 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DESARROLLO DE SENSORES DE DEFORMACIÓN BASADOS EN ANTENAS CON RESONADORES SOBRE MATERIALES FLEXIBLES

Carlos Jhonathan Araujo Muñoz

Sebastián Bedoya Londoño

Ingeniería de Telecomunicaciones

Director

M. Sc. Erick Estefen Reyes Vera

Codirector

Ing. Oscar David Ossa Molina

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Julio de 2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El avance de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) en los últimos tiempos ha despertado el interés de crear sistemas más exactos, sensibles y ubicuos, con el fin de establecer comunicaciones sin interrupciones, efectuar medidas de alguna variable física o transmitir/recibir cualquier tipo de información. En consecuencia, la presente tesis evidencia la creación de antenas de microcinta como sensores de deformación usando como sustrato flexible la lámina “Rogers RO4350B”; razón por la cual se efectuaron investigaciones sobre trabajos en los cuales se mejoraba el desempeño de las antenas a partir de la introducción de anillos resonadores regidos bajo el principio de metamateriales, así como trabajos en los cuales se realizaban pruebas de deformación con sustratos dieléctricos flexibles. Seguidamente, se procedió a diseñar las antenas a partir de la teoría recopilada y una buena parametrización hecha a través del software CST Studio, a partir de lo cual se llevó a cabo la fabricación de las antenas para después realizar su caracterización a través del Analizador de Redes Vectoriales. Finalmente, se efectuaron las respectivas pruebas de deformación experimentales, comparando esos resultados con los obtenidos en la simulación de dichas pruebas.

Después de cumplir con lo propuesto anteriormente, se pudo evidenciar que la antena funciona como sensor y que dependiendo de la dirección en que sea aplicada la deformación existe un corrimiento en su frecuencia de resonancia, el cual puede ser a la derecha o la izquierda, es decir, aumentar o disminuir en frecuencia, respectivamente.

Palabras clave: Deformación, Antena de microcinta, Resonadores, Frecuencia de Resonancia, Metamaterial, Sensor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos inicialmente a Dios por permitirnos llevar a cabo el presente proyecto anteponiéndonos a las adversidades que surgieron. Así mismo, agradecemos profundamente a nuestros padres, familiares y amigos cercanos por la comprensión, apoyo y afecto que nos proporcionaron durante este proceso, contribuyendo al fortalecimiento de los principios y valores que deben caracterizar la dimensión humana de un profesional excelente.

De igual manera, agradecemos especialmente al docente Erick Estefen Reyes Vera, quien participó como director de la presente tesis, proporcionando su experiencia y conocimientos en temas relacionados con antenas y radio propagación, así como su colaboración y motivación en la ejecución de las diferentes actividades pertenecientes a la metodología de dicha tesis.

Adicionalmente, agradecemos encarecidamente al ingeniero Oscar David Molina Ossa, quien participó como codirector de dicha tesis, aportando conceptos y consejos que permitieron comprender mejor el funcionamiento y acople de las antenas de microcinta a través del software CST Studio, e igualmente, ayudaron a realizar las pruebas de deformación experimentales exitosamente. Por consiguiente, agradecemos a Gabriel Jaime Palacio Tirado por contribuir con el diseño y la fabricación del sistema empleado para llevar a cabo las pruebas de curvatura de las antenas analizadas en este trabajo.

Finalmente, agradecemos al “Instituto Tecnológico Metropolitano” por facilitarnos las instalaciones físicas, equipos especializados, software de simulación y personal en general, a través de los cuales se desarrollaron las actividades propuestas para cumplir los objetivos de la presente tesis.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

<i>ADS</i>	Advanced Design System.
<i>CNC</i>	Control Numérico Computarizado.
<i>CPW</i>	CoplanarWaveguide.
<i>CST</i>	Computer Simulation Technology.
<i>FEM</i>	Finite Elements Method.
<i>ISM</i>	Industrial, Scientific and Medical
<i>ITM</i>	InstitutoTecnológicoMetropolitano.
<i>LHM</i>	Left Handed Metamaterials.
<i>MEMS</i>	Microelectromechanical Systems.
<i>MoM</i>	Moments Method.
<i>MW</i>	Microwave.
<i>RF</i>	Radio Frequency.
<i>S_{1,1}</i>	Coeficiente de reflexión a la entrada.
<i>SHM</i>	Structural Health Monitoring.
<i>SRR</i>	Split Resonator Ring.
<i>TIC</i>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
<i>TW</i>	Thin Wire.
<i>VNA</i>	Vector Network Analyzer.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	11
1.1 Generalidades de las antenas de microcinta	11
1.1.1 Tipos de parche para antenas de microcinta	13
1.1.2 Tipos de alimentación para antenas de microcinta	15
1.1.3 Diseño de antenas de microcinta	17
1.2 Parámetro de dispersión	20
1.3 Deformación de antenas de microcinta	22
1.3.1 Propiedades elásticas de las antenas de microcinta del proyecto	24
1.4 Simulaciones numéricas	25
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	27
2.1 Diseño del sensor de deformación	27
2.1.1 Optimización del diseño de la antena con resonador	29
2.2 Construcción y caracterización del sensor de deformación	36
2.3 Análisis experimental	37
2.3.1 Montaje experimental	37
2.3.2 Sistema empleado para efectuar las pruebas de curvatura	37
2.3.3 Descripción de las pruebas experimentales	38
2.4 Comparación de resultados y análisis	40
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1 Diseño final y parámetro S ₁₁ de las antenas propuestas	41
3.2 Parámetro S ₁₁ numérico y experimental de la antena fabricada	42
3.3 Pruebas de curvatura verticales convexas	44
3.4 Pruebas de curvatura verticales cóncavas	46
3.5 Pruebas de curvatura horizontales convexas	48
3.6 Pruebas de curvatura horizontales cóncavas	49
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	53
4.1 Conclusiones	53

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2 Recomendaciones	54
4.3 Trabajo futuro	54
REFERENCIAS	55
APÉNDICE	58

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

INTRODUCCIÓN

La alta demanda de información por parte de las personas y dispositivos tecnológicos en los últimos años ha provocado que sea necesario dar saltos tecnológicos en las diversas capas de los sistemas de comunicaciones actuales (capa física, capa de enlace de datos, entre otras). Esto ha llevado a que sea importante trabajar en la creación de nuevos protocolos, arquitecturas de red, estándares, equipos y modelos, capaces de extraer la información del mundo analógico y llevarla al mundo digital de forma exitosa. Paralelamente, se ha incrementado el interés en tener sistemas inteligentes que nos permitan optimizar los recursos y de esta manera hacer procesos más eficientes al interior de la industria mundial. Por ello, se ha invertido mucho tiempo y dinero en el desarrollo de sistemas de sensado y control que ayuden en la toma de decisiones en tiempo real, lo cual ha producido que en los últimos 20 años el área de la sensórica haya ocupado un lugar primordial en el desarrollo tecnológico global. A partir de esto, diversos tipos de sensores han sido diseñados e implementados con el fin de monitorear constantemente variables como deformación, temperatura, humedad, corriente, entre otras más. En esta área específica, es de vital importancia contar con sistemas de sensado que proporcionen alta sensibilidad, pero que simultáneamente sean de tamaño reducido. Por tal motivo, el presente proyecto está orientado a mostrar el diseño de sensores de deformación basados en antenas de microcinta, para los cuales se usó un material con buena flexibilidad, de tal forma que se pudiera evaluar con facilidad su comportamiento eléctrico cuando fuesen sometidos a un cambio de curvatura.

En esa medida, lo primero que se realizó fue un proceso de simulación a través del software CST Studio, con el fin de encontrar un diseño óptimo de la antena, lo cual nos permitiera obtener una respuesta en frecuencia con un ancho de banda muy pequeño, garantizando además que dicha antena operara en una de las bandas ISM del espectro electromagnético. Posteriormente, se llevó a cabo la fabricación de la antena a partir de la técnica “Método de transferencia de tinta con papel transfer”. Finalmente, se llevó a cabo una fase experimental en donde se verificó que la respuesta eléctrica de la antena fabricada correspondiera a lo predicho en la simulación del diseño de la antena. Por consiguiente, se evaluó cómo es posible alterar los parámetros eléctricos de dicha antena a través de cambios en su curvatura, e igualmente, cómo podría ser implementada ésta en un futuro como un sensor de deformación en la industria.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

De esa manera, cabe mencionar que en la presente tesis se tratan dos temas de investigación de mucho interés en el momento. Por un lado, se trabaja en el diseño y construcción de un sensor de deformación empleando antenas flexibles, los cuales han despertado un fuerte interés en la industria por su facilidad de adaptación a superficies. Por el otro, se aborda la implementación de metamateriales, los cuales como se ha demostrado en el pasado permiten mejorar el rendimiento de las antenas, bien sea a través de la optimización de los anchos de banda o a través de mejoras en la ganancia (Cataño-Ochoa, Senior, López, & Reyes-Vera, 2016) (Castellanos, López, & Reyes-Vera, 2016) (Acevedo-Osorio, Ossa, & Reyes-Vera, 2017). En este sentido, en el pasado diversos grupos de investigación han enfocado sus estudios a tratar de encontrar estructuras resonantes que permitan mejorar la sensibilidad de las antenas frente a variables como la deformación. Para ello, también se han explorado variaciones en la geometría del parche de las antenas de microcinta, creando así geometrías cuadradas (Sirisha Mrunalini, 2017), elípticas (S.R. Lee, 2017), triangulares (Sana Ahmed, 2015), circulares (Rufus, 2015), entre otros. Un ejemplo de ello es el trabajo presentado por Rufus y compañía, en el cual se muestra el diseño y fabricación de antenas de microcinta de parche circular sobre el sustrato flexible Kapton. Además, los autores validan experimentalmente que la frecuencia de resonancia de dichas antenas decrece 3 MHz cuando la antena es deformada a medida que aumenta la carga 0.2 kg (Rufus, 2015). Ese mismo año, Sana Ahmed y compañía dan cuenta del diseño y fabricación de una antena de microcinta multibanda sobre el sustrato Kapton, la cual posee un diseño iterativo triangular y una alimentación por guía de onda coplanar (CPW, por sus siglas en inglés). Dicha antena es sometida a pruebas de deformación convexas y cóncavas, a partir de las cuales se muestra que ésta posee una ganancia de -1.2 a 2.5 dBi tanto al ser deformada como al permanecer sin deformación (Sana Ahmed, 2015).

Por otro lado, Chunhee y compañía muestran el diseño y fabricación de un sensor inalámbrico pasivo de deformación, el cual está basado en un arreglo de antenas de microcinta, el cual se destaca ya que permite duplicar la frecuencia de las señales recibidas de un lector inalámbrico. Así mismo, ellos llevan a cabo el proceso de simulación correspondiente en los software comerciales COMSOL Multiphysics y ADS, y de igual forma, validan experimentalmente que dicho sensor es capaz de detectar pequeños cambios de deformación y crecimiento de grietas, registrando un coeficiente de determinación de 0.9890 y una sensibilidad de deformación de $-5.232 \text{ kHz}/\mu\epsilon$ (Chunhee Cho, 2016).

Ahora, en lo que concierne a la introducción de estructuras resonantes y la creación de arreglos para modificar el diseño de antenas de microcinta, teniendo en cuenta el principio de funcionamiento de los materiales, se puede citar en primera instancia el trabajo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

presentado por Bashir D. Bala y compañía, en el cual se muestra el diseño de una antena de microcinta que consta de seis celdas unitarias LMH (Left Handed Metamaterials) que constituyen un material de índice de reflexión negativo, las cuales están compuestas de una combinación de anillos resonadores divididos (SRR, por sus siglas en inglés) y un alambre delgado (TW, por sus siglas en inglés), conectados al borde radiante del parche y a una ranura en el plano tierra. Además, realizan una comparación con una antena que no posee estructuras LHM para demostrar que la antena con dichas estructuras presenta un mejor ancho de banda (Bashir D. Bala, 2012).

Por su parte, en el 2013 Oussaid y compañía presentan un estudio sobre metamateriales en el que diseñan dos antenas diferentes: la primera es diseñada usando resonadores en forma de “S” y la segunda empleando resonadores en forma de “Ω” (Oussaid, 2013). Los resultados obtenidos por los autores muestran una comparación entre el patrón de radiación de una antena convencional y las dos antenas propuestas, lo cual demuestra que a través de la implementación de resonadores es posible mejorar las características eléctricas de una antena de microcinta, pues estos permiten mejorar la ganancia, controlar los anchos de banda y manipular el patrón de radiación para que se ajuste a una necesidad específica

Tres años después, Sandeep y compañía presentan otro estudio relacionado con el uso de metamateriales (Sandeep Dubey, 2016), allí se muestra el diseño y simulación de una antena de microcinta rectangular con una ranura en forma de “E” para las frecuencias de 2.4 GHz y 3.7 GHz. A partir de eso, se observa un incremento en la ganancia, el ancho de banda y la directividad de dicha antena, comparando ésta con una antena igual sin estructuras metamateriales.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente tesis está compuesta de cuatro capítulos. En el capítulo 1 (“Marco teórico”), se presenta una recopilación de conceptos y fórmulas sobre antenas de microcinta y deformación de antenas. El segundo capítulo (“Metodología”), da cuenta del proceso llevado a cabo a través del software CST Studio para garantizar un diseño óptimo de las antenas de microcinta fabricadas, e igualmente, presenta los recursos y técnicas empleadas para su construcción, así como una descripción de las pruebas de deformación aplicadas. Seguidamente, en el capítulo 3 (“Resultados y discusión”), se muestra el diseño de las antenas construidas y los resultados obtenidos tanto numéricos (Simulación) como experimentales de las pruebas de deformación realizadas a dichas antenas, así como el análisis derivado de esos resultados. Finalmente, en el último capítulo (“Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro”), se exponen los logros importantes del proyecto, así como propuestas de investigación futuras.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En esa medida, se plantearon los siguientes objetivos como directrices del presente proyecto:

Objetivo General

Desarrollar y caracterizar sensores de deformación mediante la implementación de antenas de microcinta con resonadores cuadrados sobre sustratos dieléctricos flexibles, las cuales actuarán como elementos transductores al someterlas a pruebas de deformación reales.

Objetivos específicos

Diseñar empleando el método de elementos finitos vectorial al menos dos antenas sobre sustratos flexibles que nos permitan medir con buena sensibilidad los cambios en deformación.

Analizar cómo la implementación de resonadores (metamateriales) puede ayudar a incrementar la sensibilidad de sensores de deformación basados en antenas de microcinta, permitiendo mejorar el desempeño de los sensores propuestos.

Construir las antenas de microcinta partiendo de los parámetros de diseño establecidos en las simulaciones.

Caracterizar experimentalmente los sensores de deformación construidos y comparar los resultados obtenidos experimentalmente con lo predicho en la metodología de simulación.

Finalmente, después de cumplir con los objetivos planteados, se pudo constatar que la antena funcionó como sensor debido a que ésta presentó un pico de resonancia a 2.44 GHz bien definido y un ancho de banda a esa frecuencia de 400 MHz aproximadamente, lo cual ayudó a que dicho sensor tuviese una buena resolución. Adicionalmente, se observó experimentalmente que dicho pico de resonancia presentó una variación en la frecuencia de resonancia cuando la antena fue sometida a cambios de deformación. Estos desplazamientos dependieron de la dirección en la cual fue deformada la antena (vertical u horizontal), del tipo de prueba (convexa o cóncava) y del radio de curvatura que generó la deformación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

El avance de las telecomunicaciones a través de los años ha permitido que tanto los equipos como la experiencia de los usuarios trasciendan a otro nivel, razón por la cual se ha dado lugar a la investigación de nuevas tecnologías de comunicación y medición, las cuales permitan acceder a la información desde cualquier lugar, obtener datos de forma precisa a través de sensores, e igualmente, eliminar la dependencia que poseen algunos servicios de telecomunicaciones para prestarse únicamente por medios cableados.

En base a lo anterior, una de las soluciones más cercanas es el mundo de las comunicaciones inalámbricas apoyado por diferentes tecnologías para sensar, las cuales como parte esencial de su equipamiento emplean antenas que gracias a diversas modificaciones pueden usarse como sensores para medir variables como la deformación (Rufus, 2015), la temperatura (Jeremiah W. Sanders, 2015), la presión (Rogers, Yoon, Sheplak, & Judy, 2017), el azúcar y la sal en el agua (Tariqul Islam, Rahman, Jit Singh, & Samsuzzaman, 2018), entre otras variables. Dichos sensores al ser inalámbricos proporcionan una alternativa interesante en la industria, puesto que al no requerir de sistemas de cableado ayudan a que la perturbación del espacio de trabajo en fábricas u obras, lugares donde normalmente se emplearían, no sean entorpecidos por un cable. Adicionalmente, con el surgimiento de tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), este tipo de dispositivos proporcionan la oportunidad de monitorear y analizar datos en tiempo real, mejorando los tiempos de respuesta de tecnologías tradicionales como galgas extensiométricas, las cuales, comúnmente se emplean para medir deformaciones.

De esa manera, la presente tesis apoyada por lo anterior se centra el uso de antenas de microcinta, por lo cual se expone a continuación un compendio de conceptos y técnicas útiles para entender su funcionamiento y comprender su posible uso como sensores de deformación:

1.1 Generalidades de las antenas de microcinta

La Asociación de Estándares de la IEEE define una antena como “la parte de un sistema transmisor o receptor diseñada para irradiar o recibir ondas electromagnéticas” (IEEE, 2014). En esa medida, la antena se convierte en una estructura que sirve de puente entre el espacio libre y un dispositivo que actúa como guía de onda (Balanis, 2005), e igualmente,

puede considerarse como un “transductor de energía electromagnética a corriente eléctrica y viceversa”(Rueda, 1998). Por consiguiente, existen diferentes tipos de antenas tal como se muestra en la Figura 1, las cuales se diferencian por sus polarizaciones (lineal, circular o elíptica), geometría, dimensiones (Relacionadas con la longitud de onda de la frecuencia de operación), costos de fabricación y aplicaciones.

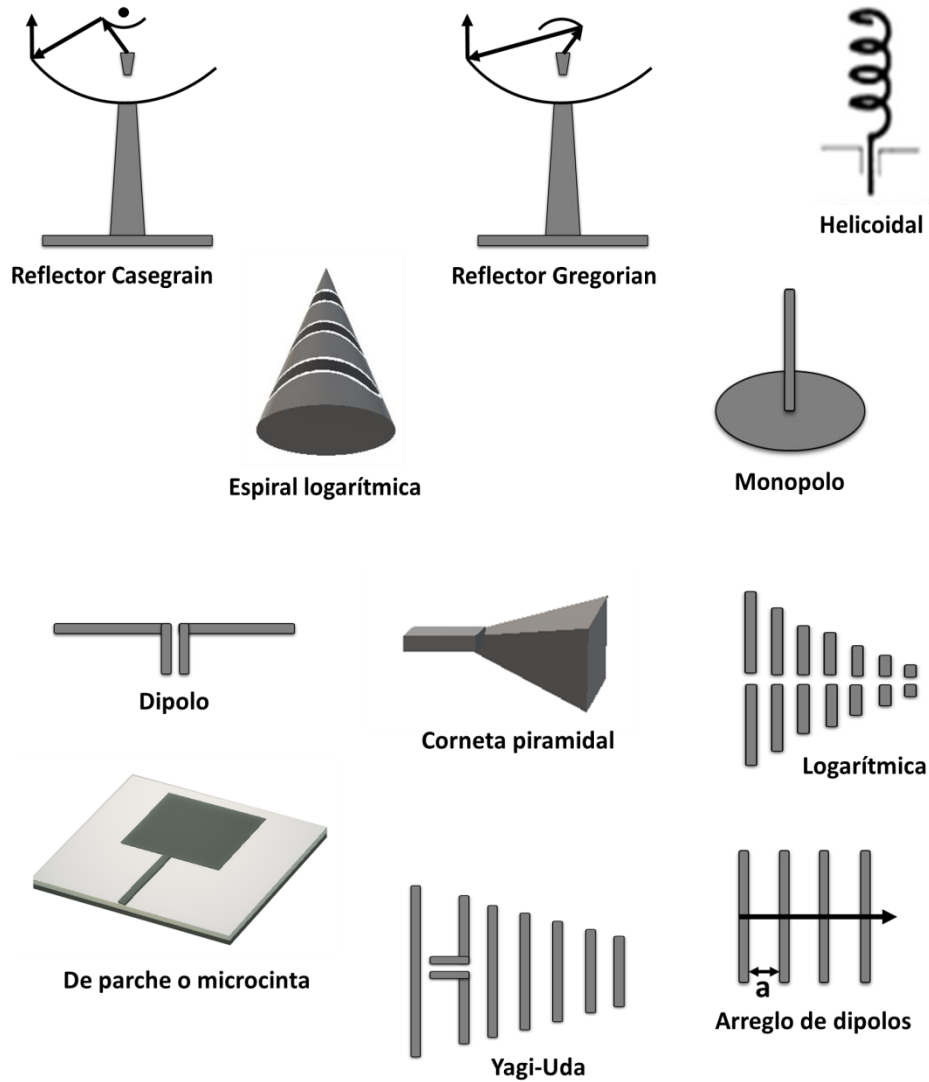


Figura 1. Diversos tipos de antenas (Rueda, 1998).

En el caso de la presente tesis, se emplearon las antenas de microcinta, las cuales están compuestas de un parche radiante (conductor) situado en la parte superior de un substrato dieléctrico, e igualmente, de un plano de referencia a tierra (conductor), situado en la parte inferior de éste. Dichas antenas se caracterizan por su tamaño, versatilidad en frecuencia,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

bajo costo de construcción y patrón de radiación omnidireccional, cuya máxima densidad de radiación es perpendicular al parche; pudiendo ser utilizadas en aplicaciones aeroespaciales, industriales, satelitales, civiles y comerciales. Sin embargo, también poseen falencias en la eficiencia, potencia y ancho de banda, las cuales pueden subsanarse a través de un buen diseño basado en diferentes formas del parche y diferentes arreglos de estructuras en éste, e igualmente, usando técnicas que permitan disminuir los efectos indeseados producidos por las ondas superficiales que se desplazan en el sustrato (Ramesh Garg, 2001) (Ossa-Molina, Forero-Camen, Espinal Ramírez, Reyes-Vera, & López, 2018) (Reyes-Vera, Arias-Correa, Giraldo-Muñoz, Cataño-Ochoa, & Santa-Marin, 2017). Otra de las características relevantes de las antenas de microcinta es que para este tipo de antenas los sustratos más gruesos son apetecidos, ya que proporcionan mejor eficiencia, mayor ancho de banda, entre otros beneficios (Reyes-Vera et al., 2017) (Cataño-Ochoa et al., 2016) (Ossa-Molina et al., 2018). En el caso de los sustratos delgados, los cuales son apropiados para circuitos de microondas, las ondas electromagnéticas se confinan dentro del dieléctrico, minimizando los efectos de borde, las pérdidas de potencia por radiación y el acoplamiento no deseado, a costa de tener menos eficiencia y un ancho de banda reducido (Balanis, 2005).

1.1.1 Tipos de parche para antenas de microcinta

Por otro lado, en lo que respecta a los tipos de parche para las antenas de microcinta, existen diseños ya establecidos, aunque hay libertad para experimentar con la geometría de dicho parche en diversos campos de investigación. Entre las antenas de microcinta más conocidas en el mundo de las comunicaciones, se destaca la antena de parche rectangular debido a su fácil fabricación y al análisis que se le puede hacer a su configuración o geometría, ya sea empleando el modelo de líneas de transmisión o el modelo de cavidad. Así mismo, otro aspecto para tener en cuenta en este tipo de parche, es que los campos en sus bordes están sometidos a los efectos de desbordamiento, ya que las dimensiones de dicho parche son finitas, pudiéndose relacionar la cantidad de campo desbordado con esas dimensiones y la altura del sustrato.

Por otro lado, a pesar de que la geometría rectangular sea una de las más utilizadas para los parches de las antenas de microcinta, existen otras geometrías parches que se pueden implementar, los cuales se muestran en la Figura 2. Ahora bien, en la actualidad existen otras estructuras más complejas, las cuales no pueden ser analizadas analíticamente como es el caso del parche mostrado en la Figura 3, el cual constituye la propuesta presentada por Sana Ahmed y compañía en su estudio (Sana Ahmed, 2015). Dicha estructura es una

variación bastante interesante de un parche en forma triangular, ya que está basada en un arreglo de anillos triangulares concéntricos, e igualmente, hace parte de una nueva generación de antenas cuyo análisis debe hacerse a través de un software numérico, pues obtener la frecuencia de resonancia analíticamente de estas estructuras es una tarea demasiado complicada.

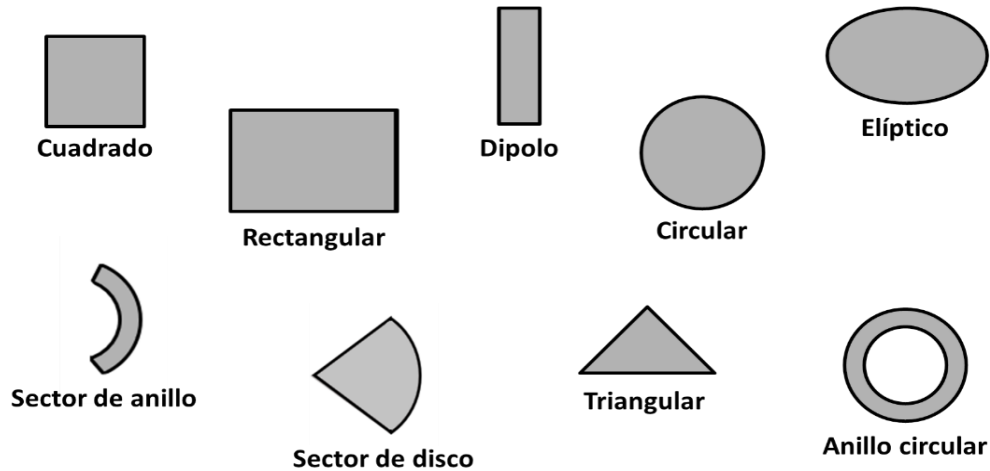


Figura 2. Formas representativas de los elementos del parche de una antena de microcinta (Balanis, 2005)



Figura 3. Antena de microcinta con parche triangular iterativo (Sana Ahmed, 2015)

1.1.2 Tipos de alimentación para antenas de microcinta

Como parte del diseño de las antenas de microcinta debe considerarse el tipo de alimentación a utilizar, así como las dimensiones más adecuadas de ésta. En esa medida, dentro de los métodos conocidos de alimentación se pueden citar: línea de microcinta, sonda coaxial, acoplamiento de la apertura y acoplamiento de proximidad.

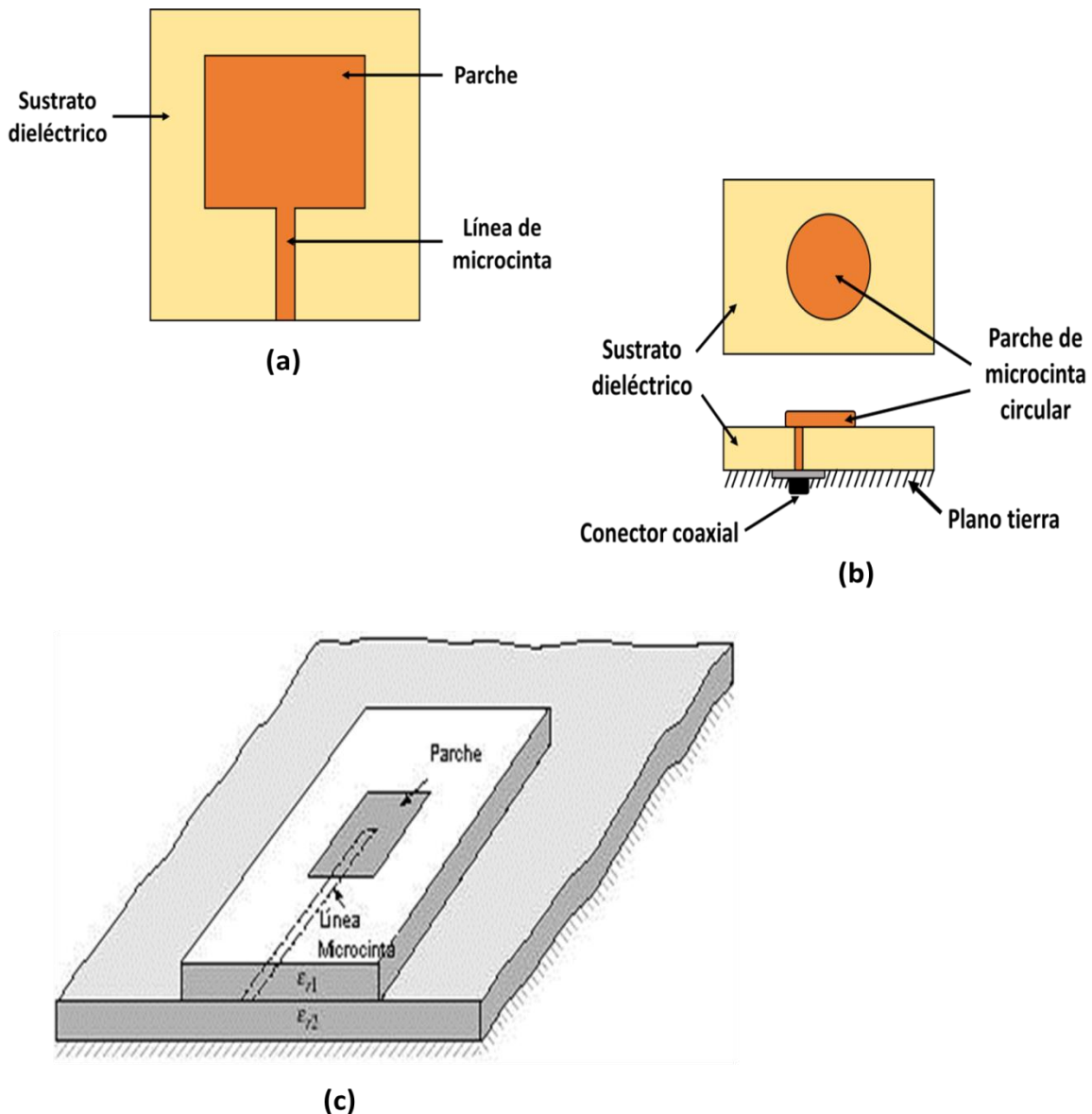


Figura 4. Método de alimentación por (a) línea de microcinta, (b) sonda coaxial y (c) proximidad acoplada (Balanis, 2005).

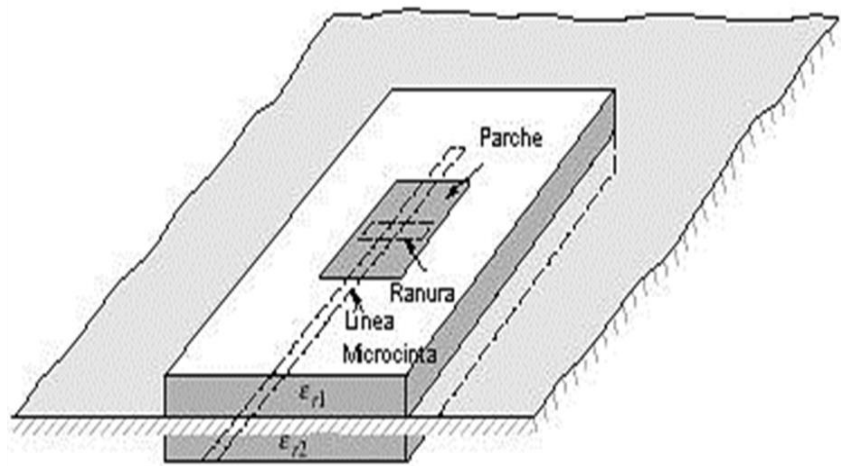


Figura 5. Métodos de alimentación por línea de apertura acoplada(Balanis, 2005).

De los métodos mencionados el más práctico es el de “línea de microcinta”, ya que se puede modelar en software de simulación y construir fácilmente, en especial cuando son empleados sustratos dieléctricos muy delgados. Otro de los métodos que se está usando es el método de **alimentación de guía de onda coplanar**, el cual consta de tres placas conductoras, una central fija que constituye la línea de alimentación del parche y dos laterales separadas a una misma distancia de la placa central, las cuales forman el plano de tierra de la antena de microcinta, todas situadas sobre el sustrato dieléctrico. (Pacheco, 2016). El método de alimentación de guía de onda coplanar es mostrado en la Figura 6 y fue el método empleado por Sana Ahmed y compañía en su estudio, con la particularidad de que en éste la forma del plano tierra es un semicírculo, tal como se aprecia en la Figura 3.

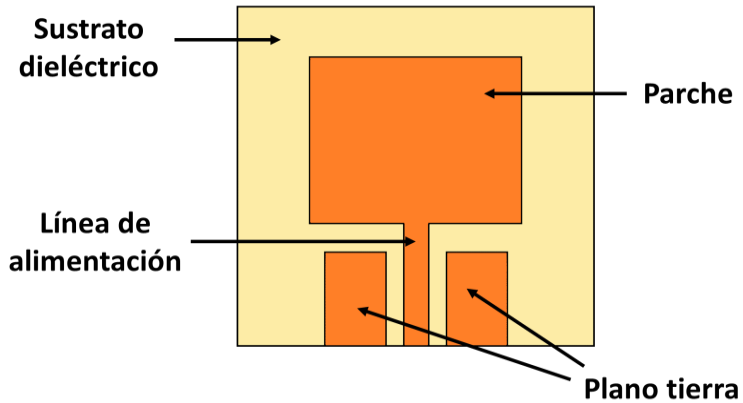


Figura 6. Métodos de alimentación por guía de onda coplanar.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ahora bien, el método de alimentación también está condicionado a otros factores como pueden ser el grosor del sustrato y la aplicación, debido a que, por ejemplo, el uso de alimentación por sonda coaxial y por proximidad acoplada son prácticamente inviables cuando se emplean sustratos muy delgados. Adicionalmente, es necesario tener presente que las dimensiones del método de alimentación deben permitir que su impedancia y la impedancia de la antena sean iguales o muy similares, con el fin de evitar reflexiones que puedan dañar los equipos involucrados en los procesos de transmisión y recepción de información. Sin embargo, una manera de contrarrestar el desacople de impedancias es recurrir a métodos de acople como lambda cuartos, stubs o similares, o de ser necesario, acudir a herramientas computacionales que faciliten el cálculo de las dimensiones apropiadas del método de alimentación en base a la impedancia requerida.

1.1.3 Diseño de antenas de microcinta

El diseño de antenas de microcinta es sencillo, sin embargo, dependiendo del tipo de estructuras que compongan su parche (componente radiante), así como de la geometría elegida para éste y el método de alimentación definido, dicho proceso puede ser complejo. En esa medida, antes de iniciar el procedimiento de diseño es preciso conocer tres constantes universales que permiten analizar el comportamiento electromagnético de ciertas estructuras. Dichas constantes son la velocidad de la luz en el espacio libre c , la permitividad del espacio libre ϵ_0 y la permeabilidad del espacio libre μ_0 . La primera de dichas constantes es equivalente a 3×10^8 m/s, la segunda de ellas proporciona un indicador de la oposición que presenta un medio o material, en este caso el vacío o espacio libre, a ser polarizado ante la presencia de un campo eléctrico. La tercera constante, representa una medida de la capacidad que posee un medio o material, en este caso el vacío, para ser magnetizado al ser sometido a un campo magnético.

Teniendo claro lo anterior, el proceso de diseño de una antena de microcinta comienza por determinar la banda del espectro electromagnético en la cual se desea operar, la cual en muchas aplicaciones está limitada a ser una de las bandas libres del espectro como lo son la frecuencia de 2.4 GHz o 5.7 GHz. Una vez seleccionada la banda de operación, el siguiente paso es determinar qué características debe cumplir el material dieléctrico que deseamos emplear, por lo que es necesario tener presente la permitividad dieléctrica relativa ϵ_r y el espesor h que éste debe tener, lo cual dependerá del uso que se le desee dar a la antena que se está diseñando. En el caso de las antenas de microcinta rectangulares, Balanis describe en su libro *Antenna Theory: Analysis and Design* (Balanis, 2005) un proceso sencillo que permite utilizar los datos anteriores para hallar las dimensiones apropiadas de este tipo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de parche y otros datos de interés. Vale la pena resaltar que dicho proceso representa una aproximación al diseño de antenas de microcinta, ya que para cada tipo de geometría existen fórmulas específicas, e igualmente, si se introducen otros elementos como resonadores en el diseño a realizar, se ha de aumentar la complejidad de éste, y por ende, será necesaria la implementación de otro tipo de herramientas para llevar a cabo el análisis.

1.1.3.1 Otra iniciativa en el diseño de antenas: Resonadores

En la actualidad los dispositivos de comunicaciones inalámbricas tienden a ser más pequeños, precisos y de bajo costo, todo esto se puede lograr gracias a la inserción y operación de los resonadores de circuito RLC, microondas y elementos agrupados, en dichos dispositivos. Existen varios tipos de resonadores como es el caso de los resonadores circulares, rectangulares, triangulares y cuadrados, los cuales se usan en múltiples dispositivos como filtros, osciladores, medidores de frecuencia, amplificadores sintonizados, y en especial, en diversos tipos de antenas, con el fin de mejorar su diseño del dispositivo, ancho de banda y frecuencia de resonancia u operación.

En esa medida, vale la pena mencionar que los **resonadores circulares** se pueden construir a partir de resonadores de cavidad cilíndrica cuya sección de guía de onda está cortocircuitada en ambos extremos, similar a las cavidades rectangulares. La cavidad de los resonadores circulares está construida con una pared superior móvil para permitir las oscilaciones mecánicas de la frecuencia de resonancia, y así mismo, esa cavidad está flojamente acoplada a una guía de onda a través de una pequeña abertura. Adicionalmente, en la operación de dichos resonadores la potencia será absorbida por la cavidad al ajustarse a la frecuencia de funcionamiento del sistema, lo cual se puede controlar con un medidor de potencia en cualquier parte del sistema.

En el caso de los **resonadores rectangulares**, se puede afirmar que éstos son similares a los resonadores de microondas, pudiéndose construir a partir de secciones cerradas de la guía de onda. Debido a que la pérdida de radiación de una guía de onda abierta puede ser significativa, los resonadores de guía de onda generalmente están cortocircuitados en ambos extremos, formando así una caja cerrada o cavidad. La energía eléctrica y magnética se almacena dentro de la caja de esa cavidad, y se disipa en las paredes metálicas de ésta, así como en el material dieléctrico que puede llenar la cavidad. Además, el acoplamiento a un resonador de cavidad puede ser por una pequeña abertura o una pequeña sonda o bucle. En este sentido se puede decir que hay muchos modos de resonancia posibles para un

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

resonador de cavidad rectangular, los cuales corresponden a variaciones de campo a lo largo de las tres dimensiones de dicha estructura. (Poazar, 2011)

Uno de los ejemplos más relevantes en el campo de los resonadores, son los SRRs (Split Ring Resonators, por sus siglas en inglés), los cuales fueron propuestos por John Pendry y están compuestos de dos anillos de metal concéntricos con pequeñas aberturas en posiciones opuestas. Este tipo de resonadores constituyen las primeras estructuras capaces de obtener valores de permeabilidad magnéticos negativos en un rango finito y determinado de frecuencias, como producto de la interacción de su estructura meta-atómica con las ondas electromagnéticas (EM). Lo anterior es producto de la propagación de las ondas electromagnéticas en el interior del material, cuya fuerza electromotriz (f.e.m) induce o excita una corriente eléctrica (flecha azul en la Figura 7) en la misma dirección en los dos anillos, y así mismo, “los portadores de carga en la corriente son positivos, entonces la abertura del anillo exterior dispone la acumulación de cargas positivas en la mitad superior del anillo, y por defecto, de cargas negativas en la mitad inferior del anillo. En el anillo interior, la abertura dispone las cargas positivas en la parte inferior y, por defecto, las negativas en la parte superior” (Castellanos et al., 2016). De esa manera, los conductores introducen un comportamiento inductivo, que junto con la capacidad eléctrica distribuida entre los anillos producen un comportamiento resonante semejante a un circuito LC.

En la Figura 7, se muestra la estructura de resonadores propuesta por J. Pendry:

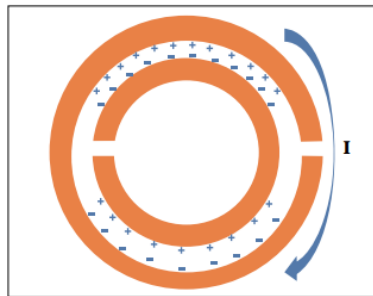


Figura 7. Anillos resonadores propuestos por J. Pendry (Castellanos et al., 2016).

Por otro lado, es importante resaltar que los **METAMATERIALES** surgen a raíz de la capacidad que tienen los resonadores para obtener valores de permitividad y permeabilidad magnética negativos, permite clasificarlos como **ESTRUCTURAS METAMATERIALES**. Dichas estructuras son un conjunto de moléculas ubicadas de forma ordenada que constituyen una estructura periódica unida entre sí mediante enlaces químicos, esto quiere decir, que al tener la interacción de la luz con un sólido se tendrá la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

respuesta de las moléculas debido a la onda electromagnética incidente. De acuerdo a lo anterior, un metamaterial se puede describir como un material artificial en el que las propiedades que lo componen no provienen de un tipo particular de átomo, sino de la ordenación y forma de sus elementos constituyentes. Así mismo, se debe tener claro que para poder tener elementos que se comporten como metamateriales y caracterizar sus respuestas electromagnéticas, se busca modelar los meta-átomos cuando estos interactúan con las ondas electro magnéticas (EM) de una forma concreta, buscando manipular la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica de esos elementos, con el objetivo de que éstas puedan ser negativas y así obtener un índice de refracción negativo (Veselago, 1968).

En base a lo anterior, se puede resaltar que la posibilidad de diseñar y construir materiales con respuestas electromagnéticas no encontradas en la naturaleza, constituye un logro importante en el diseño y fabricación de antenas de microcinta, ya que es posible optimizar sus parámetros de funcionamiento (ancho de banda, eficiencia, entre otros), así como su tamaño. De esa manera, se abre el camino en telecomunicaciones para diseñar estructuras, como es el caso de los resonadores, que permitan manipular el comportamiento electromagnético de otros materiales, permitiendo también que las dimensiones máximas de éstos sean menores a la longitud de onda con la que se va a trabajar.

1.2 Parámetro de dispersión

En ingeniería electrónica existe una gran familia de parámetros que permite analizar el comportamiento de redes eléctricas lineales de N puertos cuando son sometidas a estímulos provenientes de señales pequeñas. Una de esas familias de parámetros son los denominados “Parámetros de dispersión”, o “parámetros S”, los cuales son de gran interés a la hora de analizar el comportamiento de estructuras como las antenas de microcinta. Dichos parámetros se relacionan con las ondas que se dispersan o reflejan cuando una red de n puertos (resonador, filtro, antena) es excitada con una onda electromagnética. Así mismo, la facilidad con la que se pueden medir los parámetros de dispersión los hace especialmente adecuados para describir transistores y otros dispositivos activos, puesto que la medición de la mayoría de los otros parámetros requiere que la entrada y la salida del dispositivo se abran y cortocircuiten sucesivamente. (Hewlett-Packard, 1997).

En Figura 8, se muestra un esquema de las variables que intervienen en el análisis de los parámetros de dispersión, donde a_1 y a_2 corresponden, respectivamente, a las ondas incidente y reflejada en el puerto 1; así mismo, b_1 y b_2 corresponden a las ondas incidente

y reflejada en el puerto 2. Además, Z_L es la impedancia de la carga, Z_S es la impedancia de la fuente y V_S es el voltaje en la fuente.

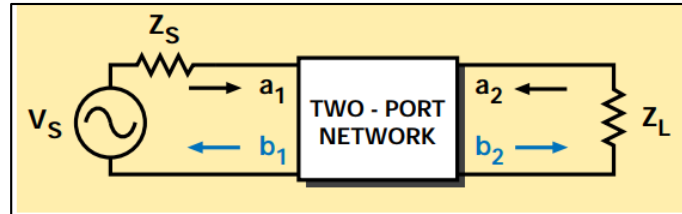


Figura 8. Red de dos puertos usada para analizar los parámetros de dispersión (Hewlett-Packard, 1997).

En la Tabla 1 se definen los cuatro parámetros de dispersión existentes, teniendo en cuenta lo mostrado en la Figura 8.

Tabla 1. Parámetros de dispersión (Hewlett-Packard, 1997)

Parámetro de dispersión	Ecuación
Coeficiente de reflexión de entrada con el puerto de salida terminado por una carga acoplada ($Z_L = Z_0, a_2 = 0$).	$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}; a_2 = 0$
Coeficiente de reflexión de salida con la entrada terminada por una carga acoplada ($Z_S = Z_0, V_S = 0$).	$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}; a_1 = 0$
Ganancia de transmisión hacia delante (inserción) con el puerto de salida terminado en una carga acoplada.	$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}; a_2 = 0$
Ganancia de transmisión hacia atrás (inserción) con el puerto de entrada terminado en una carga acoplada.	$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}; a_1 = 0$

Observación: En la Tabla 1 Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión.

Por otro lado, dentro de los cuatro parámetros S, el parámetro de gran interés para el proyecto aquí desarrollado es el parámetro S_{11} , el cual proporciona información sobre el coeficiente de reflexión a la entrada de la red de dos puertos, o en el caso del proyecto, de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

la antena de microcinta. Dicho coeficiente compara la amplitud de la onda reflejada con la amplitud de la onda incidente en dB, y adicionalmente, permite conocer la frecuencia de resonancia de la antena o dispositivo analizado, así como el grado de acople con la línea de transmisión a la cual va conectado.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{\frac{V_1}{I_1} - Z_0}{\frac{V_1}{I_1} + Z_0} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (1)$$

Donde Z_1 , V_1 e I_1 son la impedancia, voltaje y corriente de entrada del puerto 1, respectivamente.

1.3 Deformación de antenas de microcinta

La detección de deformaciones en estructuras de acero, puentes o edificios se ha convertido en un campo de investigación para gran variedad de ingenieros, llevando a que muchos estudios se centren en la potencialización de sistemas SHM (Structural Health Monitoring, por sus siglas en inglés), los cuales ayuden a identificar y evitar la propagación de daños estructurales, mitigando a su vez las deficiencias que existen actualmente a la hora de medir deformaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, uno de los estudios de gran interés en la potencialización de los sistemas SHM, es el uso que se le puede dar a las antenas de microcinta para medir deformaciones, debido a la flexibilidad en tamaño y construcción que éstas presentan. En esa medida, es necesario tener presente que dichas antenas pueden ser sometidas a esfuerzos que las deforman con el fin de proporcionar datos que ayuden al análisis estructural de puentes y otras estructuras.

En el caso de las antenas de microcinta, los esfuerzos mecánicos que éstas sufren, entendidos como fuerzas internas por unidad de superficie que ofrecen sus componentes para no ser deformados (Mott, 2009), son los siguientes:

- **Esfuerzo de compresión:** En este caso las fuerzas que actúan sobre la antena tienen direcciones opuestas y tienden a aplastarla y a acortarla, tal como se observa en la Figura 9.

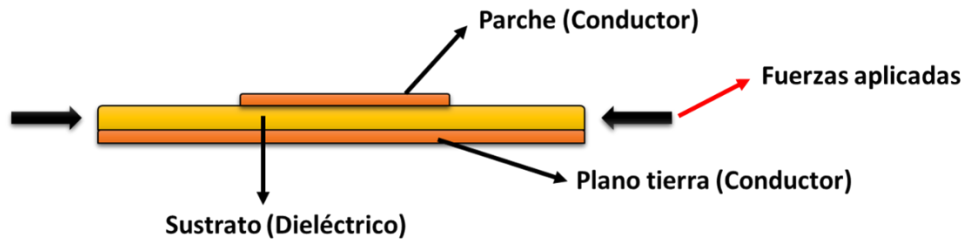


Figura 9. Antena de microcinta sometida a un esfuerzo de compresión.

- **Esfuerzo de tensión:** En este caso las fuerzas aplicadas sobre la antena tienen direcciones opuestas y tienden a alargarla, y, por ende, a separarla, tal como se ilustra en la Figura 10.

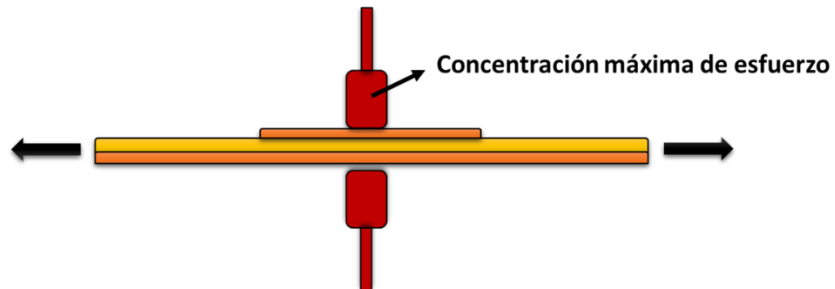


Figura 10. Antena de microcinta sometida a un esfuerzo de tensión.

Vale la pena aclarar que los esfuerzos de compresión y tensión son esfuerzos normales, ya que actúan perpendicularmente a la sección transversal de las antenas.

- **Esfuerzo de flexión:** En este caso el esfuerzo puede variar en diferentes posiciones de la antena, pudiéndose concentrar en un punto determinado o actuar a lo largo de un eje, permitiendo identificar el punto máximo donde ocurre el mayor esfuerzo. El esfuerzo de flexión se muestra en la Figura 11.

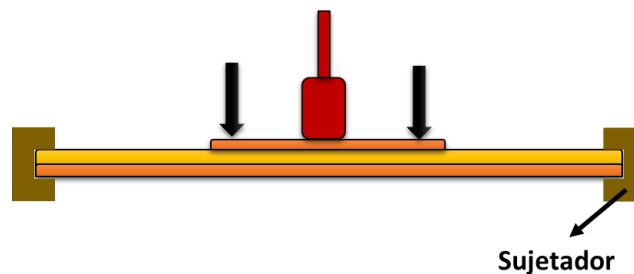


Figura 11. Antena de microcinta sometida a un esfuerzo de flexión.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el sistema internacional de unidades (SI), las unidades estándar de esfuerzo son newton por metro cuadrado (N/m^2), las cuales reciben el nombre de *pascales* y se abrevian Pa. Los niveles típicos de esfuerzo son de varios millones de pascales, por lo cual la unidad más conveniente de esfuerzo es el MegaPascal (MPa).

Ahora, teniendo claro que los esfuerzos internos generados por las fuerzas aplicadas sobre las antenas de microcinta pueden desencadenar cambios en su tamaño (deformaciones), vale la pena destacar que dichos cambios pueden alterar su frecuencia de resonancia, por consiguiente, se abre un campo para la investigación de la relación entre los parámetros eléctricos y mecánicos de las antenas de microcinta que conduzcan a una mejor caracterización de estos dispositivos como sensores de deformación.

1.3.1 Propiedades elásticas de las antenas de microcinta del proyecto

El cobre es un metal que en presencia de oxígeno tiene la propiedad de formar en su superficie una capa protectora de óxido y sulfato de cobre, llamada pátina, que es completamente lisa e insoluble en agua, protegiendo al metal del medio que lo rodea. Así mismo, el cobre posee propiedades mecánicas de resistencia según los estados por los cuales haya pasado, en el caso del proyecto es de gran interés el estado templado, el cual indica la tensión o rigidez del cobre cuyos valores en *resistencia a la tracción* son de 37 a 41 kg/mm^2 , *límite elástico* 36 kg/mm^2 y *alargamiento en la rotura* 5 a 6 % (Ingemecánica, 2018).

Otra gran propiedad que es muy importante en el Cobre y en el sustrato RO4350B como en otros materiales al momento de su manipulación en cualquier área, es el límite elástico o límite de elasticidad, el cual corresponde a la tensión máxima a la cual puede ser sometido un material sin sufrir deformaciones permanentes, esto quiere decir, que al parar la tensión o fuerza externa la pieza puede recuperar su dimensión inicial, todo ello sin superar su nivel máximo de carga o tensión, o en caso de que se supere el límite elástico que el material posee, éste sufre deformaciones permanentes y ya no recupera su forma original o inicial. Por consiguiente, ante esta última situación el material entra en el régimen de plástico hasta alcanzar el punto de rotura o resistencia a la tracción (Tecnología, 2018).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, es muy importante para la presente tesis conocer las propiedades elásticas del cobre y del sustrato RO4350B para su tratamiento al momento de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

someterlos a fuerzas externas como deformaciones. Una de estas propiedades es el módulo de elasticidad o de Young (**E**), el cual indica la relación de tensión aplicada a una pieza en una dirección con la deformación originada en esa misma dirección, considerando un comportamiento elástico en la pieza. Adicionalmente, otra propiedad importante es el coeficiente de Poisson, el cual corresponde a la razón entre la elongación longitudinal y la deformación transversal del material al momento de la tracción, este valor siempre es constante dentro del rango del comportamiento elástico del material (Ingemecánica, 2018).

Finalmente, en la Tabla 2 se muestran las propiedades elásticas de los materiales que componen las antenas de microcinta diseñadas para la tesis.

Tabla 2. Propiedades elásticas de los materiales que componen las antenas de la tesis

Propiedades elásticas del cobre	Propiedades elásticas del sustrato RO4350B
<ul style="list-style-type: none"> • Módulo de Young: 110.000 Megapascals (MPa), (110.00 N/mm²). • Módulo de Poisson: $\nu = 0.34$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Módulo de tracción: 16.767 y 14.153 MPa. • Resistencia a la tracción: 18.9 y 29.5 MPa. • Fuerza de Flexibilidad: 255 MPa.

Observación: Para mayor información sobre otras propiedades del sustrato RO4350B se sugiere visitar la página oficial de Rogers Corporation (Corporation).

1.4 Simulaciones numéricas

El proceso de simulación constituye una parte esencial de todo proceso de investigación, razón por la cual se acudió al software CST Studio Suite en la presente tesis, el cual se destaca por su precisión, velocidad y facilidad de uso, e igualmente, posee módulos y herramientas para el diseño y optimización de dispositivos que operan en amplias gamas de frecuencias, permitiendo el análisis de efectos ópticos, térmicos, mecánicos y electromagnéticos, e igualmente, facilitando un entorno de diseño integrado, acompañado de una buena gestión de sistemas electromagnéticos completos, ciclos de desarrollo más cortos, creación de prototipos virtuales, entre otras funcionalidades (CST, 2018).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Dentro de los módulos que posee CST Studio, el módulo Microwave Studio fue empleado para llevar a cabo las simulaciones de diseño en la presente tesis. Dicho módulo ofrece múltiples solucionadores de gran potencial, los cuales están basados en métodos de solución como el Método de Elementos Finitos (FEM por sus siglas en inglés), el Método de Momentos (MoM por sus siglas en inglés), entre otros. Dentro de esos solucionadores, uno bastante útil para el análisis del comportamiento de antenas es el solucionador de dominio de la frecuencia, el cual es una herramienta de propósito general que proporciona los campos electromagnéticos cercanos y lejanos para las estructuras analizadas, al igual que sus parámetros de dispersión. Así mismo, el solucionador permite cambiar el enmallado de cartesiano a tetraédrico, representar de forma segmentada superficies curvas, refinar el enmallado, e igualmente, puede utilizarse alternativamente con el solucionador de dominio del tiempo en el mismo modelo de simulación (CST, 2018).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta los objetivos planteados se definió que las antenas de microcinta propuesta operaran en una de las bandas de frecuencia ISM (Industrial, Scientific and Medical), específicamente 2.4 GHz o 5.8 GHz. Así mismo, se estableció una impedancia deseada de 50 ohmios para dichas antenas, e igualmente, se extrajo de la hoja de datos del sustrato Rogers RO4350B el valor del grosor y la constante dieléctrica de éste (0.18 mm y 3.48, respectivamente), así como el grosor de su capa de cobre (17.5 μm).

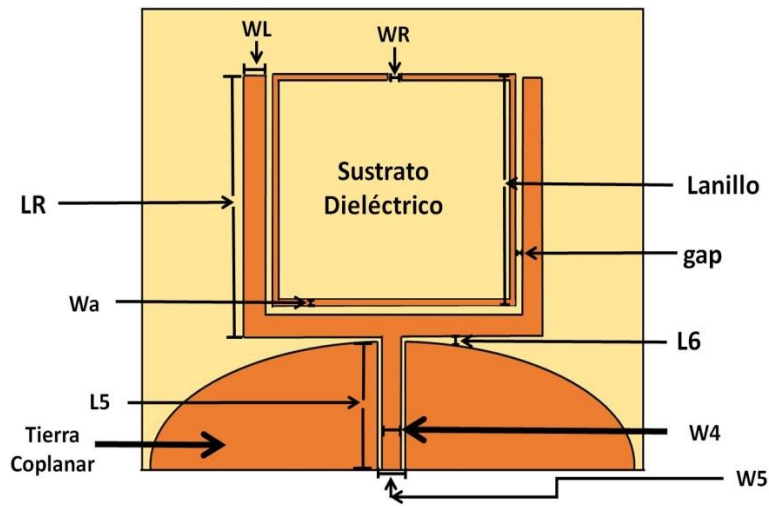
En esa medida, se implementó la siguiente metodología para cumplir con lo propuesto:

2.1 Diseño del sensor de deformación

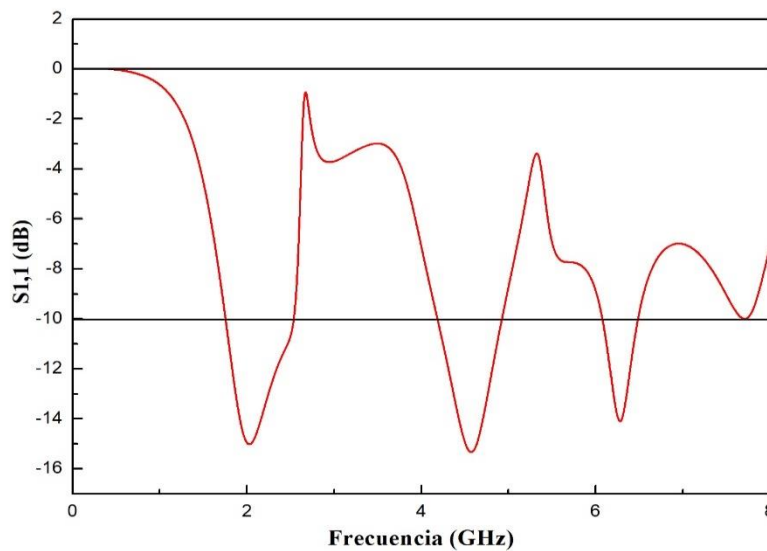
Tal como se mencionó en el capítulo 1, el diseño de las antenas propuestas se llevó a cabo a través del módulo CST Microwave Studio incorporado en el software CST Studio Suite (disponible en los PCs del laboratorio de investigación de la línea de investigación de visión artificial y fotónica del ITM). Así mismo, se decidió diseñar dos tipos de antenas, la primera de ellas estaba compuesta de un parche (radiador) en forma de U cuadrada acompañado de un resonador cuadrado con una pequeña abertura, el cual estaba ubicado al interior de dicho parche. La segunda antena poseía el mismo parche de la otra antena, pero sin el resonador cuadrado, y ambas antenas contaban con una alimentación de Guía de onda coplanar cuyo plano a tierra era un semicírculo. En esa medida, se llevó a cabo inicialmente la simulación de la antena con resonador, teniendo en cuenta los parámetros mostrados en la Tabla 3. Adicionalmente, en la Figura 12, se muestra el diseño y parámetro S_{11} asociados a ésta.

Tabla 3. Parámetros iniciales de diseño de la antena propuesta

	Parámetro							
	L6	LR	W4	W5	WL	Wa	gap	WR
Valor	0.4 mm	33 mm	4 mm	4.4 mm	2 mm	2 mm	1.25 mm	2.5 mm



(a)



(b)

Figura 12. (a) Diseño de la primera antena propuesta con parámetros iniciales y (b) Parámetro S_{11} evaluado para ésta.

En la Figura 12 se puede observar que la primera antena diseñada no se encontraba operando a 2.4 GHz, ya que en el parámetro S_{11} se resalta la existencia de tres picos de resonancia a frecuencias no deseadas (2 GHz, 4.52 GHz y 6.2 GHz). Así mismo, se observa que dichos picos de resonancia poseían anchos de banda grandes, lo cual no era apropiado para que la antena propuesta funcionara como sensor. Por consiguiente, se optó por llevar a cabo la optimización de los parámetros de diseño de dicha antena, con el fin de obtener una mejor respuesta en frecuencia, y así mismo, hallar los parámetros de diseño que

permitiesen simular la segunda antena (caracterizada por no tener un resonador cuadrado), y por consiguiente, poder comparar ambas antenas para determinar cuál de ellas ameritaba su construcción y caracterización como sensor de deformación.

2.1.1 Optimización del diseño de la antena con resonador

Inicialmente, se varió el parámetro WL (Grosor del radiador) desde 0.5 mm hasta 2.5 mm con pasos de 0.5 mm, observándose que la magnitud del primer y segundo pico de resonancia observados de izquierda a derecha en la Figura 12 disminuyó, y la magnitud del tercer pico de resonancia de dicho espectro aumentó, todo ello respecto a la línea de referencia de -10 dB. En esa medida, se puede notar en la Figura 13 que a través de los cambios inducidos en WL, el S_{11} obtenido a partir de WL igual a 0.5 constituye el espectro de interés para el proceso de optimización, ya que se logra maximizar la magnitud del coeficiente de reflexión en los picos que no eran de interés para el sensor de deformación (4.52 GHz y 6.2 GHz), dejando como frecuencia de interés el pico de resonancia de 1.52 GHz, visualizado en la Figura 13.

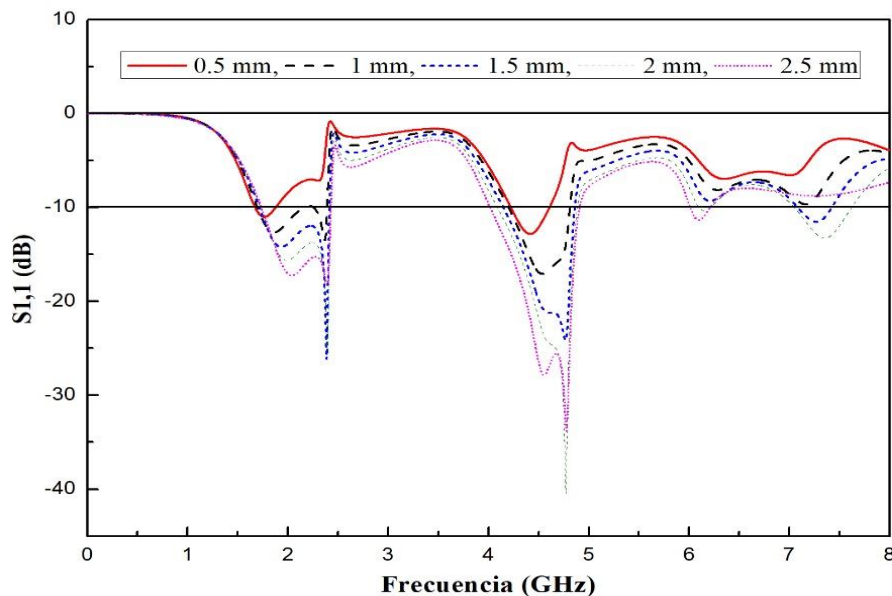


Figura 13. Parámetro S_{11} para las variaciones del parámetro WL.

Seguidamente, el segundo parámetro a variar fue W4 (Ancho de la línea de alimentación), cuya variación se estableció desde 3.6 mm hasta 4.4 mm con pasos de 0.2 mm, a partir de lo cual se buscaba que el pico de resonancia de interés producto de la variación de WL (1.52 GHz), obtuviese una mejor magnitud del coeficiente de reflexión y se desplazara hacia la frecuencia de 2.4 GHz. Por consiguiente, después de llevar a cabo la variación W4 el pico de interés se trasladó a 1.6 GHz y según lo mostrado en la Figura 14 el mejor valor de W4 fue 3.8 mm.

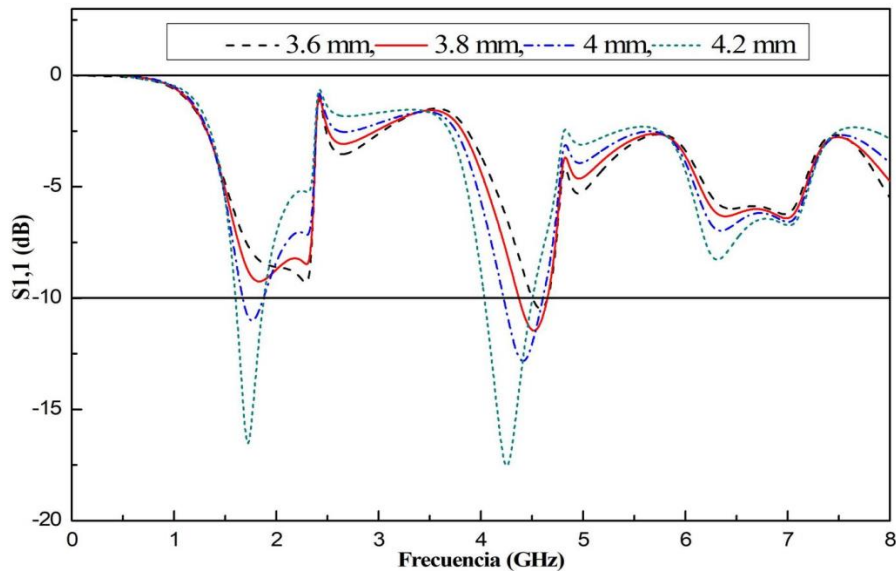


Figura 14. Parámetro S_{11} para cada variación de W4.

El siguiente parámetro en variar fue W5 (Abertura en tierra más línea de alimentación), cuya variación se estableció desde 4.2 mm hasta 5mm con pasos de 0.2 mm, a partir de lo cual se esperaba mejorar la magnitud del coeficiente de reflexión a la frecuencia de 1.6 GHz, o en su defecto, obtener un pico de resonancia cercano a 2.4 GHz. En esa medida, el mejor valor para W5 fue 4.6 mm, ya que la frecuencia de interés se situó a 2.3 GHz, aunque sus pérdidas no fueron favorables, tal como se observa en la Figura 15.

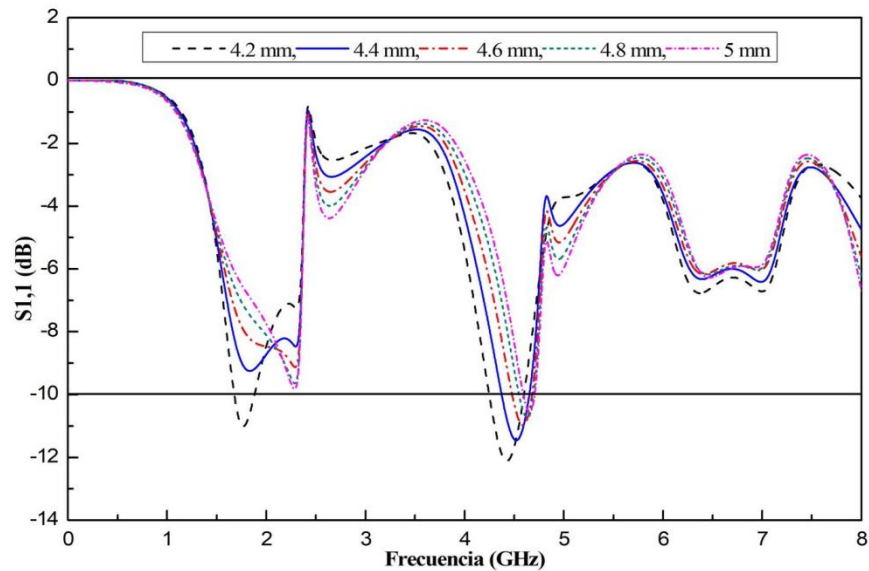


Figura 15. Parámetro S_{11} para cada variación del parámetro $W5$.

Posteriormente, se procedió a variar el parámetro $L6$ desde 0.4 mm hasta 1.32 mm con pasos de 0.23mm, el cual correspondía a la separación entre el plano tierra coplanar y el radiador. A partir de ello se obtuvo que el mejor valor para $L6$ era 1.32 mm, ya que presentaba un pico de resonancia en 4.3 GHz con un coeficiente de reflexión más favorable, aunque no el buscado, tal como se muestra en la Figura 16. Sin embargo, con el fin de buscar un coeficiente de reflexión apropiado para 2.4 GHz o una frecuencia de resonancia cercana a ésta, se procedió a variar el parámetro LR (Longitud de los brazos laterales del radiador) desde 20.8 mm hasta 32.8 mm con pasos de 3mm, tal como se observa en la Figura 17. Dicha variación arrojó que el mejor valor para LR era 26.8 mm, sin embargo, para la presente tesis se optó por el valor de LR igual a 23.8, ya que poseía un pico de resonancia en 6.51 GHz con un coeficiente de reflexión muy bueno, así como un pico de resonancia más definido y un ancho de banda más estrecho, lo cual es deseado al caracterizar una estructura como sensor. De esa manera, se optó por elegir ese pico y buscar su desplazamiento hacia 2.4 GHz a través de la variación de otros parámetros de la antena.

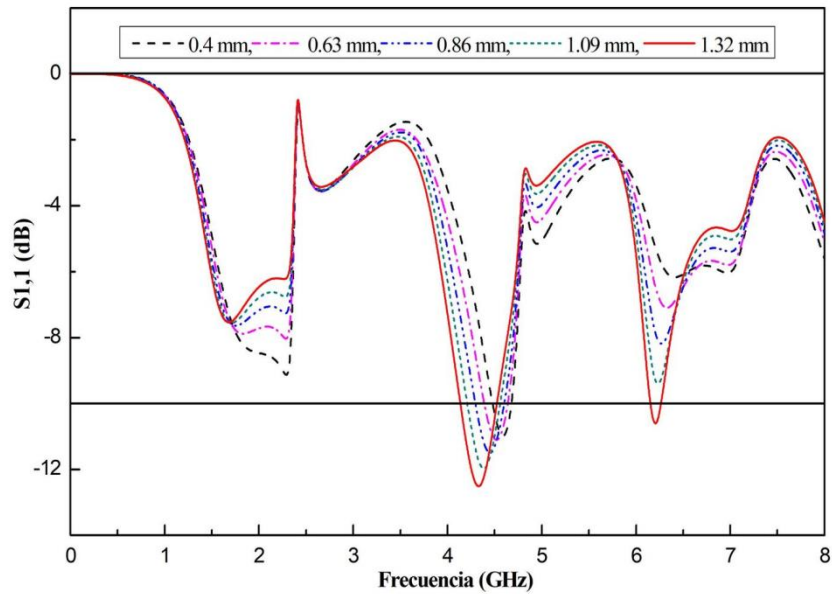


Figura 16. Parámetro S_{11} para cada variación del parámetro L6.

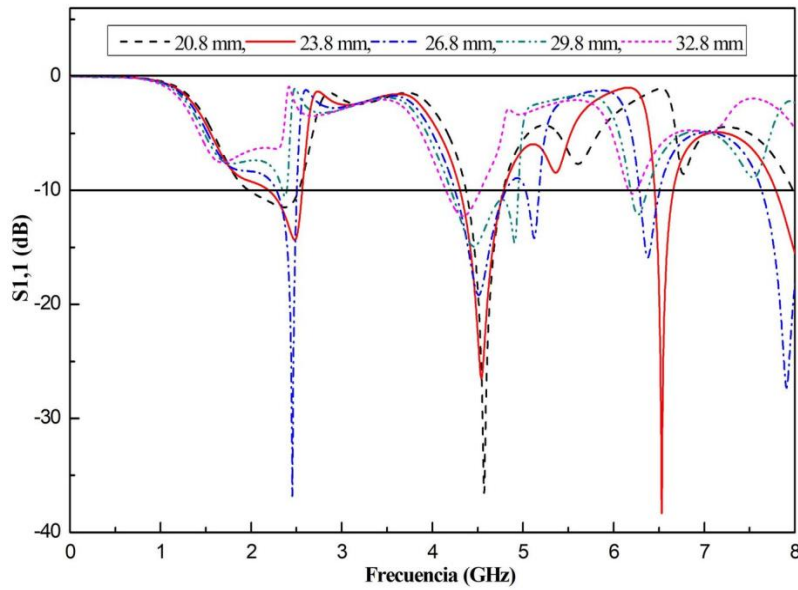


Figura 17. Parámetro S_{11} para cada variación del parámetro LR.

Ahora, con el fin de desplazar el pico de resonancia de 6.51 GHz u obtener un pico de resonancia bien definido en 2.4 GHz, se llevó a cabo la variación del parámetro Wa desde 0.5 mm hasta 2.5 mm con pasos de 0.5 mm, el cual correspondía al grosor del resonador. En esa medida, después de efectuar dicha variación se observó que el mejor valor de Wa

era 0.5 mm, puesto que se obtuvo un pico de resonancia a 2.44 GHz con un ancho de banda muy estrecho y una magnitud del coeficiente de reflexión de -47dB, lo cual se puede constatar en la Figura 18.

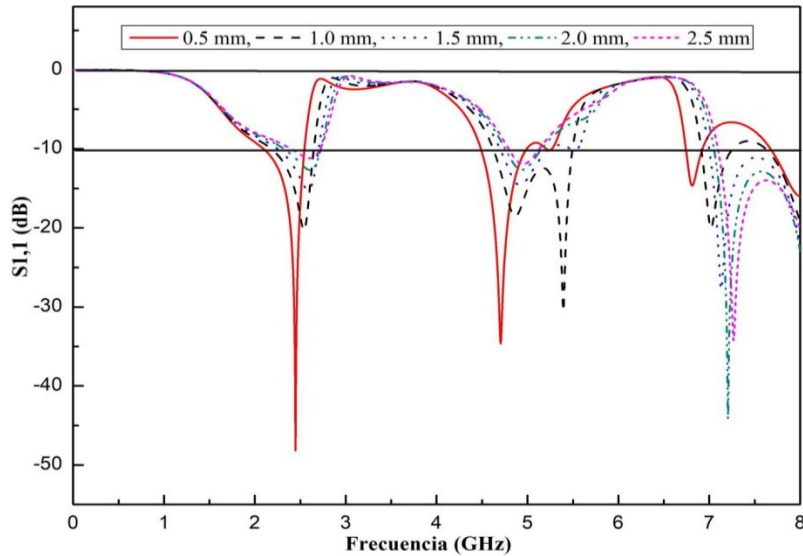


Figura 18. Parámetro S_{11} para cada variación del parámetro W_a .

Después de llevar a cabo la variación de W_a , se procedió a analizar la intensidad de la corriente eléctrica en la antena optimizada hasta ese momento ($W_L=0.5$ mm, $W_4=3.8$ mm, $W_5=4.6$ mm, $L_6=1.32$ mm, $L_R=23.8$ mm, $W_a=0.5$ mm y demás parámetros originales), con el fin de identificar la región de la antena que influía sobre las frecuencias de interés visualizadas anteriormente. Por consiguiente, en la Figura 19 se muestra que la corriente estaba distribuida principalmente sobre la región del resonador que estaba más cerca al radiador. Por lo anterior, se puede afirmar que el parámetro gap (separación entre el anillo resonador y el radiador) poseía cierta influencia sobre la frecuencia de resonancia de 2.44 GHz.

A continuación, se muestra la distribución de corriente eléctrica evaluada anteriormente:

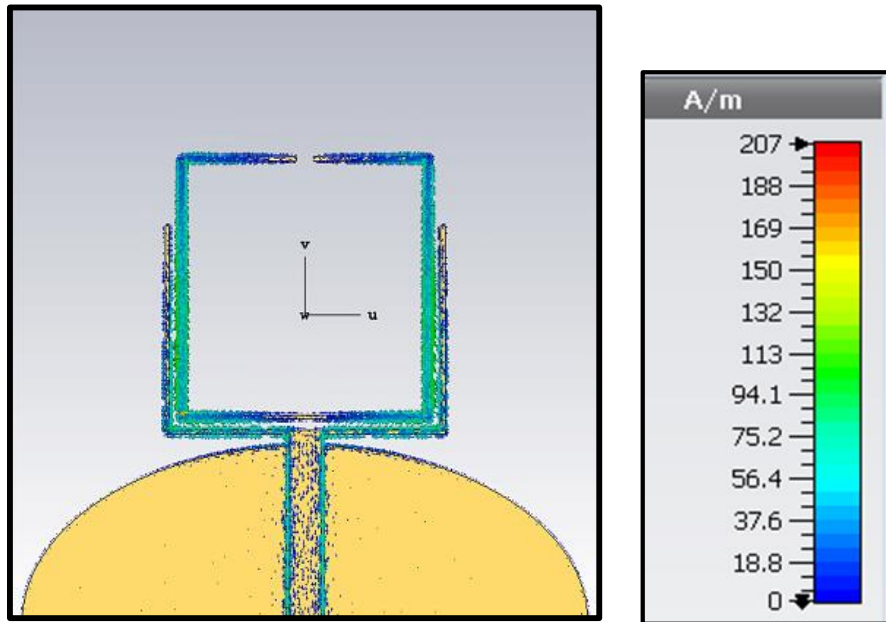


Figura 19. Distribución de corriente eléctrica de la antena optimizada a una frecuencia de 2.44 GHz después de variar el parámetro W_a .

En esa medida, se decidió variar gap desde 0.5 hasta 1.25 mm con pasos de 0.25 mm, verificando que el mejor valor de éste era 0.5 mm tal como se muestra en la Figura 20, a partir del cual el pico de resonancia en 2.44 GHz se conservaba, así como su ancho de banda. Adicionalmente, se pudo observar que el gap poseía un fuerte impacto sobre el factor de calidad del sensor, ya que al variar dicho parámetro se lograba que la resonancia fuese más pronunciada, especialmente cuando gap tenía un valor igual a 1.25 mm. Por tal motivo, se escogió el valor de gap mencionado anteriormente, pudiéndose afirmar también que la antena propuesta en este trabajo puede desempeñarse como una antena multibanda, debido a que presenta fuertes resonancias a 2.44 GHz y 4.7 GHz.

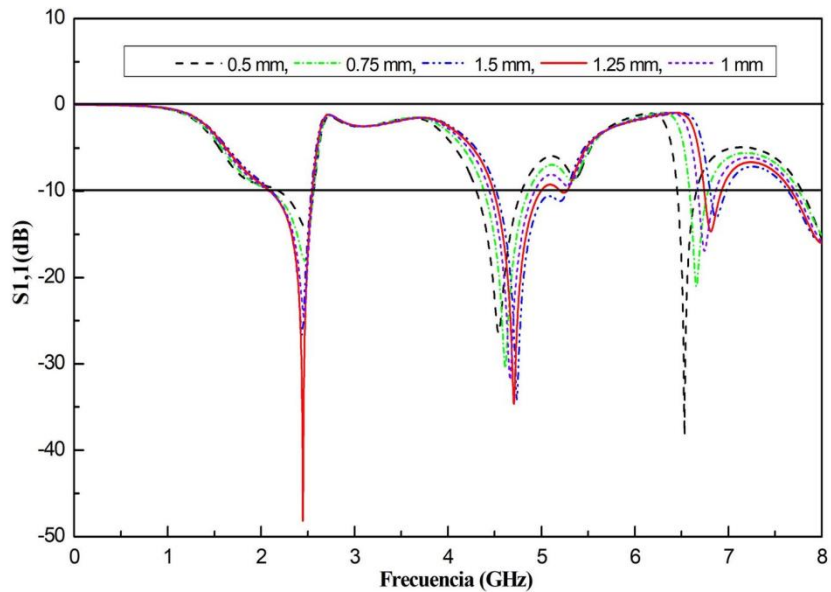


Figura 20. Parámetro S_{11} para cada variación del parámetro gap.

Finalmente, después de obtener una respuesta en frecuencia favorable para la antena propuesta, se procedió a variar el parámetro WR (Abertura del resonador) desde 0.5 mm hasta 2 mm con pasos de 0.5 mm, con el fin de evaluar su incidencia sobre el diseño propuesto hasta el momento. El producto de dicha variación mostró que para un valor de WR igual a 2 mm, el pico de resonancia a una frecuencia de 2.44 GHz presentó un mejor coeficiente de reflexión, ya que su magnitud disminuyó, lo cual a su vez dio a entender que la antena poseía un mejor acople y podría funcionar óptimamente como sensor. Sin embargo, como se observa en la Figura 21, dicho parámetro no generó cambios significativos sobre el espectro de la antena diseñada, por lo cual se dejó a 2 mm como su mejor valor, dando por finalizado el proceso de optimización de diseño.

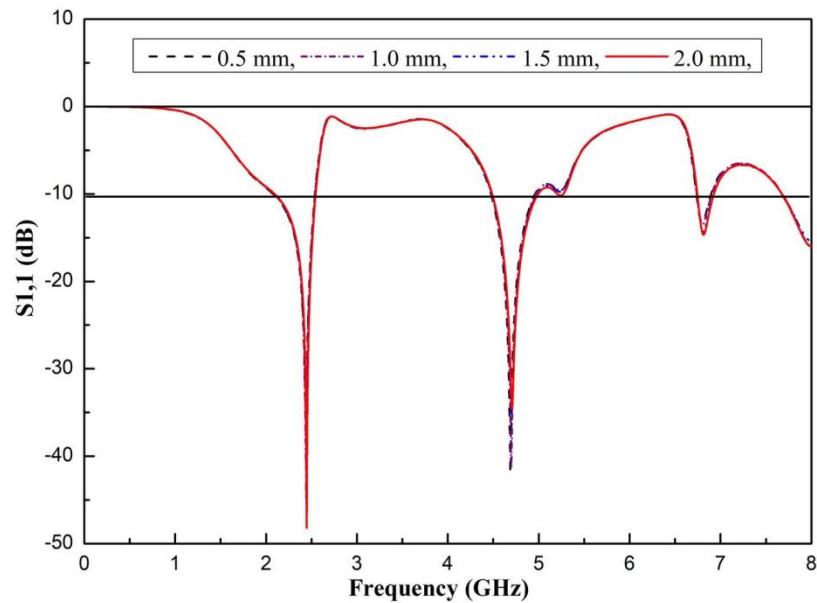


Figura 21. Parámetro S_{11} para cada variación del parámetro WR.

Ahora, teniendo el diseño de la primera antena optimizado, se procedió a simular la antena sin resonador conservando los parámetros de diseño de dicha antena, y como parte de la metodología propuesta, se registró el parámetro S_{11} (Magnitud del coeficiente de reflexión) asociado a esos diseños, siendo esto los resultados numéricos del sensor sin ser sometido a ningún tipo de deformación.

2.2 Construcción y caracterización del sensor de deformación

Luego de llevar a cabo el proceso de optimización descrito anteriormente, se procedió a fabricar la antena de microcinta que presentó el mejor coeficiente de reflexión, empleando la técnica denominada “Método de transferencia de tinta con papel transfer” (Ver Apéndice A). Después de esto, se soldó el conector SMA a la línea de alimentación de guía de onda coplanar de dicha antena, y, seguidamente, se caracterizó ésta usando un Analizador de Redes Vectorial (VNA, por sus siglas en inglés) FSH8 marca Rhode & Shwartz para medir su coeficiente de reflexión asociado. De esta manera, se obtuvo el espectro experimental asociado al parámetro S_{11} del sensor sin deformar, el cual se comparó con el espectro numérico de dicho parámetro después de construir la antena.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3 Análisis experimental

2.3.1 Montaje experimental

Como parte esencial de la metodología propuesta se implementó el montaje mostrado en la Figura 22, el cual permitió llevar a cabo la caracterización experimental del sensor de deformación fabricado, así como las pruebas de curvatura (deformación). Dicho montaje estaba compuesto de un computador portátil conectado a través de un cable de red a un VNA, el cual a su vez estaba conectado a la antena fabricada por medio de un cable coaxial, la cual estaba sujeta a un soporte encajado en una mesa metálica; y, finalmente, un sistema para cambiar los radios de curvatura aplicados en cada deformación. Así mismo, vale la pena resaltar que para visualizar y almacenar en el computador portátil los datos experimentales del parámetro S_{11} (Coeficiente de Reflexión) registrado en cada prueba, se usó el software R&S InstrumentView.

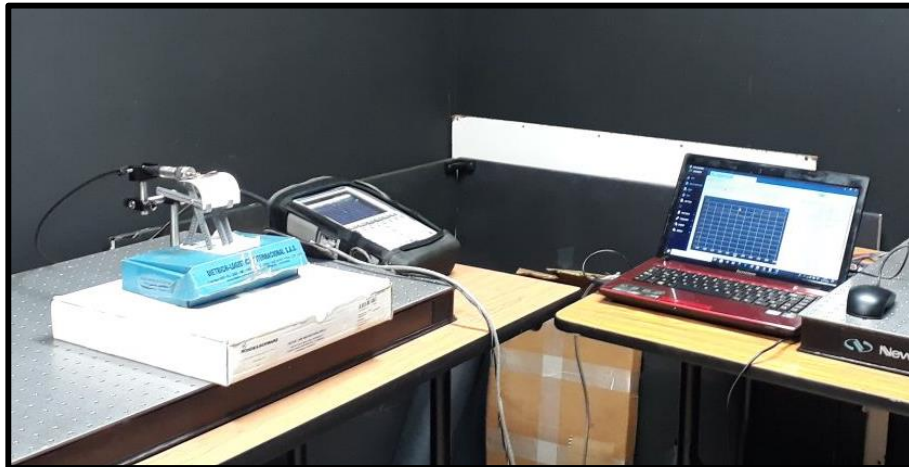


Figura 22. Montaje experimental para las pruebas de curvatura (deformaciones).

2.3.2 Sistema empleado para efectuar las pruebas de curvatura

Por su parte, el sistema usado para llevar a cabo las pruebas de curvatura fabricado en la impresora 3D MakerBotReplicator 2, disponible en el Laboratorio de Óptica, Fotónica y Visión Artificial del ITM. Dicho sistema constaba de seis barras removibles, cuatro de ellas para sujetar los bordes de la antena y dos para ejercer presión en el centro de ésta, siendo estas últimas las encargadas de producir el esfuerzo de flexión en las antenas, y por consiguiente, su deformación. Cada una de dichas barras poseía 18 agujeros circulares cuya distancia de separación entre centro y centro era de 5 mm, y así mismo, éstas estaban

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

unidas por un tornillo de acero de octava, el cual se insertaba en el agujero correspondiente al radio de curvatura a evaluar y a su vez estaba asegurado a las demás barras a través de cuatro tuercas desprendibles.

Seguidamente, vale la pena destacar que el sistema diseñado y mostrado en la Figura 23, constituye una apuesta muy creativa en la fabricación de un sistema capaz de someter una antena de microcinta a pruebas de deformación.

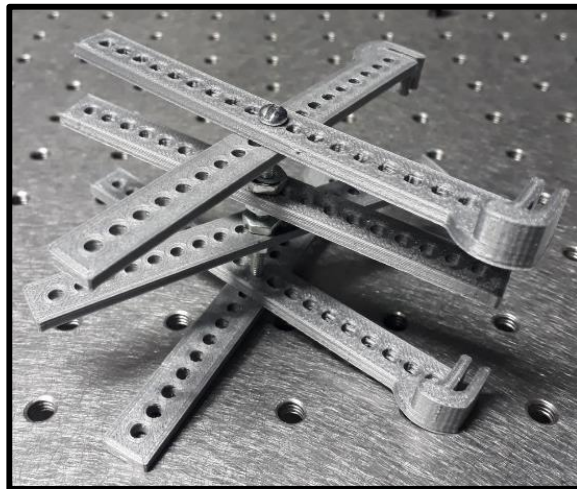


Figura 23. Sistema empleado para llevar a cabo las pruebas de curvatura.

2.3.3 Descripción de las pruebas experimentales

Luego de preparar adecuadamente el montaje mostrado en la Figura 22, se procedió a llevar cabo cuatro tipos de pruebas de curvatura (deformaciones) con la ayuda del VNA, a saber: Prueba de deformación cóncava vertical, Prueba de deformación convexa vertical, Prueba de deformación cóncava horizontal y Prueba de deformación convexa horizontal. El carácter de vertical u horizontal estaba dado por la posición del sistema de pruebas de curvatura al momento de llevar a cabo dichas pruebas, y, por otro lado, el carácter de convexo o cóncavo estaba dado por la ubicación del parche al observar la antena desde determinada altura, tal como se muestra en la Figuras 24 y 25.

Así mismo, se debe tener presente que en dichas pruebas las antenas estuvieron sometidas a fuerzas de flexión, las cuales a su vez ocasionaron una deformación sobre la antena, e igualmente, se debe precisar que se llevaron a cabo siete medidas de radio de curvatura en

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

el caso de las pruebas de curvatura verticales (radio infinito o antena sin deformar, radio de 15 mm, radio de 20 mm, radio de 30mm, radio de 40mm, radio de 50mm y radio de 60mm), y seis medidas de radio de curvatura en el caso de las pruebas de curvatura horizontales (los mismos radios mencionados para las pruebas de curvatura verticales, exceptuando el radio de curvatura de 15mm) , extrayendo el parámetro S_{11} correspondiente a cada una de esas mediciones.

Vale la pena mencionar que para efectos de análisis del proyecto se tomó como radio de curvatura el radio definido respecto a la región central de la antena de microcinta, ya que para radios mayores a 30 mm el radio de curvatura variaba en toda la superficie de dicha antena, siendo necesario un análisis diferencial del mismo, lo cual está fuera del alcance de la presente tesis.

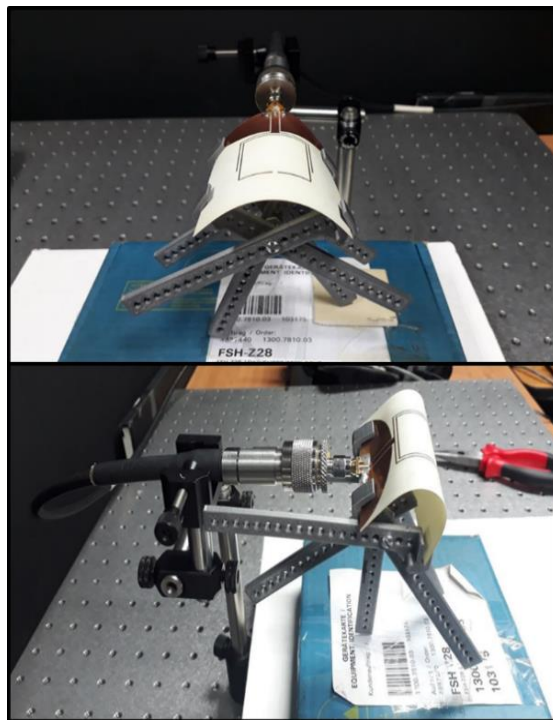


Figura 24. Ejemplo de pruebas de deformación convexas horizontales (arriba) y convexas verticales (abajo).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 25. Ejemplo de pruebas de deformación cóncavas verticales (izquierda) y cóncavas horizontales (derecha).

Los datos obtenidos a través de las pruebas mencionadas, junto al parámetro S_{11} de la antena de microcinta fabricada sin haber sido deformada, constituyen los resultados experimentales de la presente tesis.

2.4 Comparación de resultados y análisis

Como parte final de la metodología se procedió a comparar los resultados numéricos y experimentales obtenidos. El primer elemento a tener en cuenta fue el funcionamiento de la antena sin deformar, verificando a partir de ello si se produjeron mejoras en el desempeño de ésta debido a la introducción del anillo resonador. Seguidamente, se analizó el desplazamiento de la frecuencia de resonancia de la antena al momento de ejercer deformación sobre ésta, evaluando la magnitud del coeficiente de reflexión a través del parámetro S_{11} para cada una de las pruebas realizadas.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diseño final y parámetro S_{11} de las antenas propuestas

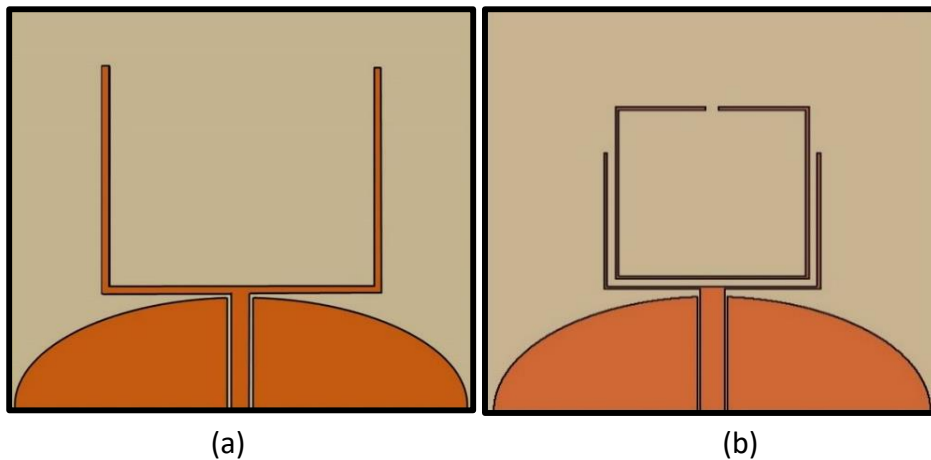


Figura 26. Esquema del sensor con (a) diseño optimizado sin el resonador y (b) diseño optimizado con el resonador.

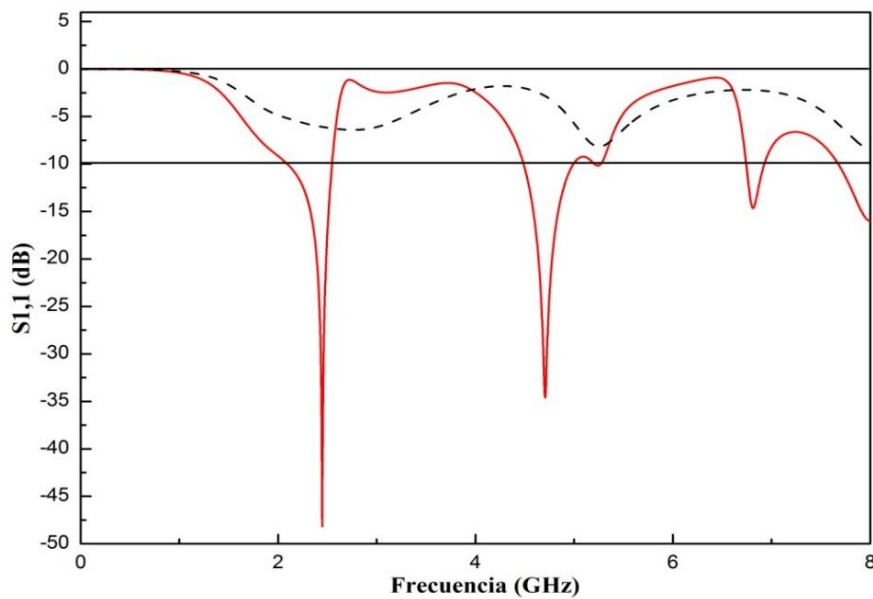


Figura 27. Comparación del parámetro S_{11} numérico de la antena de microcinta diseñada y optimizada sin resonador (línea negra punteada) y con resonador (línea roja continua).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Figura 27 se puede constatar que las resonancias vistas en las frecuencias de 2.44 GHz y 4.7 GHz se deben a la introducción del anillo resonador cuadrado, ya que al comparar los espectros de la antena sin resonador y la antena con resonador, es notable que dicho anillo contribuye con la minimización de la onda reflejada en las frecuencias mencionadas anteriormente, debido a que la magnitud del coeficiente de reflexión fue inferior a -10 dB. Adicionalmente, es notable que el ancho de banda para el pico asociado a la frecuencia de 2.44 GHz es de 400 MHz, lo cual representa un resultado significativo, ya que dicho ancho de banda es deseable cuando las antenas van a ser implementadas como sensores, e igualmente, esto permite mejorar la resolución de las mediciones a realizar.

De acuerdo al análisis presentado anteriormente, donde se da cuenta de la buena respuesta eléctrica que mostró numéricamente la antena propuesta con resonador respecto a la antena sin resonador, es posible plantear la necesidad de llevar a cabo estudios analíticos que permitan validar con mayor certeza el papel que tuvo el resonador en los resultados obtenidos. Lo anterior, obedece a la suposición de que el resonador permitió obtener valores de permeabilidad y permitividad negativos, debido a la inducción de corriente eléctrica en su interior, lo cual conllevó a que su interacción con el parche y el sustrato provocara cambios en la estructura molecular de la antena de forma ordenada y periódica, e igualmente, permitiese obtener un índice de refracción negativo. En esa medida, se podría afirmar hipotéticamente que la antena propuesta en la tesis se estaría comportando como una estructura metamaterial.

Finalmente, vale la pena resaltar que, debido a la buena respuesta eléctrica de la antena con resonador, se decidió construir dicho diseño, y a partir de éste hacer todas las pruebas de deformación requeridas.

3.2 Parámetro S_{11} numérico y experimental de la antena fabricada

Una vez construida la antena, se procedió a validar su comportamiento eléctrico de forma experimental, y así, poder confrontarlo con lo predicho por las simulaciones realizadas en CST STUDIO Suite. Dicha comparación es mostrada en la Figura 28, en la cual se observa gran similitud entre el espectro obtenido en la fase de diseño y la fase experimental en la región que va, aproximadamente, desde 2.1 GHz hasta 2.58 GHz (recuadro verde en Figura 28), lo cual es un aporte significativo para el proyecto, ya que el sensor fue diseñado para operar a 2.4 GHz, y en este caso, la banda de frecuencia de operación de éste se encuentra dentro de una banda ISM(2.4-2.5 GHz).

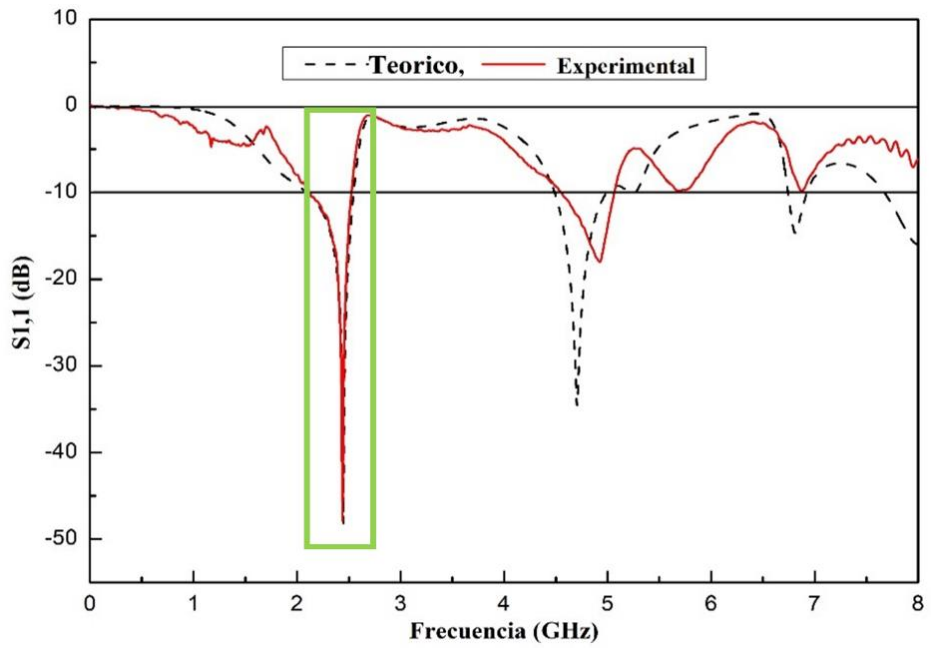


Figura 28. Comparación entre el parámetro S_{11} numérico y experimental de la antena fabricada.

Una vez validado el comportamiento eléctrico de la antena fabricada y después de haber verificado que el funcionamiento de ésta estaba acorde a lo predicho por el simulador, se procedió a realizar la caracterización experimental de dicho dispositivo al ser empleado como sensor de curvatura. Para ello, es importante tener presente que los radios de curvatura empleados en cada prueba estaban relacionados con la curvatura a través de la ecuación (2):

$$CV = \frac{1}{r} \tag{2}$$

Donde “**CV**” es la curvatura en 1/m y “**r**” es el radio de curvatura en m. De esa manera, los radios de curvatura empleados en las pruebas son resumidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Radios y curvaturas empleados en las pruebas de curvatura experimentales.

Radio [mm]	Curvatura [mm^{-1}]
∞ (antena como plano infinito)	0
60	0.017
50	0.02
40	0.025
30	0.03
20	0.05
15	0.07
Observación: Las pruebas de curvatura verticales se realizaron desde el radio infinito hasta el radio de 15 mm. Por otra parte, las pruebas de curvatura horizontales se realizaron desde el radio infinito hasta el radio de 20 mm, debido a que éste era el radio límite antes de que la antena se fracturase.	

3.3 Pruebas de curvatura verticales convexas

En la Figura 29, al variar la curvatura de la antena en las pruebas verticales convexas, se presenta un desplazamiento en frecuencia como era de esperar. Dicho desplazamiento tiene un comportamiento no lineal, como se muestra en la Figura 29, cuando se cambia de una curvatura de 0 mm^{-1} a una de 0.017 mm^{-1} el espectro se desplaza hacia frecuencias más bajas, pero al continuar curvando la antena el corrimiento espectral a partir de este punto es hacia frecuencias más altas.

De esa manera, con el fin de visualizar claramente el comportamiento de la frecuencia de resonancia en función de la curvatura cuando la antena es curvada convexamente en dirección vertical es construida la Figura 30. En esta Figura, el sensor presenta una región de comportamiento casi lineal cuando es empleado para medir curvaturas entre 0.017 mm^{-1} hasta 0.07 mm^{-1} con una sensibilidad de $1.9165 \text{ GHz}\cdot\text{mm}$, ya que al variar la curvatura en este rango la antena presenta un corrimiento de la frecuencia de resonancia desde 2.441 GHz hasta 2.501 GHz . Adicionalmente, se puede observar que en dicho rango de medición se presenta una variación en la magnitud del parámetro S_{11} , sin embargo, esta variación no presenta un patrón claro.

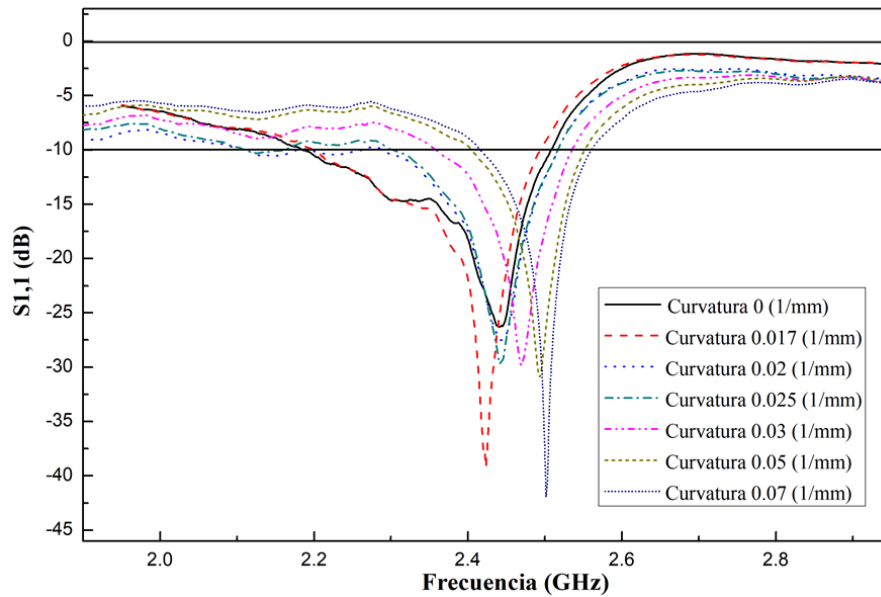


Figura 29. Respuesta espectral de la antena obtenida experimentalmente cuando la antena es sometida a pruebas de curvatura verticales convexas.

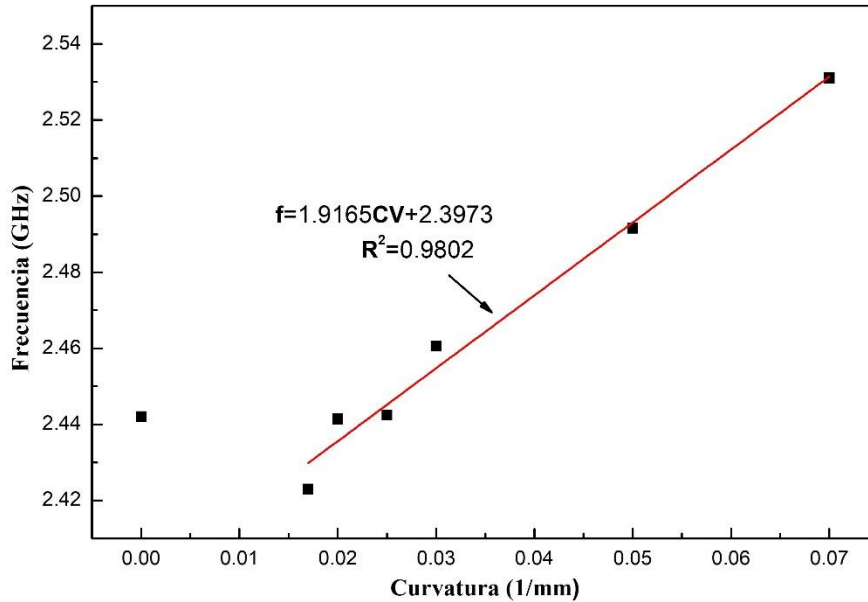


Figura 30. Análisis del corrimiento espectral obtenido experimentalmente cuando la antena es sometida a pruebas de curvatura verticales convexas.

Observación: Vale la pena tener presente que en la Figura 30, así como en la Figura 32, no se tuvo en cuenta para la regresión el punto asociado al radio de curvatura infinito, debido

a que en dicha prueba no hubo contacto entre el plano a tierra de la antena con la herramienta de deformación, lo cual si sucedió cuando se llevaron a cabo las pruebas de deformación verticales.

3.4 Pruebas de curvatura verticales cóncavas

Un procedimiento similar fue llevado a cabo para obtener la respuesta del sensor cuando era curvado cóncavamente en dirección vertical. La Figura 31 muestra cómo los espectros presentan un comportamiento similar a lo encontrado en la prueba anterior, es decir, al curvar la antena es posible modificar la frecuencia de resonancia de la antena. Por ende, en aras a obtener la curva característica de dicho sensor se realizó un análisis del corrimiento de la frecuencia de resonancia cuando la curvatura era variada desde 0 mm^{-1} hasta 0.07 mm^{-1} . El resultado de este análisis es ilustrado en la Figura 32, allí, se puede ver como en este caso el sensor presenta un comportamiento muy similar a cuando este era curvado convexamente en dirección vertical. Nuevamente, se observa que el sensor presenta un comportamiento casi lineal para curvaturas superiores a 0.017 mm^{-1} , sin embargo, en este caso la sensibilidad es ligeramente inferior, pues da como resultado $1.8055 \text{ GHz} \cdot \text{mm}$.

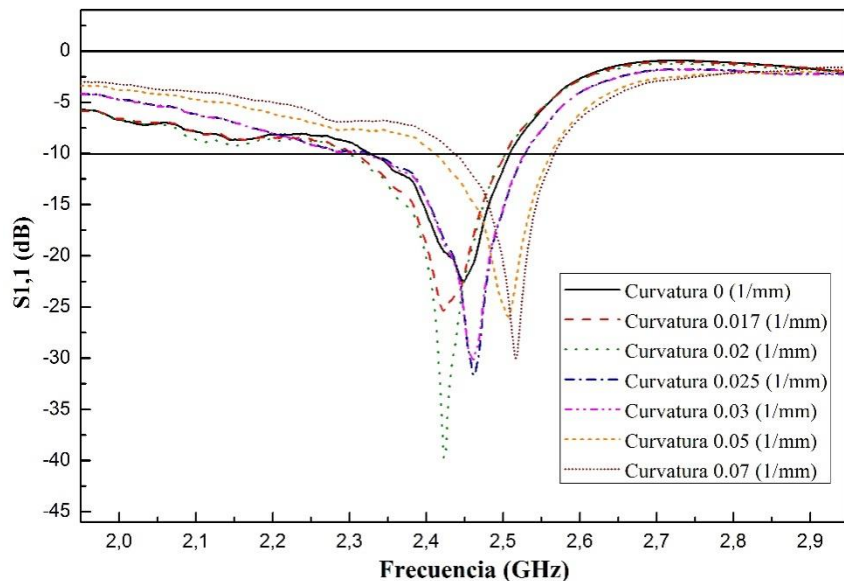


Figura 31. Respuesta espectral de la antena obtenida experimentalmente cuando la antena es sometida a pruebas de curvatura verticales cóncavas.

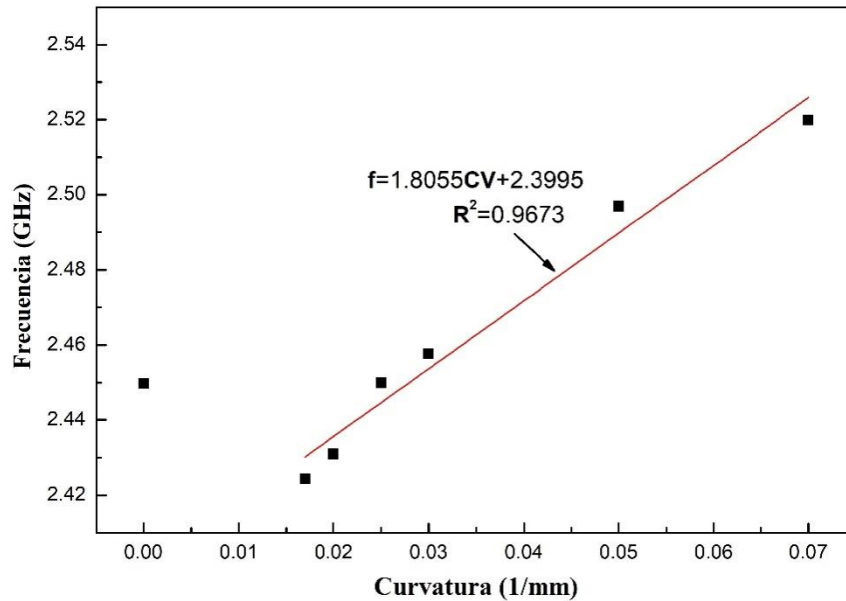


Figura 32. Análisis del corrimiento espectral obtenido experimentalmente cuando la antena es sometida a pruebas de curvatura verticales cóncavas.

Basados en los resultados mostrados al curvar la antena cóncavamente y convexamente, se puede concluir que, al modificar la antena en dirección vertical, el sensor presenta un comportamiento casi lineal, puesto que en un principio se genera un corrimiento espectral hacia frecuencias más bajas, pero a partir de una curvatura de 0.017mm^{-1} , el sensor cambia su comportamiento y la frecuencia incrementa. Esto se puede deber a que, en esta dirección, básicamente se alteran dos parámetros, la distancia de separación que hay entre la tierra y el elemento radiador (L6), y, en segundo lugar, la distancia que hay entre el radiador y el anillo resonador (gap). Así mismo, como se observó anteriormente en la Figura 23, la frecuencia de resonancia de 2.4 GHz depende fuertemente de esta última distancia, por lo cual, esto contribuyó a tener una buena sensibilidad.

Por otro lado, es importante resaltar que las pruebas de curvatura cóncavas registran picos de resonancia menos pronunciados y coeficientes de reflexión cuya magnitud es favorable pero no sigue una mejora progresiva, lo cual si se observa en las pruebas de curvatura verticales convexas.

3.5 Pruebas de curvatura horizontales convexas

Una vez analizado el comportamiento del sensor cuando éste era curvado verticalmente se procedió con la caracterización en dirección horizontal. Para ello, se deformó primero el sensor convexamente en dirección horizontal, cuyos resultados son ilustrados en la Figura 33. Al analizar dicha figura se puede ver que, al disminuir la curvatura generada, o, en otras palabras, al aumentar el radio de curvatura, la frecuencia de resonancia de la antena aumenta, lo cual es contrario a lo que se ocurría en las pruebas de curvatura verticales. Así mismo, se observa un aumento progresivo de la magnitud del coeficiente de reflexión al analizar desde la curvatura más pequeña hasta la más grande, lo cual da a entender que, si la curvatura es cada vez más grande, se incrementa la eficiencia de la antena y además el factor de calidad de la resonancia.

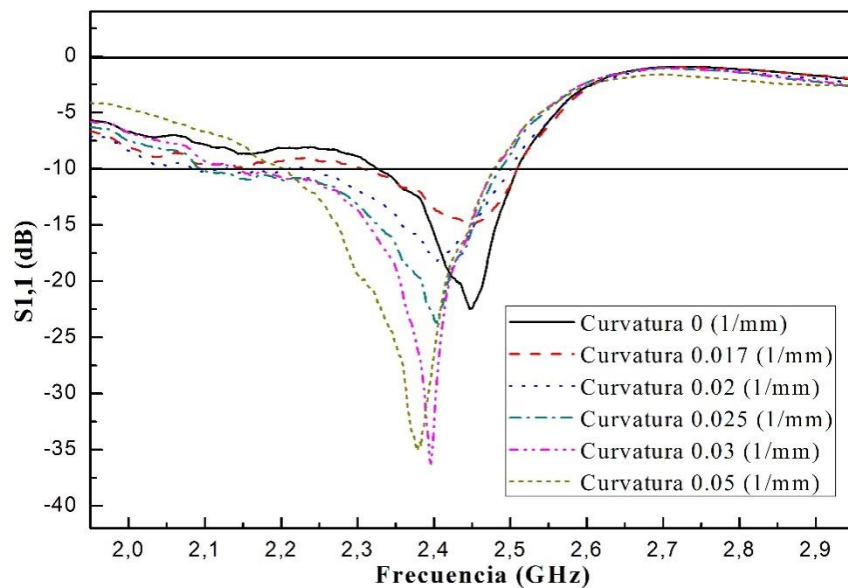


Figura 33. Respuesta espectral de la antena obtenida experimentalmente cuando la antena es sometida a pruebas de curvatura horizontales convexas.

Adicionalmente, al igual que en los dos casos anteriores, se procedió a realizar un análisis del comportamiento del pico de resonancia al incrementar la curvatura, de esta manera se pudo construir la curva característica del sensor, cuyo resultado es ilustrado en la Figura 34. Como se puede ver en esta figura, cuando el sensor fue curvado convexamente en dirección

horizontal, se obtuvo un comportamiento bastante lineal para todo el rango de análisis (0 mm^{-1} hasta 20 mm^{-1}). Adicionalmente, como lo prueba el análisis hecho, se encontró que esta configuración mostró una sensibilidad de $-1.5089 \text{ GHz}\cdot\text{mm}$.

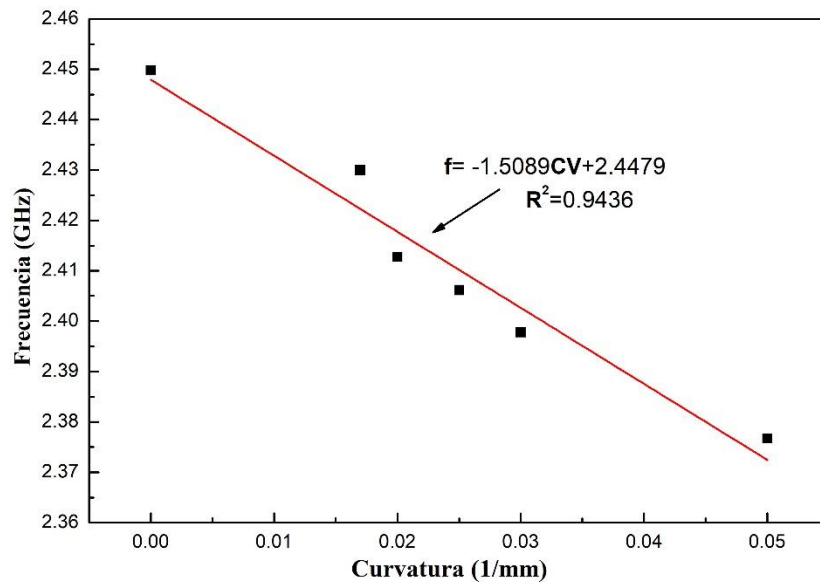


Figura 34. Análisis del corrimiento espectral obtenido experimentalmente cuando la antena es sometida a pruebas de curvatura horizontales convexas.

3.6 Pruebas de curvatura horizontales cóncavas

Finalmente, se llevaron a cabo las pruebas de curvatura cuando el sensor era curvado cóncavamente en dirección horizontal. Como se puede observar en la Figura 35, en este caso se presentó un comportamiento muy similar a cuando la antena fue curvada convexamente en la misma dirección, puesto que, al incrementar la curvatura, la frecuencia de resonancia presentó un desplazamiento hacia frecuencias más bajas. Un análisis más detallado de cómo varió la frecuencia de resonancia en función de la curvatura, es presentado a continuación en la Figura 36. En dicha figura se puede observar que la frecuencia de resonancia de la antena cambió casi linealmente con la curvatura, cuando dicha antena fue curvada desde 0 mm^{-1} hasta 20 mm^{-1} . Adicionalmente, para este caso la sensibilidad se incrementó ligeramente a $-1.5260 \text{ GHz}\cdot\text{mm}$.

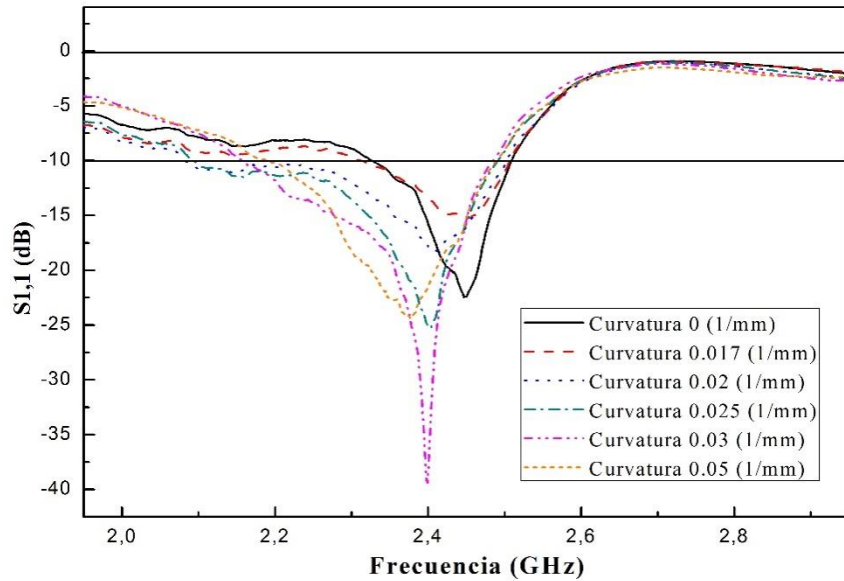


Figura 35. Respuesta espectral de la antena obtenida experimentalmente cuando la antena es sometida a pruebas de curvatura horizontales cóncavas.

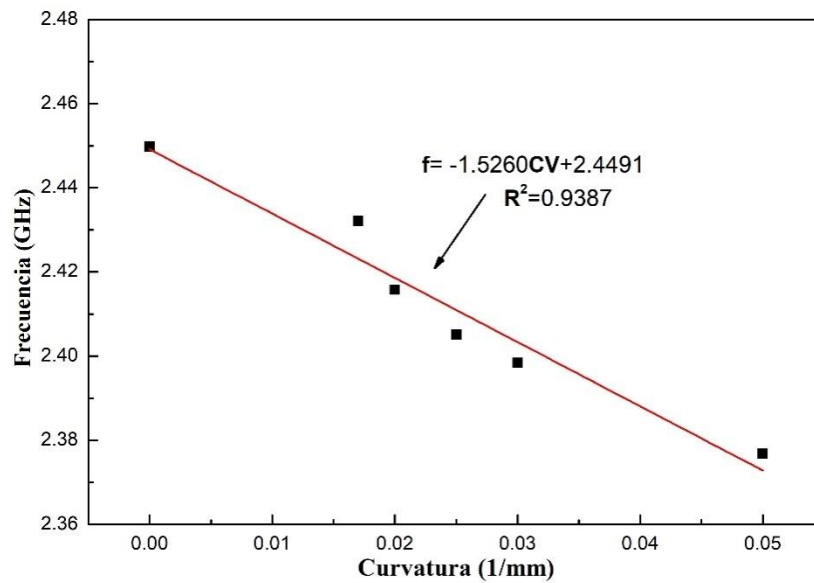


Figura 36. Análisis del corrimiento espectral obtenido experimentalmente cuando la antena es sometida a pruebas de curvatura horizontales cóncavas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Si se compara las pruebas de curvatura convexa y cóncava en dirección horizontal, se puede observar que la segunda de éstas presenta una mejor sensibilidad. Adicionalmente, a diferencia de cuando se curvó la antena de forma vertical, se encontró que el sensor presenta mayor linealidad en todo el rango de estudio, pero se perdió sensibilidad. Así mismo, cuando la antena es curvada en dirección horizontal, es posible sospechar que los factores que pueden incidir en la sensibilidad y resolución del sensor son dos: el primero de ellos está relacionado con la distancia que existe entre el resonador y el radiador (gap), pues como se observó en el caso anterior, al afectar la distancia existente entre estos dos elementos es posible cambiar la frecuencia de resonancia, lo cual efectivamente ocurrió. Adicionalmente, esto puede generar un mejor acople del campo electromagnético, por ende, se tiene una resonancia más pronunciada, tal como se ve en las Figuras 33 y 35. El segundo factor está asociado al parámetro denominado WR a lo largo del estudio, este hace referencia a la abertura del anillo resonador. De igual manera, al variar las dimensiones del corte del resonador es posible cambiar la frecuencia de resonancia del resonador (Cataño-Ochoa et al., 2016).

Otro factor importante a tener en cuenta es el relacionado con la implementación de dicha antena en la vida real. En este caso, creemos que la mejor opción es usar la antena de tal manera que la estructura sobre la cual se desean medir cambios de curvatura, genere cambios horizontalmente, ya que a pesar de tener más baja sensibilidad, presenta mayor linealidad en su región de operación, pero más importante aún, opera en una banda libre del espectro electromagnético (2.38 GHz hasta 2.45 GHz), la cual es internacionalmente reservada para aplicaciones de uso no comercial, y, por ende, cualquier persona puede usarla. Esto sin duda, significaría una gran ventaja pues permitiría su aplicación de forma libre a través de conexión a módulos inalámbricos disponibles en el mercado, tales como ZigBee o Bluetooth.

Seguidamente, se debe resaltar que, durante las pruebas experimentales llevadas a cabo en este trabajo, se comprobó que, al emplear un material flexible como sustrato, las antenas fabricadas podían ser empleadas en múltiples pruebas, puesto que una vez terminadas las pruebas de curvatura y después de liberar la antena de deformaciones, la frecuencia de resonancia de ésta volvía a su posición original, demostrando de esta manera que dichas antenas constituyen una alternativa funcional, confiable y sensible, e igualmente, pueden proporcionar la oportunidad de tener un sensor que es económico a corto y mediano plazo, debido a que es económica su fabricación y puede ser implementado en varias pruebas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Finalmente, debe aclararse que no se pudo llevar a cabo la comparación numérico-experimental de las pruebas de deformación, ya que en primer lugar no se disponía de un modelo analítico que permitiese relacionar, a través del software de simulación, los corrimientos en frecuencia con la variación de algún parámetro geométrico de la antena, así como con la deformación producida. Así mismo, otro factor que impidió dicha comparación fue la ausencia del valor numérico del módulo de Poisson, el cual no se encontró en la literatura científica ni en la hoja de datos del fabricante del sustrato; y adicionalmente, el impedimento que poseía el software de simulación CST para simular pruebas de deformación grandes como las llevadas a cabo experimentalmente, constituyó otra de las limitantes para obtener los datos numéricos de las pruebas de deformación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1 Conclusiones

- La antena fabricada funciona como sensor de deformación para cambios pequeños en curvatura, lo cual se valida con las pruebas de deformación realizadas, las cuales demuestran que el sensor presenta un comportamiento distinto para los cuatro sentidos de curvatura estudiados en este trabajo, arrojando de esta manera cuatro curvas de sensibilidad diferentes.
- La caracterización de la antena sin deformar fue bastante satisfactoria, ya que al validar con los datos numéricos (simulación) se encontró buena coincidencia en la región que va desde 2.1 GHz hasta 2.58 GHz, especialmente en la frecuencia de resonancia establecida para éste (2.44 GHz). Así mismo, se obtuvo una magnitud con un coeficiente de reflexión por debajo de -25 dB, lo cual resulta bastante favorable, e igualmente, el ancho de banda observado fue de 400 MHz, lo cual corrobora la buena construcción del sensor a pesar de que se empleó una técnica alternativa.
- Los metamateriales no existen en la naturaleza, sin embargo, pueden crearse a través de arreglos estructurales, tal es el caso del resonador cuadrado que hace parte de la antena fabricada en la tesis, el cual con su abertura y su interacción con el radiador, permitieron que dicha antena tuviera un mejor coeficiente de reflexión (-47 dB aproximadamente), e igualmente, contribuyó a que los picos de resonancia fueran más definidos, mejorando en gran medida el ancho de banda para la frecuencia de operación de dicha antena, el cual resultó apropiado para que ésta funcionara como sensor.
- Se logró diseñar, fabricar y caracterizar un sensor de curvatura, el cual en un futuro puede ser incorporado a una red de monitoreo inalámbrica que permita tomar mediciones en tiempo real sobre estructuras mecánicas y civiles que requieran medir cambios de deformación o curvatura.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2 Recomendaciones

Una recomendación importante es fabricar un sistema para hacer las pruebas de curvatura más firme y flexible, el cual permita cambiar rápidamente entre agujeros.

4.3 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se recomienda estudiar más afondo el diseño de la antena propuesta en la tesis con el fin de encontrar mejores parámetros que hagan que la antena obtenga una mejor magnitud del coeficiente de reflexión, e igualmente, le permitan ser multibanda, cuyas frecuencias de resonancia se encuentren en las bandas ISM libres, y de esta manera se pueda optimizar mayormente la antena para que se comporte como un sensor o como otro tipo de antena que sea útil en la industria. Así mismo, se recomienda estudiar qué efectos ocasionan la interacción de los metales en la respuesta de la antena, ya que ésta se diseñó para que tuviera cambios en su frecuencia de resonancia debido a una deformación, por consiguiente, sería un gran avance recopilar información futura sobre qué efectos ocasionan los metales en tipos de antenas flexibles.

Finalmente, se recomienda como trabajo futuro, crear un modelo matemático que pueda relacionar las deformaciones de una antena de microcinta sometida a pruebas de curvatura y similares, y en esa medida, servir como soporte teórico para establecer comparaciones con los datos experimentales obtenidos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Acevedo-Osorio, G., Ossa, H. M., & Reyes-Vera, E. (2017). Performance analysis of a sensor based on monopoles-coupled split-ring resonator for dielectric permittivity characterization. *Conference: 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (pp. 1-2). Cancun: IEEE.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory*. New Jersey, Estados Unidos de América.
- Bashir D. Bala, M. K. (2012). Bandwith Enhanced Microstrip Patch Antenna Using Metamaterials. *2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics* , (pp. 280-282). Melaka, Malaysia.
- Beer, F. P., E. Russell Johnston, J., Dewolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2010). *Mecánica de materiales* (Quinta ed.). México: McGRAW-HILL Educación.
- Castellanos, L. M., López, F., & Reyes-Vera, E. (2016). Metamaterials: main features and applications. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 395-401.
- Cataño-Ochoa, D., Senior, D. E., López, F., & Reyes-Vera, E. (2016). Performance analysis of a microstrip patch antenna loaded with an array of metamaterial resonators. *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)* (pp. 281-282). Fajardo: IEEE.
- Chunhee Cho, X. Y. (2016). Passive Wireless Frequency Doubling Antenna Sensor for Strain and Crack Sensing. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 16(14), 5725 - 5733.
- Corporation, R. (n.d.). *Rogers Corporation*. Retrieved from Rogers Corporation: <http://www.rogerscorp.com/acs/products/55/RO4350B-Laminates.aspx>
- CST. (2018, Marzo 15). *CST Computer Simulation Technology GmbH*. Retrieved from CST Computer Simulation Technology GmbH: <https://www.cst.com/products/csts2>
- Díaz, M. C. (2001). *Mecánica de estructuras - Libro1 - Resistencia de materiales*. Barcelona: CPET .
- Hewlett-Packard, h. (1997). *S-Parameter Techniques*. Hewlett-Packard.
- IEEE. (2014). 145-2013 - IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. *IEEE*, 1-50.
- Ingemecánica. (2018). *Ingemecánica*. Retrieved Julio 2018, 23, from Ingemecánica: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn112.html>
- Jeremiah W. Sanders, J. Y. (2015). Microstrip Patch Antenna Temperature Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 15, 5312-5319.
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de materiales* (Quinta ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Ossa-Molina, O., Forero-Camen, A., Espinal Ramírez, C., Reyes-Vera, E., & López, F. (2018). Efectos en el coeficiente de reflexión de una antena de microcinta rectangular debidos a las modificaciones de posición de una ranura en la capa radiante. *Revista EIA*, 85-97.
- Oussaid, R. (2013). Performances for Enhancement of Patch Antennas Using Metamaterials. *Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control*. Algiers, Algeria.
- Pacheco, G. (2016). *Diseño y modelado de guías de onda coplanares para aplicaciones en comunicaciones en el dominio TeraHertz*(tesis para grado de magíster). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.
- Pozar, D. M. (2011). *Mirowave Engineering Fourth Edition*. Estados Unidos de América: Wiley.
- Ramesh Garg, P. B. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. Boston-Londres: Artech House.
- Reyes-Vera, E., Arias-Correa, M., Giraldo-Muñoz, A., Cataño-Ochoa, D., & Santa-Marin, J. (2017). Development of an Improved Response Ultra-Wideband Antenna Based on Conductive Adhesive of Carbon Composite. *Progress In Electromagnetics Research C*, 199-208.
- Rogers, J. E., Yoon, Y.-K., Sheplak, M., & Judy, J. W. (2017). A Passive Wireless Microelectromechanical Pressure Sensor for Harsh Environments. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 27, 73-85.
- Rueda, J. A. (1998). *Antenas: Principios básicos, análisis y diseño*. Mexicali, Baja California: Universidad Autónoma de Baja California.
- Rufus, E. (2015). Design of Antenna for Strain Sensing Applications. *2015 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI -2015)*. Coimbatore, India.
- S.R. Lee, E. H. (2017). Circularly Polarized Elliptical Microstrip Patch Reflectarray. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(8), 4322-4327.
- Sana Ahmed, F. A. (2015). A Compact Kapton-based Inkjet Printed Multiband Antenna for Flexible Wireless Devices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1802-1805.
- Sandeep Dubey, D. V. (2016). DUAL BAND PATCH ANTENNA WITH ENHANCED GAIN USING METAMATERIAL . *INTERNATIONAL CONFERENCE & WORKSHOP ON ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATION ENGINEERING 2016* , (pp. 45-47).
- Sirisha Mrunalini, A. M. (2017). Dual-band re-configurable graphene-based. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 11, 2104-2108.
- Tariqul Islam, M., Rahman, M. N., Jit Singh, M. S., & Samsuzzaman, M. (2018). Detection of Salt and Sugar Contents in Water on the Basis of Dielectric Properties Using Microstrip Antenna-Based Sensor. *IEEE Access*, 6, 4118-4126.
- Tecnología, F. d. (2018). *Propiedades elásticas de los materiales*. Retrieved Julio 2018, 23, from Propiedades elásticas de los materiales: http://www.ehu.es/rperez/Fisicabio/docs/Propiedades_elasticas.pdf

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Varón, J. L. (2011, Enero 29). *issuu*. Retrieved Noviembre 25, 2017, from *issuu*:
https://issuu.com/qwere/docs/esfuerzos_mecanicos

Veselago, V. G. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet physics uspekhi*, 509-514.

Zanuy, M. F. (2001). *Sistemas de comunicaciones*. España: MARCOMBO, S.A.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE

Apéndice A:

Técnica “Método de transferencia de tinta con papel transfer”

La técnica “Método de transferencia de tinta con papel transfer” constituye una opción viable para llevar a cabo la construcción de antenas de microcinta, debido al bajo costo de los materiales requeridos, la facilidad de su procedimiento y el tiempo requerido para implementarse.

Los materiales requeridos para implementar la técnica mencionada son los siguientes:

- Una lámina del sustrato dieléctrico elegido.
- Archivo de diseño de la antena en formato DXF.
- Dos o tres hojas de papel transfer, con el fin de tener buena cantidad de repuestos en caso de tener problemas en la primera impresión.
- Impresora láser.
- Un marcador de tinta negra permanente.
- Una esponjilla de brillo.
- Un rollo de cinta de enmascarar.
- Tijeras.
- Un recipiente cerámico.
- Una hoja (en lo posible reciclada).
- Una plancha casera.
- Kit de experimentación personal (guantes, delantal, gafas, entre otros elementos)
- Una botella de *thinner* o removedor de esmalte de uñas.
- Un frasco de ácido férrico, o en su defecto, 4 bolsas pequeñas de dicho ácido.
- Un cuchara o palillo metálico.
- Una bolsa de algodón.
- Un conector SMA o el requerido para la antena.
- Papel de baño o cocina para secar manos.

De esa manera, como requisito inicial de la técnica en cuestión, se requiere exportar del software simulador, en este caso CST Studio Suite, el diseño de la antena en formato DXF, el cual es compatible con el software Eagle. Seguidamente, se rellena el diseño exportado

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

en Eagle para luego ser guardado como archivo en formato PDF, con el fin de llevar a cabo su impresión en papel transfer. Vale la pena aclarar que **“la impresora utilizada debe ser a láser y contar con buena tinta”**, e igualmente, es indispensable que **“la impresión del diseño de la antena se haga en tamaño real con todas las configuraciones de impresión posibles que permitan obtener una imagen bien definida y oscura”**. En esa medida, se muestra a continuación cómo debe quedar la impresión del diseño:



Figura 37. Diseño de la antena impreso sobre papel transfer. Fuente: Autores

El siguiente paso es recortar la porción del sustrato que se va a emplear para fabricar la antena de microcinta, y seguidamente, retirar la suciedad que éste tenga al lijar (en una sola dirección) con una esponjilla de brillo sus dos caras de cobre, las cuales deberán quedar brillantes. Vale la pena resaltar que quien realice dicho procedimiento debe procurar no tocar con la yema de los dedos las superficies de cobre, tratando de sostener éstas con un trozo de papel. Lo descrito anteriormente se muestra en la siguiente figura:

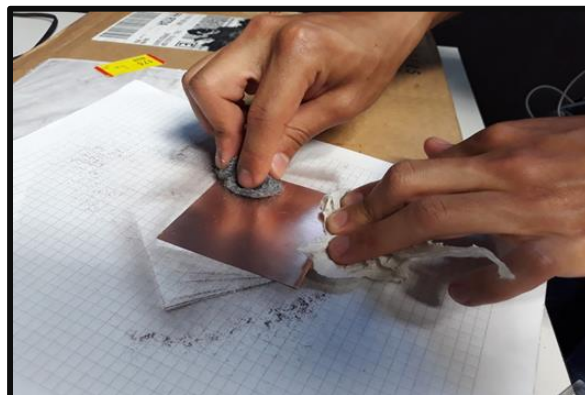


Figura 38. Limpieza inicial de las caras de cobre del sustrato dieléctrico. Fuente: Autores

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



(b)

Figura 39. Cara de cobre después de llevar a cabo la limpieza del sustrato. Fuente: Autores

Posteriormente, se procede a recortar el diseño de la antena de microcinta para pegarlo sobre una de las caras de cobre del sustrato dieléctrico, usando para ello cinta de enmascarar, e igualmente, evitando la fricción en el proceso, con el fin de evitar que la tinta se retire y altere el diseño impreso. Dicho procedimiento se ilustra en la siguiente figura:

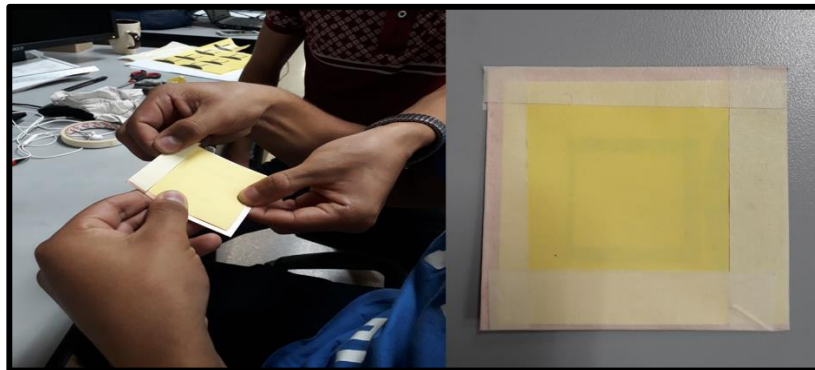


Figura 40. Adhesión del diseño impreso sobre una de las capas de cobre del sustrato dieléctrico. Fuente: Autores

Ahora, el paso a seguir es el planchado de la antena de microcinta, lo cual constituye una parte muy importante del proceso, ya que de ello dependerá en gran medida el éxito del proceso de fabricación. De esa manera, lo primero que se debe hacer es utilizar una hoja de papel doblada a la mitad en cuya interior se colocará la antena producto del paso anterior. Seguidamente, se debe planchar dicha antena haciendo movimientos horizontales durante ocho minutos, logrando de esa manera que la tinta quede impregnada en la capa de cobre sin problemas.

El paso descrito anteriormente se ilustra en la siguiente figura:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 41. Proceso de planchado de la antena de microcinta. Fuente: Autores

Seguidamente, se llena un recipiente cerámico con agua fría y se sumerge en éste la antena de microcinta planchada, dejándola allí durante cinco minutos para luego sacarla y retirar con cuidado el papel transfer y los trozos de cinta de enmascarar que posea dicha antena.

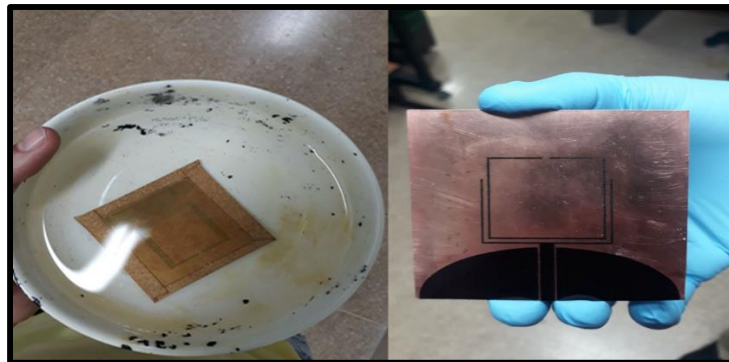


Figura 42. Antena de microcinta sumergida en agua (izquierda) y antena de microcinta con papel transfer y cinta de enmascarar retirados correctamente (derecha). Fuente: Autores

Después de haber retirado los trozos de papel transfer y cinta de enmascarar, se debe verificar que el diseño de la antena se haya transferido exitosamente, y en caso de que no haya sido así, las imperfecciones de dicho diseño pueden corregirse al ser resaltadas con el marcado de tinta negra permanente. Dicho proceso debe hacerse adecuadamente para evitar que el ácido férrico elimine porciones de cobre innecesarias. A continuación, se muestra el proceso de corrección mencionado:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

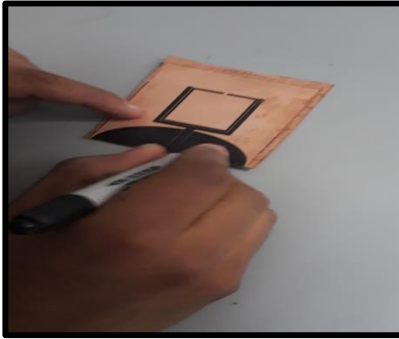


Figura 43. Proceso de corrección de las imperfecciones de la antena de microcinta impresa. Fuente: Autores

Posteriormente, se procede a sumergir la antena de microcinta en una mezcla de ácido férrico y agua caliente preparada en un recipiente cerámico durante quince minutos, buscando retirar el cobre innecesario de la antena al realizar movimientos circulares o similares con una cuchara. Vale la pena resaltar que dicho ácido no eliminará el diseño impreso, ya que la tinta es aquello que lo protege; e igualmente, es importante destacar que el agua empleada debe calentarse a 60°C, con el fin de que ésta tenga una temperatura adecuada para que el ácido sea disuelto adecuadamente.

Por otro lado, es necesario tomar las precauciones necesarias para llevar a cabo el paso anterior, y, por consiguiente, es indispensable usar guantes, tapabocas, gafas, delantal y de acuerdo con el sitio donde se lleve a cabo el proceso, se deberá usar una campana extractora o algo similar, con el fin de evitar complicaciones en la salud. En el caso del ITM dicha campana se encuentra en el Laboratorio de materiales poliméricos.

A continuación, se muestra el proceso descritos en los dos párrafos anteriores:

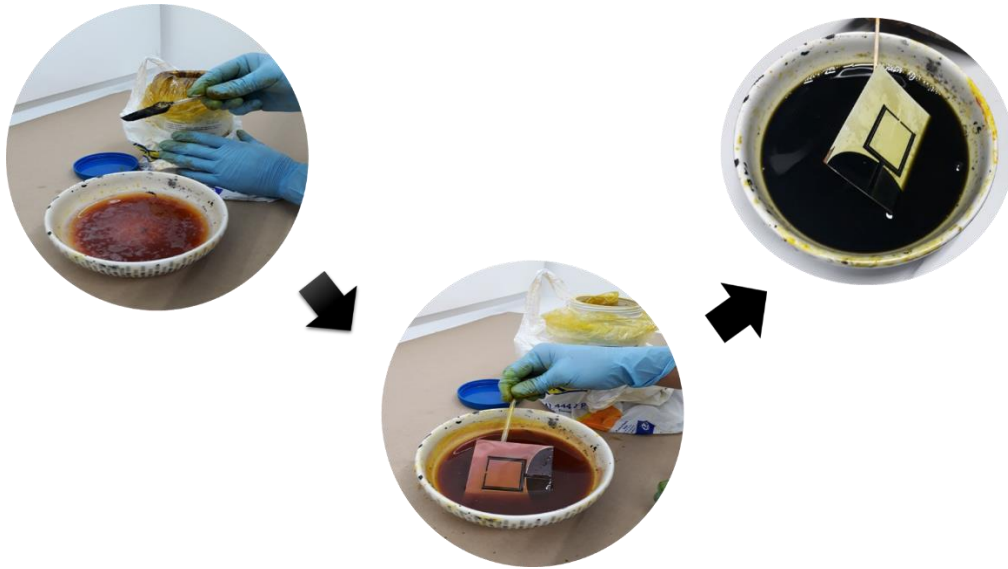


Figura 44. Retiro del cobre innecesario a través del ácido férrico. Fuente: Autores

Luego, se debe realizar la limpieza del recipiente cerámico con papel de baño para secar manos, e igualmente, se deberán acatar las demás normas de limpieza del lugar donde se lleve a cabo el anterior proceso, con el fin de dejar todo en orden.

Finalmente, se debe limpiar completamente la antena de microcinta con algodón y *thinner*, haciendo movimientos horizontales y verticales para retirar toda la tinta del diseño impreso. De esa manera, se puede proceder a soldar el conector SMA a la antena de microcinta, dando por terminado el proceso de fabricación.

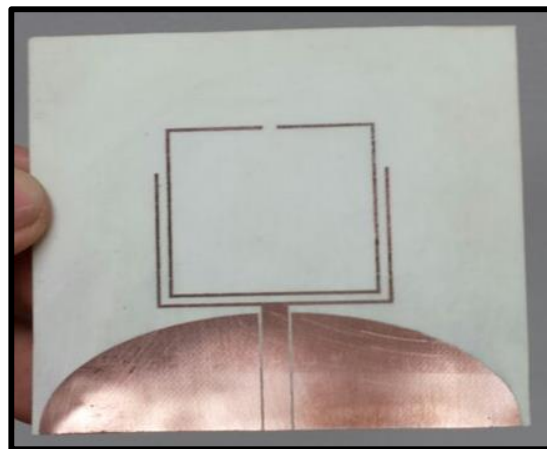



Figura 45. Antena de microcinta después de retirar la tinta de su diseño con algodón y *thinner*. Fuente: Autores

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Carlos Jhonathan Araujo Muñoz
Sebastián Bedoya Londono

FIRMA ASESOR Erick Reyes Vera
Oscar David Ossa

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____