

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



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

---

**Diseño de un arreglo de antena de microcinta compacta y reconfigurable multibanda para aplicación en dispositivos portátiles a frecuencias de microondas.**

Tesis

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

Presenta:

**Armando López Hernández**

Ensenada, Baja California, México, 2015

Tesis defendida por

**Armando López Hernández**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. José Luis Medina Monroy**  
Director del Comité

**Dr. Arturo Velázquez Ventura**  
Miembro del comité

**Dr. Roberto Conte Galván**  
Miembro del comité

**Dr. Carlos Alberto Brizuela Rodríguez**  
Miembro del comité



---

**Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo**  
Coordinador del Posgrado en Electrónica y  
Telecomunicaciones.

---

**Dr. Jesús Favela Vara**  
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Armando López Hernández**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Altas Frecuencias.

**Diseño de un arreglo de antena de microcinta compacta y reconfigurable multibanda para aplicación en dispositivos portátiles a frecuencias de microondas.**

Resumen aprobado por:

---

Dr. José Luis Medina Monroy  
Director de Tesis

En años recientes, el campo de las comunicaciones inalámbricas ha conducido a emplear frecuencias de microondas cada vez más altas, para descongestionar el espectro en frecuencias bajas, aumentar el ancho de banda, transmitir mayor cantidad de información a velocidades cada vez más elevadas, mejorar su eficiencia y disminuir su tamaño principalmente. Debido a esto, los dispositivos móviles deben adaptarse a un gran número de antenas para operar en diferentes rangos de frecuencia. Los dispositivos portátiles deben operar de acuerdo al rango de frecuencias autorizado de acuerdo a su ubicación geográfica: LTE700 (698-798 MHz), GSM850 (824-894 MHz), GSM900 (880-960 MHz), GPS(1575.42 MHz), GSM1800 (1710-1880 MHz), GMS1900 (1850-1890 MHz), UMTS2100 (1920-2170 MHz), LTE2300 (2300-2400 MHz), WiFi/WLAN (2400-2500 MHz), LTE2500 (2500-2690 MHz) y WiFi 5.8GHz. El diseño de una antena reconfigurable multibanda compacta representa una buena alternativa para cubrir los rangos de frecuencias mencionados, ya que unifica varias antenas reduciendo el tamaño considerablemente.

Para el efectuar el diseño de la antena reconfigurable multibanda objeto de desarrollo en este tema de tesis, se investigan diferentes topologías, así como las diferentes técnicas de conmutación necesarias para lograr la reconfiguración de la antena. La estructura de la antena seleccionada es una antena de microcinta con tres elementos radiantes anidados por ser una estructura compacta y capaz de cubrir las diferentes bandas de frecuencia. Para poder reconfigurar la antena y seleccionar la banda de frecuencias deseada, se utilizan tres diodos PIN los cuales cambian la estructura de la antena al encenderse o apagarse los diodos PIN con un total de ocho combinaciones. Para poder automatizar el control de la antena reconfigurable desde una PC, se utiliza el microcontrolador FT245RL y un programa en MatLab que de acuerdo a la banda de frecuencias deseada enciende o apaga los diodos PIN necesarios para reconfigurar la antena de manera automática. Se presentan resultados de la construcción de la antena y los circuitos de alimentación, así como los resultados de la caracterización de las pérdidas por retorno (S11), su ganancia y patrones de radiación en la banda de operación de 0.5 a 6GHz los cuales muestran un comportamiento aceptable.

**Palabras clave: Antena Reconfigurable Multibanda, microcinta, Diodo PIN, dispositivos inalámbricos portátiles.**

Abstract of the thesis presented by **Armando López Hernández** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in High Frequency

**Design of compact reconfigurable microstrip planar multiband antenna array with applications in portable devices at microwave frequencies.**

Abstract approved by:

---

Dr. José Luis Medina Monroy  
Thesis Advisor

In recent years, the field of wireless communications has increasing the use of higher microwave frequencies, to release the spectrum at low frequencies, increasing the bandwidth, transmit more information quantity at increasingly higher speeds, improve efficiency and decrease its size mainly. Due to this, the mobile devices must be adapted to a large number of antennas to operate in different frequency bands. Portable devices must operate according to the authorized frequencies depending of the geographical location in the bands: LTE700 (698-798 MHz), GSM850 (824-894 MHz), GSM900 (880-960 MHz), GPS(1575.42 MHz), GSM1800 (1710-1880 MHz), GSM1900 (1850-1890 MHz), UMTS2100 (1920-2170 MHz), LTE2300 (2300-2400 MHz), WiFi/WLAN (2400-2500 MHz), LTE2500 (2500-2690 MHz) and WiFi 5.8GHz. The design of a compact reconfigurable multiband antenna, represents a good alternative to cover the frequency ranges mentioned, unifying multiple antennas to reduce the size considerably.

In order to design a reconfigurable multiband antenna, different topologies are investigated, as well as the different switching techniques necessary to achieve the reconfiguration of the antenna. The structure of the selected antenna is a microstrip antenna with three nested radiating elements to reduce its size and being a compact structure capable of covering different frequency bands. To reconfigure the antenna and select the desired frequency band, three PIN diodes with a total of eight combinations of on or off conditions of PIN diodes are used, to change the structure of the antenna.

To perform the control of the reconfigurable antenna from a PC, the FT245RL microcontroller was selected and a program in MatLab was written to reconfigure the antenna automatically. Results of the construction of the reconfigurable antenna and the bias circuits for the PIN diodes are provided. Besides, results of the characterization of the return losses ( $S_{11}$ ), gain and radiation patterns are presented in the 0.5 to 6GHz frequency band, showing an acceptable behavior.

**Keywords: Multiband reconfigurable antenna, microstrip, PIN diode, wireless mobile device.**

## Dedicatoria

*Dedico esta tesis a mí amada madre María y a mí amada Hermana  
Llianahí Jazmín quienes me han inspirado, me han alentado, y  
motivado a nunca rendirme. A mis maestros quienes nunca desistieron  
al enseñarme y siempre depositando su confianza en mí.*

## Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme el coraje, la salud, la familia y los amigos que tengo, ya que gracias a todos ellos pude concluir una etapa más de mi vida. Quiero agradecer al CICESE por permitirme ser parte de este centro de investigación.

A mí madre, porque gracias a ella soy quien soy, por su apoyo incondicional, por sus sacrificios, por su cariño y por todo lo que me han dado sin pedir nada a cambio; por lo cual estaré eternamente agradecido. A mi hermana Ilianahí, que siempre ha estado de mi lado, apoyándome y cuidándome como una segunda madre. A mi director de tesis, el Dr. José Luis Medina Monroy, por dirigir este trabajo de tesis y compartir sus conocimientos, su tiempo, y el compromiso que tuvo durante todo este proyecto y sobre todo, por no perder la fe en mí. A los miembros de mi comité de tesis: Dr. Arturo Velázquez, Dr. Carlos Alberto Brizuela Rodríguez, Dr. Roberto Conte Galván por sus comentarios y revisiones. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y el CICESE por el apoyo económico para colegiatura y manutención, sin el cual esto no hubiera sido posible. A mis profesores del área de altas frecuencias: Dr. Arturo Velázquez, Dr. Apolinar Reynoso, M. en C. Jesús Ibarra, M. en C. Benjamín Ramírez, Dr. Humberto Lobato, Dr. Ricardo Chávez por sus consejos, conocimientos y ayuda cuando los necesité. Al Ing. René Torres por su apoyo en la fabricación de las antenas y circuitos de alimentación, por su tiempo y paciencia para realizar con calidad su trabajo.

A mis amigos de la infancia Alonso, Pelayo, Mónica, y Diego, quienes siempre me apoyaron; a Elena quien siempre me estuvo motivando a terminar la tesis; a mis amigos y compañeros del área de Altas Frecuencias: Reinaldo, Rafael, Ángel, Julio, Alfredo, Fernanda, Víctor, y en especial a Cruz Ángel por los consejos y apoyo que siempre me mostró; a mis compañeros los Telecos y controleros. Al todo el personal del CICESE, por su amabilidad, su gran calidad humana y la excelente atención que me brindaron.

## Tabla de Contenido

	Página
<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 y Motivación</b>	
1.1 Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	5
1.3 Objetivos.....	11
1.4 Estructura de la tesis.....	12
<b>Capítulo 2. Marco Teórico</b>	
2.1 Definición de una antena.....	13
2.2 Tipos de Antenas.....	13
2.2.1 Antenas de Alambre.....	13
2.2.2 Antenas de Apertura.....	14
2.2.3 Antenas de Microcinta.....	14
2.2.4 Antenas Reflectoras.....	15
2.2.5 Antenas de Lente.....	15
2.3 Parámetros de una antena.....	16
2.3.1 Patrón de Radiación.....	16
2.3.2 Regiones de Campo.....	17
2.3.3 Directividad.....	18
2.3.4 Ganancia.....	18
2.3.5 Eficiencia.....	18
2.3.6 Ancho de Banda.....	19
2.3.7 Polarización.....	19
2.4 Antenas de Microcinta.....	20
2.4.1 Métodos de Alimentación.....	22
2.4.1.1 Alimentación por línea de transmisión.....	23
2.4.1.2 Alimentación Coaxial.....	23
2.4.1.3 Alimentación por Ranura.....	23
2.4.1.4 Alimentación por Acoplamiento.....	24
2.5 Antenas Reconfigurables.....	24
2.5.1 Antenas Reconfigurables Multibanda.....	24
2.5.2 Tipos de Antenas Reconfigurables.....	25
2.5.3 Interruptores de RF.....	25
2.5.3.1 Interruptores de Semiconductor.....	26
2.5.3.2 Interruptores MEMS.....	28
2.6 Estándares de Comunicación para Dispositivos Portátiles.....	29

2.6.1 Estándares de Telefonía Móvil.....	29
2.6.1.1 Telefonía 2G.....	30
2.6.1.2 Telefonía 3G.....	30
2.6.1.1 Telefonía 4G.....	30
2.6.2 Estándares de Comunicaciones de Corto Alcance.....	31
<b>Capítulo 3. Metodología de Diseño</b>	
3.1 Propuesta de diseño de Antena.....	32
3.2 Diagrama de flujo de la Metodología de Diseño.....	34
3.3 Establecimiento de las Especificaciones de Diseño.....	35
3.4 Selección del Sustrato.....	35
3.5 Diseño del agrupamiento de Antenas.....	36
3.5.1 Diseño de los Elementos radiantes para cada frecuencia	37
3.5.2 Optimización de la Antena Propuesta.....	41
3.6 Diseño y selección del interruptor de RF.....	45
3.6.1 Diodo PIN.....	46
3.6.2 Diseño del Circuito de Polarización del Diodo PIN.....	48
3.6.3 Diseño del Circuito Regulador de Voltaje.....	51
3.6.4 Circuito de Control FT245RL.....	52
<b>Capítulo 4. Construcción y Caracterización de la Antena Reconfigurable</b>	
4.1 Construcción de la Antena.....	55
4.2 Caracterización de la Antena.....	67
4.2.1 Medición de Pérdidas por Retorno.....	67
4.2.2 Medición de la Ganancia.....	74
4.2.3 Medición del Patrón de Radiación.....	79
<b>Capítulo 5. Análisis y Discusión de Resultados</b>	85
<b>Capítulo 6. Conclusiones</b>	
6.1 Conclusiones generales.....	88
6.2 Aportaciones.....	89
6.3 Recomendaciones y trabajo futuro.....	90
<b>Lista de Referencia Bibliográficas.....</b>	<b>92</b>



## Lista de figuras

Figura		Página
1	Antena Multibanda implementando MEM's (Sognan,2006).....	6
2	(A) Diseño propuesto por Angus C. K. Mak y (B) Diseño propuesto por Kevin R. Boyler.....	6
3	Antena Multibanda sobre un mismo plano(Angus, 2007).....	7
4	Antena Multibanda Anidada (Chunna Z.,2007).....	7
5	Antena PIFA Multibanda (Sognan Y.,2008).....	8
6	Diseño propuesto por Zhang.....	8
7	Doble antena Multibanda (Cho j.,2009).....	8
8	Antena Multibanda con Diodos Varactores (Hattan F.,2009).....	9
9	Antenas Multibanda agrupadas (Hattan F., 2011).....	10
10	Antena Multibanda agrupadas a bajas frecuencias (Hattan F., 2012).	10
11	Diseño propuesto por A. Ghasemi.....	11
12	Ejemplo de Antenas de alambre, del lado izquierdo se muestra una antena Loop, del lado derecho se muestra una antena dipolo.....	14
13	a) antena de Rectangular de microcinta. B) antena Circular de microcinta.....	15
14	A) Antena Refractora con alimentación frontal. B) Antena reflectora con alimentación Cassegrain. C) antena con esquina 90°.....	15
15	Patrón de Radiación tridimensional.....	17
16	Regiones de campo.....	17
17	Pérdidas por Retorno.....	20
18	Tipos de Polarización.....	20
19	Antena de Microcinta.....	21
20	Figuras geométricas para el diseño de antenas de microcinta.....	22
21	Alimentación Coaxial.....	23
22	Alimentación por Ranura.....	24
23	Implementación de interruptores de RF.....	26
24	Estructura de Antena Propuesta.....	33
25	Diagrama de flujo para el diseño de la antena propuesta.....	34
26	vista transversal de la antena propuesta.....	36

27	Taper entre elementos radiantes.....	39
28	Antena propuesta sin optimizar.....	40
29	Antena propuesta A.....	40
30	Parámetros S11 Antena propuesta.....	41
31	Lista de parámetros.....	42
32	Distancia óptima entre elementos radiantes.....	43
33	Dimensiones finales de la antena propuesta.....	43
34	Dimensiones optimizadas del plano de tierra.....	44
35	Antena Optimizada.....	44
36	Parámetros S, antena final.....	45
37	Análisis de interruptores de RF.....	46
38	Parámetros S, Diodo PIN encendido.....	47
39	Parámetros S, Diodo Pin Apagado.....	48
40	Polarización con Filtro Pasa Bajas.....	49
41	Componentes ideales y comerciales para el FPB.....	50
42	Análisis del FPB S11.....	51
43	Calculo de la longitud del Stub a tierra.....	52
44	Routing del Stub a tierra.....	52
45	Parámetros S del Stub a tierra.....	53
46	Circuito Regulador de voltaje.....	53
47	Circuito de control USB FT245RL.....	55
48	Pads para el FPB y el Reg. de voltaje.....	55
49	Máquina Repromaster Agfa.....	56
50	Microscopio Mitutoyo para verificar las dimensiones de la mascarilla.....	57
51	Mascarillas de la antena.....	57
52	Roladora térmica para adherir la filmina.....	58
53	Maquina Colight M-218 de luz ultravioleta.....	58
54	Revelador de filmina y Cloruro Férrico para obtener el circuito.....	59
55	Circuito impreso de la antena y su plano de tierra.....	60
56	Circuito de alimentación de los diodos PIN y su plano de tierra.....	60
57	Circuitos de la antena y su plano de tierra protegidos con níquel.....	61

58	Circuito de alimentación y su plano de tierra protegidos con níquel.....	61
59	Circuitos introducidos al Horno para secar el Epoxy conductivo.....	62
60	Ensamble de componentes de la antena empleando el microscopio.	62
61	Vista al microscopio de los componentes del filtro pasa bajas.....	63
62	Vista del circuito de alimentación de los diodos PIN y detalles al microscopio.....	64
63	Montaje de los diodos PIN en la antena (a) y un acercamiento al microscopio (b).....	64
64	Antena terminada y su circuito de control.....	65
65	Circuito de control FT245RL.....	65
66	Circuito de alimentación con detalles de sus voltajes y corrientes.....	66
67	Antena conectada al circuito de control FT245RL.....	67
68	Medición del coeficiente de reflexión S11 de la antena reconfigurable.....	68
69	Pérdidas por Retorno (000).....	69
70	Pérdidas por Retorno (001).....	69
71	Pérdidas por Retorno (010).....	70
72	Pérdidas por Retorno (011).....	70
73	Pérdidas por Retorno (100).....	71
74	Pérdidas por Retorno (101).....	71
75	Pérdidas por Retorno (110).....	72
76	Pérdidas por Retorno (111).....	72
77	Pérdidas por propagación en función de la frecuencia y una distancia de 1.5m.....	75
78	Medición de Ganancia de la antena reconfigurable.....	76
79	Medición de ganancia de la antena multibanda vs antena Vivaldi.....	77
80	Ganancia medida vs análisis electromagnético, primeros 4 modos....	78
81	Ganancia medida vs análisis electromagnético, últimos 4 modos.....	79
82	Configuración de los equipos para medir el patrón de radiación de las antenas.....	80

83	Patrón de radiación medido vs análisis EM en forma polar a 0.85 GHz: a) plano H y b) Plano E.....	81
84	Medición de patrón de radiación de la antena 2 a 0.845GHz a) plano H y b) plano E.....	82
85	Medición de patrón de radiación de la antena 3 a 2.04GHz a) plano H y b) plano E.....	82
86	Medición de patrón de radiación de las antenas 1,2 y 3 a 1.57542GHz a) plano H y b) plano E.....	83
87	Medición de patrón de radiación de las antenas 1,2 y 3 a 2.425GHz a) plano H y b) plano E.....	84
88	Medición de patrón de radiación de las antenas 1 y 2 a 5.8GHz a) plano H y b) plano E.....	84

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Principales estándares de comunicaciones.....	2
2	Denominación de bandas de frecuencia por décadas.....	4
3	Bandas de frecuencia en microondas.....	4
4	Ventajas y desventajas de una antena de microcinta.....	21
5	Comparación entre interruptores semiconductores de RF.....	27
6	Ventajas y desventajas Diodo PIN.....	28
7	Ventajas y desventajas FET.....	28
8	Ventajas y Desventajas MEMs.....	28
9	Estándares de comunicación mayormente usados a nivel mundial.....	29
10	Estándares de comunicación y sus anchos de banda.....	33
11	Longitudes de cada antena para cada frecuencia.....	38
12	Voltajes y corrientes a la salida del FT245RL.....	66
13	Configuraciones de la antena Multibanda.....	67
14	Bandas de frecuencia de la antena medida.....	73

# Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se presenta la motivación para la realización de este trabajo de tesis y se introduce al tema de investigación de antenas reconfigurables. Se presenta el planteamiento del problema que ha conducido al continuo desarrollo de las comunicaciones inalámbricas y la importancia que juegan las antenas en estas. Se proporcionan los objetivos generales y particulares, así como la manera en que se encuentra organizado este trabajo de tesis.

## 1.1 Introducción

En años recientes, el campo de las comunicaciones inalámbricas ha conducido a los prestadores de servicios a emplear frecuencias de microondas cada vez más altas, para descongestionar el espectro en frecuencias bajas, aumentar el ancho de banda, transmitir mayor cantidad de información a velocidades cada vez más elevadas, mejorar su eficiencia y disminuir su tamaño principalmente. Por lo general cada radio se conecta a un elemento de antena separado y en el futuro se prevé que se requerirán hasta 20 elementos de antena (Sung Y., 2012). Estos dispositivos portátiles deben de operar en el rango de frecuencias establecido de acuerdo a su ubicación geográfica, por lo cual deben funcionar en diferentes bandas de frecuencia. Los teléfonos celulares modernos contienen diferentes funciones entre las que se encuentran transmisores y/o receptores:

- GPS (global positioning System)
- WLAN( wireless local area network)
- Bluetooth
- WiFi (wireless fidelity)
- radio FM,
- DVB ( Digital Video Broadcasting)

Y en el futuro se prevé que contará con:

- RFID (Radio Frequency Identification)
- RDF(Radio Direction Finding)
- CR (Cognitive Radio)
- UWB ( UltraWideBand)

Además se tienen los siguientes estándares de comunicaciones:

- GSM850 (system for mobile communications)
- E-GSM900
- GSM 1800

- GSM1900
- GPRS(General Packet Radio System)
- EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)
- UMTS band I,II, V (Universal Mobile Telecommunications system)
- HSDPA ( High-speed downlink packet Access)
- WiMax (worldwide interoperability for microwave access)
- LTE ( Long term Evolution)

Por otra parte, los dispositivos móviles son cada vez más delgados y compactos. Por este motivo el diseño de la antena reconfigurable multibanda en microcinta es una buena alternativa, ya que unifica varias antenas reduciendo el tamaño considerablemente. En la tabla 1 se presentan algunas tecnologías con su banda de frecuencias de operación que se utilizan comúnmente en el campo de las comunicaciones a nivel mundial.

**Tabla 1. Principales estándares de comunicaciones**

<b>Estándar</b>	<b>Frecuencias de operación(GHz)</b>	<b>Región</b>
LTE Banda 10,12,17	0.737- 0.768	América
GSM850	0.824 -0 .894	América
GSM900	0.8902 – 0.9598	Europa, Asia, Oceanía
LTE Banda 4	1.710 – 1.755	América
GSM1800	1.7102-1.8798	Europa, Asia, Oceanía
GSM1900	1.850 -1.990	América
UMTS 2100	1.92 - 2.17	Europa, Asia, África, Brasil, Oceanía
LTE Banda 7	2.5 – 2.57	EU, Asia, Sudamérica, África.

Como se puede apreciar en la tabla 1, existe un gran número de estándares de comunicaciones que utilizan los dispositivos móviles de acuerdo al país donde se encuentran, y que han provocado una evolución continua de los protocolos de comunicaciones.

El rápido desarrollo de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas, ha impactado mayormente a los dispositivos de comunicaciones móviles, que además de reducir su tamaño, se han incrementado de manera constante los servicios y aplicaciones. Debido a esto, se han autorizado nuevas bandas de frecuencias, lo cual implica que los dispositivos móviles deberán adaptarse a un gran número de antenas. Para efectuar la comunicación en las diferentes aplicaciones mencionadas, 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 (Boyle, 2007) (Cho J., 2009). Las principales consideraciones a tomar en cuenta son el ancho de banda amplio y conseguir una estructura compacta, además de lograr un buen comportamiento de sus características eléctricas. Las antenas reconfigurables representan una buena alternativa para lograr estas características y han recibido una mayor atención. (Sung Y., 2012).

El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1993). Por lo tanto, la misión de una antena receptora es poder captar en algún punto del espacio la onda radiada, absorber energía de esa onda y entregarla al receptor. Existen parámetros que deben cumplir las antenas receptoras para recibir niveles de potencia en ciertas bandas de frecuencia. Toda onda se caracteriza por su frecuencia ( $f$ ) y su longitud de onda ( $\lambda$ ), ambas relacionadas por la velocidad de propagación en el medio.

El conjunto de todas las frecuencias, o espectro de frecuencias, se divide por décadas en bandas, con la denominación presentada en la tabla 2. Cada porción de ese espectro tiene una aplicación asignada por los organismos de normalización.



**Tabla 2. Denominación de bandas de frecuencia por décadas.**

<b>Banda</b>	<b>Frecuencia</b>	<b><math>\lambda</math></b>
<b>ELF</b>	<3 KHz	>100 Km
<b>VLF</b>	3-30 KHz	100-10 Km
<b>LF</b>	30-300 KHz	10-1 Km
<b>MF</b>	0.3-3 MHz	1000-100 m
<b>HF</b>	3-30 MHz	100-10 m
<b>VHF</b>	30-300 MHz	10-1 m
<b>UHF</b>	0.3-3 GHz	100-10 cm
<b>SHF</b>	3-30 GHz	10-1 cm
<b>EHF</b>	30-300 GHz	10-1 mm

A frecuencias de microondas existe una subdivisión acuñada desde los primeros tiempos del radar, que se muestra en la tabla 3, y que es ampliamente utilizada en la actualidad.

**Tabla 3. Bandas de frecuencia en microondas.**

<b>Banda</b>	<b>Frecuencia (GHz)</b>
<b>L</b>	1-2
<b>S</b>	2-4
<b>C</b>	4-8
<b>X</b>	8-12.4
<b>Ku</b>	12.4-18
<b>K</b>	18-26.5
<b>Ka</b>	26.5-40

Las antenas presentan características de impedancia y de radiación que dependen de la frecuencia. El análisis de dichas características se realiza a partir de las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, utilizando las expresiones de los campos en forma compleja. Para cada aplicación y banda de frecuencias, las antenas presentan características peculiares que dan origen a topologías de antenas muy diversas (Cardama,2002).

## 1.2 Antecedentes

El término de antena multibanda ha tomado una mayor importancia en la última década, debido al rápido aumento en el número de estándares de comunicaciones inalámbricas, y que con la transición de la televisión analógica a digital se ha permitido liberar la banda de los 700MHz, que según la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) será utilizada para servicios de comunicaciones (Cho J., 2009).

Existe una gran variedad de antenas que se utilizan en los dispositivos móviles y se ha hecho una clasificación de ellas, en donde las más utilizadas para dispositivos inalámbricos son las del tipo PIFA/microstrip y PMA o monopolo planar. Para el diseño de antenas multibanda, en años recientes se ha optado por adoptar la estructura PIFA (*Planar inverted-F antenna*). Por ejemplo, los investigadores Angus C. K. y Corbett R. Rowell, (2007), desarrollaron una antena multibanda reconfigurable con estructura PIFA, la cual opera en las frecuencias de GSM, DCS, PCS y UMTS. Para reconfigurar la banda de frecuencias de operación, se utilizan técnicas para el control de la alimentación de la antena. Considerando los nuevos protocolos de comunicación, esta antena no cubre la banda liberada por la televisión analógica de 700MHz, ni los nuevos protocolos de comunicación a frecuencias superiores a 2.4 GHz.

Un año antes, el investigador Sognan, (2006), desarrolló una antena con una dimensión de 50 x 50 mm que opera a las frecuencias de 1.8, 2, 2.4 y 5.2 GHz. Esta antena puede cambiar la forma de la estructura para cambiar la banda de frecuencias de operación utilizando 38 interruptores MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) como se muestra en la Figura 1. Antena multibanda empleando MEMS (Sognan,2006).

Por otro lado, (Boyler K.R., 2007) desarrolló una antena tipo PIFA utilizando MEMS, la cual opera a 5 frecuencias autorizadas para telefonía descartando las frecuencias mayores a 2.4 GHz. En ese mismo año, (Angus C.K., 2007) desarrollo una antena que opera en las bandas de telefonía móvil (850, 900, DCS, PCS, UMTS) con una dimensión de 42 x 100 mm empleando diodos PIN. Una comparación de ambas antenas se muestra en Figura 2, donde se puede observar que ambas antenas muestran un plano de tierra muy grande.

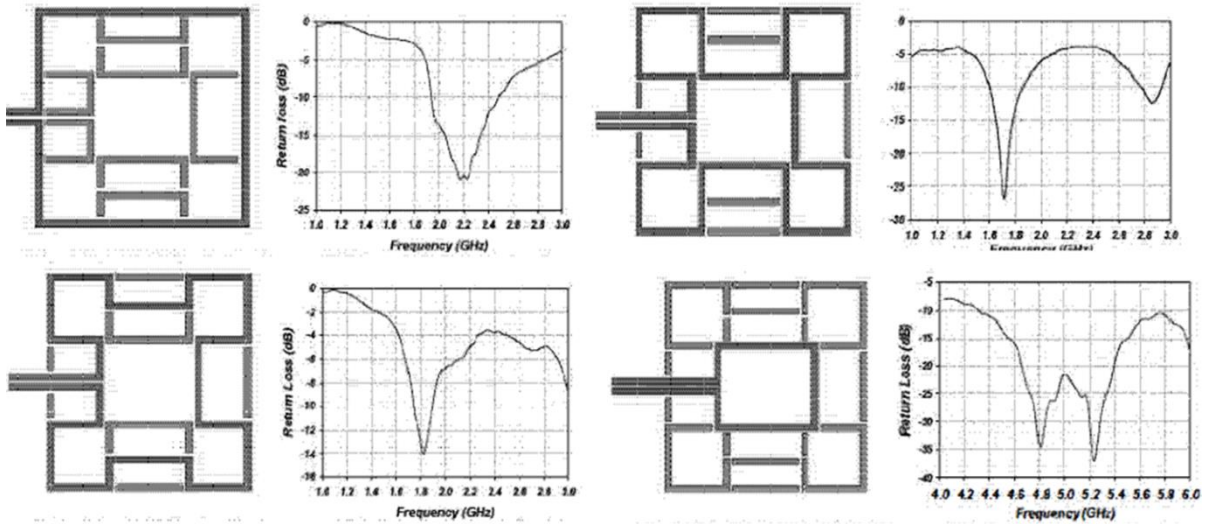


Figura 1. Antena multibanda empleando MEMS (Sognan,2006).

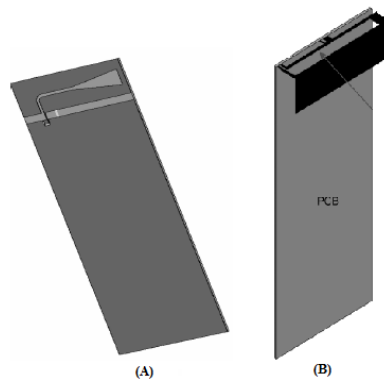


Figura 2. (A) Diseño propuesto en (Angus C. K,2007) y (B) en (Boyley K. R,2007).

En la Figura 3 se muestra tanto la estructura como las dimensiones de la antena desarrollada en la referencia (Angus C.K., 2007). Sin embargo, el problema con las antenas multibanda que operan desde las frecuencias bajas es su tamaño grande, por lo que como una solución, (Chunna Z.,2007) desarrolló una antena anidada que emplea cinco interruptores, la cual opera en la banda de GSM, GPS, DCS, y PCS, con una dimensión de 33x27 mm. El problema con esta antena, es que solo opera en una banda de frecuencias a la vez como se puede apreciar en la

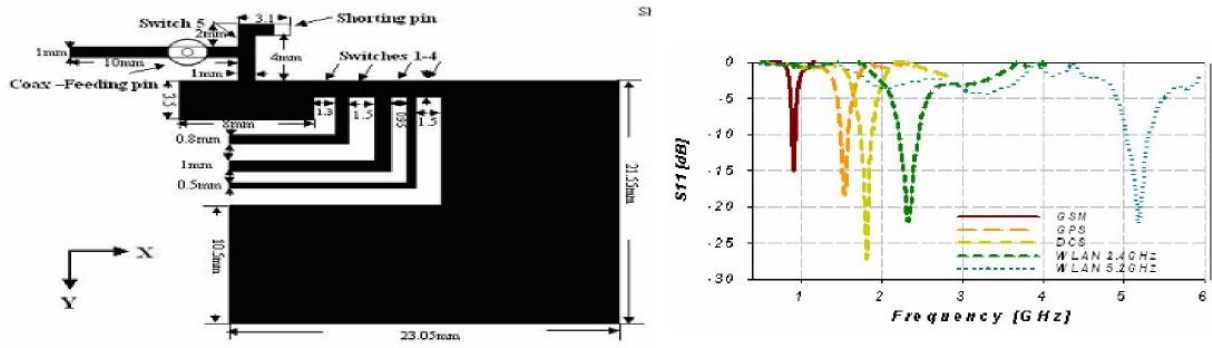


Figura 4.

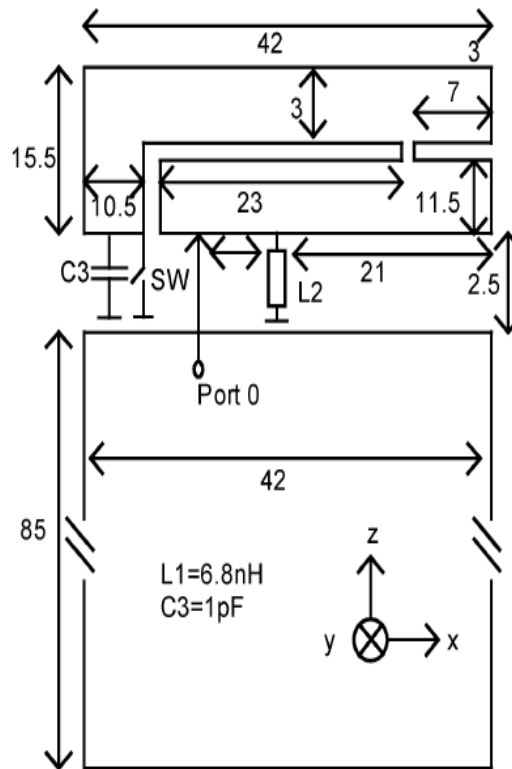


Figura 3. Antena multibanda sobre un mismo plano (Angus, 2007).

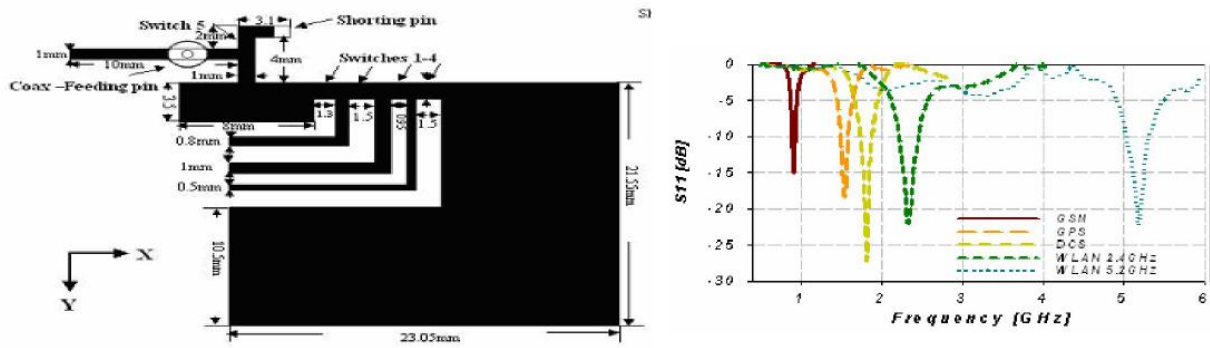


Figura 4. Antena multibanda anidada (Chunna Z., 2007).

Por otro lado, (Songnan Y., 2008) utiliza dos diodos PIN para modificar la estructura de una antena de topología PIFA, ya que al encender o apagar los diodos se cambia de posición el corto de la antena como se puede apreciar en la Figura 5.

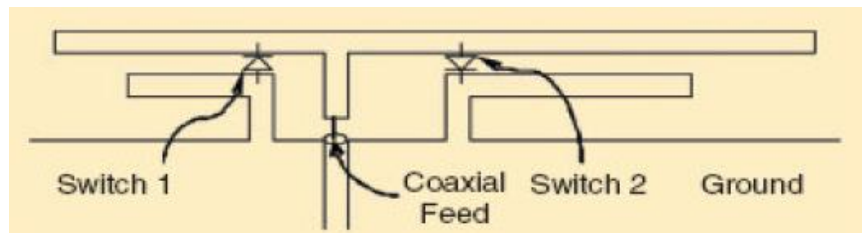


Figura 5. Antena PIFA Multibanda (Sognan Y., 2008).

Otro ejemplo de una antena reconfigurable multibanda, es la antena monopolo propuesta por Chunna Zhang, (2009), la cual opera en las frecuencias de 800 MHz, 900 MHz, y 1.7 GHz. En la Figura 6, se muestra la topología del diseño propuesto la cual utiliza tres interruptores que cambian los elementos de antena.

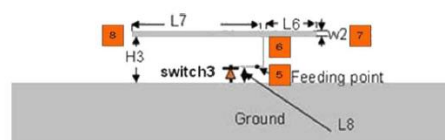
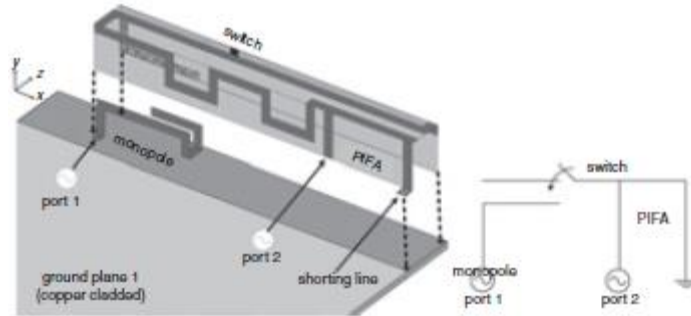


Figura 6. Diseño propuesto por (Zhang C., 2009).

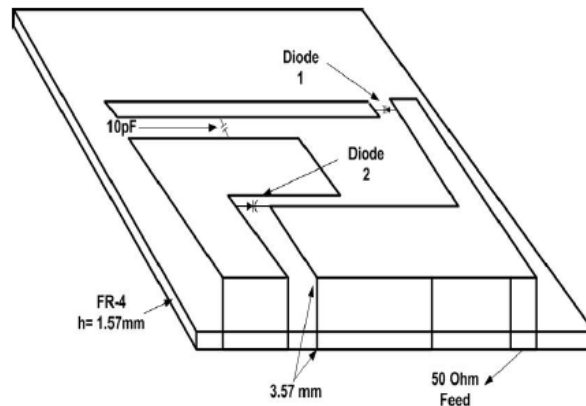
Por otro lado, en la referencia de Cho J., (2009) se propone el desarrollo de dos antenas multibanda mostradas en la Figura 7. La primera antena tiene una estructura PIFA, mientras que la segunda se trata de una antena monopolo. La antena utiliza diferentes fuentes de alimentación pero un mismo plano de tierra, de gran tamaño, y cubre las principales bandas de comunicación inalámbrica. En este trabajo se diseñan

las dos estructuras individualmente y no se realiza la unificación de las antenas para tener un solo puerto. Se utiliza un solo interruptor en la antena PIFA, teniendo además un tamaño demasiado grande que evita sea utilizada en algún dispositivo móvil (Cho J., 2009).



**Figura 7. Doble antena multibanda (Cho j.,2009).**

En ese mismo año, Hattan F., (2009) propone una antena multibanda con dos diodos varactores con los cuales se logra cambiar la banda de frecuencia a la cual operan, principalmente en las bandas de telefónica móvil. La estructura se muestra en la Figura 8.



**Figura 8. Antena multibanda con diodos varactores (Hattan F.,2009).**

En el 2010, (Zhuo W., 2010) desarrolló una antena reconfigurable la cual opera en dos modos: cada modo cubre un rango de frecuencias, logrando funcionar en un total de cinco frecuencias de comunicaciones móviles. Para la reconfiguración de la banda de frecuencias, se propone utilizar MEMS o diodos PIN.

Por otro lado, en la referencia Hattan F., (2011) se propone agrupar dos antenas

utilizando diodos PIN para cubrir las bandas de 5 a 7 GHz. La antena tiene dimensiones de 50 x 50 mm y muestra un tipo de topología diferente, con dos elementos de parche con ranura, que se puede emplear en el diseño de antenas reconfigurables como se muestra en la Figura 9.

Al año siguiente, Hattan F. (2012) propone otro diseño de cuatro antenas agrupadas con la cual se cubren cinco bandas de frecuencia empleadas para telefonía, y tiene una dimensión de 105 x 30 x 9 mm como se muestra en la siguiente Figura 10.

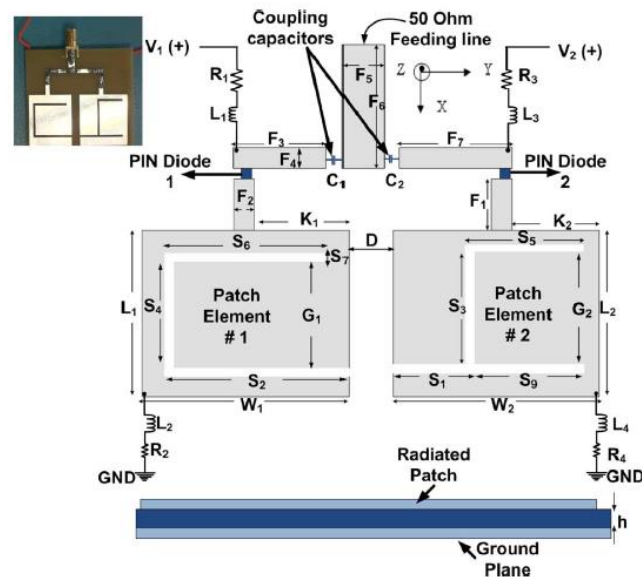


Figura 9. Antena multibanda de dos elementos agrupados (Hattan F., 2011).

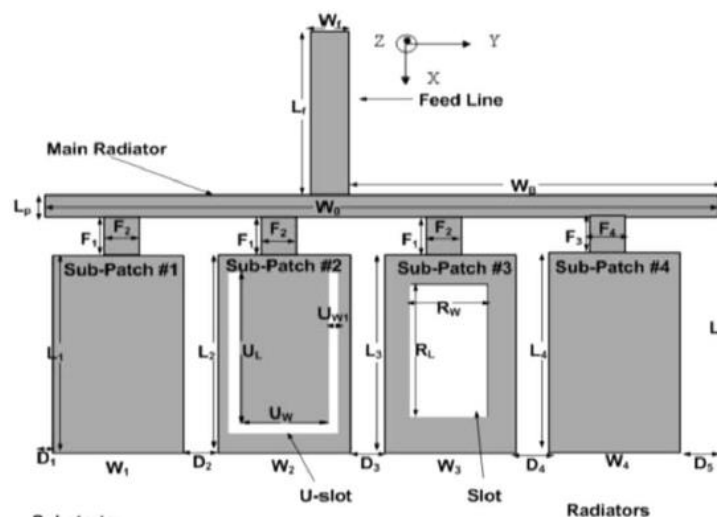
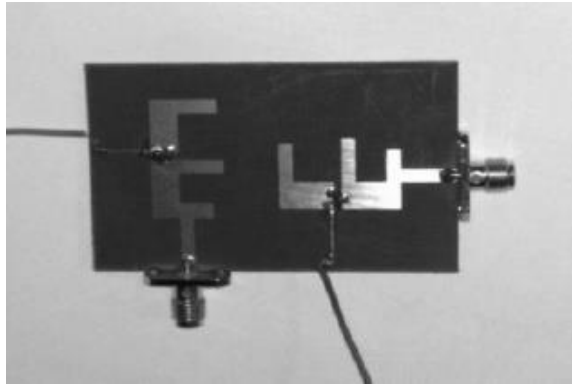


Figura 10. Antena multibanda de cuatro elementos agrupados (Hattan F., 2012).

Por otro lado, Cecep Ginanjar y Achmad Munir, (2011), desarrollaron una antena multibanda que no es reconfigurable, pero que cubre las bandas requeridas para comunicaciones móviles e inalámbricas. (Ginanjar, 2011). Además, en la referencia de Amirhossein Ghasemi, (2012), se diseña una antena multibanda reconfigurable utilizando la topología de una antena tipo PIFA la cual opera a las frecuencias de 2.3 GHz y 3.5 GHz para aplicaciones MIMO la cual se muestra en la Figura 11.



**Figura 11. Diseño propuesto por (Ghasemi A.,2012).**

Por su parte Sung Y., (2012), desarrolló una antena multibanda compacta que cubre las bandas GSM, DCS, PCS y WCDMA utilizando diodos PIN y una antena de estructura tipo PIFA. Por otro lado, Pazin y Leviatan (2013), proponen una antena multibanda cambiando la estructura del plano de tierra, además de emplear diodos varactores para efectuar el cambio de frecuencia dentro del rango de 6-10.6 GHz (Pazin, 2013). Un trabajo adicional es el de Wei Zhuo, (2013), que propone una antena multibanda que cubre la banda de 600MHz a 900 MHz, siendo la primera antena multibanda compacta. Sin embargo, esta antena utiliza 24 diodos PIN, lo que la hace poco eficiente ( Wei Z., 2013).

### **1.3 Objetivos**

El objetivo principal de este trabajo de tesis es el de investigar y proponer un arreglo de antena reconfigurable multibanda de microcinta para dispositivos portátiles.

Dentro de los objetivos particulares se tienen:



- Proponer una estructura compacta reconfigurable adecuada para dispositivos portátiles.
- Diseñar, analizar y optimizar el arreglo de antenas para operación en diferentes bandas de frecuencia, empleando programas para realizar el análisis electromagnético.
- Diseñar el circuito de conmutación de RF y de control de diodos PIN que permita cambiar el rango de frecuencias de operación de la antena.
- Construir y caracterizar la antena incluyendo los interruptores y su circuito de control.

### **1.3 Estructura de la Tesis**

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2, se describen los tipos de antenas que existen de acuerdo a su geometría, así como también los parámetros que se emplean para caracterizar una antena. Se presentan los diferentes tipos de interruptores de RF, se describe el circuito de control y se mencionan los estándares mayormente utilizados para aplicaciones en telefonía móvil. En el capítulo 3 se propone una metodología para efectuar el diseño de una antena reconfigurable multibanda. Además, se presentan los resultados del análisis electromagnético de la antena en donde se proporciona el comportamiento teórico de sus pérdidas por retorno, ganancia y patrón de radiación. En el capítulo 4 se describe la metodología empleada para la construcción de la antena empleando una técnica fotolitográfica. Además, se describe la metodología para caracterizar la antena y los resultados de la medición para obtener el comportamiento experimental de sus pérdidas por retorno, ganancia y patrón de radiación. En el capítulo 5 se realiza el análisis de resultados y se presenta un resumen de los mismos. Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo de tesis y las aportaciones derivadas del desarrollo de este trabajo de tesis. Asimismo, se hacen recomendaciones para trabajos futuros en esta línea de investigación.

## **Capítulo 2. Marco Teórico**

En este capítulo se aborda la teoría fundamental de antenas, presentando los tipos de antenas, en donde se hace énfasis en las antenas de microcinta, además se definen los parámetros que caracterizan a las antenas tales como lo son: el ancho de banda, la impedancia de la antena, ganancia, directividad, ancho del haz, el patrón de radiación y sus lóbulos laterales, entre otros. Por último, se mencionan los estándares de comunicación inalámbrica y las bandas de frecuencia que se utilizan actualmente en los dispositivos móviles.

### **2.1 Definición de Antena**

El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1993). Por lo tanto, la misión de una antena receptora es poder captar en algún punto del espacio la onda radiada, absorber energía de esa onda y entregarla al receptor. Por su parte en Kraus J., (1997) se define como la estructura asociada con la región de transición entre una línea de transmisión o guía de onda y el espacio libre, y viceversa (Kraus J., 1997).

### **2.2 Tipos de Antenas**

Existe una gran variedad de antenas, ya que en la actualidad se pueden construir de diferentes formas, con diversos materiales y para diferentes aplicaciones de acuerdo a la tecnología empleada para su fabricación. En este trabajo de tesis se sigue la clasificación por la forma de la antena.

#### **2.2.1 Antenas de Alambre**

Este tipo de antenas son las más comunes, ya que se encuentran comúnmente en el área automotriz, en construcciones, barcos, aviones, naves espaciales, etc. Entre las diversas formas de este tipo de antenas se encuentran los monopolos, dipolos, antenas de lazo cerrado y de hélice. Las antenas de lazo cerrado, también conocidas como

antenas *loop* son las más utilizadas por la simplicidad de su construcción (Balanis, 2005). En la Figura 12 se muestran ejemplos de antenas las cuales se utilizan principalmente para bajas frecuencias del orden de MHz y que tienen una aplicación en televisores principalmente.

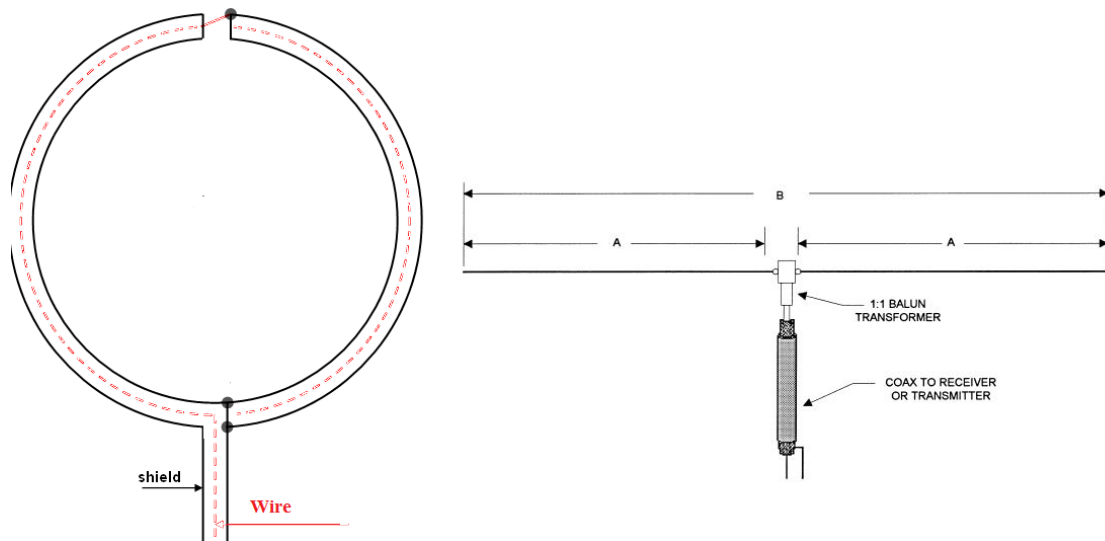


Figura 12. Ejemplo de antenas de alambre: (izquierda) antena Loop, (derecha) antena dipolo.

### 2.2.2 Antenas de Apertura

Este tipo de antenas se han utilizado tanto en los años pasados como en la actualidad sobre todo en las altas frecuencias, así como en aplicaciones aeroespaciales. Entre este grupo principalmente se encuentran antenas con forma piramidal, bocina cónica, y la antena de guía de onda rectangular, siendo esta última mayormente utilizada en las frecuencias de microondas mayores a 1 GHz.

### 2.2.3 Antenas de Microcinta

Estas antenas están constituidas por un parche metálico grabado sobre un material dieléctrico y un plano de tierra por la parte inferior. El parche metálico puede tener muchas configuraciones diferentes, donde la rectangular y la circular son las más populares debido a su análisis y fabricación fácil, así como por el buen comportamiento de sus características de radiación. Las antenas de microcinta son delgadas, se pueden ajustar a superficies planas y no planas, son simples y de bajo costo al ser fabricadas

mediante una tecnología moderna de circuitos impresos que permite una reproducción fácil y rápida. Las antenas de microcinta son robustas mecánicamente cuando se montan en superficies rígidas y son muy versátiles en términos de frecuencia de resonancia, polarización, patrones de radiación e impedancia (Balanis, 2005).

En la Figura 13, se presentan ejemplos de antenas de microcinta, con estructura de parche cuadrada con alimentación por línea de transmisión Figura 13a, y una antena circular con alimentación coaxial Figura 13b.

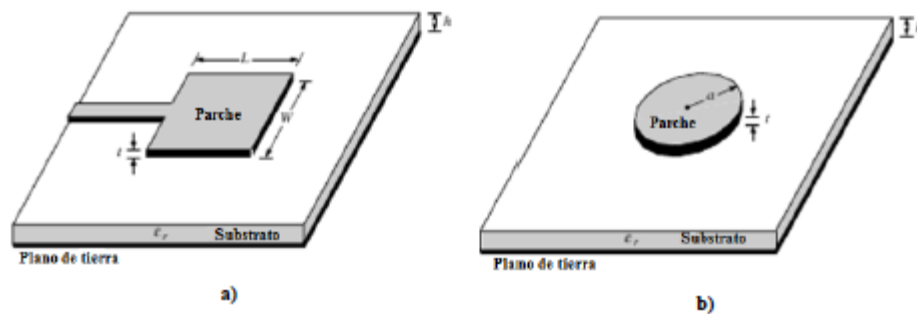


Figura 13. a) Antena rectangular de microcinta y b) Antena circular de microcinta.

#### 2.2.4 Antenas Reflectoras

Debido a la necesidad de comunicarse a largas distancias, se desarrollaron formas más sofisticadas de antenas, siendo las antenas reflectoras parabólicas las más adecuadas para dichas funciones. (Balanis, 2005).

En la Figura 14 se presentan ejemplos de antenas reflectoras, las cuales pueden ser de foco primario, asimétricas, o de foco desplazado. Además existen antenas reflectoras tipo Cassegrain o Gregoriana, ambas con un reflector secundario.

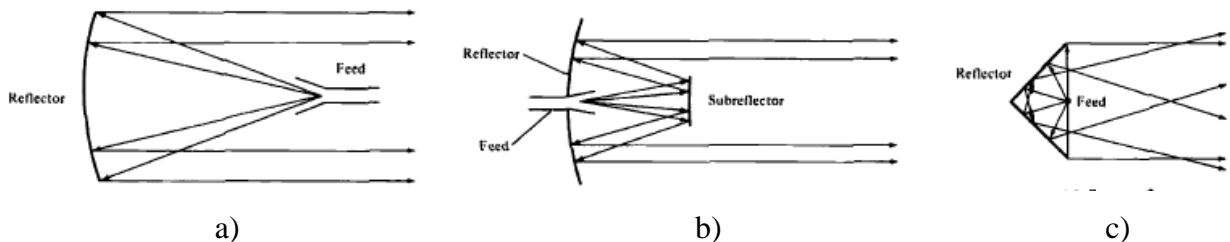


Figura 14. a) Antena reflectora con alimentación frontal. b) Antena reflectora con alimentación Cassegrain c) Antena reflectora plana de 90°.

### **2.2.5 Antenas de Lente**

Este tipo de antenas pueden formar varias formas de energía divergente en ondas planas, cuando se selecciona de manera apropiada el material de los lentes y la forma de los mismos (convexo, cóncavo, o plano) así como de su refracción. (Cardama et al.,1998)

## **2.3 Parámetros de una Antena**

En esta sección se describen los parámetros que caracterizan una antena con el fin de conocer el desempeño de la antena en los sistemas transmisores y receptores.

### **2.3.1 Patrón de Radiación**

El patrón de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las distintas direcciones del espacio. Por lo general se utiliza un sistema de coordenadas esféricas en decibeles. Este diagrama ayuda a conocer las propiedades de la antena, como son la potencia de la densidad de flujo y la intensidad de radiación (Balanis, 2005).

El diagrama de radiación se puede representar en forma tridimensional al utilizar diversas técnicas gráficas, como las curvas de nivel o el dibujo en perspectiva. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de una representación tridimensional de un diagrama de radiación correspondiente a una antena directiva.

El patrón de radiación puede presentar diferentes tipos de lóbulos, dentro de los cuales se caracteriza el lóbulo mayor o principal y los lóbulos menores o laterales y traseros.

Además, se puede conocer el ancho de haz de mediana potencia (HPBW) el cual es la separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia toma la mitad de la potencia con respecto al valor máximo. Es decir 3dB menor al valor máximo. El patrón de radiación puede ser tridimensional o tener cortes en dos planos llamados comúnmente como plano H y plano E.

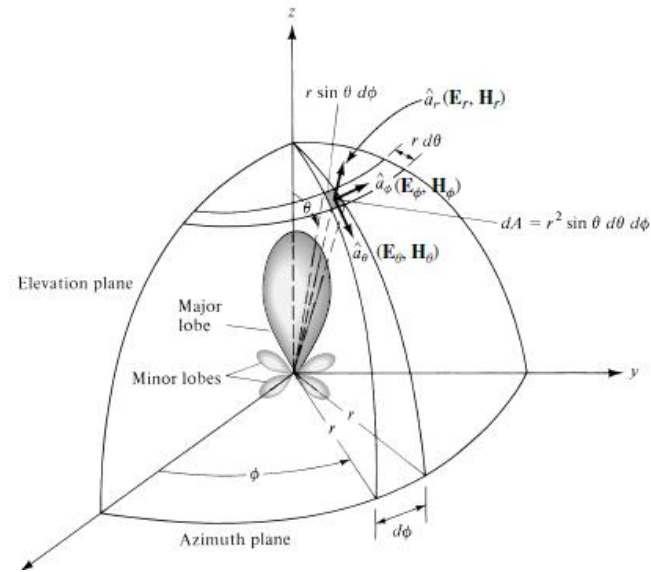


Figura 15. Patrón de radiación tridimensional.

### 2.3.2 Regiones de Campo

Este parámetro permite conocer el comportamiento de los campos alrededor de una antena. Principalmente se dividen en 3 como se muestra en la Figura 16, y se describen enseguida:

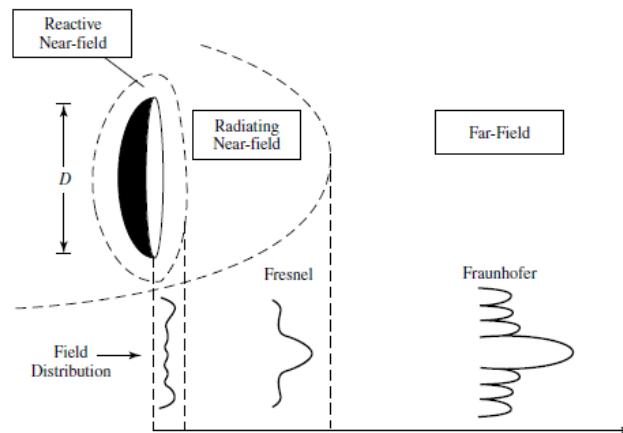


Figura 16. Regiones de campo

#### 1) Región de campo cercano o campo reactivo

Es justo el área alrededor de la antena donde predominan los campos reactivos, y cuyo límite comprende la siguiente relación:

$$R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (1)$$

Donde D es la dimensión máxima de la antena y en esta área los campos eléctricos E y magnéticos H se encuentran fuera de fase.

## 2) Región de campo cercano radiante

También conocida como región de Fresnel, es la región donde predominan los campos radiantes, ya que es donde empiezan a emerger de la antena, dado que está ubicada entre el campo cercano y el campo lejano comprende la relación:

$$0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < R < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2)$$

## 3) Región de campo lejano

Esta es la región más importante, ya que determina el patrón de radiación, esta región también es conocida como zona Fraunhofer y es donde la onda es plana.

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3)$$

### 2.3.3 Directividad

Se trata de una medida del patrón de dirección de una antena. La directividad en una antena no isotrópica, es la relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada de la antena y la intensidad de la radiación promedio de todas las direcciones (Balanis, 2005).

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (4)$$

Si la dirección no se especifica, entonces se toma por defecto la dirección de máxima intensidad de radiación (donde existe una directividad máxima).

$$D_{(\theta,\phi)} = \frac{4\pi \cdot (\text{potencia radiada en una direccion})}{\text{Potencia total radiada}} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (5)$$

### 2.3.4 Ganancia

Un segundo parámetro directamente relacionado con la directividad es la ganancia de la antena. Su definición es semejante, pero la comparación no se establece con la potencia radiada sino con la potencia entregada a la antena, permitiendo tener en cuenta las pérdidas en la antena, debido a que no toda la potencia entregada se radia al espacio. La ganancia es una de las características más utilizadas que describen el

rendimiento de las antenas, y que depende de la eficiencia de la antena y de la dirección de máxima radiación. La ganancia y la directividad están relacionadas por la eficiencia. La ganancia también se puede definir de manera alternativa como: una cantidad que define la habilidad de concentrar energía en una dirección particular. Las unidades de la ganancia son adimensionales pero comúnmente se expresa en decibeles (Cardama A., 2000).

$$Gan = \frac{4\pi U}{P_{ent}} \quad (6)$$

### 2.3.5 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 define un factor de rendimiento de la antena llamado eficiencia  $\eta$ , que se obtiene de la relación de la potencia radiada entre la potencia entregada. (Cardama, 1998).

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad (7)$$

### 2.3.6 Ancho de banda

Todas las antenas están limitadas a operar satisfactoriamente en un margen de frecuencias. Este intervalo de frecuencias se le conoce como ancho de banda.

$$Bw = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_0} \quad (8)$$

Generalmente se utiliza el término VSWR (*Voltaje Standing Wave Ratio*) en relación al ancho de banda.

$$B = \frac{VSWR - 1}{Q\sqrt{VSWR}} \quad (9)$$

También se utilizan las pérdidas por retorno RL en dB (S11dB), las cuales deben ser menores a -10 dB, aunque algunas veces se permite que las RL < -6dB que implica un VSWR < 3.0:1 sobre todo en las bandas de frecuencia bajas. A este factor se le conoce como ancho de banda de impedancia el cual se puede observar en la Figura 17.



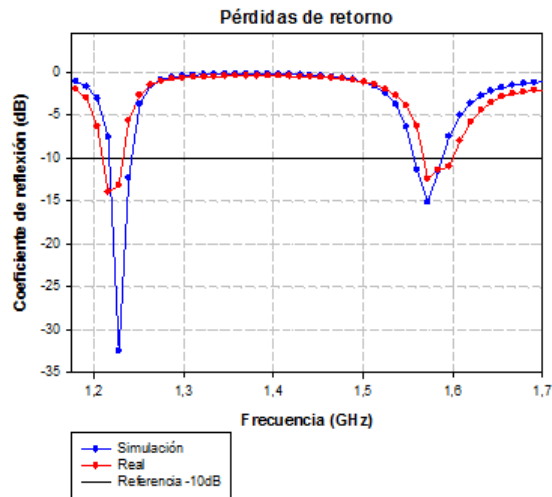


Figura 17. Pérdidas por retorno de una antena.

### 2.3.7 Polarización

La polarización de una antena es una indicación de la orientación del vector de campo en un punto fijo del espacio en función del tiempo. Es la figura geométrica descrita al transcurrir un tiempo del vector de campo eléctrico en un punto fijo del espacio, en el plano perpendicular a la dirección de propagación (Balanis, 2005). Existen tres tipos de polarización: lineal (vertical u horizontal), circular (de mano izquierda lhcp o de mano derecha rhcp) y elíptica como se muestran en la Figura 18.

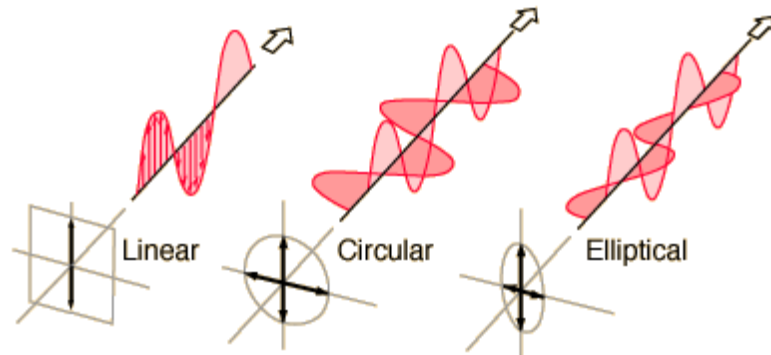
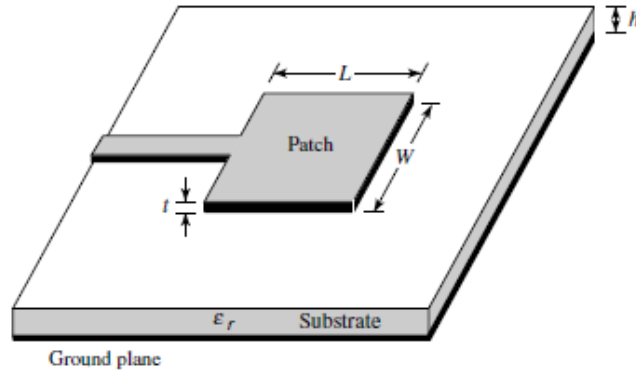


Figura 18. Tipos de polarización de una antena.

## 2.4 Antenas de Microcinta.

En fechas recientes, las antenas de microcinta se han hecho muy populares, debido a las prestaciones y características que presentan con respecto a otro tipo de antenas, como son su tamaño y peso pequeño, bajo costo, alto desempeño y facilidad de

fabricación. En la Figura 19 se puede observar cómo está constituida una antena de microcinta básica, la cual se basa principalmente en una tira metálica muy delgada conectada a un parche radiante grabado sobre un sustrato dieléctrico que se encuentra sobre un plano de tierra.



**Figura 19: Antena de Microcinta.**

Las antenas de microcintas pueden tener desde estructuras sencillas hasta estructuras con varias composiciones de sustratos y parches en paralelo. El parche está constituido por una lámina metálica resonante de forma rectangular, triangular o circular. Las características básicas así como sus limitaciones se listan en la siguiente tabla 3.

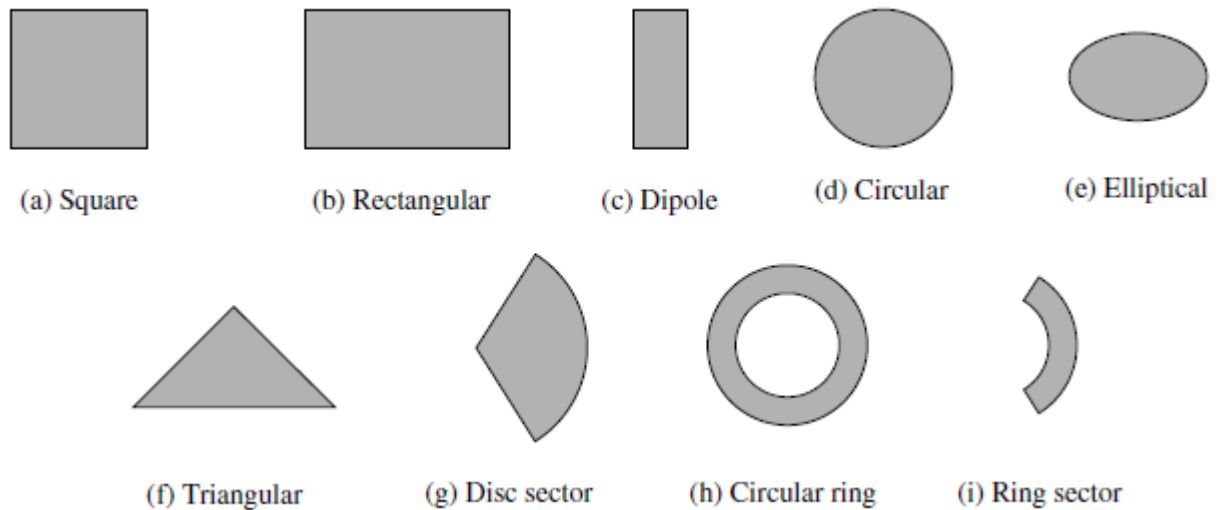
**Tabla 4. Ventajas y desventajas de una antena de microcinta.**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Bajo perfil (peso ligero y volumen reducido)	Alto Q (ancho de banda estrecho)
Bajo costo	Requiere sustratos de calidad con pocas pérdidas
Facilidad de fabricación	Limitación en potencia
Repetitividad	
Versátiles( frecuencia, polarización, simulación)	
Adaptables a superficies curvas	
Múltiples resonancias	

Se pueden utilizar numerosos tipos de sustratos en los diseños, en donde una de las características importantes que caracteriza a los dieléctricos es su constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) comprendida por lo general entre  $1 < \epsilon_r < 12$ .

En el caso de tener circuitos de microondas, es recomendable elegir sustratos más finos (h delgada), con valores de  $\epsilon_r$  mayores para minimizar radiaciones y acoplamientos indeseados, así como para obtener circuitos de menor tamaño, aunque en general presentarán mayores pérdidas, con lo que bajará su eficiencia y en algunos casos su ancho de banda. Tomando esto en consideración habrá que buscar un compromiso entre un funcionamiento óptimo de la antena y el diseño de los circuitos que la acompañen.

Por otro lado, los elementos radiantes se deben construir sobre sustratos con  $\epsilon_r$  menores y h gruesa. Estos pueden ser cuadrados, rectangulares, circulares, elípticos, triangulares o de cualquier otra configuración. Lo más común es elegir diseños con forma cuadrada, rectangular, circular o en forma de tira, ya que son más fáciles de fabricar y sobre todo de analizar. En la Figura 20 se muestran algunos ejemplos comúnmente utilizados.



**Figura 20. Figuras geométricas para el diseño de antenas de microcinta.**

#### 2.4.1 Métodos de Alimentación

La configuración de los métodos para la alimentación de las antenas varía en función de la estructura de esta. En las antenas de microcinta, los principales tipos de

alimentación son el de la línea de transmisión, el coaxial, el de acoplamiento por apertura y el acoplamiento por proximidad, los cuales se podrán apreciar enseguida.

#### 2.4.1.1 Alimentación por Línea de Trasmisión

Se trata de una línea conductora generalmente con un ancho mucho menor que la del parche. Sus principales aspectos positivos son: la facilidad en la fabricación, simplicidad en la unión controlando la posición de inserción y es bastante sencilla de modelar. En la figura 19 se puede observar este tipo de alimentación.

#### 2.4.1.2 Alimentación Coaxial

Otro tipo de alimentación muy utilizado es la alimentación mediante cable coaxial, en la que el conductor interior está unido al parche radiante y el conductor exterior está conectado al plano de tierra. Asimismo, es fácil de fabricar y ensamblar, teniendo un bajo nivel de radiaciones espurias. Sin embargo, este tipo de alimentación tiene un ancho de banda estrecho y es más difícil de modelar. En la Figura 21 se presenta un ejemplo de este tipo de alimentación en un parche circular.

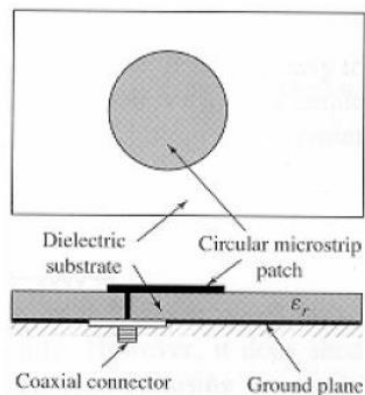
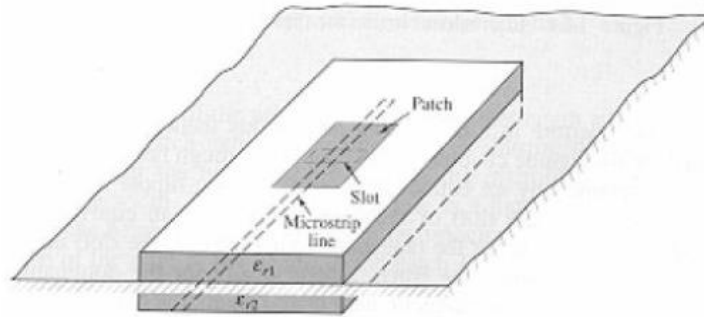


Figura 21 Alimentación coaxial

#### 2.4.1.3 Alimentación por ranura

Este método es más fácil de modelar, y es el que tiene menor número de radiaciones espurias. Consiste en dos sustratos separados por un plano de tierra, como se muestra en la Figura 22. En la superficie inferior del sustrato situado debajo, se graba la línea impresa cuya energía se acopla al parche a través de una ranura que se graba en el plano de tierra que separa a ambos dieléctricos.



**Figura 22. Alimentación por ranura.**

#### **2.4.1.4 Alimentación por Acoplamiento**

Este método se basa en el acoplo de energía de la línea de transmisión utilizada como elemento de alimentación hacia el elemento radiante. Este acoplo se produce directamente a través del sustrato superior, que suele ser delgado, dando lugar a la polarización de la antena.

## **2.5 Antenas Reconfigurables**

Las antenas reconfigurables se pueden clasificar de acuerdo a su polarización, su frecuencia de operación, o su patrón de radiación, ya que son estos parámetros los cuales pueden ser reconfigurables.

En este trabajo de tesis se realiza una investigación a profundidad sobre las antenas reconfigurables en frecuencia, comúnmente llamadas antenas reconfigurables multibanda.

### **2.5.1 Antenas Reconfigurables Multibanda**

Una antena reconfigurable multibanda tiene la capacidad de operar ya sea en una sola banda de frecuencia o varias bandas, dependiendo de sus características eléctricas y físicas reconfigurables.

Para cambiar la frecuencia de resonancia existen diferentes técnicas como la utilización de conmutadores o interruptores de RF que cambian la forma o estructura de la antena, aunque también es posible reconfigurar modificando la ubicación del plano de alimentación o de tierra de la antena. Una antena reconfigurable puede ser una sola antena o una agrupación o arreglo de antenas.

### 2.5.2 Tipos de Antenas Reconfigurables.

Existen tres tipos de antenas reconfigurables en frecuencia que son las mejores candidatas para plataformas inalámbricas multibanda: antenas de parche, antenas de alambre y antenas PIFA (*planar Inverted F antennas*), donde cada una utiliza un mecanismo distinto para lograr la reconfigurabilidad en las frecuencias requeridas.

- Antenas de parche: En este tipo de antenas se colocan ranuras las cuales están diseñadas de tal forma que un interruptor o switch de RF (on/off) colocado en la ranura, desvíe la trayectoria de la señal de RF, ya que se estaría cambiando la longitud de la antena y por lo tanto su frecuencia de operación.
- Antenas de alambre: En las antenas de alambre, la frecuencia de resonancia se define principalmente por su longitud o su perímetro, el cual también puede ser reconfigurable, ya que una antena monopolo tiene su primera resonancia cuando su longitud alcanza un cuarto de longitud de onda (o media longitud de onda), mientras que una antena de lazo resuena a una frecuencia donde su perímetro alcanza aproximadamente una longitud de onda, y por ende, se pueden emplear varios interruptores para cambiar su longitud.
- Antenas PIFA: Este tipo de antena es una variante de las antenas de parche, la diferencia reside en que existe un cortocircuito entre la parte radiante y el plano de tierra, logrando así que la antena trabaje en diferentes bandas de frecuencia. Cuando a esta variante se le cambia la localización del plano de tierra o el punto de alimentación, se puede controlar la frecuencia de resonancia.

Existen diversas alternativas, pero para este trabajo de tesis se decidió utilizar la antena de parche ya que es la que presenta mejor ancho de banda, con respecto a las antenas PIFA, además de ser compatible con los dispositivos móviles, desventaja que tienen las antenas de alambre. En la sección 1.2 anteriormente presentada, se proporcionan diversos ejemplos de antenas reconfigurables multibanda.

### 2.5.3 Interruptores de RF

Los interruptores de RF se emplean para cambiar las longitudes de la antena o para conectar otros elementos de antena, permitiendo controlar la frecuencia de resonancia.

Existen interruptores del tipo mecánico e interruptores basados en semiconductores. Las consideraciones que se deben de tomar en cuenta para la selección de un interruptor de RF son:

- Impedancia característica ( VSWR, pérdidas por retorno)
- Ancho de banda ( algunos funcionan como filtros)
- Topología ( N/A ,N/C)
- Pérdidas por inserción y aislamiento.
- Velocidad de conmutación.
- Tiempo de vida
- Consumo de potencia.
- Costo
- Tamaño
- Frecuencias de operación.

En la Figura 23 se puede observar cómo se conectan los interruptores de RF en un arreglo de antenas de parche, en donde algunos interruptores están encendidos y otros apagados.

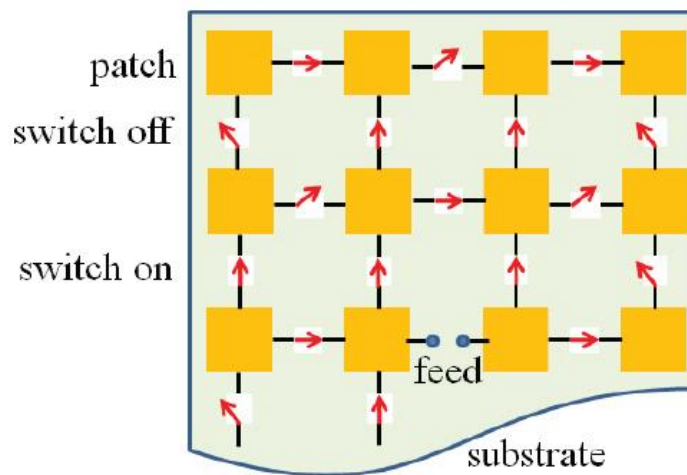


Figura 23. Conexión de interruptores de RF en un arreglo de antena de parches.

### 2.5.3.1 Interruptores de semiconductor

Existen diferentes tipos de interruptores de RF de semiconductor, dentro de los cuales se encuentran los transistores FET (*Field Effect Transistor*) que pueden funcionar como

interruptores, ya que al incrementar el voltaje en la compuerta se incrementa la conductividad en el canal entre la fuente y drenador. Los FET vienen en diferentes variantes, como por ejemplo los MESFET (*Metal-Semiconductor Field Effect Transistor*) y los PHEMT (*Pseudomorphic High-Electron-Mobility Transistor*). En la tabla 4 se comparan las características de los interruptores de RF.

**Tabla 5. Comparación entre interruptores semiconductores de RF.**

	MESFET	PHEMT	Diodo PIN
<b>Numero de terminales</b>	3	3	2
<b>Resistencia típica</b>	1.5 ohms	1.2 ohms	1.7 ohms.
<b>Capacitancia típica(off)</b>	0.4 pF	0.32pF	0.05 pF
<b>Fc (ec. 10)</b>	265 GHz	414 GHz	1872GHz
<b>Complejidad del driver</b>	Baja	Baja	Alta
<b>Requerimientos del driver</b>	0v on; -5V off	+0.5V on; -5V off	5 a 10 mA; 1.5V on; 0v off

Por lo general se utiliza la figura de mérito (FOM) para conocer la frecuencia de corte  $F_c$  de los interruptores de semiconductor la cual se da por.

$$F_c = \frac{1}{2\pi C_{off} R_{on}} \quad (10)$$

Para lograr una operación en altas frecuencias los valores de la resistencia  $R_{on}$  y la capacitancia  $C_{off}$  deben ser pequeños. En la tabla 5 se presentan las ventajas y desventajas de los transistores FET.

Por otro lado, los diodos PIN son muy populares como interruptores de RF, los cuales están formados por dos regiones tipos P y N altamente dopadas. En la tabla 6 se presentan las ventajas y desventajas de los diodos PIN.



Tabla 6. Ventajas y desventajas de los transistores FET.

Ventajas	Desventajas
Bajas pérdidas por inserción	Mayores pérdidas que un diodo PIN
Son controlados por voltaje	Necesitan parámetros S para ser modelados
Son de bajo costo	
No requieren circuito de polarización.	

Tabla 7. Ventajas y desventajas de los diodos PIN.

Ventaja	Desventaja
Encapsulados pequeños	Requiere circuito de polarización complejo
Bajas pérdidas por inserción	
Soporta muy altas frecuencias	
Opera con voltajes bajos	
Bajo costo	

### 2.5.3.2 Interruptores MEMS

Los MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*), son interruptores electro mecánicos que se caracterizan por su tamaño y funcionalidad. Los MEMS en general varían en tamaño desde un micrómetro a un milímetro. Se ha reportado que estos pueden operar hasta 9000GHz (Goldsmith, 1998). Los MEMS como interruptores presentan bajo consumo de potencia, bajas pérdidas por inserción y un alto aislamiento. En la tabla 7 se presentan las ventajas y desventajas de los MEMS.

Tabla 8. Ventajas y desventajas de los MEMS

Ventajas	Desventajas
Muy bajas pérdidas	Difíciles de fabricar
Bajo consumo de potencia	Costosos
No requieren circuito de polarización	Algunos necesitan niveles altos de voltaje.

## 2.6 Estándares de comunicación para dispositivos portátiles

En la actualidad existe una gran gama de estándares de comunicación para dispositivos móviles. Dentro de los estándares de comunicación están los de aplicación y los de

telefonía. En la siguiente tabla se presentan los estándares de comunicación mayormente utilizados a nivel mundial, donde se encuentran las bandas GSM, UMTS, WiFi y LTE principalmente.

**Tabla 9: Estándares de comunicación mayormente utilizados a nivel mundial.**

Estándar	Frecuencias de operación(GHz)	Ancho de banda (MHz)
LTE Banda 10,12, 17	0.698- 0.768	70
GSM850	0.824 -0 .894	70
GSM900	0.8902 – 0.9598	69.6
LTE Banda 4	1.710 – 1.755	45
GSM1800	1.7102-1.8798	169.6
GSM1900	1.850 -1.990	140
UMTS 2100	1.92 - 2.17	250
WIFI 802.11 b/g/n	2.412 – 2.484	72
LTE Banda 7,38,40,41	2.3– 2.69	70

### 2.6.1 Estándares de telefonía móvil

La Comisión Federal de Comunicaciones (*Federal Communication Commission*) es una agencia estatal independiente de Estados Unidos, bajo responsabilidad directa del Congreso. La FCC fue creada en 1934 con la Ley de Comunicaciones y es la encargada de la regulación (incluyendo la censura) de las telecomunicaciones interestatales e internacionales por radio, televisión, redes inalámbricas, teléfonos, satélite y cable. La FCC otorga licencias a las estaciones transmisoras de radio y televisión, asigna frecuencias de radio y vela por el cumplimiento de las reglas creadas para garantizar que las tarifas de los servicios por cable sean razonables. A

continuación se presentan las generaciones de estándares de comunicación que se siguen utilizando a la fecha.

### **2.6.1.1 Telefonía 2G**

Se conoce como telefonía móvil 2G a la segunda generación de telefonía móvil. La telefonía móvil 2G no es un estándar o un protocolo sino que es una forma de marcar el cambio de protocolos de telefonía móvil analógica a digital. Los protocolos de telefonía 2G son los siguientes:

- GSM (*Global System for Mobile Communications*)
- Cellular PCS/IS-136, conocido como TDMA (conocido también como TIA/EIA136 o ANSI-136) Sistema regulado por la *Telecommunications Industry Association* o TIA
- IS-95/cdmaONE, conocido como CDMA (*Code Division Multiple Access*)
- D-AMPS (*Digital Advanced Mobile Phone System*)
- PHS (*Personal Handyphone System*) Sistema utilizado en un principio en Japón por la compañía NTT DoCoMo, con la finalidad de tener un estándar enfocado más a la transferencia de datos que el resto de los estándares 2G.

### **2.6.1.2 Telefonía 3G**

La telefonía 3G es la abreviación de la tercera generación para transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil mediante UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System* o Servicio Universal de Telecomunicaciones Móviles).

Los servicios asociados con la tercera generación, proporcionan la posibilidad de transferir tanto voz como datos (una llamada telefónica o una video llamada) y datos solamente (como la descarga de programas, intercambio de correos electrónicos, y mensajería instantánea).

### **2.6.1.3 Telefonía 4G**

En las telecomunicaciones 4G se refiere a la cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil. La 4G está basada completamente en el protocolo IP, siendo un sistema y una red, que se alcanza gracias a la convergencia entre las redes alámbricas (de cables) con las inalámbricas. Esta tecnología puede emplearse por módems

inalámbricos, móviles inteligentes y otros dispositivos móviles. La principal diferencia con las generaciones predecesoras es la capacidad para proveer velocidades de acceso mayores de 100 Mbit/s en movimiento y 1 Gbit/s en reposo, manteniendo una calidad de servicio (QoS) de alta seguridad que permite ofrecer servicios de cualquier clase en cualquier momento, en cualquier lugar y con el mínimo costo posible.

### **2.6.2 Estándares de comunicaciones de corto alcance**

Dentro de los estándares de comunicaciones de corto alcance se tiene el WiFi (*Wireless Fidelity*). Que también se le denomina WLAN ("*Wireless Local Area Network*") ó Redes de Área Local Inalámbrica. Se trata de una tecnología de transmisión inalámbrica por medio de ondas de radio con muy buena calidad de emisión para distancias cortas (hasta teóricamente 100 metros). Este tipo de transmisión se encuentra estandarizado por la IEEE (Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica), la cual es una organización internacional que define las reglas de operación de ciertas tecnologías.

BlueTooth significa literalmente diente azul, debido al nombre de un rey de la antigüedad. Se trata de una tecnología de transmisión inalámbrica por medio de ondas de radio de corto alcance (de 1, 20 y hasta 100 m a la redonda dependiendo la versión). Las ondas pueden incluso ser capaces de cruzar cierto tipo de materiales, incluyendo muros.

## Capítulo 3 Metodología de diseño

En este capítulo, se presenta la metodología de diseño propuesta para diseñar la antena objeto de este trabajo de tesis. Se describe paso a paso el proceso de diseño de la antena de microcinta, en donde se presenta el diseño de cada elemento radiante y la sintonización entre las antenas, debido al acoplamiento entre ellas. Además, se describe el proceso de diseño y análisis de un filtro pasa bajas empleado para alimentar a los diodos PIN, así como sus circuitos de polarización y los resultados del análisis electromagnético de la antena y sus circuitos utilizando el software CST.

### 3.1 Propuesta de Diseño de la Antena Multibanda

Como se mencionó en el capítulo 2, existen diferentes tipos de topologías adecuadas para el diseño de antenas multibanda. Debido a que la utilización de una antena de parche presenta mayores ventajas sobre las PIFA, como se describió anteriormente, se propone utilizar esta topología para desarrollar la antena objeto de este trabajo de tesis. Una de las características más notorias entre las antenas de parche y las PIFA es el ancho de banda dado en la ecuación (8), ya que las antenas PIFA tienen la ventaja de lograr frecuencias menores con tamaños de elementos de antena más pequeños, pero tienen la desventaja de proporcionar un ancho de banda estrecho.

En la tabla 9 se muestran los anchos de banda que se deben satisfacer de acuerdo a los estándares de comunicaciones mayormente utilizados a nivel mundial. Debido al gran número de estándares que se requiere cubrir, se busca que los elementos radiantes proporcionen un buen ancho de banda para cubrir el rango de frecuencias que comprende desde 0.698 GHz y hasta 5.8 GHz.

Dada la tabla 9, Se puede apreciar que la estructura de la antena debe de cubrir un gran rango de frecuencias, para lo cual se busca agrupar las frecuencias de tal modo que un solo elemento radiante cubra a la vez varias frecuencias como se muestra en la figura 24.

Tabla 10 . Estándares de comunicación y sus anchos de banda

Estándar	Frecuencias de operación(GHz)	Ancho de banda (MHz)
LTE Banda 10,12, 17	0.698- 0.768	70
GSM850	0.824 -0 .894	70
GSM900	0.8902 – 0.9598	69.6
LTE Banda 4	1.710 – 1.755	45
GSM1800	1.7102-1.8798	169.6
GSM1900	1.850 -1.990	140
UMTS 2100	1.92 - 2.17	250
WIFI 802.11 b/g/n	2.412 – 2.484	72
LTE Banda 7,38,40,41	2.3– 2.69	70

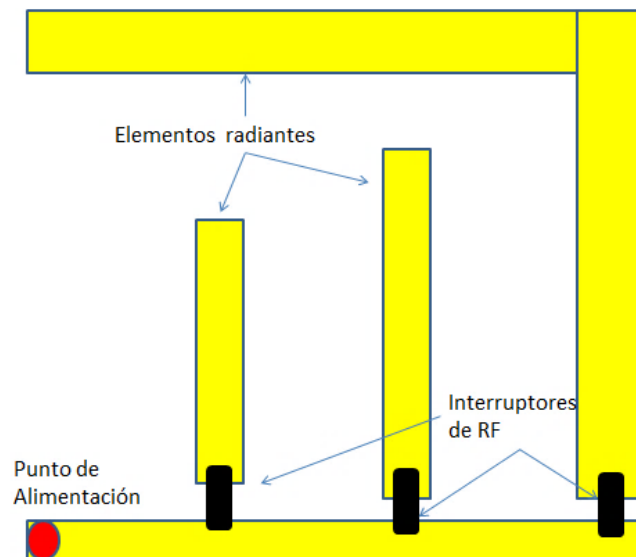
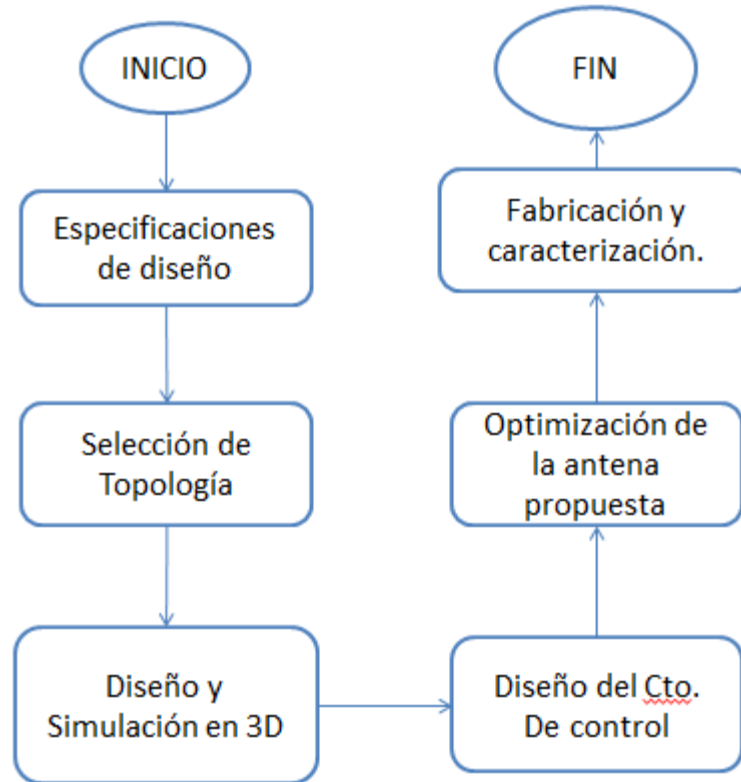


Figura 24 Estructura de la antena propuesta.

Como se puede apreciar en la figura 24, se propone colocar un grupo de antenas con diferentes longitudes, las cuales deben resonar dentro de los rangos de frecuencias deseados. Para controlar la estructura de la antena se utilizaran interruptores de RF para cambiar la longitud de la antena.

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

Para una mejor comprensión, en el siguiente diagrama se presentan los pasos a seguir para el diseño de la antena.



**Figura 25. Diagrama de flujo para el diseño de la antena propuesta.**

Como se puede apreciar en la figura 25, en primer lugar se establecen las reglas de diseño. Es decir, las frecuencias de operación, los anchos de banda que se desean cubrir, agrupando en grupos los rangos de frecuencia y las características físicas (tamaño) y eléctricas que se deben satisfacer ( $S_{11} < -10\text{dB}$ ,  $G > 0\text{dBi}$ , patrón omnidireccional, tipo de polarización, etc). Posteriormente se elige el tipo de topología a implementar, donde se establecen las dimensiones máximas que deberá tener la antena, el número de elementos de antena, el substrato que se utilizará para construir la antena, el tipo de interruptor de RF que se empleará, así como el tipo de alimentación que se utilizará. Posteriormente se realiza el análisis electromagnético de la antena propuesta y se realiza la primera optimización para acoplar las antenas y cumplir con las características eléctricas requeridas. Posteriormente se diseña el circuito de alimentación y control para el encendido y apagado de los interruptores de RF. Una vez

que se ha diseñado todo el sistema de control incluyendo el circuito de alimentación, se incorpora a las antenas para realizar el análisis electromagnético del circuito completo, y si es necesario se optimiza y sintoniza la antena, ya que su respuesta se modifica debido a los efectos parásitos que pueden ser provocados al agregar los circuitos de alimentación a la antena propuesta. Finalmente, la antena diseñada y optimizada se construye y se caracteriza experimentalmente para determinar si satisface las características eléctricas requeridas.

### 3.3 Establecimiento de las Especificaciones de Diseño

De acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la figura 25, se deben de establecer los criterios que debe cumplir la antena propuesta. La antena debe tener la característica de poder operar en las diferentes bandas de frecuencia proporcionadas en la tabla 9.

- Ancho de banda: Como se muestra en la tabla 9, se debe de cumplir los anchos de banda requeridos para cada estándar de comunicación, definiendo dos bandas de operación: Banda 1: (0.68GHz – 0.96GHz) y Banda 2: (1.71GHz a 2.69GHz).
- Impedancia: estándar de 50  $\Omega$ .
- Pérdidas por retorno: de acuerdo a los antecedentes mostrados en la sección 1, para las frecuencias de 0.68 GHz a 0.96 GHz,  $S_{11} < -6$  dB, y para las frecuencias de 1.71GHz a 2.69GHz,  $S_{11} < -10$  dB.
- Ganancia: mayor a 0dBi
- Polarización: Lineal
- Tamaño compacto con la finalidad de incorporarse a un dispositivo móvil.

### 3.4 Selección de Substratos

Debido a que la antena contará con una etapa de circuitería para el circuito de alimentación y control de los interruptores de RF, se propone utilizar dos diferentes sustratos empalmados como se muestra en la figura 26.

El sustrato 1 se emplea para construir el arreglo de antenas de microcinta (estructura radiante) y deberá tener un dieléctrico con espesor  $h$  grande, así como una constante



dieléctrica  $\epsilon_r$  baja. El sustrato 2 se emplea para construir el circuito de alimentación o de polarización de los diodos PIN, el cual deberá tener un espesor  $h$  delgado y una constante dieléctrica  $\epsilon_r$  alta con el fin de reducir las dimensiones físicas del circuito.



Figura 26. Vista transversal de los substratos de la antena propuesta.

El espesor  $h$  grande del sustrato 1, permite mejorar las características de radiación, su ganancia y el ancho de banda del agrupamiento de antenas. Mientras que el sustrato 2, con espesor  $h$  delgado, permite disminuir el tamaño de los componentes de polarización y circuitería si se utilizan elementos distribuidos. En este trabajo de tesis, se propone utilizar como sustrato 1 el material FR4 con espesor  $h=1.57\text{mm}$ , y para el sustrato 2, se utilizara también el material FR4 con  $h=0.7874\text{mm}$ , ambos con una constante dieléctrica relativa  $\epsilon_r= 4.08$ , una conductividad  $\sigma=5.8e7$  siemens/m, y un factor de disipación o de pérdidas tangenciales  $\tan \delta=0.018$ .

### 3.5 Diseño del agrupamiento de antenas

Siguiendo la metodología propuesta, ya con las especificaciones establecidas y con el sustrato seleccionado, el siguiente paso es diseñar los elementos radiantes para cada frecuencia de operación, para determinar posteriormente la separación entre cada elemento y realizar una agrupación de las frecuencias de resonancia.

### 3.5.1 Diseño de Elementos Radiantes Para Cada Frecuencia

Cada elemento radiante a diseñar, debe de resonar a una determinada frecuencia. Por lo que existe una relación entre las dimensiones de cada elemento y su frecuencia de resonancia, además de la influencia que existe por el espesor del dieléctrico y su constante dieléctrica como se aprecia en la figura 19. En este trabajo de tesis, se utiliza el método de línea de transmisión (Bahl,1980), cuyas ecuaciones de diseño se describen a continuación:

$$W = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (11)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{\frac{W}{h}}\right)^{-ab} \quad (12)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left( \frac{\left(\frac{W}{h}\right)^4 + \left(\frac{W}{52h}\right)^2}{\left(\frac{W}{h}\right)^4 + 0.432} \right) + \frac{1}{18.7} \ln \left( 1 + \left(\frac{W}{18.1}\right)^3 \right) \quad (13)$$

$$b = 0.564 \left( \frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (14)$$

$$\Delta l = 0.41h \left( \frac{\epsilon_r + 0.3}{\epsilon_r - 0.258} \right) \left( \frac{\left(\frac{W}{h}\right) + 0.264}{\left(\frac{W}{h}\right) + 0.813} \right) \quad (15)$$

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta l \quad (16)$$

donde: W=Ancho del parche (m), L=Longitud del parche (m),  $\epsilon_r$  =Constante dieléctrica relativa, h=Altura del substrato (m), c=Velocidad de la luz (m/s),  $f_r$  =frecuencia de resonancia (Hz),  $\epsilon_{reff}$ = constante dieléctrica efectiva,  $\Delta l$ = longitud del extremo abierto.

Debido a que la estructura de la antena propuesta, consiste de un agrupamiento de elementos radiantes, se debe calcular la longitud que debe de tener cada elemento radiante (L) para cubrir los diferentes rangos de frecuencia, utilizando la ecuación 16.

Para calcular las longitudes físicas en milímetros de cada elemento de antena, se escribe el siguiente código en MATLAB.

```
%programa para diseñar antenas de microcinta
%Lopez Hernandez Armando

clc
C=3e11; %velocidad de la luz mm/s
Er=4.08; %cte Dielectrica del sustrato(FR-4)
Fc=859e6; %frecuencia de resonancia buscada
Ereff=(Er+1)/2; %Aproximación de la Eeff promedio
%calculo para Lamda/2 (resultados en mm)
Long_Lamd_2_min=C/(2*Fc*sqrt(Ereff))
Long_Lamd_2_Max=C/(2*Fc*sqrt(Er))
%calculo para Lamda/4
Long_Lamd_4_min=C/(4*Fc*sqrt(Ereff))
Long_Lamd_4_Max=C/(4*Fc*sqrt(Er))
```

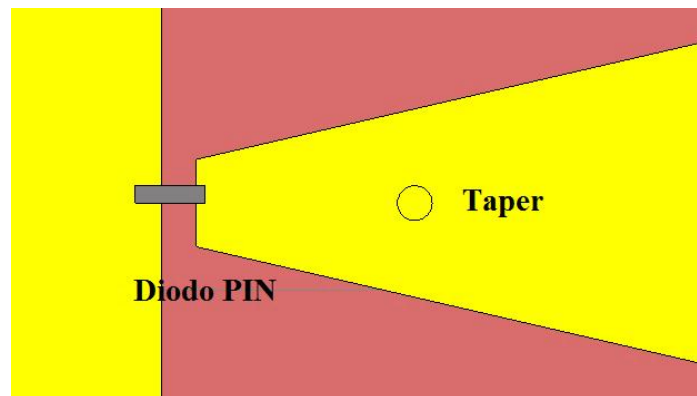
Donde se calculan las longitudes mínimas y máximas de los elementos de antena, con un cuarto y un medio de la longitud de onda, obteniendo finalmente las dimensiones para cada frecuencia dadas en la tabla 10.

**Tabla 38. Longitudes de cada elemento de antena para cada frecuencia.**

Estándar	Frecuencias de operación(GHz)	Cálculo de dimensión para $\lambda/2$ (mm)	Calculo de dimensión para $\lambda/4$ (mm)
LTE Banda 10,12, 17	0.698- 0.768	98.75	49.37
GSM850	0.824 -0 .894	86.45	43.22
GSM900	0.8902 – 0.9598	80.28	40.14
LTE Banda 4	1.710 – 1.755	42.86	21.43
GSM1800	1.7102-1.8798	41.37	20.68
GSM1900	1.850 -1.990	38.67	19.33
UMTS 2100	1.92 - 2.17	36.31	18.15
WIFI 802.11 b/g/n	2.412 – 2.484	30.33	15.16
LTE Banda 7,38,40,41	2.3– 2.69	29.29	14.64

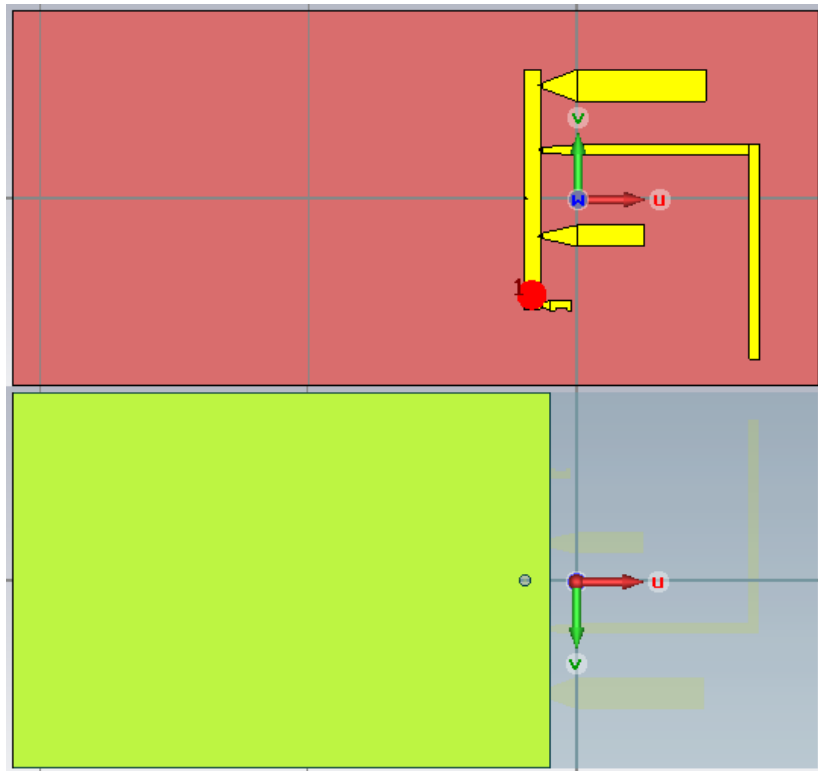
El siguiente paso en el proceso de diseño, es realizar el análisis electromagnético del comportamiento que tendría cada elemento radiante. Para ello, se utiliza el software CST (Computer Simulation Technology) basado en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo. Debido a que se deben cubrir 9 bandas de frecuencias, se debe buscar la manera de agrupar las frecuencias de resonancias con el fin de utilizar el menor número de elementos radiantes, que a su vez permitirá reducir el tamaño de la antena. Empleando el software CST se realiza el análisis electromagnético en 3D del comportamiento de la antena. Para ello se selecciona el tipo de sustrato, se introducen sus dimensiones y características y una vez que se tiene el sustrato dibujado, se colocan los elementos radiantes con las longitudes calculadas anteriormente.

Para evitar los cambios abruptos entre los elementos radiantes, se utilizaron elementos tipo *taper*, los cuales son elementos distribuidos que evitan efectos parásitos entre elementos de diferentes tamaños. En la figura 27 se puede observar el tipo de *taper* utilizado en el diseño de los elementos de antena.



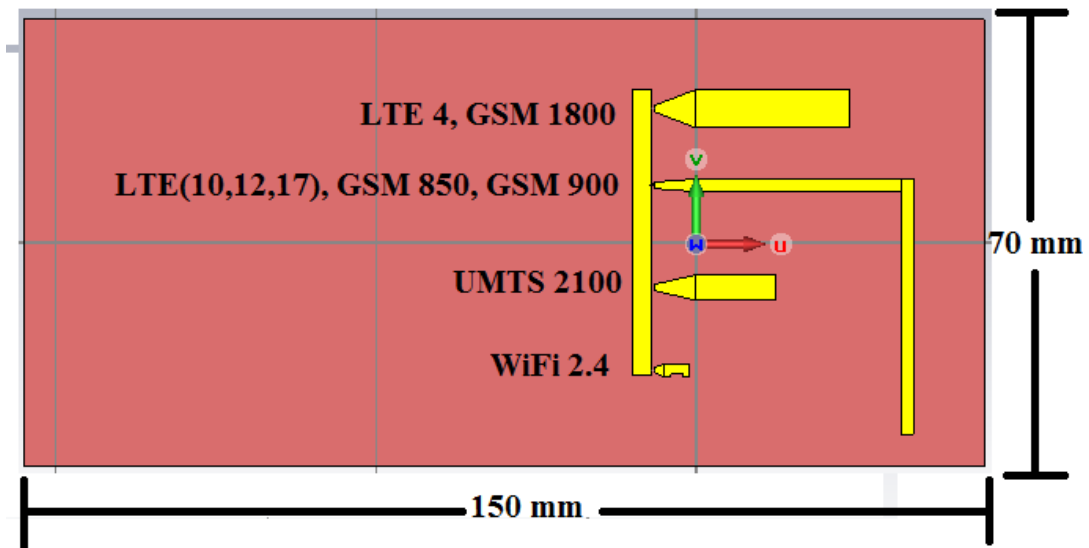
**Figura 27. Tipo de Taper utilizado en los elementos radiantes.**

En la estructura de antena propuesta, en el lado superior del sustrato se encuentran los elementos radiantes, mientras que el plano de tierra es parcial, de modo que solo cubre una parte del sustrato como se muestra en la figura 28.



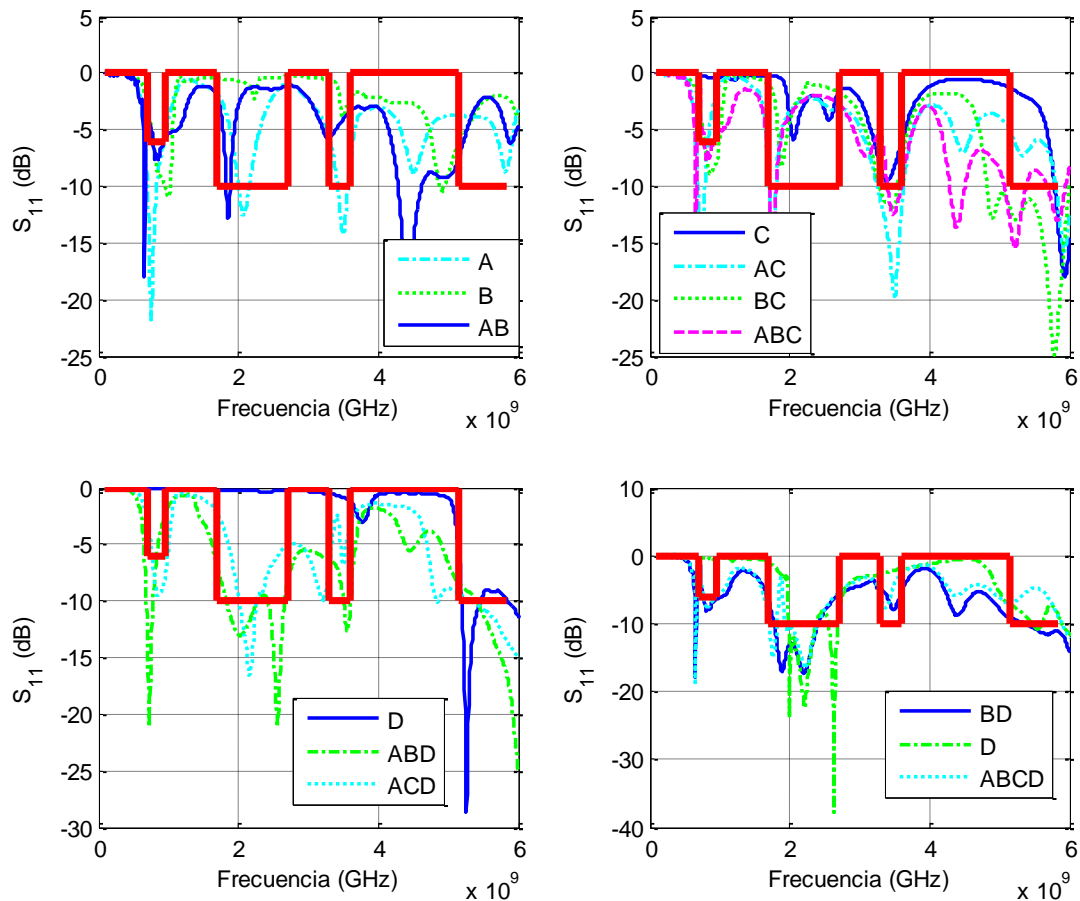
**Figura 28. Vista superior e inferior de la antena propuesta sin optimizar.**

Al hacer el análisis electromagnético, se observó que algunas frecuencias tienen un ancho de banda grande, razón por lo cual se pueden agrupar un par de frecuencias para un mismo resonador resultando la primera propuesta A dada en la figura 29.



**Figura 29. Antena propuesta A**

Debido a que se tienen 4 elementos radiantes, se deben utilizar 4 interruptores de RF, lo cual daría un total de 16 posibles combinaciones. En la figura 30 se muestran las pérdidas por retorno ( $S_{11}$  dB) obtenidas del análisis electromagnético de la antena A.



**Figura 30. Parámetros  $S_{11}$  de la antena propuesta A.**

En la figura 30, se puede observar una línea gruesa que denota la respuesta que se busca, llegando a la conclusión que la antena A propuesta cumple con las bandas de frecuencia que se requieren. Además, se puede apreciar que no se graficaron todas las combinaciones, porque estas generan frecuencias de resonancia que no cubren ninguno de los estándares de comunicación requeridos, por lo que algunas combinaciones no son necesarias y se pueden descartar. Cabe mencionar que esta estructura cumple además el estándar WiFi 802.11a que opera en las bandas de 5.2 y 5.8GHz.

### 3.5.2 Optimización de la antena propuesta

Dado que se busca que la antena se utilice para dispositivos móviles, el siguiente paso es optimizar el diseño, lo cual se logra variando el ancho de los parches y buscando un compromiso entre tamaño y ancho de banda. En la actualidad, algunos dispositivos

móviles como el iPhone Plus 6 tienen dimensiones de 77.8 mm x 158.1 mm, y el Galaxy S5 con dimensiones de 72 mm x 146 mm por lo que se busca diseñar una antena con dimensiones inferiores o iguales a estas.

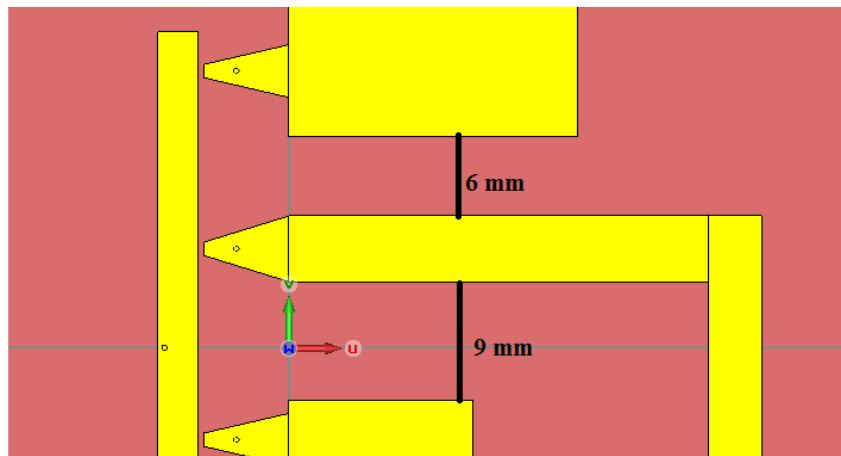
Dentro de CST, las dimensiones físicas de los elementos pueden ser asignadas a letras y con esto se puede dar un margen a esa letra para estudiar el comportamiento de ese elemento de la antena, y de esa forma ir optimizando la antena como se muestra en la siguiente figura 31.

Name	Value	Description	Type
H	1.57		Length
HFull	$-(mt*3)+H+0.785$		None
L	60		Length
Mt	0.03556		Length

**Figura 31. Lista de algunos parámetros de los elementos de antena.**

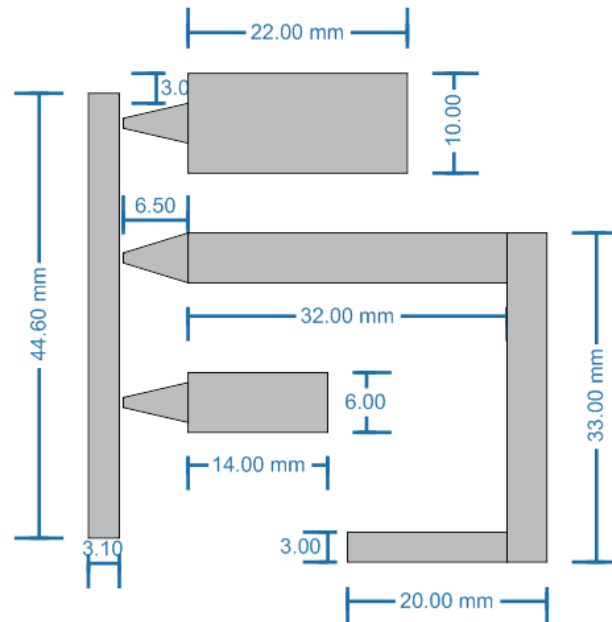
Una vez nombrada cada variable, se puede dar un rango de valores a esa variable y estudiar su comportamiento. Una desventaja de hacer esto es que el proceso es muy lento, que se acentúa cuando la dimensión de la antena o la frecuencia máxima de análisis se incrementan. Con el propósito de reducir aún más el tamaño de la antena optimizada, se reduce el número de elementos de antena, utilizando solo tres elementos en la antena B la cual tendrá ocho combinaciones.

Otro punto importante a considerar, es la distancia entre los elementos radiantes. Para ello, se realizó un análisis electromagnético para determinar las distancias óptimas entre cada elemento radiante, evitando o minimizando el acoplamiento mutuo entre ellos como se puede apreciar en la figura 32.



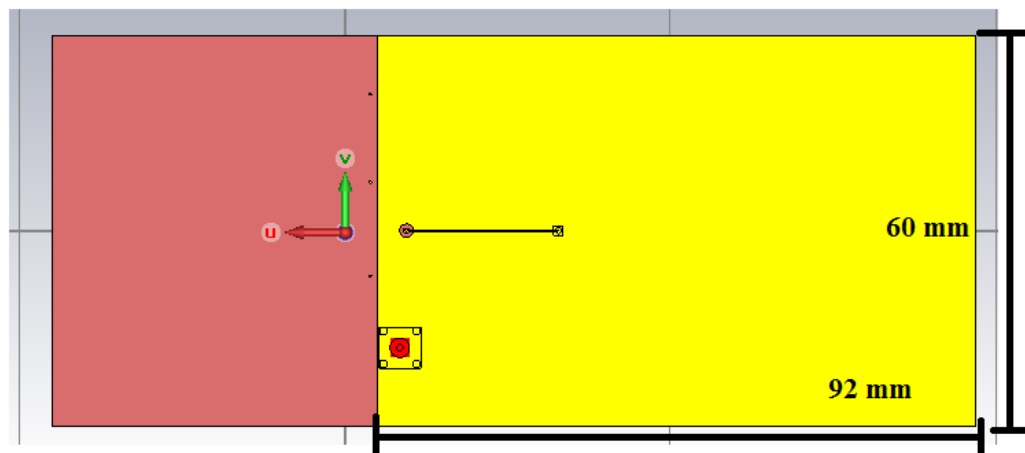
**Figura 32. Distancia óptima entre elementos radiantes.**

Como se puede observar en la figura 32, para los elementos que cubren las altas frecuencias la distancia entre los elementos radiantes debe de ser mayor, en comparación con los elementos que cubren las frecuencias bajas, debido a que los efectos parásitos son más pronunciados a frecuencias mayores. Finalmente el diseño optimizado de la antena propuesta B resulta con las dimensiones que se muestran en la figura 33.



**Figura 33. Dimensiones finales de la antena propuesta.**

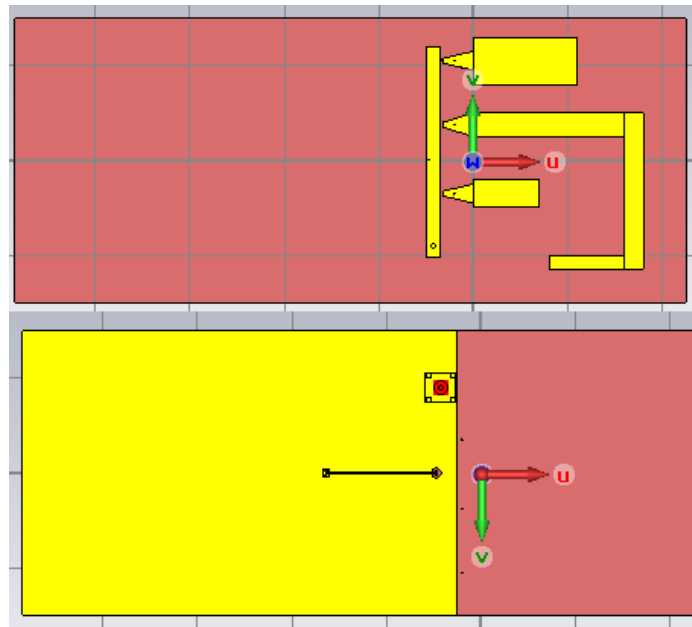
Para optimizar la parte del plano de tierra, se redujeron tanto el ancho como el largo del plano de tierra, resultando las dimensiones que se muestran en la figura 34.



**Figura 34. Dimensiones optimizadas del plano de tierra.**

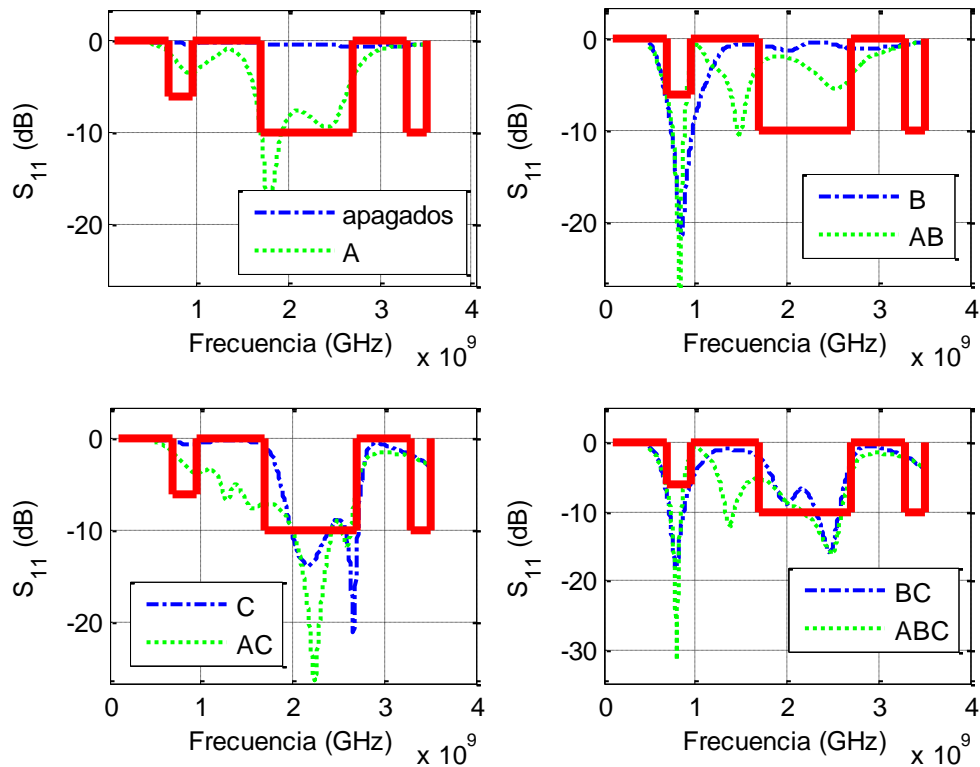


Una vez analizada y optimizada la antena completa junto con los elementos radiantes y el tamaño del plano de tierra, se obtuvo el diseño final deseado que se muestra en la figura 35.



**Figura 35. Antena Optimizada final.**

La antena tiene una dimensión final de 60mm x 142 mm, utiliza solo tres elementos radiantes, y por ende se redujo el número de interruptores de RF o diodos PIN para obtener finalmente solo ocho combinaciones de antenas. El comportamiento de los parámetros S11 en el intervalo de frecuencias de 0.5GHz a 3.5GHz se muestra en la figura 36. Se puede observar que algunas combinaciones de antena cubren las bandas deseadas con un comportamiento excelente, lo cual permite realizar una programación del circuito de control para conectar una o más antenas para lograr un S11 bajo, dependiendo de la frecuencia de interés.



**Figura 36. Parámetros S11 de la antena final optimizada de tres elementos.**

Es necesario resaltar que al hacer el análisis electromagnético, además de los resultados del S11 de la antena, se obtuvo el comportamiento de la ganancia y de los patrones de radiación para cada una de las ocho combinaciones. Sin embargo, por cuestiones de espacio y por evitar duplicidad, los resultados teóricos se presentan comparados con los resultados experimentales obtenidos de la medición en el capítulo 4.

### 3.6 Diseño y Selección del interruptor de RF

Como se mencionó en la sección 2.5.3 del capítulo anterior, se debe de buscar un interruptor de RF con las características que mejor convengan para el diseño propuesto que son:

- Tamaño pequeño
- Desempeño (bajas pérdidas)
- Bajo costo
- Circuito de alimentación sencillo.

En la referencia de (Angus C.K. et al, 2007) se analiza el comportamiento de los tres tipos de interruptores de RF en el intervalo de frecuencias de 0.7GHz a 2.3GHz como se muestra en la figura 37. Para realizar esta prueba, se diseñó una antena reconfigurable que operará en dos modos: En el modo 0, el interruptor de RF se encuentra encendido, y en el modo 1 se encuentra apagado. Como se puede apreciar en la figura 37, el diodo PIN tiene un mejor ancho de banda que los otros tipos de interruptores, que es lo que se busca, ya que en este trabajo de tesis se agrupan varias frecuencias de resonancia en un mismo elemento radiante.

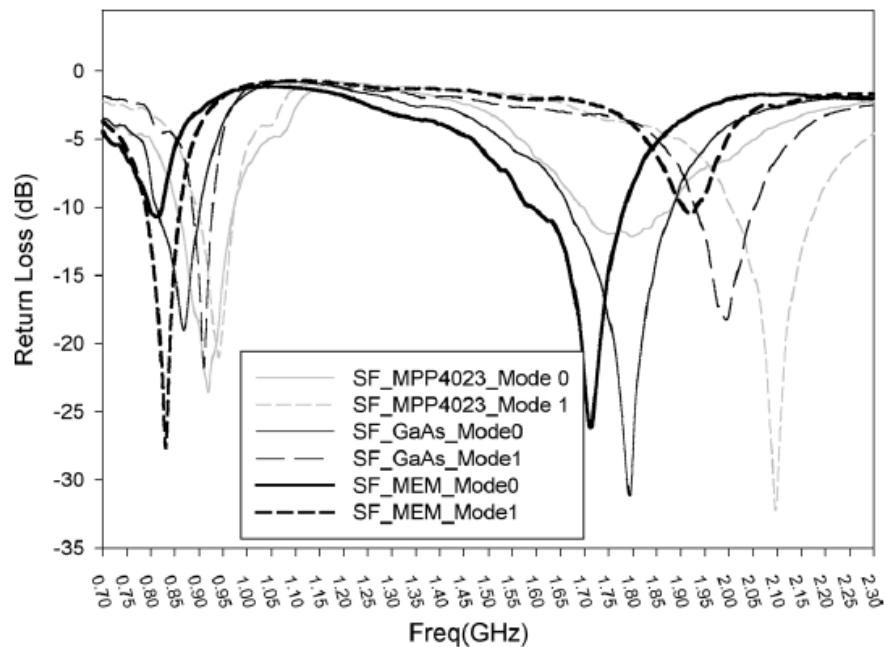


Figura 37. Análisis de interruptores de RF (Angus C.K. et al., 2007).

### 3.6.1 Diodos PIN

Como se mencionó anteriormente, el diodo PIN (p type-intrinsic-n type) representa una buena opción como interruptor de RF por sus bajas pérdidas, tamaño pequeño y fácil de controlar. En trabajos relativamente recientes en el CICESE (Figueroa-Torres, 2012), se utiliza el diodo PIN de la compañía MA/COM, modelo MA4AGBLP912 el cual se montó en una base de pruebas construida sobre un sustrato del tipo Duroid 6010, para medir los parámetros S del diodo PIN en el intervalo de frecuencias de 1 a 8 GHz, cuyos resultados se muestran en las figuras 38 y 39. Como se puede observar en la

figura 38, el parámetro S21 del diodo PIN encendido, presenta pérdidas por inserción bajas (0.38dB a 0.57dB) las cuales aumentan con la frecuencia, por lo cual se puede concluir que funciona como un cortocircuito con pocas pérdidas. El comportamiento del S11 del diodo encendido está acoplado y cercano a  $50\Omega$ . En la figura 39, se puede observar el funcionamiento del diodo PIN apagado. El coeficiente de reflexión S11 del diodo apagado se comporta como un circuito abierto con una impedancia alta, que evita que las frecuencias de RF pasen al ser reflejadas. El S12 del diodo apagado, se comporta como un interruptor abierto o circuito abierto que muestra un aislamiento entre -30dB a -12dB en el rango de frecuencias de 1 a 8 GHz.

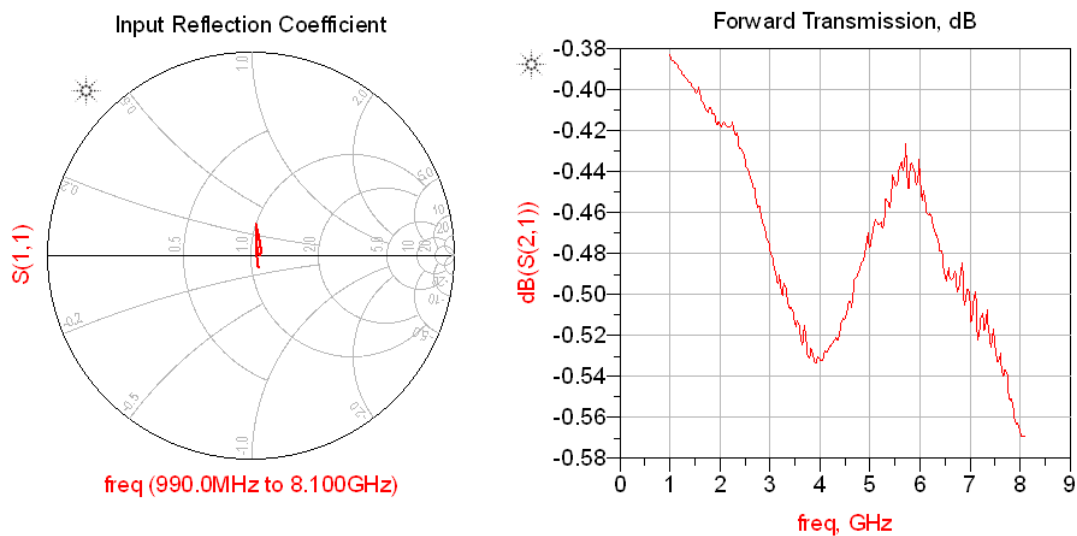


Figura 38. Parámetros S del diodo PIN encendido.

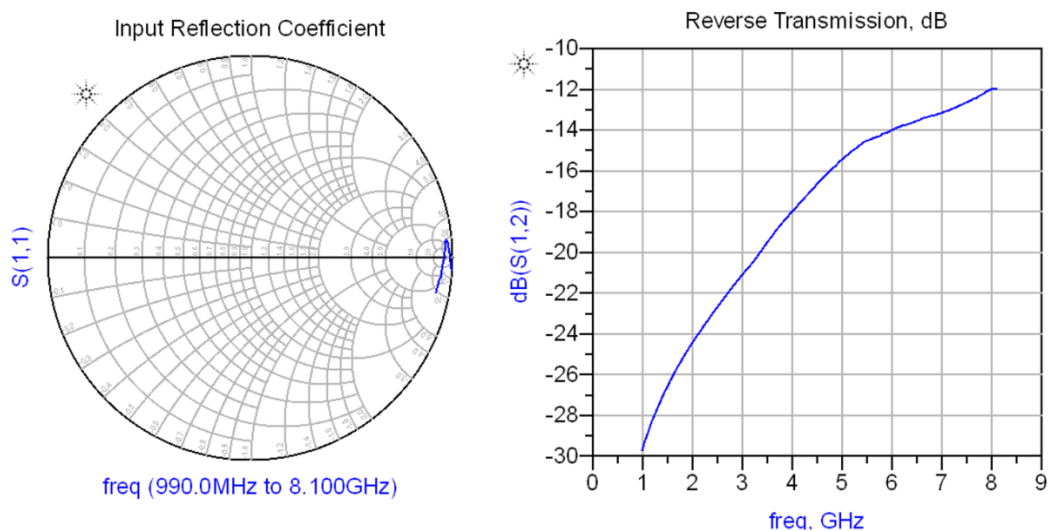


Figura 39. Parámetros S del diodo PIN apagado.

### 3.6.2 Diseño del circuito de alimentación del diodo PIN

El propósito del circuito de alimentación es el de encender o apagar el diodo PIN. Para encender el diodo, se aplica un voltaje  $V=1.45\text{v}$  (1.5v máximo) y consume una corriente entre 10mA y 20mA. La condición de apagado se logra al quitarle el voltaje ( $V=0\text{v}$ ). Un ejemplo del circuito de alimentación del diodo PIN se muestra en la figura 40, el cual se basa en un filtro pasa bajas sobre el cual pasa el voltaje de CD y se bloquean las frecuencias de RF. El voltaje positivo se aplica en el punto +V1 a través del filtro pasa bajas, formado por un inductor en serie y un capacitor en paralelo, directamente en el ánodo del diodo PIN, mientras que el cátodo se conecta a tierra mediante una inductancia SRF (Self Resonance Frequency).

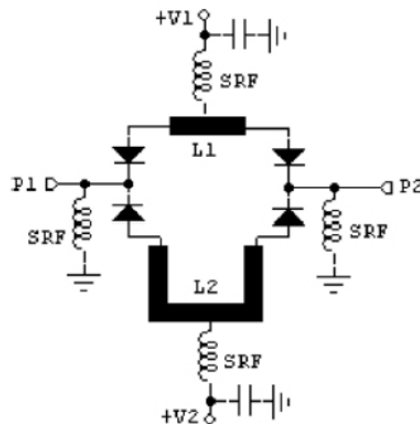
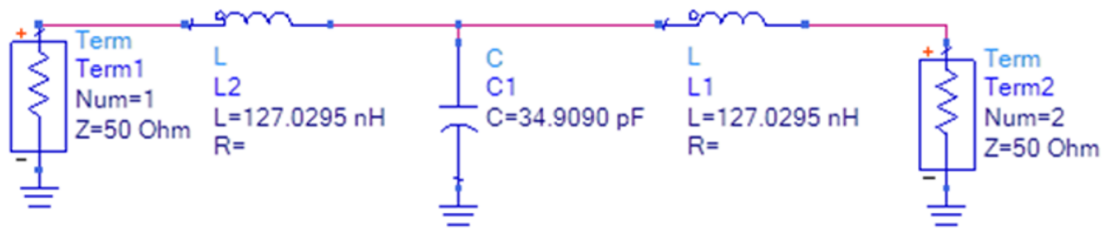
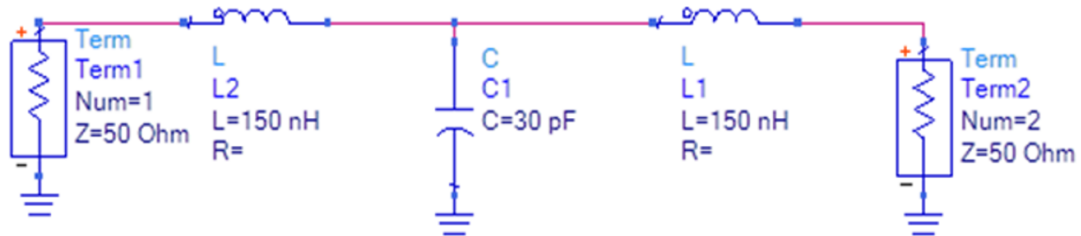


Figura 40 . Circuito de alimentación del diodo PIN.

Aplicando la teoría de diseño de filtros, se diseñó un filtro FPB de tercer orden con elementos concentrados para disminuir sus dimensiones. Una alternativa es utilizar elementos distribuidos, sin embargo estos serían de gran tamaño debido a las bajas frecuencias a las que trabaja la antena que son 698MHz. El filtro de tercer orden consiste de dos inductores en serie y un capacitor en paralelo. El filtro se diseñó y se obtuvieron los siguientes valores:  $L_{s1}=127.0295\text{ nH}$ ,  $C_p1=34.9090\text{ pF}$  y  $L_{s2}=127.0295\text{ nH}$ . Buscando valores disponibles comercialmente con valores aproximados a los calculados, se encontraron los siguientes elementos:  $L_{s1}=120\text{ nH}$ ,  $C_p1=30\text{ pF}$  y  $L_{s2}=120\text{ nH}$ . En la figura 41, se puede observar la topología del FPB con componentes ideales (calculados) y con componentes comerciales.



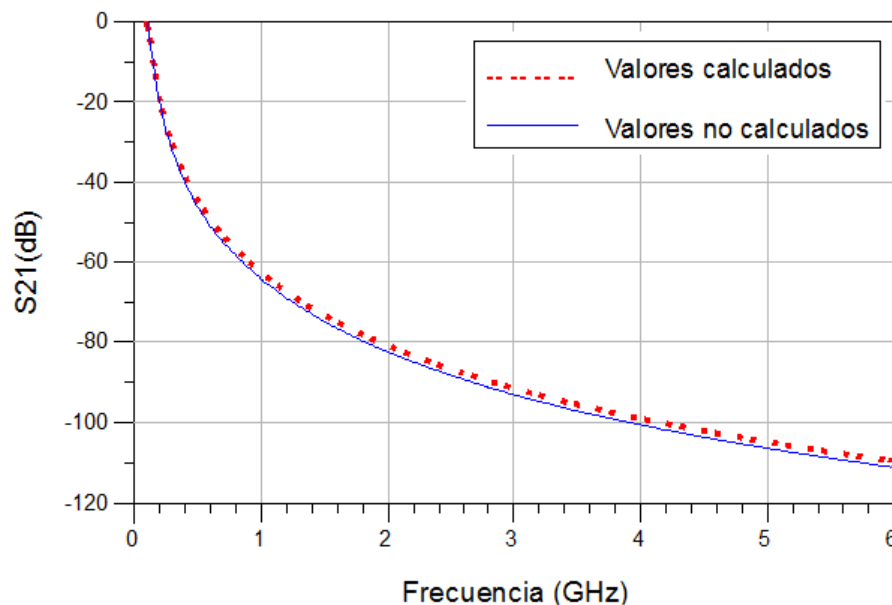
a) FPB con valores ideales (calculados).



b) FPB con valores comerciales.

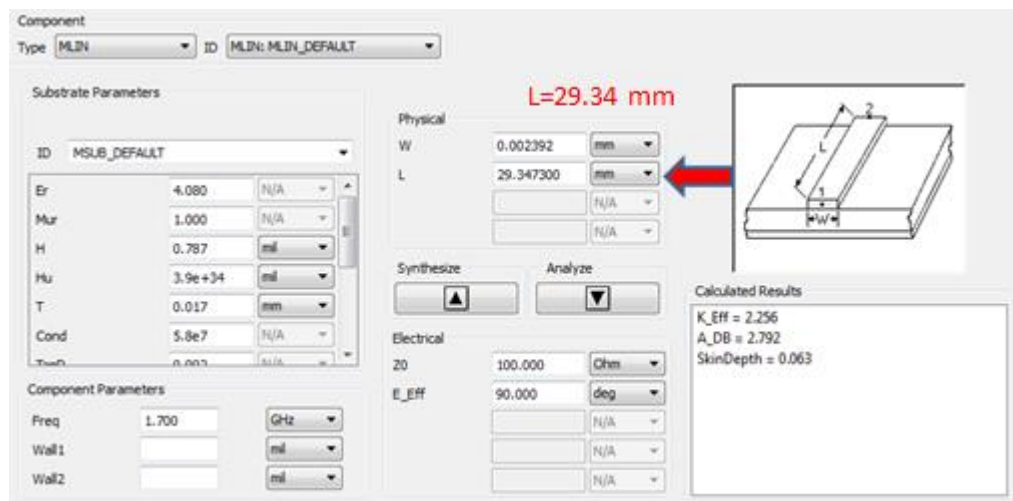
**Figura 41. Filtro pasa bajas FPB con valores calculados y comerciales.**

En la figura 42 se proporcionan los parámetros S21 del filtro pasa bajas, comparando el comportamiento con valores calculados contra el que utiliza elementos comerciales. Se puede observar que el comportamiento del FPB por debajo de 100 MHz pasa la señal con muy bajas pérdidas, filtrando la RF a frecuencias superiores a 500MHz. Se puede apreciar que el comportamiento entre elementos calculados y comerciales es muy similar, siendo un poco mejor el de valores comerciales con una atenuación superior a -50dB a frecuencias mayores a los 700MHz, por lo que se puede proceder a utilizar componentes con valores comerciales.



**Figura 42. Resultados del análisis del S21 del FPB diseñado con valores calculados y comerciales.**

Por otro lado, debido a que el cátodo del diodo PIN debe estar conectado a tierra, se debe colocar un elemento invisible en RF pero que pase la componente de voltaje CD. Para lograr esto, se coloca un stub a tierra de longitud eléctrica =  $90^\circ$ , de tal forma que la RF “vea” un circuito abierto y que la CD “vea” un corto. Utilizando el software LinCAL de ADS, se calcula la longitud que debe de tener este stub, considerando las características del sustrato que se va a utilizar como se muestra en la figura 43. Se puede observar que para el sustrato FR4, se especifica una línea de alta impedancia de  $100\Omega$ , y la longitud calculada a la frecuencia de 1.7GHz resulta de 29.347mm. Para comprobar el funcionamiento de este stub, se realiza el análisis electromagnético empleando el software CST, en donde se consideran las características del sustrato a utilizar en la antena propuesta, la cual está constituida por dos sustratos. El stub se coloca perpendicularmente con respecto a una línea de transmisión de  $50\Omega$  como se muestra en la figura 44 en la sección transversal de los dos sustratos.



**Figura 43. Cálculo de la longitud del Stub a tierra mediante LineCalc de ADS.**

En la figura 45 se puede apreciar el comportamiento del Stub a tierra. Como se aprecia en la figura, al analizar este elemento para las frecuencias de interés, este stub es invisible en los intervalos de frecuencia de 700MHz a 2.7GHz y 3.72 GHz a 6GHz, donde se obtienen bajas pérdidas por inserción y un acoplamiento aceptable menor a -10dB.

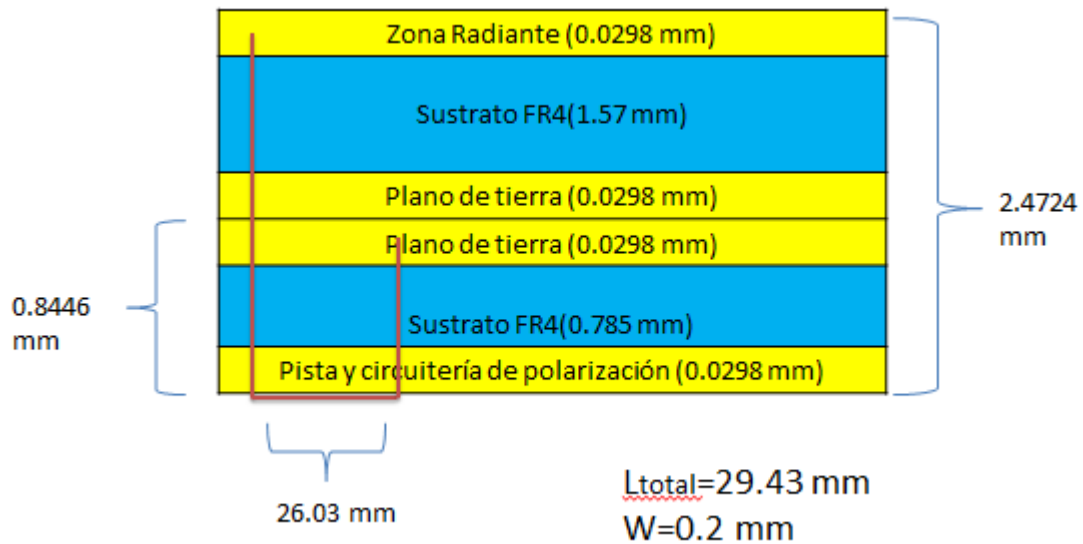


Figura 44. Trayectoria de conexión del Stub a tierra entre los dos substratos.

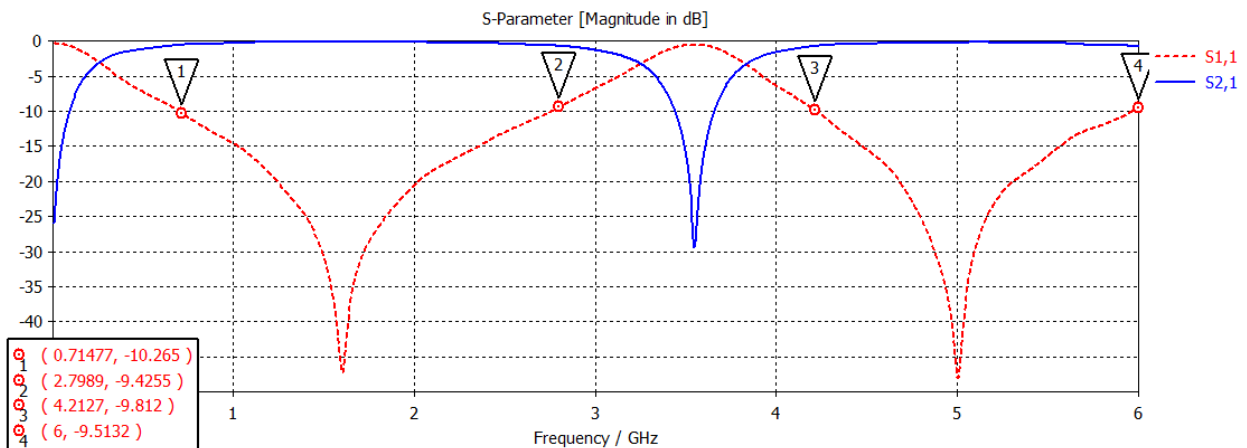
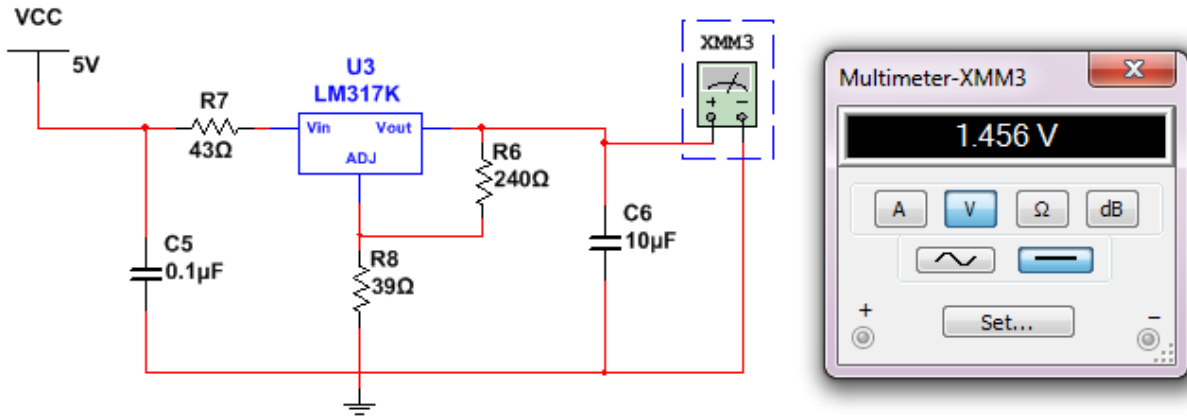


Figura 45. Comportamiento de los parámetros S del Stub a tierra diseñado.

### 3.6.3 Diseño del circuito regulador de voltaje

Como se mencionó en la sección 3.6, los diodos PIN utilizados son de la compañía MA/COM, modelo MA4AGBLP912 y se alimentan con un voltaje  $V = 1.45$  v y consumen una corriente máxima de 20 mA. Para obtener el voltaje de 1.45v, se diseña un circuito regulador de voltaje empleando el regulador LM317 el cual va a ser alimentado por el circuito de control a través del puerto USB el cual entrega 5V. En la figura 46 se muestran el circuito y los datos del diseño del regulador de voltaje.





**Figura 46. Circuito regulador de voltaje diseñado.**

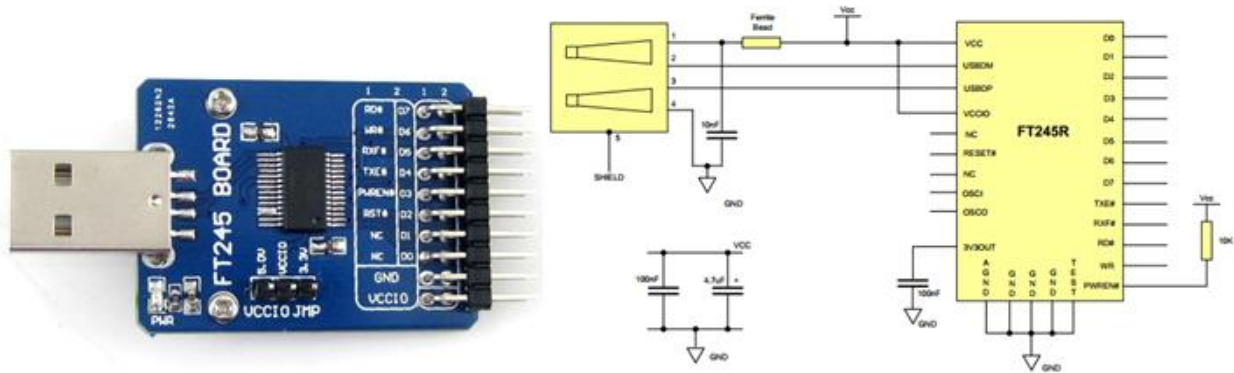
El circuito diseñado utiliza dos capacitores en paralelo para estabilizar y filtrar los voltajes de entrada y salida, una resistencia de referencia de 240Ω y una resistencia variable, la cual controla el nivel de voltaje a la salida. Además en la entrada del regulador se agregó una resistencia en serie para limitar la corriente de entrada. Para poder alimentar y encender los 3 diodos simultáneamente, se requiere una corriente máxima de 60 mA, debido a que cada diodo PIN consume aproximadamente 20 mA en la condición de encendido. El circuito que controla el encendido y apagado de los diodos PIN por el puerto USB, puede entregar entre 500 mA y 1 Amp de corriente a la salida, la cual es suficiente para alimentar a los 3 diodos PIN.

#### **3.6.4. Circuito de Control FT245R**

Para automatizar el control de los diodos PIN, se puede controlar por medio de la computadora mediante el puerto USB, el cual ofrece más ventajas que sus predecesores, sin embargo es más complejo de utilizar, ya que su funcionamiento está basado en protocolos de software. El USB tiene 3 modos de operación:

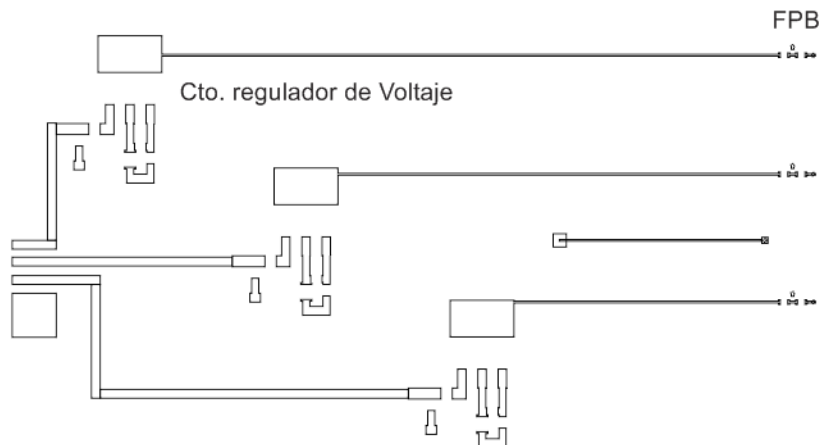
- USB Human Interface Device (HID): Velocidad Baja, no requiere driver.
- USB Communication Device Class (CDC): Velocidad Media, requiere driver, creando un Puerto Serie Virtual.
- USB Custom Driver: Velocidad Alta, pero requiere driver. Este es el modo que utiliza WinUSB (para Windows Vista) y el mpusbapi (Windows 2000 y posterior).

Debido a los inconvenientes mencionados, se decidió utilizar el módulo integrado FT245RL, ya que simula un puerto serie COM, el cual es compatible con MATLAB. Este módulo utiliza el modo de operación CDC, que tiene la ventaja de no requerir oscilador y puede entregar hasta 7 puertos como entradas o salidas programables. Este módulo es bastante pequeño con unas dimensiones de 7.8 x 10.2 mm. En la figura 47 se puede observar el circuito a utilizar, así como el diagrama esquemático del circuito.



**Figura 47. Circuito de control USB FT245RL.**

Una vez que ya se han diseñado tanto el FPB como el circuito regulador de voltaje, se diseña la topología (layout) del circuito impreso, empleando componentes de montaje superficial, de tal forma que estos queden en el substrato delgado, por la parte contraria donde se encuentran los elementos radiantes de la antena. En la figura 48 se presenta el diseño del circuito realizado empleando CST, donde se colocan los elementos de los tres FPB y los tres circuitos reguladores de voltaje.



**Figura 48. Diseño del circuito impreso de los FPB y reguladores de voltaje.**

Una vez diseñada la estructura radiante donde se encuentran los tres elementos de antena mostrados en la figura 33, así como el circuito de los filtros FPB y los circuitos reguladores de voltaje utilizados para alimentar los diodos dados en la figura 48, se procede a efectuar el proceso de construcción de la antena y sus circuitos en el capítulo 4.

## **Capítulo 4. Construcción y caracterización de la antena reconfigurable.**

En este capítulo se presenta el proceso de construcción de la antena y de los circuitos diseñados y optimizados en el capítulo 3. Se describe la metodología de construcción, se presentan los equipos y el material empleados para la construcción y se presentan resultados del ensamble de la antena y sus circuitos. Se describen las metodologías empleadas para caracterizar la antena, y se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los parámetros de la antena en los intervalos de frecuencias de interés.

### **4.1 Construcción de la Antena.**

Una vez diseñada la antena, analizada y optimizada con el programa de análisis electromagnético CST, se procede a construir la estructura final dada en las figuras 33 y 48. Para iniciar el proceso, el dibujo de la topología de la antena diseñada, de sus planos de tierra y de los circuitos de alimentación y control empleados para obtener la antena reconfigurable, se imprimen en papel Bond grueso con 97% de blancura mediante una impresora Láser. Siguiendo el proceso fotolitográfico, el dibujo se coloca en la máquina Agfa Gevaert Repromaster (2001) que se muestra en la figura 49, para obtener la mascarilla (o negativo) grabada en material fotosensible de alta resolución a escala 1:1.



**Figura 49. Máquina Repromaster Agfa para obtener la mascarilla de la antena.**

Las mascarillas se obtienen colocando los dibujos del circuito en la parte inferior de la máquina Repromaster, mientras que en la parte superior se coloca la película fotográfica de alta resolución. Se enciende la máquina para exponer el circuito por 45 segundos y posteriormente se sumerge en los químicos (revelador, parador y fijador), para obtener las mascarillas o negativos de los circuitos. Una vez que se obtienen los negativos se verifica que las dimensiones sean las correctas mediante el microscopio Mitutoyo que se muestra en la figura 50. En la figura 51 se presentan las mascarillas obtenidas en película fotográfica de alta resolución la cual debe tener un buen contraste.



**Figura 50. Microscopio Mitutoyo utilizado para verificar las dimensiones de la mascarilla.**



**Figura 51. Mascarillas de la antena en película de alta resolución.**

Para grabar las antenas y circuitos en las placas de material FR-4 con conductor de cobre, en primer lugar se limpian con acetona para remover impurezas, posteriormente se adelgazan las capas de cobre para reducir el espesor del conductor  $t$  de cobre inicialmente con  $t=0.018$  mm. para facilitar el grabado de líneas delgadas y separaciones pequeñas. Hecho esto, se pulen con un pulidor de metales (Brasso) y enseguida se lavan con acetona, alcohol isopropílico y se secan. Posteriormente se coloca una capa fotosensible de material denominado Filmina sobre la placa de cobre y se introduce en la roladora caliente que se muestra en la figura 52, para adherir la Filmina al cobre tratando de evitar burbujas de aire. Para grabar el circuito de la antena en la placa de cobre cubierta con filmina, se coloca el negativo sobre la misma y se introduce en la máquina Colight M-218 dada en la figura 53, que produce una luz ultravioleta durante 2 minutos.



**Figura 52. Roladora térmica empleada para adherir la filmina.**



**Figura 53. Maquina Colight M-218 para exponer a la luz ultravioleta.**

La placa expuesta a la luz ultravioleta se introduce en la solución de revelador de filmina K1A-K1B, para obtener el circuito de la antena protegido con la filmina. Posteriormente se introduce la placa en una solución de Cloruro Férrico, mostrado en la figura 54, para eliminar el cobre no deseado y dejar listo el circuito de la antena y los circuitos de alimentación de los diodos PIN, los cuales se muestran en las figuras 55 y 56 respectivamente.



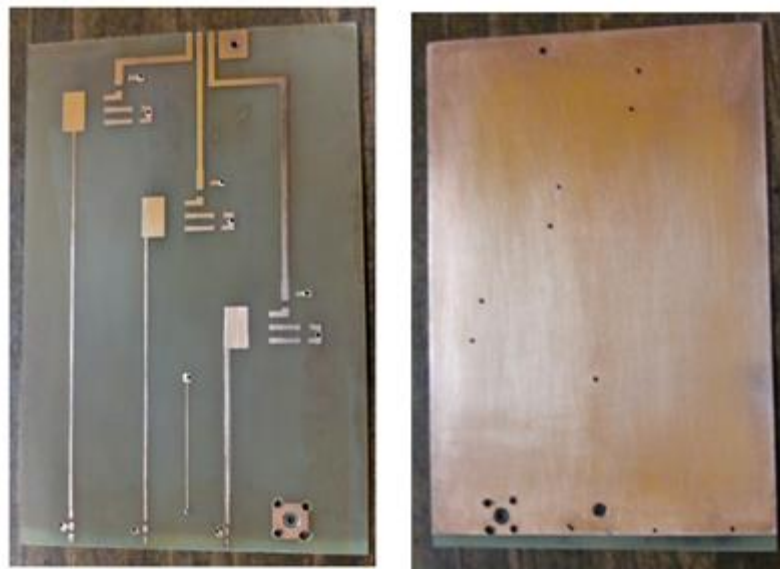
**Figura 54 Revelador de filmína y Cloruro Férrico para obtener el circuito.**

Es necesario verificar de nuevo las dimensiones de los circuitos para asegurar que sean iguales a las obtenidas durante el proceso de diseño y asegurar un buen funcionamiento de la antena. Una vez que se ha verificado que se cumple con las dimensiones físicas requeridas, se procede a limpiar las diferentes capas y a hacer los hoyos los cuales se pueden observar en las figuras 55 y 56, para extender los planos de tierra o para cruzar de una capa a otra.





**Figura 55. Circuito impreso de la antena y su plano de tierra.**



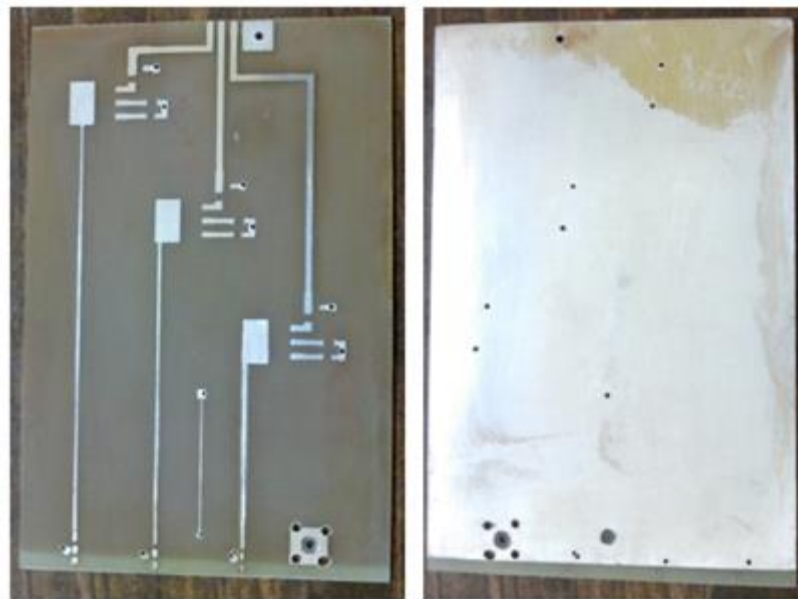
**Figura 56. Circuito de alimentación de los diodos PIN y su plano de tierra.**

Enseguida, se sumergen los circuitos en una solución para adherir una capa de níquel la cual protegerá al cobre de la oxidación, quedando los circuitos como se muestra en las figuras 57 y 58. El siguiente paso es agregar postes metálicos para conectar los planos de tierra y adherir los dos substratos empleando Epoxy conductivo de plata EPOTEK H20E. Una vez que a los planos de tierra se les deposita el Epoxy conductivo,

se sujetan y se introducen al horno, como se muestra en la figura 59, por un tiempo de 2 horas a una temperatura de 100 grados centígrados.



**Figura 57. Circuitos de la antena y su plano de tierra protegidos con níquel.**



**Figura 58. Circuito de alimentación y su plano de tierra protegidos con níquel.**



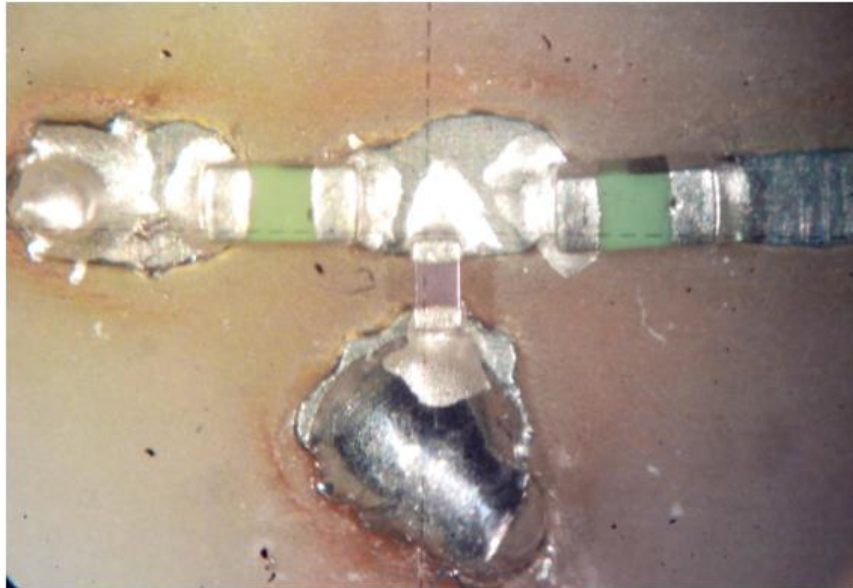
**Figura 59. Circuitos introducidos al horno para secar el Epoxy conductivo.**

El siguiente paso es ensamblar o adherir todos los componentes (inductancias y capacitancias) del filtro pasa bajas, los componentes del circuito regulador de voltaje (resistencias, capacitores y circuito integrado), así como los diodos PIN en la cara de las antenas y el conector SMA. Para ensamblar los componentes se utiliza el microscopio Mitutoyo mostrado en la figura 60.



**Figura 60. Ensamble de componentes de la antena empleando el microscopio.**

Se ensamblaron los componentes inductores de 150nH (tamaño 0403) y el capacitor de 20pF (tamaño 0201) del filtro pasa bajas diseñado como se muestra en la figura 41 y en la figura 62 se muestra una vista al microscopio del montaje de los inductores y capacitor del filtro pasa bajas.



**Figura 61. Vista al microscopio de los componentes del filtro pasa bajas.**

En la figura 62 se muestran los circuitos de alimentación de los diodos PIN y un acercamiento mostrando los detalles al microscopio. Se puede notar a la izquierda por arriba del conector de RF tipo SMA, el filtro pasa bajas visto al microscopio y dado en la figura 61 que tiene unas dimensiones muy pequeñas.

Enseguida, se ensamblan los diodos PIN como se muestra en la figura 63a, donde apenas se pueden distinguir, sin embargo en la figura 63b se hace un acercamiento en el microscopio.

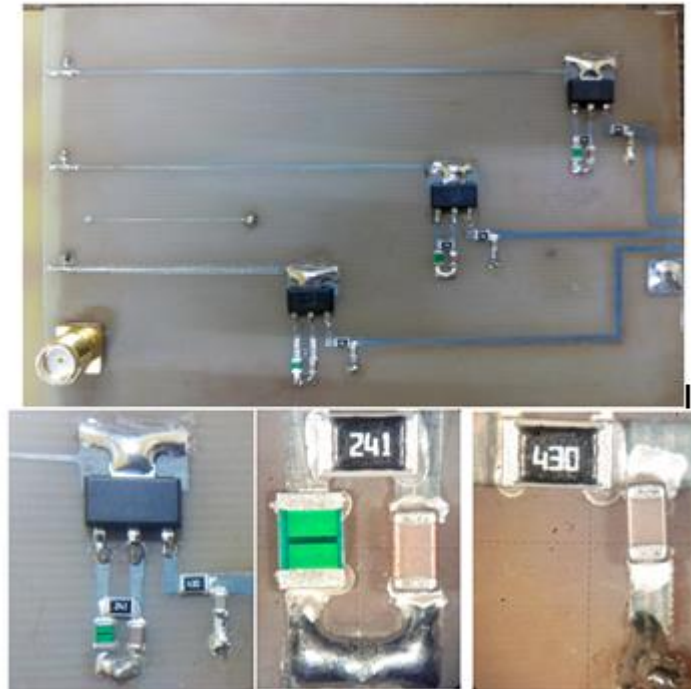


Figura 62. Vista del circuito de alimentación de los diodos PIN y detalles al microscopio.



Figura 63. Montaje de los diodos PIN en la antena (a) y un acercamiento al microscopio (b).

En la figura 64 se muestra la antena terminada con los cables soldados, los cuales son necesarios para poder hacerla reconfigurable y controlar los voltajes suministrados a los diodos PIN empleando el circuito FT245RL, el cual se muestra en la figura 65 por ambos lados.

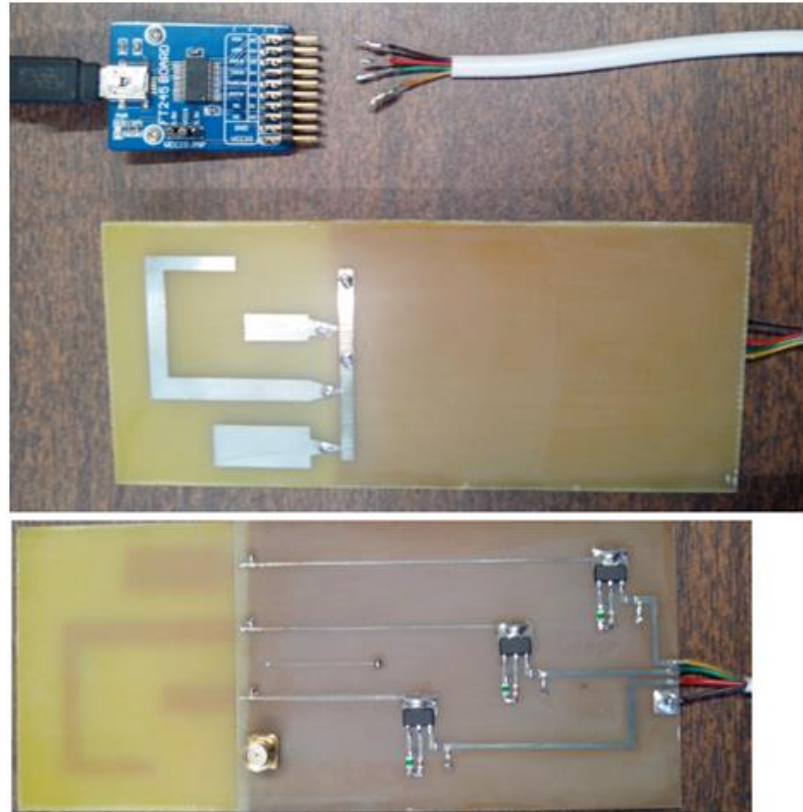


Figura 64. Antena terminada y su circuito de control por ambos lados.



Figura 65. Circuito de control FT245RL (USB - puerto serie).

Para verificar el funcionamiento del circuito de alimentación y asegurar que se encienden y apagan los diodos PIN, se midieron los voltajes en cada uno de los

circuitos resultando los valores que se muestran en la figura 66 y que se muestran en la tabla 11.

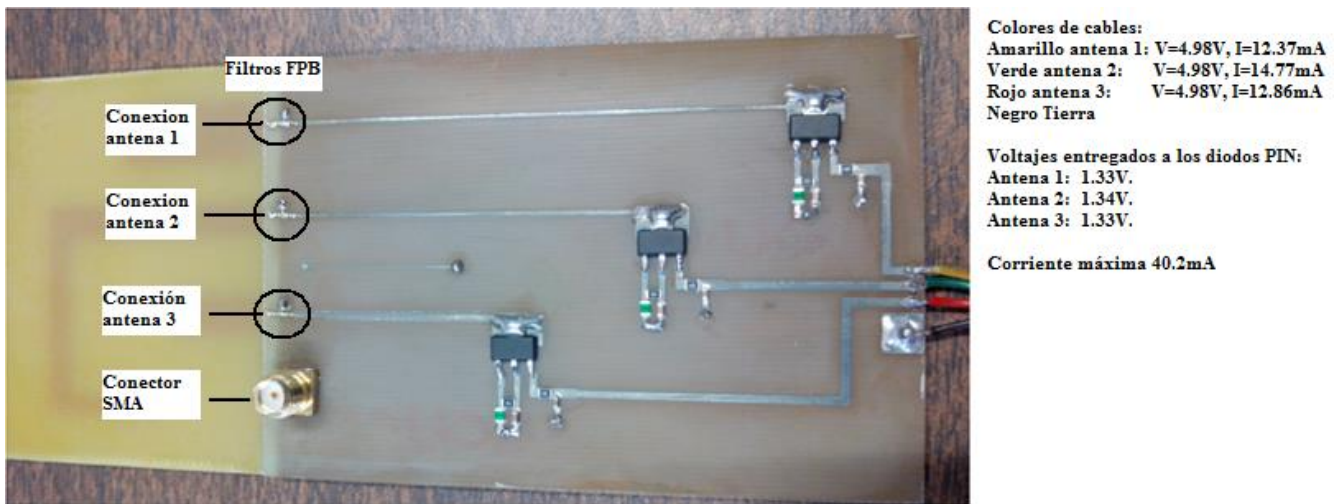


Figura 66. Circuito de alimentación con detalles de sus voltajes y corrientes.

Tabla 12. Voltajes y corrientes a la salida del módulo FT245RL.

Antena	Voltaje	Corriente
1	4.98	12.37
2	4.98	14.77
3	4.98	12.86

Finalmente, se presenta una fotografía del diseño final conectado al controlador USB empleado para controlar a la antena desde la PC como se muestra en la figura 67.

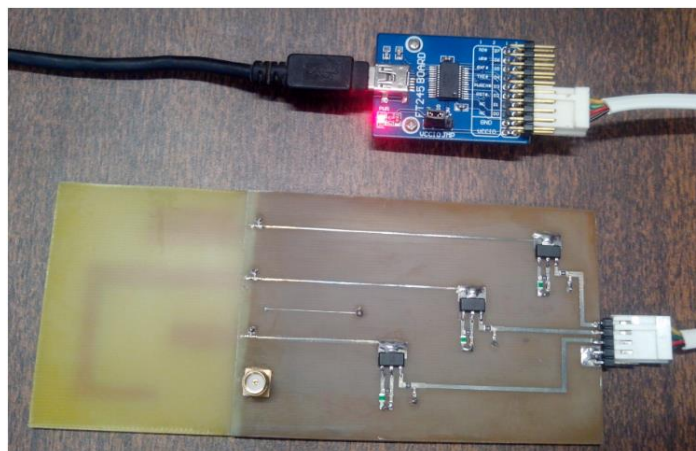


Figura 67. Antena conectada al circuito de control FT245RL.

## 4.2 Caracterización de la antena

En esta sección, se presentan las metodologías empleadas para caracterizar la antena multibanda y así obtener los diferentes parámetros que describen el comportamiento de una antena.

Se presentan las metodologías y resultados para obtener las pérdidas por retorno, la ganancia y el patrón de radiación de la antena y la comparación entre los resultados del análisis electromagnético y los valores experimentales medidos. Como referencia, se utiliza la nomenclatura proporcionada en la tabla 12, para referirse a cada configuración de la antena multibanda.

**Tabla 13. Configuraciones de la antena multibanda.**

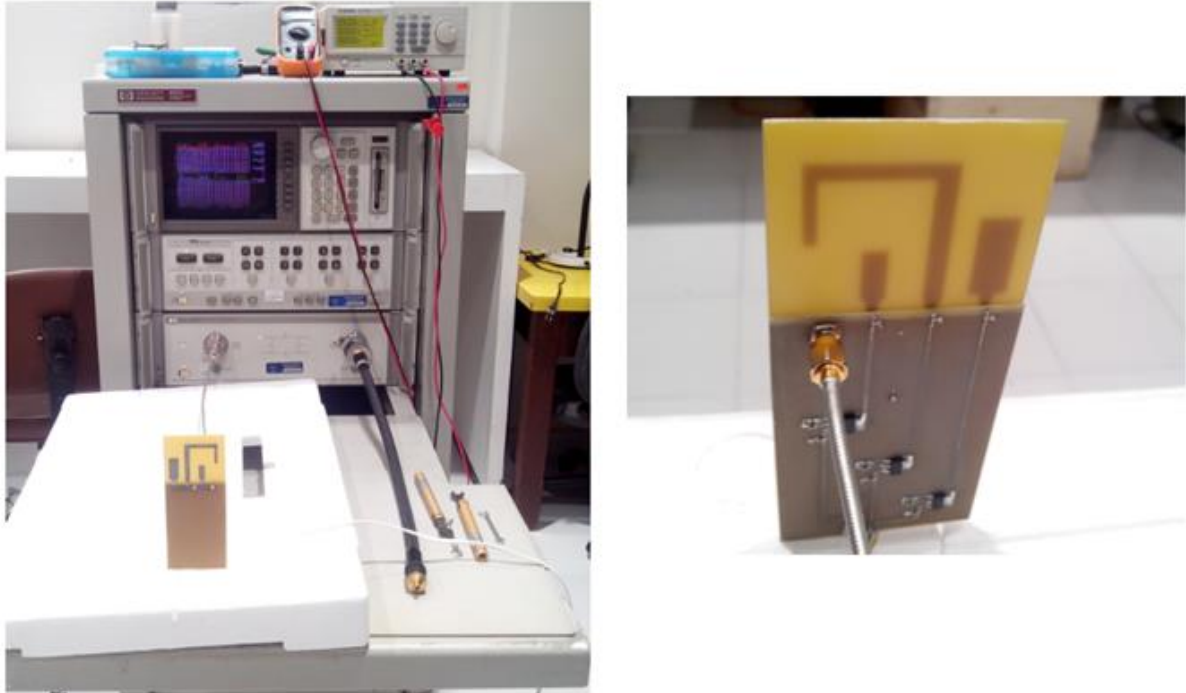
<b>000</b>	Antenas Apagadas
<b>001</b>	Antena A encendida
<b>010</b>	Antena B encendida
<b>011</b>	Antena A, B encendida
<b>100</b>	Antena C encendida
<b>101</b>	Antena A, C encendida
<b>110</b>	Antena B, C encendida
<b>111</b>	3 Antenas encendidas

### 4.2.1 Medición de pérdidas por retorno

Para obtener las pérdidas por retorno, se utiliza el analizador de redes vectorial HP8510C que opera de 45MHz a 50GHz. Se calibra el analizador de 0.5 a 6 GHz con 401 puntos, mediante la técnica de calibración SOLT (Short-Open-Load-Thru). Se realizó la calibración completa para tener certeza de que la medición de las pérdidas por regreso fueran lo más precisa posible. Una vez que se calibró y se comprobó que la calibración se hizo correctamente, se procede a conectar la antena como se muestra en la figura 68 y se realizan las mediciones para obtener los resultados del coeficiente de reflexión S11 mostrados en las gráficas dadas en las figura 69 a la 76 correspondientes a las ocho configuraciones dadas en la tabla 12. En cada una de las gráficas se



muestran los resultados del análisis electromagnético, comparados con los obtenidos de la medición.



**Figura 68. Medición del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  de la antena reconfigurable.**

En la figura 70 se muestra que la antena A funciona de 1.62GHz a 2.013GHz y de 4.529GHz a 5.505GHz, y que además se tiene un gran parecido entre las respuestas teórica y experimental.

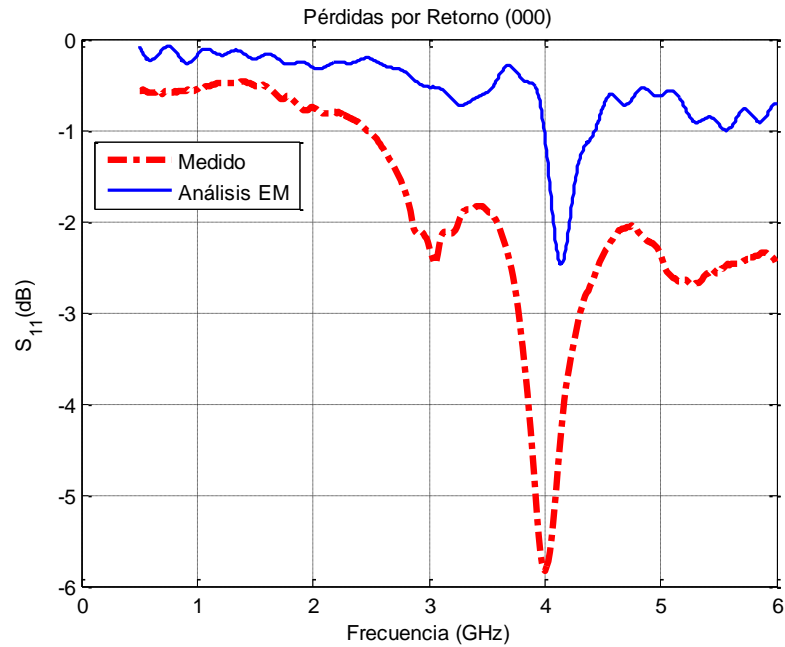


Figura 69. Pérdidas por retorno en la configuración (000) con las tres antenas apagadas.

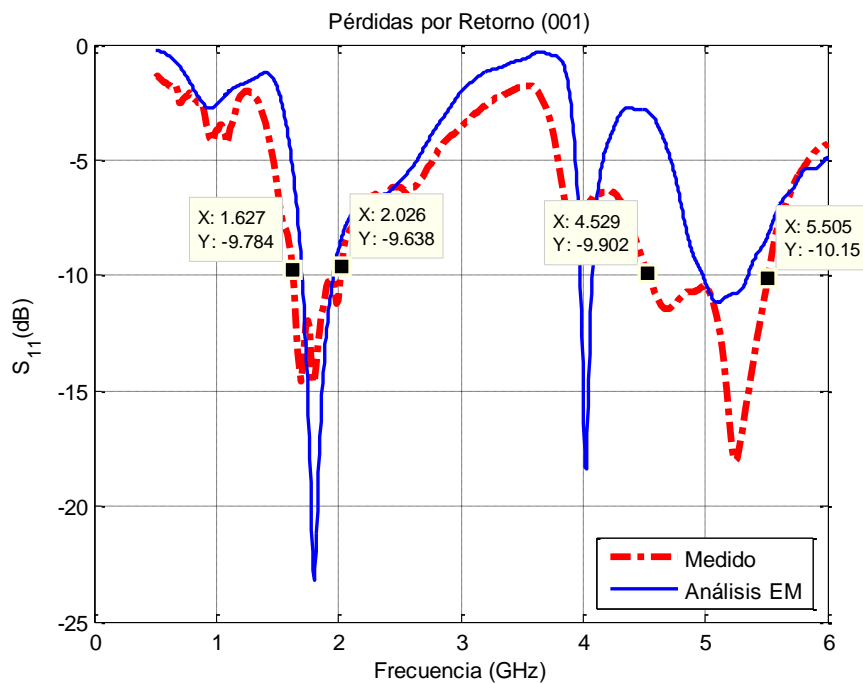
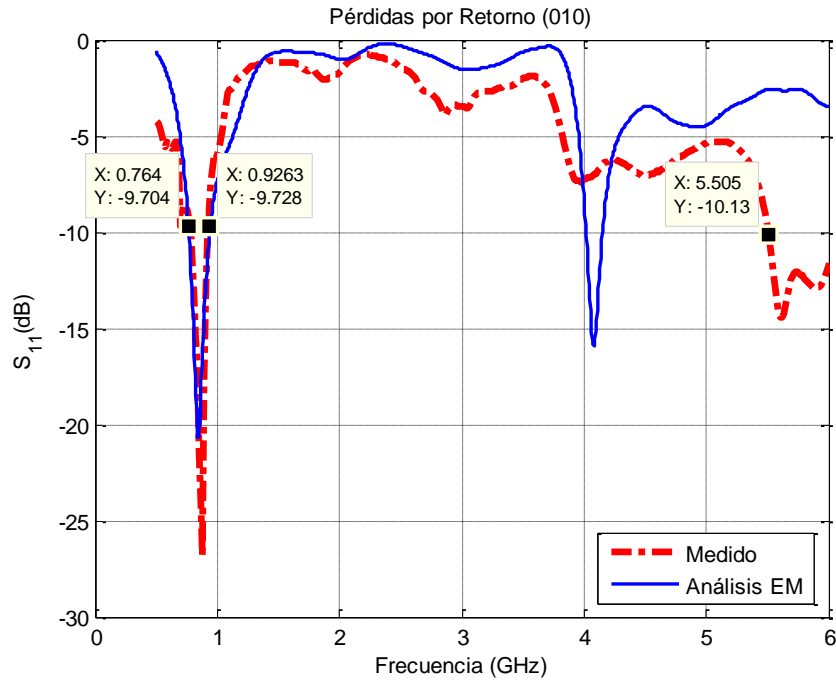


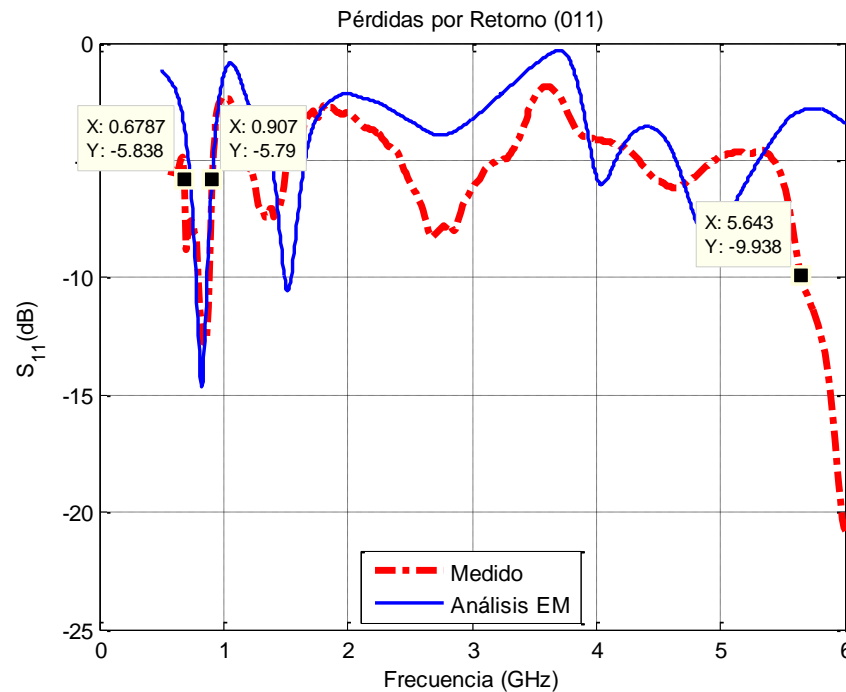
Figura 70. Pérdidas por retorno en configuración (001) con la antena A encendida.

En la figura 71 se muestra que la antena B funciona de 0.6787 a 1.009 GHz y de 5.505GHz hasta frecuencias mayores que 6GHz, y que además se tiene un gran parecido entre las respuestas teórica y experimental sobre todo a frecuencias menores a 4 GHz.



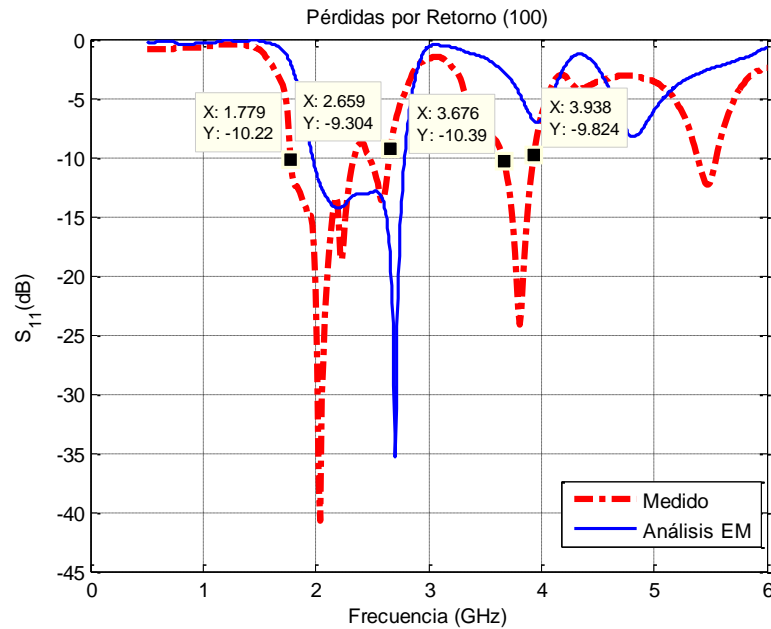
**Figura 71. Pérdidas por retorno en la configuración (010) con la antena B encendida.**

En la figura 72 se muestra que las antenas A y B operan de 0.678GHz a 0.897GHz y a frecuencias mayores a 5.643GHz, obteniéndose una gran similitud entre ambas respuestas en ciertos anchos de banda.



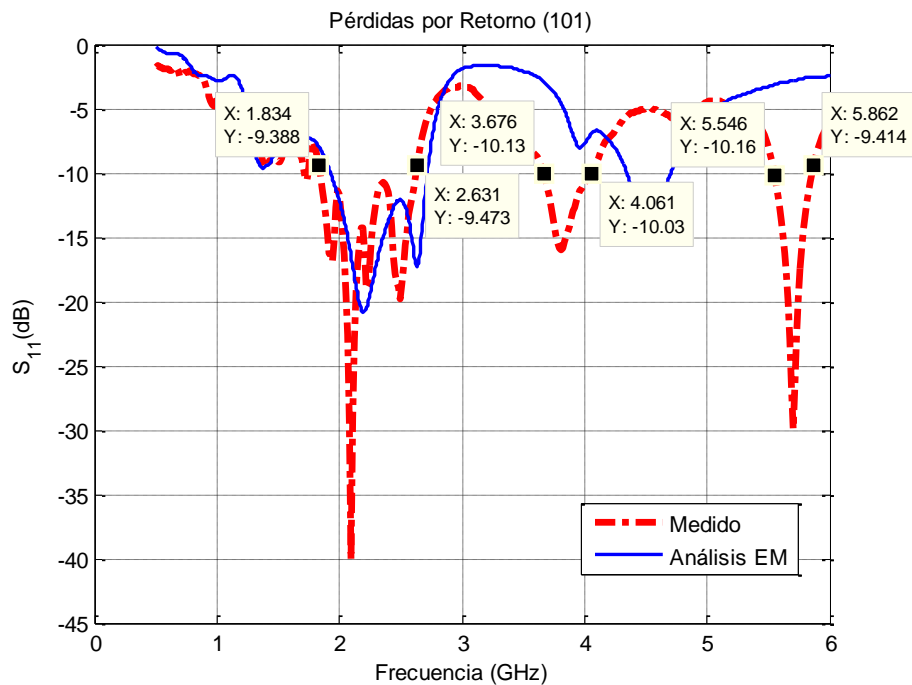
**Figura 72. Pérdidas por retorno en la configuración (011) con las antenas A y B encendidas.**

En la figura 73 se muestra que la antena C opera de 1.779GHz a 2.8GHz y de 3.66GHz a 3.9GHz.



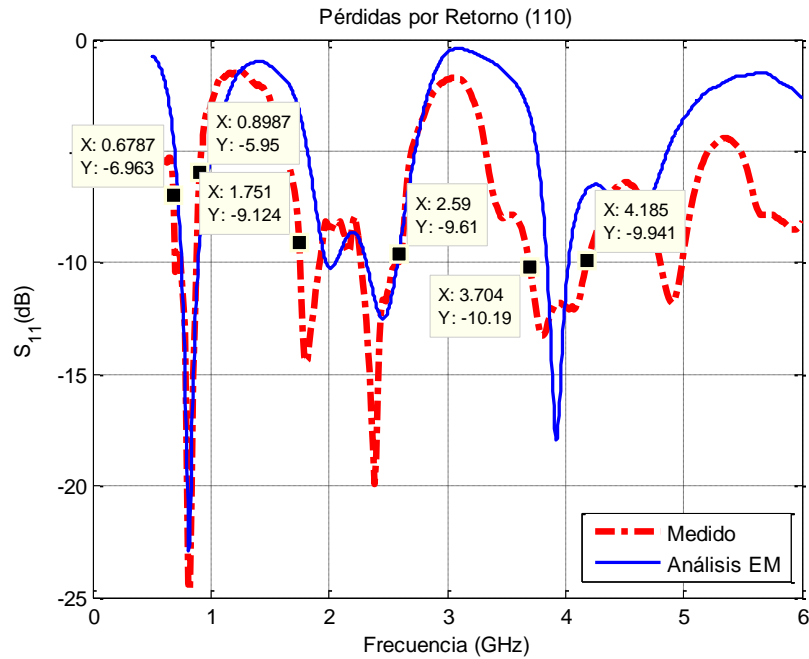
**Figura 73. Pérdidas por retorno para la configuración (100) con la antena C encendida.**

En la figura 74 se observa que con las antenas A y C encendidas, la antena opera de 1.834GHz a 2.618GHz y de 5.5GHz a 5.849GHz.



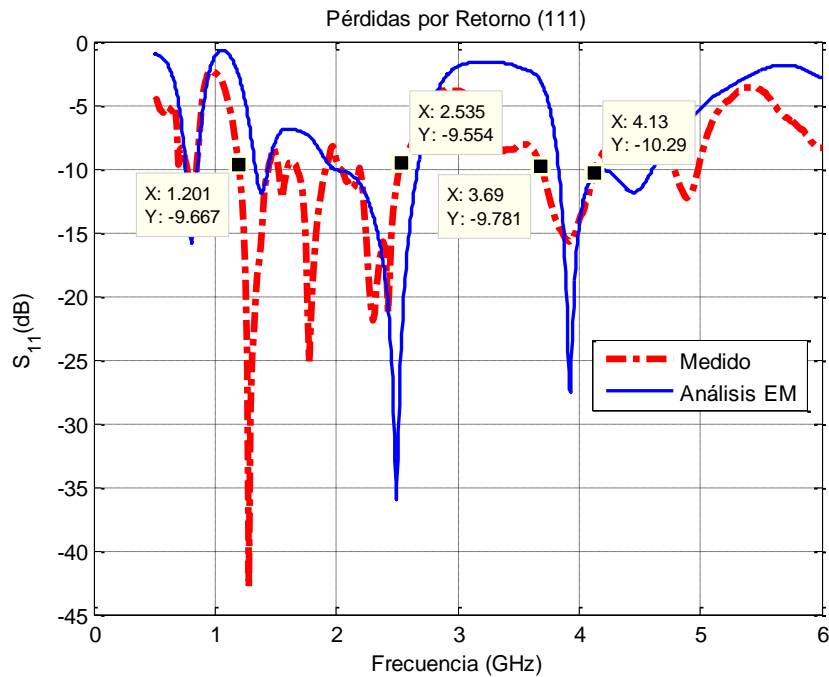
**Figura 74. Pérdidas por retorno en la configuración (101) con las antenas A y C encendidas.**

En la figura 75 se observa que con las antenas B y C encendidas, la antenna opera de 0.678GHz a 0.8987GHz, de 1.751GHz a 2.65GHz y de 3.69 a 4.185GHz.



**Figura 75. Pérdidas por retorno en la configuración (110) con las antenas B y C encendidas.**

En la figura 76 con las tres antenas encendidas, se puede apreciar que funciona en varias bandas de frecuencia cubriendo una banda ancha de 1.531GHz a 2.507GHz.



**Figura 76. Pérdidas por retorno en la configuración (111) con las tres antenas encendidas.**

Se puede notar que para cada una de las gráficas dadas anteriormente se presentan resultados de las pérdidas por retorno en las diferentes configuraciones (xxx), en donde un 1 indica que el diodo PIN está encendido y un 0, cuando el diodo PIN está apagado, por ejemplo, 101, indica que las antenas A y C están encendidas, mientras que la antena B está apagada. Como se puede apreciar en las figuras 69 a 76, los resultados obtenidos de la medición son muy similares a los obtenidos en el análisis electromagnético, sobre todo en las bandas de interés o de resonancia. Las diferencias se atribuyen a que las dimensiones calculadas en el análisis electromagnético no consideran el efecto del conector ni el cable coaxial. Otra diferencia es que las dimensiones de la antena construida difieren un poco de las calculadas.

En la tabla 13 se presenta un resumen de los resultados experimentales de las bandas de frecuencia requeridas, con sus anchos de banda, en donde se han considerado como aceptables un nivel de pérdidas por retorno <-6dB para frecuencias inferiores a 1 GHz y -10 dB para frecuencias superiores a 1GHz. En la primera columna se muestran las combinaciones de las antenas A,B y C que cubren cada una de las bandas de frecuencia. Donde se puede apreciar que se cubren todas las bandas.

**Tabla 14. Bandas de frecuencia de operación de la antena medida y sus combinaciones.**

Combinaciones de antenas	Estándar	Frecuencias de operación(GHz)	Ancho de banda (MHz)
010 (B)	LTE Banda 10,12, 17	0.698- 0.768	70
010 (B)	GSM850	0.824 -0 .894	70
010 (B)	GSM900	0.8902 – 0.9598	69.6
110 (BC)	GPS	1.57542	10
001 (A)	LTE Banda 4	1.710 – 1.755	45
001 (A)	GSM1800	1.7102-1.8798	169.6
001 (A)	GSM1900	1.850 -1.990	140
100 (C)	UMTS 2100	1.92 - 2.17	250
100 (C)	WIFI 802.11 b/g/n	2.412 – 2.484	72
100 (C)	LTE Banda 7,38,40,41	2.3– 2.69	70
001,010 (A) y (B)	WIFI 802.11 a	5.15- 5.825	675

### 4.2.2 Medición de la Ganancia

Para medir la ganancia de la antena en sus diferentes configuraciones, se utiliza un generador de señales Rohde&Schwarz modelo SMB 100A que funciona de 100KHz a 40 GHz al cual se le conecta una antena transmisora, se emplea un analizador de espectros Rohde&Schwarz FSP que funciona de 9KHz a 40 GHz donde se conecta la antena bajo medición o antena receptora. Utilizando la ecuación 3 para el campo lejano, se determina la distancia mínima a la cual se colocan las antenas resultando de 80 cm, por lo que la antena bajo prueba se coloca a 1.5 metros de la transmisora.

Utilizando el método de las 3 antenas, mediante el cual se puede conocer la ganancia de la antena, se realizan tres mediciones de las potencias recibidas ( $S_{21}$ ) con las tres antenas desconocidas y se forma un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, donde las incógnitas son la ganancia de cada una de las tres antenas.

La primera medición se realiza entre las antenas 1 y 2 ( $M_{12}$ ), la segunda entre la 1 y la 3 ( $M_{13}$ ) y finalmente entre la 2 y la 3 ( $M_{23}$ ). A estas mediciones se les suman las pérdidas por propagación  $pp$  (las cuales son negativas) resultando las ecuaciones 17 a la 19:

$$M_{12} = 20 \log_{10} |S_{21}|_{12} + pp \quad (17)$$

$$M_{13} = 20 \log_{10} |S_{21}|_{13} + pp \quad (18)$$

$$M_{23} = 20 \log_{10} |S_{21}|_{23} + pp \quad (19)$$

donde:

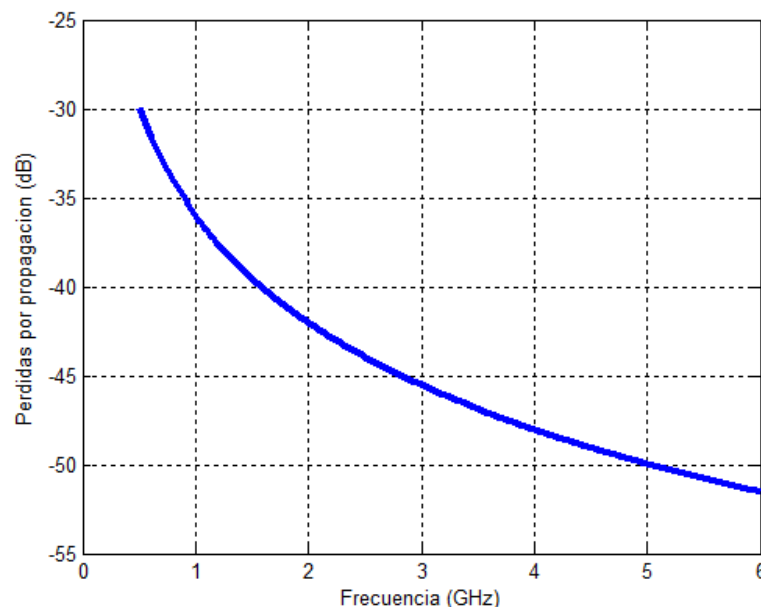
$$pp = 10 \log \left[ \frac{4\pi D}{\lambda} \right]^2 \quad (20)$$

Donde  $D$  es la distancia de medición y  $\lambda$  es la longitud de onda. Posteriormente se plantea el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas y se resuelve para determinar la ganancia de cada una de las tres antenas  $G_1$ ,  $G_2$ , y  $G_3$  como se muestra en las ecuaciones 21 y 22:

$$\begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{13} \\ M_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & -0.5 & 0.5 \\ -0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{13} \\ M_{23} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Para obtener la ganancia de cada una de las antenas se resuelve la ecuación 22 para cada frecuencia en la medición. El sistema está completamente automatizado, donde se introduce el intervalo de frecuencias de medición de 0.5 a 6 GHz con 201 puntos o frecuencias de medición. En primer lugar se establece una potencia fija de 8 dBm y se conectan o unen los cables coaxiales para calibrar y determinar la potencia que se entregara a la antena receptora, considerando las pérdidas de los cables. Enseguida se conectan las antenas denominadas 1 y 2 que son del tipo Vivaldi de banda ancha desarrolladas en (Trujillo, 2012) y que operan de 1 a 18GHz, para obtener la medición (Med12). Se desconecta la antena 2 (Vivaldi) y se conecta la antena 3 que es la antena bajo prueba objeto de este trabajo de tesis y se realiza la medición (Med13). Por último, se desconecta la antena 1 (Vivaldi) y se conecta la antena 2 (Vivaldi) para realizar la medición (Med23). Posteriormente se calculan las pérdidas por propagación en función de la frecuencia y la distancia establecida de 1.5 metros que oscilan entre -30dB y -52dB como se muestra en la figura 77, se corrigen las potencias y se determina la ganancia de cada una de las tres antenas. En la figura 78 se muestra la configuración del equipo utilizado para determinar la ganancia.



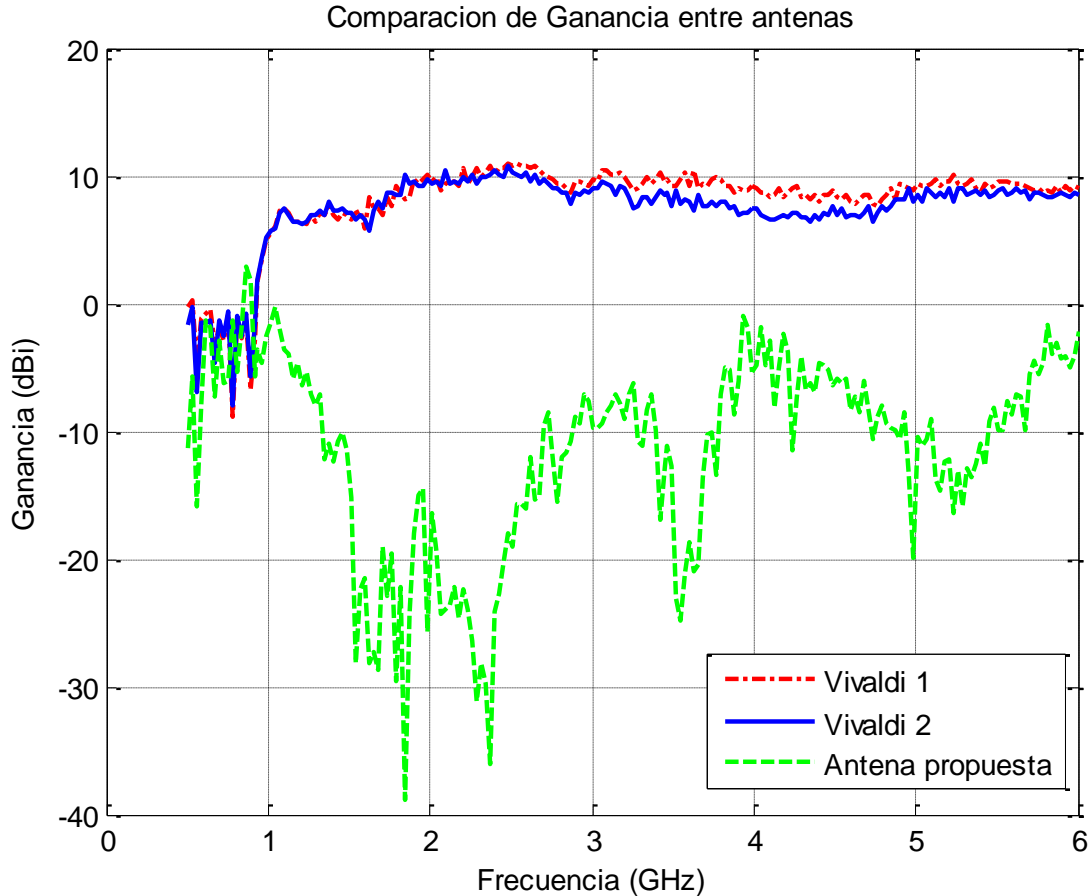
**Figura 77. Pérdidas por propagación en función de la frecuencia y a una distancia de 1.5m.**





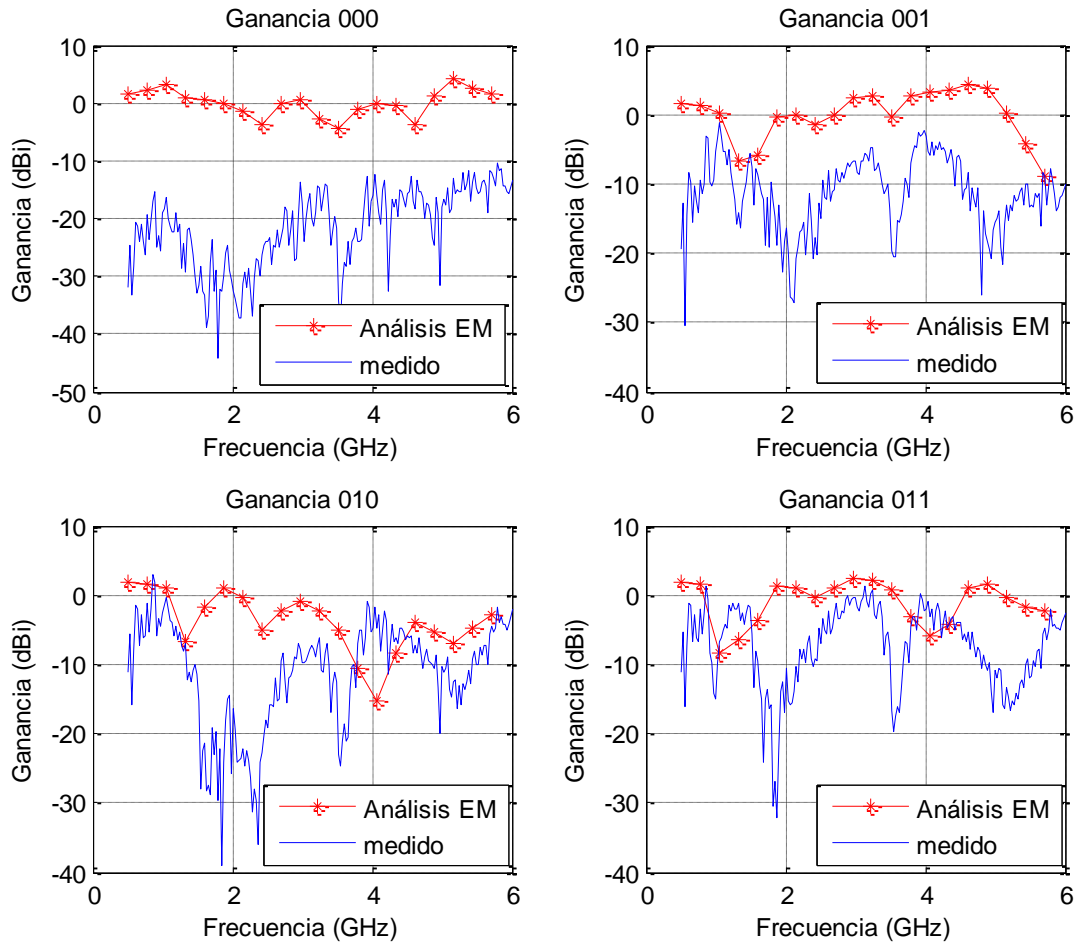
**Figura 78. Equipo utilizado en la medición de la ganancia de la antena reconfigurable.**

En la figura 79 se presentan las ganancias de las antenas 1 y 2, que son las dos Vivaldi (Gant1 y Gant2), y la antena 3 (Gant3) corresponde a la antena reconfigurable B en el modo 010 que opera de 0.68 a 0.96 GHz. La antena Vivaldi proporciona una mayor ganancia sobre todo en las frecuencias altas, debido a que las antenas Vivaldi son de mayor tamaño que la antena multibanda reconfigurable desarrollada en este trabajo de tesis.



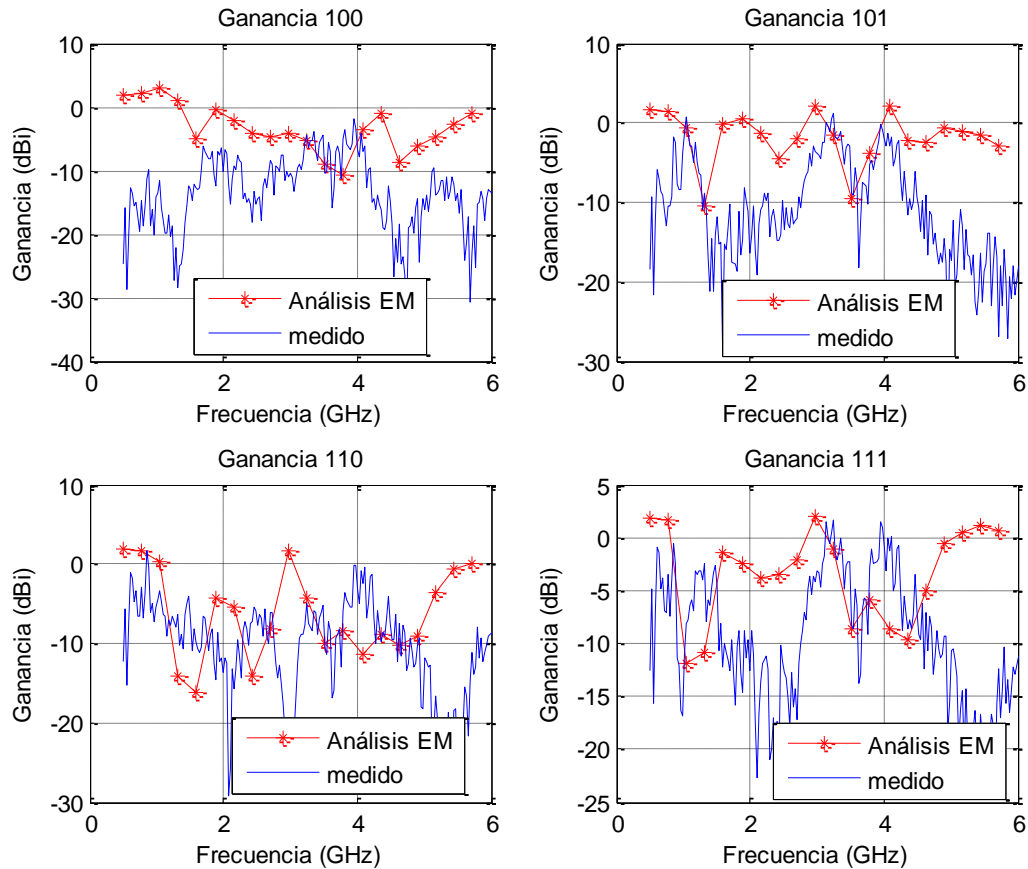
**Figura 79. Medición de la ganancia de la antena multibanda vs las antenas Vivaldi.**

En la figura 80 se presentan las ganancias obtenidas para las cuatro primeras configuraciones (000), (001), (010) y (011) comparando sus valores medidos con los obtenidos del análisis electromagnético en CST. Se puede observar que la configuración (000) no coincide y es donde todos los diodos están apagados, mientras que en las otras configuraciones (010) y las otras coinciden para algunos rangos de frecuencia. Esta diferencia se debe a que en el análisis no se consideró el conector SMA ni el cable, que los diodos tienen pérdidas que provocan una reducción en la ganancia, que los patrones de radiación no son omnidireccionales y tienen una ganancia menor en la dirección cero como se podrá apreciar en la sección 4.2.3, y que las dimensiones de la antena construida difieren en cierta manera de los valores calculados.



**Figura 80. Ganancia medida vs análisis electromagnético para los primeros 4 modos.**

Como se puede observar en la figura 81 para los últimos cuatro modos, ocurre un efecto similar que en los primeros cuatro modos, donde la ganancia medida difiere de la ganancia obtenida del análisis electromagnético. Esta diferencia se debe a que el patrón de radiación de algunos modos de operación de la antena reconfigurable no es omnidireccional como en los modos 001 y 100, excepto en el modo 010 que es donde la antena central está activada, la cual opera en la banda de 800MHz. Además, difieren porque en el análisis electromagnético no se consideraron las pérdidas de los diodos PIN.



**Figura 81. Ganancia medida vs análisis electromagnético para los últimos 4 modos.**

### 4.2.3 Medición del Patrón de Radiación

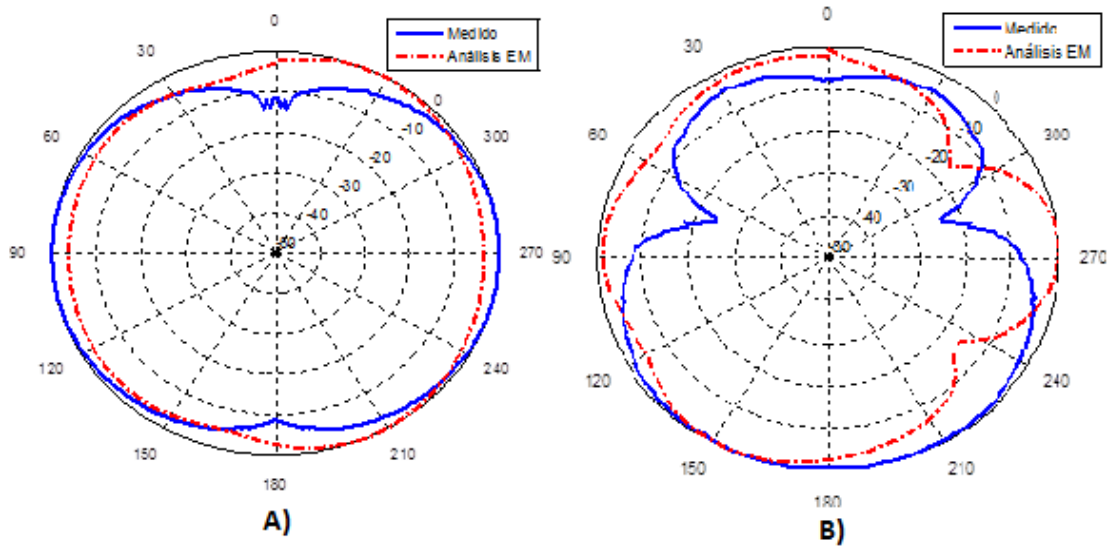
Para la caracterización del patrón de radiación se utiliza un generador de señales Rohde&Schwarz modelo SMB 100A que funciona de 100KHz a 40 GHz, al cual se le conecta la antena transmisora denominada Vivaldi. A una distancia de 1.5 metros de la transmisora, se coloca la antena reconfigurable desarrollada en este trabajo y que funciona como receptora, sobre el poste de la mesa rotatoria que gira 360 grados en pasos de 1 grado y se conecta a un analizador de espectros Rohde&Schwarz FSP que funciona de 9KHz a 40 GHz. Tanto el generador de señales como el analizador de espectros y la mesa rotatoria se controlan por una computadora portátil la cual se encarga de mover la antena y realizar las mediciones para obtener el patrón de radiación de manera automática. En la figura 86 se muestra el equipo utilizado, donde se puede apreciar que las mediciones se hicieron al aire libre para evitar o minimizar reflexiones.



**Figura 82:** Configuración de los equipos para medir el patrón de radiación de las antenas.

El patrón de radiación se midió en dos planos: en el plano E y el plano H. Para obtener el plano H se debe girar la antena  $90^\circ$  con respecto al plano E y viceversa. Una vez que el equipo ha sido calibrado, se procede a medir los patrones de radiación a las frecuencias de 0.845GHz, 1.57542GHz, 1.793GHz, 2.02GHz, 2.424GHz y 5.8GHz, las cuales se seleccionaron para los rangos de frecuencia en los cuales operan algunas configuraciones.

En la figura 83 se muestra el patrón de radiación en los planos H y plano E obtenidos de la medición para la frecuencia de 1.793GHz en el modo (001), comparados con los patrones obtenidos del análisis electromagnético. Se puede observar en la figura 83 que el  $HPBW_H$  (ancho del haz de mediana potencia en el plano H) medido es de  $128^\circ$ , con un máximo en  $92^\circ$  mientras que el obtenido en el análisis electromagnético el  $HPBW$  es de  $70^\circ$ . Para el  $HPBW_E$  medido es de  $122^\circ$ , con un máximo en  $170^\circ$ , mientras que el  $HPBW$  obtenido del análisis electromagnético es de  $35^\circ$  con un máximo en  $150^\circ$  y en  $275^\circ$ .



**Figura 83. Patrón de radiación medido vs análisis EM en forma polar a 1.793 GHz: a) plano H y b) Plano E.**

Como se puede apreciar, existen diferencias en los patrones de radiación, debido a que en el análisis electromagnético no se consideraron las pérdidas de los diodos PIN ni el conector coaxial de la antena.

En la figura 84 se presenta el patrón de radiación en 0.845 GHz, en donde se activa la antena B en el modo 010. Se puede observar que el  $HPBW_H$  medido es de  $232^\circ$ , con un máximo en  $164^\circ$  mientras que el  $HPBW$  obtenido en el análisis electromagnético es de  $75^\circ$ . Para el  $HPBW_E$  medido es de  $172^\circ$ , con un máximo en  $160^\circ$ , el  $HPBW$  del análisis EM es de  $80^\circ$ .

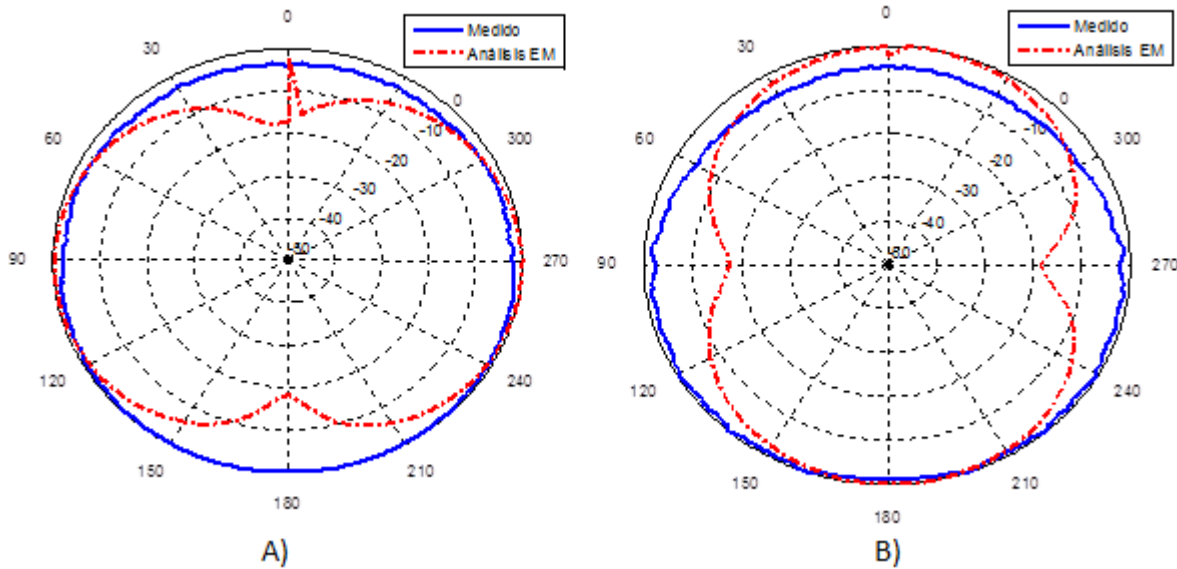


Figura 84. Medición de patrón de radiación de la antena B a 0.845GHz a) plano H y b) plano E

En la figura 85 se muestra el patrón de radiación a 2.04GHz, en donde la antena esta en modo 100 en donde se encuentra conectada la antena C. Se puede observar que el  $HPBW_H$  medido es de  $128^\circ$ , con un máximo en  $90^\circ$  mientras que el HPBW obtenido en el análisis electromagnético es  $105^\circ$  y son muy similares los patrones calculados vs los medidos.

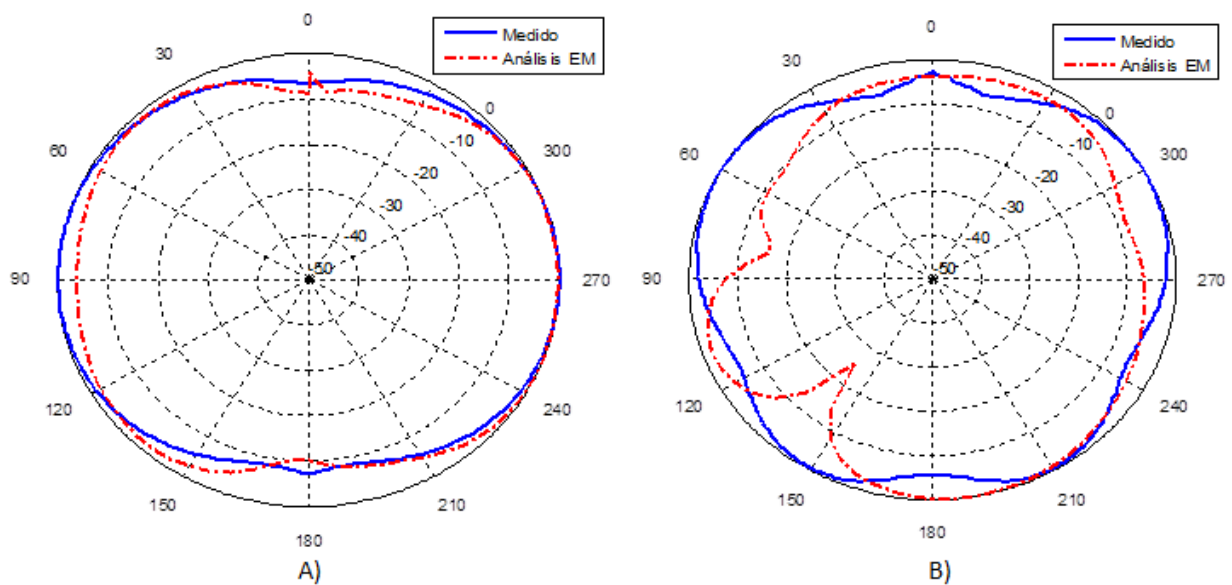
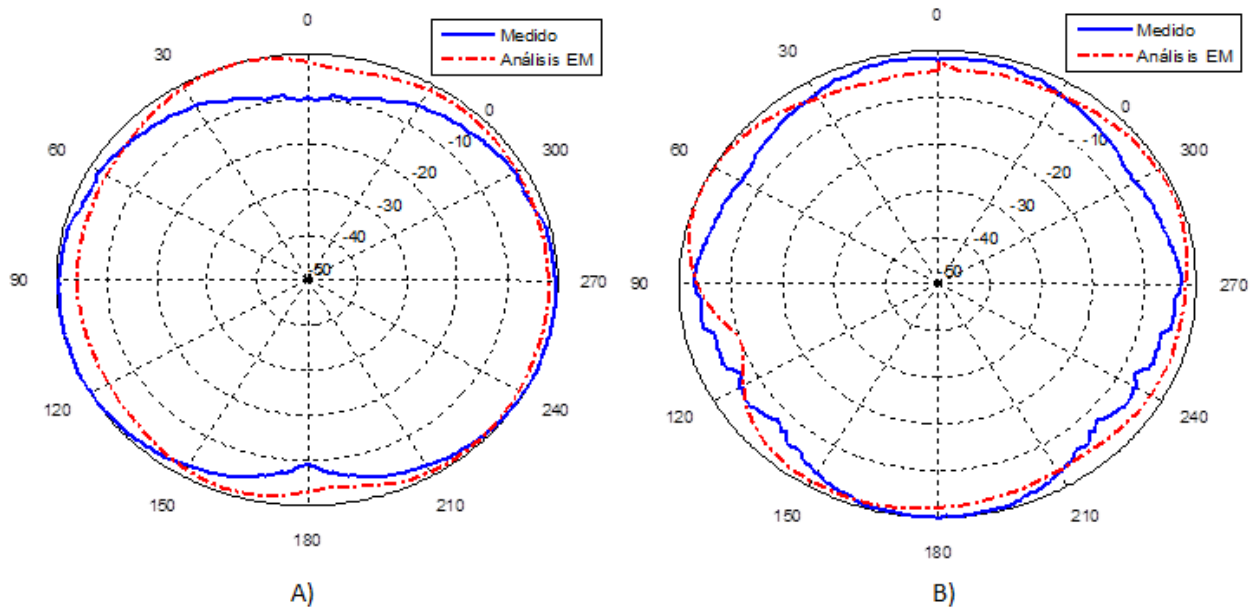


Figura 85. Medición de patrón de radiación de la antena C a 2.04GHz a) plano H y b) plano E.

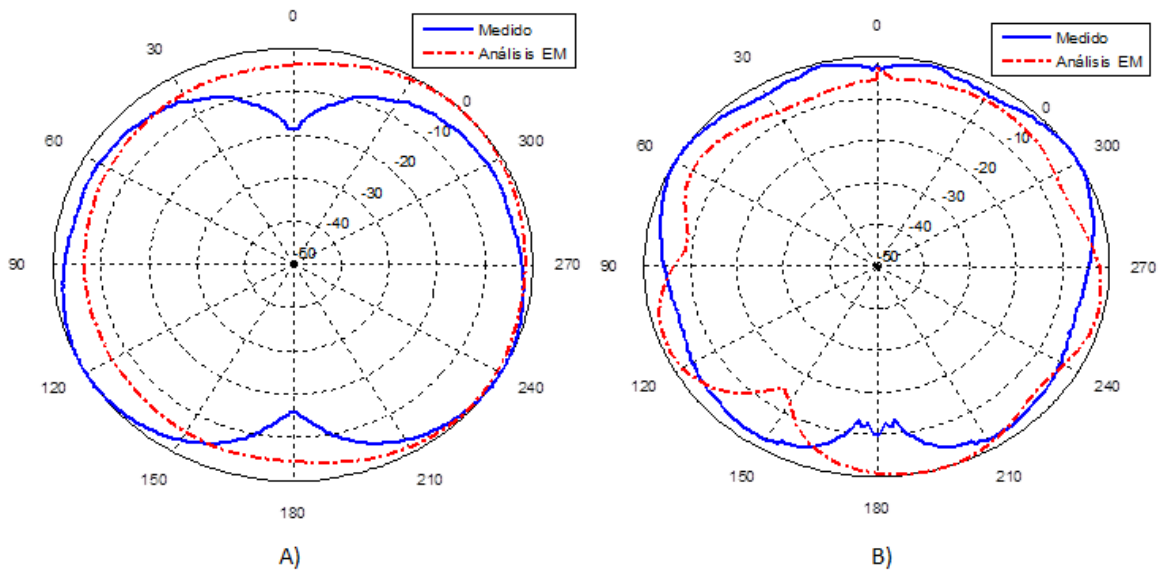
Para el plano E, el  $HPBW_E$  medido es de  $74^\circ$ , con dos máximos en  $59^\circ$  y  $147^\circ$ , mientras que el HPBW del análisis EM es de  $50^\circ$ . En la figura 86 se presenta el patrón de radiación cuando todas las antenas están encendidas, es decir en el modo 111 en 1.57 GHz. Se observa que el  $HPBW_H$  medido es de  $86^\circ$ , con un máximo en  $105^\circ$  mientras que el HPBW obtenido en el análisis electromagnético es  $40^\circ$ , para el  $HPBW_E$  medido es de  $60^\circ$ , con un máximo en  $180^\circ$ , mientras que el HPBW obtenido del análisis electromagnético es de  $55^\circ$ .



**Figura 86. Medición de patrón de radiación de las antenas A, B y C a 1.57542GHz a) plano H y b) plano E.**

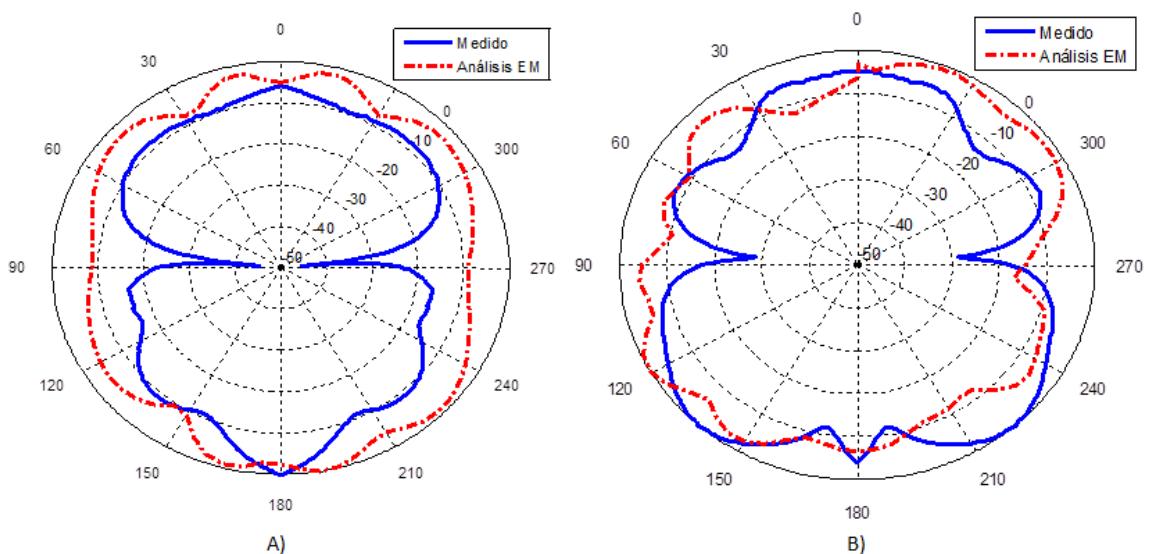
En la figura 87 se muestra el patrón de radiación a 2.425 GHz, donde la antena está en el modo 111 con las tres antenas conectadas. Se puede apreciar que el  $HPBW_H$  medido es de  $70^\circ$ , con un máximo en  $117^\circ$  mientras que el HPBW obtenido en el análisis electromagnético es  $155^\circ$ , para el  $HPBW_E$  medido es de  $52^\circ$ , con un máximo en  $56^\circ$ , en el análisis electromagnético se obtuvo un HPBW de  $30^\circ$ .





**Figura 87.** Medición de patrón de radiación de las antenas A, B y C a 2.425GHz a) plano H y b) plano E.

En la figura 88 se muestra el patrón de radiación a 5.8 GHz, donde la antena está en el modo 011 con las antenas A y B conectadas. Se observa que el  $HPBW_H$  medido es de  $16^\circ$ , con un máximo en  $180^\circ$ , mientras que el HPBW obtenido en el análisis electromagnético es de  $25^\circ$ . Para el  $HPBW_E$  medido es de  $28^\circ$ , con un máximo en  $139^\circ$ , mientras que el HPBW del análisis electromagnético es de  $20^\circ$  con un máximo en  $120^\circ$ .



**Figura 88.** Medición de patrón de radiación de las antenas A y B a 5.8GHz a) plano H y b) plano E.

## Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos en las etapas de diseño, construcción y caracterización de la antena reconfigurable multibanda desarrollada en este trabajo de tesis.

En primer lugar, se presentaron las diferentes antenas reconfigurables que se pueden encontrar en la literatura, en donde la mayoría son antenas reconfigurables para UWB. Sin embargo, también se presentaron antenas reconfigurables con aplicación en telefonía celular, pero estas solo operaban en 4 bandas de frecuencia. Además, se estudió el tipo de topología más adecuada, en donde se consideró que las antenas anidadas representan una buena opción, la cual se utilizó. Además, se estudiaron los diferentes dispositivos para realizar interruptores y conmutar para cambiar la banda de operación de las antenas, como los diodos varactores, MEMS, transistores FET y los diodos PIN, siendo estos últimos los utilizados en este trabajo de tesis, por las ventajas de costo, tamaño, pérdidas y consumo de corriente.

En el capítulo dos, se describieron los parámetros de las antenas, así como los diferentes tipos de antenas que existen, haciendo énfasis en las antenas de microcinta, debido a las ventajas que presentan con respecto a las antenas convencionales, para su implementación en dispositivos portátiles, en la cual se basa este trabajo de tesis. Cuando se presentaron las estructuras de antenas reconfigurables multibanda encontradas en la literatura, se observó que las antenas que trabajan a más bajas frecuencias son de gran tamaño, en donde se consideran pérdidas por retorno aceptables de  $<-6\text{dB}$  ( $\text{VSWR}<3$ ). Dado que la antena multibanda desarrollada es reconfigurable, se presentaron los diversos interruptores de RF mayormente usados, en donde el diodo PIN presentaba muy buenas características y su bajo costo comparado con los otros interruptores de RF. En este trabajo de tesis se aprendió a utilizar el software CST Microwave Studio y ADS de Agilent, que son herramientas que permiten realizar el análisis electromagnético de estructuras planares. Debido a que el CST trabaja en 3D y el ADS en 2.5D, se decidió utilizar el CST para efectuar el análisis electromagnético de la antena reconfigurable multibanda. Sin embargo, se utilizó la herramienta LineCalc de ADS para calcular el ancho de una línea de transmisión de 50

ohms, y para calcular la longitud de una línea de transmisión de  $90^\circ$  eléctricos necesaria para el FPB del diodo PIN.

En el capítulo 3 se presenta la metodología de diseño que se utilizó para realizar el diseño de la antena propuesta. La antena diseñada opera en la banda de baja frecuencia dentro de las bandas de frecuencia de: LTE700, GSM850 y GSM900 con un  $VSWR < 3$ . En la banda de alta frecuencia funciona en las bandas de: GPS, DCS, PCS, UMTS2100, LTE2300 y WiFi 802.11 b/g/ a 2.4 GHz con un  $VSWR < 2$  y adicionalmente, se cubre la banda de WiFi 802.11a en la banda de 5.8 GHz.

La topología de la antena desarrollada en este trabajo emplea tres resonadores para cubrir las especificaciones de diseño, cumpliendo los requerimientos. Incluso se logró que operara en las bandas de GPS las cuales no estaban contempladas originalmente, así como en la banda de 5.8GHz.

La discrepancia entre los resultados teóricos y experimentales en la mayoría de los parámetros, se atribuye a que las dimensiones físicas reales de la antena construida son distintas a las obtenidas del diseño. Además de que en el análisis electromagnético de la antena no se consideró el efecto del conector SMA y el cable coaxial utilizado en la medición. Se supone que la diferencia se debe principalmente a que en el análisis electromagnético no se consideraron las pérdidas de los diodos PIN, ya que en el análisis electromagnético se consideran como interruptores ideales.

Es importante mencionar que al tener la antena múltiples resonadores, estos se acoplan provocando la aparición o cancelación de resonancias que se tienen al utilizar un resonador único, por lo cual el proceso de diseño se dificulta, ya que se tiene que buscar un compromiso entre la separación de los elementos resonantes. Especialmente cuando la antena debe tener dimensiones pequeñas y los resonadores se acoplan unos con otros por su cercanía.

También se investigó la manera de controlar los diodos PIN por medio de la computadora, lo cual facilita las mediciones, ya que se controla el encendido y apagado de los diodos. Se investigaron las diferentes maneras de utilizar el puerto USB, en donde se seleccionó el módulo integrado FT245RL, el cual permite tener 8 puertos configurables como entradas y salidas con una salida de voltaje de 5V. Dado que para activar el Diodo PIN se requieren 1.45V, se diseñó un circuito regulador de voltaje utilizando componentes de montaje superficial montados en la antena.

Para la medición del patrón de radiación, se trabajó en equipo con otros tres compañeros de la maestría y el Dr. JL. Medina para desarrollar una mesa rotatoria la cual gira en pasos de  $1^\circ$ , con el fin de automatizar el proceso de medición del patrón de radiación y reducir el tiempo de medición y graficado. Dados todos los resultados presentados anteriormente, se concluye que la antena reconfigurable multibanda desarrollada en este trabajo de tesis cumple las especificaciones de ancho de banda, pérdidas por retorno, ganancia y patrón de radiación, con un tamaño reducido comparado con otros trabajos reportados en la literatura. A pesar de que la ganancia de la antena resulto menor que la calculada, se puede decir que en las bandas donde opera cada antena se reciben niveles adecuados de potencia. Además, debido a su tamaño final, la antena puede ser implementada en dispositivos móviles: *smartphones* de gama alta, tablets, o Laptops.

## Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En este último capítulo se presentan las conclusiones generales de este trabajo de tesis, resaltando las principales aportaciones. Además, se proporcionan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

### 6.1 Conclusiones generales

- Se investigaron las diferentes topologías de antenas reconfigurables multibanda, con el fin de conocer y comparar los diferentes métodos y técnicas empleadas en el desarrollo de antenas multibanda para dispositivos portátiles.
- Se propone una topología de la antena, la cual se basa en una configuración de antenas anidadas de microcinta, que permite cubrir las diferentes bandas de frecuencia establecidas en un tamaño compacto.
- El diseño de antenas compactas que operan a frecuencias menores a 1GHz, se vuelve más complejo, ya que las antenas tienen a ser mayores, debido a la longitud de onda que se tiene a bajas frecuencias.
- El agrupar elementos radiantes, dificulta el diseño, ya que tienen a acoplarse y desacoplarse entre ellos, por lo que se tiene que buscar la distancia óptima entre los elementos.
- Se optimizó el tamaño de la antena reduciendo su tamaño un 10%, al hacer un compromiso entre la longitud y ancho del plano de tierra con el ancho y largo de los elementos radiantes de la antena,
- Se realizó una investigación sobre los diferentes interruptores de RF necesarios para realizar la conmutación de los elementos de antena, y se seleccionó el diodo PIN por las ventajas que presenta: tamaño, costo y pérdidas y aislamiento.

- Se diseñó un circuito de alimentación que contiene un filtro pasa bajas realizado con elementos concentrados y un circuito regulador de voltaje necesarios para alimentar a los diodos PIN.
- Se propone utilizar el módulo FT245RL basado en la interfaz USB-FIFO como circuito de control, el cual permite controlar los diodos PIN desde el puerto USB de cualquier PC.
- La antena reconfigurable desarrollada opera desde 0.698 y hasta 6 GHz en las bandas establecidas: LTE700, GSM850, GSM900, GPS, DCS, PCS, UMTS2100, LTE2300 y WiFi 802.11 b/g/n y WiFi 802.11a.
- La antena construida en este trabajo de tesis tiene unas dimensiones totales de 2.47 x 60 x 140 mm, la cual se puede instalar perfectamente en los teléfonos móviles de gama alta, tablets y PC's.

## **6.2 Aportaciones.**

Enseguida se resaltan las aportaciones en este trabajo de tesis.

- Se propuso una topología de un arreglo de antenas anidadas, reconfigurables y compacta con aplicación en dispositivos móviles. Se realizó un análisis paramétrico para determinar las longitudes y anchos de cada elemento radiante de la antena, así como para el plano de tierra, con el fin de reducir el tamaño de la antena.
- Se diseñó y construyó un circuito de alimentación que contiene un filtro pasa bajas de tercer orden realizado con elementos concentrados y un circuito regulador de voltaje necesarios para alimentar a los diodos PIN.

- Se propuso utilizar el módulo FT245RL como circuito de control, el cual permite controlar los diodos PIN desde el puerto USB de cualquier PC para reconfigurar la antena de manera automática
- Se diseñó y construyó una mesa rotatoria, su circuito de control y el software que controla la mesa rotatoria por medio del puerto USB de una PC, para efectuar la medición automatizada del patrón de radiación y ahorrar tiempo en las mediciones al ser automatizado. Esto en conjunto con tres alumnos y un profesor.
- Se diseñó, construyó y caracterizó una antena reconfigurable multibanda que opera de manera adecuada desde 0.698GHz hasta 6 GHz en las bandas establecidas: LTE700, GSM850, GSM900, GPS, DCS, PCS, UMTS2100, LTE2300 y WiFi 802.11 b/g/n y WiFi 802.11a. La antena es compacta con dimensiones: 2.47 x 60 x 140 mm., teniendo aplicación en dispositivos móviles de gama alta, teléfonos, tablets y PC's. En la literatura no se encontró ninguna antena reconfigurable que funcione en todas las bandas que opera esta antena.

### **6.3 Recomendaciones y Trabajo Futuro**

En esta sección, se presentan algunas recomendaciones las cuales pueden ser consideradas para el diseño de antenas multibanda reconfigurables, o bien para ampliar la investigación en esta área.

- Se recomienda modelar los conectores SMA en el análisis electromagnético, con el fin de considerar cualquier efecto que pueda alterar el comportamiento de la antena.
- Se recomienda utilizar los parámetros S de los diodos PIN y efectuar una co-simulación electromagnética para considerar sus pérdidas y mejorar la convergencia entre los resultados teóricos y experimentales.

- Se recomienda utilizar software para el análisis electromagnético en 3D, como el que se utilizó en este trabajo de tesis (CST) empleando un gran número de elementos en la discretización, para reducir el error con las mediciones.
- En este trabajo de tesis, el circuito de control se colocó en la tarjeta de evaluación del FT245RL. Para reducir el tamaño, se podría incorporar en la antena por la parte donde se encuentra el FPB y el circuito regulador de voltaje.
- Utilizar una maquina fotografadora láser para obtener directamente la mascarilla del circuito y disminuir el error en el proceso de construcción.
- Las mediciones del patrón de radiación, y la ganancia de la antena, se hicieron tratando de reducir las reflexiones en campo abierto, así como las interferencias midiendo en frecuencias libres de señal. Sin embargo, lo ideal es que estas mediciones se realicen dentro de una cámara anecóica.



## Lista de referencias Bibliográficas

- Angus C. K. Mak, Corbett R. Rowell, Ross D. Murch, and Chi-Lun Mak, (2007) Reconfigurable Multiband Antenna Designs for Wireless Communication Devices , *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, Volumen: 55, 7, pp.1919-1928.
- Balanis Constantine A. (2005), *Antenna Theory*, New Jersey, *Third Edition*. 27-70 pp.
- Boyle, K.R., Steeneken, P.G.: A five-band reconfigurable PIFA for mobile phones, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2007, 55, (11), pp. 3300-3309.
- Cardama, Jofre, Rius. (2002), *Antenas*, UPC, Barcelona, segunda edición. 16 pp.
- Cho, J., Jung, C.W., Kim, K. (2009), Frequency-reconfigurable two-port antenna for mobile phone operating over multiple service bands , *Electron. Lett.*, v45, n20, pp. 1009-1011.
- Chunna Zhang; Songnan Yang (2006), Development of reconfigurable mini-nested patches antenna for universal wireless receiver using MEMS, *Antenna and wireless propagation letters*, IEE, pp. 205-208.
- Chunna Zhang; Songnan Yang (2009), A low-profile branched monopole laptop reconfigurable multiband antenna for wireless application, *Antenna and wireless propagation letters*, IEE, V8, pp. 216-219.
- D. N. Elsheakh, H. A. Elsadek, and E. A. Abdallah (2010), Reconfigurable single and multiband inset feed microstrip patch antenna for wireless communication devices, *Progress in Electromagnetics Research C*, Vol. 12, 191-201.
- Fallahpour, M.; Ghasr, M.T.; Zoughi, R.,(2012), A multiband reconfigurable CPW-fed slot antenna, *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, pp. 1- 2
- Ghasemi, A.; Ghahvehchian, N, (2012), A reconfigurable printed monopole antenna for MIMO application, *Antennas and Propagation (EUCAP)*, 6<sup>th</sup> European conference, pp. 1-4.
- Haupt, R.L., Lanagan, M, (2013) Reconfigurable Antennas, *Antennas and Propagation Magazine*, *IEEE Vol 55, Issue: 1*, pp. 49- 61.
- J. R. Kelly, P. Song, P. S. Hall, and A. L. Borja; (2011), Reconfigurable 460MHz to 12GHz antenna with integrated narrowband slot, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 24, pp.137-145.
- M. A. Madi, M. Al-Husseini, A. H. Ramadan, K. Y. Kabalan, and A. El-Hajj, (2012) A reconfigurable cedar-shaped microstrip antenna for wireless applications,

Antennas and Propagation, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 25, 209-221.

- M.-J. Lee, Y. S. Kim, and Y. Sung,(2012), Frequency reconfigurable planar inverted-f antenna (PIFA) for cell-phone applications, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 32, 27-41.
- Mak, A.C.K. ; Rowell, C.R. ; Murch, R.D. ; Chi-Lun Mak, (2007), Reconfigurable Multiband Antenna Designs for Wireless Communication Devices, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on Vol 55, Issue: 7, July 2007*, pp. 1919-1928.
- Nurulazlina Ramli, Mohd Tarmizi Ali, Azita Laily Yusof, Suzilawati Muhamud-Kayat, and Hafiza Alias (2013) Aperture-coupled frequency-reconfigurable stacked patch microstrip antenna (frspma) integrated with pin diode switch, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 39, pp. 237-254.
- Pazin, L.; Leviatan, Y., (2013), Reconfigurable Slot Antenna for Switchable Multiband Operation in a Wide Frequency Range, *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE Vol12*, pp. 329- 332.
- Permana, C.G; Munir, A, (2011), Printed Multiband Antenna for Mobile and Wireless Communications, *Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), 2011 6th International Conference on*, pp. 236- 240.
- Ramadan H. A., K. Y. Kabalan, A. El-Hajj, S. Khoury and M. Al-Husseini, (2009) A reconfigurable U-Koch microstrip antenna for wireless applications, *Progress In Electromagnetics Research, PIER 93*, pp. 355-367.
- Rowell, C; Lam, E. (2012), Mobile-Phone Antenna Design, *Antennas and Propagation Magazine, IEEE Vol 54, Issue: 4*, pp. 14- 34.
- RuiZhi Jiu, FanYi Meng, and KunPeng Feng, (2011), Reconfigurable Multiband Antenna for Mobile Terminals, *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Vol 1*, pp. 527-529.
- S. Mana, S. Nikmehr, and M. Bemani, (2012), A planar reconfigurable multifunctional antenna for WLAN/WIMAX/UWB/PCS-DCS/UMTS applications, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 26, pp.123-137.
- Songnan Yang ; Fathy, A.E. ; Nair, V.K., (2008), Reconfigurable multi-band twin-PIFA antennas for Wi-Fi/WiMAX and WWAN services on a multi-radio laptop platform , *Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S 2008. IEEE*, pp.1-4.

- Tawk, Y. ; Costantine, J. ; Christodoulou, C.G., (2011), A Rotatable Reconfigurable Antenna for Cognitive Radio Applications, *Radio and wireless symposium (RWS), IEEE*, pp.158-161.
- Trong Duc Nguyen ; Duroc, Y. ; Van Yem Vu ; Tan Phu Vuong, (2012), Frequency reconfigurable PIFA antenna driven by microcontroller, *Communications and Electronics (ICCE), 2012 Fourth International Conference on*, pp. 406- 410.
- Wei Zhou; Arslan, T. ; Benkrid, K. ; El-Rayis, A.O. ; Haridas, N., (2013), Reconfigurable feeding network for GSM/GPS/3G/WiFi and global LTE applications, *Circuits and Systems (ISCAS), 2013 IEEE International Symposium on*, pp. 958- 961
- Weiping Zhuo ; Gang Yan ; Donghai Yu, (2010), Reconfigurable Multiband Antenna Design for Mobile Phones, *Signals Systems and Electronics (ISSSE), 2010 International Symposium on, Volume 2*, pp. 1- 4.
- Y. Sung, (2012), Compact quad-band reconfigurable antenna for mobile phone applications, *Electronics Letters, Volume 48, Issue 16, 2 August 2012*, pp. 977 – 979.
- Zhu, H.; Liu, X.; Cheung, S.; Yuk, T., (2013), Frequency Reconfigurable Antenna using Metasurface, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, Volume: PP , Issue: 99, 2013*, pp. 1
- Zulkifli, F.Y.; Halim, H., Rahardjo, E.T., (2008), A Compact Multiband Microstrip Antenna Using U and S slot, *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE*, pp.1-4