

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**Diseño y Validación de Antenas Flexibles en
la Banda de 4G/LTE para Sistemas de Radio
Comunicación Móvil con Geometría Esférica**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el
título de Ingeniero en Electrónica con el grado
académico de Licenciatura

Rolando Coto Salazar

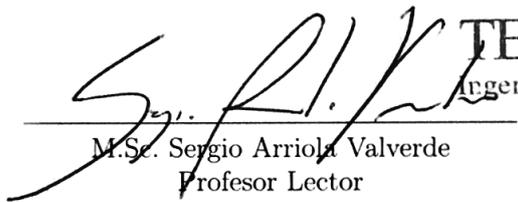
Cartago, Costa Rica

21 de junio de 2018

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Electrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

Proyecto de graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal


M.Sc. Sergio Arriola Valverde
Profesor Lector



M.Sc. Roberto Molina Robles
Profesor Lector


Dr.-Ing. Renato Rímolo Donadio
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 13 de junio de 2018

Declaratoria de autenticidad

Yo, Rolando Coto Salazar, cédula 3-0485-0793, estudiante de la carrera de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, carné 2013115944, declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado por mi persona, empleando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En el caso de la bibliografía utilizada, he procedido a referenciar cada una de las fuentes mediante su respectiva cita bibliográfica.



Rolando Coto Salazar

Cartago, 13 de junio de 2018

Cédula: 3-0485-0793 Carné: 2013115944

Resumen

El presente trabajo muestra el proceso de estudio, diseño e implementación de antenas flexibles multibanda para aplicaciones de *4G/LTE*. Dichas antenas deberán de ser aptas para ajustarse a las dimensiones de una geometría esférica y operar en las bandas de telefonía celular de operadores de servicios en Estados Unidos. Los modelos de simulación de antenas se analizan en función de parámetros de microondas en superficies planas y bajo deformación en la proximidad del dispositivo. Las pruebas de antenas físicas en términos de pérdidas de retorno ($|S_{11}|$) se realizan en el laboratorio para validar la metodología y los resultados de simulación. Se proponen finalmente dos diseños, los cuales son implementados exitosamente, basados en antenas triangulares y de cavidad *PIFA*.

Palabras clave: Antena, *4G/LTE*, flexible, multibanda, pérdidas de retorno, *Bounce Explorer(BE)*.

Abstract

The present work shows the process of study, design, and implementation of multi-band flexible antennas for 4G/LTE applications. These antennas must be able to adjust physically to the dimensions of spheric geometry and operate in the cellular telephone bands of service operators in the United States. Antenna simulation models are analyzed based on microwave parameters on flat surfaces and under deformation in the vicinity of the device. The tests of physical antennas are carried out in terms of return loss measurements ($|S_{11}|$) to validate the methodology and the simulations results. Two designs are finally proposed, which are successfully implemented, based on triangle shape antennas and cavity PIFA.

Keywords: Antenna, 4G/LTE, flexible, multi-band, return loss, Bounce Explorer (BE).

a mis amados padres y mi sobrino Luca

Agradecimientos

El presente proyecto de graduación es una dedicatoria especial para mi padre, Joaquín y mi madre, Magaly. Mis amados padres, una fuente de amor y apoyo incondicional, los cuales han sido parte intrínseca de mi crecimiento moral, ético y académico a lo largo de todos estos años; agradezco a Dios cada uno de sus consejos, enseñanzas y sacrificios. De igual forma, agradezco a Marco, Julián, Renato y Luca, mis hermanos, por ser parte de mi motivación y razón de aspirar a ser una mejor persona día con día.

Agradezco la asesoría y enseñanza brindada por distintos profesores, ellos han sido la fuente de sabiduría y conocimiento que han llevado la formación de un nuevo ingeniero dispuesto a servir al país. Debo agradecer de manera especial al profesor Dr.-Ing. Renato Rímolo Donadío, por su guía, apoyo, consejos y valiosas enseñanzas durante el desarrollo de este proyecto. A él mi admiración total por su humildad y vasto conocimiento. Además, agradezco a M.Sc. Sergio Arriola Valverde por sus consejos y apoyo. Agradezco a Francisco Aguilar, Fabián Zamora y Esteban Martínez por la colaboración brindada en las diferentes etapas del proyecto

También, no menos importante, deseo extender mi agradecimiento a todas las personas que han formado parte de mi etapa universitaria, con mayor énfasis a Brenda Solís, Gabriel Rodríguez, Javier Aparicio, Daniel León, Daniel Sandoval y Amit Ferencz los cuales son personas maravillosas que me brindaron su amistad y ayuda. A la vida, le doy gracias por ponerlos en mi camino.

Rolando Coto Salazar

Cartago, 21 de junio de 2018

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Organización del trabajo	2
2. Fundamentos para el Diseño de Antenas	4
2.1. Teoría de antenas	4
2.1.1. Resonancia	5
2.1.2. Pérdidas de retorno	5
2.1.3. Banda de operación	5
2.1.4. Patrón de radiación	5
2.1.5. Regiones de campo	6
2.1.6. Directividad	7
2.1.7. Ganancia	7
2.1.8. Eficiencia	8
2.1.9. Polarización	8
2.2. Líneas de transmisión y conectores de Radio Frecuencia	9
2.2.1. Líneas de transmisión	9
2.2.2. Cable coaxial	10
2.2.3. Línea de microcinta	11
2.2.4. Línea coplanar <i>waveguide</i>	11

2.3.	Tipos de antenas	12
2.3.1.	Antena monopolo plana	12
2.3.2.	Antena PIFA	15
2.4.	Tecnología de fabricación de circuitos impresos	16
2.4.1.	Substratos	17
2.5.	Técnicas de fabricación	21
2.5.1.	Grabado químico (<i>Chemical Etching</i>)	21
2.5.2.	Tinta de impresión (<i>Inkjet printing</i>)	22
2.5.3.	Remoción de cobre por <i>LDI</i> (<i>Laser Direct Imaging</i>)	23
2.6.	Servicios de comunicaciones inalámbricas	23
2.6.1.	GSM y UMTS	23
2.6.2.	Long Term Evolution	24
2.6.3.	Operadores de telefonía celular en Estados Unidos	26
3.	Metodología de Análisis y Diseño de Antenas Multibanda	27
3.1.	Evaluación y modelado numérico de antenas	28
3.1.1.	Antena monopolo serpenteada	29
3.1.2.	Antena <i>PIFA</i>	34
3.1.3.	Antena comercial <i>Taoglas fxub63</i>	38
3.2.	Diseño y optimización de antenas multibanda	40
3.2.1.	Selección del sustrato	41
3.2.2.	Antena <i>bowtie</i>	41
3.2.3.	Análisis paramétrico	42
3.2.4.	Deformación en espacio libre	47

3.2.5.	Variaciones de diseño de antena <i>bowtie</i>	49
3.2.6.	Desempeño de la antena en la proximidad de un plano de blindaje esférico	52
3.2.7.	Antena <i>PIFA</i> flexible	56
3.2.8.	Análisis paramétrico	57
3.2.9.	Desempeño de la antena en la proximidad del modelo esférico	61
3.3.	Fabricación de las antenas	63
4.	Validación y Análisis de Resultados	65
4.1.	Mediciones en superficie plana	65
4.1.1.	Antena <i>bowtie</i>	66
4.1.2.	Antena <i>PIFA</i> flexible	69
4.2.	Mediciones en modelo esférico	70
4.2.1.	Antena <i>bowtie</i>	71
4.2.2.	Antena <i>PIFA</i> flexible	75
5.	Conclusiones y Recomendaciones	78
6.	Bibliografía	80

Índice de Figuras

1.1. Dispositivo de radio comunicación móvil <i>Bounce Explorer Tactical Edition</i> , tomado de [3].	1
2.1. Modelo de antena como medio transductor, tomado de [6].	4
2.2. Patrón de radiación de antena dipolo, obtenido de [4].	6
2.3. Regiones de radiación de antena de dimensión máxima D, tomado de [11]. . .	7
2.4. Pérdidas asociadas a una antena, tomado de [11].	8
2.5. Polarización de ondas electromagnéticas [15].	9
2.6. Tipos de líneas de transmisión[16].	10
2.7. Campos eléctricos y magnéticos de una línea coaxial[17].	10
2.8. Tipos de líneas de transmisión[16].	11
2.9. Guía de onda coplanar [19].	12
2.10. Antena monopolo plano simple [22].	13
2.11. Antena de tipo S y T [22].	13
2.12. Antena monopolo de doble banda [22].	14
2.13. Pérdidas de retorno de antena monopolo de doble banda [22].	14
2.14. Coeficiente de reflexión de antena monopolo de doble banda en substrato flexible [9].	15
2.15. Antena plana F-invertida, adaptada de [25].	15
2.16. <i>Stackup</i> de una capa de placa flexible de una sola cara de cobre [30].	16
2.17. Curva de esfuerzo contra deformación [36].	20
2.18. Proceso de fabricación foto sensible[9].	21
2.19. Proceso de fabricación <i>inkjet printing</i> [32].	22
2.20. Proceso de fabricación <i>LDI</i> [39].	23

3.1. Proceso de diseño, adaptado de [1].	27
3.2. Flujo de trabajo de modelado numérico de antenas multibanda.	28
3.3. Modelo de simulación parametrizado de antena monopolo plana para <i>tablet</i> [37].	29
3.4. Modelo de simulación de antena monopolo plana para <i>tablet</i> [37].	30
3.5. Pérdidas de retorno de modelo de simulación de monopolo serpenteado.	30
3.6. Patrón de radiación de ganancia en <i>dB</i> de modelo de simulación de antena monopolo plana para <i>tablet</i> [37].	31
3.7. Pérdidas de retorno de modelo de simulación de monopolo serpenteado.	31
3.8. Pérdidas de retorno de variación paramétrica de L_{strip}	32
3.9. Pérdidas de retorno de variación paramétrica de W_{strip}	33
3.10. Pérdidas de retorno de variación paramétrica de L_1	33
3.11. Modelo de simulación de <i>PIFA</i> rígida.	34
3.12. Pérdidas de retorno de antena <i>PIFA</i> en sustrato rígido simulado, tomado de [40].	35
3.13. Patrón de radiación <i>2D</i> de ganancia en <i>dB</i> de antena <i>PIFA</i> a $760MHz$, tomado de [40].	36
3.14. Patrón de radiación <i>2D</i> de ganancia en <i>dB</i> de antena <i>PIFA</i> a $1860MHz$, tomado de [40].	36
3.15. Estudio paramétrico de antena <i>PIFA</i> rígida.	38
3.16. Antena comercial <i>Taoglas fxub63</i> , tomado de [45].	39
3.17. Correlación de antena <i>Taoglas fxub63</i> sobre placa de acrílico de $2mm$ de espesor.	39
3.18. Efecto de superficie conductora en el coeficiente de reflexión de antena <i>Taoglas fxub63</i>	40
3.19. Modelo de simulación parametrizado de antena <i>bowtie</i> flexible	42
3.20. Iteraciones en la geometría de antena flexible multibanda.	43

3.21. Variaciones paramétricas de iteración a .	43
3.22. Variaciones paramétricas de iteración b con $L_1 = 90mm$.	44
3.23. Variaciones paramétricas de iteración c con $L_1 = 90mm$ y $L_2 = 85mm$.	45
3.24. Variaciones paramétricas de iteración d .	46
3.25. Puerto de modelo doblado	47
3.26. Deformación de la antena en el eje y debido a una curvatura de radio R .	48
3.27. Curvaturas en el eje y para la antena <i>bowtie</i> .	48
3.28. Deformación de la antena en el eje x debido a una curvatura de radio R .	48
3.29. Curvaturas en el eje x para la antena <i>bowtie</i> .	49
3.30. Variaciones de diseño de antenas <i>bowtie</i> .	49
3.31. Pérdidas de retorno de variaciones de modelos de simulación de antenas <i>bowtie</i> .	51
3.32. Patrón de radiación de ganancia en dB de variación 1 de antena <i>bowtie</i> en espacio libre.	52
3.33. Modelo de simulación doblados sobre para la antena <i>bowtie</i> .	53
3.34. Pérdidas de retorno de variaciones de modelos de simulación de antenas <i>bowtie</i> .	55
3.35. Modelo de simulación de antena <i>PIFA</i> flexible.	56
3.36. Análisis paramétrico de antena <i>PIFA</i> flexible de doble banda.	60
3.37. Patrón de radiación de antena <i>PIFA</i> flexible en espacio libre.	61
3.38. Modelo de simulación de antena <i>PIFA</i> flexible sobre carcasa esférica.	61
3.39. Pérdidas de retorno de variaciones(a) y (b) de simulación de antena <i>PIFA</i> flexible sobre superficie esférica.	62
3.40. Panel de antenas flexibles para geometría esférica.	63
4.1. Pruebas de laboratorio de antenas <i>bowtie</i> y <i>PIFA</i> sin deformación.	66
4.2. Pérdidas de retorno de variación (a) y (b) de antena <i>bowtie</i> .	67
4.3. Pérdidas de retorno de variación (c) y (d) de antena <i>bowtie</i> .	68

4.4. Pérdidas de retorno de variaciones (a) y (b) de antena <i>PIFA</i> sin doblar. . . .	70
4.5. Pruebas de laboratorio de antenas <i>bowtie</i> y <i>PIFA</i> sobre carcasa esférica. . . .	71
4.6. Pérdidas de retorno de variaciones (a) y (b) de antena <i>bowtie</i> sobre carcasa esférica.	72
4.7. Pérdidas de retorno de variaciones (c) y (d) de antena <i>bowtie</i> sobre carcasa esférica.	73
4.8. Modelo de simulación de variante 1 de antena <i>bowtie</i> flexionada.	74
4.9. Pérdidas de retorno de variaciones (a) y (b) de antena <i>PIFA</i> flexible sobre modelo esférico.	76

Índice de Tablas

2.1. Propiedades eléctricas de substratos flexibles [35].	19
2.2. Propiedades mecánicas de substratos flexibles [35].	19
2.3. Bandas de operación de GSM en FDD.	24
2.4. Bandas de operación de LTE en FDD.	25
2.5. Bandas de operación de LTE en TDD.	25
2.6. Bandas de LTE para FDD en región NAR.	26
3.1. Dimensiones de modelo de simulación de antena monopolo.	29
3.2. Dimensiones iniciales de modelos de simulación de antena <i>bowtie</i>	47
3.3. Desempeño en ancho de banda de las variaciones de modelos de simulación de antenas <i>bowtie</i>	52
3.4. Desempeño en ancho de banda de las variaciones de modelos de simulación de antenas <i>bowtie</i> flexionadas.	56
3.5. Ancho de banda de mediciones de las variaciones de los modelos de simulación de antenas <i>pifa</i> dobladas	62
4.1. Ancho de banda de mediciones de las variaciones de las antenas <i>bowtie</i> sin deformación.	69
4.2. Ancho de banda de mediciones de las variaciones de las antenas <i>bowtie</i> dobladas sobre modelo esférico.	75
4.3. Ancho de banda de mediciones de las variaciones de las antenas <i>PIFA</i> dobladas sobre esfera.	76

1 Introducción

Los dispositivos *wearables* y flexibles han ganado popularidad excepcional debido a su profundo potencial en una variedad de áreas vitales como salud, telefonía y ocio. El desarrollo de antenas flexibles y *wearables* ha provocado un particular interés debido a que los procesos involucrados en su diseño y fabricación son algo diferentes a los métodos convencionales de antenas en sustratos rígidos [1].

El aumento significativo de terminales móviles capaces de cubrir una o más bandas de frecuencias supone un reto a considerar para la electrónica flexible. La incursión de los sistemas modernos de comunicación como *LTE*, *WLAN* y *WiMAX* ha enfocado el diseño de antenas flexibles y *wearables* multibanda, compactas y de ancho de banda suficiente para cubrir al menos dos o más rangos de frecuencia de los operadores de servicios de telefonía celular [2].

El presente trabajo es una exploración académica realizada en el Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con la colaboración de *Bounce Imaging* [3], con el fin de evaluar diseños de antenas que puedan ser útiles en geometrías esféricas como la que se muestra en la 1.1.

Dado la particularidad de geometría del sistema de radio comunicación tratado, las antenas comerciales experimentan deficiencias en la banda deseada y no permiten mantener la transmisión de señales con buena calidad. Estas antenas poseen patrones de radiación escasamente directivos y que enfocan la potencia tanto en plano superior como en el inferior, lo que origina problemas de interferencia. Por esta razón se hace deseable el diseño de una antena que satisfaga las limitaciones actuales de la geometría de la figura 1.1.



Figura 1.1: Dispositivo de radio comunicación móvil *Bounce Explorer Tactical Edition*, tomado de [3].

El proyecto en cuestión tendrá énfasis en el diseño e implementación de antenas multibanda en el estándar de *LTE* que se acople a las dimensiones del modelo tratado y que

cubra en ancho de banda los rangos de frecuencia requeridos para operar en esta tecnología, que se extiende desde $698MHz$ hasta $3000MHz$ con bandas específicas para cada región. El proceso de diseño conlleva el análisis del prototipo en entornos bajo deformación física y la presencia de otros elementos en el entorno como capas de blindaje.

En la literatura reciente se han presentado múltiples tipos de antenas multibanda basadas en microcinta, debido a la ventaja de este tipo de antenas en cuanto a diseño, fabricación, costo y capacidad de miniaturización. De esta manera, se debe indagar en referencias acerca de los materiales conductores, substratos dieléctricos, tecnologías y métodos de fabricación para seleccionar las configuraciones a evaluar y servicios inalámbricos.

Las antenas a diseñar deben de funcionar como un medio de conexión inalámbrica entre el dispositivo móvil transmisor y el receptor, en un enlace *half-duplex*. Es por ello, que se hará el estudio de modelos y técnicas de diseño de antenas mediante simulaciones en entornos de simulación controlados para evaluar el desempeño con base en parámetros de microondas y patrón de radiación de ganancia o directividad [4].

El análisis se hará por medio de variaciones paramétricas sobre los modelos numéricos de simulación en superficies planas o curvas, con distintos materiales dieléctricos, dimensiones y bajo la premisa de modificar las antenas de manera que se logre alcanzar el desempeño suficiente.

1.1. *Objetivos*

1.1.1. *Objetivo General*

Evaluar antenas de geometría a la medida para la banda de telefonía celular *4G/LTE* ($698 - 3000MHz$), para un sistema de radio comunicación móvil de geometría esférica.

1.1.2. *Objetivos Específicos*

1. Definir una tecnología de fabricación de circuitos impresos para la implementación de la antena.
2. Diseñar los prototipos de antenas, estimando su desempeño a través de simulaciones de onda completa en entornos controlados.
3. Implementar variantes de diseño de las antenas, validando su funcionamiento a través de mediciones de laboratorio.

1.2. *Organización del trabajo*

La organización de este informe se resume en 4 capítulos. En el capítulo 2 se fundamenta la base teórica para el desarrollo y comprensión de los siguientes capítulos. Se definen los

términos básicos de la teoría de antenas, como por ejemplo, el concepto de antena, patrón de radiación, ganancia, directividad, polarización, líneas de transmisión, antenas multibanda y sus configuraciones. Además, se repasan algunos de los materiales dieléctricos y métodos de fabricación de electrónica flexible. Se hace una revisión de las bandas de operación de las tecnologías de *3G* y *4G/LTE*.

Por otro lado, en el capítulo 3 se presentan los prototipos de antenas analizados que dan paso al diseño final, se denotará cada una de las iteraciones realizadas para obtener un modelo de antena para el sistema de radio comunicación móvil. Se justificará cada paso con los resultados y análisis de los mismos de cara a la correlación del modelo de simulación con el fabricado.

En el capítulo 4 se analizará las antenas fabricadas mediante el proceso de *model to hardware correlation* en términos de parámetros medibles en el Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas, con el fin de validar la metodología de diseño propuesta.

Por último, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado, que pueden ser usados de referencia para trabajos con una línea de investigación similar.

2 Fundamentos para el Diseño de Antenas

En esta sección se plantean los fundamentos teóricos más relevantes para la comprensión y realización de este proyecto. Se tratan los conceptos de la teoría de antenas como patrón de radiación, ganancia, directividad, eficiencia, polarización, etc. Además, se aborda el estudio de las tecnologías de fabricación de circuitos impresos.

2.1. Teoría de antenas

De acuerdo a *The IEEE Standard Definition of terms for Antennas*:

Una antena es un medio para radiar o recibir ondas de radio [5]. En otras palabras, una antena puede concebirse como un transductor para el acoplamiento de la línea de transmisión o guías de onda con el medio circundante, el cual es capaz de convertir la energía eléctrica en energía electromagnética y viceversa.

Una antena es un elemento recíproco ya que la forma física en la que emite la radiación es la misma a la que recibe la radiación [6]. Mientras opera como receptor, la antena toma las ondas electromagnéticas incidentes y las transforma nuevamente en señales de tensión y corriente [7].

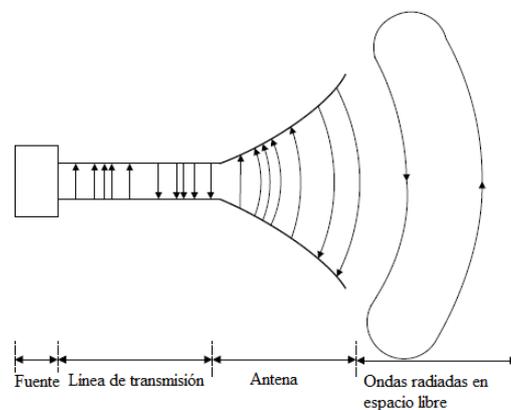


Figura 2.1: Modelo de antena como medio transductor, tomado de [6].

El desempeño de una antena se puede describir mediante parámetros básicos como ancho de banda, patrón de radiación, ganancia, directividad, polarización e impedancia de entrada, como se detalla a continuación.

2.1.1. Resonancia

Es el fenómeno que se produce en un circuito en el que existen elementos reactivos (capacitores e inductores) cuando es recorrido por una corriente alterna de frecuencia tal, que hace que la reactancia se anule [8]. Este término resulta importante en el análisis electromagnético de antenas ya que a la frecuencia resonante la antena es un elemento puramente resistivo y muestra el acople de impedancia con el medio que guía la señal hasta sus terminales.

2.1.2. Pérdidas de retorno

De acuerdo con [9], las pérdidas de retorno, $|S_{11}|$, hace referencia a la relación entre la potencia reflejada (P_r) y la potencia incidente (P_i). Este parámetro describe el desacople de impedancia y la banda de frecuencia a la cual la antena es diseñada, cuya relación de potencias está dada por la ecuación 1.

$$|S_{11}|_{dB} = 10 \log \frac{P_r}{P_i} \quad (1)$$

2.1.3. Banda de operación

La banda de operación de la antena se define como el rango (para una banda) o rangos (múltiples rangos) de frecuencias donde es ajustada, y satisface ciertos criterios en términos de pérdidas de retorno [9].

- Criterio I: $|S_{11}| \leq -10dB$, lo que significa que la potencia reflejada es menor o igual al 10 % de la potencia incidente, $P_r \leq 0,1P_i$.
- Criterio II: $|S_{11}| \leq -6dB$, lo que significa que la potencia reflejada es menor o igual al 25 % de la potencia incidente, $P_r \leq 0,25P_i$.

El ancho de banda se describe como función de la frecuencia máxima f_{max} y la frecuencia mínima f_{min} [9].

$$BW_{\%} = 100 \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}} \quad (2)$$

2.1.4. Patrón de radiación

El patrón de radiación (o patrón de antena) es una representación de las propiedades de radiación de la antena como una función de coordenadas espaciales [6]. El patrón de

radiación de la antena normalmente se determina en la región de los campos lejanos, donde la potencia radiada no depende de la distancia [10].

Las condiciones de campos cercanos y lejanos obedecen a las dimensiones de la antena y la longitud de onda de la frecuencia de operación, λ [11]. La forma usual de ilustrar el patrón de antena es mediante gráficos en 2D o 3D, donde la distribución de campos es una función de las coordenadas esféricas ϕ y θ en el espacio tal como se muestra en la figura 2.2.

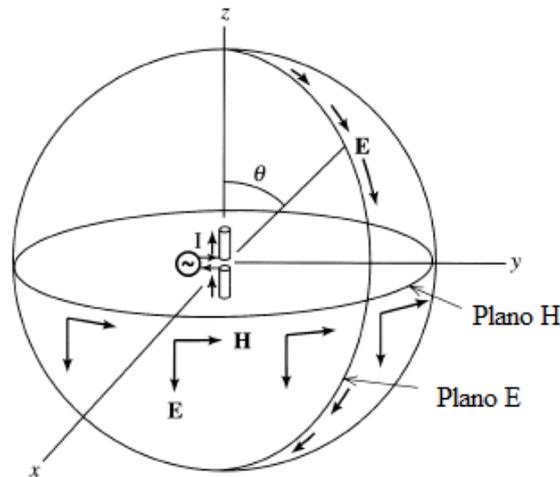


Figura 2.2: Patrón de radiación de antena dipolo, obtenido de [4].

Las propiedades de radiación de la antena se clasifican según tres patrones.

- Isotrópico: corresponde a un radiador ideal, hipotético, sin pérdidas, que se emplea como referencia para expresar las características de radiación de antenas actuales.
- Direccional: se refiere a una antena que posee la capacidad de radiar o recibir ondas electromagnéticas de manera más eficiente en algunas direcciones que otras [6].
- Omnidireccional: es un patrón de antena no direccional en una región específica.

2.1.5. Regiones de campo

El espacio que rodea una antena se clasifica en tres regiones:

- Campo cercano reactivo: es la región más próxima a la antena, predomina el campo reactivo [8].
- Campo cercano radiante: se le conoce como región de Fresnel [8], es el espacio entre el campo cercano reactivo y la región de campo lejano; donde la distribución de campos depende de la distancia desde la antena [11].

- Campo lejano: también llamada zona de Fraunhofer, es la región donde los campos se distribuyen independiente de la distancia de la antena [8].

Las regiones descritas se ejemplifican con mayor claridad en la figura 2.3.

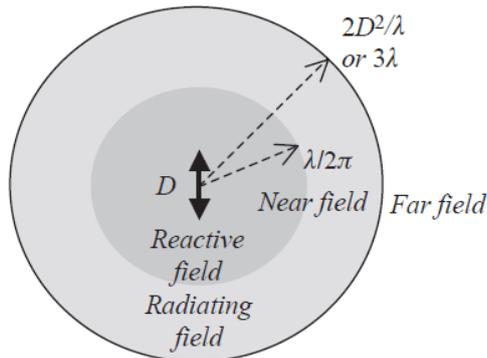


Figura 2.3: Regiones de radiación de antena de dimensión máxima D , tomado de [11].

2.1.6. Directividad

Es una medida de la concentración de energía radiada en una dirección particular. Define la capacidad de la antena de radiar potencia en una dirección específica.

Para una fuente isotrópica, la intensidad de radiación U_0 es igual al total de la potencia radiada P_{rad} dividida por 4π . De modo que la directividad de una antena se toma con base a una antena conocida, que usualmente es un radiador isotrópico [11].

Matemáticamente, la directividad de la antena es:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3)$$

2.1.7. Ganancia

La ganancia es otro parámetro útil para determinar el desempeño de una antena. La ganancia está relacionada con la directividad, esta medición toma en consideración la eficiencia y capacidades directivas de la antena. La ganancia de la antena (en una dirección) se define como “la relación de intensidad, en una dirección, a la intensidad de radiación que puede ser obtenida si la energía suministrada a la antena es radiada de forma isotrópica” [11]

Formalmente, se describe como:

$$G = 4\pi \frac{I_{ntensidad} R_{radiacion}}{P_{otencia} E_{ntrada} T_{otal} A_{ceptada}} = 4\pi \frac{U_{\theta,\phi}}{P_{in}} \quad (4)$$

2.1.8. Eficiencia

El término eficiencia hace referencia a la relación entre directividad y ganancia de la antena. La eficiencia también se especifica mediante la razón de resistencia de radiación y resistencia de pérdidas [12]. La resistencia de radiación es un resistor hipotético que disiparía una magnitud de energía equivalente al radiador, mientras que la resistencia de pérdidas es proporcional a la potencia en pérdidas por el acople, el conductor y el dieléctrico de la antena [13].

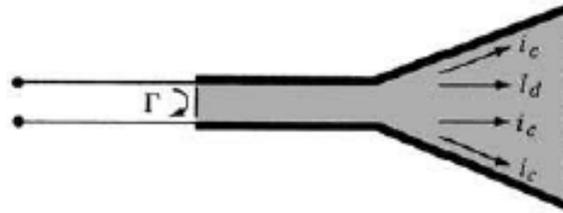


Figura 2.4: Pérdidas asociadas a una antena, tomado de [11].

En cuanto mayor sea la resistencia de radiación (R) con respecto a la resistencia de pérdidas óhmicas (r), la antena será un tanto más eficiente. La eficiencia se expresa como valor porcentual [13].

$$\eta = \frac{R}{R + r} \quad (5)$$

2.1.9. Polarización

La polarización está definida por la orientación del vector de campo eléctrico como una función del tiempo y el espacio en la dirección de propagación de la onda [14][15].

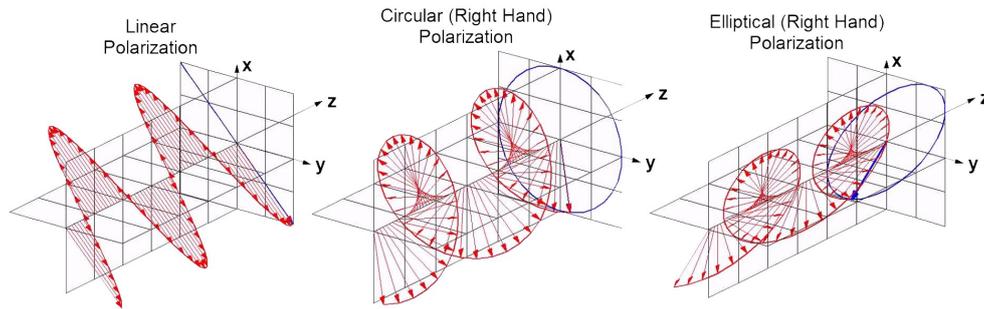


Figura 2.5: Polarización de ondas electromagnéticas [15].

La polarización se puede clasificar como lineal, circular o elíptica [12].

- Lineal: el vector de campo eléctrico se mantiene paralelo a un plano en la dirección de propagación de la onda. El vector de campo eléctrico puede posicionar la polarización totalmente horizontal, vertical (alineados con el eje) o formando un ángulo intermedio entre ambos [6]. Las antenas con patrones omnidireccionales se caracterizan por tener polarización lineal [13].
- Circular: es un caso especial de polarización elíptica, el vector de campo eléctrico describe un círculo como función del tiempo y el espacio [5].
- Elíptica: el vector de campo eléctrico describe una geometría elíptica mientras el frente de onda avanza en la dirección de propagación y es el caso general de polarización [5].

2.2. Líneas de transmisión y conectores de Radio Frecuencia

Como se ha visto, el desempeño de la antena depende del medio que se encarga de guiar las ondas electromagnéticas hasta el radiador. Para ello, se emplean líneas de transmisión y conectores de Radio Frecuencia como interfaz a la fuente de energía.

2.2.1. Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión son usadas para transmitir energía eléctrica y señales de un punto a otro, específicamente de un generador a una carga [16]. Algunos ejemplos de ello son la conexión de un transmisor con la antena, conexiones entre dispositivos en un PCB de alta frecuencia o conexiones en una red de computadoras; de manera que se han desarrollado distintas configuraciones de acuerdo a la conexión [17].

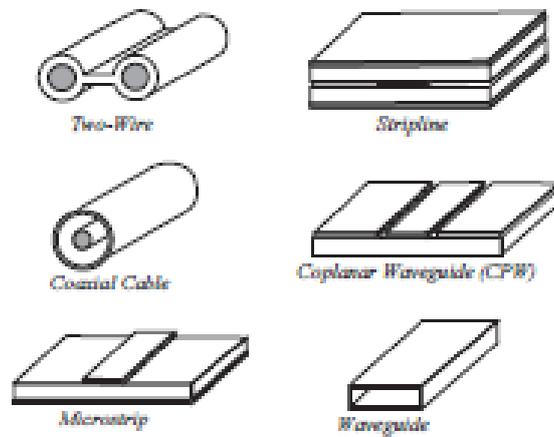


Figura 2.6: Tipos de líneas de transmisión[16].

En el diseño de antenas las líneas de transmisión más empleadas son:

- Cable coaxial.
- Línea *microstrip*.
- Línea *coplanar waveguide (CPW)*.

2.2.2. Cable coaxial

Está constituido por un conductor interno, aislado del conductor externo con un material dieléctrico, está recubierto por un material que le protege de influencias externas [16][17]. Los cables coaxiales son ampliamente usados en aplicaciones de Radio Frecuencia, mediciones de antenas y conexión entre transceptor y antena.

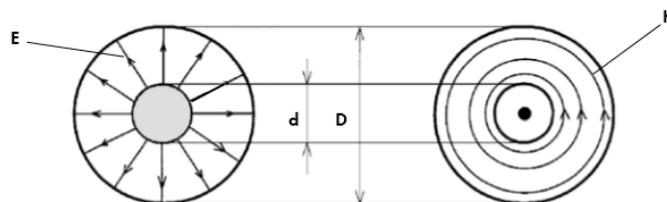


Figura 2.7: Campos eléctricos y magnéticos de una línea coaxial[17].

El modo de propagación de ondas en el cable coaxial es transversal, como se aprecia en la figura 2.7. El modo TEM se cumple mientras las señales sean de frecuencia menor a la frecuencia de corte f_c , una vez se sobrepase f_c se pueden experimentar diversos modos de propagación [11].

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{d}{D} \quad (6)$$

La impedancia característica de la línea depende de la relación entre el diámetro del conductor interno y externo, además del dieléctrico aislante [17]. Comercialmente se manejan valores de 50 y 75 Ω .

2.2.3. Línea de microcinta

La línea de microcinta es sumamente popular por la capacidad de escalamiento e integración en dispositivos de microondas pasivos y activos [18], está conformada por un plano de referencia, un substrato dieléctrico y un conductor, como se muestra en la figura 2.8

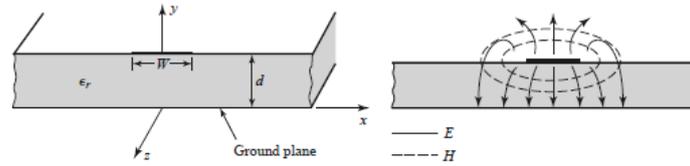


Figura 2.8: Tipos de líneas de transmisión[16].

La propagación de las líneas de campo eléctrico y magnético se da tanto por el dieléctrico como por el aire, el modo no es puramente TEM por la diferencia en la velocidad de fase en el aire (c) y en el substrato ($v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}}$) [16][18].

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (7)$$

De acuerdo con 7 la permitividad eléctrica depende del espesor y material del substrato.

2.2.4. Línea coplanar waveguide

La línea coplanar convencional se caracteriza por la ubicación del plano de referencia y de la línea conductora en el mismo plano, sobre un substrato dieléctrico [19]. La estructura básica muestra una tira metálica en medio del plano de tierra, separada por dos ranuras estrechas, como se describe en la figura 2.9.

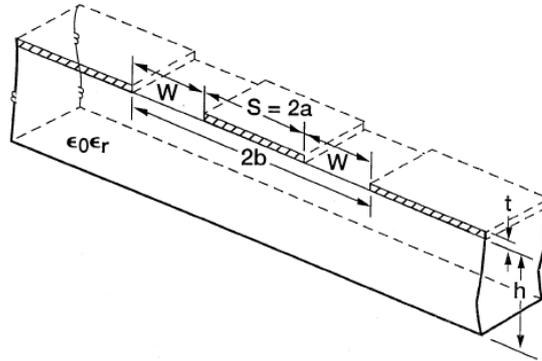


Figura 2.9: Guía de onda coplanar [19].

La estructura tolera un modo quasi-TEM, simplifica el método de fabricación, facilita el montaje sobre superficie y reduce las pérdidas de radiación [19][20]. Antenas alimentadas con guías de onda coplanares logran mayor ancho de banda, buen aislamiento entre elementos radiantes y bajas radiaciones espurias [8].

2.3. Tipos de antenas

En los dispositivos móviles modernos es deseable integrar las antenas sobre placas de circuitos con el fin de disminuir el costo, el tamaño y el diseño de la aplicación [21]. Las antenas de celulares son típicamente diseñadas para tener pérdidas de retorno mayores a 6 dB, lo que corresponde a una razón de onda estacionaria (*VSWR*) de 3:1, es decir, reflexión no mayor a 25 % de la energía suministrada a la antena [22].

Las antenas multibanda son atractivas en muchas aplicaciones comerciales y su uso se ha extendido a sectores como la industria médica [9], textil y de dispositivos *wearables* [1]. Es por ello que se realiza un repaso de algunas configuraciones elaboradas en sustratos rígidos y flexibles, que se caracterizan por su capacidad de integración y desempeño en banda. Existen muy diversas geometrías que se consideran en el diseño de antenas [12]. A continuación se detallan algunas geometrías básicas, relevantes para este trabajo.

2.3.1. Antena monopolo plana

La antena monopolo exhibe su primer resonancia a una frecuencia donde su altura, h , es aproximadamente $\lambda/4$. A esta frecuencia de resonancia su resistencia de radiación es de 36Ω [22]. El monopolo plano más simple es aquel que se imprime sobre un sustrato, alimentado por una línea de transmisión y un plano de tierra truncado, como se ejemplifica en la figura 2.10.

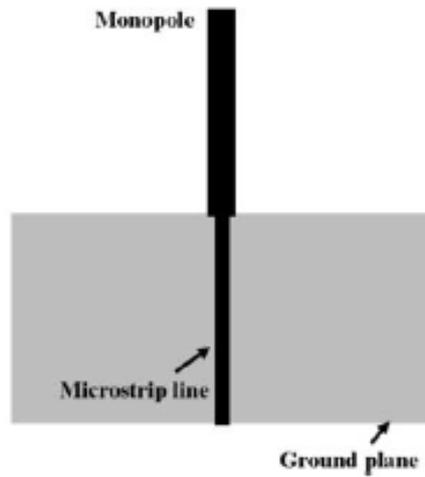


Figura 2.10: Antena monopolo plano simple [22].

Antenas planas multibanda se pueden obtener si se agregan múltiples monopolos con diferentes formas y longitudes, por ejemplo, la antena monopolo de L-invertida doble banda [22]. Para antenas multibanda compactas es complicado lograr que su ancho de banda sea amplio a baja frecuencia, debido a su corta longitud eléctrica. Un diseño recomendado para mejorar este problema es utilizar antenas planas de dos tiras, como se observa en la figura 2.11.

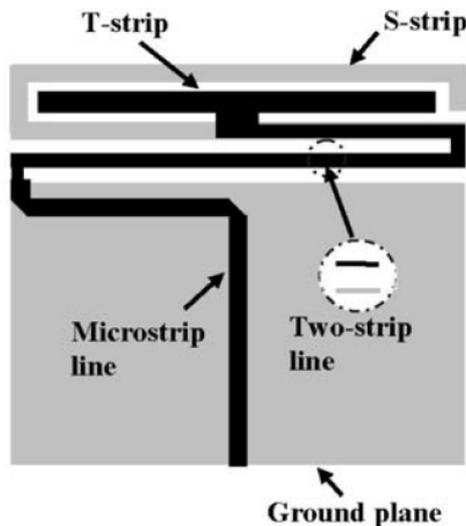


Figura 2.11: Antena de tipo S y T [22].

Esta antena consiste en una tira en forma de S y otra en forma de T, la configuración en T es alimentada directamente por la línea de microcinta, mientras que la configuración en S está acoplada de forma electromagnética. Las dimensiones de la antena se reducen por la disposición de las tiras dobladas, aumentando la longitud eléctrica y el ancho de banda por medio del acople electromagnético entre los conductores (acople mutuo) [22].

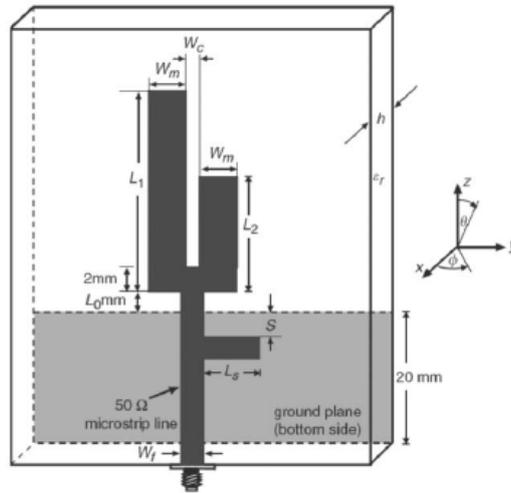


Figura 2.12: Antena monopolo de doble banda [22].

En la figura 2.12 dos monopolos de distintas longitudes, impresos en el mismo lado de un substrato delgado, se conectan por medio de una línea de transmisión con un *stub*. El plano de tierra en el lado opuesto del substrato se usa como elemento reflector [23].

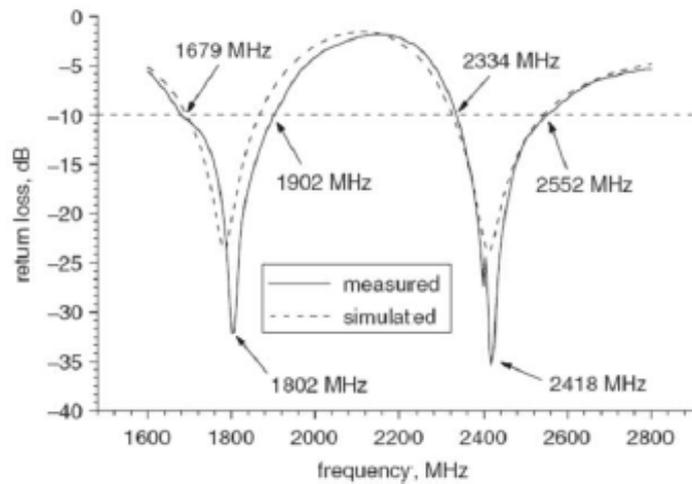
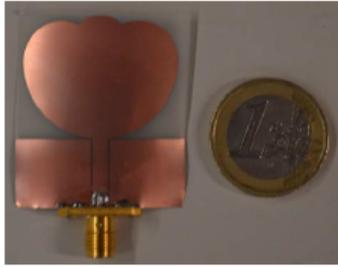


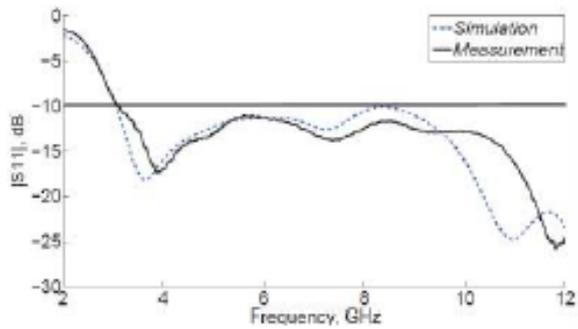
Figura 2.13: Pérdidas de retorno de antena monopolo de doble banda [22].

La antena tiene un comportamiento de doble banda, con un ancho de banda del 9% en cada una. El monopolo más largo, de longitud eléctrica mayor, es dominante en baja frecuencia, mientras que el más corto logra resonar de manera más eficiente en alta frecuencia [23][22].

En [9] se propone una configuración monopolo simple [24], sobre un substrato flexible y diseñado para operar en ancho de banda amplio, que se extiende de 3 a 12GHz por debajo de $-10dB$.



(a) Antena monopolo de doble banda en sustrato flexible.



(b) Pérdidas de retorno

Figura 2.14: Coeficiente de reflexión de antena monopolo de doble banda en sustrato flexible [9].

La antena es impresa en un sustrato flexible de tipo polimida y de $0,1\text{mm}$ espesor, es alimentada por una estructura *CPW* para eliminar el efecto de campos eléctricos que se propagan normal a la superficie del cuerpo humano donde se coloca, de manera que se disminuya las pérdidas por radiación [9].

2.3.2. Antena PIFA

PIFA es probablemente la antena más utilizada en teléfonos celulares debido a su limitado uso de espacio y su baja tasa de absorción específica (SAR) [22]. La antena plana F-invertida (*Planar Inverted-F Antenna*) consiste en un plano de tierra finito, un elemento radiador elevado, alimentado por un pin coaxial y un pin de cortocircuito que une eléctricamente el plano de tierra con el parche sobre el plano [25].

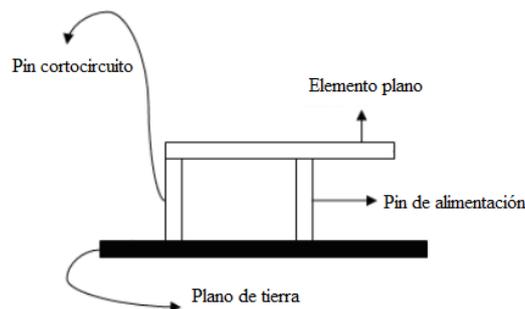


Figura 2.15: Antena plana F-invertida, adaptada de [25].

La antena es resonante a $\lambda/4$ debido al pin de cortocircuito, reduciendo el tamaño necesario del parche para resonar a la misma frecuencia. Posee patrón de radiación omnidireccional y su ancho de banda se puede mejorar añadiendo pines de cortocircuito o ranurando el conductor o el plano de tierra [25]. Como el parche es cortocircuitado en el extremo, la corriente al final del parche no está forzada a ser cero y como resultado de eso, la antena tiene la

misma distribución de tensión y corriente que un parche de $\lambda/2$. La ganancia de la antena se reduce, pero se mantiene las mismas características del parche de $\lambda/2$.

2.4. Tecnología de fabricación de circuitos impresos

Un *PCB* (placa de circuito impreso) es un soporte de material aislante donde se conectan entre sí puntos de un circuito eléctrico mediante pistas conductoras impresas o adheridas a él [26]. El *PCB* suele servir de soporte para el montaje de componentes y ensamblaje de circuitos eléctricos.

El material de la placa es un aislante que usualmente es resina, plástico o fibra de vidrio. El cobre se coloca en una o ambas caras de la placa, formando el *stackup* de una o varias capas [27][28]. Entre las variantes de circuitos impresos se tiene [29]:

- *PCB* de una capa: Está hecho de una capa de aislante o substrato, un lado de la placa es revestido con cobre, el cual es recubierto por una capa protectora de *soldermask*. Posee la ventaja de ser sencillo de diseñar y manufacturar.
- *PCB* de doble capa: Está conformado por una placa aislante, que se recubre con una capa de cobre o estaño por ambos lados. Taladrar agujeros a la placa permite conectar elementos de una capa a otra. Estos *PCBs* son usados en aplicaciones de circuitería con complejidad intermedia.
- *PCB* multicapa: Consiste en una serie de dos o tres *PCBs* de doble capa apilados. Este tipo de *boards* se compactan juntos formando un tipo de emparedado con capas de material aislante, *prepeg*, entre placas. Esta configuración ha facilitado la reducción de tamaño, mayor densidad de empaquetado e interconexión.
- *PCB* flexible (*Flexible PCB*): Está constituido por una o más capas de substratos con altas propiedades de flexibilidad, se caracterizan por su capacidad de integración y deformación [30].

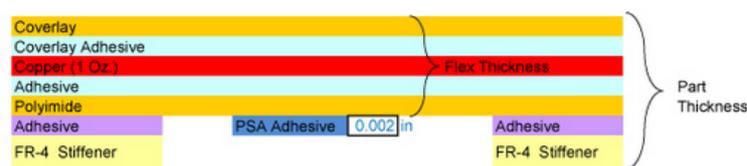


Figura 2.16: *Stackup* de una capa de placa flexible de una sola cara de cobre [30].

El *stackup* de un *PCB* flexible de una capa como se ilustra en la figura 2.16 está constituido de elementos aislantes, conductores y dieléctricos flexibles y rígidos.

La capa de *coverlay* es un material que se utiliza para aislar y proteger de corrosión y daños la superficie conductora. Los adhesivos que revisten el conductor se colocan para unir la lámina de cobre al sustrato. Mientras que la capa de *stiffener* es una capa extra que se agrega cuando se requiere dar rigidez y durabilidad a una superficie, por ejemplo, a una terminación de un conector de la placa [28].

Los circuitos flexibles pertenecen al área denominada Electrónica Flexible, que difiere de los circuitos rígidos por la tecnología de los materiales y métodos de fabricación involucrados. Los *Flexible PCBs* son ideales para un amplio rango de aplicaciones por ofrecer ventajas [31] en términos de:

- Ahorro de espacio: Este tipo de diseño solo ocupa el 10% del espacio y peso de un *PCB* rígido común, lo que ofrece una mayor libertad de instalación y empaquetado.
- Máxima confiabilidad: Una placa de circuito impreso flexible requiere menos interconexiones, lo que a su vez supone menos puntos de contacto, conectores y uniones de soldadura. Lo que significa que una placa *PCB* flexible disminuye las potenciales fuentes de falla, lo que mejora su confiabilidad.
- Menores costos: Las ventajas de ahorro de costos de los *PCB* flexibles incluyen la reducción de las demandas de material y embalaje, menores costos de reemplazo de piezas y errores de ensamblaje que podrían resultar en la necesidad de reparaciones.

2.4.1. *Substratos*

Los materiales sustratos son principalmente usados para brindar soporte mecánico a los elementos conductores de la antena [1]. El sustrato debe satisfacer requerimientos eléctricos y mecánicos dentro de los rangos permisibles según la aplicación, ya que influye en el desempeño eléctrico de la antena [8], por ejemplo, con el uso de un sustrato de bajo espesor y constante dieléctrica, se disminuye las pérdidas de radiación ya que las ondas electromagnéticas no están mayormente restringidas dentro del dieléctrico [32].

La evaluación y selección del sustrato es parte esencial del proceso de diseño y entre algunas las propiedades eléctricas y mecánicas a considerar se encuentran: la constante dieléctrica y tangente de pérdidas y su variación con la frecuencia y la temperatura; flexibilidad, tensión y fuerzas estructurales debidas a la deformación [33].

Los sustratos se agrupan en 5 categorías: cerámicos, semiconductores, ferromagnéticos, sintéticos y compuestos.

- Cerámicos: El sustrato cerámico más empleado en circuitos de microcinta es Alúmina, posee características eléctricas deseables como bajas pérdidas y dispersión con la frecuencia. El manejo mecánico es complicado ya que es duro y quebradizo, lo cual limita

las capacidades para ser fabricado en grandes dimensiones (no más de 4x4 pulgadas) [33].

- Semiconductores: Substratos de Silicio y Arseniuro de Galio, de alta resistividad, se pueden usar en circuitos pasivos y antenas, sin embargo, el tamaño de estos substratos es considerablemente pequeño para frecuencias de microondas en antenas [33].
- Ferromagnéticos: En la naturaleza estos substratos son anisotrópicos, poseen permitividad relativa en un rango de 9 a 16 con pérdidas bajas. La frecuencia de resonancia de antenas *microstrip* sobre substratos ferromagnéticos depende de la polarización del campo magnético [33].
- Sintéticos: Estos substratos se caracterizan por sus condiciones mecánicas, usualmente de alta flexibilidad y bajo espesor, permitividad y pérdidas [33]. Se emplean en la integración de circuitos flexibles [28] como antenas, películas capacitivas, conectores eléctricos y en el desarrollo de modelos que puedan ser fácilmente integrados en superficies irregulares sin disminuir de manera significativa sus características funcionales [1].
- Compuestos: Son substratos que se componen de distintos materiales que han sido modificados para alcanzar propiedades mecánicas y eléctricas específicas. Al agregar fibra de vidrio, cuarzo o cerámica en proporciones específicas a materiales orgánicos o sintéticos se ajusta y modifica las características [33]. Todos estos substratos son populares por sus propiedades mecánicas en la fabricación de antenas rígidas por medio de técnicas estándar de circuitos impresos [28].

Ahora bien, ya que la antena debe ser mecánicamente flexible, los substratos sintéticos orgánicos son ideales para escenarios donde se tolere deformaciones mecánicas. Los substratos integrados en la fabricación de electrónica flexible en su mayoría son polímeros robustos y ligeros, de alta confiabilidad y eficiencia con las características de radiación [34]. Y entre los substratos orgánicos más destacados en la electrónica flexible se tienen:

- *PET (Polyethylene terephthalate)*.
- *PEN (Polyethylene naphthalate)*.
- *PI (Polyimide)*.
- *LCPs (Liquid crystal polymers)*.
- Papel.

Las propiedades eléctricas y mecánicas de estos substratos son apropiadas por su ductilidad y pérdidas eléctricas, con excepción del papel, el cual se incluye como parte de su

aplicación en antenas flexibles y *wearables* por la simplicidad de integración con los métodos de fabricación de la electrónica flexible y costo [1][34].

Tabla 2.1: Propiedades eléctricas de substratos flexibles [35].

Material	ϵ_r	$\tan(\delta)$	Rigidez dieléctrica (10000V/m)
<i>PI</i>	3.1-3.4	0.0015-0.0018	27-30.1
<i>PET</i>	3.8-4	0.003-0.007	18-19.4
Papel	2.5-6	0.015-0.04	0.2-0.3
<i>LCP</i>	3.28-3.52	0.0148-0.0188	38.2-45.1
<i>PEN</i>	2.9-3.2	0.003-0.005	45-50

Cuando el dieléctrico está expuesto a un campo eléctrico de amplitud E y frecuencia f , la potencia P es disipada y el campo es atenuado [35]. Esto se describe por medio de la ecuación 8.

$$P = fE^2\epsilon_r\epsilon_o\tan(\zeta) \quad (8)$$

De la tabla 2.1 se aprecia que los substratos con menor tangente de pérdidas y variación en la constante dieléctrica son los polímeros de tipo *PI*. Esto supone que de acuerdo a la ecuación 8 estos materiales presentan las pérdidas de potencia más bajas a medida que aumenta la frecuencia.

Tabla 2.2: Propiedades mecánicas de substratos flexibles [35].

Material	Fuerza de tensión(MPa)	Elongación(%)	Fuerza de flexión (MPa)
PI	74.2-118	7.5-90	90.5-199
PET	96-100	1.86-2.15	131-145
Papel	15-34	0.38-1.7	25-45
LCP	3.28-3.52	3.37-4.08	38.2-45.1
PEN	46.4-48.8	57.8-62.3	72.7-80.2

Entre las propiedades mecánicas mostradas en la tabla 2.1 para evaluar estos substratos se encuentran: el módulo de Young, la fuerza de flexión, la fuerza de tensión y el porcentaje de elongación. Resulta conveniente hacer referencia la figura 2.17 para comprender el contexto bajo el que se caracteriza y valora la flexibilidad del material.

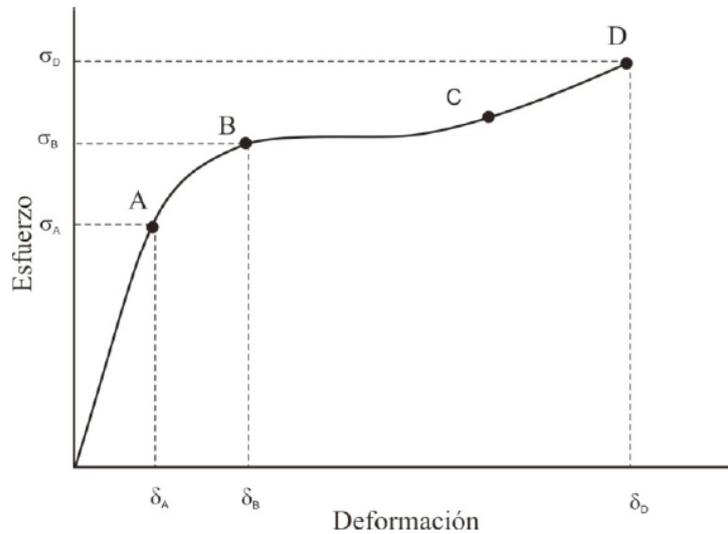


Figura 2.17: Curva de esfuerzo contra deformación [36].

La curva de esfuerzo contra deformación se puede dividir en varios tramos. El primer segmento de la curva OA es lineal y muestra proporcionalidad entre esfuerzo y deformación. Al punto A se le denomina límite de proporcionalidad e indica que el material se comporta como un elástico, es decir, el material es capaz de regresar a su forma inicial de manera instantánea si cesa el esfuerzo [36].

En el tramo de AB ya no hay proporcionalidad pero el material es capaz de retomar su estado inicial a través del tiempo si se quita el esfuerzo, se dice que la deformación es consecuencia del estiramiento de las moléculas. A este punto se le conoce como límite elástico, lo que indica que un esfuerzo mayor provocará una deformación permanente del material hasta alcanzar el punto de ruptura D del mismo (resistencia de ruptura) [36]. La deformación generada por la prueba de esfuerzo se define con el porcentaje de elongación, el cual establece el límite de extensión del material como función de la longitud original [35].

Con respecto a este análisis y los resultados mostrados en la tabla 2.2 el material que posee las características más relevantes en términos de capacidad para tolerar esfuerzo y elongarse sin deformación permanente es la polimida (PI), lo cual lo hace conveniente para ser usado como dieléctrico.

Además, este sustrato presenta una mejor estabilidad térmica que otros sustratos, deformándose menos a temperaturas y tiempos de exposición mayores. Es muy importante evaluar la estabilidad térmica del sustrato, en especial cuando el proceso de fabricación implica muchas fases de curado, para los cuales se somete a calentamientos y enfriamientos que afectan sus características [37].

2.5. Técnicas de fabricación

De acuerdo a la descripción de materiales conductores y sustratos, se realiza una revisión de los métodos comerciales de fabricación de circuitos rígidos y flexibles empleados en la actualidad, en este caso, se hace especial énfasis en los procesos que ofrece el Laboratorio de Circuitos Impresos de la Escuela de Ingeniería en Electrónica del ITCR y en los métodos aplicados a la electrónica flexible.

2.5.1. Grabado químico (Chemical Etching)

Esta técnica ha ganado notable popularidad debido a su capacidad para producir patrones precisos con detalles finos. El grabado químico envuelve un proceso fotosensible y agentes químicos corrosivos que permiten remover secciones de área indeseadas y de esta manera generar el patrón definido en la capa conductora [1].

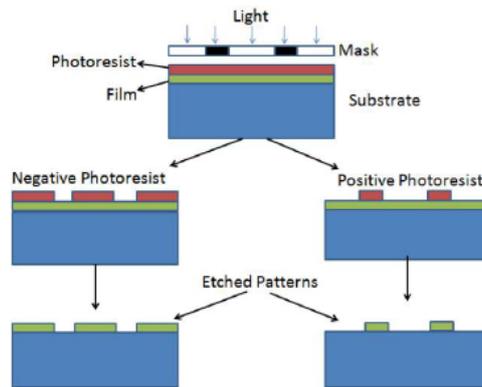


Figura 2.18: Proceso de fabricación foto sensible[9].

Los materiales usados para este proceso son fotosensibles, los cuales, son polímeros orgánicos que cambian sus características químicas al ser expuestos a luz ultravioleta. Como se muestra en la figura 2.18, se coloca una máscara sobre la película fotosensible con el patrón de la capa metálica. El material es expuesto a la luz y la capa fotosensible cambia sus propiedades mecánicas de acuerdo a las áreas transparentes de la máscara [38].

El proceso se puede llevar a cabo con fotoresistores positivos o negativos, en la fabricación de antenas y circuitos de RF se recomienda usar fotoresistores positivos por el hecho de que los fotoresistores negativos incrementan el efecto de *edge-swelling*, comprometiendo la resolución y consistencia del patrón resultante [1]. Una vez expuesto, la capa fotosensible se remueve remojando el material en un compuesto químico.

2.5.2. Tinta de impresión (*Inkjet printing*)

Este es un método de bajo costo e impacto que se ha usado en la fabricación de circuitos electrónicos [34]. El método se divide en cuatro categorías: piezoeléctrico, térmico, electrostático y acústico; que a pesar de suministrar la tinta conductora de forma distinta, comparten el proceso general de crear gotas de tinta que son depositadas en el sustrato. Por ejemplo, el proceso piezoeléctrico controla el flujo de tinta por medio de pulsos de tensión y esto hace que el consumo de material sea bajo, como se muestra en la figura 2.19.

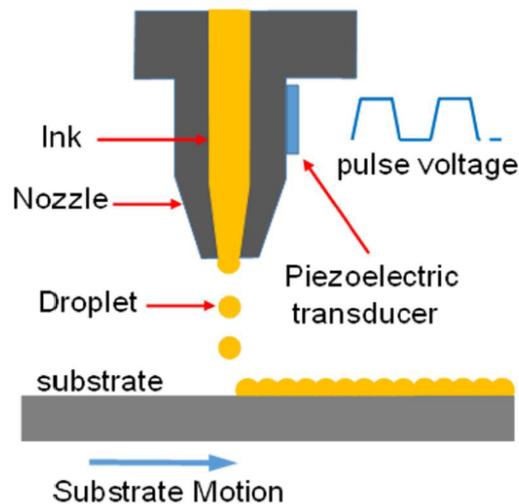


Figura 2.19: Proceso de fabricación *inkjet printing* [32].

La tinta de impresión se caracteriza por ser altamente efectiva cuando es compatible con los sustratos polímeros y alcanzar alta resolución en los patrones. Este método ha sido usado con éxito en la fabricación de antenas de tipo monopolo en sustratos de papel y antenas *boutie* para *RFID* [1], que a diferencia del grabado químico, la capacidad de regular la cantidad de material sin desperdicio y el desuso de productos químicos, hace de la tinta de impresión un método que resulta económico, rápido y amigable con el ambiente.

El proceso de impresión mediante *inkjet* permite realizar grabado directo de patrones o capas de material con la descripción digital de las mismas. A partir de un fichero que contiene los lugares en donde se debe imprimir, la impresora va depositando la tinta en los lugares donde corresponda [37].

El potencial de esta tecnología de fabricación está orientado a sustratos que cumplan con los requisitos de rugosidad y flexibilidad para alojar microcircuitos, como lo son los sustratos sintéticos *PEN*, *PET* y *PI* (*Kapton*) [35][37].

2.5.3. Remoción de cobre por LDI (Laser Direct Imaging)

El proceso de *LDI* ha surgido como una demanda de la necesidad de miniaturización y funcionalidad de componentes y dispositivos electrónicos, bajo el manejo de placas de alta densidad de interconexión, reducción en costo y tiempo [39].

LDI es popular en la fabricación de electrónica flexible por la tendencia de la tecnología a la miniaturización, ya que la precisión de los procesos mecánicos es limitada. *LDI* enfoca el haz del láser directamente sobre la placa expuesta de *PCB*, revestida por un material fotosensible, como se ilustra en la figura 2.20.

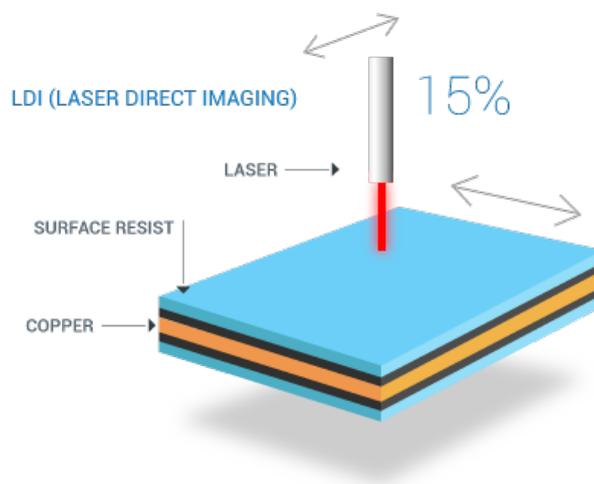


Figura 2.20: Proceso de fabricación *LDI* [39].

El proceso de *LDI* se lleva a cabo por medio del haz del láser que se desplaza a lo largo de la superficie fotosensible de la placa. El haz del láser conmuta entre encendido y apagado como función del control aplicado por el computador de acuerdo al patrón del circuito eléctrico diseñado [39].

2.6. Servicios de comunicaciones inalámbricas

Según al ancho de banda y frecuencias de operación, las redes inalámbricas se clasifican en *WWAN*, *WMAN*, *WLAN*, *WPAN* y *WBAN* [2]. Las redes *WLAN* son ampliamente usadas para interconexión de dispositivos móviles y entre las tecnologías de interés en esta red se encuentran *GSM*, *UMTS* y *LTE*.

2.6.1. *GSM* y *UMTS*

El sistema *GSM* tiene una asignación de ancho de banda de 25MHz en el rango de frecuencia de 900MHz , que tiene una capacidad máxima de 125 canales, cada uno con una

portadora de $200kHz$ [2]. En la tabla 2.3 se muestra la distribución del espectro.

Tabla 2.3: Bandas de operación de GSM en FDD.

Identificador	<i>Uplink</i>(MHz)	<i>Downlink</i>(MHz)
GSM 900	890.2-915	935.2-960/925.4-935 (Banda extendida)
DCS 1800	1710-1785	1805-1880
PCS 1900	1850-1909.6	1930-1989.6

Por su parte, *UMTS* (*Universal Mobile Telecommunication System*), corresponde a la tercera generación de sistemas de comunicación (*3G*). Es multiservicio, soporta los servicios de telecomunicaciones tradicionales e Internet sobre la misma red, con tasas de velocidad de $348kbps$ hasta $2Mbps$ en área local [2].

Ya que *UMTS* es una red respaldada del núcleo de *GSM* existe una coexistencia entre ambas tecnologías, lo cual permite a un dispositivo realizar un traslado de una celda *3G* a una celda *2G* cuando la calidad es ineficiente para una estación (proceso de *handoff*) [2].

2.6.2. Long Term Evolution

Es un estándar desarrollado por *3GPP* (*Third Generation Partnership*) [8] y es clasificado en dos grupos: *Long Term Evolution* (*LTE*) y *System Architecture Evolution* (*SAE*); donde *LTE* se centra en la evolución de de la interfaz de radio y *SAE* en el núcleo [2].

El sistema soporta *FDD* y *TDD*, con una tasa de bajada de $100Mbps$ con ancho de $20MHz$ ($5bps/Hz$) y tasa de subida de $50Mbps$ con un espectro igual a $20MHz$. La flexibilidad en ancho de banda le permite elegir entre 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz [40]. En la tabla 2.4 se muestra la distribución del espectro de frecuencia asignado para FDD en este estándar.

Tabla 2.4: Bandas de operación de LTE en FDD.

Banda	Identificador	<i>Uplink</i>(MHz)	<i>Downlink</i>(MHz)
1	IMT Core Band	1920-1980	2110-2170
2	PCS 1900	1850-1910	1930-1990
3	GSM 1800	1710-1785	1805-1880
4	AWS	1710-1755	2110-2155
5	850	824-849	869-894
6	850 (Japan #1)	830-840	875-885
7	IMT	2500-2570	2620-2690
8	GSM 900	880-915	925-960
9	1700 (Japan)	1750-1785	1845-1880
10	3G Americas	1710-1770	2110-2170
11	1500 (Japan #1)	1427.9-1452.9	1475.9-1500.9
12	US 700	698-716	728-746
13	US 700	777-787	746-756
14	US 700	788-798	758-768
17	US 700	704-716	734-746
18	(Japan #2)	815-830	860-875
19	(Japan #3)	830-845	875-890
20	Dividendo Digital	1710-1755	2110-2155
21	(Japan #3)	1447.9-1462.9	1495.9-1510.9

LTE tiene la característica de poseer interfaces interconectadas con tecnologías como *2G* y *3G*, esto le permite optimizar recursos y hacer un regreso a una tecnología anterior si la red así lo demanda [2]. El espectro de *LTE* se divide según las bandas definidas para *FDD* y *TDD* en diferentes áreas. Para *FDD* la distribución en ancho de banda se muestra en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Bandas de operación de LTE en TDD.

Banda	Identificador	Frecuencia (MHz)
33	TDD 2000	1900-1920
34	TDD 2000	1900-1920
35	TDD 1900	1850-1910
36	TDD 1900	1930-1990
37	PCS Center Grap	1910-1930
38	IMT Extension CG	2570-2620
39	China TDD	1880-1920
40	2.3 TDD	2300-2400

2.6.3. Operadores de telefonía celular en Estados Unidos

En el región de América del Norte los principales operados de comunicaciones inalámbricas en telefonía móvil son: *AT&T*, *Verizon*, *T-Mobile* [41], *Sprint* y *US Cellular*. Las antenas integradas a los dispositivos móviles se diseñan tal que su desempeño en frecuencia cumpla con los requerimientos en banda como se ejemplifica en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Bandas de LTE para FDD en región NAR.

Portadora	3G (MHz)	LTE 4G (MHz)
Verizon	850/1900 (CDMA)	2,4,5,13
Sprint	800/1900 (CDMA)	25,26
AT&T	850/1900(GSM)	2,4,5,12,17,30
T-Mobile	1700/2100 (AWS), 1900	2,4,12,66,71
US Cellular	850/1900(CDMA)	5,12

CDMA hace referencia a la tecnología de acceso múltiple por división de código, mientras que *AWS* es el espectro de frecuencia de *Advance Wireless Services* usado en telefonía celular para vídeo, voz y mensajería.

3 Metodología de Análisis y Diseño de Antenas Multibanda

En este capítulo se describe el proceso de correlación, análisis y diseño de estructuras de antenas resonantes en substratos rígidos y flexibles empleados en comunicaciones eléctricas en el área de telefonía celular. Se explora la sensibilidad del desempeño en banda, en términos de parámetros de microondas y patrón de radiación, a las variables de diseño de los modelos de simulación en entornos controlados. Para ello se sigue el flujo general de diseño de antenas mostrado en la figura 3.1.

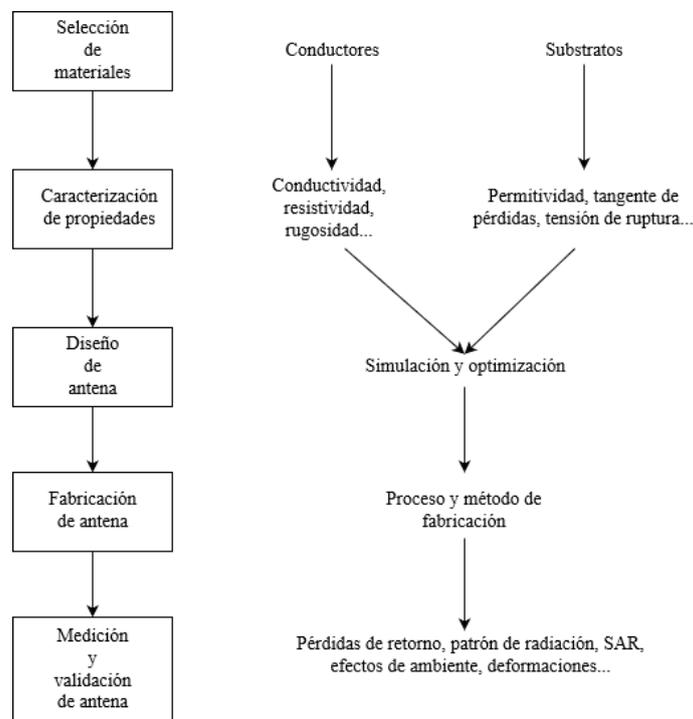


Figura 3.1: Proceso de diseño, adaptado de [1].

Mediante la evaluación y correlación de tres diseños propuestos por fabricantes de antenas e investigaciones se genera un flujo de trabajo de modelos numéricos de antenas multibanda que es aplicado a los diseños propuestos para el modelo de radio comunicación móvil, de manera que se conozcan las restricciones de las geometrías en limitaciones físicas, frecuencia de operación, ganancia y acople de impedancia.

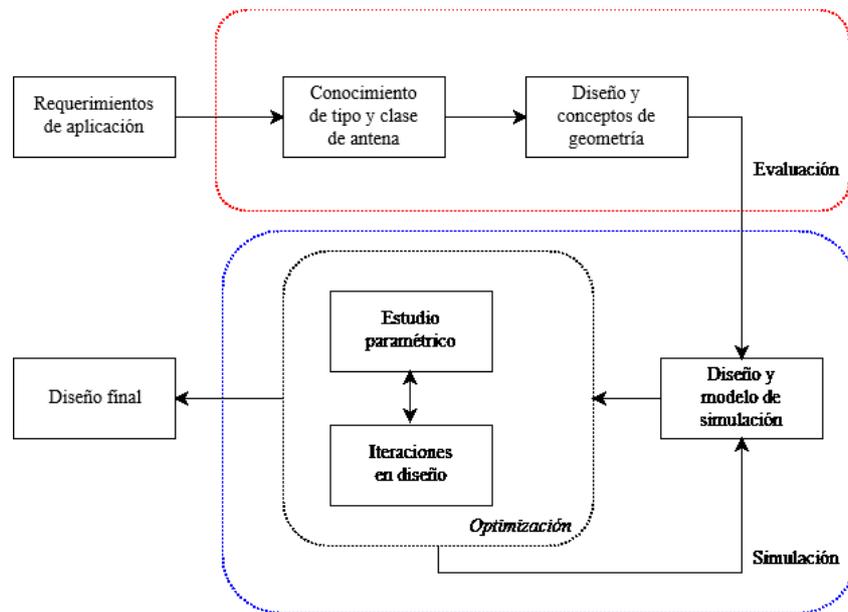


Figura 3.2: Flujo de trabajo de modelado numérico de antenas multibanda.

En la figura 3.2 se presentan los pasos a seguir para el estudio de los tipos de antenas. Este flujo permite establecer un punto de partida para las propuestas de diseño final. Una vez se llegue al diseño final, se estima el comportamiento de estas antenas en escenarios donde experimenten deformaciones físicas en proximidad a modelos planos y esféricos con presencia de superficies metálicas.

3.1. Evaluación y modelado numérico de antenas

En el proceso de simulación y correlación de las antenas de telefonía celular se utilizó la herramienta de análisis electromagnético *Ansys HFSS*, que es un solucionador numérico de visualización en 3D de efectos electromagnéticos para aplicaciones de alta frecuencia [42]. Se emplea el método de simulación de elementos finitos (*FEM*).

En el modelo de las antenas se trabajó un rango de frecuencias suficiente para cubrir las bandas *3G* de la tabla 2.3 y de la tabla *4G/LTE* de 2.4, de manera que los barridos tuviesen la siguiente distribución:

- Frecuencia inicial: 0.6 *GHz*.
- Frecuencia final: 3 *GHz*.
- Paso de frecuencia: 0.048096 *GHz*.
- Puntos de simulación: 500.

En la configuración de los análisis se definió un número máximo de 20 iteraciones y un mínimo de 10, estableciendo una convergencia de al menos el 25% de las iteraciones y un porcentaje de error de 2 a 4% de iteraciones sucesivas para asegurar la confiabilidad y convergencia de los perfiles de simulación. Se utiliza el método de solución iterativo ya que permite reducir el recurso de procesamiento y mejora la velocidad de simulación.

A continuación se evalúan tres diseños base reportados en la literatura, los cuales luego son variados y optimizados para las bandas $4G/LTE$.

3.1.1. Antena monopolo serpenteada

En [43] propone un diseño de antena multibanda de tipo monopolo plana para aplicaciones de tipo *MIMO* para *LTE*. Es una estructura en sustrato rígido que se incorpora en un *tablet*. La antena se diseña sobre un sustrato dieléctrico de tipo FR4, con $\epsilon_r=4.4$, espesor de 1.6 mm y doble capa de cobre de $35\ \mu\text{m}$. La antena cuenta con una línea de alimentación de microcinta que se encarga de guiar la señal hasta el parche. Esta línea se dimensiona para ofrecer un acople de $50\ \Omega$.

Se agrega un puerto interno para excitar la antena, la dirección de la corriente en el puerto se define desde el plano de tierra hasta la línea de alimentación. El perfil de simulación de la antena se modela en términos de variables parametrizadas como se muestra en la figura 3.3.

Tabla 3.1: Dimensiones de modelo de simulación de antena monopolo.

Variable	L_s	L_g	L_1	L_{strip}	W_s	W_{strip}	W_2
Dimensión (mm)	83	22.7	34.8	40	50	3	37

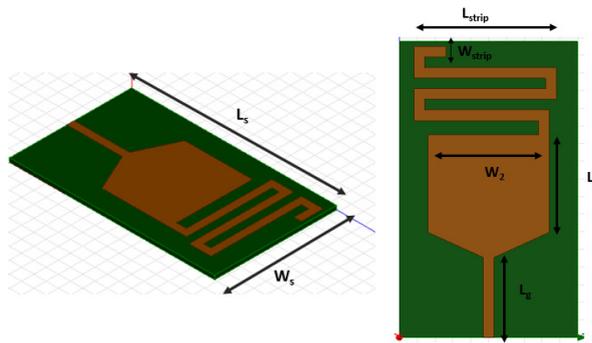


Figura 3.3: Modelo de simulación parametrizado de antena monopolo plana para *tablet* [37].

La caja de radiación del modelo se define como una región abierta con límites de radiación para la menor frecuencia del barrido que es de 0.6 GHz , con $\lambda = 499\text{ mm}$, estableciendo al menos una distancia de $\lambda/4$ desde cada borde de la antena al final de cada cara de la caja.

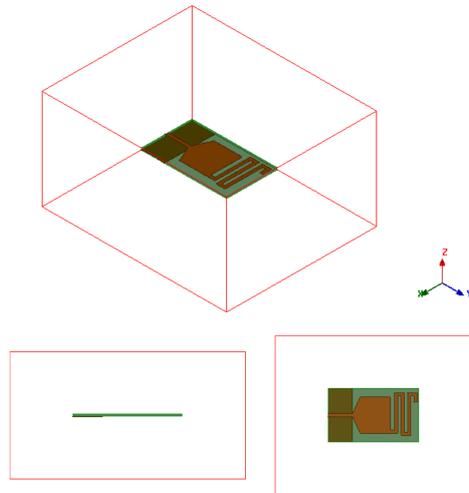


Figura 3.4: Modelo de simulación de antena monopolo plana para *tablet* [37].

Con la construcción y validación del modelo de simulación se procede a correr la primera iteración de un análisis con frecuencia de solución en $0,77\text{GHz}$ e iteraciones y porcentaje de error como se estableció en la sección anterior.

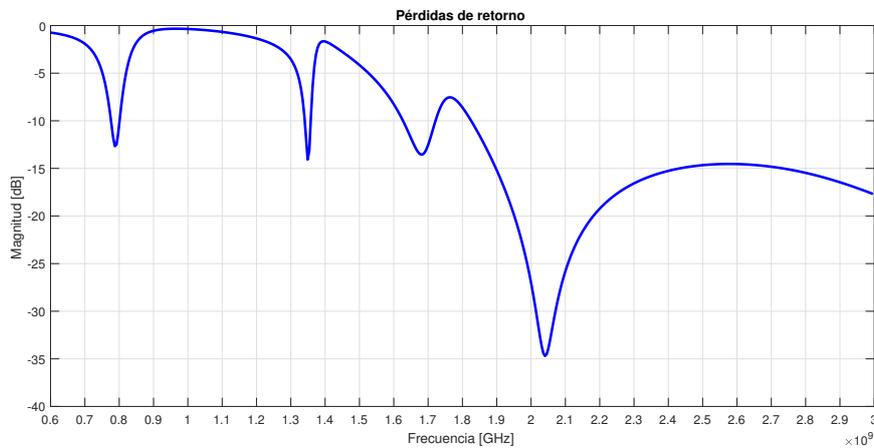


Figura 3.5: Pérdidas de retorno de modelo de simulación de monopolo serpenteado.

De la figura 3.5 se observa que la antena es multibanda ya que es posible notar 4 resonancias con magnitud menor a -10 dB y anchos de banda de 7,3, 3 y 70 %. Posee una respuesta de tipo *wide band* en el rango de frecuencias de banda alta.

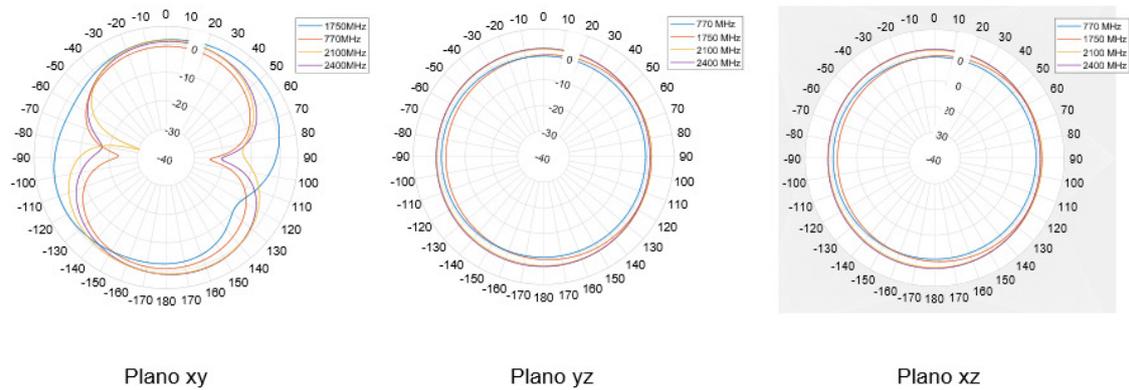


Figura 3.6: Patrón de radiación de ganancia en dB de modelo de simulación de antena monopolo plana para *tablet* [37].

Al observar el patrón de radiación en los planos yz y xz se identifica una tendencia omnidireccional, característica de las antenas empleadas en telefonía celular. Se tiene cierta distorsión en el plano xy pero se conserva un patrón extendido en la mayor parte de las direcciones.

La ganancia de mayor magnitud es $3,12dB$ y se da en $2,4GHz$ lo cual es consecuente con el coeficiente de reflexión a lo largo del barrido, mientras que para $0,77GHz$, $1,75GHz$ y $2,1GHz$ la ganancia pico es de $-0,6dB$, $2,59dB$ y $2,73dB$ respectivamente.

El comportamiento en banda de la antena se debe a la forma del elemento radiador, ya que la antena está conformada por un monopolo y una línea serpenteada, que tiene como función generar resonancias en baja frecuencia. Este efecto se aprecia con mayor claridad en la distribución de densidad de corriente en la estructura de la antena [24] y como se ilustra en la figura 3.7.

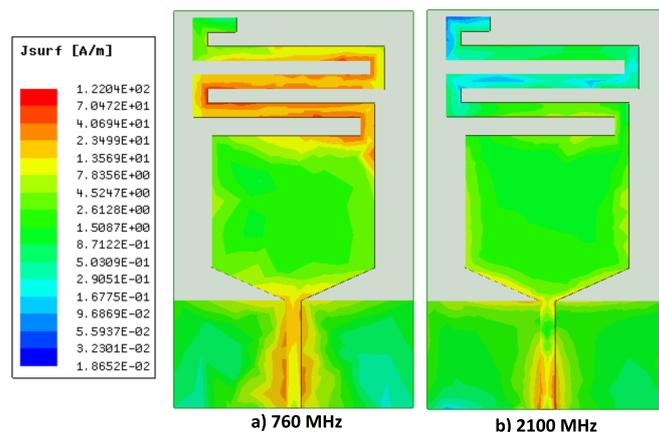


Figura 3.7: Pérdidas de retorno de modelo de simulación de monopolo serpenteado.

Como se nota en la figura 3.7 la geometría influye en las características de RF de la

antena. La magnitud de la densidad de corriente es mayor en la sección serpenteada en baja frecuencia ya que la configuración ayuda a crear una longitud eléctrica proporcional a la longitud de onda a $0,7GHz$, esto debido a la modificación del camino de las corrientes.

Al examinar el segundo caso, en $2100MHz$, se tiene una distribución uniforme en el parche principal de mayor magnitud que en la línea serpenteada, lo que prueba que el elemento dominante en alta frecuencia es el parche.

Ante la dependencia de las características de radiación de la antenna con respecto a sus dimensiones, se estima el desempeño de la misma comparando las curvas de pérdidas de retorno en función de variaciones paramétricas de las variables L_{strip} , W_{strip} , W_2 y L_1 . El análisis paramétrico se hace modificando la variables de interés en pasos de 5-10 % del valor inicial y manteniendo constante las demás. En la figura 3.8 se presentan los coeficientes de reflexión para diferentes longitudes ($L_{strip} = 34mm$, $L_{strip} = 38mm$ y $L_{strip} = 40mm$).

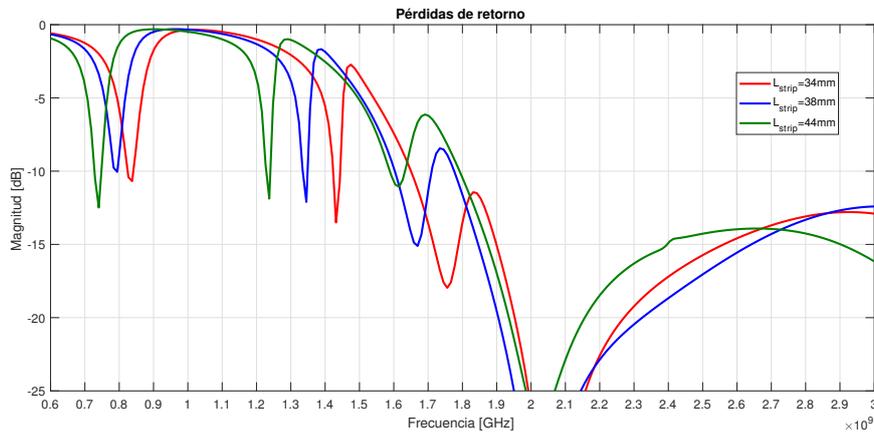


Figura 3.8: Pérdidas de retorno de variación paramétrica de L_{strip} .

De los resultados simulados se desprende que las variaciones del parámetro L_{strip} afectan significativamente la ubicación de las primeras 3 resonancias del barrido. Es apreciable el desplazamiento en frecuencia a valores de frecuencia menor a medida que L_{strip} incrementa, lo cual está directamente relacionado con el aumento de la longitud eléctrica como se vio en la distribución de corriente mostrada en la figura 3.7. El acople de impedancia para la banda de 1,5 a 1,8GHz tiende a empeorar a longitudes mayores.

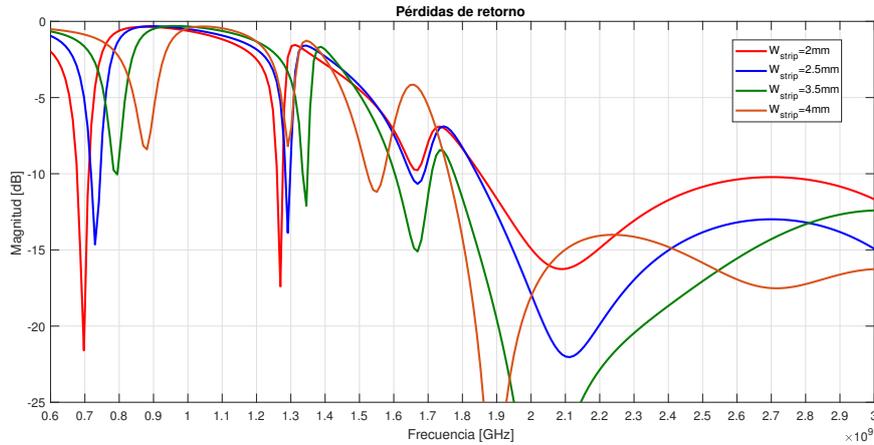


Figura 3.9: Pérdidas de retorno de variación paramétrica de W_{strip} .

En la figura 3.9 se observa las variaciones de W_{strip} en 2, 2,5, 3,5 y 4 mm. El acople de impedancia es mejor en banda baja a medida que la variable W_{strip} disminuye su valor. Sin embargo, para frecuencias mayores a $1,5GHz$ el acople se afecta de forma negativa y se tiene un cambio en frecuencia y magnitud de la cuarta resonancia.

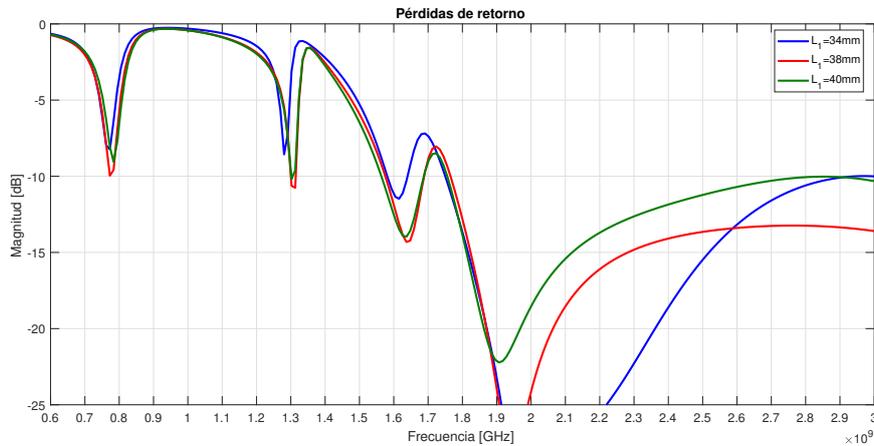


Figura 3.10: Pérdidas de retorno de variación paramétrica de L_1 .

Por su parte, en la figura 3.10 se tienen los resultados de los cambios hechos a la variable L_1 . De estas curvas se nota que el largo del parche solamente varía la magnitud y ubicación de las últimas dos resonancias del barrido. A pesar de ello, el ancho de banda de $-6 dB$ no cambia considerablemente con respecto al resultado mostrado en la figura 3.5.

Ahora bien, esta configuración ofrece un muy buen desempeño en banda alta por su amplio ancho de banda y ganancia. Sin embargo, a pesar de que logra ubicar una resonancia en banda baja su ancho de banda no es suficiente para cubrir los anchos requeridos para los enlaces de subida y bajada en $4G$, además de la baja ganancia. El plano de tierra truncado

representa una técnica recomendada para aumentar la respuesta en banda, la cual es bien vista como parte del diseño final.

3.1.2. Antena PIFA

En [22] se discute sobre la popularidad de las antenas de tipo *PIFA* en la integración de dispositivos móviles. Se evalúa un diseño implementado por [44] para aplicaciones de *LTE*. El parche se coloca sobre un plano de referencia con substrato de tipo FR-4 con dimensiones de $130 \times 70 \times 1,6 \text{ mm}$. Como se vio en el capítulo anterior, la principal característica de esta antena es el pin de cortocircuito que une físicamente el plano de masa con el elemento radiador.

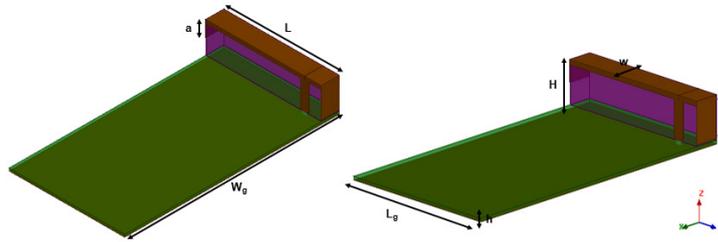
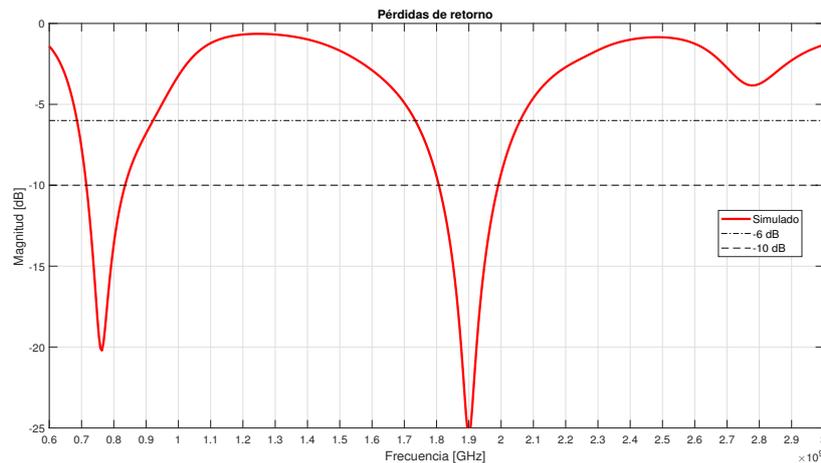
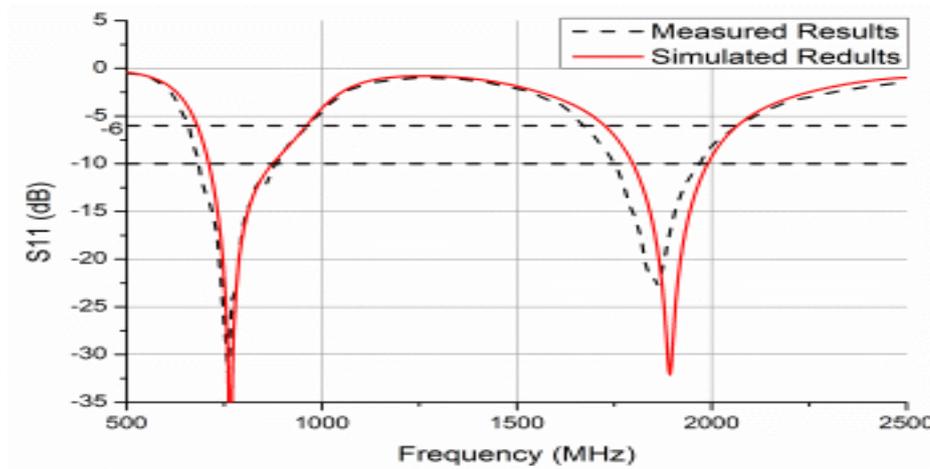


Figura 3.11: Modelo de simulación de *PIFA* rígida.

Se modela la antena de [44] y estima el desempeño en banda de acuerdo a las dimensiones del fabricante. A partir de esto se compara con el resultado obtenido por el fabricante como se ilustra en la figura 3.12



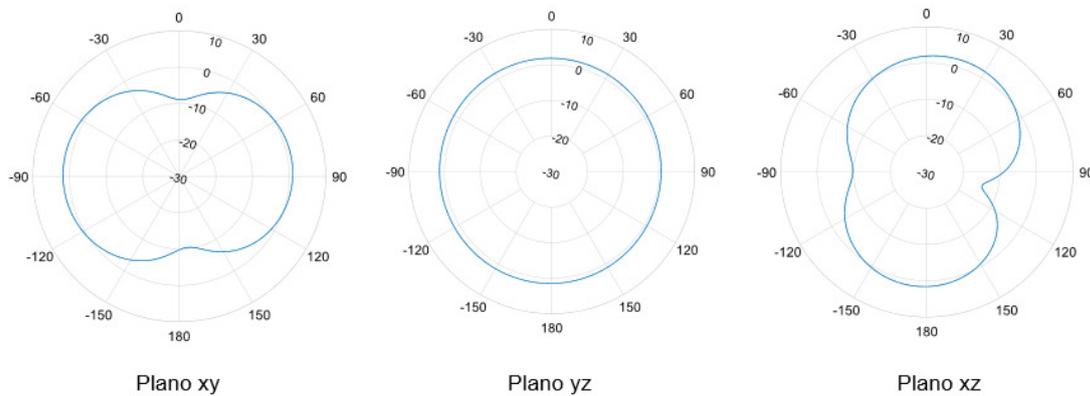
(a) Modelo de simulación.



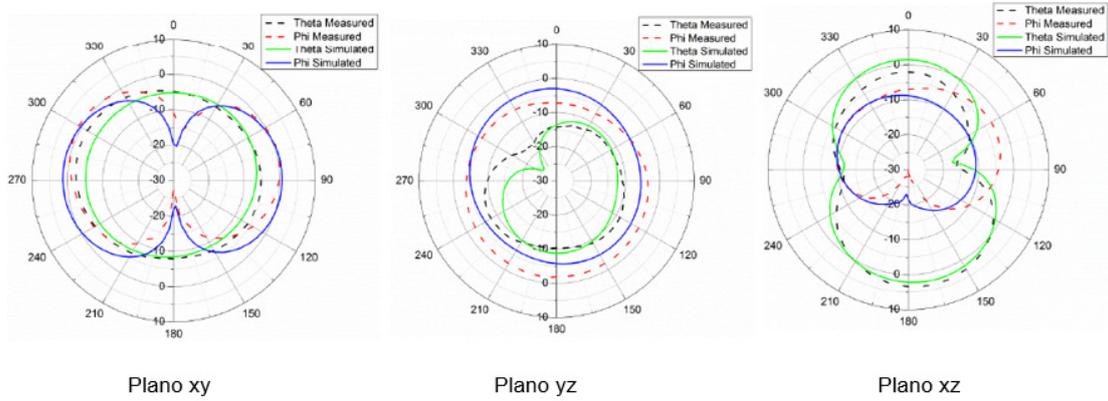
(b) Modelo de fabricante

Figura 3.12: Pérdidas de retorno de antena *PIFA* en sustrato rígido simulado, tomado de [40].

Como se observa en la figura 3.12 el modelo de simulación logra replicar el comportamiento de la antena en términos de coeficiente de reflexión. El ancho de banda en $-6dB$ es de $235MHz$ en banda baja y de $396MHz$ en banda alta, lo cual concuerda con lo establecido en [44] que es de $208MHz$ y $396MHz$ en las mismas bandas.

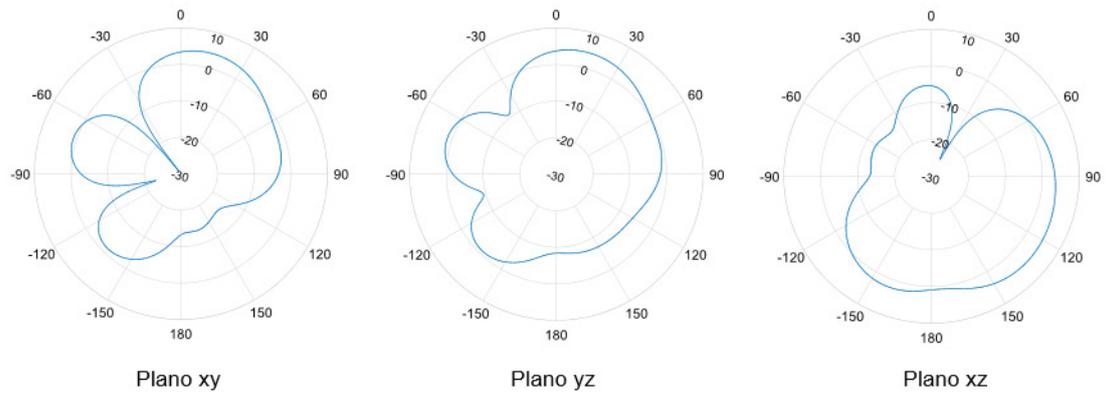


(a) Patrón de radiación de ganancia de modelo simulado.

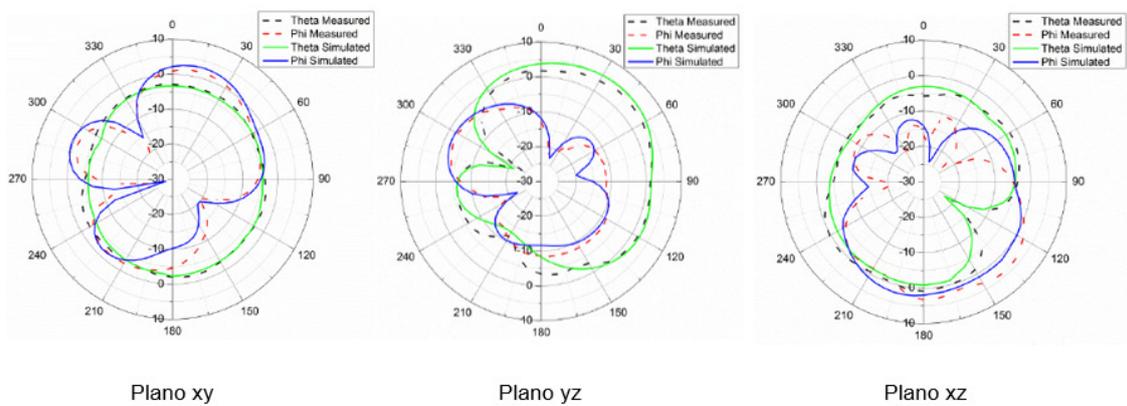


(b) Patrón de radiación de ganancia de fabricante

Figura 3.13: Patrón de radiación 2D de ganancia en dB de antena *PIFA* a $760MHz$, tomado de [40].



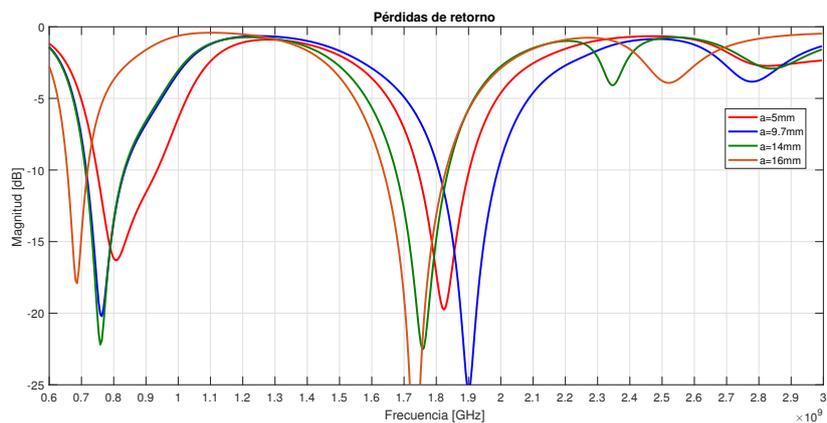
(a) Patrón de radiación de ganancia de modelo simulado.



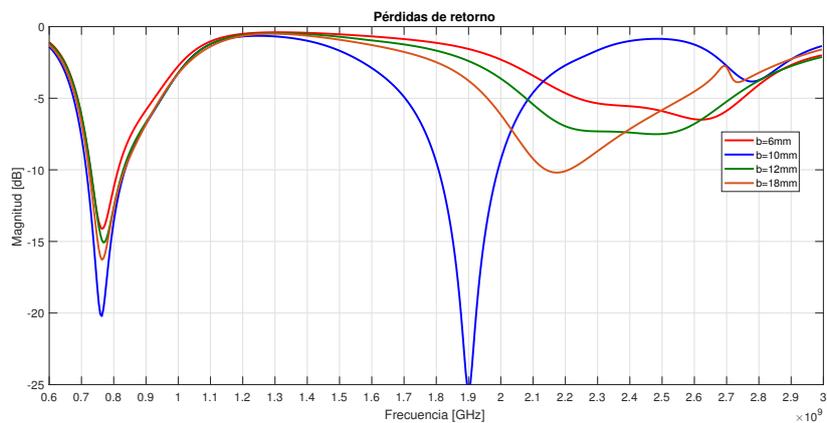
(b) Patrón de radiación de ganancia de fabricante

Figura 3.14: Patrón de radiación 2D de ganancia en dB de antena *PIFA* a $1860MHz$, tomado de [40].

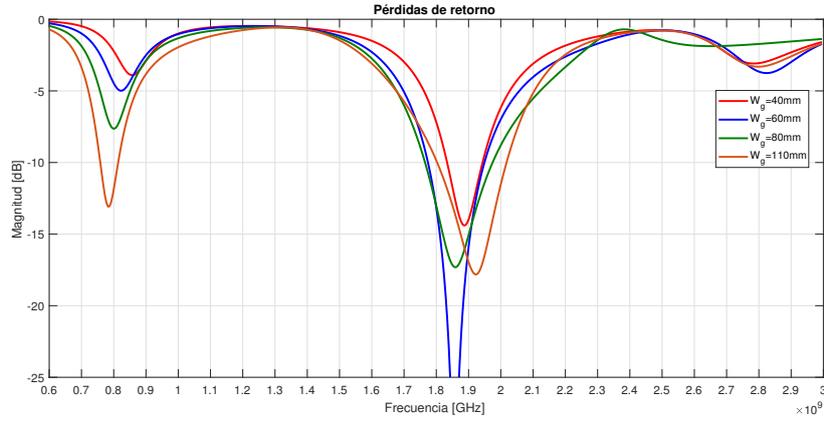
En la figura 3.13 y en la figura 3.14 los patrones de radiación de ganancia muestran gran similitud en forma y magnitud. Se conserva un patrón omnidireccional y se aprecia en los planos yz y xz que la antena no tiene un comportamiento direccional en el plano superior como lo tienen antenas con plano de tierra [33] en que su cercanía al plano de tierra es mayor, como por ejemplo, las antenas de tipo *microstrip*.



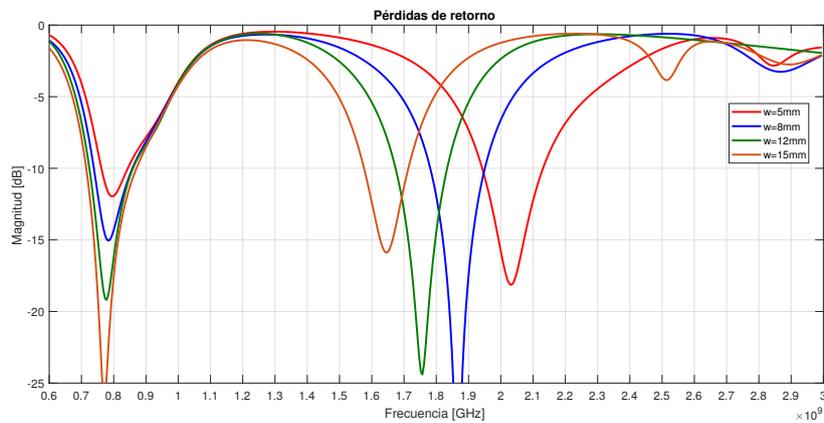
(a) Variación de a



(b) Variación de b



(c) Variación de W_g



(d) Varación de w

Figura 3.15: Estudio paramétrico de antena *PIFA* rígida.

Del estudio paramétrico mostrado en las imágenes anteriores se determina que la separación del parche con respecto al plano de tierra incide de forma directa en el acople de impedancia en alta frecuencia, de manera similar con W_g en banda baja. Ubicar la resonancia en banda alta está ligado a la variación del parámetro w .

3.1.3. Antena comercial *Taoglas fxub63*

Como parte de las antenas evaluadas se trata una geometría comercial de una antena flexible, la antena es la versión *fxub63* de [45]. Las dimensiones y características de diseño de la antena real no se encuentran en las hojas de datos, así que se genera un modelo de simulación a partir de la información tomada de [45] y mediciones de longitud de la antena física con una regla. El modelo equivalente se ilustra en la figura 3.16.

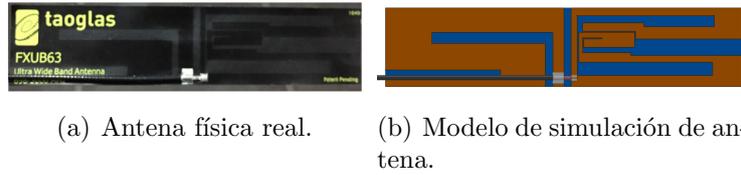


Figura 3.16: Antena comercial *Taoglas fxub63*, tomado de [45].

Las dimensiones de la antena son $96 \times 21 \times 0,13 \text{ mm}$, el modelo es de una sola capa de cobre de $35 \mu\text{m}$, con dieléctrico de tipo *Kapton* de $0,13 \text{ mm}$ de espesor. La antena posee plano de tierra independiente y está diseñada para cubrir múltiples bandas de telefonía celular. El diseño se basa en un par de lazos abiertos con ranuras de diferente ancho y longitud para operar en múltiples frecuencias. Se estima el desempeño de este perfil de simulación y se muestra el resultado de simulación más aproximado.

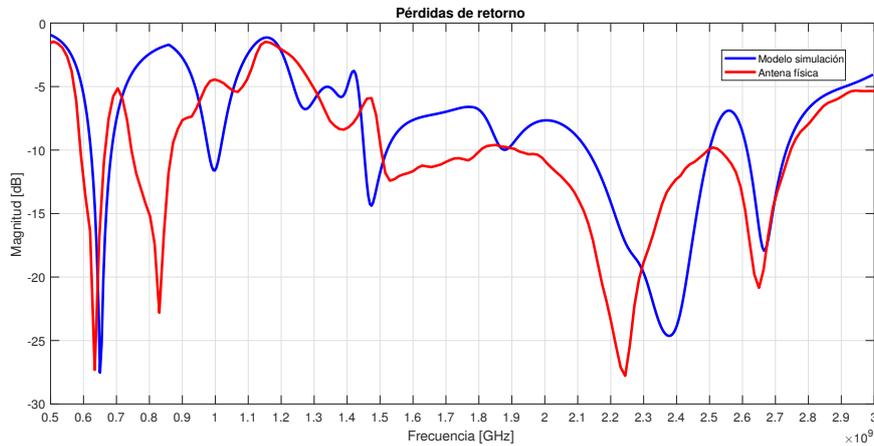
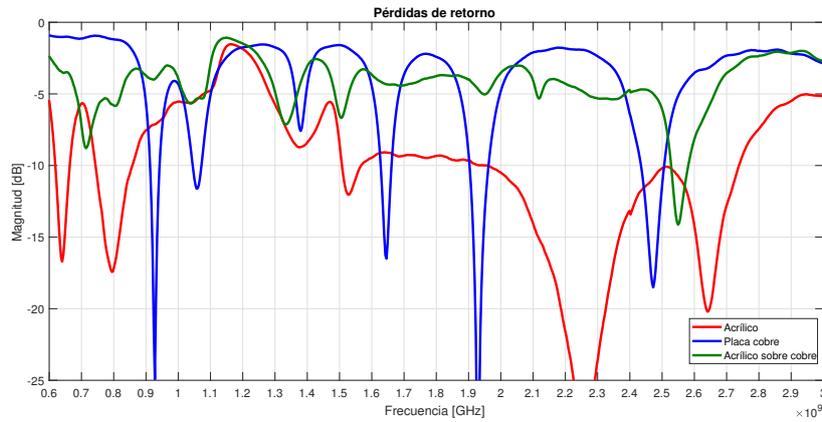


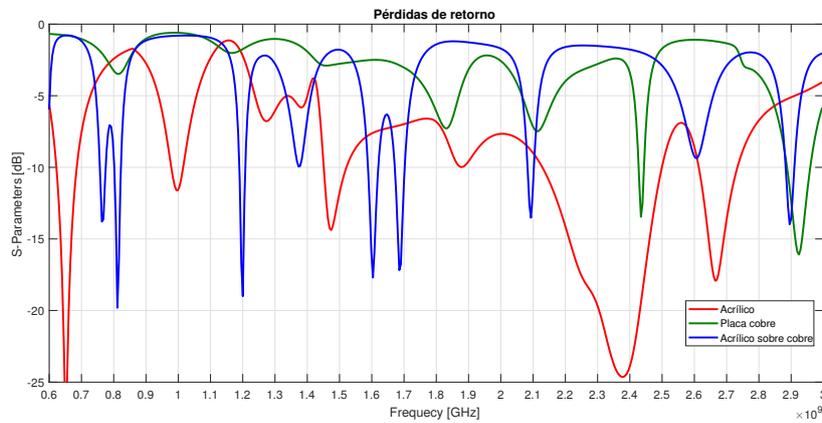
Figura 3.17: Correlación de antena *Taoglas fxub63* sobre placa de acrílico de 2 mm de espesor.

El coeficiente de reflexión simulado se asemeja en gran medida las características del coeficiente de reflexión medido bajo las mismas condiciones, pero la correlación es incompleta pues no es posible caracterizar la antena en función de la distribución de ganancia en el espacio.

Se hacen pruebas sobre diferentes superficies con el fin de comprobar el efecto de materiales con distinta permitividad relativa en las propiedades electromagnéticas de la antena física. Las mediciones se hacen con la antena sobre un placa de cobre, una placa de acrílico sobre cobre y una placa de acrílico.



(a) Pérdidas de retorno antenna real.



(b) Pérdidas de retorno de modelo de simulación.

Figura 3.18: Efecto de superficie conductora en el coeficiente de reflexión de antenna *Taoglas frub63*.

La antena tiene sensibilidad considerable al material al que se monta, por ejemplo, como se ve en la figura 3.18, colocar la antena en proximidad a un material conductor empeora considerablemente el desempeño de la antena. Al ubicar la antena sobre la placa de cobre se aprecia múltiples resonancias de ancho de banda angosto y desplazadas a lo largo del barrido. Estos factores señalan que el entorno en el cual la antena se coloca incide directamente en su desempeño y no se debe obviar esto al evaluar el diseño propuesto para un modelo esférico.

3.2. Diseño y optimización de antenas multibanda

Con el estudio hecho de la literatura y de los tres modelos anteriores se pasa al siguiente paso de la metodología y se da inicio al proceso de iteración y simulación de las antenas para un dispositivo móvil esférico.

3.2.1. Selección del sustrato

La selección del material para el sustrato es de gran importancia para el proceso de diseño de la antena propuesta. Ya que la antena debe tener la capacidad de ser mecánicamente flexible, el material a escoger debe ser maleable y robusto de manera que permita que la antena experimente deformaciones como flexiones sobre superficies curvas.

Como se expuso en el marco teórico, los sustratos adecuados para trabajar bajo escenarios como los que se proyecta para la antena son los sustratos sintéticos. El material flexible debe tener características mecánicas favorables pero no debe comprometer las propiedades electromagnéticas de permitividad eléctrica y pérdidas, por ello se escoge el dieléctrico *Kapton* del grupo de los polímeros tipo *PI*.

Kapton es una lámina de material flexible ampliamente usado en electrónica flexible por la buena combinación de características físicas, químicas y eléctricas. En [1][45][46] y [47] este material es usado como sustrato en antenas flexibles, además, este es un material comercial estándar que es compatible con las 3 técnicas de fabricación descritas y estará disponible en uno u otro fabricante sin importar el método de fabricación.

Para el diseño en el ambiente de simulación se usa la lámina de $25,4\mu m$ con $50\mu m$ de adhesivo dieléctrico y cobre de $35\mu m$ de espesor. Los parámetros del material que se obtuvieron de [35][48] son los siguientes:

- Permitividad eléctrica relativa (ϵ_r) = 3.4
- Tangente de pérdidas ($\tan(\delta)$) = 0.0018

Estos valores son medidos a $1kHz$ [48] y el material está incluido en la base de datos de Ansys [42].

3.2.2. Antena bowtie

Ahora bien, con la evaluación hecha de las configuraciones de antenas usadas en telefonía celular en la sección anterior se propone un diseño de antena multibanda para el sistema de radio comunicación de geometría esférica. La estructura de la antena se obtiene como referencia de las geometrías de antenas triangulares estudiadas en [7][21][46]. En la figura 3.19 se muestra el modelo parametrizado.

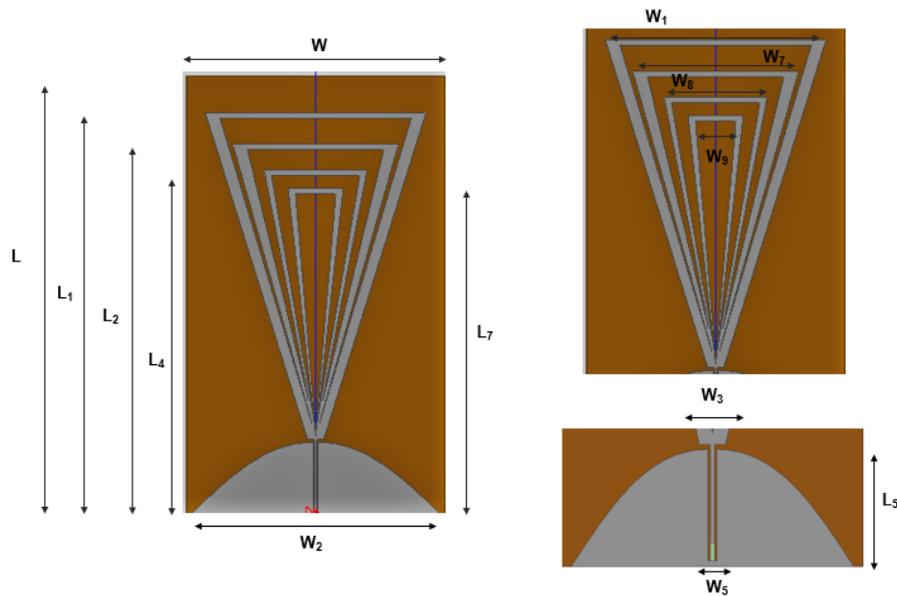


Figura 3.19: Modelo de simulación parametrizado de antena *bowtie* flexible

Esta antena es un diseño de tipo *bowtie* que cuenta con una estructura de guía de onda coplanar. La antena se caracteriza por reducir la metalización del plano conductor principal para tener iteraciones de la misma forma pero que se dimensionan para responder a longitudes eléctricas de frecuencias de resonancia específicas.

La construcción del modelo de simulación sigue las mismas pautas adoptadas con las antenas evaluadas en la etapa anterior. Los materiales se asignan de acuerdo a la selección del substrato *Kapton*.

3.2.3. Análisis paramétrico

Se estima el desempeño de la antena a medida que la geometría sufre modificaciones con la adición de elementos radiadores. La sensibilidad de la antena a las dimensiones del radiador principal brinda información suficiente para determinar el efecto en el acople de impedancia y propiedades electromagnéticas. En la figura 3.20 se ilustran las iteraciones iniciales aplicadas al modelo, las cuales varían en el número de resonadores.

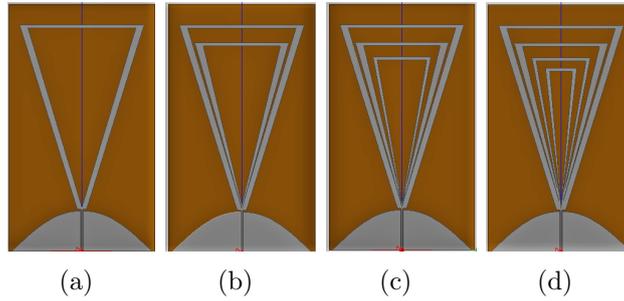
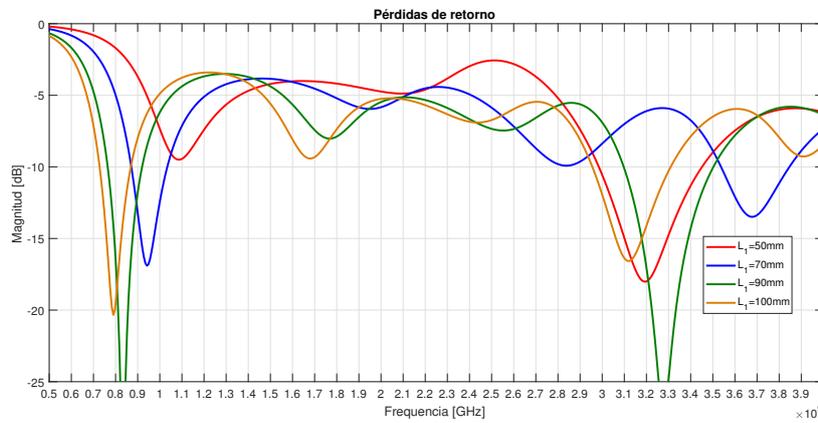
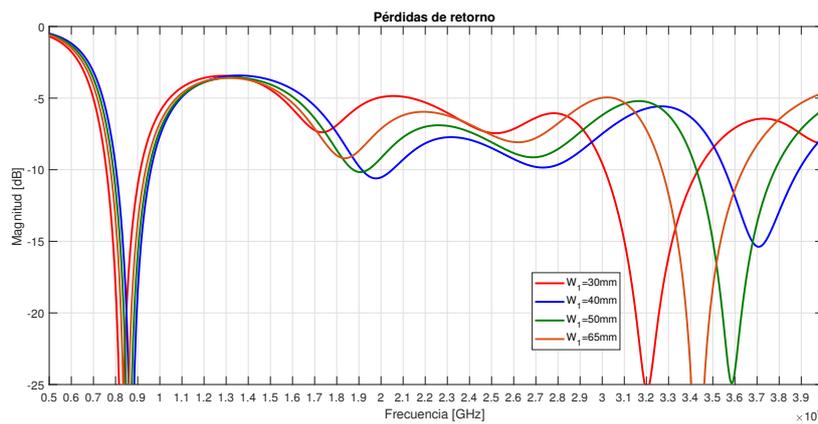


Figura 3.20: Iteraciones en la geometría de antena flexible multibanda.

En 3.21 se presentan los resultados de la variaciones de L_1 y W_1 para 4 valores diferentes.



(a) Pérdidas de retorno de análisis paramétrico de L_1

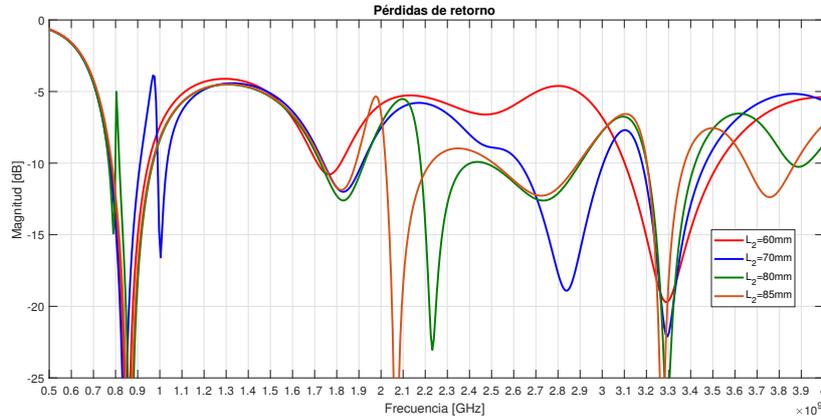


(b) Pérdidas de retorno de análisis paramétrico de W_1

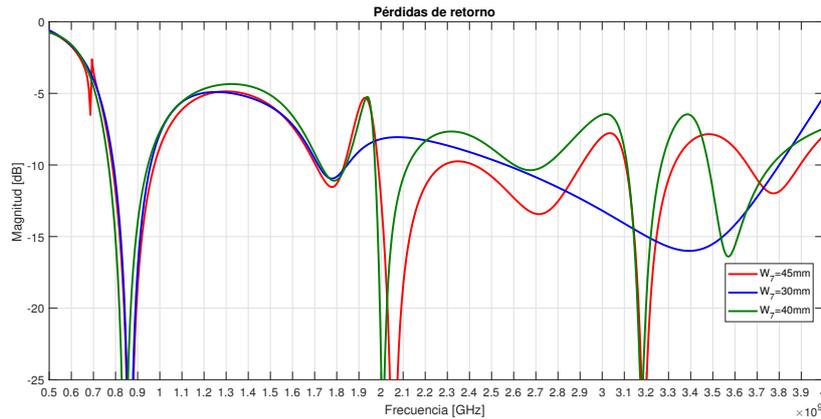
Figura 3.21: Variaciones paramétricas de iteración a .

Como se observa, el incremento en la longitud de L_1 trae consigo un desplazamiento a frecuencias menores, por ejemplo, en las resonancias de la banda entre $0,6 - 0,9 \text{ GHz}$.

Mientras que el incremento del ancho W_1 se hace con $L_1 = 90mm$ se aprecia que estos cambios no influyen en el desempeño en banda baja, sin embargo se observa que el mejor acople de la resonancia en banda alta se obtiene con $W_1 = 30mm$.



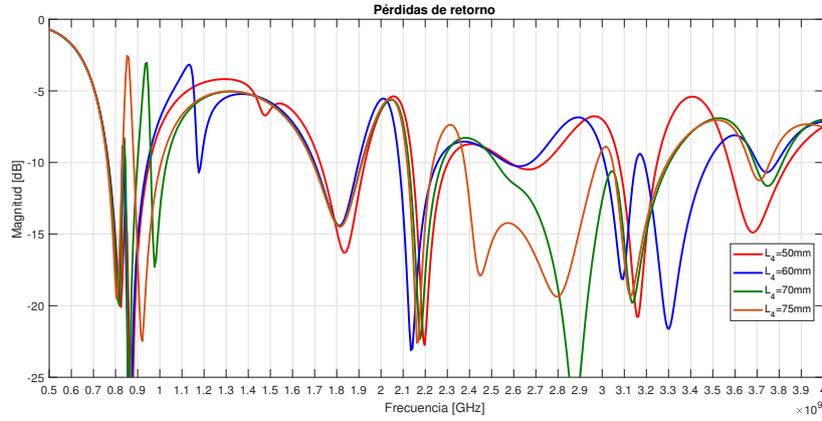
(a) Pérdidas de retorno de análisis paramétrico de L_2



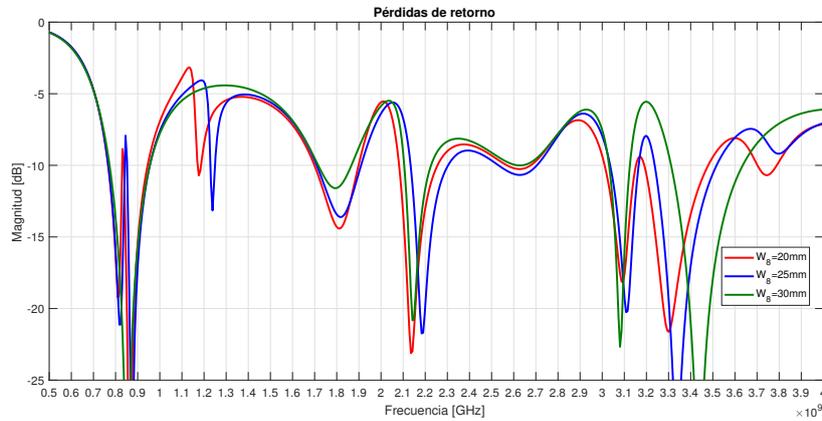
(b) Pérdidas de retorno de análisis paramétrico de W_7

Figura 3.22: Variaciones paramétricas de iteración b con $L_1 = 90mm$.

Por otro lado, cuando se agrega un segundo elemento conductor de longitud y ancho menor se generan nuevas resonancias en la respuesta en frecuencia de la antena. Con base en la figura 3.22 es claro que la longitud de L_2 establece una resonancia en la banda de $2 - 3 GHz$ y conforme su valor aumenta se ubica la resonancia a frecuencias cercanas a $2GHz$ y el ancho de banda en $-6dB$ mejora. Para la variable W_7 el ancho de banda a $-10dB$ es mayor con $W_7 = 45mm$.



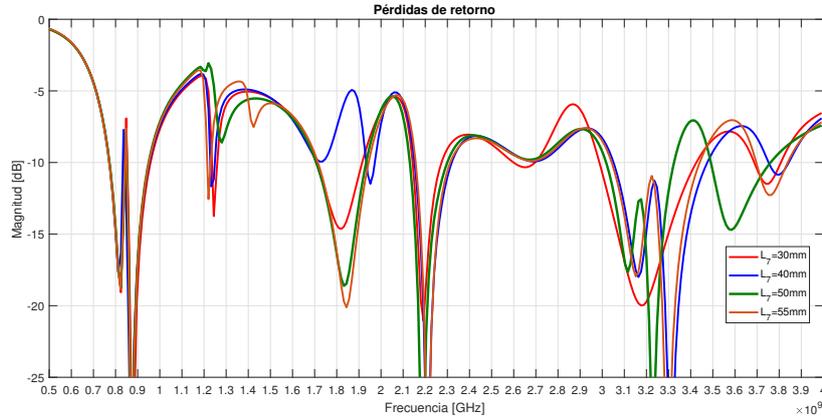
(a) Pérdidas de retorno de análisis paramétrico de L_4



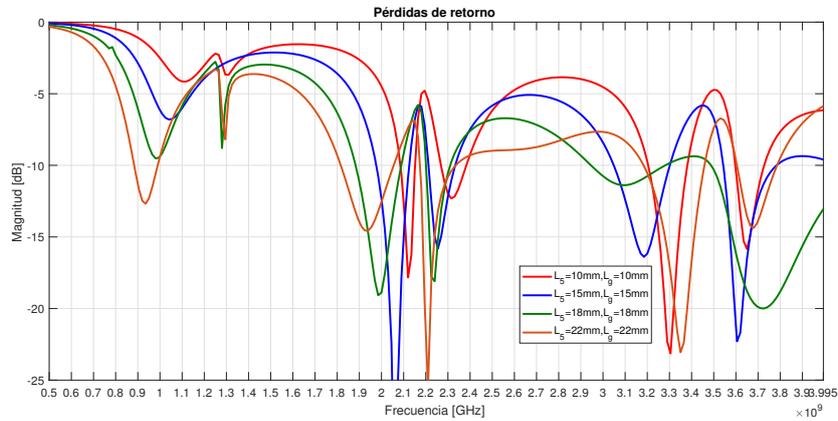
(b) Pérdidas de retorno de análisis paramétrico de W_8

Figura 3.23: Variaciones paramétricas de iteración c con $L_1 = 90mm$ y $L_2 = 85mm$.

Los resultados de simulación de la figura 3.23 muestran que la adición de un tercer resonador y la variación de L_4 tiene un efecto significativo en la resonancia de banda baja pues inserta una nueva resonancia y disminuye el ancho. Además, para la banda en el rango de 2 a 3 GHz al aumentar L_4 se obtiene un comportamiento de tipo *wide band* cuando $L_4 = 75mm$. Para las variaciones de W_8 no hay un efecto considerable en el acople de impedancia y en la ubicación de resonancias en el barrido.



(a) Pérdidas de retorno de análisis paramétrico de L_7



(b) Pérdidas de retorno de análisis paramétrico de L_5 y L_g

Figura 3.24: Variaciones paramétricas de iteración d .

Al agregar el último resonador el coeficiente de reflexión en la banda de 1,6 a 2 GHz está ligado a la longitud de L_7 y conforme este aumenta lo hace la magnitud. El análisis paramétrico se aplica a L_5 y L_g y se aprecia que el acople de impedancia de la estructura de CPW y el radiador principal es pobre para valores menores de L_5 y L_g .

Mediante el estudio paramétrico se determina que la antena se puede adecuar a las bandas de frecuencia requeridas por medio del ajuste en la separación entre los resonadores, lo que corresponde al acople de impedancias mutuo entre los resonadores. Un diseño con al menos 3 resonadores parece capturar bastante bien el desempeño deseado, por esto se va a trabajar con modelos de 3 y 4 resonadores.

A partir de esto se definen las variables de diseño de la antena como se ordena en la tabla 3.2. Las modificaciones necesarias a la estructura toman como punto de partida este modelo.

Tabla 3.2: Dimensiones iniciales de modelos de simulación de antena *bowtie*.

Variable	Dimensión (mm)	Variable	Dimensión (mm)
L_1	100	W_1	35
L_2	95	W_2	37
L_4	90	W_4	1.13
L_5	20	W_5	1.83
L_g	20	W_7	28
L	122	W_8	16
W	40	W_3	7

3.2.4. Deformación en espacio libre

El desempeño de la antena se evalúa en escenarios de flexión. La antena se dobla alrededor de un cilindro de radio R colocado en el plano trasero. La capa de sustrato y la capa de cobre se doblan por separado alrededor de la circunferencia. En la figura 3.27 y la figura 3.29 se ilustra la manera en la que la antena es doblada alrededor del eje x y el eje y .

Para lograr estimular la capa conductora de la antena se cambió la estructura de *source gap port* por un puerto paralelo a la cara del conductor en $x = 0$. El puerto se dimensiona de acuerdo a la separación entre la línea de señal y los planos de referencia del *CPW*, tal y como se sugiere en [42]. Esto se hizo ya que *HFSS* solamente permite asignar puertos que sean rectos y no tolera estructuras curvas.

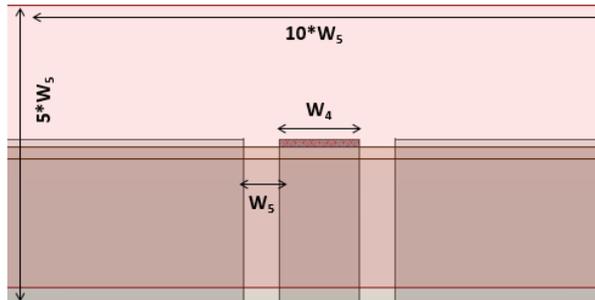


Figura 3.25: Puerto de modelo doblado

Con esta corrección se valida el modelo y calcula el parámetro $|S_{11}|_{dB}$ para 3 valores de radio diferentes ($R = 50mm$, $R = 60mm$ y $R = 70mm$) con la antena doblada a lo largo del eje y . Los radios de curvatura de la antena son equivalente a los radios de las carcasas interna y externa de modelos esféricos conocidos.

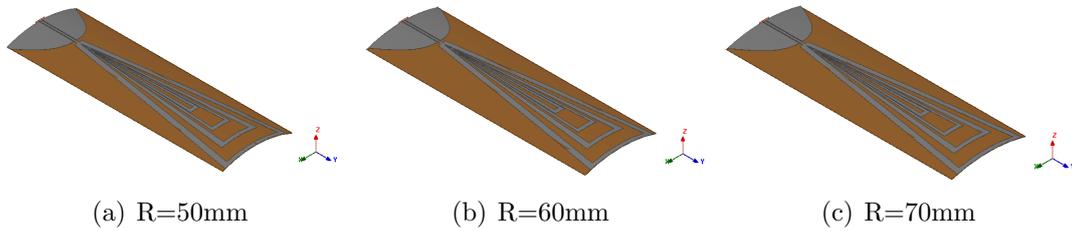


Figura 3.26: Deformación de la antena en el eje y debido a una curvatura de radio R .

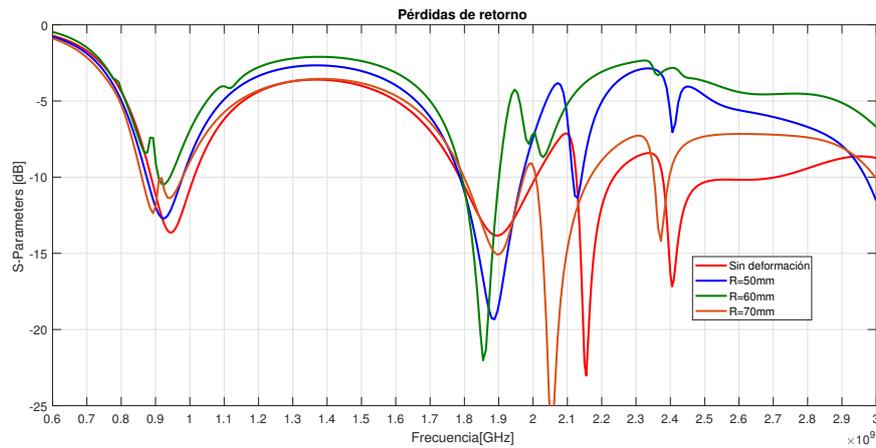


Figura 3.27: Curvaturas en el eje y para la antena *bowtie*.

La deformación de la antena presenta un efecto importante en las pérdidas de retorno. En banda baja no se observa un cambio abrupto en la magnitud y la ubicación de la frecuencia central, caso contrario en la banda de $1,7GHz$ en adelante. Con $R = 50mm$ y $R = 60mm$ el mejor acople se da en la banda intermedia ya que en banda baja y alta el ancho de banda en $-6dB$ se ve disminuido. Se dobla la antena en el eje x como se muestra en la figura 3.28 y los resultados de simulación se adjuntan en la figura 3.29.

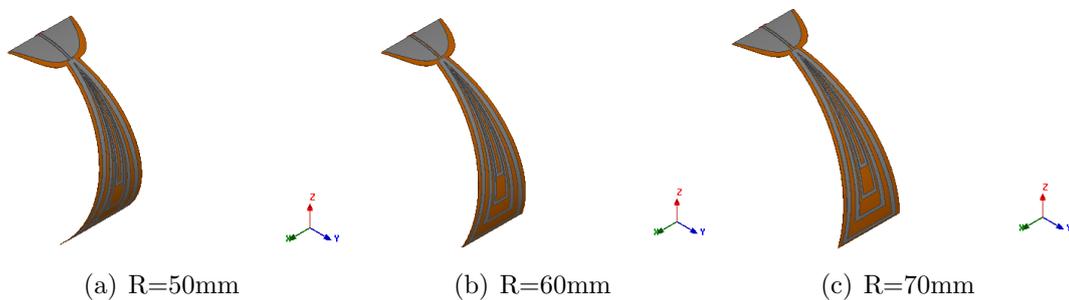


Figura 3.28: Deformación de la antena en el eje x debido a una curvatura de radio R .

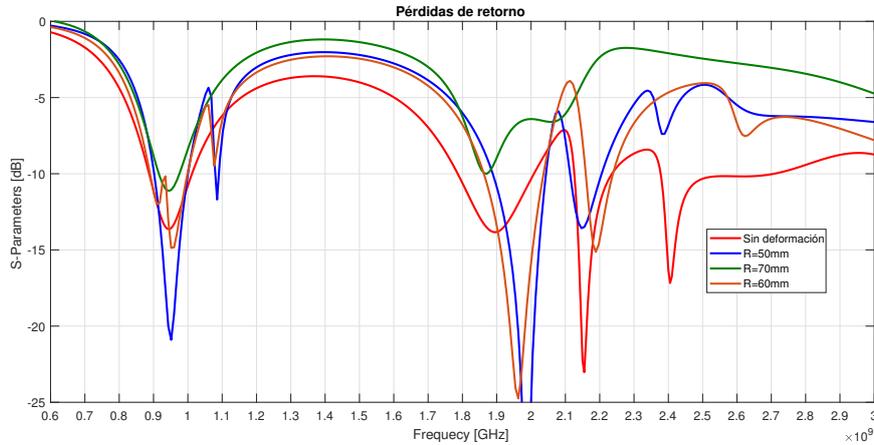


Figura 3.29: Curvaturas en el eje x para la antena *bowtie*.

Como se puede observar las pérdidas de retorno de la antena se ven afectadas por la deformación en el eje x . Bajo flexión con $R = 50\text{mm}$ y $R = 60\text{mm}$ el ancho de banda tiende a ser un poco más angosto en las bandas inferiores a -6dB , y hay un leve desplazamiento en las frecuencias de banda alta. Para $R = 70\text{mm}$ el desempeño de la antena es muy pobre, lo que supone que doblar la antena de esa forma incide negativamente en el acople de impedancia mutuo de los resonadores.

3.2.5. Variaciones de diseño de antena *bowtie*

Con el conocimiento de las limitaciones físicas de la antena bajo escenarios de deformación y la sensibilidad de las variables de diseño en su operación en banda, se proponen 4 variaciones del modelo inicial como se ilustra en la figura 3.30.

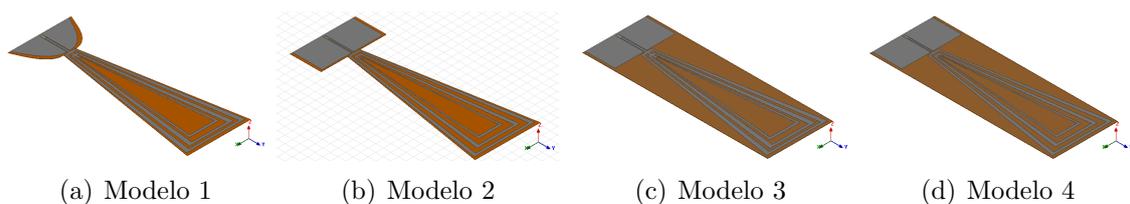
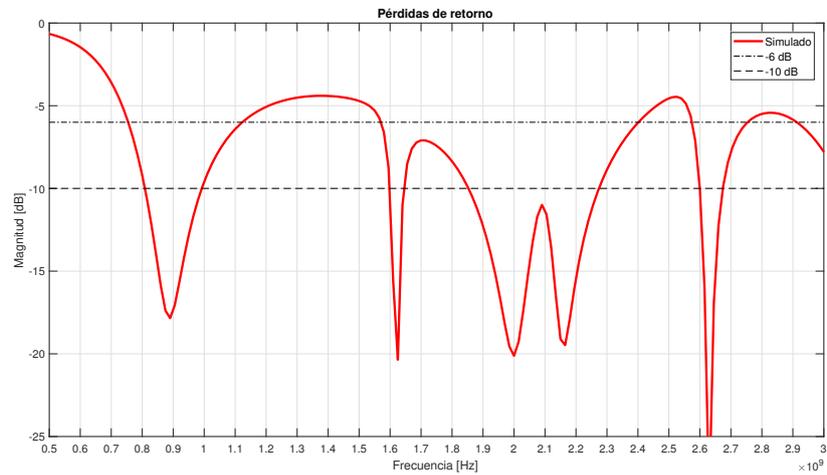


Figura 3.30: Variaciones de diseño de antenas *bowtie*.

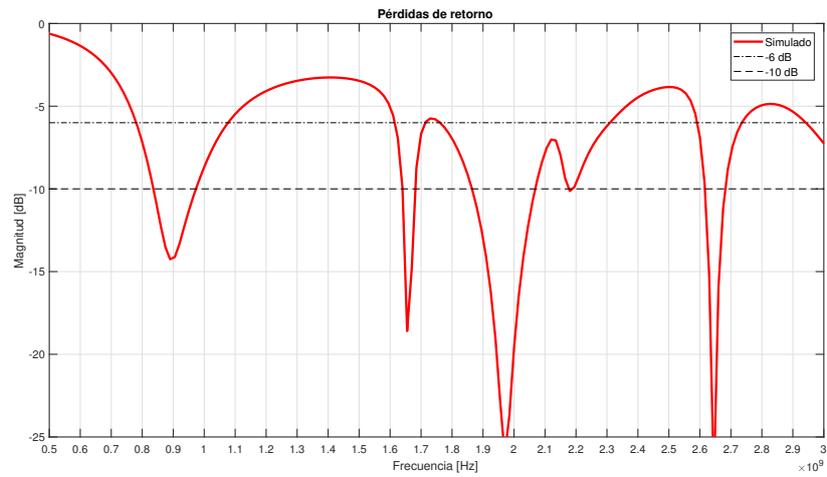
El modelo 1 y modelo 3 comparten las dimensiones de los radiadores y línea de alimentación, ya que en estos diseños la línea de alimentación se extiende hasta el tercer resonador. La principal diferencia es la forma del plano de tierra del *CPW* y el área efectiva del sustrato. Esta última se reduce para que la integración de la antena sobre el modelo esférico se ajuste lo mejor posible a su superficie.

Por su parte, el modelo 2 y 4 comparten las mismas medidas en el plano de tierra y en plano conductor. La línea de alimentación solamente hace contacto con el primer resonador,

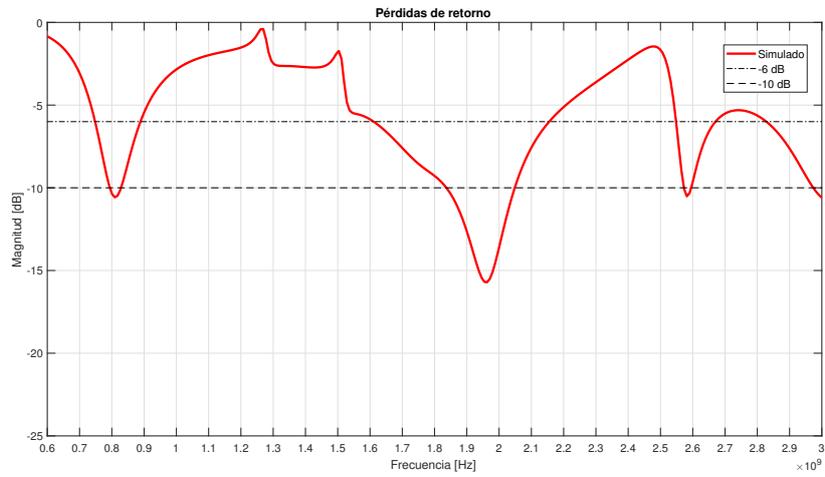
con $W_4 = 0,73mm$ y $W_5 = 1,43mm$ para favorecer el acople mutuo entre resonadores. Se definen las condiciones de simulación como se han trabajado los demás modelos y se obtienen los resultados mostrados en la figura 3.31 para las variantes generadas.



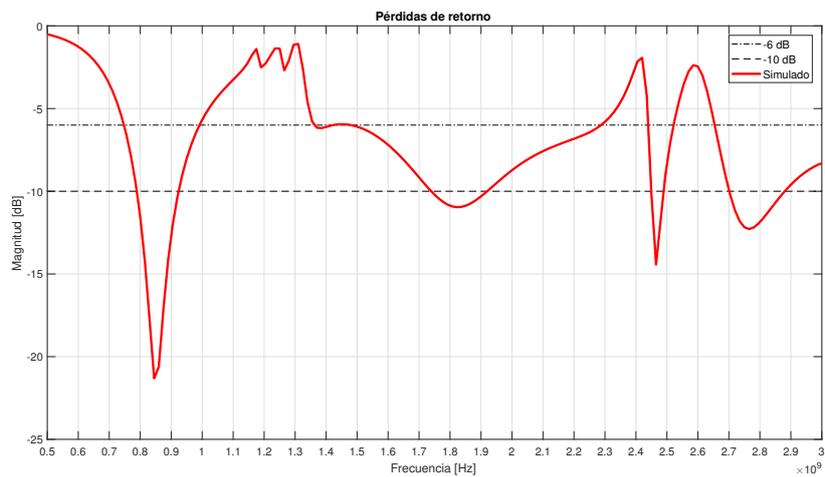
(a) $|S_{11}|$ modelo 1



(b) $|S_{11}|$ modelo 2



(c) $|S_{11}|$ modelo 3



(d) $|S_{11}|$ modelo 4

Figura 3.31: Pérdidas de retorno de variaciones de modelos de simulación de antenas *bowtie*.

Para los cuatro modelos se tiene un comportamiento multibanda y de banda ancha con un buen acople en la banda de baja ($600 - 900 \text{ MHz}$) e intermedia ($1500 - 2200 \text{ MHz}$). El detalle de las bandas de frecuencia cubiertas con referencia en -6dB y -10dB se ordenan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Desempeño en ancho de banda de las variaciones de modelos de simulación de antenas *bowtie*.

Modelo	Ancho de banda (MHz)		Bandas
	-6 dB	-10 dB	
Variación #1	759-1120	811-994	1,2,3,4,5, 8,10,13*,14
	1565-2406	1593-2280	
	2574-2753	2599-2676	
Variación #2	776-1078	836-973	1,2,3,4,5, 8,10,13*,14*
	1610-2315	1866-2189	
	2592-2735	2609-2680	
Variación #3	741-893	1835-2052	,1,2,3,4,5, 10,14,13
	1611-2160		
	2555-2826		
Variación #4	740-995	785-920	1,2,3,4,5, 8,10,13,14
	1355-2300	1700-1925	

Estas antenas son capaces de cubrir de forma parcial (13*,14*) las bandas 13 y 14 de *US 700*, *CDMA*, *AWS* y *GSM*, en caso de que se deba hacer un retroceso a una tecnología anterior a *4G*. El acople en banda baja resulta ser bueno ya que se alcanza un promedio de $342MHz$, mientras que en la banda intermedia es de $760MHz$ a $-6dB$.

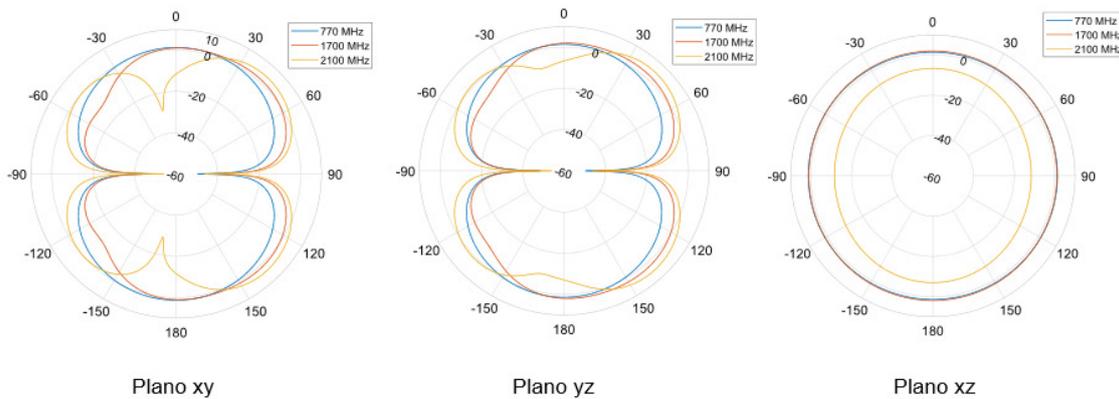


Figura 3.32: Patrón de radiación de ganancia en dB de variación 1 de antena *bowtie* en espacio libre.

Las antenas se caracterizan por contar con patrones de radiación omnidireccionales, por ejemplo, en la figura 3.32 el patrón de ganancia del modelo 1 distribuye la energía en prácticamente todas las direcciones. La ganancia pico máxima es de $1,67dB$ para $700MHz$, $3,02dB$ para $1700MHz$ y de $4,80dB$ para $2100MHz$.

3.2.6. Desempeño de la antena en la proximidad de un plano de blindaje esférico

Con el conocimiento del desempeño de las antenas bajo circunstancias de ausencia de deformación se procede a montar las antenas sobre un cascarón esférico. Las pérdidas de

retorno de las antenas se evalúan bajo la flexión generada por el modelo de simulación.

El modelo tiene un radio interno de $48mm$ y externo de $58mm$. La carcasa se define como caucho y en su interior posee una estructura interna de $4mm$ de espesor, hecha de plástico y que contiene en su interior la pintura conductora. Las variaciones presentadas en la figura 3.30 se doblan de acuerdo al radio de la esfera y se colocan sobre la carcasa como se ilustra en la figura 3.33.

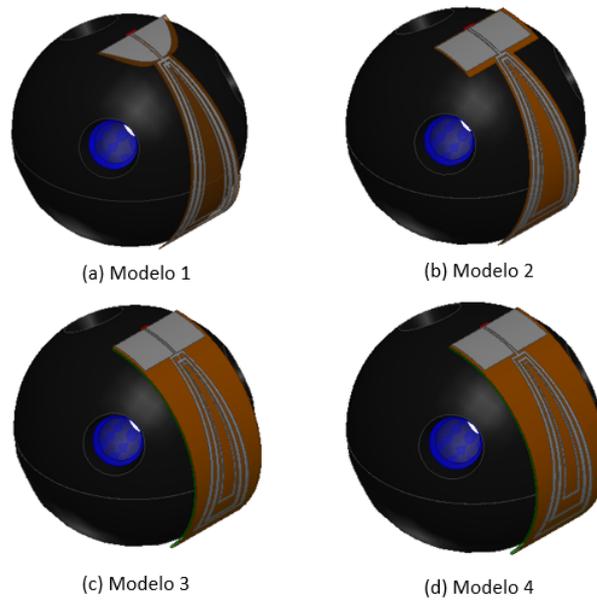
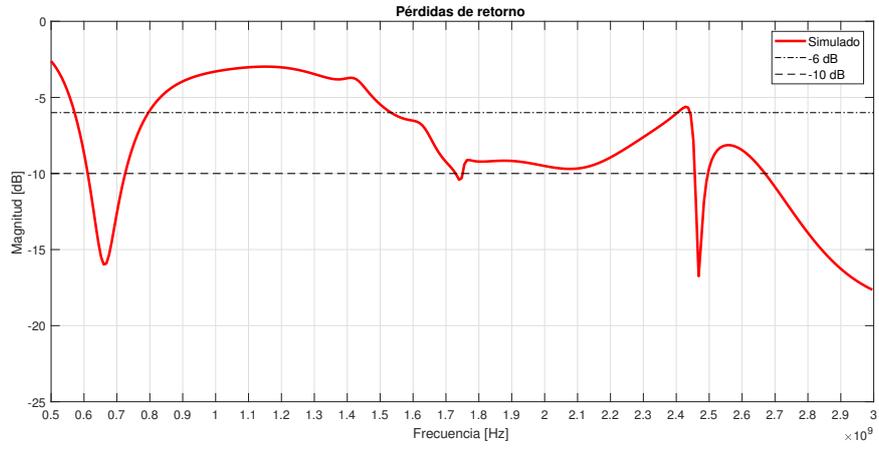
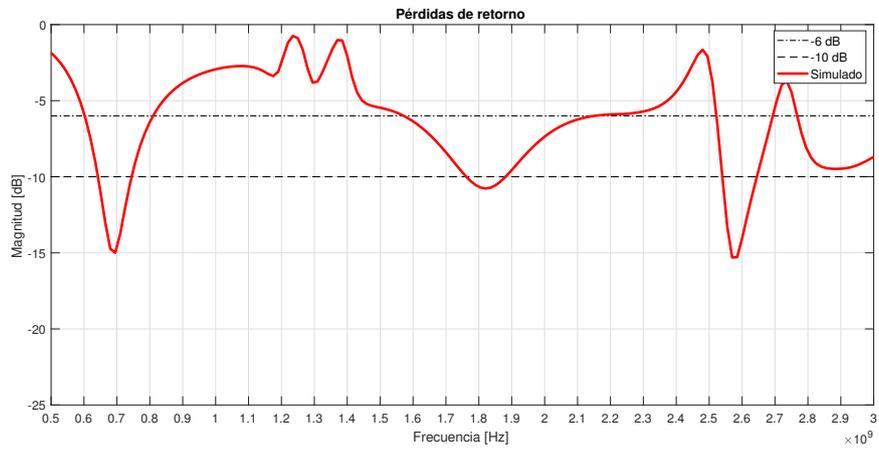


Figura 3.33: Modelo de simulación doblados sobre para la antena *bowtie*.

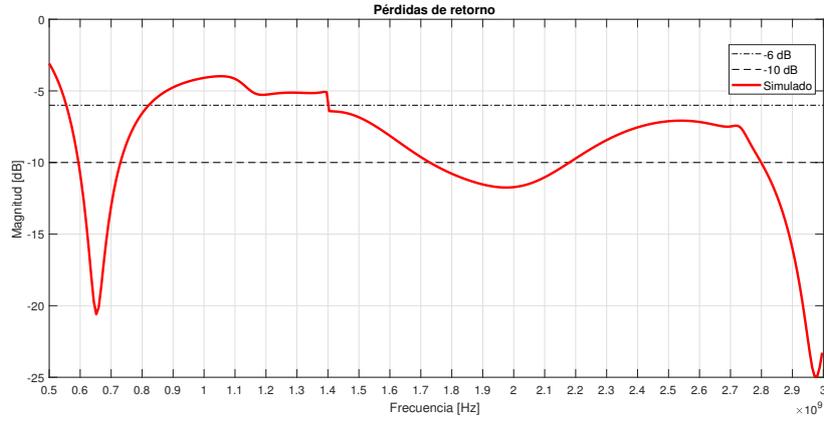
Se definen las condiciones de simulación y se da inicio al proceso para obtener las pérdidas de retorno de estas antenas dobladas. Los resultados de simulación se extraen y se analiza el desempeño en banda en las referencias de $-6dB$ y $-10dB$.



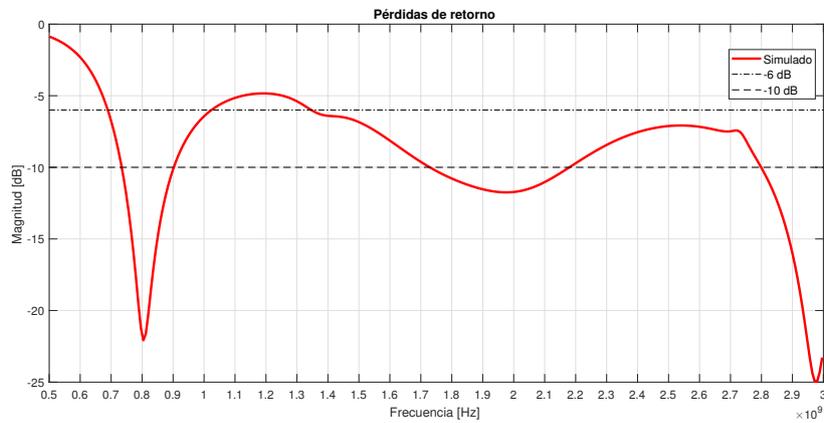
(a) $|S_{11}|$ modelo 1



(b) $|S_{11}|$ modelo 2



(c) $|S_{11}|$ modelo 3



(d) $|S_{11}|$ modelo 4

Figura 3.34: Pérdidas de retorno de variaciones de modelos de simulación de antenas *bowtie*.

Como se aprecia en la figura 3.34 las antenas logran un buen acople en banda baja. Se logra mantener un ancho de banda amplio en la banda intermedia a pesar de que como se determinó en los resultados de la figura 3.18 y en la figura 3.29, la proximidad de la antena a la pintura conductora y la deformación física de la antena deterioran la respuesta en frecuencia. A partir de las pérdidas de retorno obtenidas en simulación se detalla el ancho de banda de las antenas y se muestra en la tabla 3.4

Tabla 3.4: Desempeño en ancho de banda de las variaciones de modelos de simulación de antenas *bowtie* flexionadas.

Modelo	Ancho de banda (MHz)		Bandas
	-6 dB	-10 dB	
Variación #1	566-805	608-740	1,2,3,4,10
	1530-2935	2662-3000	12,13,14,17
Variación #2	605-815	650-740	1,2,3,4,10
	1500-2300	2540-2645	12,13,14,17
	2525-2645		
Variación #3	556-828	1732-2170	1,2,3,4,12,
	1405-3000		13,14,17
Variación #4	684-1036	1732-2240	1,2,3,4,5,7,
	1344-3000	2804-3000	8,10,12,13,14,17

Al igual que en los modelos en que las antenas no se flexionan, se alcanza a cumplir en banda para múltiples anchos, conservando las características multibanda y logrando satisfacer al menos para 8 bandas de operación en el peor de los casos.

3.2.7. Antena PIFA flexible

Se genera un segundo diseño de antena de tipo *PIFA*. Este modelo se basa en el único prototipo comercial para la banda de *Wi-Fi* de $2,4GHz$ [49]. La antena se diseña sobre un sustrato flexible y se dobla sobre una espuma para alcanzar la separación requerida entre el parche y el plano de tierra.

Este prototipo, al igual que el anterior, se modela sobre el sustrato *Kapton* de $0,11mm$ de espesor con capa de cobre de $35\mu m$. El diseño de la antena responde al análisis de la antena *PIFA* rígida y las geometrías multibanda tratadas en [25][44]. El modelo de la antena diseñada se ilustra en la imagen 3.35.

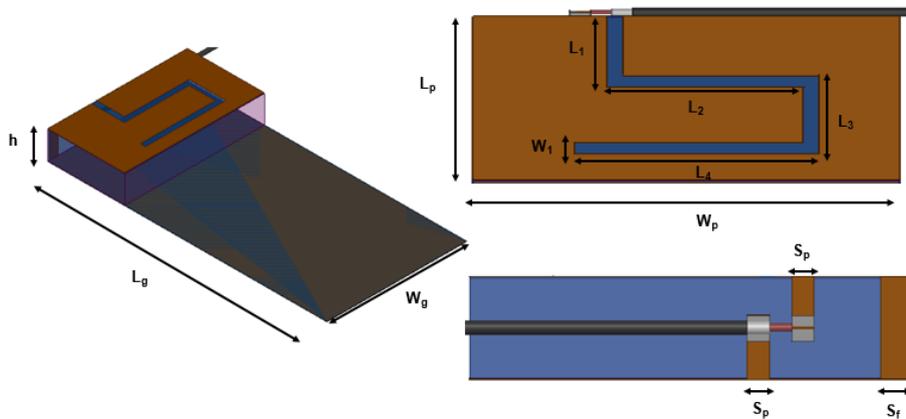
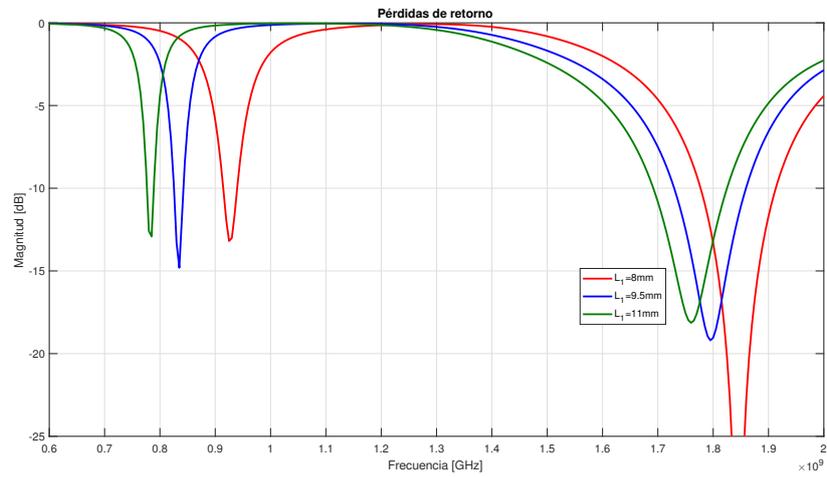


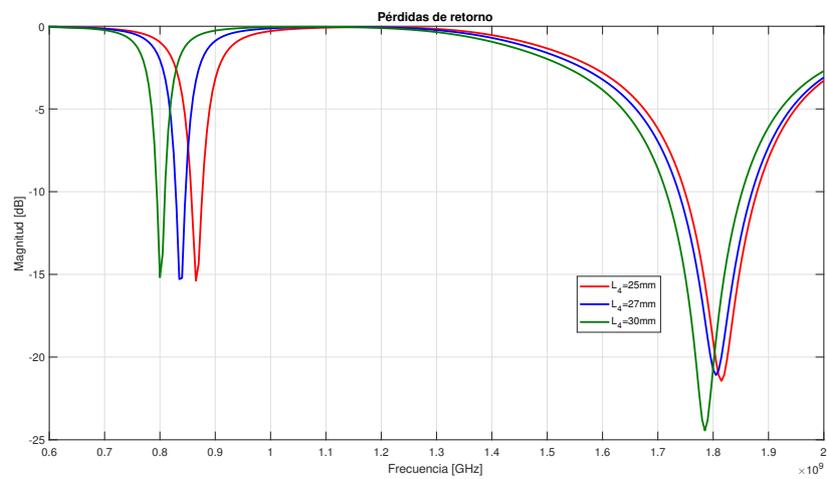
Figura 3.35: Modelo de simulación de antena *PIFA* flexible.

3.2.8. Análisis paramétrico

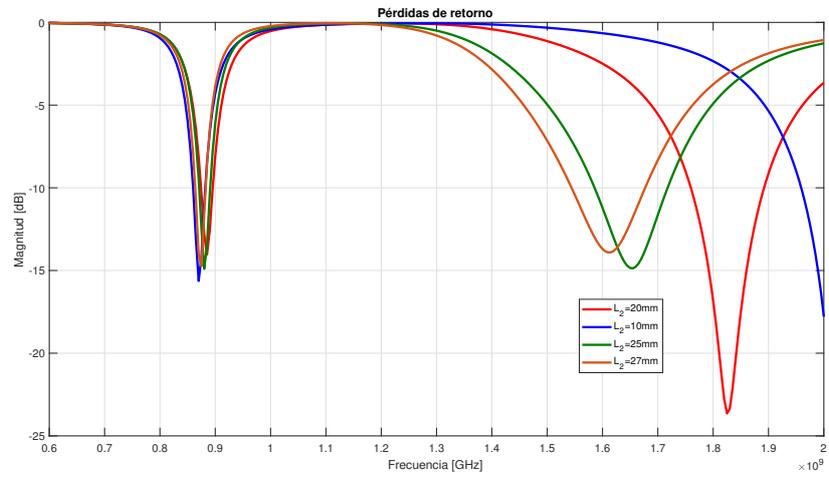
Siguiendo el flujo de trabajo, se hace el análisis paramétrico de las variables de la figura 3.35 y se obtienen los resultados mostrados en la figura 3.36



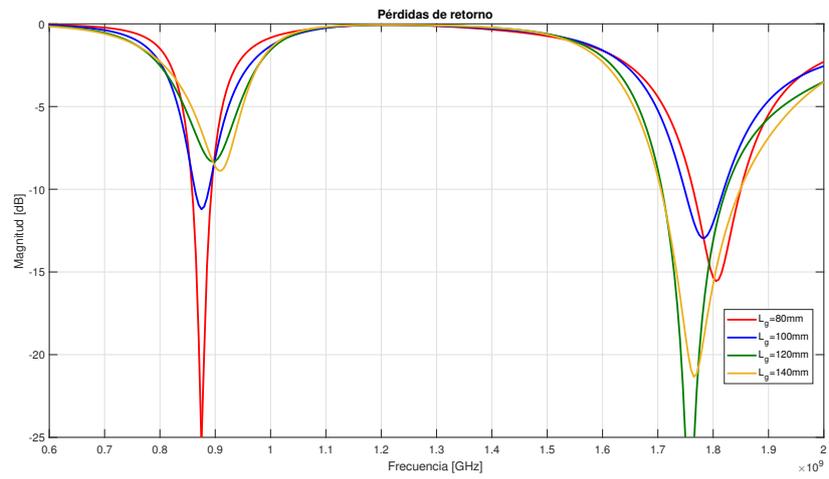
(a) Variciones de L_1



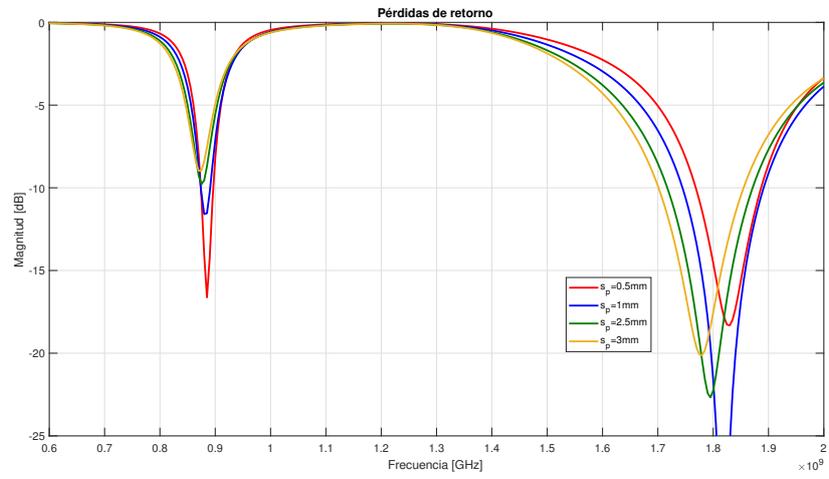
(b) Variciones de L_4



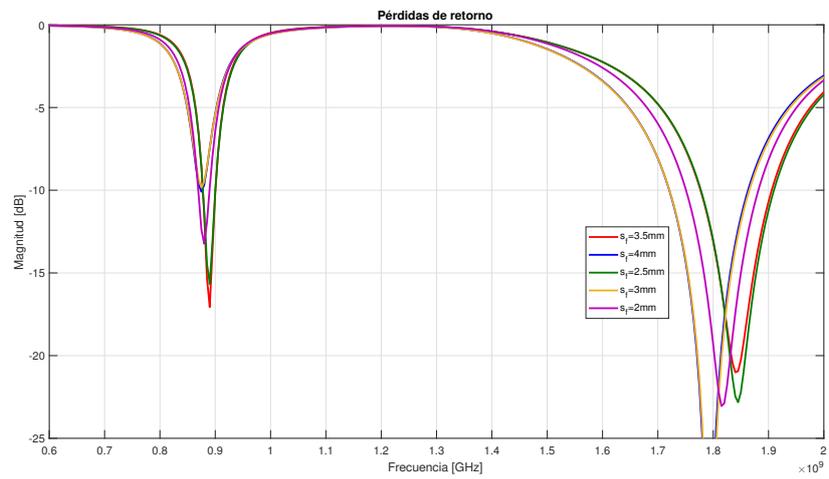
(c) Variciones de L_2



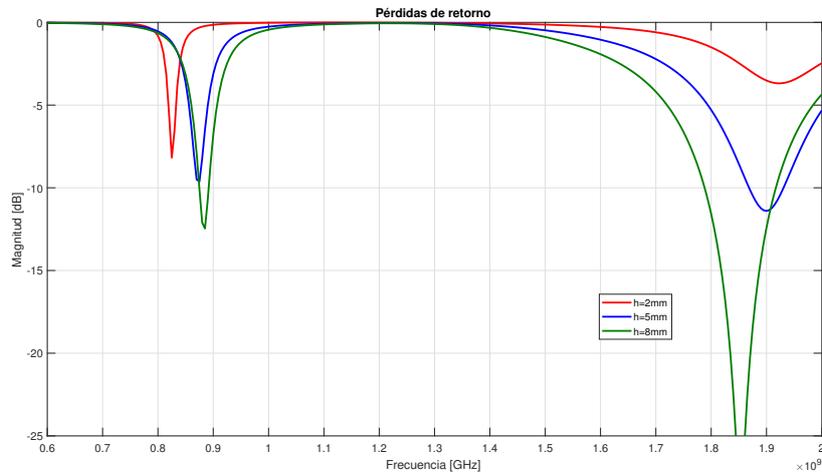
(d) Variciones de L_g



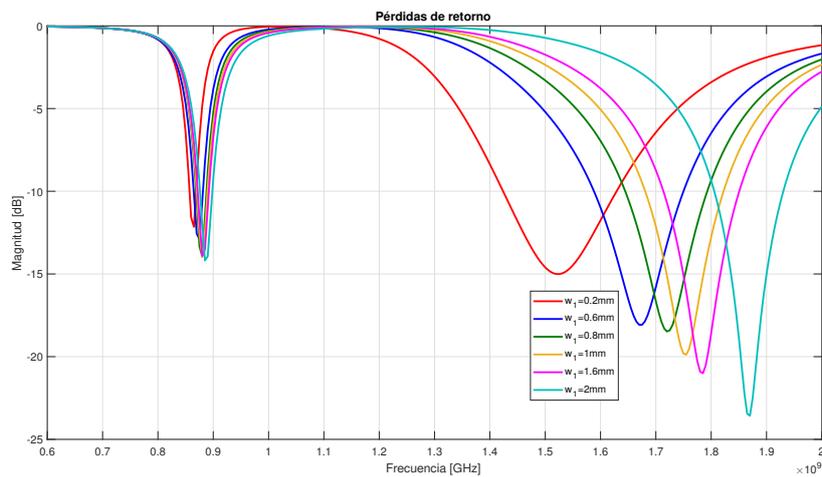
(e) Variciones de s_p



(f) Variciones de s_f



(g) Variciones de h



(h) Variciones de w_1

Figura 3.36: Análisis paramétrico de antena *PIFA* flexible de doble banda.

Se determina que las variables de diseño que más influencia tienen en la capacidad para centrar las resonancias en banda son L_1 y L_2 , ya que con L_1 se posiciona la resonancia en banda baja y con L_2 la resonancia en banda alta. Mientras que la dependencia de la antena de variables como el ancho del pin de cortocircuito s_f , el largo del plano de tierra L_g y el ancho de las tiras de unión al cable coaxial s_p no tiene un efecto significativo en el desempeño de la antena.

A medida que disminuye la distancia h entre el parche y el plano de tierra la respuesta en frecuencia empeora. El ancho de banda en banda alta depende del ancho de las ranuras en el parche, conforme incrementa w_1 se desplaza en frecuencia y el ancho de banda aumenta.

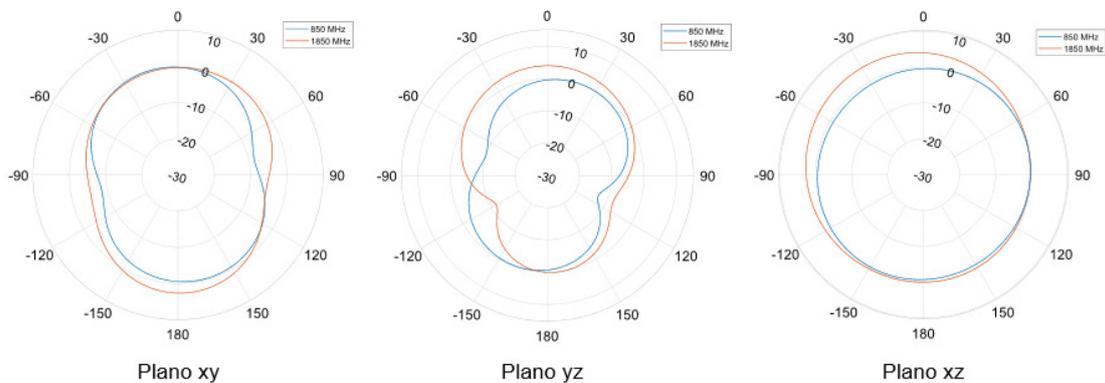


Figura 3.37: Patrón de radiación de antena *PIFA* flexible en espacio libre.

Al igual que se determinó con la antena *PIFA* rígida el patrón de radiación de esta antena omnidireccional con una ganancia pico de $0,2dB$ para $800MHz$ y $4,46dB$ para $1800MHz$. Lo que resulta normal por el hecho de que la magnitud de la resonancia en banda alta es considerablemente mayor que en banda baja.

3.2.9. Desempeño de la antena en la proximidad del modelo esférico

Al igual que con la antena anterior, se determina el comportamiento de la antena *PIFA* en la cercanía de la superficie de la bola. Para ello se generan dos variaciones. En la primera se ajustan las variables L_2 y L_4 para alcanzar frecuencias de la banda de $700MHz$ sin perder la resonancia en banda alta cercana a $1700MHz$. La segunda variación busca cubrir en baja frecuencia la banda de $800MHz$ mientras que en alta frecuencia las bandas 2 y 25 del espectro de $4G$. En la figura 3.38 se ilustran las variaciones aplicadas.

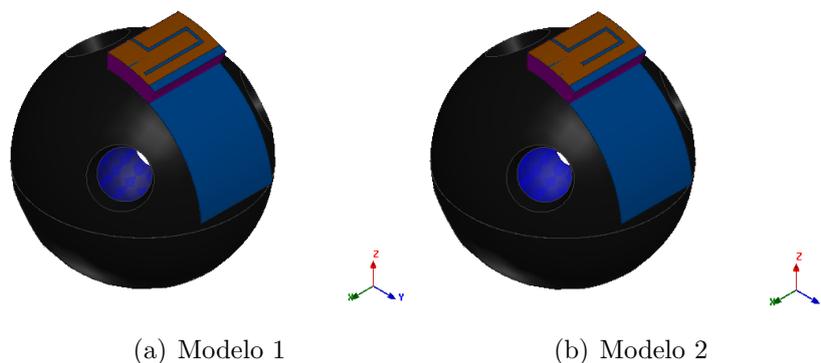
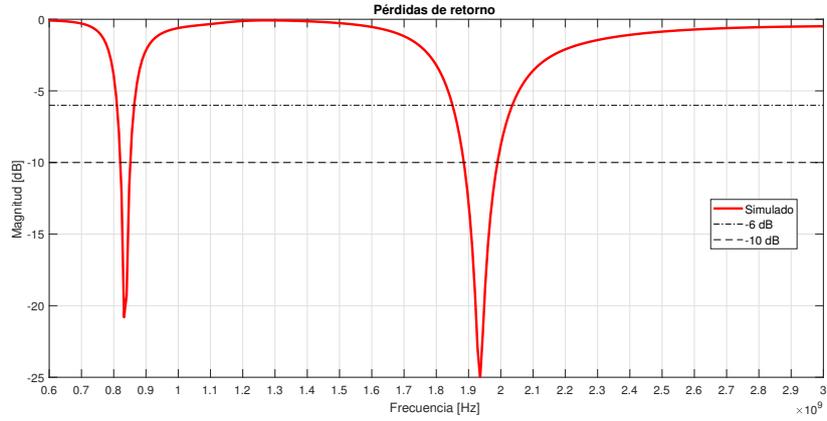
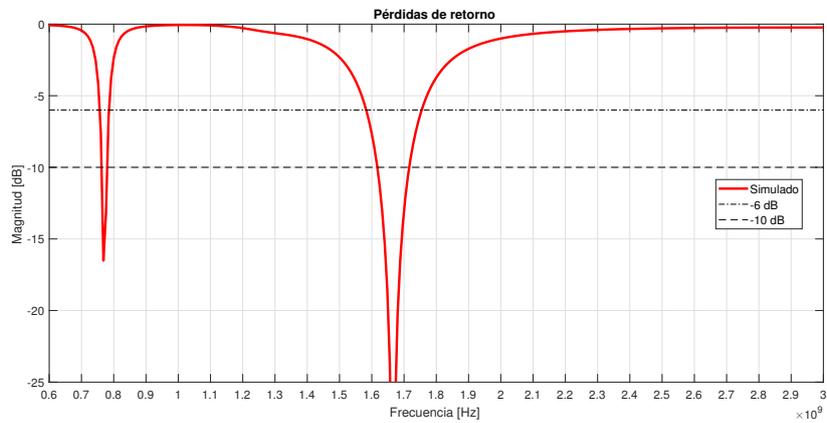


Figura 3.38: Modelo de simulación de antena *PIFA* flexible sobre carcasa esférica.



(a) $|S_{11}|$ medido de (a)



(b) $|S_{11}|$ medido de (b)

Figura 3.39: Pérdidas de retorno de variaciones (a) y (b) de simulación de antena *PIFA* flexible sobre superficie esférica.

Los resultados de simulación muestran dos resonancias definidas, la primera se ajusta en la banda baja del barrido y la segunda en la banda intermedia. El ancho de banda de los prototipos y las bandas que cubren se definen en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Ancho de banda de mediciones de las variaciones de los modelos de simulación de antenas *pifa* dobladas

Modelo	Ancho de banda (MHz)		Bandas
	-6 dB	-10 dB	
Variación #1	780-864/1847-2070	809-849/1867-1984	8,2,DCS 1800
Variación #2	740-783	1576-1760/1621-1719	13

3.3. Fabricación de las antenas

Ahora bien, con los diseños de las antenas *bowtie* y *PIFA* flexible, se procede a su fabricación. El diseño de fabricación se hizo en *Eagle* [50] y se usó el formato “Gerber RS-274X” para generar los archivos requeridos por el fabricante. Las antenas se colocan y fabrican en panel tal y como se ilustra en la figura 3.40.

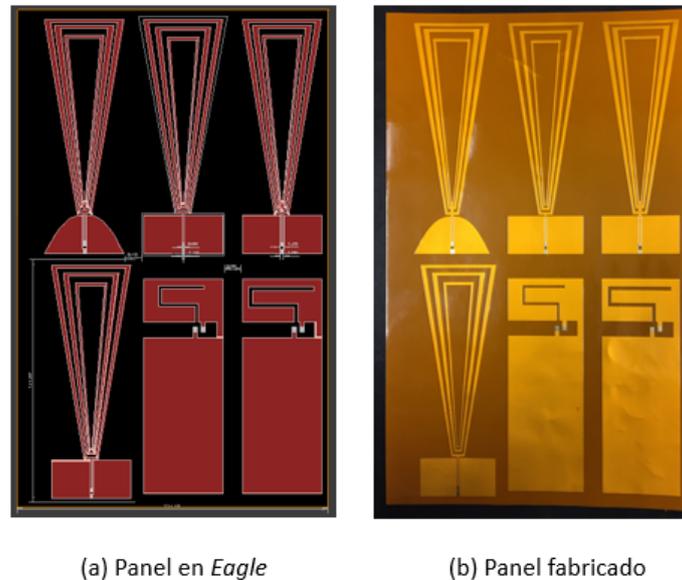


Figura 3.40: Panel de antenas flexibles para geometría esférica.

El método de fabricación usado fue *LDI* por su alta precisión y rapidez. Además, tal y como se mencionó, el sustrato a utilizar es *Kapton* de $0,11\text{mm}$ de espesor, este dieléctrico se recubre con un adhesivo flexible de $50\mu\text{m}$ para reforzar la estructura y que el cobre se adhiera sin problemas. Las especificaciones de fabricación de las antenas son las siguientes:

- Dimensiones: $147 \times 253\text{mm}$.
- Capas: 1.
- Sustrato: *Kapton* de $50\mu\text{m}$
- Espesor del *FPC*: $0,11\text{mm}$.
- Espacio mínimo entre pistas: $\geq 0,1\text{mm}$.
- Acabado de capa de conducción: Cobre de $1\text{oz}(35\mu\text{m})$.
- Acabado de superficie: ENIG.
- *Solder Mask*: Amarillo.

- Adhesivo: Plano posterior.

Estas condiciones de fabricación son equivalentes a las usadas en los modelos de simulación. El acabado de tipo *ENIG* se selecciona por sus buenas propiedades eléctricas sobre el cobre, ya que brinda protección duradera al *PCB* para alcanzar excelentes propiedades mecánicas. El *coverlay* o *solder mask* se coloca para dar mayor protección al circuito y se escoge amarillo para apreciar el diseño de las antenas. El adhesivo que se pone en el plano posterior de las antenas se usa para pegar las mismas a distintas superficies de montaje.

4 Validación y Análisis de Resultados

En este capítulo se describirá el proceso de validación de las antenas flexibles multibanda fabricadas para el sistema de radio comunicación de geometría esférica. Para esto se realizaron pruebas de parámetros medibles por medio del equipo disponible en el Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas.

Para obtener el coeficiente de reflexión de las antenas en los diferentes escenarios se usó en analizador de redes (*VNA-Vector Network Analyzer*), de *Keysight*, modelo PXIE-M910A, cuyo ancho de banda de operación es de 0Hz hasta 20GHz .

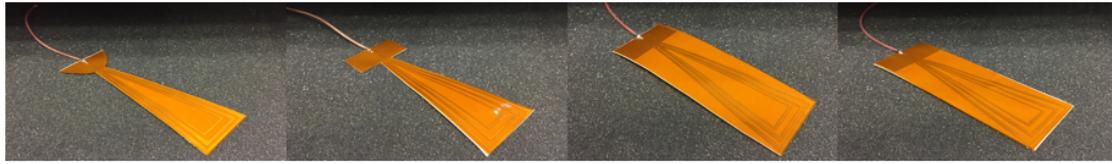
Se calibra un puerto del dispositivo usando la calibración de tipo *SOLT* (*Short-Open-Load-Thru*) para contemplar las pérdidas generadas por el cable y los conectores, de manera que en el plano de medición solo se mida el elemento bajo prueba. Una vez calibrado el *VNA* se define un barrido con la siguiente distribución:

- Frecuencia inicial: 0.5 GHz .
- Frecuencia final: 4 GHz .
- Paso de frecuencia: 0.070140 GHz .
- Puntos de simulación: 500.

Las mediciones de las antenas se hicieron sobre una espuma aislante que se usa para disminuir las reflexiones generadas por materiales metálicos en el Laboratorio, tal y como se muestra en la figura 4.2. Las pruebas realizadas son con los modelos sin deformación (idealmente rectos) y sobre la carcasa esférica. Estos resultados son comparados con los obtenidos en simulación con el objetivo de corroborar que la metodología seguida es válida.

4.1. Mediciones en superficie plana

Una vez cortadas y soldadas las antenas al cable coaxial se colocan sobre la espuma aislante y se hacen las pruebas de pérdidas de retorno. La ubicación y prototipo final de cada antena sobre la espuma sin doblar se ejemplifica en la figura 4.1.



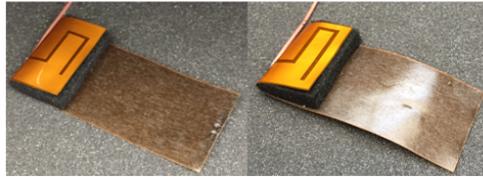
(a) Modelo 1

(b) Modelo 2

(c) Modelo 3

(d) Modelo 4

(a) Antenas *bowtie*



(a) Modelo 1

(b) Modelo 2

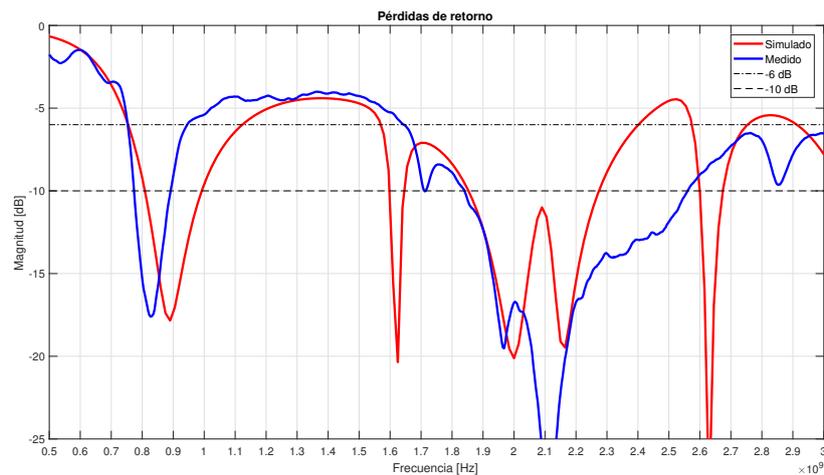
(b) Antenas PIFA flexible

Figura 4.1: Pruebas de laboratorio de antenas *bowtie* y PIFA sin deformación.

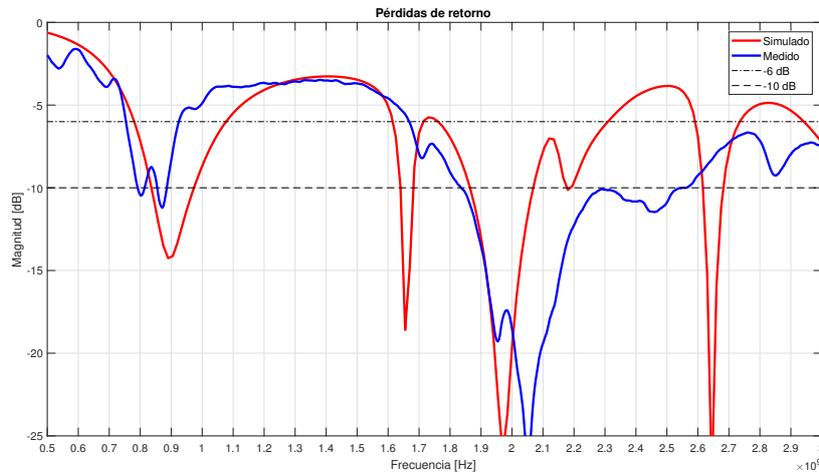
Es importante señalar, que para las antenas PIFA se usó una espuma de 5mm de espesor para separar el parche conductor con el plano de tierra tal y como en los modelos de simulación.

4.1.1. Antena *bowtie*

En la figura 4.2 se pueden ver los resultados de pérdidas de retorno medidas y su comparación con los resultados de simulación.



(a) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (a).

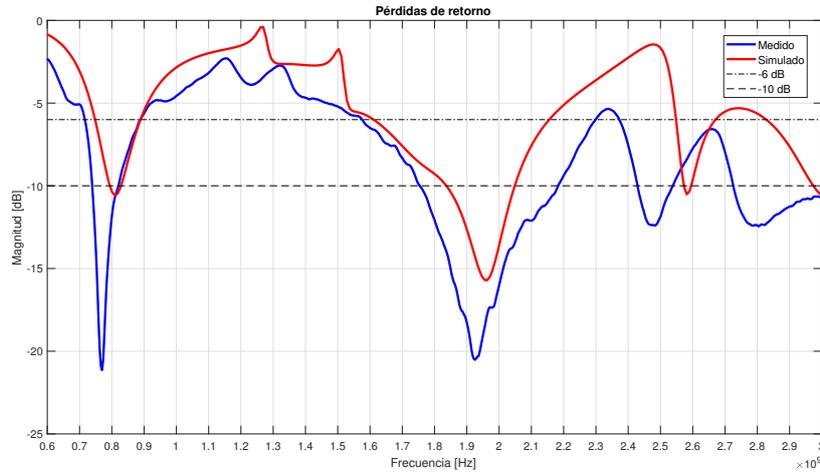


(b) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (b).

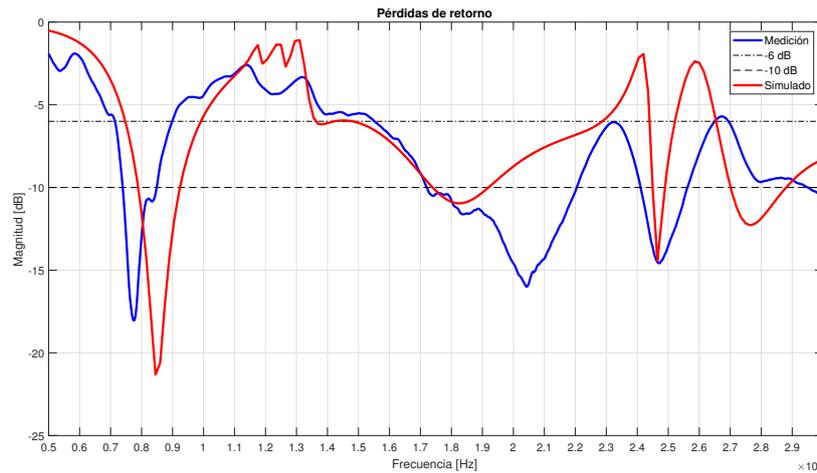
Figura 4.2: Pérdidas de retorno de variación (a) y (b) de antena bowtie.

De las mediciones anteriores es posible observar que en efecto el diseño de la antena en términos de dimensiones logra ubicar una resonancia de ancho de banda importante en la banda baja, obteniendo un mejor acople para estas frecuencias con la variación (a) de la figura 4.2. También, en ambos modelos se tiene un comportamiento típico de antenas *wide band* por su gran respuesta en la banda intermedia y alta en términos de ancho de banda.

Comparando los resultados de los modelos numéricos de simulación se pueden ver algunas variaciones. Por ejemplo, a pesar de que principales resonancias están centradas en las mismas frecuencias, las simulaciones no logran estimar con precisión su ancho de banda en alta frecuencia. Además, el modelo de simulación parece dar especial énfasis a algunas resonancias de ancho de banda muy angosto que en la medición no lo tienen. A pesar de ello, los modelos de simulación logran capturar el desempeño en banda en su mayoría.



(a) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (c).



(b) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (d).

Figura 4.3: Pérdidas de retorno de variación (c) y (d) de antena *bowtie*.

Para las otras dos variaciones de la antena *bowtie* los resultados de la figura 4.3 de pérdidas de retorno parecen satisfacer los requerimientos de la aplicación. En banda baja se pueden notar resonancias bien ubicadas y con ancho de banda nada despreciable, mientras que en las bandas intermedia y alta el ancho de banda es amplio.

Viendo los resultados de simulación se puede decir que el acople de impedancia es mejor de lo esperado y que se logra estimar en gran medida el comportamiento de la antena bajo estas condiciones. En la tabla 4.1 se ordenan los resultados de ancho de banda con referencia en $-6dB$ y $-10dB$ de las antenas *bowtie*.

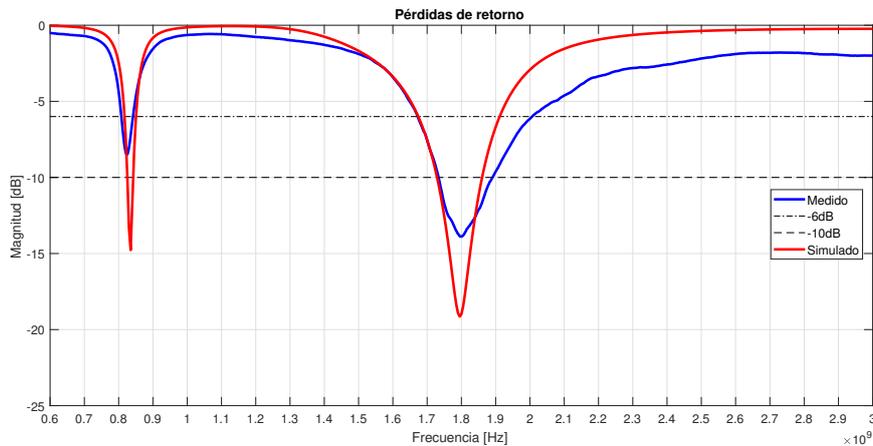
Tabla 4.1: Ancho de banda de mediciones de las variaciones de las antenas *bowtie* sin deformación.

Modelo	Ancho de banda (MHz)		Bandas
	-6 dB	-10 dB	
Variación #1	752-948	769-889	1,2,3,4,5,
	1646-3000	1838-2564	7,10,13,14
Variación #2	753-926	783-882	1,2,3,4,5,
	1674-3000	1845-2567	7,10,13,14
Variación #3	713-889	741-825	1,2,3,4,5,
	1576-2297	1751-2178	7,13,14,17
	2374-300	2430-2543	
Variación #4	713-903	738-850	1,2,3,4,5,
	1548-2648	1723-2206	7,13,14,17
	2648-3000	2413-2564	

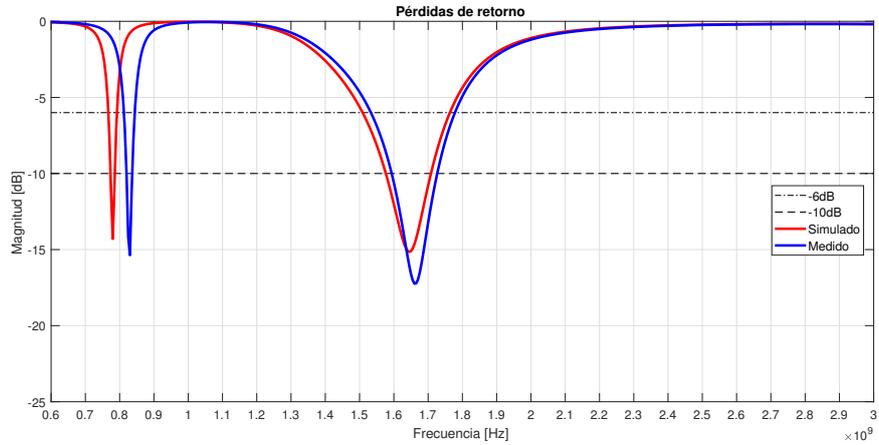
Las antenas tienen un ancho de banda promedio de 183MHz en la banda baja y logran cubrir en su mayoría las bandas de *US 700*. En las otras dos bandas, se alcanza con facilidad anchos de banda de al menos 900MHz a partir de frecuencias mayores a $1,5\text{GHz}$, con lo que se puede dar servicio a muchas más bandas del espectro de *4G LTE* como las bandas 7 (*IMT*) y 10 (*3G Americas*).

4.1.2. Antena PIFA flexible

Se miden las pérdidas de retorno de la antena *PIFA* sobre la espuma aislante, los resultados se extraen y se comparan con los obtenidos en simulación. En la figura 4.4 se observa los parámetros de correlación.



(a) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (a).



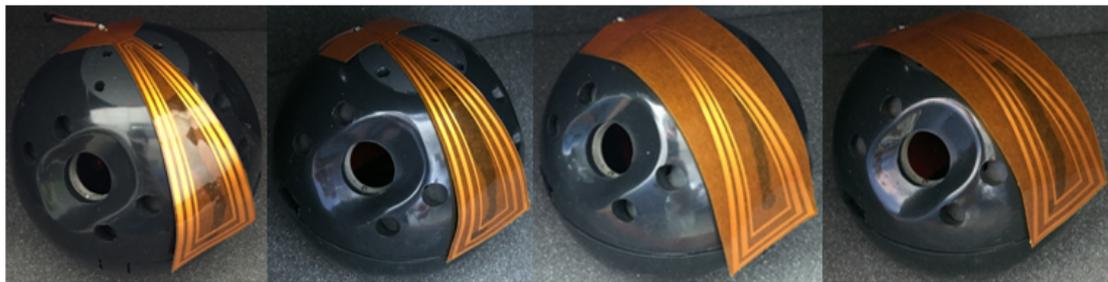
(b) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (b).

Figura 4.4: Pérdidas de retorno de variaciones (a) y (b) de antena PIFA sin doblar.

Los resultados de medición son consistentes con los estimados en los modelos de simulación, ya que se comprueba la presencia de las dos resonancias y su ancho de banda en cada banda.

4.2. Mediciones en modelo esférico

Ya que las antenas han sido medidas en escenarios sin deformación, se procede a medir su respuesta en banda cuando adquieren la forma de la superficie de la esfera. Las mediciones de laboratorio de los prototipos se hicieron tal y como se muestran en la figura 4.5.



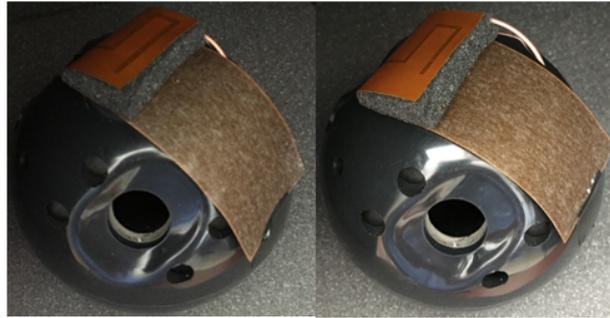
(a) Modelo 1

(b) Modelo 2

(c) Modelo 3

(d) Modelo 4

(a) Antenas bowtie



(a) Modelo 1

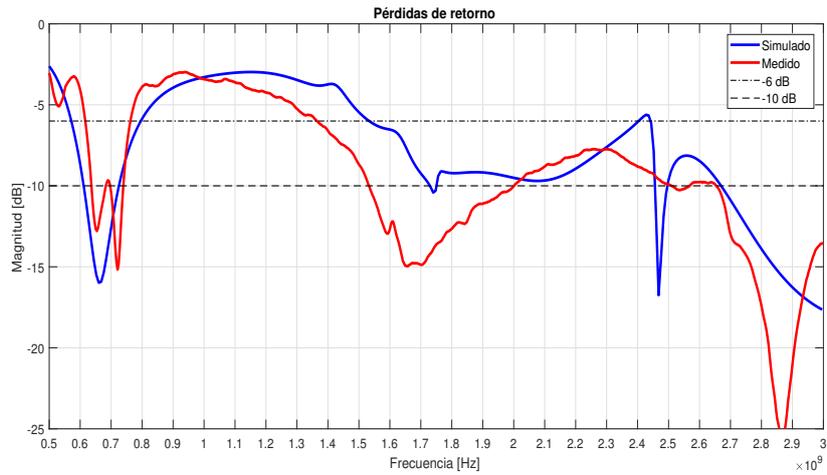
(b) Modelo 2

(b) Antenas *PIFA* flexible

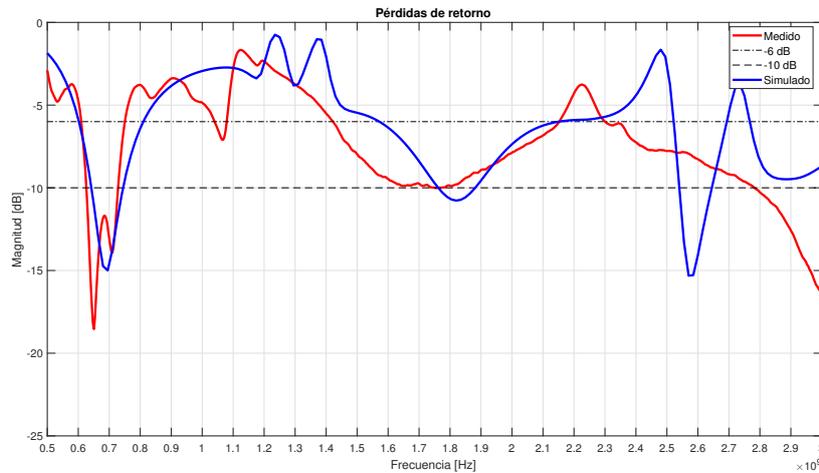
Figura 4.5: Pruebas de laboratorio de antenas *bowtie* y *PIFA* sobre carcasa esférica.

4.2.1. Antena *bowtie*

Las mediciones de las primeras dos variaciones de las antenas de tipo *bowtie* se adjuntan en la figura 4.2.



(a) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (a).

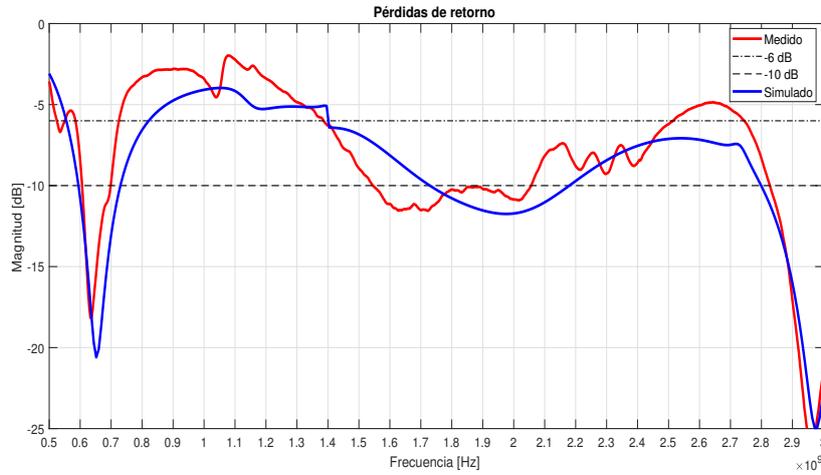


(b) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (b).

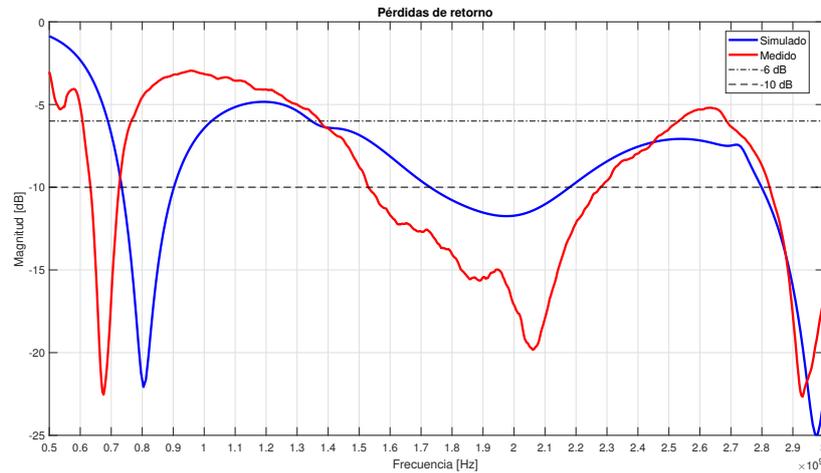
Figura 4.6: Pérdidas de retorno de variaciones (a) y (b) de antena *bowtie* sobre carcasa esférica.

El coeficiente de reflexión medido para estas variaciones genera resultados esperados de acuerdo a las pruebas y resultados obtenidos con los modelos de simulación. En el caso (a) hay un desplazamiento en banda baja de 137MHz a frecuencias inferiores y una alteración el acople de impedancia. Para el modelo (b) hay un desajuste en banda de 148MHz y desacople de impedancia a lo largo de las bandas intermedia y alta. Aún así, si se revisa con detenimiento el ancho de banda para -6dB y -10dB se nota que las antenas aún son funcionales en múltiples bandas para telefonía celular.

Por su parte, al observar las comparaciones entre las mediciones y simulaciones se puede decir en primera instancia que las correlaciones son pobres en algunas bandas. Para el modelo (b) se aprecia un comportamiento cercano a lo largo de la banda, pero a medida que se acerca a frecuencias mayores a $2,2\text{GHz}$ el modelo de simulación pierde precisión y la estimación es mala. Sin embargo, este modelo logra predecir algunas de las bandas de operación del modelo real y centra la primera resonancia en la misma banda que la antena física.



(a) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (c).



(b) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (d).

Figura 4.7: Pérdidas de retorno de variaciones (c) y (d) de antena *bowtie* sobre carcasa esférica.

En el caso de los modelos (c) y (d) las pérdidas de retorno sufren efectos similares en menor o mayor medida. Por ejemplo, el desplazamiento de la primera resonancia hacia valores de frecuencia menores es evidente. El acople de impedancia tiende a disminuir en la banda intermedia, donde no hay presencia de una resonancia de magnitud menor a $-12dB$ como ocurre en el caso (c).

La comparación de $|S_{11}|$ en ambas variaciones tiene algunos puntos altos y bajos. En el modelo (c) se logra centrar la primera resonancia pero en la banda intermedia la simulación tiende a alterarse con algunas resonancias de ancho de banda angosto a pesar de que el acople en $-6dB$ parece ser similar. Para (d) la simulación tiende a capturar el comportamiento en banda con la única diferencia de que la resonancia en banda baja está desplazada $100MHz$.

Ahora bien, la aproximación de los modelos de simulación doblados carecen de algunas características que tienen las antenas reales y que tienden a disminuir la calidad de la correlación. Por ejemplo, en simulación no se modela el cable coaxial de las antenas por las limitaciones de asignación de *HFSS* para puertos de excitación que contengan algún tipo de curvatura.

Además, a pesar de que se logra deformar los modelos de acuerdo al radio de la esfera, la deformación real (en dos ejes) no se alcanza ya que solamente se permite hacer en un eje y esta no es uniforme para modelos complejos como se muestra en la figura 4.8. El modelo esférico de simulación es simplificado y no contempla todas las características porque la complejidad tiende a aumentar el tiempo y uso de recursos de cómputo.

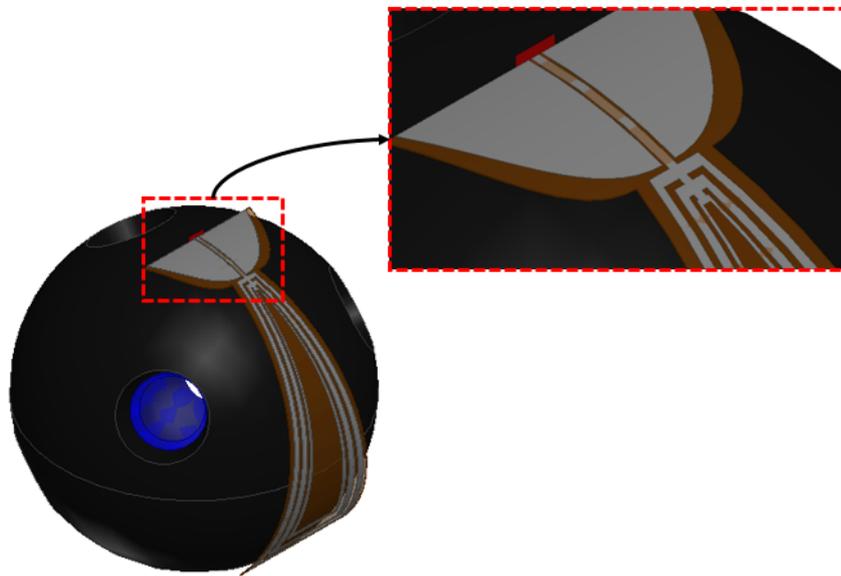


Figura 4.8: Modelo de simulación de variante 1 de antena *bowtie* flexionada.

Habiendo determinado las características de las antenas sobre el modelo de la bola, se hace un repaso de las bandas de frecuencia de operación y se ordenan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Ancho de banda de mediciones de las variaciones de las antenas *bowtie* dobladas sobre modelo esférico.

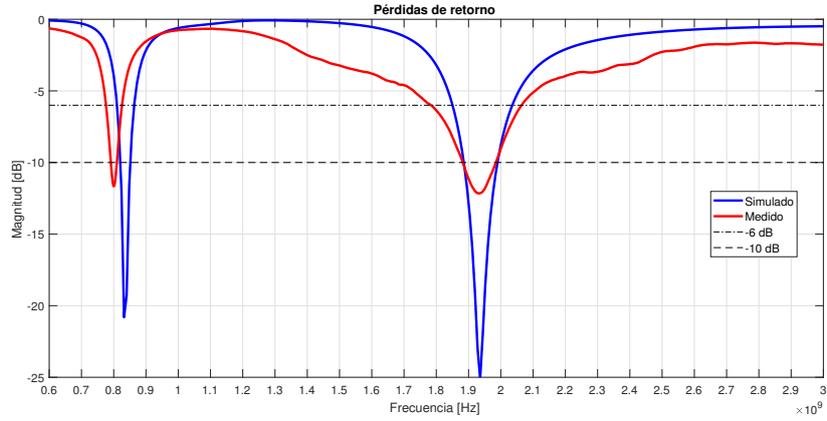
Modelo	Ancho de banda (MHz)		Bandas
	-6 dB	-10 dB	
Variación #1	615-759	637-745	1,2,3,4,10 12,13,17
	1376-3527	1530-1996	
		2511-3289	
Variación #2	605-757	626-731	1,2,3,4,7 10,12,17
	1418-2154	2781-3128	
	2297-3257		
Variación #3	580-724	605-700	1,2,3,4,10 12,17
	1386-2515	1544-2052	
	2746-3187	2830-3128	
Variación #4	605-762	629-724	1,2,3,4,7 10,12,17
	1372-2525	1530-2276	
	268-3436	2830-3240	

Como se especifica en la tabla 3.4 las antenas logran cubrir la bandas 12,13 y 17 de *US 700*, las cuales son aprovechadas por *Verizon* y las otras operadoras de servicio. El comportamiento *wide band* de las antenas les permite cubrir múltiples frecuencias en las bandas intermedia y alta, haciéndolas atractivas para otras tecnologías como *3G* y *GSM*.

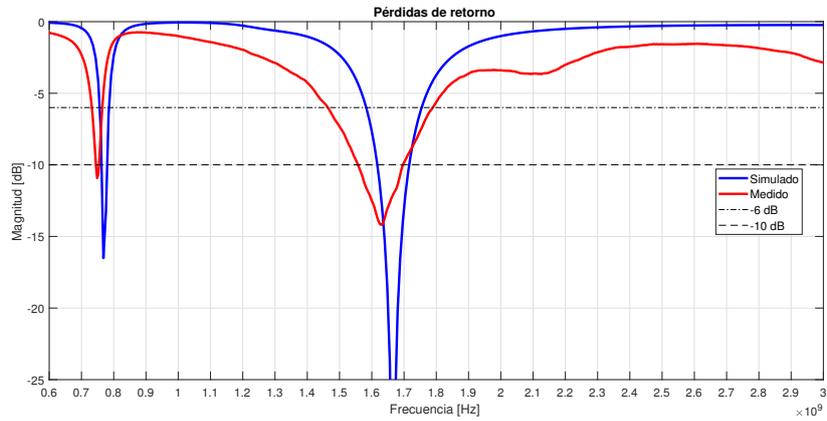
De estos modelos, la antena con mejor desempeño en frecuencia y que tiene la capacidad de integración más adecuada a la bola es la antena de variación #1, por sus dimensiones y la reducción del área efectiva de sustrato.

4.2.2. Antena PIFA flexible

Por otro lado, se realizaron las mismas pruebas a las antenas *PIFA* flexible y se determinaron las pérdidas de retorno que se adjuntan en la figura 4.9.



(a) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (a).



(b) Comparación de $|S_{11}|$ de medición y simulación de (b).

Figura 4.9: Pérdidas de retorno de variaciones (a) y (b) de antena *PIFA* flexible sobre modelo esférico.

De acuerdo al comportamiento en banda de estas antenas en el cascarón se puede decir que son de doble banda por la resonancia en banda baja y alta. La correlación es bastante buena, las resonancias están centradas correctamente y el desempeño en banda se replica. Las antenas tienen la siguiente distribución en banda.

Tabla 4.3: Ancho de banda de mediciones de las variaciones de las antenas *PIFA* dobladas sobre esfera.

Modelo	Ancho de banda (MHz)		Bandas
	-6 dB	-10 dB	
Variación #1	768-828/1777-2032	785-810/1876-1990	14,3,2
Variación #2	724-787/1463-1796	1555-1695	13

De la tabla 4.3 se nota que estas antenas resultan poco atractivas para esta aplicación

ya que son de ancho de banda angosto en banda baja y limitan la capacidad de operar en múltiples bandas de *US 700*. Aun así, logran validar el proceso de trabajo adoptado en este proyecto y operar en un máximo de 3 bandas.

5 Conclusiones y Recomendaciones

El propósito fundamental de este proyecto fue valorar un marco de trabajo de diseño, simulación y verificación para antenas multibanda flexibles en el espectro $4G/LTE$, que puedan ser aptas para trabajar con una geometría esférica. Mediante este flujo de trabajo se hace el estudio de tres geometrías de antenas multibanda usadas en comunicaciones inalámbricas de telefonía celular, en las que se alcanzan resultados de correlación correctos de acuerdo a las especificaciones de los fabricantes, en función de pérdidas de retorno y patrones de radiación.

Se logró cerrar el lazo de diseño y caracterización, con dos alternativas y la selección de materiales según los requerimientos eléctricos y mecánicos para la aplicación. Se fabrican seis variantes diferentes en substrato flexible de antenas de tipo *bowtie* y *PIFA* con características multibanda.

Las antenas diseñadas fueron medidas en superficies planas y en la proximidad de una esfera, y correlacionadas con los modelos de simulación en términos de pérdidas de retorno. La respuesta en banda de los modelos planos de simulación logra capturar las principales características de $|S_{11}|$ medidos. Para los modelos bajo deformación física la tendencia de las curvas se aproxima en menor medida, lo cual supone que los entornos e simulación se deben debe crecer en complejidad para alcanzar grados de correlación mayor. A pesar de esto, los modelos comparten la mayoría de las bandas de operación.

Se demostró que el modelo (a) de las variaciones de antenas *bowtie* fabricadas se ajusta a las dimensiones del dispositivo de geometría esférica y logra mantener el desempeño en las bandas 12 (698 – 716/728 – 746MHz), 13 (728 – 746/777 – 787MHz) y 17 (704 – 716/734 – 746MHz) para la banda baja y 1 (1920 – 1980/2110 – 2170MHz), 2 (1850 – 1910/1930 – 1990MHz), 3 (1710 – 1785/1805 – 1880MHz), 4 (1710 – 1755/2110 – 2155MHz) y 10 (1710 – 1770/2110 – 2170MHz) en las bandas intermedias del espectro de $4G/LTE$ con anchos de bandas amplios a $-6dB$ y $-10dB$.

Para la construcción de los modelos $3D$ numéricos de simulación de las antenas, se recomienda que los diseños se generen sobre un solo plano ($2D$) utilizando polilíneas cuyos puntos estén parametrizados, en este caso, de acuerdo a las variables de diseño. Lo anterior porque teniendo modelos de dos dimensiones solamente se deben unir caras y dar espesor, esto hace que al generar modelos doblados sobre superficies con la función *Wrap Sheet* el proceso sea más ágil y se puedan hacer análisis paramétricos de variables con modelos curvos como se hizo en este caso.

Asimismo, se sugiere realizar simulaciones de modelos numéricos de antenas con cable coaxial para distintas posiciones y estimar el *route* adecuado para no disminuir o afectar las características de radiación en frecuencia de las antenas físicas. Y en este caso, si se desea tener un modelo de simulación lo más completo posible, se sugiere caracterizar e

implementar el conector de tipo *uFL micro RF* para la interfaz de la antena con la fuente de alimentación de geometría esférica. Esto permitirá obtener un análisis modal que sea integral.

Además, se recomienda explorar otros solucionadores numéricos, o metodologías alternativas, que permitan una mayor flexibilidad para trabajar con modelos flexionados.

Se debe tomar en cuenta que las mediciones de parámetros de microondas de las antenas fabricadas fueron hechas en condiciones no ideales, se recomienda el uso de una cámara anecóica para medir las antenas, en donde los escenarios de prueba no sean susceptibles a reflexiones o interferencias de elementos externos. También, además de contar con una cámara anecóica, se sugiere usar un caracterizador de antenas, ya que este permite realizar una descripción más completa de las características de las antenas, como por ejemplo, con la estimación de patrones de radiación de ganancia y directividad en dos dimensiones en los planos E y H.

6 Bibliografía

- [1] H. Khaleel, *Innovation in Wearable and Flexible Antennas*. WITPress, 2015.
- [2] R. Rueda, “Diseño de una Antena Plana Multibanda para Dispositivos Móviles usando los estándares GSM/UMTS/LTE/Zigbee/RFID,” 2015. [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/8604/Tesis.pdf?sequence=1>
- [3] B. Imaging, “Bounce Imaging,” 2018. [Online]. Available: <http://www.bounceimaging.com/>
- [4] R. Rodrigo, “Fundamental Parameters of Antennas,” May 2010. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwizuoXzusfZAhVBiFkKHf8uBv4QFghKMAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.aast.edu%2Fpheed%2Fstaffadminview%2Fpdf_retrieve.php%3Furl%3D66_10285_EC442_2015_1_1_1_antenna%2520parameters.pdf%26stafftype%3Dstaffcourses&usg=AOvVaw19R_W7nd-kdjFvkHAjqoZu
- [5] “IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas, IEEE Standard 145,” 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6758443/>
- [6] J. Liang, “Antenna Study and Design for Ultra Wideband Communications Applications,” 2006. [Online]. Available: http://anteny.jeziorski.info/wp-content/uploads/2011/12/2006_Liang.pdf
- [7] M. Amir, “Parametric Modeling of Small Terminals and Multiband or UWB Antennas,” 2015. [Online]. Available: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00634866/document>
- [8] Y. Paz and A. Saavedra, “Antena multibanda ranurada alimentada por guía de onda coplanar para aplicaciones LTE, WiMAX, Bluetooth, WLAN,” 2014. [Online]. Available: <http://tesis.cujae.edu.cu/handle/123456789/3692>
- [9] J. Faria, “Flexible Antennas Design and Test for Human Body Application Scenarios,” 2015. [Online]. Available: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113702325/Dissertacao.pdf>
- [10] V. Fuertes, “Analysis of Influences on Antenna Radiation Patterns by Conducting Environments for the Development of Vehicle Antennas,” 2013. [Online]. Available: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33007/FuertesPals_VicenteAlejandro.MasterERASMUS.pdf?sequence=1
- [11] Y. Huang and K. Boyle, *Antennas from theory to practice*. Wiley, 2008. [Online]. Available: <http://www.westvalleyarc.org/Antennas/Antennas%20From%20Theory%20to%20Practice.pdf>
- [12] C. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*. Wiley, 2005. [Online]. Available: <http://www.westvalleyarc.org/Antennas/Antennas%20From%20Theory%20to%20Practice.pdf>
- [13] E. Monachesi, A. M. Frenzel, G. Chaile, A. Carrasco, and F. Gómez, “Efecto de la Foresta en las Transmisiones electromagnéticas dentro de una WLAN (LAN inalámbrica). conceptos generales de antenas.” [Online]. Available: http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf
- [14] B. Yen, R. Cahill, and V. Fusco, “Understandig and Measure Circular Polarization.” [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1220729>
- [15] Youtube, “Linear, circular and elliptical polarization animation in a single shot.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Q0qrU4nprB0>
- [16] W. Hayt and J. Buck, *Engineering Electromagnetics*. McGraw Hill, 2012.
- [17] N. M. Ridler, “Connectors Air Lines and RF Impedance.” [Online]. Available: <http://anlage.umd.edu/Microwave%20Measurements%20for%20Personal%20Web%20Site/Connectors%20Air%20Lines%20and%20RF%20Impedance%2001515916.pdf>
- [18] D. Pozar, *Microwave Engineering*. Wiley, 2012.
- [19] R. Simons, *Coplanar Waveguide, Circuits, Components and Circuits*. Wiley, 2001.
- [20] A. Azman, M. Z. A. A. Aziz, M. K. Suaidi, A. Salleh, H. Nornikman, and F. Malek, “Cpw-fed compact monopole antenna for dual-band wlan/ wimax applications,” in *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, April 2015, pp. 485–488.
- [21] L. Marnat and A. Shamim, “Liquid crystal polymer(lcp)based antenna for flexible system on package (sop) applications,” 2012. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6262403>
- [22] D. A. Sanchez, *Multiband Integrated Antennas for 4G Terminals*. Artech House, 2008. [On-

- line]. Available: <http://bbs.hwrp.com.cn/downmte/Multiband%20Integrated%20Antennas%20for%204G%20Terminals-2008.pdf>
- [23] H. Chen, "A Compact Dual-Band Microstrip-Fed Monopole Antenna," 2001. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=19510>
- [24] Y. Li, W. Li, Q. Ye, and R. Mittra, "A Survey of Planar Ultra-Wideband Antenna Designs and their Applications." [Online]. Available: <https://www.e-fermat.org/files/articles/153371b85cc609.pdf>
- [25] S. Raghavan and N. Jayanthi, "Design of Planar Inverted F Antenna for Wireless Applications," 2009. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/32a6/66b261fdcb6f5af726790ba43b5ae3087f2.pdf>
- [26] "Glossary Definition for Printed-Circuit-Board." [Online]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/glossary/definitions.mvp/term/Printed-Circuit-Board/gpk/973>
- [27] "PCB Quote, Cost Calculator." [Online]. Available: <http://www.7pcb.ca/pcb-quote-online/#>
- [28] B. Jordan and C. Max, *Altium Rigid-Flex PCB Design*.
- [29] L. Chavarría, *Diseño de una plataforma de interconexión para evaluación de un circuito integrado en alta frecuencia para espectroscopía de impedancia eléctrica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2016.
- [30] EPEC, "Common flex circuit material stack-up, EPEC." [Online]. Available: <http://www.epectec.com/flex/material-stackup.html>
- [31] "Flexible pcb, pcbcart." [Online]. Available: <https://www.pcbcart.com/pcb-fab/flexible-pcb.html>
- [32] A. Rahman and et al, "Preparation and Characterization of Flexible for Substrate Material from Phenyl-Thiophene-2-Carbaldehyde Compound," May 2016. [Online]. Available: http://anteny.jeziorski.info/wp-content/uploads/2011/12/2006_Liang.pdf
- [33] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittibipoon, *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House, 2001.
- [34] Z. Yang, "Flexible substrate technology for millimeter wave applications," 2017. [Online]. Available: http://anteny.jeziorski.info/wp-content/uploads/2011/12/2006_Liang.pdf
- [35] "CescEduPack Software 2014, polymer universe," 2010.
- [36] M. Beltran and A. Marcilla, "Tecnología de polímeros. procesado y propiedades," 2014. [Online]. Available: <http://iq.ua.es/TPO/Tema1.pdf>
- [37] E. Díaz, "Caracterización de dispositivos y circuitos micro electrónicos impresos con inkjet. memoria del trabajo de tesis de Doctorado en Microelectrónica y Sistemas Electrónicos, Línea de investigación: Diseño de sistemas y circuitos integrados." [Online]. Available: http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf
- [38] H. Yousef, "High aspect ratio microstructures in flexible printed circuit boards. process and applications," 2008. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:171609/FULLTEXT01.pdf>
- [39] R. Barbucha and et al, "Laser direct imaging of tracks on pcb covered with laser photoresist," 2008. [Online]. Available: [http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/\(56-1\)17.pdf](http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/(56-1)17.pdf)
- [40] A. S. Limited, "Frequency Band Support for Future Mobile Handsets," 2014. [Online]. Available: https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0035/69785/future_mobile_handset.pdf
- [41] T-Mobile, "Bandas y tecnologías de la red T-Mobile," 2018. [Online]. Available: <https://es.support.t-mobile.com/docs/DOC-4988#tech4GLTE>
- [42] "ANSYS HFSS - High Frequency Electromagnetic Field Simulation." [Online]. Available: <http://www.ansys.com/products/electronics/ANSYS-HFSS>
- [43] Y. Yao, X. Wang, and J. Yu, "Multiband planar monopole antenna for lte mimo systems," 2012. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2012/890705/>
- [44] A. Loutridis, M. John, and M. Ammann, "A Dual Band LTE PIFA Antenna for M2M Applications," 2015. [Online]. Available: <https://arrow.dit.ie/ahfrcart/60/>
- [45] T. A. Solutions, "Specification patent pending fxub63.07.0150c. lte wide band flex antenna 698mhz-3000mhz," 2014. [Online]. Available: <https://www.taoglas.com/datasheets/FXUB63.07.0150C.pdf>
- [46] S. Ahmed, F. Tahir, A. Shamin, and H. Cheema, "A Compact Kapton-based Inkjet Printed Multiband Antenna for Flexible Wireless Devices," 2015. [Online]. Available: <http://>

- //ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7089213
- [47] T. A. Solutions, "Specification patent pending fxub66.01.0150c. maximus flexible ultra wide band antenna 700-6000 mhz," 2014. [Online]. Available: <https://www.taoglas.com/datasheets/FXUB63.07.0150C.pdf>
 - [48] "DuPont FEP FLUROCARBON FILM, Properties Bulletin," 2014. [Online]. Available: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf>
 - [49] LSR, "2.4 GHz - 2.5 GHz FlexPIFA 2 dBi Antenna Datasheet," 2017. [Online]. Available: <https://www.lsr.com/downloads/products/330-0149.pdf>
 - [50] "Eagle." [Online]. Available: <https://cadsoft.io/>