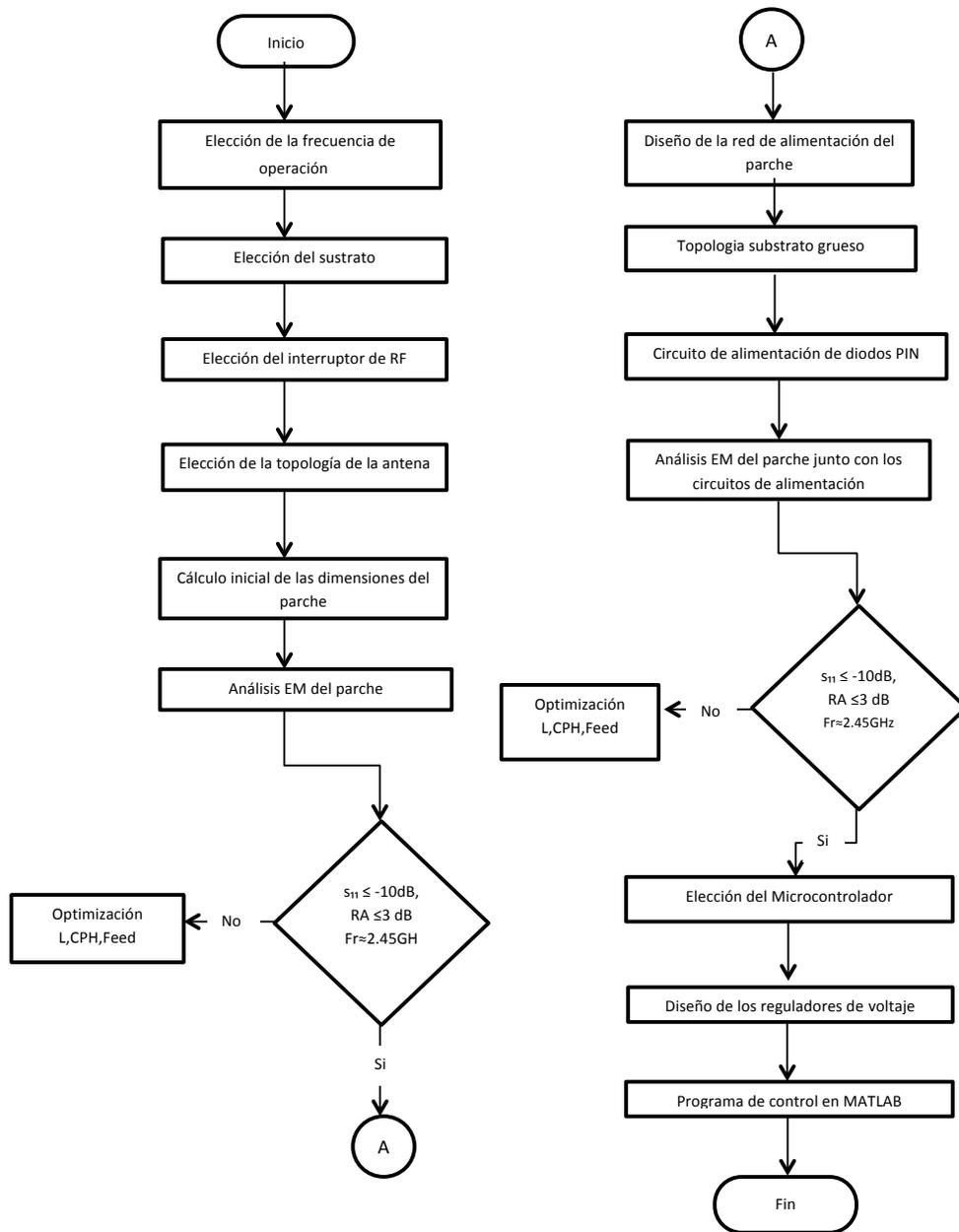


Figura 16. Diagrama a bloques del proceso de diseño de la antena reconfigurable.

### 3.3 Elección de la frecuencia de operación de la antena

La frecuencia de operación elegida para realizar el diseño de la antena con polarización reconfigurable es de 2.45 GHz, debido a que el objetivo de este trabajo de tesis es el de diseñar una antena con aplicación en sistemas de comunicaciones inalámbricas, siendo esta frecuencia a la cual opera la mayoría de estos dispositivos como los que utilizan la tecnología Wi-Fi y Bluetooth principalmente.

### 3.4 Elección del sustrato

El siguiente paso en la metodología de diseño es seleccionar un sustrato sobre el que se diseñará la antena de polarización reconfigurable. El sustrato es una parte fundamental en el diseño de una antena, ya que de éste dependerán diversas propiedades de la misma (tamaño, peso, costo y características eléctricas). Por esta razón es muy importante conocer las características principales del sustrato a utilizar, para esto se pueden utilizar métodos como el método del resonador (Medina, 2013).

Se eligió el sustrato FR4, principalmente debido a que tiene un costo bajo y ya ha sido utilizado y caracterizado en trabajos de tesis anteriores en CICESE (Díaz, 2008; Trujillo, 2012). Una desventaja de este sustrato es que tiene altas pérdidas, especificadas por su factor de disipación ( $\tan\delta$ ) y una constante dieléctrica relativamente alta comparadas con sustratos más costosos como el Duroid 5880.

En este trabajo fue necesario utilizar dos sustratos, que aunque son del mismo material FR4, tienen diferente espesor. El sustrato más grueso se utiliza para el parche radiador de la antena; mientras que el sustrato más delgado se utiliza para la parte posterior de la antena, lo cual permite que el ancho de las líneas empleadas para alimentar los diodos PIN, sea menor y se reduzca el efecto de borde (fringing). Al elegir un sustrato grueso para la parte posterior las líneas resultan más anchas, ocasionando un acoplamiento no deseado en el lugar donde se colocan los diodos PIN que cambian el tipo de polarización. Las características de este sustrato se especifican en la tabla 2.

**Tabla 2. Características del sustrato elegido.**

Característica	Valor del sustrato grueso	Valor del sustrato delgado
$\epsilon_r$	4.08	4.08
H	1.57 mm	0.269mm
T	18 $\mu\text{m}$	18 $\mu\text{m}$
$\sigma$	$5.8 \times 10^7$ Siemens/m	$5.8 \times 10^7$ Siemens/m
$\tan\delta$	0.018	0.0182

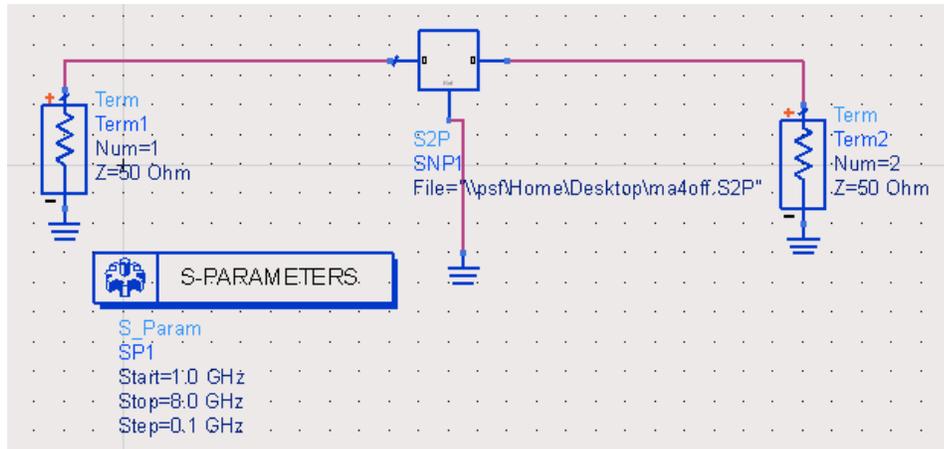
### 3.5 Elección del interruptor de RF

Para efectuar la conmutación que permitirá cambiar la topología del parche de la antena, que a su vez realizará el cambio de polarización, se requiere utilizar algún dispositivo interruptor de bajas pérdidas que funcione en RF. Por lo general se utilizan interruptores a base de transistores FET, MEMS, o diodos PIN.

El interruptor de RF elegido para utilizarse en este trabajo es el diodo PIN. Estos son ampliamente utilizados por su bajo costo y alta confiabilidad. El modelo de diodo PIN que se utilizó para el diseño es el MA4AGBLP912, de la compañía MA/COM. Este modelo ya ha sido utilizado en otro trabajo desarrollado en CICESE (Figueroa Torres, 2012), en donde se caracterizaron para obtener sus parámetros S, con un voltaje de alimentación de  $V=1.45$  V y una corriente máxima  $I=20$  mA.

Las características de mayor interés de este tipo de interruptores son las bajas pérdidas por inserción, así como sus dimensiones físicas, ya que éstas deben de ser tomadas en cuenta en el diseño de la antena, dejando el espacio adecuado para su colocación tanto en el parche como en los circuitos de alimentación. La hoja de datos del diodo PIN se encuentra en los anexos de este trabajo de tesis. Las dimensiones de interés son el largo (0.4mm) y ancho (0.12mm).

Los resultados obtenidos por Figueroa (2012) se analizaron en el software de análisis electromagnético ADS con la configuración mostrada en la figura 17.



**Figura 17. Circuito utilizado para efectuar el análisis de los parámetros del diodo PIN.**

En la figura 18 se muestra el parámetro S11 del diodo PIN en sus estados de encendido (ON) que se encuentra en línea sólida y en apagado (OFF) que se encuentra en línea punteada. Como se puede observar, cuando el diodo está encendido la respuesta cae en el centro de la carta de Smith como es de esperarse, ya que existe una buena adaptación al comportarse el S21 como un cortocircuito. Cuando está apagado su respuesta se encuentra sobre el lado derecho de la carta de Smith comportándose como un circuito abierto.

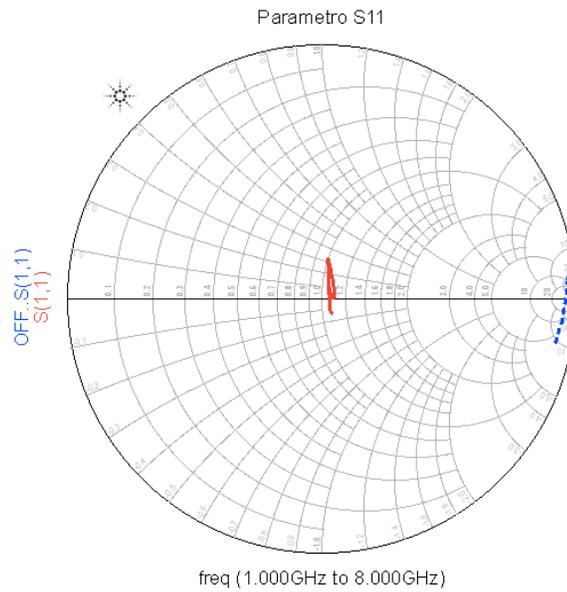


Figura 18. Parámetro S11 del diodo PIN en encendido (línea sólida) y apagado (línea punteada).

En la figura 19 se muestra el parámetro S21 del diodo PIN, el cual muestra que a la frecuencia de operación de 2.4 GHz se tienen pérdidas por inserción de aproximadamente -0.4 dB cuando el diodo está encendido (ON, curva con línea sólida) y pérdidas por inserción de aproximadamente -23 dB cuando el diodo PIN está apagado (OFF, curva con línea punteada).

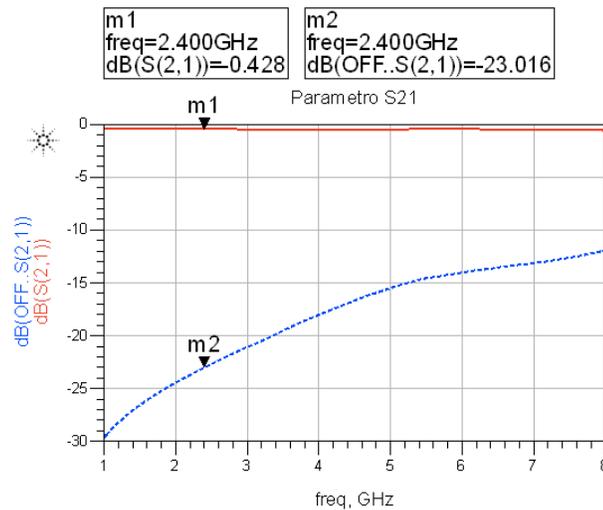


Figura 19. Parámetro S21 del diodo PIN en encendido (línea sólida) y apagado (línea punteada).

### 3.6 Elección de la topología de la antena

El diseño de la antena reconfigurable con polarización variable, se lleva a cabo utilizando el método de las esquinas truncadas para poder provocar el cambio a polarización circular, como lo hizo Y. J. Sung, T. U. Jang y Y. S. Kim (2004). Sin embargo, debido a que se utilizan dos puntos de alimentación en el parche para lograr las cuatro polarizaciones diferentes (Circular de mano derecha RHCP, circular de mano izquierda LHCP, lineal vertical VLP y lineal horizontal HLP) se podrá prescindir de uno de los pares de esquinas truncadas, ya que al elegir un punto de alimentación diferente por medio de los diodos PIN, se cambia el sentido de giro de la polarización circular lograda.

### 3.7 Cálculo de las dimensiones del parche

El diseño del parche radiador de la antena se comienza calculando las dimensiones necesarias para lograr la resonancia a la frecuencia elegida de 2.45 GHz. Para esto, se utilizó el modelo de línea de transmisión, que sólo soporta parches rectangulares. En este modelo, el parche radiador se trata como una línea resonante con variaciones transversales del campo. Las variaciones del campo y la resonancia del parche, se determinan por la longitud del parche que comúnmente es de media longitud de onda, debiéndose considerar los efectos de extensión de los campos (ecuación 14). Este modelo permite obtener las dimensiones de los parches (ancho W y largo L) para una frecuencia en particular, y se calculan mediante las ecuaciones 10 a la 15 (Carver K. R, et al, 1981):

$$W = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (10)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{W/h}\right)^{-ab} \quad (11)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left( \frac{(W/h)^4 + (W/52h)^2}{(W/h)^4 + 0.432} \right) + 1 + \frac{1}{18.7} \ln \left( 1 + \left( \frac{W/h}{18.1} \right)^3 \right) \quad (12)$$

$$b = 0.564 \left( \frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (13)$$

$$\Delta l = 0.412h \left( \frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right) \left( \frac{(W/h) + 0.264}{(W/h) + 0.813} \right) \quad (14)$$

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta l \quad (15)$$

donde:  $W$  = Ancho del parche (m).

$c$  = Velocidad de la luz (m/s).

$\epsilon_r$  = Constante dieléctrica relativa (adimensional).

$fr$  = Frecuencia de resonancia (Hz).

$\epsilon_{eff}$  = Constante dieléctrica efectiva (adimensional).

$h$  = Altura del sustrato (m).

$\Delta l$  = Efecto de borde o de extremo abierto (m).

$L$  = Longitud del parche (m).

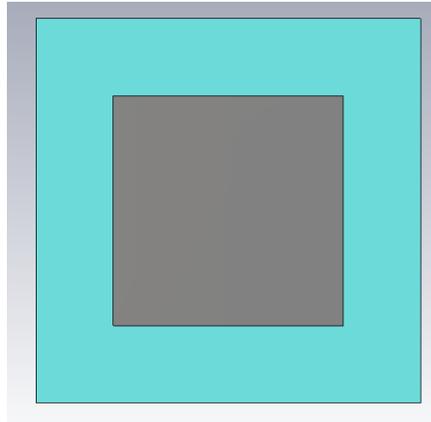
Las ecuaciones 10-15 se programaron en el software MATLAB, y utilizando las características del sustrato FR4 elegido y dado en la tabla 2, se obtuvo una longitud  $L=29.9$  mm, un ancho  $W=38.39$  mm y una relación  $L/W=0.7788$ . Sin embargo, por razones de simetría y para realizar el cambio de polarización, se requiere que el parche sea cuadrado, por lo cual se hace  $W=L=29.9$ mm, ya que la longitud  $L$  es la que define la frecuencia de resonancia de la antena.

### 3.8 Análisis electromagnético del parche cuadrado

Con la longitud  $L$  obtenida, se procede a realizar el análisis electromagnético de un parche cuadrado de dimensiones 29.9mm x 29.9mm en el software CST, considerando el sustrato elegido FR4 y con plano de tierra en la parte posterior.

#### 3.8.1 Optimización de las dimensiones del parche

Dado que la longitud  $L$  calculada no proporciona una frecuencia de resonancia en 2.45 GHz, se procedió a realizar una optimización utilizando la herramienta Parameter Sweep del software CST, la cual permite mover los parámetros preestablecidos dentro de un rango determinado. La optimización del parche que se muestra en la figura 20 se efectúa para poder encontrar la mejor respuesta del parche radiador a la frecuencia de 2.45 GHz.

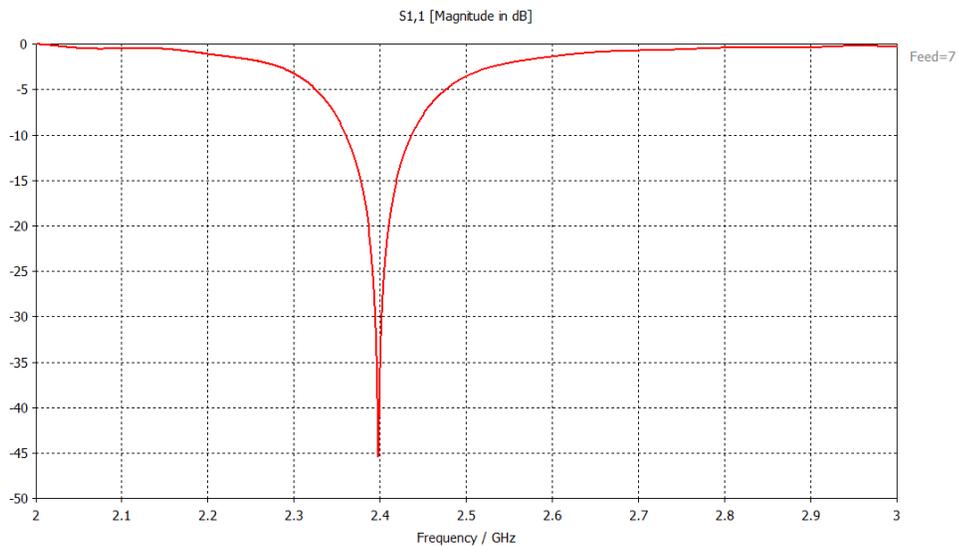


**Figura 20. Parche cuadrado con dimensiones LxL analizado en CST.**

### **3.8.1.1 Optimización del punto de alimentación**

El primer parámetro a optimizar es el punto de alimentación de la antena, razón por la cual se definió el parámetro Feed, que representa la distancia a la que se encuentra el puerto discreto del centro del parche sobre el eje X. La primera optimización se hizo variando el parámetro Feed del centro del parche desde 5 a 15 mm. La mejor respuesta se obtuvo para un valor de Feed=7mm.

Posteriormente, se realizó una segunda optimización utilizando un valor de Feed más fino que varia solo de 6 a 8 mm, debido a que se identificó que las mejores respuestas obtenidas en el análisis anterior se dieron entre esos valores de Feed. La mejor respuesta obtenida fue nuevamente con el valor de Feed= 7mm, como se muestra en la figura 21. Es con este valor de Feed con el que se procede a optimizar la longitud del parche para centrar la frecuencia en 2.45GHz.

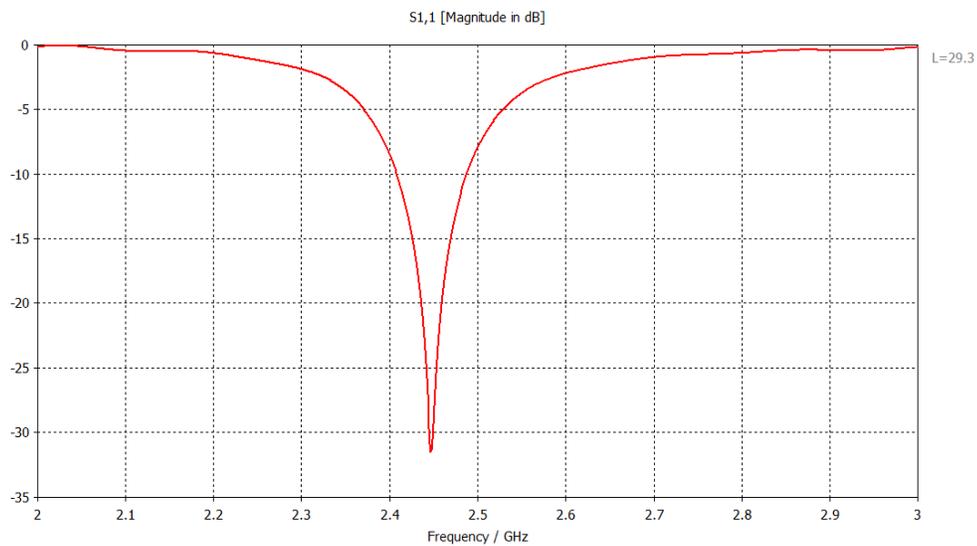


**Figura 21. Parámetro S11 resultante de la variación fina del valor del parámetro Feed.**

### 3.8.1.2 Optimización del largo del parche

Como se puede observar en el resultado de la figura 21, la respuesta del parche está centrada en 2.4GHz y no en los 2.45 GHz deseados, por lo que se procede a hacer una variación del parámetro L que representa la longitud de un lado del parche. Para optimizar la longitud se varía de 29 a 31 mm, y se encontró que la respuesta más aproximada a la frecuencia de 2.45 GHz es con un valor de L=29.5mm.

Posteriormente se realizó una segunda variación más fina de L, de 29 a 30 mm en pasos de 0.1mm, lográndose una L=29.3mm que hace que la respuesta se encuentre centrada en 2.45 GHz, como se puede apreciar en la figura 22.

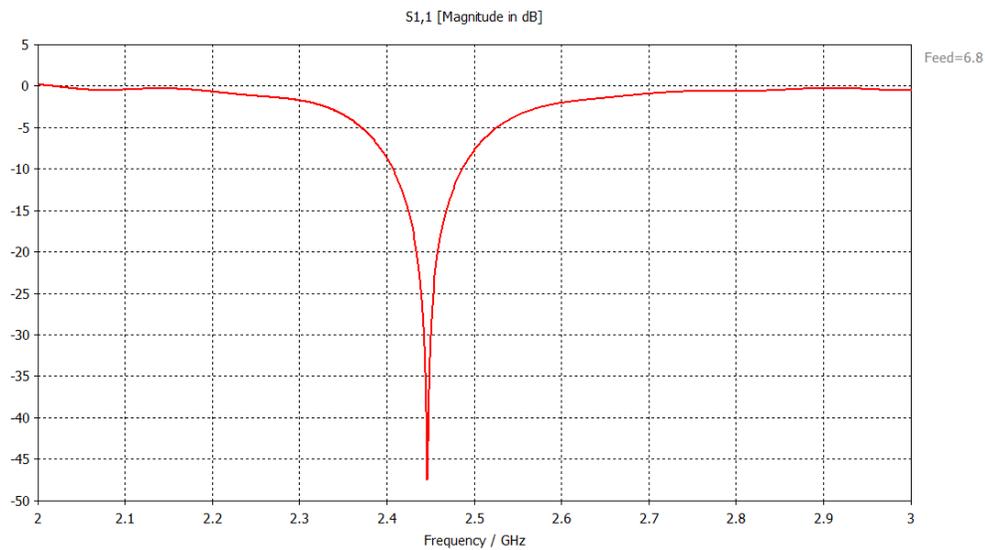


**Figura 22. Parámetro S11 resultante de la segunda variación de L en pasos de 0.1mm.**

### 3.8.1.2.1 Optimización del punto de alimentación

Teniendo la respuesta centrada en la frecuencia de 2.45 GHz deseada, se vuelve a efectuar una variación del punto de alimentación, ya que al modificar las dimensiones del parche, el punto de alimentación se modifica. El parámetro Feed se varió de 6.5 a 7.5 mm, encontrándose la mejor respuesta con un valor de Feed=6.8mm como se muestra en la figura 23, en donde se puede apreciar que las pérdidas por retorno disminuyen considerablemente y que la respuesta se encuentra centrada en 2.45GHz.

Es importante mencionar que no se consideró necesario realizar variaciones más finas de los parámetros Feed y L, debido a que conforme se agregan más elementos a la antena a lo largo del proceso de diseño, los valores a los que se han llegado se modificarán como consecuencia, sin embargo, estos proporcionan los rangos de los valores con los cuales se logra una buena respuesta.



**Figura 23. Parámetro S11 resultante de la optimización del parámetro Feed.**

### 3.8.2 Análisis del parche con esquinas truncadas

Como se mencionó anteriormente, la topología que se utiliza para lograr el cambio a polarización circular es la del parche cuadrado con esquinas truncadas, como lo hicieron Nazia Hasan y S.C. Gupta (2014). En dicha publicación se diseña una antena con polarización circular utilizando este principio y la regla de la que partieron para la truncación de las esquinas es que la longitud de la esquina debe ser  $L/5$ . Aplicando esta regla al parche de este trabajo, se divide la longitud de 29.3mm entre 5 ( $29.3/5$ ), resultando la truncación de 5.86 mm requerida.

La truncación del parche se realizó fijando el parámetro CPH que se define como la distancia del centro hacia cada una de las esquinas que se truncaron, las cuales se encuentran encontradas o en esquinas opuestas. Otro factor a considerar es que a diferencia de la antena diseñada por Nazia Hasan y S.C. Gupta (2014), la antena diseñada en este trabajo mantendrá las esquinas similares al trabajo de Y. J. Sung, T. U. Jang y Y. S. Kim (2004). De esta manera se podrá lograr el cambio de polarización colocando los diodos PIN entre las ranuras de las esquinas, para lo cual resulta importante conocer las dimensiones del diodo.

Para conocer el valor de CPH requerido, en primer lugar es necesario conocer el valor de CPH correspondiente desde el centro del parche hasta una de sus esquinas que definiremos como CPHT y es igual a la suma de CPH+LD+HT. Este se puede calcular tomando el parche cuadrado y seccionarlo en cuatro partes, en donde cada una corresponde a un triángulo rectángulo como se puede apreciar en la figura 24, con un lado L conocido de 29.3 mm que sería la hipotenusa del triángulo, donde los otros dos ángulos son de 45° debido a que se trata de un triángulo equilátero. Se utiliza la propiedad trigonométrica de la ecuación (16) para conocer el cateto opuesto o CPHT, como se describe en las ecuaciones 17 a 19.

$$\text{sen}\theta = \frac{\text{Cateto opuesto}}{\text{Hipotenusa}} = \frac{\text{CPHT}}{L} \quad (16)$$

$$\text{CPHT} = L\text{sen}\theta \quad (17)$$

$$\text{CPHT} = 29.3\text{sen}45^\circ \quad (18)$$

$$\text{CPHT} = 24.931 \text{ mm} \quad (19)$$

El siguiente paso es calcular la longitud de CPH que resultará de una truncación  $T=5.86$  mm. Para esto se resuelve otro triángulo rectángulo cuya hipotenusa es  $T=5.86$  mm y la longitud del cateto opuesto resultante corresponderá a HT (altura de la truncación) + LD (largo del diodo PIN). El cálculo se puede observar en las ecuaciones 20-23.

$$\text{sen}\theta = \frac{\text{Cateto opuesto}}{\text{Hipotenusa}} = \frac{\text{HT}+\text{LD}}{T} \quad (20)$$

$$\text{HT} + \text{LD} = T\text{sen}\theta \quad (21)$$

$$\text{HT} + \text{LD} = 5.86\text{sen}45^\circ \quad (22)$$

$$\text{HT} + \text{LD} = 4.254 \text{ mm} \quad (23)$$

Entonces, el valor de CPH que proporciona una truncación de 5.86 mm es la resta del valor de CPHT menos el de HT+LD, como se aprecia en las ecuaciones 24 a 26.

$$CPH = CPHT - (HT + LD) \quad (24)$$

$$CPH = 24.931 - (4.2454) \quad (25)$$

$$CPH = 20.677 \quad (26)$$

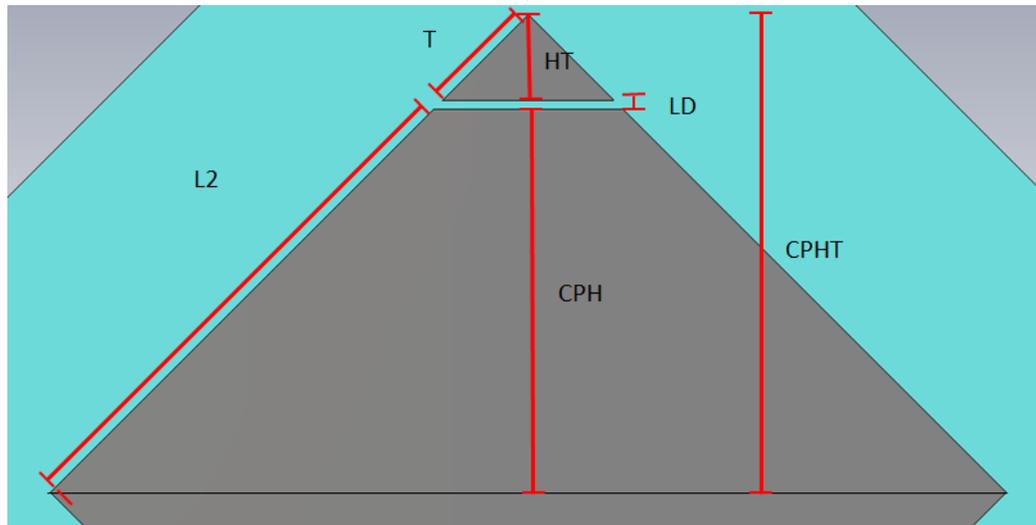


Figura 23. Triángulo rectángulo equilátero resuelto para obtener el valor de CPH.

En la figura 24 se muestra el parche con las esquinas truncadas con un parámetro  $CPH=20.677$  mm, con una truncación de 5.86 mm.

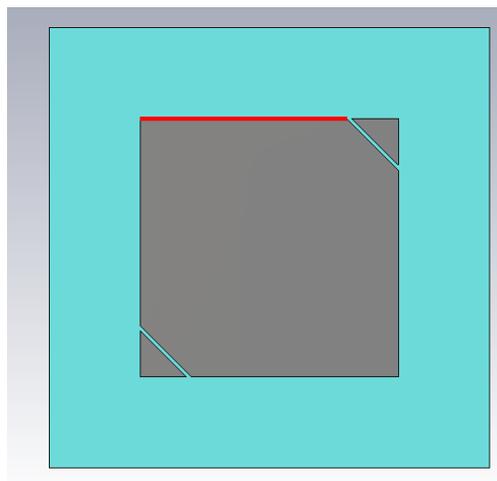
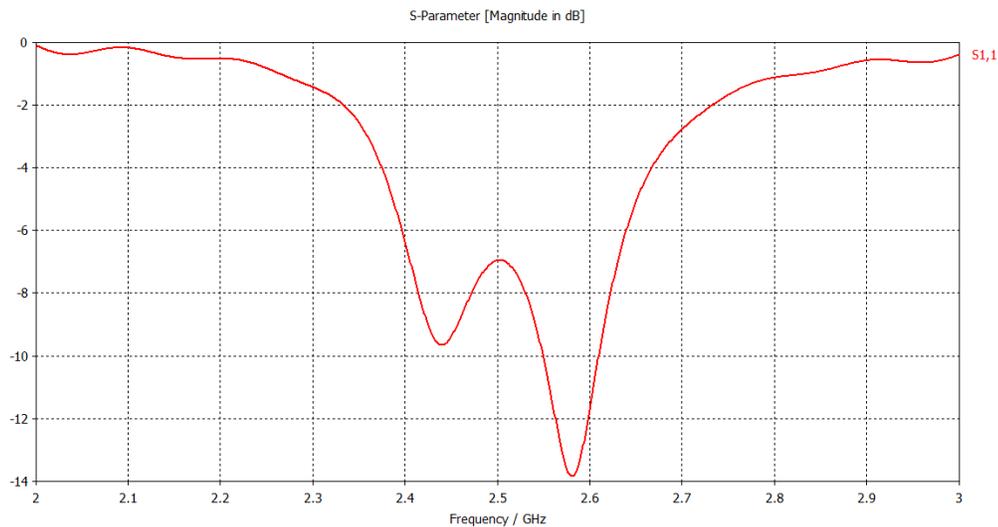


Figura 24. Parche con truncaciones en las esquinas.

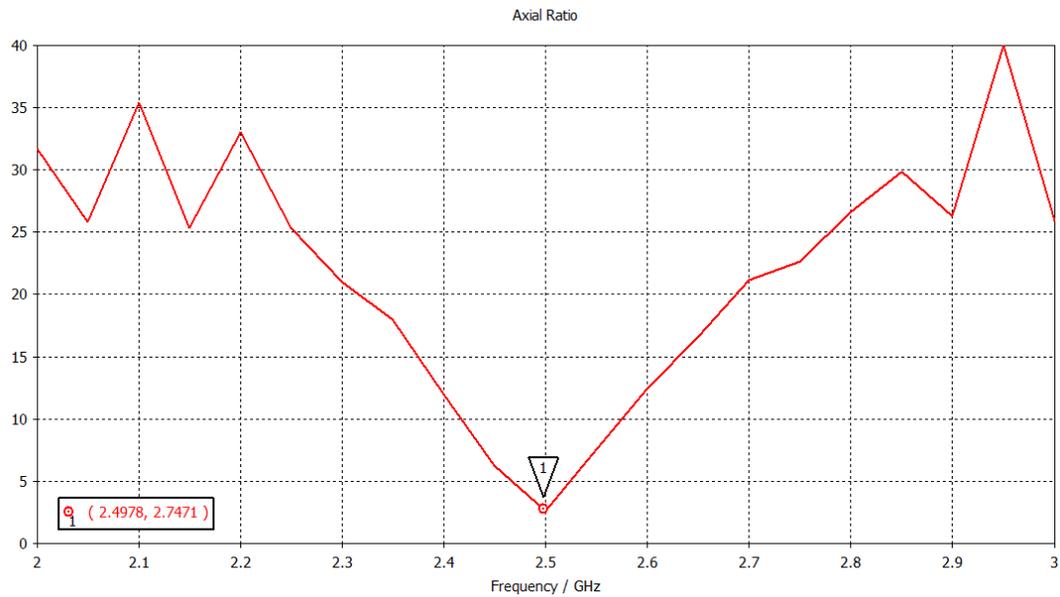
En la figura 24 el borde resaltado de color rojo tiene una longitud de 23.44 mm, que sustraída de la longitud original  $L=29.3$  mm, resulta una truncación de 5.83 mm con la que se procede a realizar el análisis electromagnético. El espacio entre el parche y las esquinas se definió como  $LD= 0.4\text{mm}$  que representa el largo del diodo PIN.

En dicho análisis se desea obtener una buena respuesta de las pérdidas por retorno ( $S_{11} < -10\text{dB}$ ), y también se busca tener una relación axial igual o menor a 3 dB que asegura que se tiene una polarización circular. En la figura 25 se muestra el parámetro  $S_{11}$  obtenido del análisis electromagnético del parche con las dimensiones mencionadas de  $CPH=16.6\text{mm}$ .



**Figura 25. Parámetro  $S_{11}$  del análisis del parche con  $CPH= 16.6$  mm.**

Como se puede observar en la figura 25, la respuesta se modificó considerablemente, lo que era de esperarse ya que se modificaron las dimensiones del parche, el cual se hizo más pequeño al truncar las dos esquinas por lo que resuena a una mayor frecuencia (2.58GHz). En la figura 26 se presenta la relación axial graficada en función de la frecuencia.

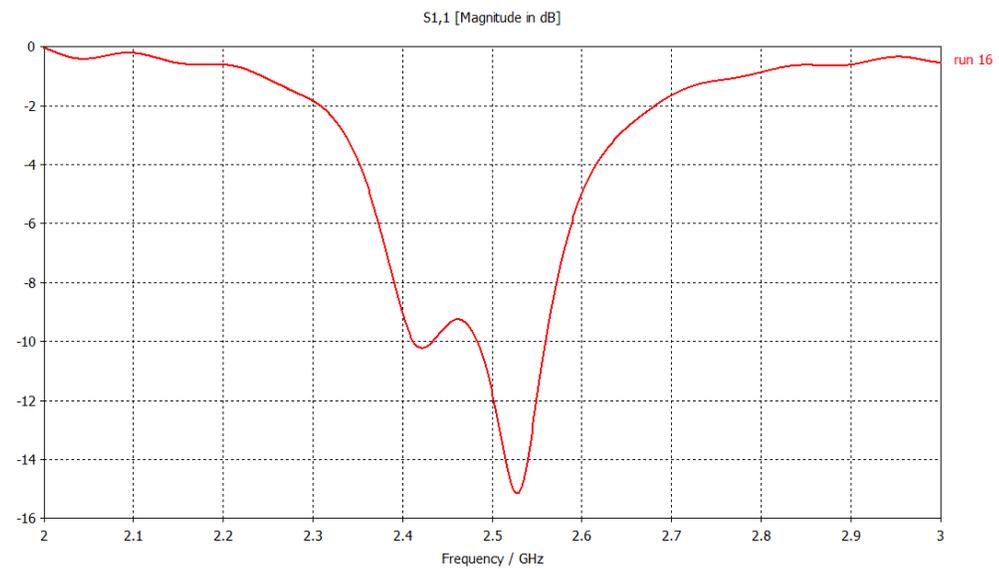


**Figura 26. Relación axial del parche con las esquinas truncadas y CPH=16.6 mm.**

Como se puede observar en la figura 26, se obtuvo una relación axial menor a 3 dB utilizando la regla de L/5, sin embargo, está centrada en 2.5 GHz, por lo que se procede a efectuar una optimización de las dimensiones para lograr esta relación axial menor a 3 dB pero centrada en 2.45 GHz.

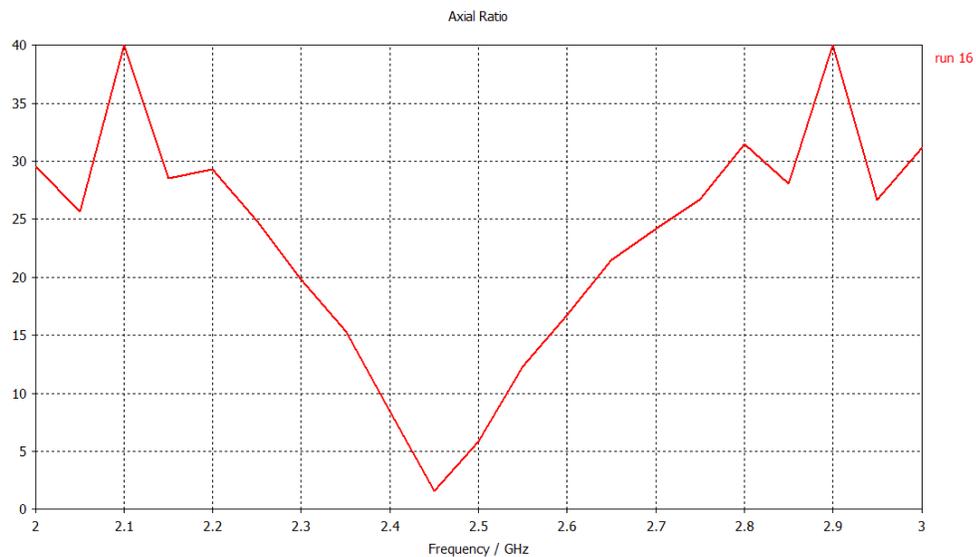
### 3.8.2.1 Optimización de las dimensiones del parche con las esquinas truncadas

El siguiente paso fue hacer una variación de los tres parámetros que están en juego para lograr mejorar la respuesta del parámetro S11 como la relación axial menor a 3 dB centrada en 2.45 GHz, los cuales son: la longitud del parche L, el punto de alimentación Feed, y la distancia a la que se encuentra el corte de las esquinas CPH. Para realizar esta optimización, la longitud L se varió entre 29 y 30 mm, el punto de alimentación Feed se varió entre 6.5 y 7.5 mm, y el parámetro CPH se movió entre 17.5 y 18 mm. De todas la curvas resultantes, la 16 fue la que presentó una mejor respuesta simultánea del S11 y la relación axial. El parámetro S11 del análisis 16 se muestra en la figura 14, para los parámetros L=29.6mm, Feed=7mm y CPH=17.5mm.



**Figura 27. Parámetro S11 del análisis número 16.**

Como se puede observar en la figura 27, a pesar de que no resuena centrado en la frecuencia de 2.45 GHz, se tiene una respuesta por debajo de -9 dB en todo el ancho de banda de 2.4 a 2.5 GHz lo cual podría considerarse aceptable. La relación axial lograda en este análisis fue de 1.66 y se muestra en la figura 28.



**Figura 28. Relación axial del análisis número 16.**

### **3.9 Diseño de la red de alimentación en la parte posterior del parche**

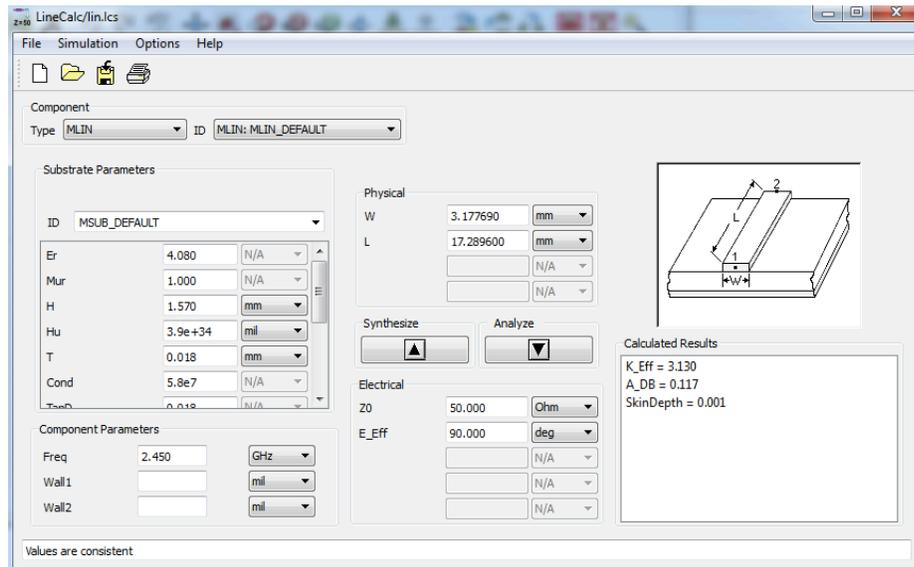
Como se mencionó anteriormente, la antena diseñada en este trabajo de tesis tiene la particularidad de ser alimentada por dos puntos distintos, los cuales se eligen por medio de dos diodos PIN colocados en la parte trasera de la antena. Para esto se utilizan dos substratos del tipo FR4: un substrato grueso ( $h=1.57\text{mm}$ ) para la estructura radiante o parche y un substrato delgado ( $h=0.269\text{mm}$ ) para la red de alimentación de los diodos PIN, teniendo la estructura un doble plano de tierra. La ventaja que proporciona esto es que sólo se tiene que cortar un par de esquinas opuestas para poder alcanzar los 4 estados de polarización deseados. Para ello, se propusieron distintas geometrías para lograr una mejor respuesta de la antena.

#### **3.9.1 Diseño de la red de alimentación en el substrato grueso**

Inicialmente, se contemplaba utilizar el mismo espesor del substrato tanto en la parte del parche radiador como en la parte posterior correspondiente a la red de alimentación. El substrato grueso hace que el ancho  $w$  de las líneas de  $50\ \Omega$  sea muy grande, en comparación con el ancho de las terminales de los diodos PIN. Entre más anchas sean las líneas, mayor efecto de fringing se presenta, lo que provoca a su vez un acoplamiento entre las líneas, aún cuando el diodo PIN se encuentre abierto. Debido a esto, se cambió el substrato grueso ( $h=1.57\text{mm}$ ) por uno más delgado ( $h=0.269\text{mm}$ ), con el fin de que las líneas resultantes fueran más delgadas y se minimizara en gran parte el efecto de fringing.

##### **3.9.1.2 Cálculo de la línea de $50\ \Omega$ en el substrato grueso**

El primer paso para el diseño de la red de alimentación en el substrato grueso fue calcular las dimensiones de la línea de  $50\ \Omega$  sobre este substrato. Para esto se utilizó la herramienta LineCalc del software ADS, en donde se ingresaron los datos del substrato y la frecuencia de operación deseada de 2.45 GHz como se muestra en la figura 29.



**Figura 29. Ventana de la herramienta LineCalc en el software ADS.**

El resultado del diseño con LineCalc más importante es el ancho  $W$  que resulta con un valor de 3.1 mm para una línea de  $50 \Omega$ , ya que en este caso la longitud  $L$  de las líneas tendrá que establecerse dependiendo de donde se encuentren los puntos de alimentación y de la topología utilizada.

### 3.9.1.3 Topologías propuestas con el sustrato grueso

Utilizando el ancho de la línea calculado de  $W=3.1$ , se propusieron distintas topologías para alimentar a la antena por dos puntos fijos previamente establecidos y que están dados por el valor de  $\text{Feed}=7$  mm, siendo un punto sobre el eje  $X$  con valor positivo y otro punto sobre el eje  $Y$  con valor negativo. Es importante mencionar que las siguiente topologías cuentan con una rama principal que parte de la esquina cortada que es donde se coloca el puerto de guía de onda, mientras que las dos ramas secundarias terminan en los hoyos metalizados “vías” que se conectan hacia el lado del parche y que su posición está dada por el parámetro  $\text{Feed}$ . Los diodos PIN se representan por los pequeños rectángulos que unen a las tres líneas anchas de 3.1

mm. Estos diodos están representados por líneas de tamaño  $LD=0.4$  mm que corresponde al largo del diodo y  $AD=0.12$  mm al ancho del diodo PIN. En la tabla 3 se presentan las diferentes topologías propuestas.

#### **a) Topología en forma de Y**

La primer topología propuesta es una en forma de Y en la cual se cortó la esquina inferior derecha de la antena, que incluye los dos substratos y el plano de tierra. Esto fue necesario para poner el puerto de guía de onda en la esquina y alimentar al parche.

Al efectuar el análisis electromagnético de esta topología, no funcionó debido a que el efecto de fringing provoca un acoplamiento de las líneas, de tal manera que se ignora el hecho de que estuvieran presentes las líneas que representan a los diodos PIN, consiguiéndose un mal comportamiento en la respuesta. Es por esto que se decidió proponer y analizar nuevas topologías. Esta topología se puede apreciar en el inciso (a) de la tabla 3.

#### **b) Topología en forma de T**

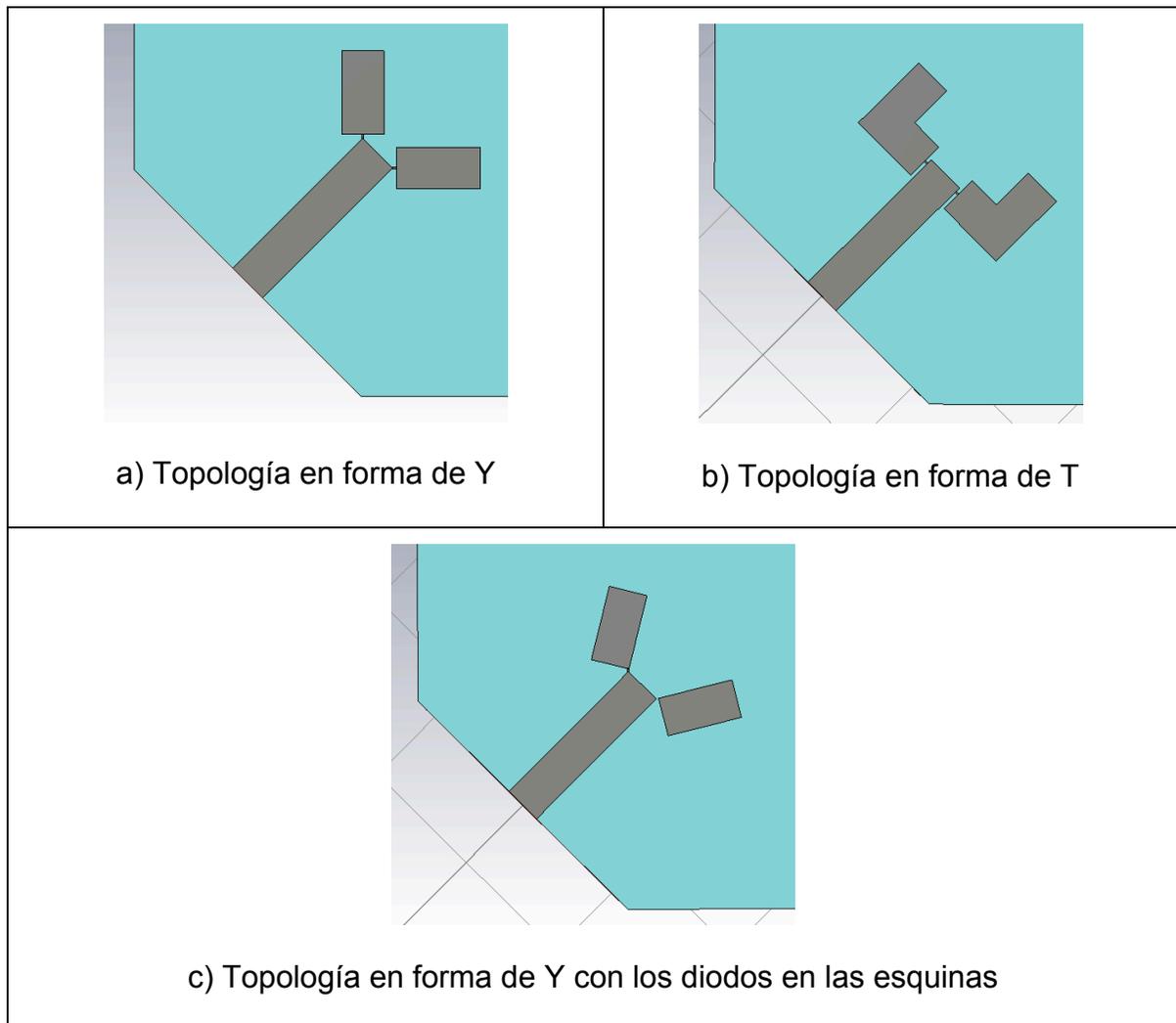
La intención de proponer esta topología es la de evitar el acoplamiento que se presentaba entre las dos ramas secundarias de la topología en forma de Y. La topología en forma de T se muestra en el inciso ( b) de la tabla 3. Con esta topología se logró solucionar el acoplamiento que se presentaba en las dos ramas secundarias al separarlas entre sí, sin embargo, el ancho de las líneas sigue siendo muy grande en comparación con el ancho del diodo PIN, el cual es muy pequeño. Entre más grande sea el ancho de las líneas, se hace presente de manera más significativa el efecto de fringing, lo que sumado a la proximidad entre ellas debido al tamaño pequeño del diodo PIN, seguía existiendo un acoplamiento entre la línea de la rama principal con las líneas secundarias.

#### **c) Topología en forma de Y con los diodos en las esquinas**

Esta topología tiene una forma similar a la primera presentada en el inciso (a), sin embargo, en esta topología los diodos PIN se colocaron en las esquinas de las líneas secundarias para minimizar el área de acercamiento entre las 3 líneas. En el

inciso (c) de la tabla 3 se muestra esta topología. Con esta topología se minimizó el acercamiento entre las líneas, lo que hizo que el efecto de fringing no afectara de manera significativa la respuesta, sin embargo, aún no fue suficiente para obtener la respuesta deseada. Es por esto que se decidió por utilizar un sustrato más delgado para la parte posterior de la antena.

**Tabla 3. Topologías propuestas con el sustrato grueso.**



### 3.9.2 Diseño de la red de alimentación en el sustrato delgado

Debido a que no se consiguió una respuesta aceptable con ninguna de las topologías propuestas con el sustrato grueso para la parte posterior dadas en las

figuras de la tabla 3, se optó por utilizar un sustrato más delgado, con un espesor  $h = 0.269$  mm (con las características dadas en la tabla 2). El utilizar un sustrato más delgado permite que las líneas tengan un ancho  $W$  menor, reduciendo el efecto de fringing, siendo factible alcanzar la respuesta esperada de la antena.

### 3.9.2.1 Cálculo de la línea de $50 \Omega$ en el sustrato delgado

El primer paso para el diseño de la red de alimentación en este sustrato delgado ( $h=0.269$  mm) fue calcular una línea de  $50 \Omega$  sobre este sustrato. Para ello se utilizó la herramienta LineCalc del software ADS, en donde se ingresaron los datos del sustrato y la frecuencia de operación deseada de 2.45 GHz como se muestra en la figura 30.

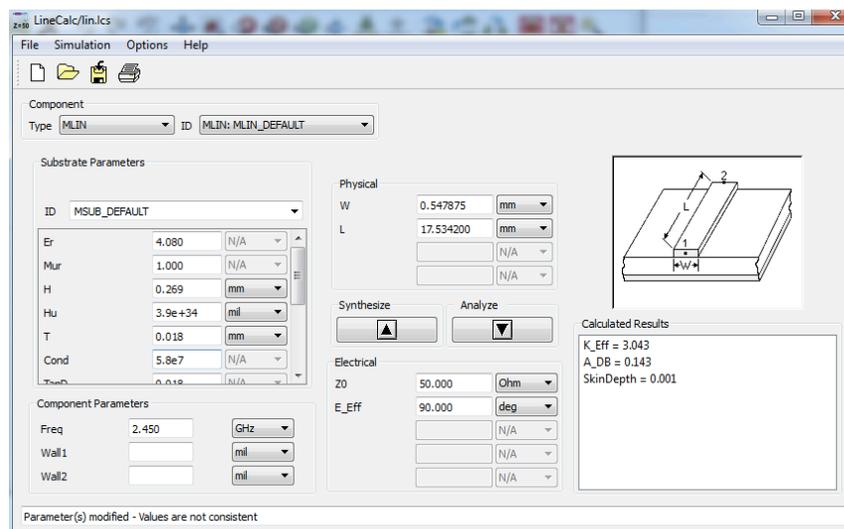
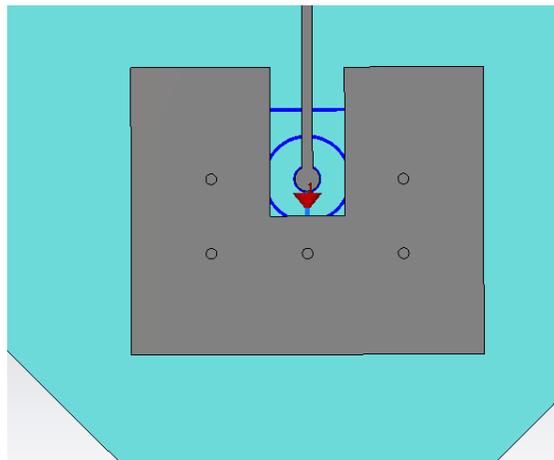


Figura 30. Ventana de la herramienta LineCalc del software ADS para el sustrato delgado.

El ancho  $W$  calculado resultó ser de 0.547 mm, ya que la longitud  $L$  de las líneas dependerá de la posición donde se encuentren los puntos de alimentación y de la topología utilizada.

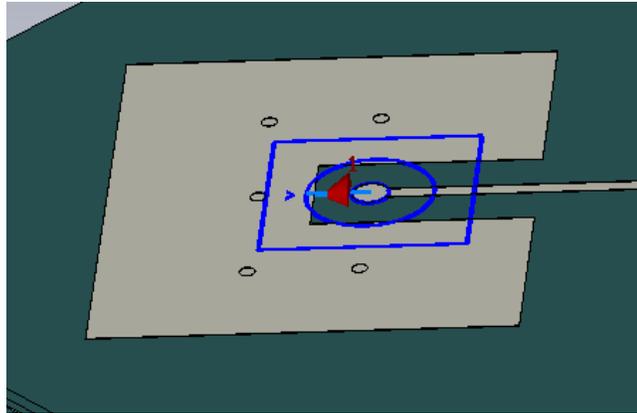
### 3.9.2.2 Topología propuesta de la red de alimentación con el sustrato delgado

El tener ahora líneas más delgadas para lograr la alimentación de la antena, permitió proponer otra topología de la red de alimentación para colocar el puerto. La primera modificación se hizo en la forma en la que el puerto alimenta a la antena. Para ello, se cambió de la esquina del sustrato, a la estructura mostrada en la figura 31, donde se colocará un conector SMA directamente sobre el sustrato más delgado. Como se puede apreciar, para lograr esto se subió el plano de tierra hacia la superficie del sustrato delgado por medio de hoyos metalizados “vías” con un diámetro de 0.41 mm.



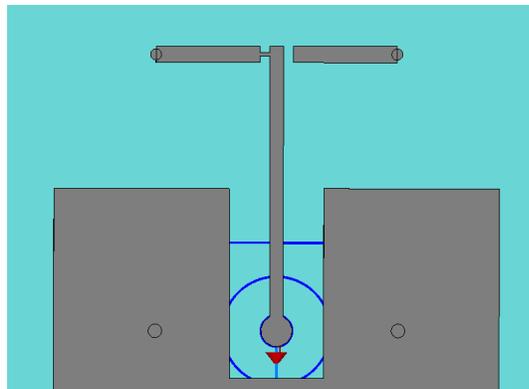
**Figura 31. Vista de la geometría diseñada para conectar el puerto.**

Como se puede observar en la figura 31, se colocan 5 vías hacia tierra para que hagan contacto con la tierra del conector tipo SMA. También se puede apreciar en el centro el punto donde llega la alimentación de la antena por medio del puerto justo sobre la línea principal. Las líneas azules son guías que se pusieron con las dimensiones medidas del puerto. En la figura 32 se puede observar el puerto desde otro ángulo.



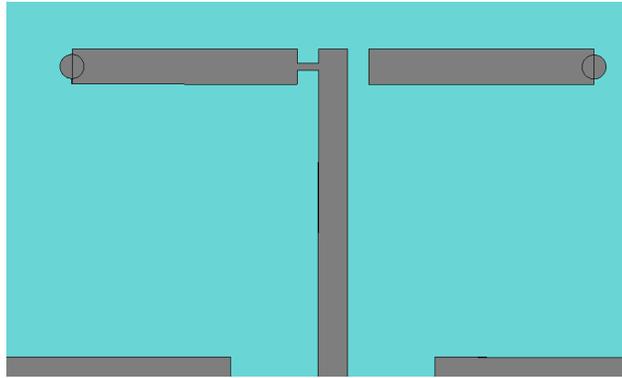
**Figura 32.** Otro ángulo de la vista de la geometría en donde va conectado el puerto.

Enseguida se cambiaron las líneas de alimentación que conectan al parche que se encuentra en el substrato grueso. Al tener líneas más delgadas, se pudo implementar una topología en forma de T, minimizando el efecto de fringing. En la figura 33 se puede observar la topología propuesta utilizada para la red de alimentación.



**Figura 33.** Vista de la red de alimentación del parche.

En la figura 34 se proporciona un acercamiento al área en donde se encuentran las líneas que representan los diodos PIN. Se puede observar la topología utilizada para alimentar el parche radiador en dos puntos distintos, representados por los dos círculos al final de la línea horizontal superior.



**Figura 34. Acercamiento de la red de alimentación del parche.**

La longitud de las líneas está dada por la distancia entre los dos puntos de alimentación dados por el parámetro Feed calculado inicialmente y optimizado posteriormente. La separación entre la rama principal y las ramas secundarias es el largo  $LD=0.4\text{mm}$  correspondiente al diodo PIN. En este caso, la alimentación toma el camino del lado izquierdo porque la línea delgada en corto representa el diodo PIN en estado de encendido, mientras que la del lado derecho se encuentra abierta para el estado de apagado.

### **3.10 Diseño del circuito de alimentación para los diodos PIN**

Para poder proporcionar el voltaje  $V=1.45\text{ V}$  y la corriente  $I=10\text{ mA}$  a cada uno de los diodos PIN para su encendido, fue necesario diseñar filtros pasabajas para que la RF con la que el parche está siendo alimentado no fluya hacia los reguladores de voltaje y los stubs a tierra correspondientes.

Utilizando la herramienta LineCalc del software de análisis electromagnético y realizando una optimización de sus dimensiones, se encontró que para la frecuencia de  $2.45\text{ GHz}$  se requiere de un stub a tierra con una longitud de  $90$  grados eléctricos ( $L=18\text{ mm}$ ) calculado a la frecuencia de  $2.45\text{ GHz}$ . El diagrama esquemático utilizado en el software ADS (Advanced Design System) se presenta en la figura 35, el cual consiste de dos pequeños segmentos de líneas de  $50\ \Omega$  y en el centro una línea delgada ( $w=0.1\text{mm}$ ) y con una longitud ( $L=18\text{mm}$ ) conectada a tierra. Los resultados del análisis

con ADS se presentan en la figura 36. Como se puede observar en la figura 36, el stub a tierra diseñado resuena a una frecuencia cercana a 2.45GHz, lo cual provoca que a la frecuencia de operación se comporte como un circuito abierto, mientras que en bajas frecuencias (DC) se comporta como un cortocircuito, dado que este elemento se encuentra a tierra.

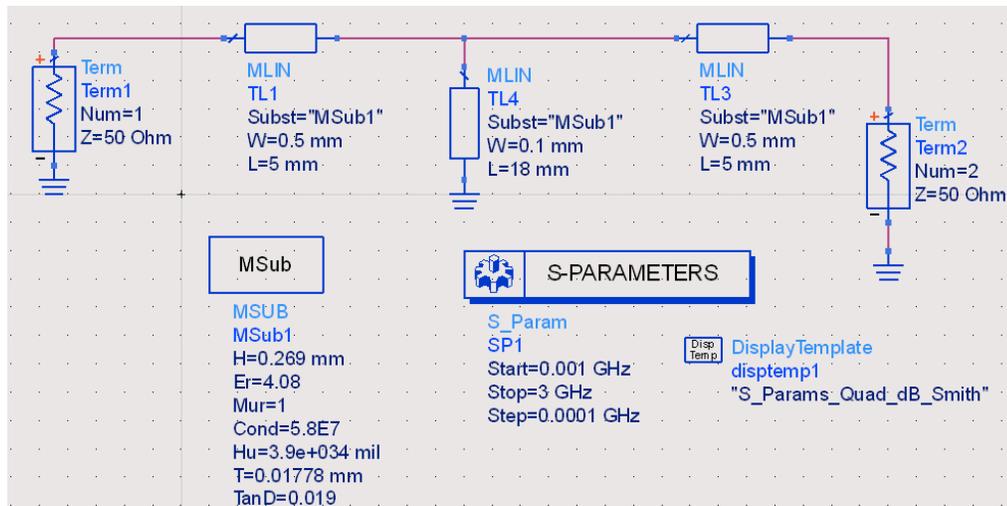


Figura 35. Esquemático utilizado en ADS para el diseño del stub a tierra.

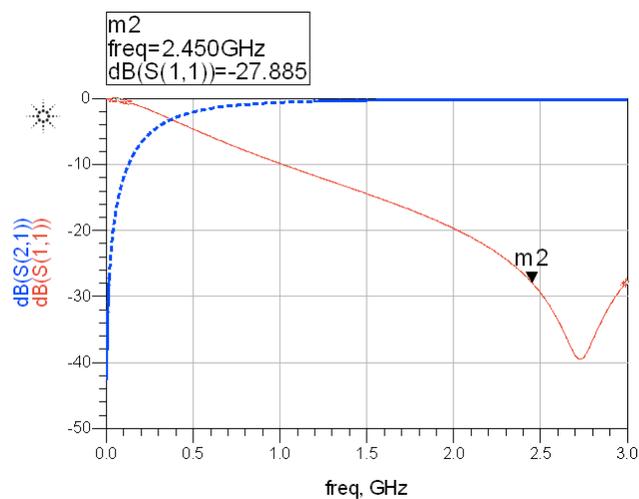


Figura 36. Parámetro S11 (línea sólida) y S21 (línea punteada) del stub a tierra.

Para proveer la DC y alimentar a los diodos PIN, se diseñó un filtro pasabajas de tercer orden, de la forma inductor-capacitor-inductor. Para los inductores, se emplearon dos líneas inductivas con una longitud  $L=18$  mm de largo y ancho  $W=0.1$  mm, similares a las empleadas para la línea en corto previamente diseñada. Además, se utilizó un capacitor de  $10,000$  pF con tamaño 0201 como base para el diseño, cuyas dimensiones son: largo  $L=0.6$  mm, ancho  $W=0.3$  mm y una altura  $h=0.3$  mm. Utilizando la herramienta LineCalc se realizó el análisis electromagnético de la estructura dada en la figura 37, y sus resultados correspondientes se muestran en la figura 38.

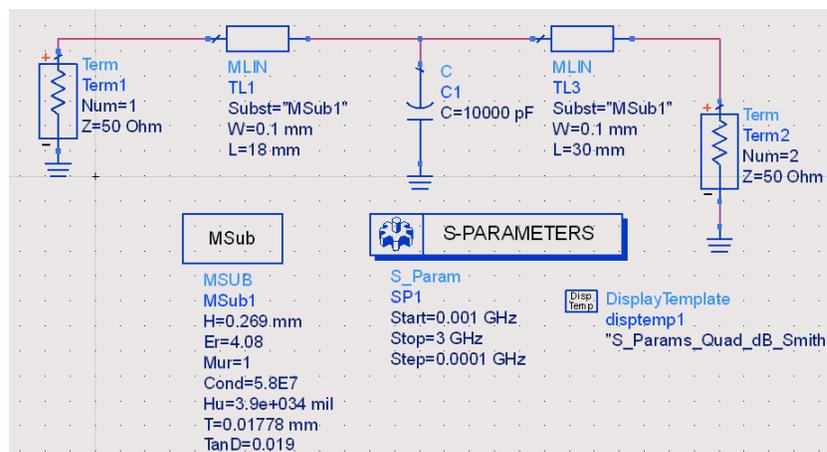


Figura 37. Diagrama esquemático en ADS para el diseño de los filtros de alimentación de los diodos PIN.

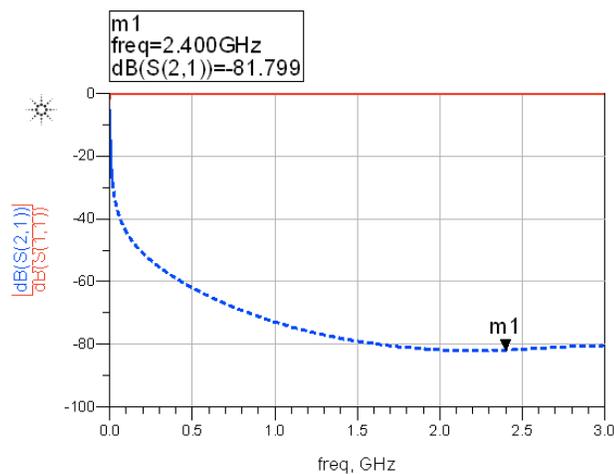


Figura 38. Parámetro S11 (línea sólida) y S21 (línea punteada) del filtro de alimentación de los diodos PIN.

Como se puede observar en la figura 38, el filtro funciona adecuadamente ya que éste permite pasar las bajas frecuencias (especialmente DC) y atenúa las altas frecuencias. Se puede notar que a partir de 100MHz se tiene una atenuación mayor a 40dB, y que a la frecuencia de 2.4GHz la señal se atenúa 81.79dB lo cual indica que se bloquean las altas frecuencias.

### **3.11 Optimización de las dimensiones del parche de la antena**

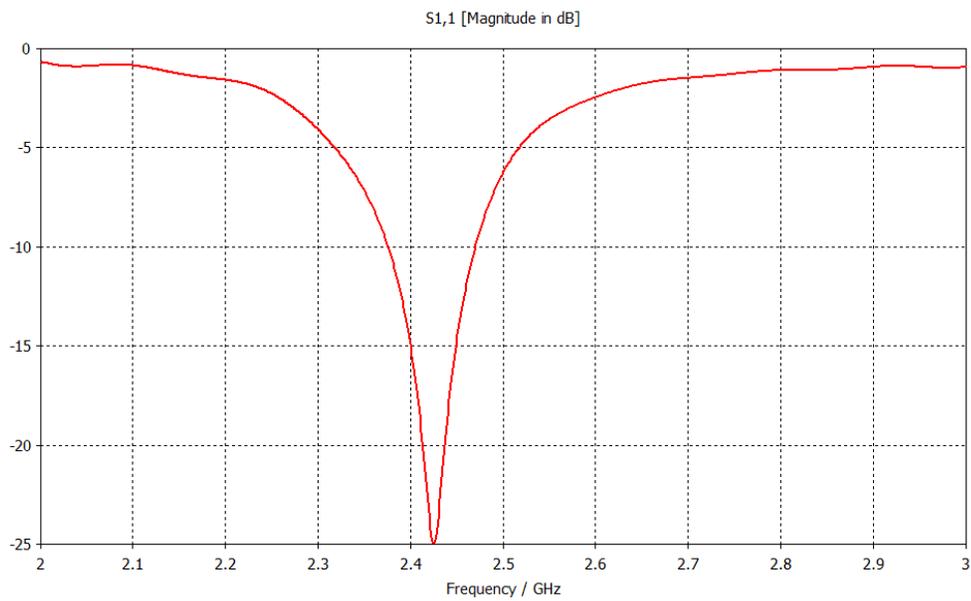
Las dimensiones del parche de la antena se optimizaron en primer lugar sólo con el parche y la red de alimentación, con el fin de tener un punto de comparación al momento de realizar la optimización de las dimensiones al incluir a los filtros y stubs, ya que el comportamiento de los circuitos debe de ser idealmente transparente al del parche.

Esta optimización se llevo a cabo sobre los parámetros L, CPH y Feed, buscando obtener la mejor respuesta posible tanto de pérdidas por retorno en el parámetro S11 y de relación axial. Es importante mencionar que la optimización se realizó sobre la antena en la configuración de polarización circular de mano derecha (RHCP). Esto se debe a dos razones: la primera es que en las polarizaciones circulares se tiene que buscar un compromiso entre los resultados de pérdidas por retorno y relación axial menor o igual a 3 dB, requerimiento que no se presenta en las lineales donde la relación axial sólo se requiere que sea alta. La segunda razón es que la geometría de la antena al ser simétrica, debe de proporcionar un comportamiento idéntico o al menos muy parecido para la polarización circular de mano izquierda.

Los mejores resultados se obtuvieron con los valores: L=30 mm, CPH=17.6 mm y Feed=6.8 mm. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las polarizaciones con dichos valores.

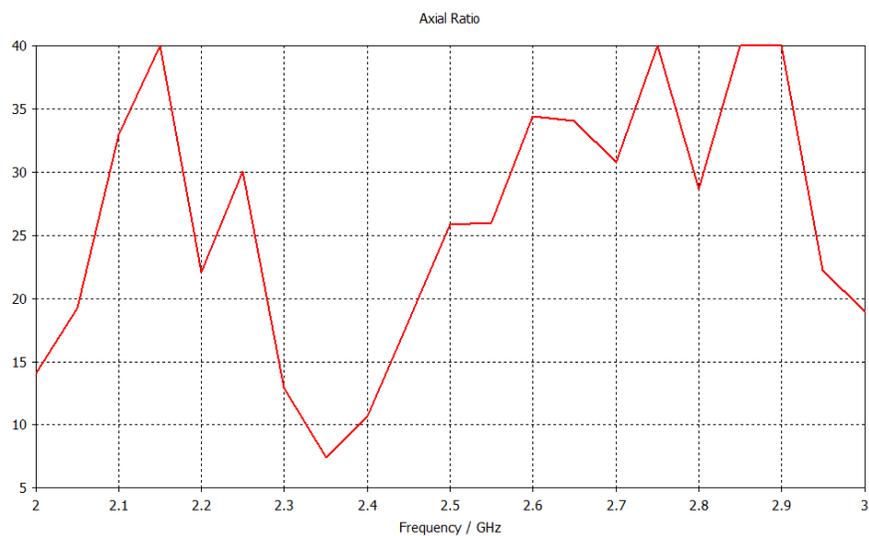
#### **3.11.1 Polarización lineal horizontal sin circuitos de alimentación**

En la figura 39 se pueden observar las pérdidas por retorno en el parámetro S11 de la polarización lineal horizontal, en donde se aprecia que disminuye hasta un valor de -25 dB y se encuentra centrada en 2.42GHz, cubriendo casi todo el ancho de banda.



**Figura 39. Parámetro S11 de la polarización lineal horizontal sin circuitos de alimentación.**

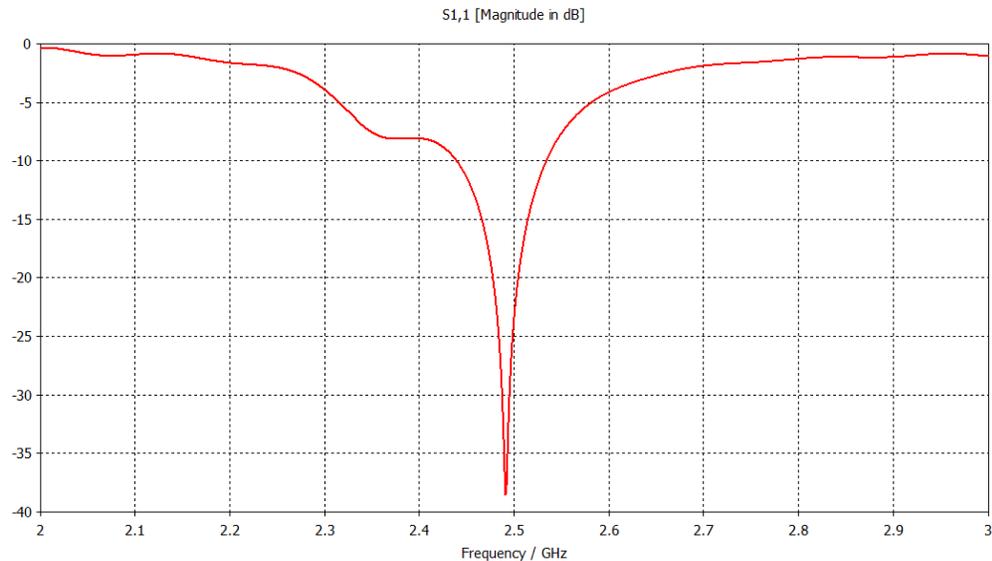
En la figura 40 se puede observar el comportamiento de la relación axial de la polarización lineal. Como se puede apreciar a la frecuencia de 2.45 GHz, se tiene un valor de aproximadamente 20 dB lo cual es más que suficiente para considerarse como una polarización lineal.



**Figura 40. Relación axial de la polarización lineal horizontal sin circuitos de alimentación.**

### 3.11.2 Polarización circular de mano derecha sin circuitos de alimentación

En la figura 41 se pueden observar las pérdidas por retorno en el parámetro S11 de la polarización RHCP, en donde se puede apreciar que si cumple el requerimiento de estar por debajo de -10 dB a la frecuencia de 2.45 GHz y superior, pero que a la frecuencia de 2.4 GHz se encuentra en -8 dB.



**Figura 41. Parámetro S11 de la polarización circular de mano derecha sin circuitos de alimentación.**

En la figura 42 se puede observar la relación axial de la polarización RHCP. Como se puede apreciar, a la frecuencia de 2.45 GHz se tiene un valor de aproximadamente 1.1 dB lo cual cumple con la condición establecida de que para considerarse una polarización circular, se debe tener una relación axial igual o menor a 3 dB.

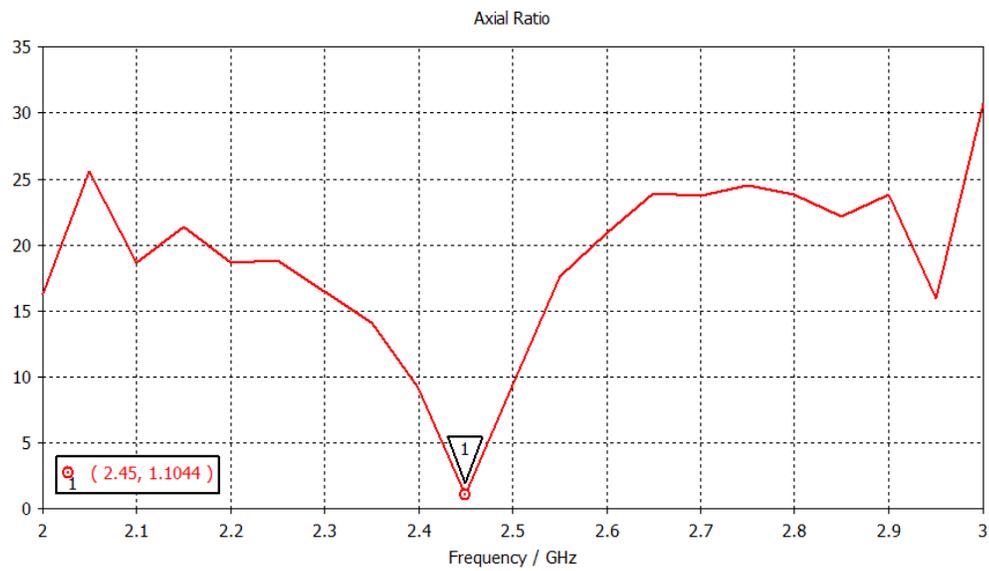


Figura 42. Relación axial de la polarización circular de mano derecha sin circuitos de alimentación.

### 3.11.3 Polarización lineal vertical sin circuitos de alimentación

En la figura 43 se pueden observar las pérdidas por retorno en el parámetro S11 de la polarización vertical, en donde se aprecia que disminuye hasta un valor de -25 dB y cubre casi todo el ancho de banda.

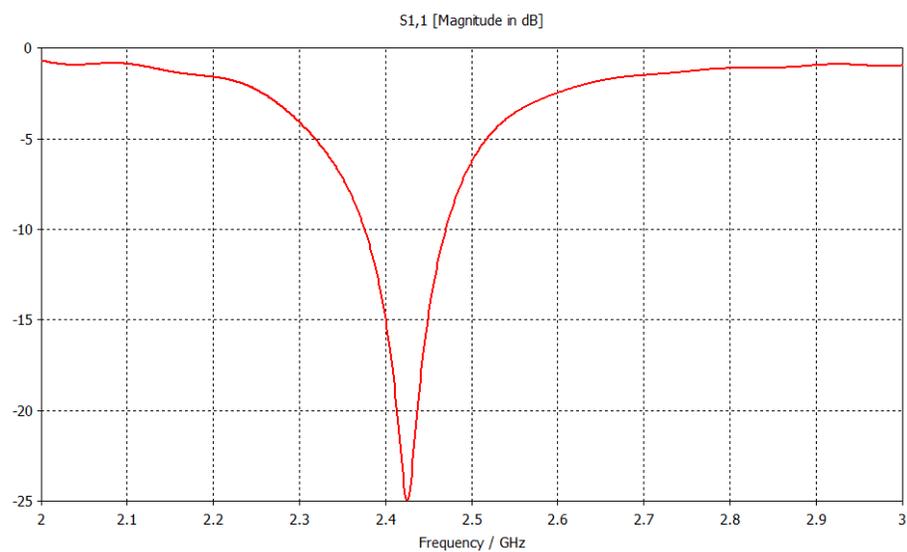
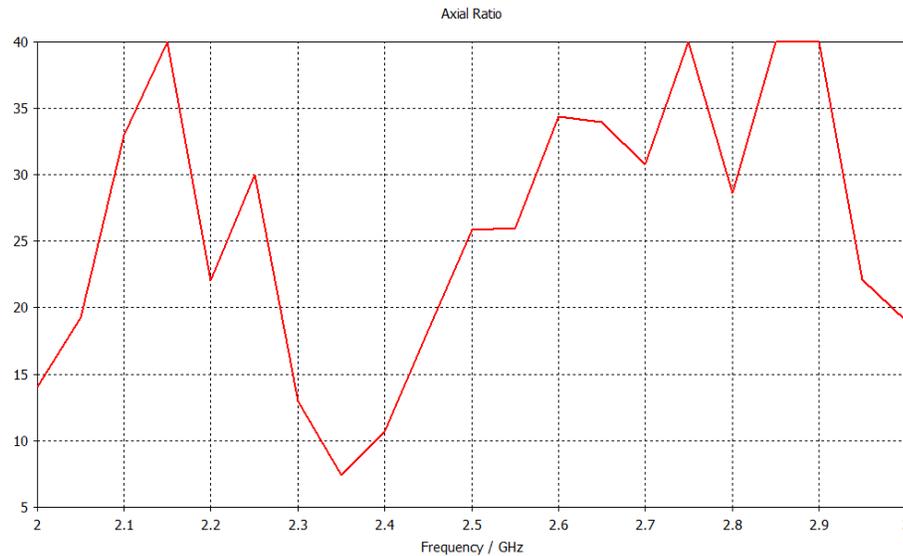


Figura 43. Parámetro S11 de la polarización lineal vertical sin circuitos de alimentación.

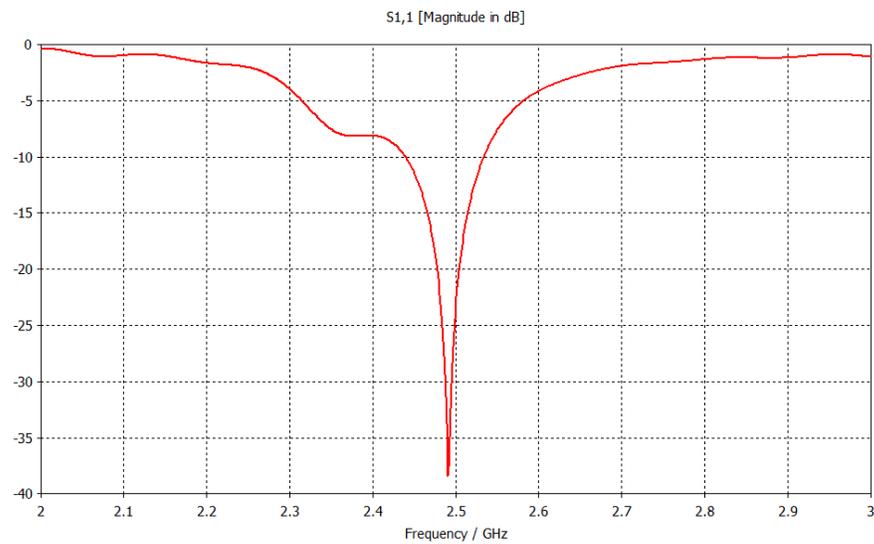
En la figura 44 se puede apreciar la relación axial de la polarización lineal vertical VLP. Como se puede notar, a la frecuencia de 2.45 GHz se tiene un valor de aproximadamente 20 dB lo cual es suficiente para considerarse una polarización lineal.



**Figura 44. Relación axial de la polarización lineal vertical sin circuitos de alimentación.**

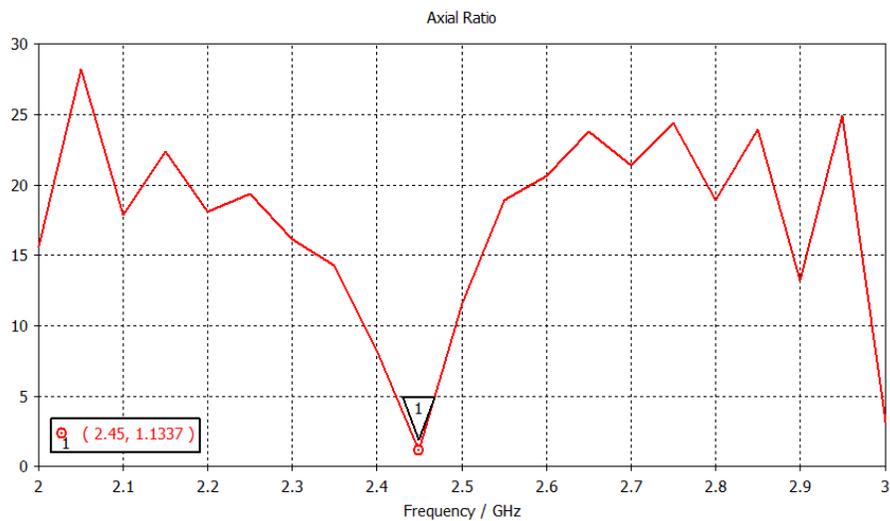
### 3.11.4 Polarización circular de mano izquierda sin circuitos de alimentación

En la figura 45 se pueden observar las pérdidas por retorno en el parámetro S11 de la polarización LHCP, en donde se nota que si cumple el requisito de estar por debajo de -10 dB a la frecuencia de 2.45 GHz y superior. Se puede apreciar que el mínimo se encuentra a la frecuencia de 2.48GHz y que a la frecuencia de 2.4 GHz se encuentra en -8 dB.



**Figura 45. Parámetro S11 de la polarización circular de mano izquierda sin circuitos de alimentación.**

En la figura 46 se puede observar la relación axial de la polarización LHCP. Como se puede notar, a la frecuencia de 2.45 GHz se tiene un valor de aproximadamente 1.13 dB lo cual cumple con la condición establecida de que para considerarse polarización circular, debe tener una relación axial igual o menor a 3 dB.



**Figura 46. Relación axial de la polarización circular de mano izquierda sin circuitos de alimentación.**

Como se esperaba, tanto las polarizaciones lineales como las circulares, aunque opuestas entre sí, presentaron un comportamiento prácticamente idéntico debido a la simetría que tiene la antena, que fue la razón principal de elegir esta topología de parche cuadrado.

### **3.12 Optimización de las dimensiones de la antena**

Una vez diseñado el circuito de alimentación de los diodos y habiendo elegido una topología para la alimentación del parche, se procedió a implementar todo el circuito en el software CST para proceder a optimizar nuevamente las dimensiones del parche de la antena. Esta optimización se requiere debido a que la circuitería en la parte posterior de la antena tendrá un impacto sobre la respuesta anteriormente obtenida para el parche solo. Para llevar a cabo la optimización, en los filtros pasa bajas diseñados para la red de alimentación (línea-capacitor-línea), los capacitores se pusieron en corto a tierra, ya que este es el comportamiento que tendrían en alta frecuencia.

La optimización primeramente se llevo a cabo sobre los parámetros L, CPH y Feed mencionados anteriormente, ya que son estos los que determinan la frecuencia de resonancia de la antena, su relación axial, y el nivel de las pérdidas por retorno respectivamente. Se realizó un gran número de variaciones simultáneas de estos parámetros con un mallado de 40, ya que al tener muchos más elementos en el diseño es necesario utilizar una malla más fina en la discretización. Nuevamente se utilizó como base para la optimización a la antena con configuración RHCP de polarización circular de mano derecha.

En la primera optimización se varió L entre 28 y 31 mm y CPH entre 16 y 18 mm, buscando centrar el S11 en 2.45 GHz y a su vez obtener una relación axial menor a 3 dB. De esta optimización, se notó que sólo 3 combinaciones de estos parámetros cumplían con una relación axial menor a 3 dB. En la figura 47 se puede apreciar el parámetro S11 y en la figura 48 la relación axial para los análisis 6,12 y 18. Es importante mencionar que el valor de Feed se mantiene fijo en 6.5mm y que las tres curvas mostradas tienen los siguientes parámetros:

Run 6:  $L=29.3$  y  $CPH=17.5$

Run 12:  $L=29.4$  y  $CPH=17.5$

Run 18:  $L=29.5$  y  $CPH=17.5$

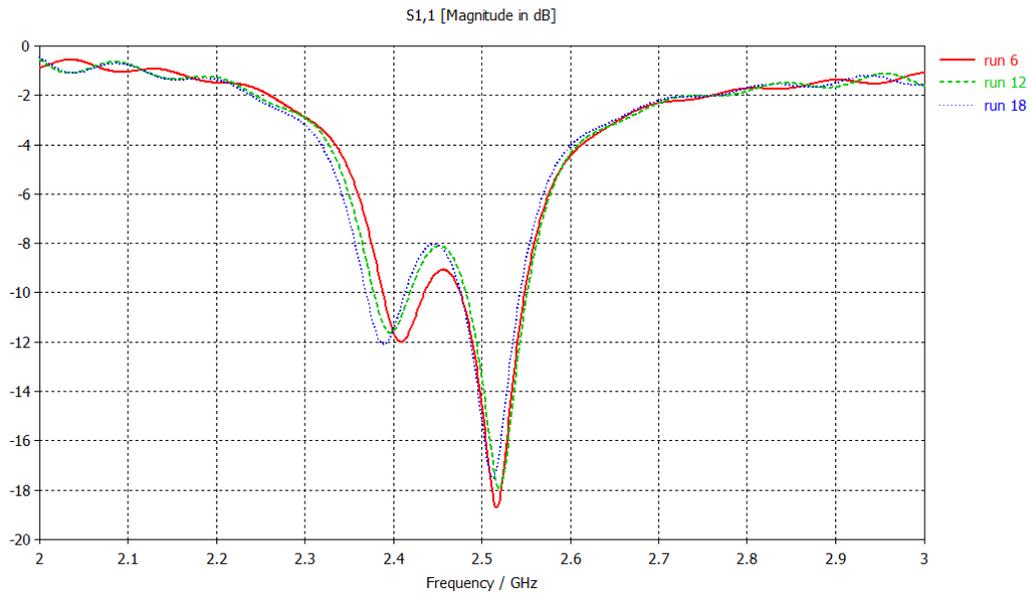


Figura 47. Parámetro S11 de los análisis 6(línea sólida), 12(línea rayada) y 18 (línea punteada).

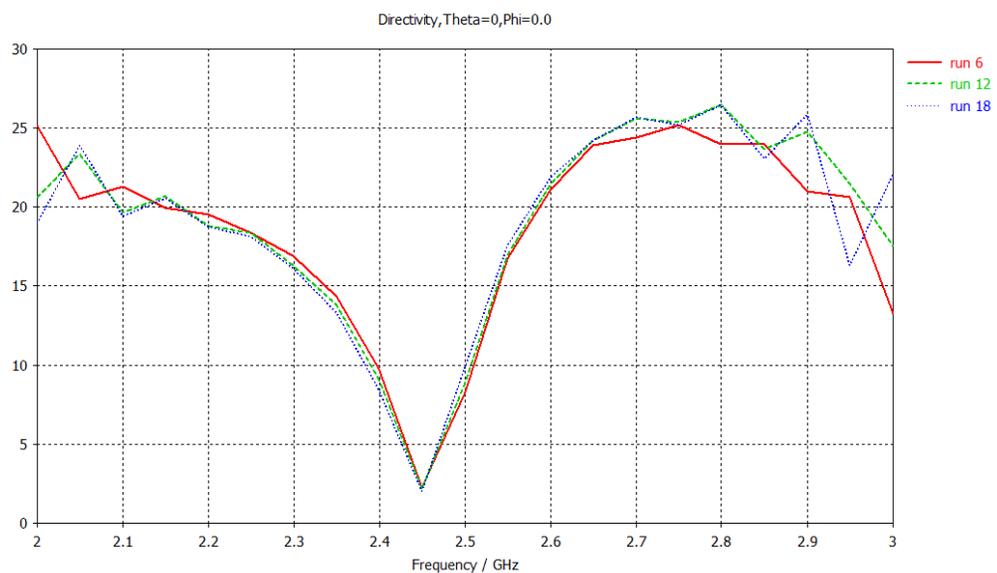
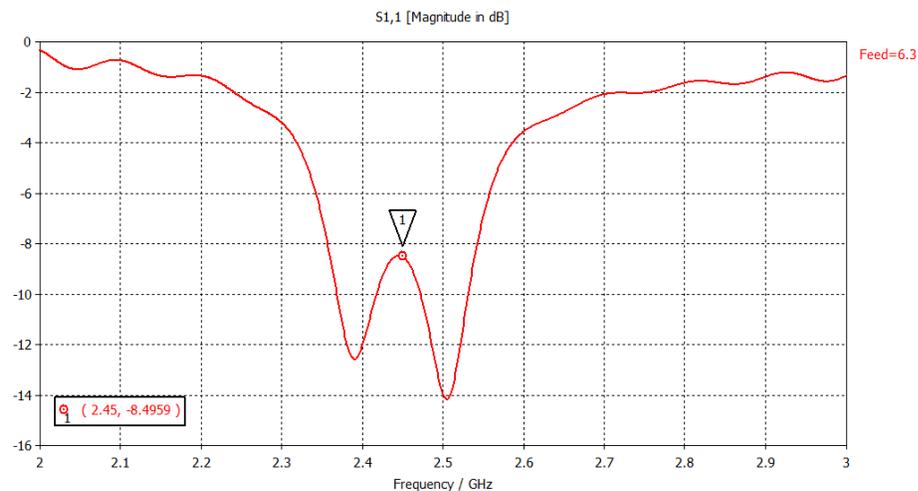


Figura 48. Relación axial de los análisis 6(línea sólida),12(línea rayada) y 18 (línea punteada).

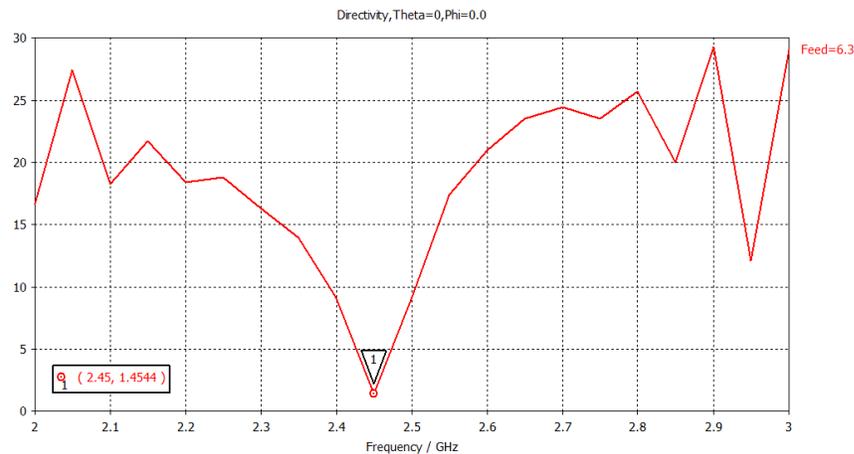
De las tres curvas, se eligieron los valores de los parámetros correspondientes a la curva Run 6 para proseguir con la optimización.

Enseguida se realizó un nuevo análisis, optimizando ahora el parámetro Feed entre 6mm y 7mm en pasos de 0.1mm, para tratar de mejorar el S11 obtenido anteriormente. Esto se realiza porque al cambiar las dimensiones del parche, se desplazó un poco el punto óptimo de alimentación.

De los resultados obtenidos en esta optimización, la que mostró mejor relación axial fue la obtenida para un valor de Feed=6.3mm, y con un valor de S11 de aproximadamente -9dB para todo el ancho de banda requerido. Este valor de Feed=6.3mm fue el elegido para proseguir con la optimización, donde los otros parámetros se modificaron resultando L=29.5mm y CPH=17.5mm. En la figura 49 se puede apreciar el parámetro S11 y en la figura 50 la relación axial obtenida con los valores que presentan una mejor respuesta.



**Figura 49. Parámetro S11 del análisis con las dimensiones L=29.5mm, CPH=17.5mm y Feed=6.3mm.**



**Figura 50. Relación axial del análisis con las dimensiones  $L=29.5\text{mm}$ ,  $CPH=17.5\text{mm}$  y  $\text{Feed}=6.3\text{mm}$ .**

Hasta este punto ya se cuenta con una relación axial aceptable, sin embargo, al modificar las dimensiones del parche no se pudo lograr pérdidas por retorno menores a  $-10\text{ dB}$  en el ancho de banda requerido. Por ello, se procedió a realizar una optimización considerando las dimensiones de los circuitos de alimentación de los diodos PIN, específicamente el largo de los stubs y de las primeras líneas de los filtros, ya que son estas las que definen principalmente la frecuencia de operación del filtro.

La optimización realizada se hizo en los parámetros largostubtierra y largolíneafiltro en CST, que como sus nombres lo indican, definen la longitud de dichas líneas. Tomando como punto central la longitud calculada anteriormente de  $18\text{ mm}$ , se decidió efectuar una variación entre  $16.5\text{mm}$  y  $19.5\text{ mm}$  en ambos parámetros. Con esta modificación en la antena RHCP se logró mejorar los resultados tanto de pérdidas por retorno como de relación axial como se puede observar en las figuras 51 y 52 respectivamente. Los valores de los parámetros que proporcionaron la mejor respuesta fue con un largostubtierra= $19.2\text{ mm}$  y largolíneafiltro= $18.3\text{ mm}$ . Con estos parámetros se procede a realizar el análisis para las demás polarizaciones.

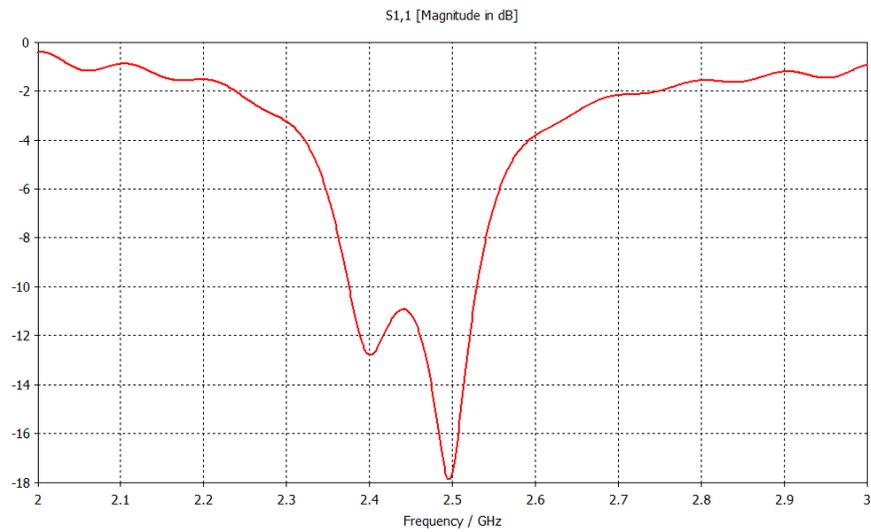


Figura 51. Parámetro S11 resultante de la optimización de la antenna en polarización RHCP.

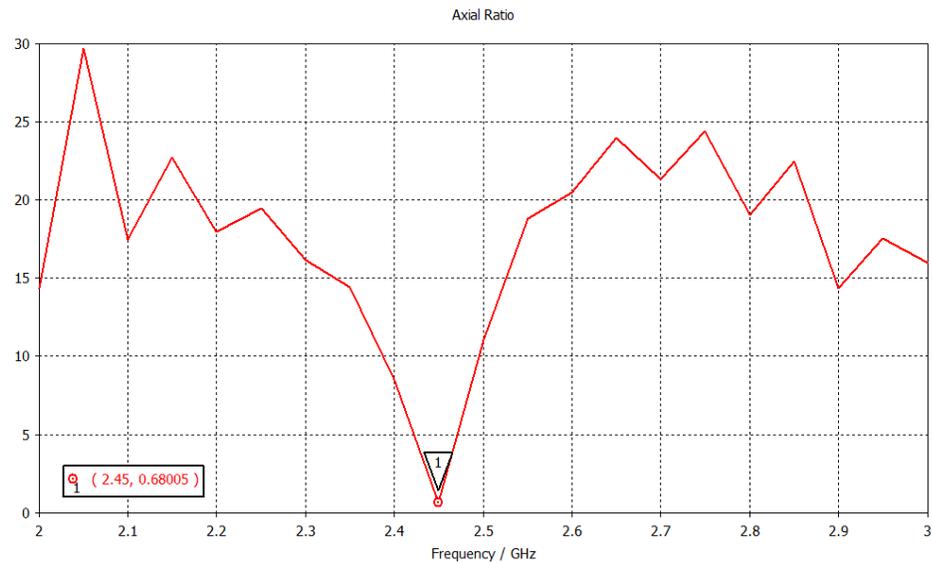


Figura 52. Relación axial resultante de la optimización de la antenna en polarización RHCP.

### 3.13 Diseño final de la antenna de polarización reconfigurable

En este apartado se presenta el diseño final de la antenna. Se describen todos los elementos de la antenna y se proporciona una breve explicación de cada característica.

### 3.13.1 Parche radiador frontal

En la figura 53 se muestra el parche frontal de la antena. Como se puede observar, el substrato que rodea al parche se deja deliberadamente más grande que el parche, debido a que la circuitería en la parte posterior (substrato delgado) requiere de un mayor espacio. Los dos puntos cercanos al centro del parche, son los dos puntos por donde se alimenta la antena establecidos por el valor de Feed. Es importante mencionar también que para efectuar el cambio de la polarización de la antena, se toma como diodo PIN 3 al de la esquina inferior izquierda y como diodo PIN 4 al de la esquina superior derecha.

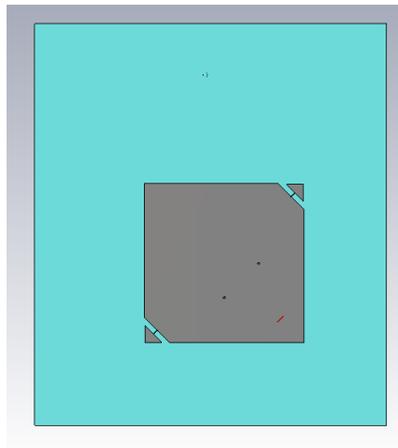
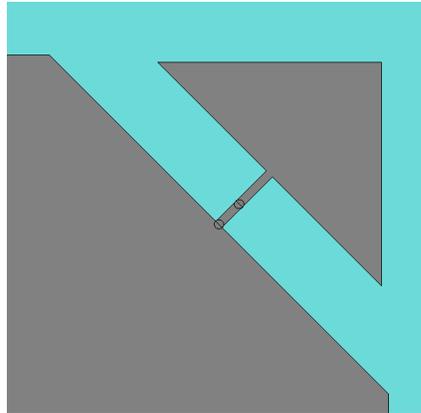


Figura 53. Vista frontal de la antena.

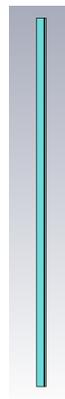
En la figura 54 se proporciona un acercamiento de la esquina superior derecha del parche, donde se puede observar que existen dos elementos que separan al parche principal de las esquinas. El segmento de línea delgada que se encuentra del lado del parche representa al diodo PIN y el otro segmento de 0.6 mm de largo se agregó para que la distancia entre el parche y la esquina fuera mayor y evitar un acoplamiento indeseado provocado por el efecto de fringing. La longitud  $L$  del parche obtenido es de  $L=29.5$  mm y el valor del corte de la esquina es  $CPH=17.5$ mm.



**Figura 54. Acercamiento de la esquina superior derecha del parche.**

### 3.13.3 Vista lateral de la antena

En la figura 55 se muestra la vista lateral desde el lado derecho de la antena, quedando del lado izquierdo el parche radiador y del lado derecho la parte de los circuitos de alimentación.



**Figura 55. Vista lateral derecha de la antena.**

En la figura 56 se efectúa un acercamiento de la vista lateral de la estructura, comenzando del lado izquierdo donde se encuentra el parche radiador, pero que casi no se aprecia. En color azul se tiene el substrato grueso con  $h_1=1.57$  mm, después se encuentra el plano de tierra doble con un grosor de 0.1 mm, enseguida se tiene el

substrato más delgado con un grosor  $h_2=0.269$  mm, y por último del lado derecho las redes de alimentación de la antena.

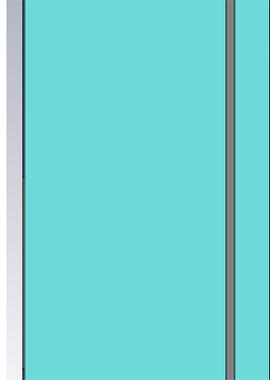


Figura 56. Acercamiento de la vista lateral derecha de la antena.

### 3.13.4 Vista posterior de la antena reconfigurable

En la figura 57 se puede observar la vista posterior de la antena con todos sus elementos, los cuales que se describen en las siguientes secciones.

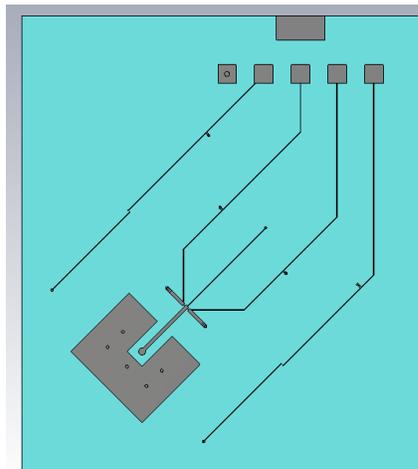
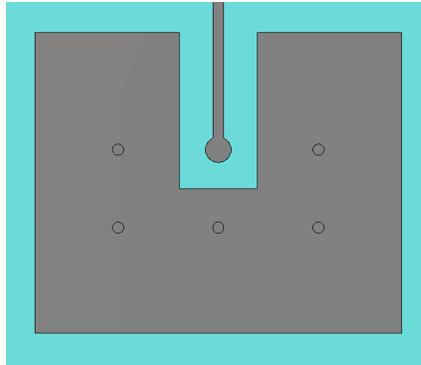


Figura 57. Vista de la parte posterior de la antena reconfigurable.

#### 3.13.4.1 Alimentación de la antena

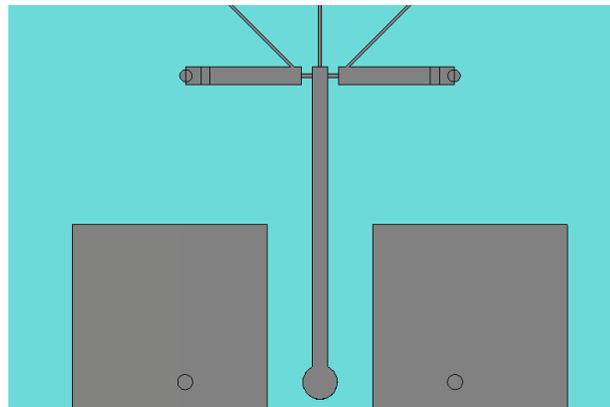
En primer lugar, se describe la geometría en donde va conectado el puerto de RF del parche, que es donde se colocará el conector SMA como se muestra en la figura

58. Cada uno de los círculos representa un punto en donde va colocado un hoyo metalizado “vía” hacia tierra.



**Figura 58. Vista del pad para colocar el conector coaxial SMA de RF en el puerto de la antena.**

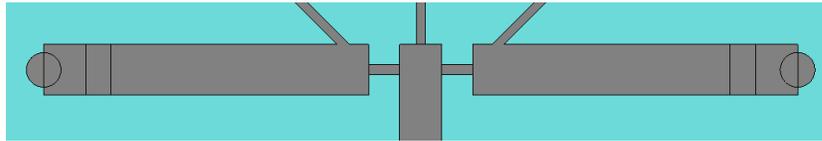
En la figura 59 se muestran las líneas de alimentación que terminan en los puntos definidos por el parámetro Feed hacia el parche.



**Figura 59. Vista completa de la red de alimentación del parche.**

En la figura 60 se muestra un acercamiento de la figura 59, para poder apreciar mejor los elementos donde se colocan los diodos. La separaciones entre la rama principal (vertical) y las dos ramas secundarias (horizontales) son las correspondientes a los diodos PIN ( $LD=0.4\text{mm}$ ), mientras que los pequeños rectángulos localizados casi al final de las ramas secundarias, representan el lugar para los dos capacitores

bloqueadores de DC, como los que se utilizaron para los filtros. Esto fue necesario para evitar que la DC se fugará hacia el parche donde están los otros diodos PIN. Para realizar el análisis se colocó una línea en corto en vez del capacitor, ya que es el comportamiento de un capacitor en RF.

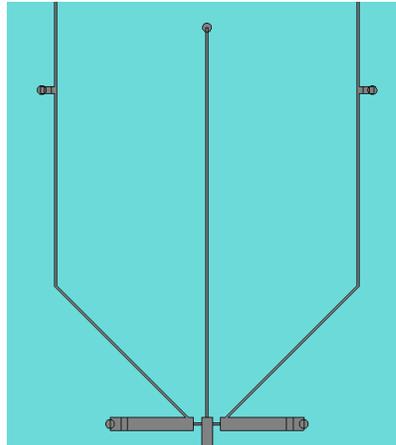


**Figura 60. Acercamiento de la ramificación de las líneas de alimentación de la antena.**

Es importante mencionar que para cambiar la configuración de la polarización, se denomina como diodo PIN 1 al de la izquierda y diodo PIN 2 al de la derecha.

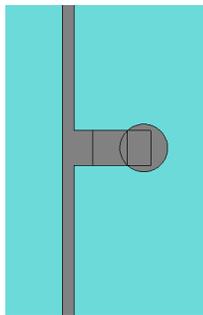
#### **3.13.4.2 Circuito de alimentación de los diodos PIN**

En la figura 61 se muestran los filtros denominados como Filtro 1 y Filtro 2, donde la numeración del filtro se da de acuerdo al número asignado al diodo PIN. En el centro se tiene el stub a tierra calculado con una longitud  $L = 19.2$  mm, que sirve como tierra común para el cátodo de los diodos PIN 1 y PIN 2. En los costados se tienen los filtros, que primero comienzan con una línea de 18.3 mm cada uno, la cual se dobló para ahorrar espacio en dos segmentos de 9.15 mm cada uno, y que terminan en los pads donde se colocan los capacitores de 10,000 pF a tierra.



**Figura 61. Vista del stub común y los filtros de los diodos PIN 1 y PIN 2.**

En la figura 62 se presenta un acercamiento de los pads de los capacitores, en donde el círculo de la derecha indica el “via” a tierra. El rectángulo en el centro se colocó para substituir el capacitor a tierra, y realizar el análisis electromagnético como se había mencionado anteriormente. Es en este lugar en el que se deja el espacio para soldar el capacitor de 10,000pF y que tiene un tamaño 0201.



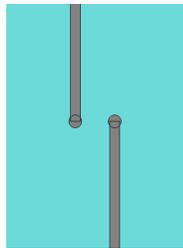
**Figura 62. Acercamiento del pad del capacitor de 10,000 pF con tamaño 0201.**

En la figura 63 se muestra el stub a tierra para el diodo PIN 3 que se conecta con el parche frontal. Este stub tiene una longitud  $L=19.2$  mm y un ancho  $W=0.1$  mm. El stub del PIN 4 es idéntico sólo que se encuentra del otro lado extremo.



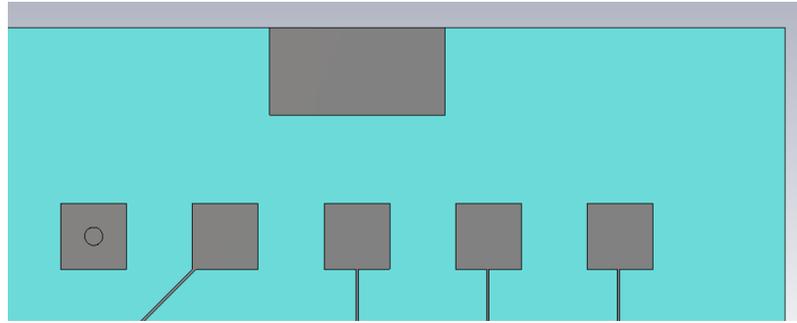
**Figura 63. Stub a tierra del diodo PIN 3 que se conecta al parche frontal.**

En la figura 64 se muestra un acercamiento de los hoyos metalizados “vías” que se conectan al parche radiador, específicamente de los extremos del diodo PIN 3. La línea de la izquierda es para el filtro requerido para la alimentación positiva del diodo PIN y la de la derecha es el stub a tierra que se conecta al cátodo del diodo PIN.



**Figura 64. Acercamiento de los “vías” que pasan al lado del parche y alimentan al diodo PIN 3.**

En la figura 65 se presentan los Pad's en dónde terminan los filtros por los cuales se introduce el voltaje de DC de 1.45 V a los diodos PIN. El segmento rectangular de la parte superior se utiliza para fijar el cable que tiene 5 cables más delgados, uno de tierra que va al pad de la izquierda, y los cuatro restantes de la derecha que se conectan a cada uno de los reguladores de voltaje que entregan un  $V=1.45\text{ V}$  y que por el otro extremo se conectan a los filtros pasa bajas FPB y a las terminales de los diodos PIN.



**Figura 65.** Vista de los pads por donde se introduce la DC para los reguladores de voltaje.

### **3.14 Resultados de las diferentes configuraciones de polarización**

El diseño de la antena propuesto permite obtener cuatro polarizaciones distintas: los dos sentidos de polarización circular (RHCP, LHCP) y los dos estados de polarización lineal (VLP y HLP). Estas polarizaciones se establecen de acuerdo a la configuración de encendido/apagado de los diodos PIN como se muestra en la tabla 4.

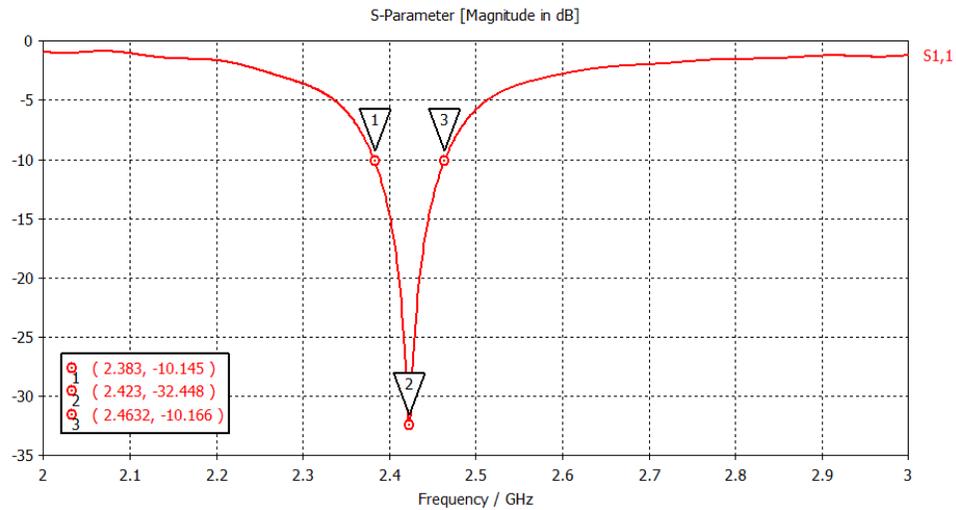
**Tabla 4. Tabla de verdad de las configuraciones de los diodos PIN para obtener las diferentes polarizaciones**

Diodo PIN 1	Diodo PIN 2	Diodo PIN 3	Diodo PIN 4	Polarización
ON	OFF	ON	ON	Líneal horizontal HLP
ON	OFF	OFF	OFF	Circular de mano derecha RHCP
OFF	ON	ON	ON	Líneal vertical VLP
OFF	ON	OFF	OFF	Circular de mano izquierda LHCP

### 3.14.1 Polarización lineal horizontal HLP

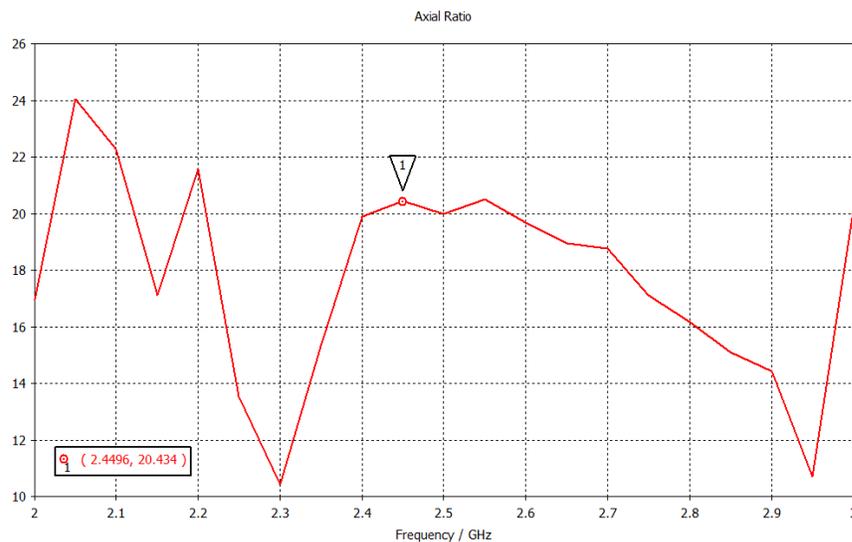
Para lograr la polarización Lineal horizontal HLP, se apaga el diodo PIN 2 y se mantienen encendidos los diodos PIN1, PIN3 y PIN4, como se puede observar en la tabla 4. De esta manera se tienen ambas esquinas del parche activas, lo que permite que se comporte como un parche cuadrado. Cabe mencionar que el punto de alimentación es el que se encuentra sobre el eje X, dando como resultado una polarización lineal horizontal. En las figuras 66 a 71 se presentan los resultados obtenidos del análisis electromagnético de la antena con polarización lineal horizontal.

En la figura 66 se puede observar el parámetro S11 obtenido en la polarización lineal horizontal. Se puede apreciar un buen nivel de pérdidas por retorno, de -32.4 dB y que además cubre el ancho de banda desde 2.38 a 2.46 GHz.



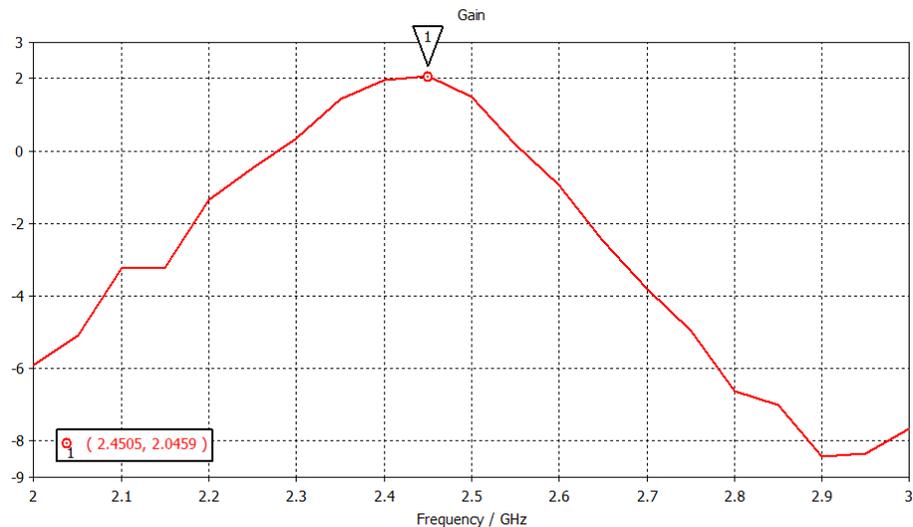
**Figura 66. Parámetro S11 de la polarización lineal horizontal.**

En la figura 67 se muestra la relación axial para la polarización lineal horizontal, en donde se logró un nivel de 20.4 dB en la frecuencia de 2.45 GHz, el cual es adecuado para una antena con polarización lineal.



**Figura 67. Relación axial de la polarización lineal horizontal.**

En la figura 68 se muestra la ganancia de la antena obtenida, la cual es comparable con la ganancia de un dipolo (2.15dBi) y se puede considerar baja (de 2.04 dBi) para una antena de parche. Una de las razones por las que tiene un valor bajo es el tamaño pequeño (<3cm) del parche radiador.



**Figura 68. Ganancia de la polarización lineal horizontal.**

En la figura 69 se presenta la densidad de corriente superficial de la polarización lineal horizontal. En la figura no se puede apreciar lo que en el software de análisis CST, ya que este permite animar la figura de la densidad, indicando un cambio de la densidad de izquierda a derecha y viceversa. Es decir, que la densidad de corriente ilustrada en forma de rectángulos amarillo y azul, giran sobre el eje y (vertical). Este cambio no se ve totalmente limpio ya que la relación axial no mostró un valor más alto, pero se sigue considerando como polarización lineal y que en este caso está en sentido horizontal.

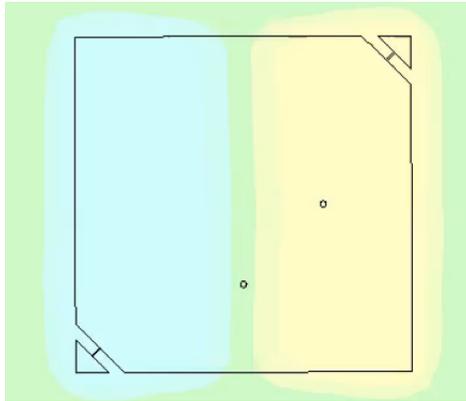


Figura 69. Densidad de corriente de la polarización lineal horizontal.

En la figura 70 se presenta el patrón de radiación en el plano H (figura 70(a)) en donde se tiene un ancho del haz o haz de mediana potencia HPBW=90° y en el plano E (figura 70(b)) en donde se tiene un HPBW=95°. En la figura 71 se muestra el patrón de radiación en 3D.

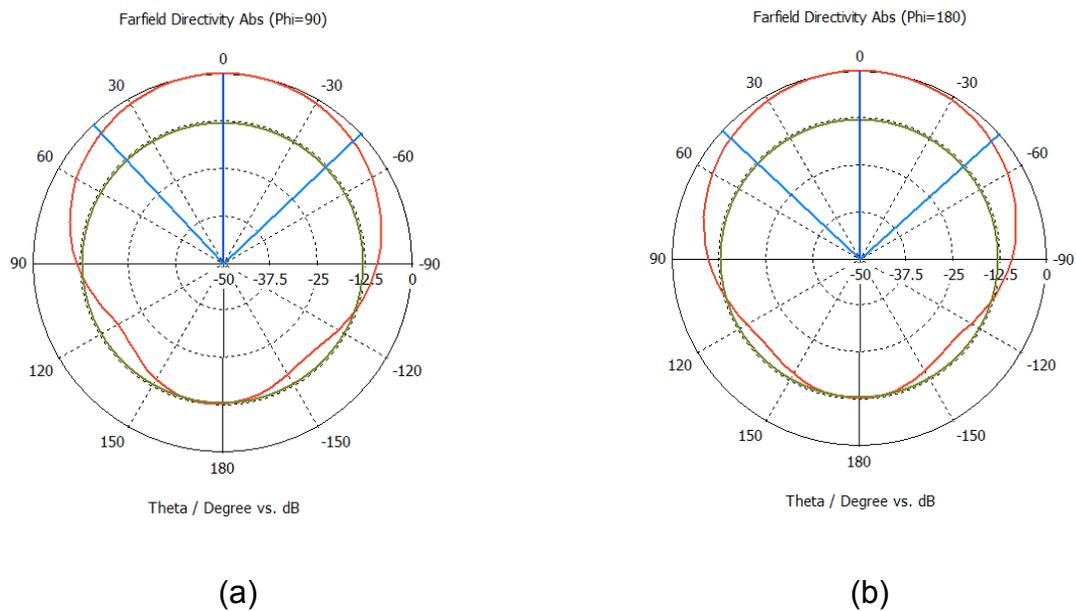


Figura 70. Patrón de radiación en el plano H (a) y en el plano E (b) de la polarización lineal horizontal.

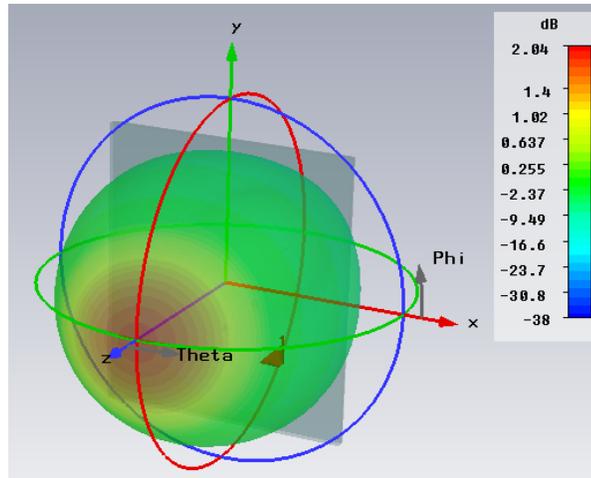


Figura 71. Patrón de radiación en 3D de la polarización lineal horizontal.

### 3.14.2 Polarización circular de mano derecha RHCP

Para lograr la polarización circular de mano derecha RHCP, se mantiene encendido el diodo PIN 1 y se apagan los dos diodos situados en el parche (PIN3 y PIN4), así como el diodo PIN 2, de tal manera que se desconectan las esquinas y cambia la forma de la antenna. Esto hace que ahora el parche se comporte como uno de esquinas truncadas, el cual es una manera de lograr una polarización circular. En las figuras 72 a 77 se presentan los resultados obtenidos del análisis electromagnético de la antenna para la polarización circular de mano derecha.

En la figura 72 se puede observar que se tiene un nivel de pérdidas por retorno de  $-10.9$  dB a la frecuencia de  $2.45$  GHz. Además, se puede apreciar que se cumple para un amplio ancho de banda desde  $2.37$  a  $2.52$  GHz, excediendo el requerido.

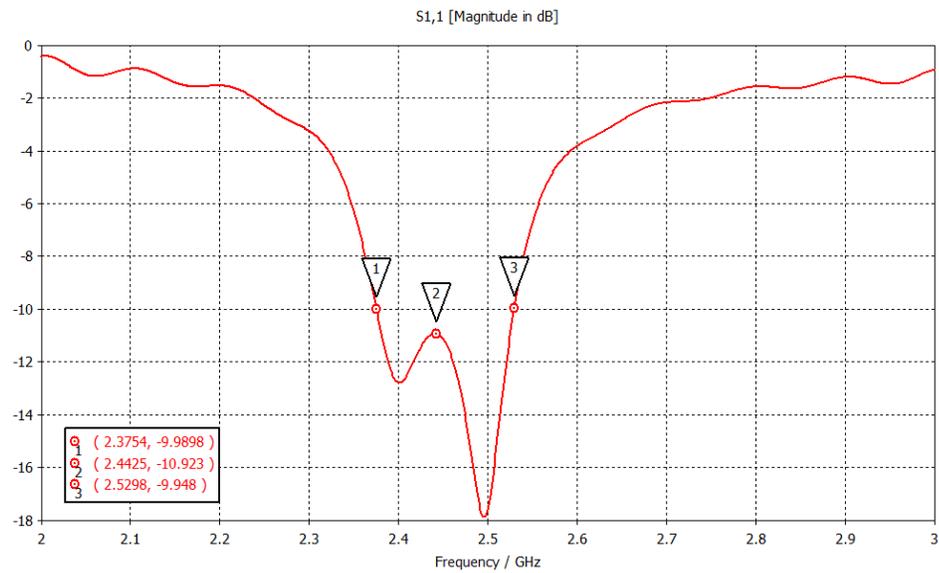


Figura 72. Parámetro S11 de la polarización circular de mano derecha RHCP.

En la figura 73 se puede apreciar la relación axial para la polarización circular de mano derecha RHCP, la cual mostró un comportamiento excelente, ya que es menor a 1 dB (0.68dB en 2.45GHz) por lo que supera y cumple con la condición de que la relación axial debe ser igual o menor a 3 dB.

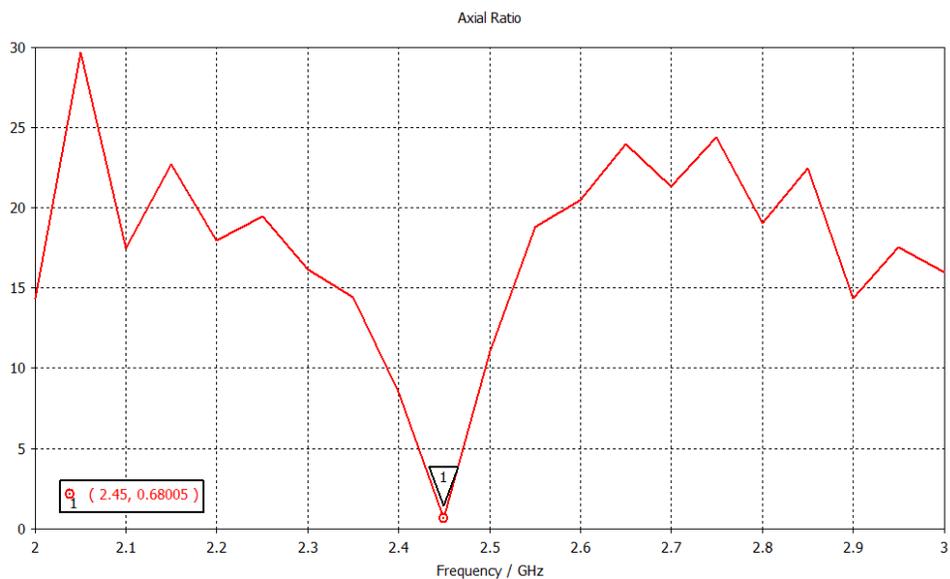
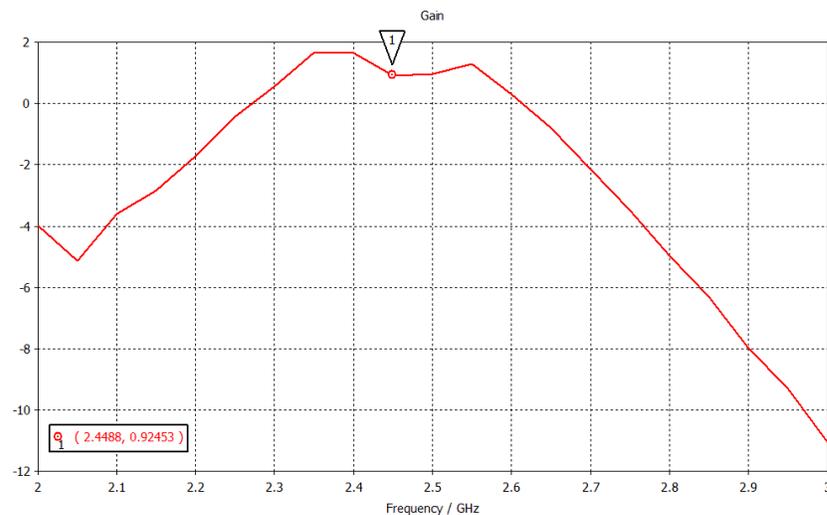


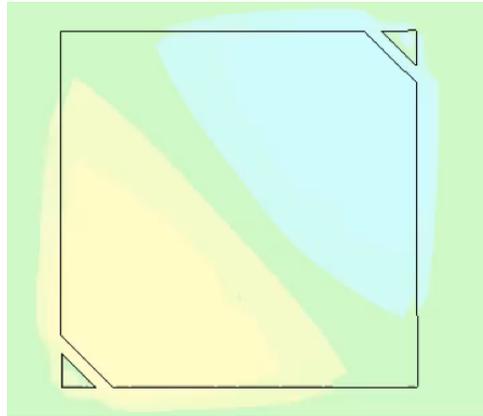
Figura 73. Relación axial de la polarización circular de mano derecha RHCP.

El comportamiento de la ganancia para la polarización circular de mano derecha RHCP se puede observar en la figura 74. Se puede notar que la ganancia tiene un valor bajo con un nivel de 0.9 dB en la frecuencia de 2.4488GHz, lo cual era de esperarse concordando con la teoría que establece que la polarización circular proporciona un nivel menor de ganancia que la polarización lineal. Además, se puede apreciar que se obtiene una ganancia mayor  $G=1.7\text{dB}$  dentro del intervalo de 2.35 a 2.4 GHz.



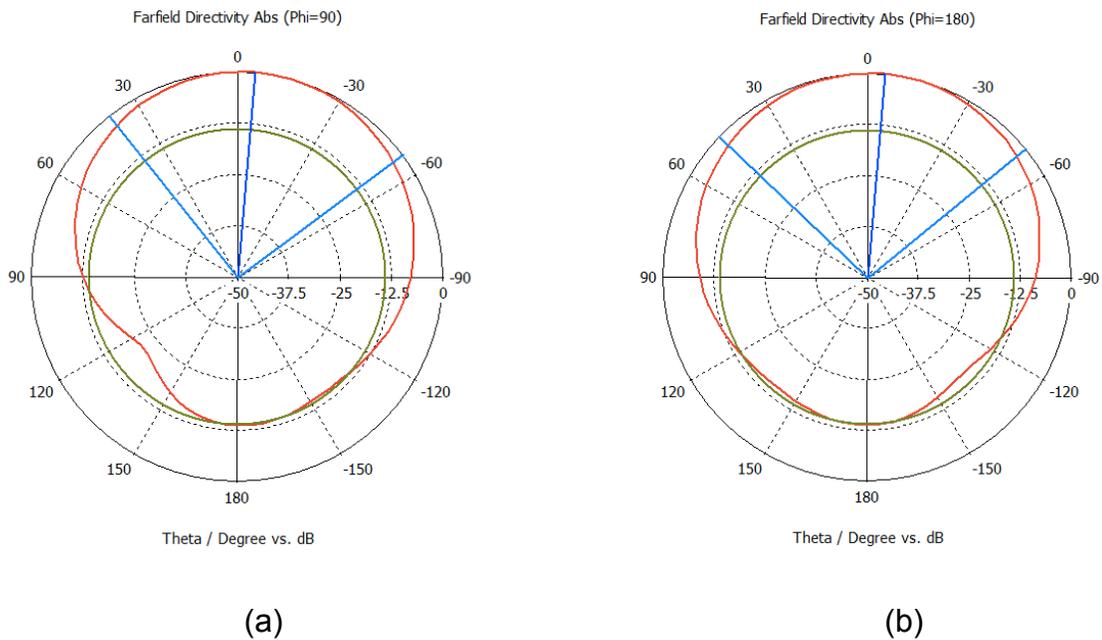
**Figura 74. Ganancia de la polarización circular de mano derecha RHCP.**

En la figura 75 se proporciona la densidad de corriente superficial de la polarización circular de mano derecha. Cuando se activa la animación en el software de análisis electromagnético CST, se puede apreciar que la densidad de corriente (marcada con los triángulos amarillo y azul), gira en sentido de las manecillas del reloj, y se ha observado que este giro es más puro cuando la relación axial es menor. Debido a que para esta polarización se logró una relación axial muy pequeña, el giro es muy uniforme, lográndose obtener la polarización circular de mano derecha.



**Figura 75. Densidad de corriente de la polarización circular de mano derecha RHCP.**

En la figura 76 se presenta el patrón de radiación en el plano H (figura 76(a)) en donde se tiene un HPBW=92°, y en el plano E (figura 76(b)) en donde se tiene un HPBW=97.2°. En la figura 77 se muestra el patrón de radiación en 3D.



**Figura 76. Patrón de radiación en el plano H (a) y en el plano E (b) de la polarización RHCP.**

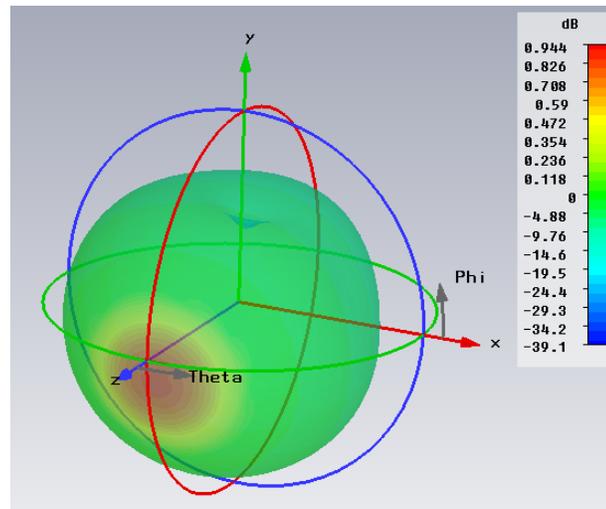
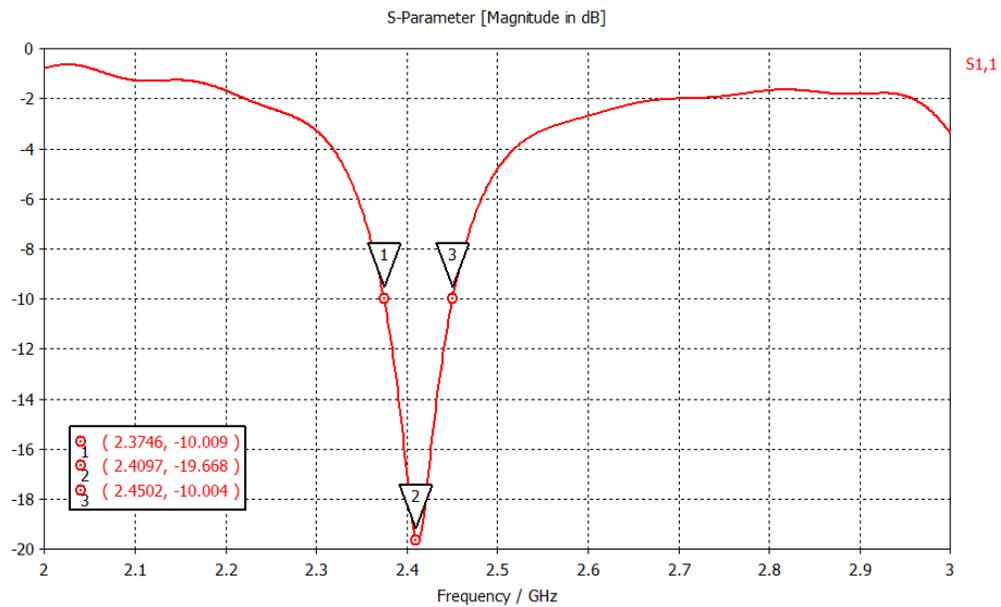


Figura 77. Patrón de radiación en 3D de la polarización circular de mano derecha RHCP.

### 3.14.3 Polarización lineal vertical VLP

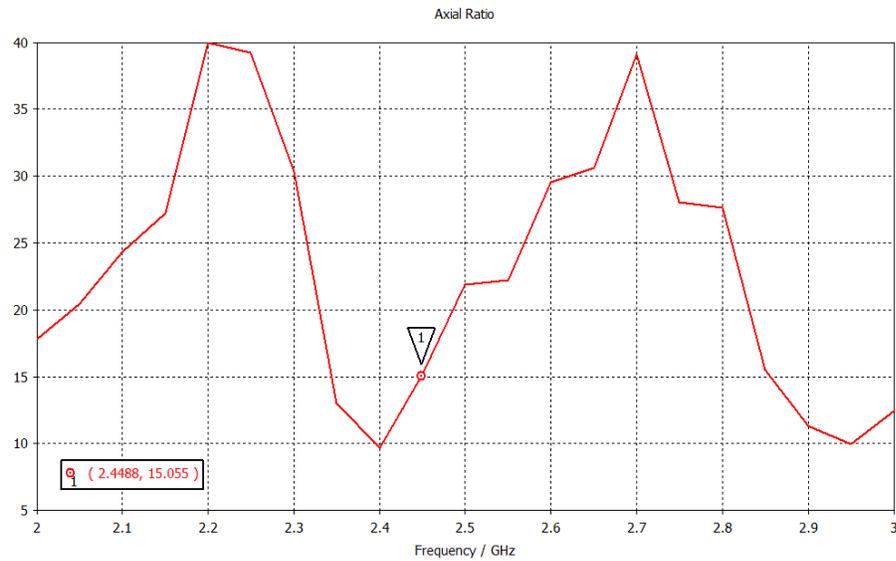
Para lograr la polarización lineal vertical VLP, se apaga el diodo PIN 1 y se mantienen encendidos los diodos PIN2, PIN3 y PIN 4, como se puede observar en la tabla 4 que muestra las diferentes configuraciones de las polarizaciones. En este tipo de polarización, se mantienen activas ambas esquinas del parche, lo que se hace que se comporte como un parche cuadrado. Además, en esta polarización el punto de alimentación es ahora el que se encuentra sobre el eje Y, dando como resultado una polarización lineal con sentido vertical. En las figuras 78 a 83 se presentan los resultados obtenidos del análisis electromagnético para la antena con polarización lineal vertical.

En la figura 78 se puede observar que el parámetro S11 para la polarización lineal vertical se deteriora un poco en relación a la polarización lineal horizontal al contar con un S11 mínimo de -19dB. A la frecuencia de 2.45 GHz se obtuvo un S11 de -10dB, y se observa que no cubre por completo el ancho de banda requerido ya que los -10 dB sólo los cumple desde 2.38 a 2.45 GHz. Este comportamiento fue algo que resultó inesperado ya que el diseño de la antena es completamente simétrico y se esperaba que la respuesta del S11 fuera similar a la polarización lineal horizontal.



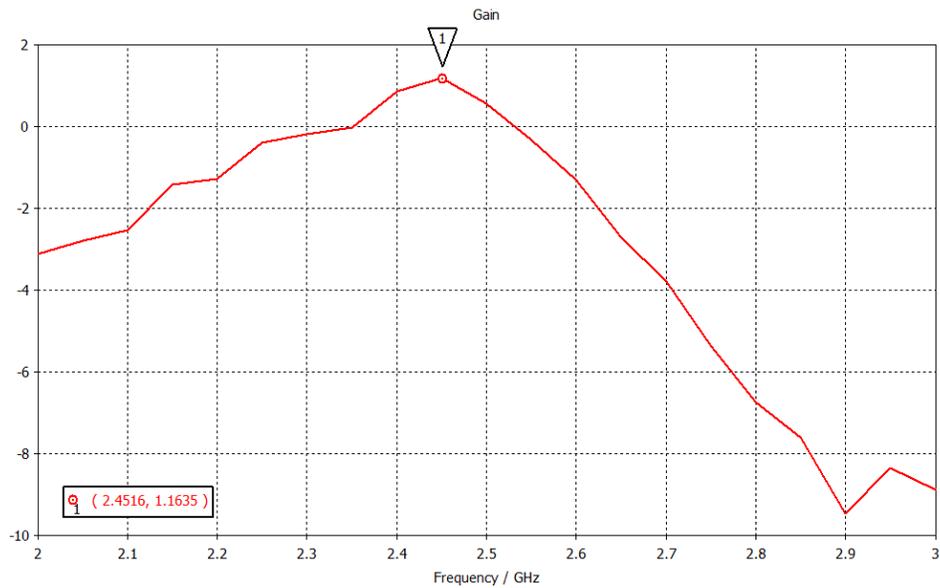
**Figura 78. Parámetro S11 de la polarización lineal vertical VLP.**

El comportamiento de la relación axial de la antena en polarización lineal vertical VLP se puede apreciar en la figura 79, Se nota que la relación axial es muy alta (de 10 a 22dB) en comparación con una requerida para polarización circular (<3dB), lo cual es adecuado para una polarización lineal. Se puede apreciar que el nivel es menor que el que se obtuvo para la polarización lineal horizontal y que se encuentra centrado en 2.4GHz.



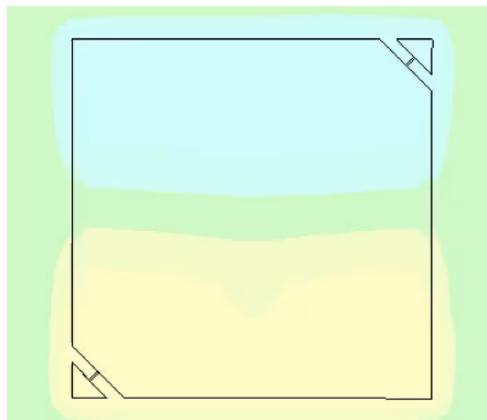
**Figura 79. Relación axial de la polarización lineal vertical VLP.**

En la figura 80 se puede observar el nivel de ganancia obtenido a la frecuencia de 2.45 GHz para la polarización lineal vertical VLP, el cual resultó inferior al obtenido para la polarización lineal horizontal, mostrando una ganancia de 1.16 dB. En teoría este nivel debía de ser muy similar al de la polarización lineal horizontal, sin embargo, como se mostró en el parámetro S11, en esta polarización se tiene un desacoplamiento que puede explicar el bajo nivel de ganancia.



**Figura 80. Ganancia de la antena en polarización lineal vertical VLP.**

En la figura 81 se presenta la densidad de corriente superficial de la polarización lineal vertical. Cuando se activa la animación en el software de análisis electromagnético CST, se puede notar que existe un cambio en la densidad de arriba hacia abajo y viceversa (los rectángulos amarillo y azul se cambian dando la impresión que esta girando sobre el eje x).



**Figura 81. Densidad de corriente de la polarización lineal vertical VLP.**

En la figura 82 se presenta el patrón de radiación en el plano H (figura 82(a)) en donde se tiene un HPBW=90.1°, y en el plano E (figura 82(b)) en donde se tiene un HPBW=95.6°. En la figura 83 se muestra el patrón de radiación en 3D.

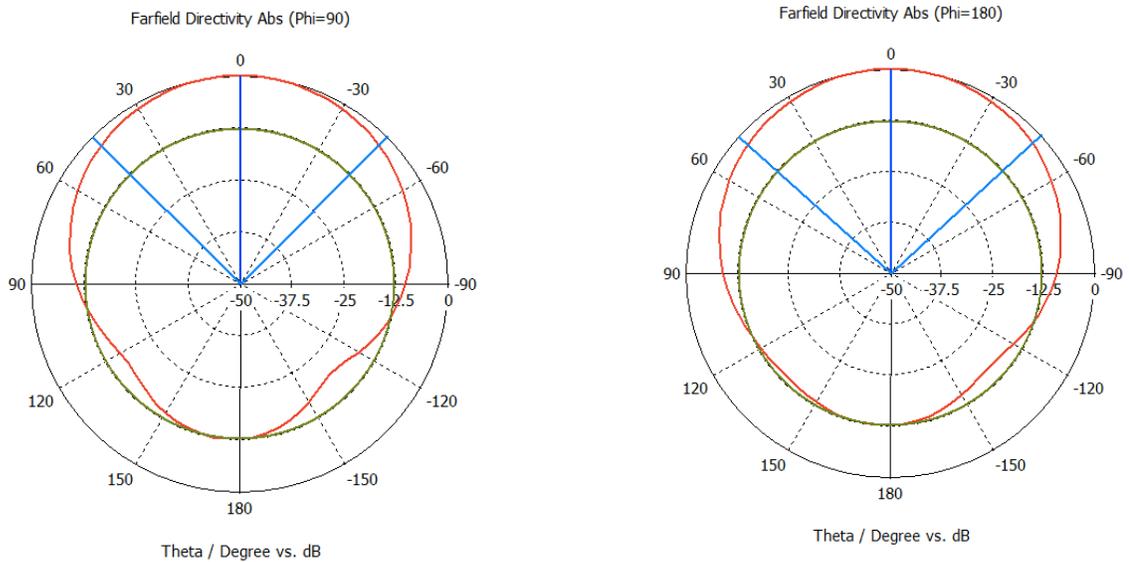
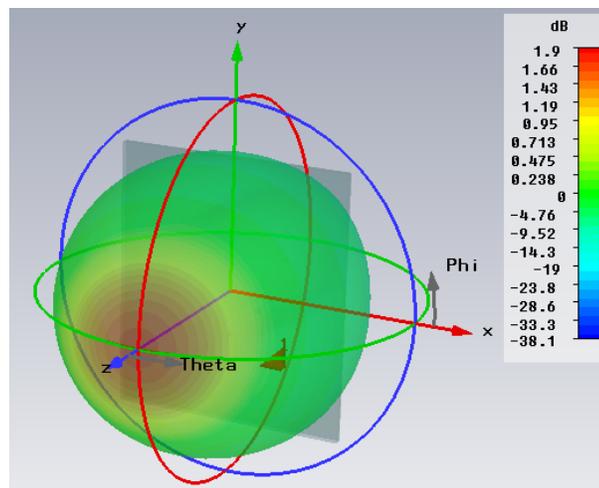


Figura 82. Patrón de radiación en el plano H (a) y en el plano E (b) de la polarización lineal vertical.

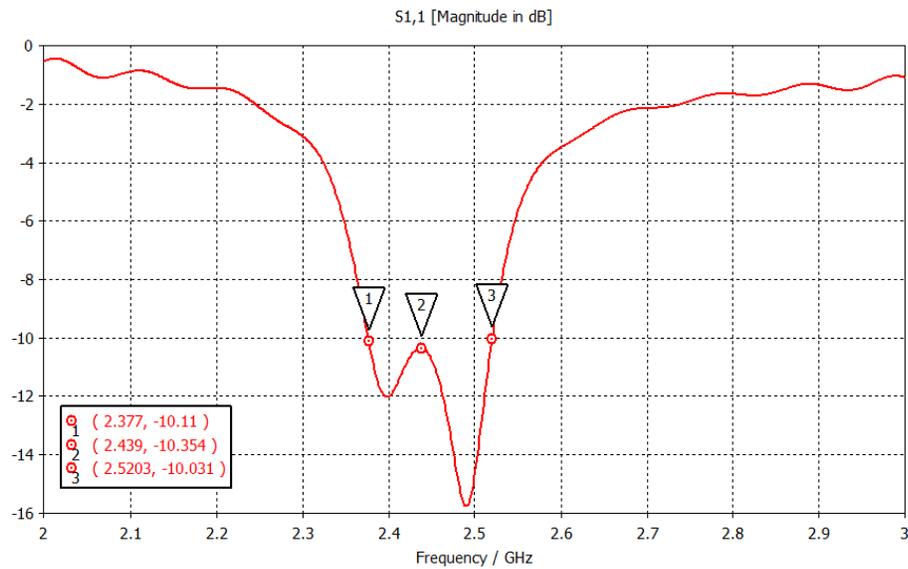


**Figura 83. Patrón de radiación en 3D de la polarización lineal vertical VLP.**

#### **3.14.4 Polarización circular de mano izquierda LHCP**

Para lograr la polarización circular de mano izquierda LHCP, se mantiene encendido el diodo PIN 2 y se apaga el diodo PIN 1, así como los dos diodos PIN3 , PIN4 de tal manera que se desconectan las esquinas del parche y por lo tanto cambia la forma de la antena para polarización circular. Esto hace que ahora el parche se comporte como uno de esquinas truncadas, permitiendo lograr la polarización circular. Al encender el diodo PIN 2 y apagar el diodo PIN1, el parche se alimenta por el punto de alimentación que se encuentra sobre el eje Y, viendo las esquinas truncadas en sentido opuesto al punto de alimentación, lo que provoca la polarización circular de mano izquierda. En las figuras 83 a la 89 se presentan los resultados obtenidos del análisis electromagnético de la configuración de la antena en polarización circular de mano izquierda.

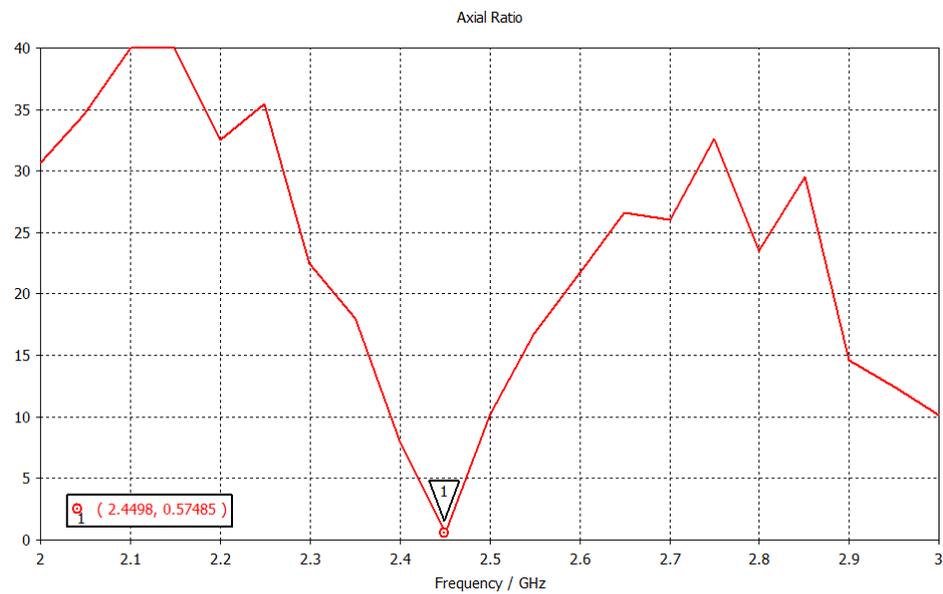
El comportamiento del parámetro S11 se puede apreciar en la figura 88, donde se tiene una respuesta similar a la de la polarización lineal vertical, ya que a la frecuencia de 2.45 GHz se tiene un nivel de -10.1 dB y cubre por completo el ancho de banda de 2.4GHz a 2.5GHz. Este comportamiento cumple con lo esperado al tener una respuesta parecida a la de la polarización circular de mano derecha por la simetría de la antena, sin embargo, se deterioró un poco en comparación con la de mano derecha ya que esta apenas llega a -10.35 dB y la de mano derecha llegaba a -10.92 dB.



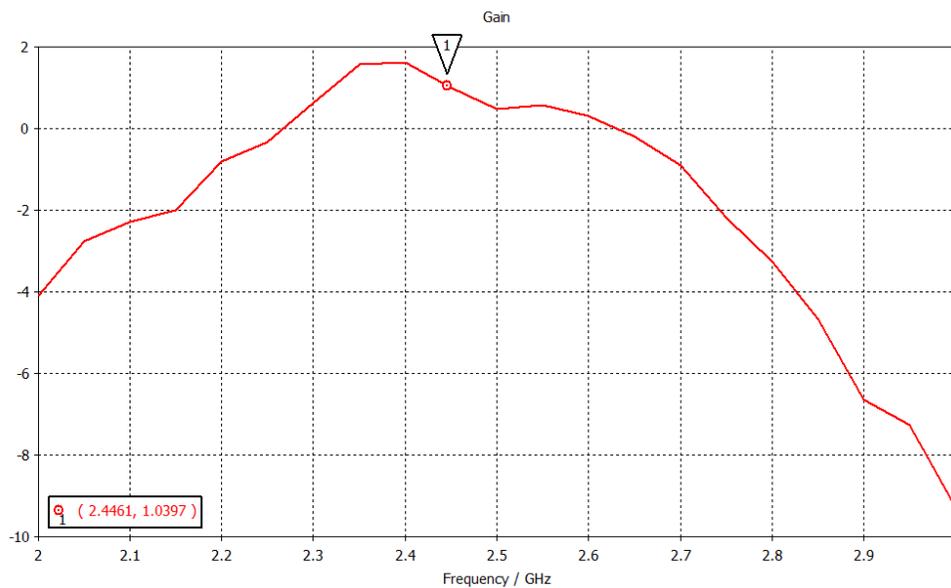
**Figura 84. Parámetro S11 de la polarización circular de mano izquierda LHCP.**

En la figura 85 se puede apreciar el comportamiento de la relación axial para la polarización circular de mano izquierda LHCP, la cual resultó por debajo de los 3 dB, llegando a un mínimo de 0.57dB a la frecuencia de 2.45GHz, con lo que cumple con la condición de ser igual o menor a 3 dB requerido para considerarse como una polarización circular.

El comportamiento de la ganancia se puede observar en la figura 86, en donde se obtuvo 1 dB a la frecuencia de 2.45GHz y de 1.7dB a la frecuencia de 2.4GHz. Esto concuerda con el hecho de que una polarización circular proporciona un nivel menor de ganancia que una polarización lineal, además de que el nivel es casi idéntico que la de la polarización circular de mano derecha. La ganancia es tiene un valor positivo en el intervalo de 2.27GHz a 2.63GHz, resultando un ancho de banda de 360MHz.



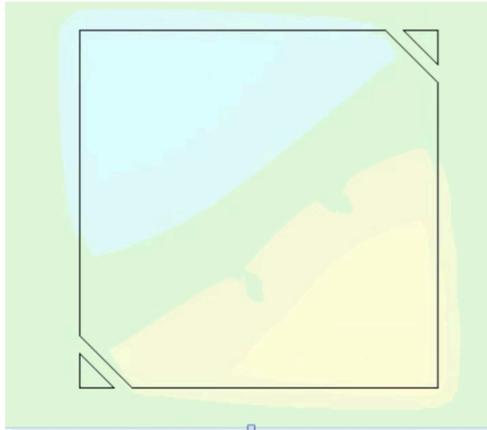
**Figura 85. Relación axial de la polarización circular de mano izquierda LHCP.**



**Figura 86. Ganancia de la antena en polarización circular de mano izquierda LHCP.**

En la figura 87 se presenta la densidad de corriente de la polarización circular de mano izquierda LHCP. Cuando se activa la opción de animación en el software CST, se puede apreciar que la densidad gira en sentido contrario a las manecillas del reloj,

siendo este giro más limpio para relaciones axiales menores a 3dB. Para esta polarización se logró una relación axial cercana a los 3 dB y se notó que el giro no es tan uniforme como el obtenido para la polarización circular de mano derecha.



**Figura 87. Densidad de corriente de la polarización circular de mano izquierda LHCP.**

En la figura 88 se presenta el patrón de radiación en el plano H (figura 88(a)) en donde se tiene un HPBW=93.6°, y en el plano E (figura 88(b)) en donde se tiene un HPBW=98.2° . En la figura 89 se muestra el patrón de radiación en 3D.

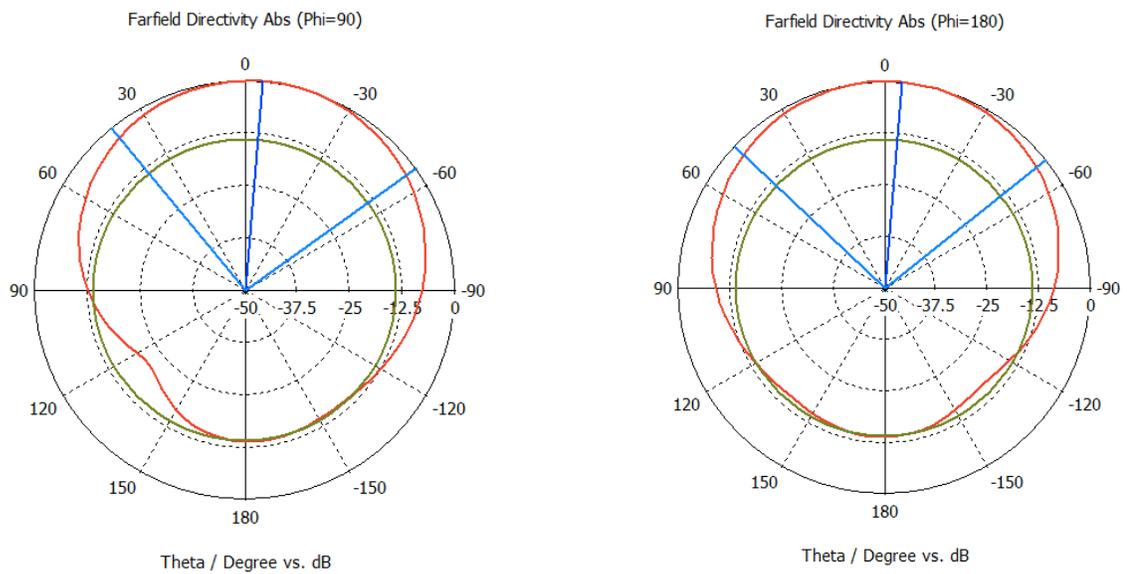


Figura 88. Patrón de radiación en el plano H (a) y en el plano E (b) de la polarización LHCP.

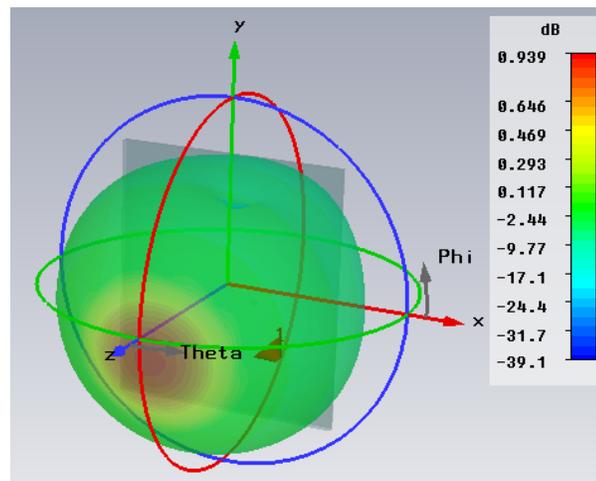


Figura 89. Patrón de radiación en 3D de la polarización circular de mano izquierda LHCP.

### 3.15 Elección del microcontrolador para el control de la polarización

Durante el proceso de diseño de la antena de este trabajo de tesis, se contempló la idea de que la polarización de la antena se controlara desde una computadora. Para esto, se investigaron diferentes tipos de microcontroladores. Se requiere que el circuito

sea pequeño, comparable al tamaño de la antena y que de preferencia sea compatible con el lenguaje de programación MATLAB, que es el software que se utiliza en CICESE para automatizar las mediciones.

El microcontrolador que cumple con estos requerimientos fue el Arduino Nano V3.1, que tiene unas dimensiones de 45x18 mm. Otra característica por la que se eligió este microcontrolador es que con sólo instalar una librería en MATLAB, hace la interpretación del lenguaje nativo del Arduino y para ello existe mucho material disponible en la web. El microcontrolador cuenta con 14 terminales de entrada/salida de las cuales sólo se requerirán 4 y el de tierra, el cual puede proporcionar 5V con una corriente de hasta 40 mA en cada una de sus terminales. En la figura 90 se muestra el microcontrolador Arduino Nano por ambos lados de la tarjeta. La hoja de datos del microcontrolador se incluye en el anexo 1 de este trabajo de tesis.

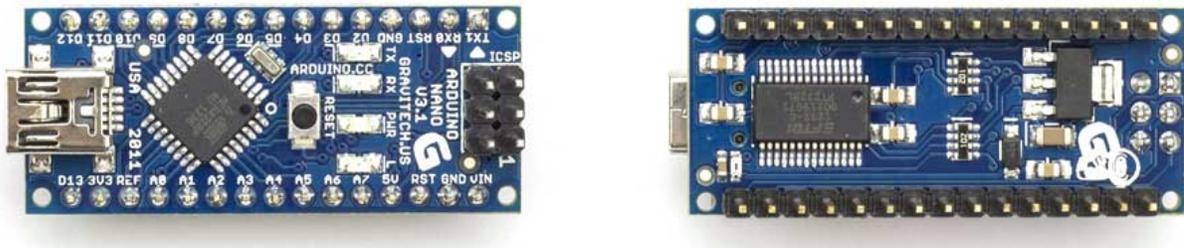


Figura 90. Vista frontal del Arduino Nano (izquierda) y vista posterior (derecha).

### 3.16 Diseño de los reguladores de voltaje

Como se mencionó anteriormente, los diodos PIN utilizados requieren de un voltaje de 1.45 V para poder encenderse, y pueden consumir una corriente entre 10mA y 20 mA. Sin embargo, las terminales de entrada/salida del microcontrolador Arduino Nano presentan un voltaje fijo de 5V y pueden proporcionar hasta 40 mA por cada terminal. Debido a esto, se utiliza el regulador de voltaje LM317 para disminuir y regular el voltaje de 5V a 1.45 V, que requiere cada uno de los diodos PIN para encenderse. En

la figura 91 se presenta el circuito del regulador de voltaje LM317 propuesto por el fabricante.

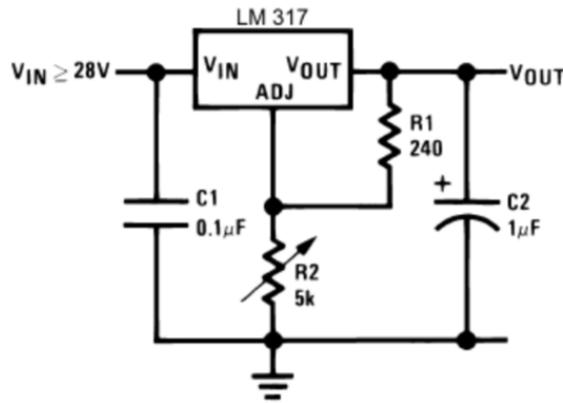


Figura 91. Diagrama del regulador de voltaje propuesto por el fabricante.

En vez de utilizar el potenciómetro R2 de 5KΩ, se emplea una resistencia fija de valor  $R_2 = 39\Omega$  para lograr el voltaje deseado de 1.45 V. Debido a que el circuito de la antena emplea 4 diodos PIN, se utiliza un regulador de voltaje como el de la figura 91 para cada uno de los diodos PIN, teniendo finalmente 4 circuitos reguladores, donde cada uno de ellos se alimenta por los 5V provenientes de cada una de las terminales del microcontrolador Arduino Nano. El siguiente paso fue diseñar el circuito impreso en donde se construirán los 4 reguladores de voltaje con sus respectivas entradas hacia el microcontrolador Arduino Nano, y sus salidas hacia la antena. En la figura 92 (a) se muestra el diseño del circuito impreso PCB realizado y en la figura 92 (b) el montaje de los componentes.

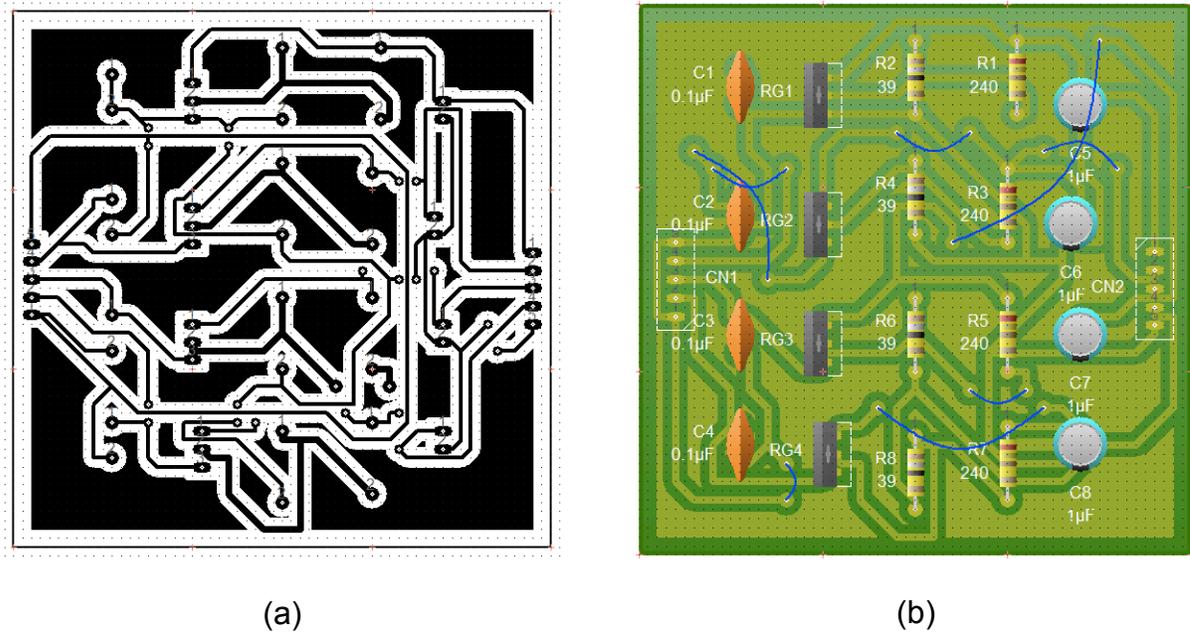


Figura 92. Placa del circuito impreso diseñado para los 4 reguladores de voltaje. (a) PCB de las pistas, (b) Vista del montaje de los componentes.

### 3.17 Programa para elegir el estado de polarización

Para controlar la polarización de la antena utilizando el circuito microcontrolador Arduino Nano desde la computadora, se desarrolló un programa en el lenguaje de programación MATLAB que controla el encendido y apagado de las 4 terminales del microcontrolador Arduino Nano que se utilizarán para los 4 diodos PIN. Los voltajes de encendido (+5V) y apagado (0V) entregados por el microcontrolador Arduino Nano, alimentan a los circuitos reguladores de voltaje, los cuales proporcionan el voltaje de 1.45V, con la corriente necesaria para encender a cada uno de los diodos PIN, o 0V para apagarlos. En la programación se utilizó la herramienta GUIDE de MATLAB para desarrollar una ventana que despliega 4 botones, uno para cada polarización (HLP, VLP, LHCP y RHCP), de tal manera que al presionar uno de estos botones, automáticamente se establece la comunicación de la PC con el Arduino Nano y realiza la configuración de encendido o apagado de los diodos PIN necesarios para lograr la polarización deseada, como se muestra en la tabla 4. El código del lenguaje de

programación realizado se puede encontrar en el anexo 2 de este trabajo de tesis. En la figura 93 se puede observar la ventana que se despliega al ejecutar el programa para elegir la polarización deseada de la antena.

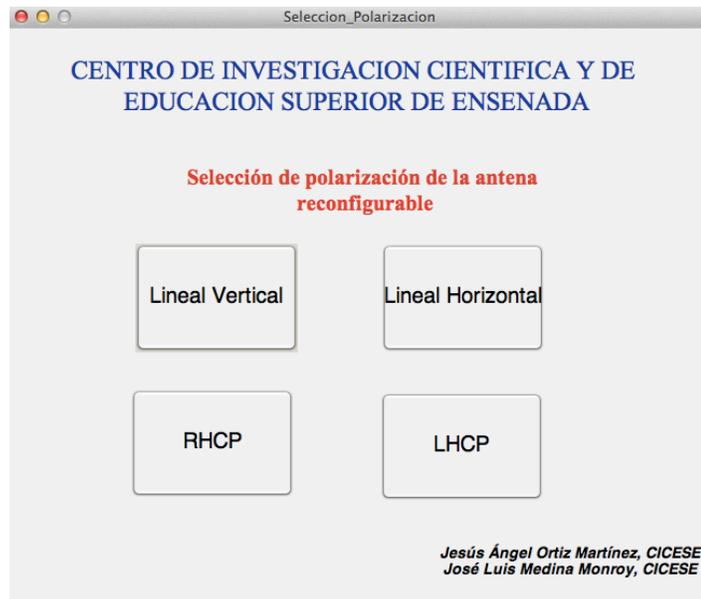
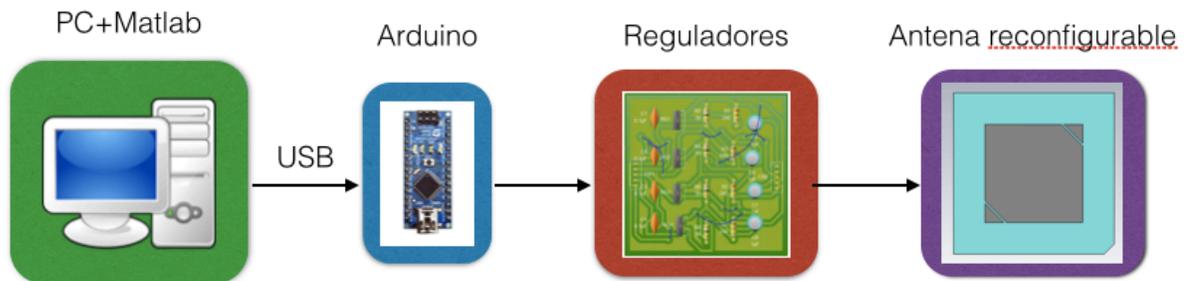


Figura 93. Ventana realizada en el software MATLAB para el cambio de polarización de la antena.

### 3.18 Sistema completo de la antena con polarización reconfigurable

El sistema completo necesario para poder controlar la antena reconfigurable con cambio de polarización diseñada en este trabajo de tesis se muestra en la figura 94. Como se podrá apreciar en esta figura, el sistema consiste de una computadora con el software MATLAB y el Arduino instalados, el circuito de microcontrolador Arduino Nano, el circuito con 4 reguladores de voltaje y la antena diseñada. Para activar una de las cuatro polarizaciones (RHCP, LHCP, VLP y HLP) que puede realizar la antena reconfigurable, se elige la configuración desde el software MATLAB instalado en una computadora personal. El software le comunica al microcontrolador Arduino Nano que proporcione 5V para encender o 0V para apagar los circuitos reguladores de voltaje, que entregan los voltajes regulados de 1.45V o 0V para encender o apagar los diodos PIN montados en el circuito de la antena, y que se utilizan para elegir la polarización deseada. En primer lugar se encenderán y apagarán, los diodos que cambian el punto

de alimentación elegido y en segundo lugar los que cambian la forma del parche, para conseguir la polarización deseada: lineal horizontal (HLP), lineal vertical (VLP), o ambos sentidos de la polarización circular (RHCP o LHCP).



**Figura 94. Configuración final del sistema de la antena con polarización reconfigurable.**

## Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados

---

En este capítulo se efectúa un análisis de los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo de tesis, en las diferentes etapas del diseño de la antena de polarización reconfigurable.

La primera especificación requerida de la antena es que ésta tenga la capacidad de cambiar entre diferentes estados de polarización, específicamente entre los estados de polarización lineal y circular. Otra especificación es la de trabajar en la banda de frecuencias de 2.4 a 2.483 GHz, de la banda ISM (Industrial, Scientific, Medical) que es donde se cubren diversos estándares de comunicación inalámbrica como es el Wi-Fi y Bluetooth.

El trabajo se inició haciendo una investigación de las diferentes topologías que cumplieran con el requerimiento del cambio de polarización, entre las cuales se encontró que para lograr una polarización circular se emplean dos métodos principales: el de parches cuadrados con las esquinas truncadas, y el de ranuras de diferente geometría dependiendo de la forma del parche principal. Durante el desarrollo de este trabajo de tesis se estableció que la antena ahora no sólo cambiase entre una polarización lineal y una circular, sino que debía tener la capacidad para alcanzar los 4 estados de polarización diferente: lineal horizontal (HLP), lineal vertical (VLP), circular de mano derecha (RHCP) y circular de mano izquierda (LHCP). Debido a este nuevo requerimiento, se decidió utilizar una topología de parche cuadrado con esquinas truncadas, ya que por su simetría, sería más sencillo alcanzar los 4 estados de polarización.

El diseño de la antena se inició calculando las dimensiones de un parche cuadrado, necesarias para operar a la frecuencia de 2.45 GHz. Para ello se utilizó el método de línea de transmisión que entrega las dimensiones  $W$  y  $L$  del parche. Posteriormente se realizó una optimización a las dimensiones y el punto de alimentación del parche para tener la respuesta deseada. Se propuso utilizar dos puntos de alimentación diferentes en el parche para alcanzar los dos estados de polarización lineal (VLP y HLP), y se propuso truncar solo dos esquinas opuestas del

parche para conseguir las polarizaciones circulares (LHCP y RHCP) cambiando los puntos de polarización. Se realizó el análisis electromagnético del parche con las esquinas truncadas, hasta encontrar una relación axial adecuada que indica que está operando en polarización circular y se optimizaron sus dimensiones para mejorar la respuesta en lo posible. Este análisis y optimización se realizó en el software de análisis electromagnético CST Microwave Studio.

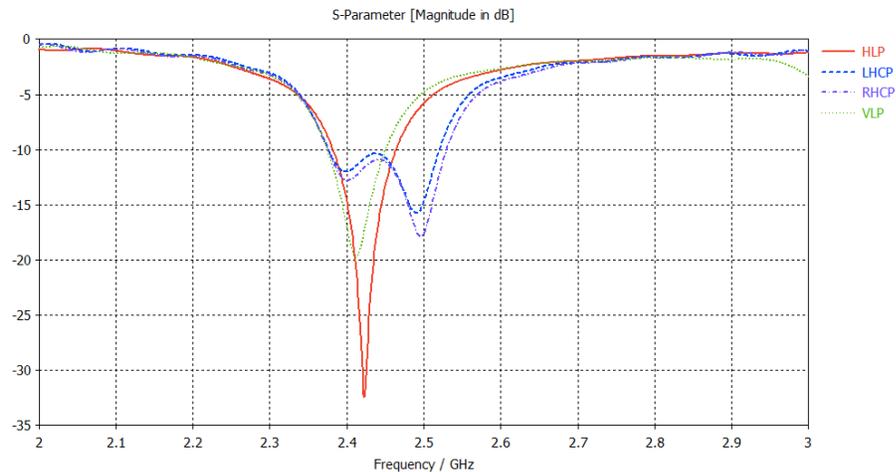
Una gran parte del proceso de diseño, consistió en encontrar la topología más adecuada para alimentar el parche por la parte posterior en dos diferentes puntos de alimentación, pero utilizando un solo puerto. Esto se realizó de tal manera que por medio del encendido/apagado de diodos PIN fuera posible seleccionar el punto de alimentación del parche. Se propusieron y analizaron diferentes topologías como se mostró en el capítulo 3, hasta que se concluyó que debido al efecto de fringing o de borde provocado en las líneas utilizadas para conectar el puerto a los diodos PIN, y en las líneas que conectan a los dos puntos de alimentación, las líneas eran muy anchas comparadas con el ancho de los diodos PIN, que provocaba un acoplamiento muy fuerte en las líneas, de manera que al encender o apagar los diodos no se notaba algún cambio en la polarización debido a la cercanía de los elementos, pareciendo que el parche se estaba alimentando por los dos puntos a la vez, modificando drásticamente el comportamiento de la antena en comparación a cuando se alimenta por un solo punto. Para corregir esto se propuso utilizar un substrato de FR4 más delgado en la parte posterior, lo que permitiría que las líneas que interconectarán los diodos PIN tuvieran un ancho  $W$  más delgado, para a su vez disminuir el efecto de borde y así poder elegir el punto de alimentación deseado de la antena mediante los diodos PIN. Hecho esto, se pudo comprobar que efectivamente el cambiar el substrato grueso por el substrato delgado proporcionó las características que se deseaban, minimizando el efecto de borde y siendo posible elegir el punto de alimentación por separado, aunque en el análisis electromagnético se notaban ligeras fugas de energía.

El siguiente paso fue diseñar los circuitos que le proporcionan los voltajes y corrientes necesarios a los diodos PIN para su funcionamiento. Para ello, se diseñó un filtro pasabajas de tercer orden utilizando la configuración inductor-capacitor-inductor con el fin de bloquear la RF de la antena a la frecuencia de diseño y que permitiera el

paso de la corriente directa proveniente de los reguladores de voltaje. Para proveer la alimentación a tierra del cátodo de los diodos PIN, se diseñaron stubs a tierra que presentan un cortocircuito en DC necesario para aterrizar a los diodos PIN y que presentan un circuito abierto a la frecuencia de diseño. Este diseño se efectuó utilizando el software Advanced Design System, empleando su herramienta LineCalc y realizando el análisis de líneas de microcinta y elementos concentrados del diagrama esquemático del circuito. Una vez obtenidas las dimensiones de los elementos de alimentación de los diodos, se realizó un análisis electromagnético de los mismos con el software CST, junto con la antena. Es importante mencionar que para analizar la antena con el diodo PIN encendido se utilizó una línea con las dimensiones del diodo en el software CST. Se agregaron capacitores entre las líneas de  $50 \Omega$  para bloquear la DC y que pasaran la RF, ya que el capacitor es un corto en altas frecuencias. Asimismo, se utilizaron capacitores a tierra para los filtros pasa bajas. Para analizar los capacitores se colocó una línea pequeña con las dimensiones del capacitor en su lugar para obtener un cortocircuito, ya que en las altas frecuencias este sería el comportamiento que presentarían idealmente. Ya con estas consideraciones se procedió a optimizar las dimensiones del parche para obtener el comportamiento de las pérdidas por retorno, debiendo ser menores a -10 dB para todas las configuraciones, que además cubriera la banda de 2.4 a 2.483 GHz, y que en los estados de polarización circular, existiera una relación axial menor o igual a 3 dB. Después de la optimización, se obtuvieron las dimensiones que cumplían con los requerimientos para cada una de las polarizaciones y se procedió a hacer un análisis más a fondo de sus resultados.

En la figura 95 se presenta el comportamiento obtenido del parámetro S11 correspondiente a cada una de las cuatro polarizaciones (VLP, HLP, LHCP y RHCP) de la antena para su comparación. Se puede apreciar que las antenas con polarización circular tienen mayor ancho de banda y que sobrepasan el ancho de banda requerido. En las polarizaciones lineales se obtuvo un mejor acoplamiento con excelente S11, sobre todo para la polarización HLP, pero con menor ancho de banda, ocurriendo un desplazamiento en frecuencia hacia la parte baja de la banda de operación. Es por esta razón que se eligió la topología del parche cuadrado, que debido a su simetría tiene la capacidad de lograr los dos pares de polarizaciones con respuestas similares. Se

puede observar que las polarizaciones circulares sufren de un descoplamiento en relación con las lineales, pero con mayor ancho de banda y lo cumplen por completo. Se puede observar que las polarizaciones lineales cubren hasta 2.45 GHz en la lineal vertical y hasta 2.46 GHz en la lineal horizontal, la cual tiene un  $S_{11} < -6\text{dB}$  a 2.5GHz, siendo todavía adecuado, no siendo así para la polarización lineal vertical.



**Figura 95. Parámetro S11 de las polarizaciones. HLP ( — ), LHCP ( - - - ), VLP ( . . . ) y RHCP ( -.-.- ).**

Es importante mencionar que la razón por la cual las polarizaciones lineales resuenan más cerca de 2.4 GHz que de 2.45 GHz se debe a que las polarizaciones lineales tienen las esquinas conectadas con los diodos activos, lo cual provoca un incremento en las dimensiones del parche y como consecuencia una frecuencia de resonancia menor. Esta resonancia desplazada en las polarizaciones lineales se podía corregir modificando las dimensiones del parche de la antena, sin embargo, al hacer estas modificaciones para poder cumplir con el ancho de banda por completo en las polarizaciones lineales, tenía la consecuencia de empeorar la respuesta del S11 de las polarizaciones circulares, así como en la relación axial, la cual es de suma importancia para las polarizaciones circulares. Por esta razón, se tuvo que encontrar un compromiso entre una relación axial menor a 3 dB en las polarizaciones circulares y el  $S_{11} < -10\text{dB}$  en todo el ancho de banda de las polarizaciones lineales, cumpliendo a la vez el ancho de banda en las circulares. De esta manera, se considera que en este trabajo de tesis se logró el mejor compromiso entre los tres factores antes mencionados para obtener los resultados presentados.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

### 5.1 Introducción

En este capítulo se presentan las conclusiones generales a las que se llegó durante el desarrollo de este trabajo de tesis, destacando las aportaciones de este trabajo de diseño y análisis electromagnético. Asimismo, se proporcionan algunas recomendaciones relacionadas con la mejora de una antena reconfigurable para trabajos futuros en esta rama.

### 5.2 Conclusiones generales

- Se diseñó y analizó una antena reconfigurable con capacidad de cambiar la polarización entre cuatro estados de polarización: Polarización Lineal Vertical (VLP), Polarización Lineal Horizontal (HLP), Polarización Circular de Mano Izquierda (LHCP) y Polarización Circular de Mano Derecha (RHCP) con aplicación en sistemas inalámbricos en la banda ISM de 2.4GHz.
- Se investigaron y estudiaron diferentes topologías de antenas con polarización reconfigurable, con el fin de comparar sus estructuras y se encontró que la mayoría de estas sólo tienen 2 o hasta 3 estados de polarización.
- Se propuso una metodología para diseñar una antena reconfigurable con cuatro estados de polarización diferentes, con una estructura simétrica, pequeña y de bajo consumo de potencia.
- Se propuso una topología de parche cuadrado con esquinas opuestas truncadas sobre un sustrato grueso tipo FR4, y con un circuito de alimentación de RF doble en forma de T por la parte posterior sobre un sustrato delgado tipo FR4.
- La estructura de antena propuesta utiliza solo cuatro diodos PIN MA/COM MA4AGBLP912 para cambiar la polarización entre los cuatro estados, de los cuales solo se encienden tres al mismo tiempo para las polarizaciones lineales y uno solo para las circulares.
- Se diseñó un filtro pasa bajas de tercer orden para alimentar a cada uno de los diodos PIN por el ánodo, y un stub a tierra por el cátodo, los cuales permiten

pasar la DC sin afectar la RF. Estos circuitos se realizan sobre el sustrato delgado FR4 de la parte posterior de la antena.

- Se diseñó el circuito regulador de voltaje y su PCB que consiste de cuatro sub-circuitos que proporcionan los voltajes y corrientes requeridos por los diodos PIN de 1.45V, empleando el circuito integrado LM317.
- Para realizar el diseño y el análisis electromagnético de la antena reconfigurable se utilizaron los programas CST Microwave Studio® y ADS Momentum®, donde se analizó tanto la estructura radiante como los circuitos de alimentación de RF y de los diodos PIN.
- Se propone utilizar el microcontrolador Arduino Nano para cambiar la polarización de la antena de manera automática desde una computadora, para lo cual se desarrolló un programa en lenguaje MATLAB que permite establecer la polarización deseada.
- Los resultados del análisis electromagnético de la antena con polarización reconfigurable diseñada en este trabajo de tesis, cumple con las especificaciones requeridas para las polarizaciones circulares de una manera excelente al cubrir todo el ancho de banda con pérdidas por retorno menores a -10 dB y con relación axial menor a 3 dB. En el caso de las polarizaciones lineales, se concluye que se llegaron a los mejores resultados posibles sin comprometer las características de las polarizaciones circulares. Para las polarizaciones lineales se obtuvo una relación axial de 15 dB para la horizontal y de 20 dB para la vertical, sin embargo en el S11 se notó una reducción en el ancho de banda, así como un ligero corrimiento hacia las frecuencias más bajas cercanas a 2.4GHz.
- Se puede concluir que el diseño de antenas con polarización reconfigurable es un proceso muy complejo debido a todas las variables que se tienen que tomar en cuenta simultáneamente, ya que se debe cumplir el comportamiento del  $S_{11} < -10\text{dB}$  en el ancho de banda requerido tanto para las polarizaciones lineales como para las circulares, y además una relación axial menor a 3 dB para las polarizaciones circulares.

## 5.2 Aportaciones

Las principales aportaciones realizadas con este trabajo de tesis se presentan a continuación:

- Se propuso una metodología para diseñar una antena reconfigurable con cuatro estados de polarización, simétrica, pequeña, de bajo costo y de bajo consumo de potencia, con aplicaciones en comunicaciones inalámbricas en la banda ISM de 2.4GHz.
- Se propuso una topología de parche cuadrado con esquinas opuestas truncadas sobre un substrato grueso tipo FR4, y con un circuito de alimentación de RF doble en forma de T por la parte posterior sobre un substrato delgado tipo FR4.
- Se propuso utilizar solo cuatro diodos PIN para cambiar la polarización entre los cuatro estados, de los cuales solo se encienden tres simultáneamente para las polarizaciones lineales y uno solo para las circulares, disminuyendo el consumo de potencia a 10mA para las polarizaciones circulares y 30mA para las lineales.
- Se propone el diseño de los circuitos de alimentación para los cuatro diodos PIN, que contiene cuatro filtros pasa bajos de tercer orden y tres stubs a tierra, así como un circuito regulador de voltaje y su circuito impreso PCB, para alimentar a todos los diodos PIN.
- Se propuso utilizar el microcontrolador Arduino Nano para cambiar la polarización de la antena de manera automática desde una computadora y se desarrolló un programa en lenguaje MATLAB que permite elegir la polarización deseada.
- Se logró el diseño de una antena reconfigurable de bajo costo sobre un substrato FR4 y tamaño pequeño (74x65 mm), con capacidad de cambiar 4 estados de polarización diferentes: (HLP, VLP, RHCP y LHCP), con aplicación en sistemas de comunicaciones inalámbricos en la banda de 2.4 GHz. La antena cumple con las especificaciones requeridas de pérdidas por retorno con un  $S_{11} < -10\text{dB}$  y una relación axial  $< 3\text{dB}$  en las polarizaciones circulares en la banda de 2.4GHz a 2.48GHz.

- Por último, es conveniente mencionar que además se diseñó y construyó una mesa rotatoria para la medición del patrón de radiación de antenas en conjunto con otros tres alumnos y un profesor. Para ello, se utilizó un microcontrolador Arduino Uno y un programa en MATLAB, para el control de la rotación de la mesa, incluyendo un conjunto con programas previamente diseñados en CICESE para medir la potencia con un analizador de espectros y mover la mesa rotatoria en incrementos de 1 grado, lo cual permite obtener el patrón de radiación en poco tiempo y con gran precisión.

### **5.3 Recomendaciones y trabajo futuro**

A continuación se presentan algunas recomendaciones útiles para el diseño de este tipo de antenas de polarización reconfigurable y posible trabajo futuro:

Se recomienda utilizar un sustrato grueso para la estructura radiante para mejorar las características de radiación, y un sustrato delgado en la parte posterior para evitar en lo posible el efecto de fringing al reducir el ancho de las líneas de alimentación y filtros pasabanda.

Se recomienda tener mucho cuidado en el diseño de los filtros, stubs a tierra y los circuitos de alimentación, ya que de estar mal diseñados pueden alterar el comportamiento de la antena.

Se recomienda utilizar un software de análisis electromagnético en 3D como el CST, para realizar el análisis electromagnético de la antena, con el propósito de contar con resultados que concuerden con los valores experimentales de la medición.

Se recomienda hacer una prueba de convergencia de los resultados del análisis electromagnético para tener la certeza de que la discretización utilizada sea la adecuada.

Para el diseño y optimización de la antena, se sugiere enfocarse en una polarización circular primero, ya que en las circulares se deben optimizar dos parámetros a la vez: la respuesta del parámetro S11 y obtener una relación axial menor a 3 dB.

Como trabajo futuro para esta antena en particular, se puede intentar mejorar el ancho de banda de las polarizaciones lineales utilizando redes de acoplamiento diferentes para la red de alimentación de RF. Además, se recomienda construir y caracterizar la antena diseñada para comparar los resultados teóricos con los experimentales de la medición.

Por último se recomienda construir los circuitos reguladores integrados en el mismo sustrato por la parte posterior de la antena y de ser posible incluir el microcontrolador.

## Lista de referencias bibliográficas

---

- Anguera, L., y Pérez, A. (2008). Teoría de Antenas. *Universitat Ramón Llull. Editor: Lluís Vicent.*
- Bahl, I. J. and Bhartia, P. (1980). *Microstrip Antennas*. Dedham, Massachusetts. Artech House.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*. (3a. ed.) New Jersey, John Wiley & Sons.
- Beddeleem, G., Ribero, J. M., Kossiavas, G., Staraj, R., and Fond, E. (2008). Dual-frequency circularly polarized antenna. *Microwave and optical technology letters*, 50(1), 177-180.
- Buenrostro Rocha, S. (2007). *Metodología para el diseño y construcción de antenas de microcinta en la banda WiMAX a 3.5 GHz*. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación y Tecnología Digital. 161 p.
- Cardama, A., Jofre, L., Rius, J.M., Romeu, J., Blanch, S. y Ferrando, M. (2002). "Antenas". (2da ed.) Barcelona, Edicions UPC.
- Chen, Y. B., Jiao, Y. C., and Zhang, F. S. (2007). Polarization reconfigurable CPW-fed square slot antenna using pin diodes. *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(6), 1233-1236.
- Chen, R. H., and Row, J. S. (2008). Single-fed microstrip patch antenna with switchable polarization. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 56(4), 922-926.
- Chung, K., Nam, Y., Yun, T., and Choi, J. (2006). Reconfigurable microstrip patch antenna with switchable polarization. *ETRI journal*, 28(3), 379-382.
- Díaz Tapia E., (2008), *Diseño y construcción de un repetidor activo con antenas planares para aplicaciones en comunicaciones inalámbricas*, Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 136p.

- Fries, M. K., Gräni, M., and Vahldieck, R. (2003). A reconfigurable slot antenna with switchable polarization. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 13(11), 490-492.
- Fukusako, T., Kitamura, N., and Mita, N. (2006). Design of patch antenna with switchable circular polarization using a branched feed circuit. *Microwave and optical technology letters*, 48(1), 1-4.
- Hasan Nazia, Gupta S.C.(2014). *Corner truncated microstrip patch antenna*. International xJournal of Advanced Engineering and Science. 2 (8), 352-358
- Huang, Y. and Boyle, K. (2008). *Antennas: from Theory to Practice*. London, U.K., John Wiley & Sons Ltd.
- Huff, G. H., Feng, J., Zhang, S., and Bernhard, J. T. (2003). A novel radiation pattern and frequency reconfigurable single turn square spiral microstrip antenna. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 13(2), 57-59.
- Hyun D.-H., Baik J.-W., Lee S.H. and Kim Y.-S. (2008). *Reconfigurable microstrip antenna with polarisation diversity*. Electronics Letters, 44 (8).
- Kim, B., Pan, B., Nikolaou, S., Kim, Y. S., Papapolymerou, J., and Tentzeris, M. M. (2008). A novel single-feed circular microstrip antenna with reconfigurable polarization capability. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 56(3), 630-638.
- Kraus, J. D. and Marhefka, R. J. (2002). *Antennas for all applications* (3a. ed.). Mc. Graw-Hill.
- Krauss, J. D. (1988). *Antennas* (2a. ed.). New Delhi, Mc. Graw Hill.
- Medina, J. L. (2013). Apuntes de clase de la materia de Caracterización de Dispositivos y Componentes de Microondas. Apuntes, CICESE, Electrónica y Telecomunicaciones, Ensenada, BC.
- Medina-Monroy, J. L., Díaz-Tapia, E., Olvera-Cervantes, J. L., Chávez-Pérez, R. A., y Velázquez-Ventura, A. (2008). *Análisis y Comparación de Metodologías para Determinar Experimentalmente la Ganancia de Antenas de RF y Microondas Simposio de Metrología CENAM*, 22-24, p. 1-6.

- Millanes Ruiz, R. A. (2013). *Diseño y fabricación de un arreglo de antenas planares sectorizadas con aplicación en WiMAX* Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.117p.
- Monti G., L. Corchia, and L. Tarricon. (2009). *Patch antenna with reconfigurable polarization*. Progress In Electromagnetics Research C, 9, 13-23.
- Nave C. R, (2000). Hyper Physics. Recuperado de. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polarcon.html#c1>
- Nieto Rodríguez, M. A. (2012). *Diseño de un arreglo de antena plana con capacidad de control del patrón de radiación a frecuencias de microondas*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.155p.
- Nishamol, M. S., Sarin, V. P., Tony, D., Anandan, C. K., Mohanan, P., and Vasudevan, K. (2011). Varactor controlled frequency and polarization reconfigurable microstrip antenna. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 21(6), 680-686.
- Qin, P. Y., Weily, A. R., Guo, Y. J., and Liang, C. H. (2010). Polarization reconfigurable U-slot patch antenna. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 58(10), 3383-3388.
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering*. (4th ed.) Massachusetts, John Wiley & Sons.
- Rezvani, S., Atlasbaf, Z., and Forooghi, K. (2012). A new compact reconfigurable patch antenna for polarization and frequency diversity. *Electromagnetics*, 32(5), 287-293
- Pyo, S., and Shin, I. (2012). A miniaturized switchable circularly polarized patch antenna controlled by a single diode operation. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(10), 2375-2378
- Hsu, S. H., and Chang, K. (2007). A novel reconfigurable microstrip antenna with switchable circular polarization. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 6, 160-162.

- Silver, S. (1949). *Microwave antenna theory and design* (No. 19). Iet
- Sung, Y. J. (2008). Reconfigurable patch antenna for polarization diversity. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 56(9), 3053-3054.
- Trujillo Ramírez, Raúl. (2012). *Diseño y construcción de antenas planares de banda ancha con aplicaciones en sistemas de telecomunicaciones*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 149p.
- Yang, F., and Rahmat-Samii, Y. (2002). *A reconfigurable patch antenna using switchable slots for circular polarization diversity*. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 12(3), 96-98.

## MA4AGBLP912

### AlGaAs Beamlead PIN Diode

V4

#### Features

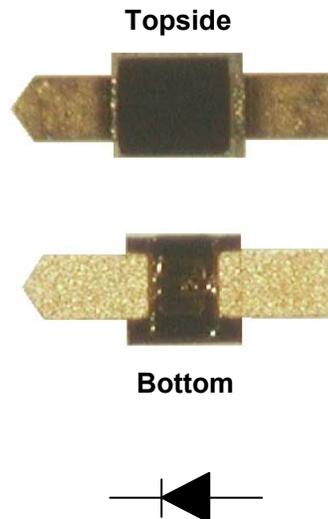
- ◆ Low Series Resistance
- ◆ Low Capacitance
- ◆ 5 Nanosecond Switching Speed
- ◆ Can be Driven by a Buffered +5V TTL
- ◆ Silicon Nitride Passivation
- ◆ Polyimide Scratch Protection
- ◆ RoHS Compliant

#### Description

M/A-COM Technology Solutions MA4AGBLP912 is an Aluminum-Gallium-Arsenide anode enhanced, beam lead PIN diode. AlGaAs anodes, which utilize M/A-COM Tech's patented hetero-junction technology, produce less diode "On" resistance than conventional GaAs or silicon devices. This device is fabricated in a OMCVD system using a process optimized for high device uniformity and extremely low parasitics. The result is a diode with low series resistance, 4Ω, low capacitance, 28fF, and an extremely fast switching speed of 5nS. It is fully passivated with silicon nitride and has an additional polymer coating for scratch protection. The protective coating prevents damage to the junction and the anode air bridges during handling and assembly.

#### Applications

The ultra low capacitance of the MA4AGBLP912 device makes it ideally suited for use up to 40GHz when used in a shunt configuration. The low RC product and low profile of the beamlead PIN diode allows for use in microwave switch designs, where low insertion loss and high isolation are required. The operating bias conditions of +10mA for the low loss state, and 0V, for the isolation state permits the use of a simple +5V TTL gate driver. AlGaAs, beamlead diodes, can be used in switching arrays on radar systems, high speed ECM circuits, optical switching networks, instrumentation, and other wideband multi-throw switch assemblies.

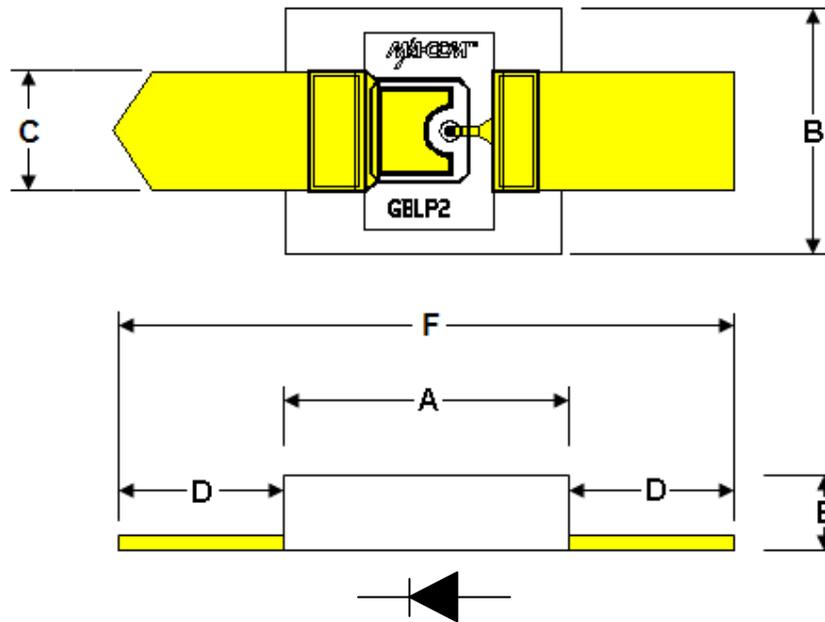


#### Absolute Maximum Ratings @ T<sub>AMB</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

Parameter	Absolute Maximum
Reverse Voltage	-50V
Operating Temperature	-65°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Junction Temperature	+175°C
Forward DC Current	40mA
C.W. Incident Power	+23dBm
Mounting Temperature	+235°C for 10 seconds

### Electrical Specifications at $T_{AMB} = 25^{\circ}C$

Test Conditions	Parameters	Units	Min	Typical	Max.
Total Capacitance @ -5V/1 MHz	Ct	fF	-	26	30
Forward Resistance @ +20mA/1 GHz	Rs	Ohms	-	4	4.9
Forward Voltage at +10mA	Vf	Volts	1.2	1.36	1.5
Leakage Current at -40 V	Ir	nA	-	50	300
Minority Carrier Lifetime	TL	nS	-	5	10



DIM	INCHES		MM	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	0.009	0.013	0.2286	0.3302
B	0.0049	0.0089	0.1245	0.2261
C	0.0037	0.0057	0.0940	0.1448
D	0.0049	0.0089	0.1245	0.2261
E	0.002	0.006	0.0508	0.1524
F	0.0218	0.0278	0.5537	0.70612

**ADVANCED:** Data Sheets contain information regarding a product M/A-COM is considering for development. Performance is based on target specifications, simulated results, and/or prototype measurements. Commitment to develop is not guaranteed.

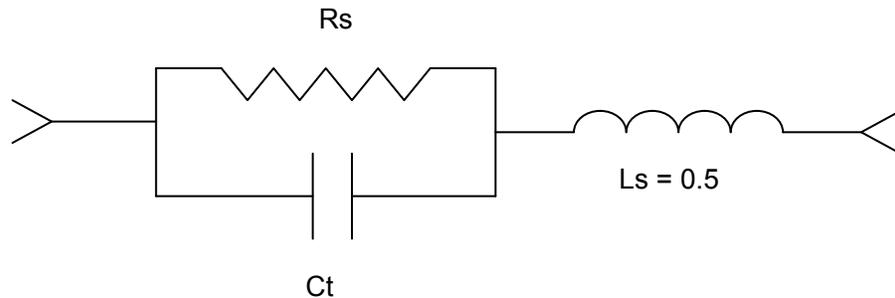
**PRELIMINARY:** Data Sheets contain information regarding a product M/A-COM has under development. Performance is based on engineering tests. Specifications are typical. Mechanical outline has been fixed. Engineering samples and/or test data may be available. Commitment to produce in volume is not guaranteed.

- **North America** Tel: 800.366.2266 / Fax: 978.366.2266
- **Europe** Tel: 44.1908.574.200 / Fax: 44.1908.574.300
- **Asia/Pacific** Tel: 81.44.844.8296 / Fax: 81.44.844.8298

Visit [www.macom.com](http://www.macom.com) for additional data sheets and product information.

M/A-COM Inc. and its affiliates reserve the right to make changes to the product(s) or information contained herein without notice.

### Diode Model



### MA4AGBLP912 SPICE Model

$I_s = 1.0E-14$  A  
 $V_i = 0.0$  V                       $wBv = 50$  V  
 $\mu_e = 8600$  cm<sup>2</sup>/V-sec       $wPmax = 100$  mW  
 $W_i = 3.0$   $\mu$ m                       $Ffe = 1.0$   
 $R_r = 10$  K Ohms  
 $C_{jmin} = 0.020$  pF  
 $\tau = 10$  nsec  
 $R_s(I) = R_c + R_j(I) = 0.10$  Ohm +  $R_j(I)$   
 $C_{j0} = 0.022$  pF  
 $V_j = 1.35$  V  
 $M = 0.5$   
 $F_c = 0.5$   
 $I_{max} = 0.04$  A  
 $K_f = 0.0$   
 $A_f = 1.0$

### Handling and Assembly Procedures

*The following precautions should be observed to avoid damaging these devices.*

#### **Cleanliness**

These devices should be handled in a clean environment.

#### **Static Sensitivity**

Aluminum Gallium Arsenide PIN diodes are Class 0, HBM, ESD sensitive and can be damaged by static electricity. Proper ESD techniques should be used when handling these devices.

#### **General Handling**

These devices have a polymer layer which provides scratch protection for the junction area and the anode air bridge. Beam lead devices must, however, be handled with extreme care since the leads may easily be distorted or broken by the normal pressures exerted when handled with tweezers. A vacuum pencil with a #27 tip is recommended for picking and placing.

#### **Attachment**

These devices were designed to be inserted onto hard or soft substrates. Recommended methods of attachment include thermo-compression bonding, parallel-gap welding and electrically conductive silver epoxy.

### Ordering Information

Part Number	Packaging
MA4AGBLP912	Gel Pak

## Apendice 2. Código del programa en MATLAB para el control de la polarización

```

%% Codigo para cambiar el estado de polarizacion de la antena.
%% Jesus Angel Ortiz Martinez
%% CICESE 2015
clear all
close all
clc
function varargout = Seleccion_Polarizacion(varargin)
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Seleccion_Polarizacion_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Seleccion_Polarizacion_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before Seleccion_Polarizacion is made visible.
function Seleccion_Polarizacion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% Choose default command line output for Seleccion_Polarizacion
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Seleccion_Polarizacion_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)

```

```

varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
clear all
clc
delete(instrfind({'Port'},{'/dev/tty.usbserial-A9Y9DBB7'})); %% Borramos los
puertos abiertos con el COM de nuestro dispositivo
a=arduino('/dev/tty.usbserial-A9Y9DBB7'); %% Abrimos el puerto
%Definicion de pines como salida
%Los siguientes son para controlar la activacion/desactivacion de cada diodo
PIN
a.pinMode(2, 'output');
a.pinMode(3, 'output');
a.pinMode(4, 'output');
a.pinMode(5, 'output');
disp('Polarizacion Lineal Vertical seleccionada')
    a.digitalWrite(2,1);
    a.digitalWrite(3,0);
    a.digitalWrite(4,1);
    a.digitalWrite(5,1);
    pause(5);
    a.digitalWrite(2,0);
    a.digitalWrite(3,0);
    a.digitalWrite(4,0);
    a.digitalWrite(5,0);

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all
clc
delete(instrfind({'Port'},{'/dev/tty.usbserial-A9Y9DBB7'})); %% Borramos los
puertos abiertos con el COM de nuestro dispositivo
a=arduino('/dev/tty.usbserial-A9Y9DBB7'); %% Abrimos el puerto
%Definicion de pines como salida
%Los siguientes son para controlar la activacion/desactivacion de cada
%diodo PIN
a.pinMode(2, 'output');
a.pinMode(3, 'output');

```

```

a.pinMode(4, 'output');
a.pinMode(5, 'output');
disp('Polarizacion Lineal Horizontal seleccionada')
    a.digitalWrite(2,0);
    a.digitalWrite(3,1);
    a.digitalWrite(4,1);
    a.digitalWrite(5,1);
    pause(5);
    a.digitalWrite(2,0);
    a.digitalWrite(3,0);
    a.digitalWrite(4,0);
    a.digitalWrite(5,0);

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all
clc
delete(instrfind({'Port'}, {'/dev/tty.usbserial-A9Y9DBB7'})); %% Borramos los
puertos abiertos con el COM de nuestro dispositivo
a=arduino('/dev/tty.usbserial-A9Y9DBB7'); %% Abrimos el puerto
%Definicion de pines como salida
%Los siguientes son para controlar la activacion/desactivacion de cada
%diodo PIN
a.pinMode(2, 'output');
a.pinMode(3, 'output');
a.pinMode(4, 'output');
a.pinMode(5, 'output');
disp('Polarizacion Circular de Mano Derecha seleccionada')
    a.digitalWrite(2,1);
    a.digitalWrite(3,0);
    a.digitalWrite(4,0);
    a.digitalWrite(5,0);
    pause(5);
    a.digitalWrite(2,0);
    a.digitalWrite(3,0);
    a.digitalWrite(4,0);
    a.digitalWrite(5,0);

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)

```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
clear all
clc
delete(instrfind({'Port'}, {'/dev/tty.usbserial-A9Y9DBB7'})); %% Borramos los
puertos abiertos con el COM de nuestro dispositivo
a=arduino('/dev/tty.usbserial-A9Y9DBB7'); %% Abrimos el puerto
%Definicion de pines como salida
%Los siguientes son para controlar la activacion/desactivacion de cada
%diodo PIN
a.pinMode(2, 'output');
a.pinMode(3, 'output');
a.pinMode(4, 'output');
a.pinMode(5, 'output');
disp('Polarizacion Circular de Mano Izquierda seleccionada')
    a.digitalWrite(2,0);
    a.digitalWrite(3,1);
    a.digitalWrite(4,0);
    a.digitalWrite(5,0);
    pause(5);
    a.digitalWrite(2,0);
    a.digitalWrite(3,0);
    a.digitalWrite(4,0);
    a.digitalWrite(5,0);
```