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

DISEÑO DE SENSOR BASADO EN ANTENAS MISCROSTRIP EMPLEANDO SUSTRATOS FLEXIBLES PARA EL SENSADO DE DEFORMACIONES.

Anderson David Valencia Pérez

David Ricardo Jaramillo Correa

Tecnología en Telecomunicaciones

Director

M.Sc. Erick Reyes Vera

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Octubre del 2016

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

RESUMEN

En el presente proyecto de grado se muestra el diseño de un sensor de deformación altamente sensible basado en una antena microstrip ranurada con cuatro anillos resonadores complementarios. A través de los resultados obtenidos en esta propuesta se plantea una posible solución del problema de medición de cambios de esfuerzos o deformaciones sobre estructuras civiles o mecánicas, cuando estas son sometidas a fuerzas externas. Adicionalmente, se plantea una gran alternativa, ya que a través del desarrollo de estos sensores a futuro podrían ser implementados para crear una red de sensores que tomen mediciones de forma inalámbrica, brindando mayores prestaciones que los sensores tradicionales. Para llevar a cabo el diseño de este sensor se empleó el método de elementos finitos, con el fin de diseñar una antena microstrip que fuera sensible a deformaciones. Dicha simulación permitió mejorar la estructura para que, a pequeños cambios de deformaciones, sean generados mayores corrimientos en la frecuencia de resonancia y por ende permitan tener un sistema de medida más sensible y que permita adquirir información en tiempo real. Posterior a ello, implementamos la técnica de serigrafía para la fabricación de la antena. Finalmente, se realizó la comparación de los resultados teóricos y experimentales para validar la metodología empleada.

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

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos principalmente a nuestros núcleos familiares por el apoyo físico y moral a lo largo de todo el proceso investigativo. Igualmente, agradecemos a nuestro asesor de trabajo de grado por los aportes realizados para llevar a cabo nuestro trabajo a través de su experiencia, conocimiento y los recursos físicos, como equipos de cómputo y dispositivos de medición; también se agradece al Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) por proporcionar las instalaciones físicas donde se transcurrió la mayor parte del trabajo; ayudando recursos intangibles como lo son asesorías, software de simulación y equipos especializados necesarios para la investigación.

Además, agradecemos al Ingeniero Oscar David Ossa Molina quien nos brindó asesoría en el proceso de diseño y simulación en CST STUDIO y conceptos fundamentales en sensores de deformación basados en antenas de microcinta. Por último, agradecemos la ayuda de Brayan Gallego en el proceso de fabricación de antenas empleando la técnica de serigrafía.

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

ACRÓNIMOS

- CSRR* Anillo resonador complementario
- SRR* Anillo resonador con cortes en su geometría
- CNC* Máquina de control numérico computarizado
- S11* Parámetro “S” que muestra las pérdidas por retorno

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

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	9
3. METODOLOGÍA.....	11
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	31
REFERENCIAS	33

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

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha despertado un fuerte interés en desarrollar sistemas que permitan llevar a cabo la medición de deformaciones o cambios de esfuerzos, bien sea en estructuras civiles o mecánicas; debido al bajo costo de este tipo de antenas y su amplio campo de acción, así como también se han implementado diferentes sustratos (dependiendo de la aplicación) desde un material totalmente rígido hasta uno altamente flexible, creando así diversas técnicas para resolver la problemática. Estudiar este tipo de fenómenos es muy útil a la hora de prever un daño o ruptura posible en una obra civil, como lo son puentes o edificios, muy posiblemente si en dichas estructuras es ubicada una red de estos sensores, podría predecirse que tanto se deforma en un tiempo determinado, de esta forma sería posible prevenir una catástrofe y pérdidas significativas en vidas humanas.

En contraste con lo que se quiere hacer en el proyecto, las anteriores técnicas permitirán medir la deformación, pero el problema de los sensores basados en nanotubos de carbono y fibra óptica, es que resultan costosos y son difíciles de manipular, además estos sensores son bastante rígidos, lo que sería una desventaja a la hora de medir la deformación en una estructura.

OBJETIVOS

General:

Diseñar y construir una antena microstrip flexible que sea capaz de medir la deformación.

Específicos

- Validar proceso de simulación empleando la herramienta computacional CST Studio.
- Realizar mediante la herramienta de simulación el modelado de un sensor de deformación altamente sensible.
- Construir el sensor de deformación sobre un material dieléctrico flexible
- Comparar resultados teóricos y experimentales.

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

Inicialmente se buscó un acercamiento al software de diseño CST STUDIO que nos es útil para realizar procedimientos experimentales del tipo de antena que se desea realizar; el acercamiento consiste en replicar lo más exacto posible el artículo (Daliri, 2011) en los dos factores que se analizan generalmente un sensor, estos parámetros son la frecuencia de resonancia y las pérdidas por retorno (S11). Luego de este proceso se continuará realizando cambios en la antena que afecten en comportamiento de forma positiva en la misma; los cambios se realizaron en la longitud de la ranura con el fin de mejorar las respuestas de la antena, como segundo cambio se intercambió el sustrato por ULTRALAM 3850 (Roggers Corporation, 2016) buscando que el sensor presentara retorno a su forma original luego de la deformación, sin embargo al apreciar el S11 de la antena presento un aumento en las pérdidas por retorno conllevando a que la antena no presentara resonancia en el rango de frecuencia de 3 GHz a 4 GHz.

Este trabajo, se buscará llevar a cabo el diseño y construcción de un sensor basado en antenas microcinta con materiales flexibles que permita medir deformaciones. El cual se buscará que tenga una alta sensibilidad comparado con sensores RF presentados en la actualidad. Para ello se empleará el software CST STUDIO SUITE, para llevar a cabo el diseño de una estructura altamente estable sobre un material dieléctrico flexible (al ser flexible nos permite tener una mayor área de contacto, incrementando la sensibilidad). Además, se usa un arreglo de anillos resonadores complementarios (CSRR) que debido a su diseño permite tener un parámetro concreto de análisis en frecuencia para la medición del fenómeno de deformación en múltiples estructuras; luego de la incrustación de los CSRR en el parche de la antena se visualizó un mejoramiento en la sensibilidad presentando un decrecimiento en las pérdidas por retorno (S11) en la región donde interactúan los CSRR y la ranura; lo cual conlleva al previo estudio de este tipo de estructuras, bajo diferentes configuraciones o arreglos. Al obtener las respuestas experimentales del CSRR, para examinar y estudiar cómo responde el sensor a los cambios de esfuerzo.

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

Una vez esté modelado, se realizará un proceso de construcción empleando la técnica de serigrafía. Finalmente, este sensor se caracterizará empleando el analizador de redes vectorial FSH8 de Rhode & Schwartz. En el proceso de simulación se hace necesario entender el problema de acoplamiento de los fenómenos mecánicos con fenómenos asociados a la resonancia de la antena, agregándole de esta manera un alto grado de complejidad.

Por último, se plantea un análisis de resultados para comparar los datos obtenidos de CST con los valores experimentales, adicionalmente un trabajo futuro que consistirá en determinar la dirección en la cual se efectúan las deformaciones y además este sensor se podrá ejecutar el censado de forma inalámbrica.

2. MARCO TEÓRICO

Antenas microstrip (Ali Daliri, 2010)

En los últimos años las antenas microstrip han sido usadas extensamente en el rango de las microondas y han sido integradas en muchos dispositivos electrónicos. esto es por su diseño compacto, adaptable, tecnología de circuito impreso barata y fácil integración con dispositivos electrónicos. Una típica antena microstrip se muestra en la Figura 1.

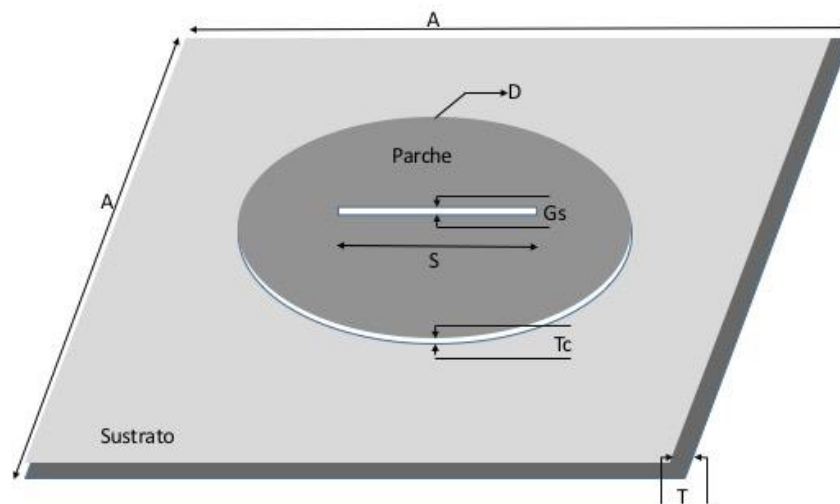


Figura 1. Antena microstrip con parche circular.

La frecuencia de resonancia de una antena de parche circular con el radio a , y espesor del sustrato h , y permitividad relativa ϵ_r , su modo dominante TMM_{110} es:

$$f_{r_{110}} = \frac{1.2412 c}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Donde la velocidad de la luz (C) está dada por:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2)$$

Y el área efectiva a_e del parche de la antena:

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

$$a_e = a \left[1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right]^{1/2} \quad (3)$$

Entonces la frecuencia de resonancia (f_r) es:

$$f_r = \frac{c_2}{a_e} \quad (4)$$

Donde la constante dos está dada (C_2) por:

$$C_2 = \frac{1.2412 c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

Las ecuaciones anteriormente seleccionadas se cumplen cuando la estructura no es sometida a una deformación, pero si se toma en cuenta dicho cambio en la frecuencia de resonancia, habría que reformular el área efectiva del parche (a_{es}), el cambio de la frecuencia (∇f y f_{rs}) en términos de la nueva área asociada a la deformación. Obteniendo que (Siendo ϵ la deformación aplicada a la estructura):

Entonces el área efectiva después de la deformación (a_{es}) es

$$a_{es} = a_e (1 + \epsilon) \quad (6)$$

Y la frecuencia de resonancia después de la deformación (f_{rs}):

$$f_{rs} = \frac{c_2}{a_{es}} \quad (7)$$

Siendo el cambio de Frecuencia de resonancia:

$$\nabla f = f_{rs} - f_r \quad (8)$$

Por lo cual la deformación (ϵ) es:

$$-\epsilon = \frac{\nabla f}{f_{rs}} \quad (9)$$

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

3. METODOLOGÍA

Conforme a los objetivos, se inició el proceso de validación con el software de simulación CST MICROWAVE STUDIO, este analiza las estructuras mediante análisis de elementos finitos (FEA) en el dominio del tiempo y la frecuencia, permitiendo ver una respuesta muy aproximada a la realidad. A través de su implementación logramos reproducir los resultados previamente presentados en (Daliri, 2011), donde los autores plantean una antena microstrip que tiene tres frecuencias de resonancia las cuales son calculadas por medio del parche y la ranura (Ver Figura 2). Acá claramente se puede evidenciar que ellos han empleado un parche circular con una ranura en el centro del mismo, donde la ranura presenta una geometría rectangular con lados de 25 mm y 0.5 mm. Adicionalmente es importante resaltar que la forma de alimentación propuesta en esta referencia es a través de feed point, con un cable coaxial de 50 Ω y el material dieléctrico fue el FR4. Al simular esta antena los autores obtuvieron tres picos de resonancia ubicados exactamente en 3.057 GHz, 3.38 GHz y 3.52 GHz, tal como se puede ver de las pérdidas por retorno ilustradas en la Figura 3.

En esta primera sección de nuestro trabajo, presentaremos la validación de la metodología propuesta para diseñar una antena microstrip y posteriormente el sensor. Por ello, se simula la antena presentada en el artículo anteriormente mencionado a través de la implementación de CST STUDIO 2016. Como se puede ver de la Figura 4 se obtuvieron respuestas cercanas al diseño propuesto en el artículo. Una razón por la que las frecuencias están desviadas es la permitividad relativa del material (FR-4) real respecto al de la base de datos del software, 4.4 y 4.3 respectivamente. Realizando un análisis detallado en la Figura 4, se logró el objetivo de replicar la misma potencia del artículo en referencia. En nuestro caso se obtuvieron las siguientes frecuencias de resonancia para la antena simulada: 3.048 GHz, 3.344 GHz y 3.46 GHz, lo cual significa tener un porcentaje de error ilustrado en la tabla 1:

Valor (Daliri, 2011) [GHz]	Valor simulación CST [GHz]	Diferencia de frecuencia [MHZ]	% de error
3,057	3,048	9	0.29
3,38	3,344	36	1,06
3,52	3,46	60	1.7

Tabla 1. Porcentajes de error entre (Daliri, 2011)y simulación CST.

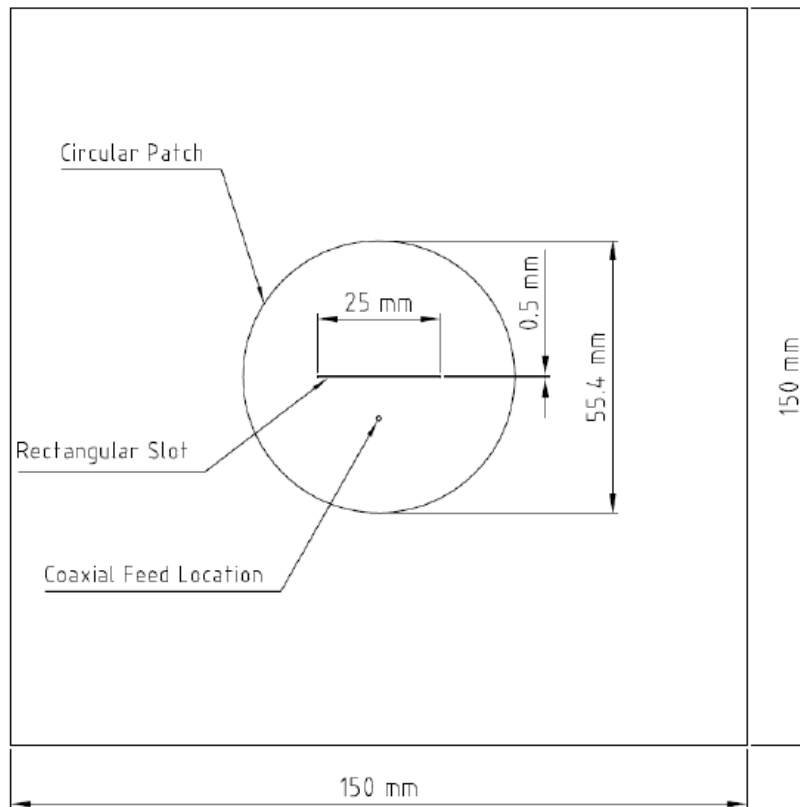


Figura 2. Parámetros de diseño antena microstrip.

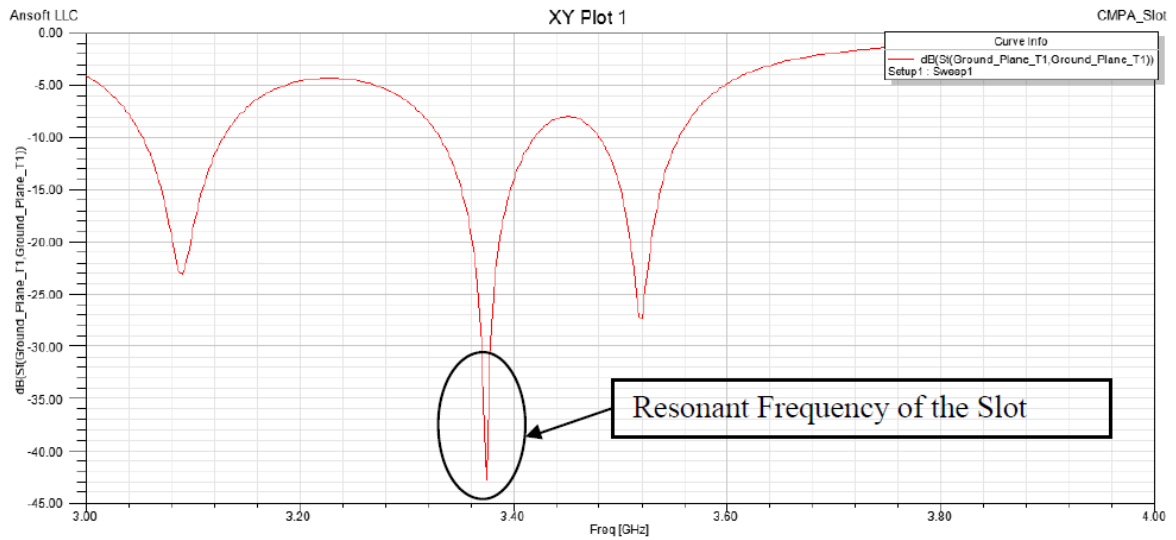


Figura 3. S11 reportado en (Daliri, 2011).

Luego de haber replicado la antena se procedió a implantar la línea de alimentación, con una herramienta proporcionada por el software que ayuda a diseñar y construir correctamente las dimensiones del puerto. Lo anterior se efectuó con el fin de lograr un buen calculo y acople de impedancias, y así lograr máxima transferencia de potencia al parche.

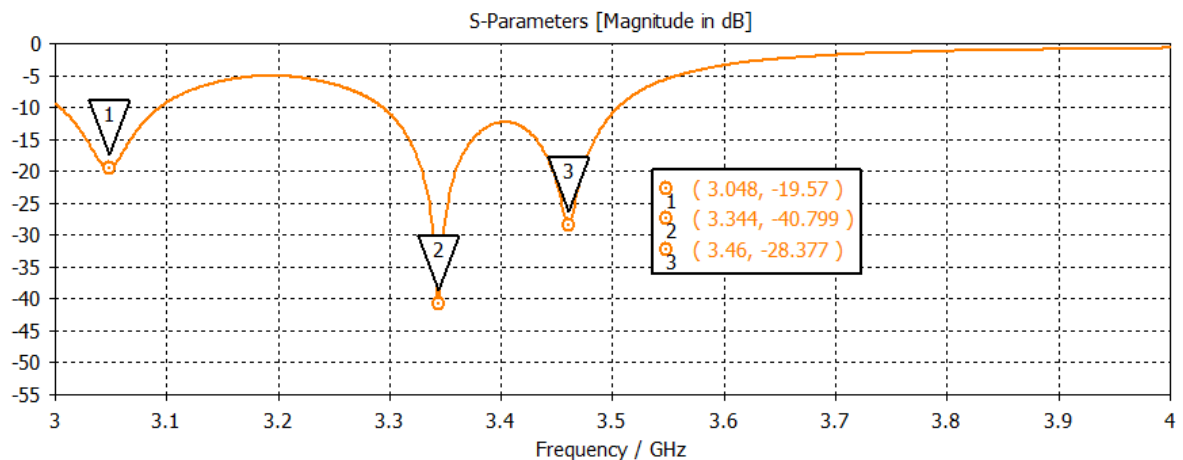


Figura 4. S11 de la simulación en CST MICROWAVE STUDIO.

Luego de validar las frecuencias de resonancia implementadas en el diseño y ratificar el comportamiento del mismo, se realiza el siguiente paso que consiste en deformar el sensor

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

en los tres puntos establecidos por (Daliri, 2011), por facilidad, en este diseño no se implementa la placa de aluminio en la base del sensor, ya que dicha placa no presenta relevancia en el diseño realizado en CST, puesto que para llevar a cabo la simulación no es necesaria una estructura externa que ejerza la deformación sobre la antena, en la Figura 5 se observa la estructura deformada cinco milímetros (5 mm) en el plano XZ de CST en dirección +Z.

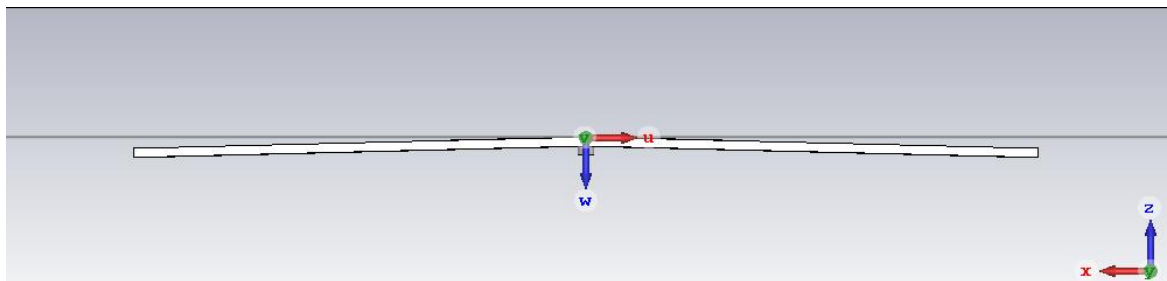


Figura 5. Antena deformada en el plano XZ

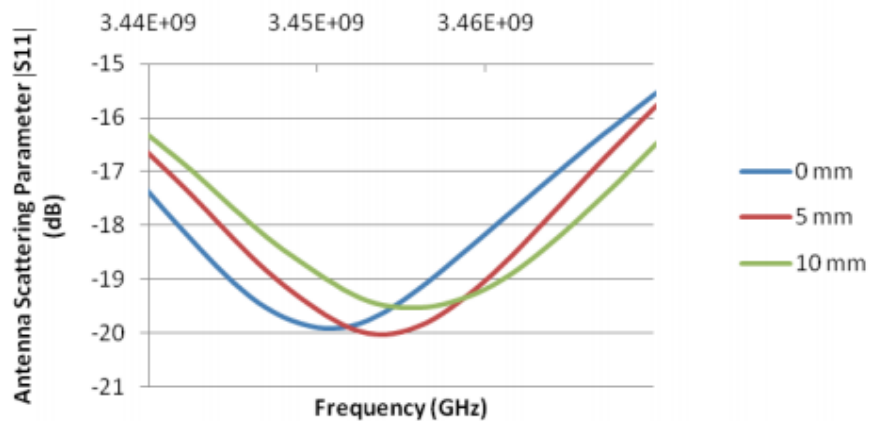


Figura 6. Resultados experimentales deformación (Daliri, 2011).

La Figura 6 muestra lo obtenido experimentalmente por los autores, aplicando una fuerza uniforme en la estructura de aluminio previamente mencionada, esta cumple la función de deformar la antena que se ubica en el centro de dicha placa. Los efectos de la deformación son reflejados en la frecuencia de resonancia la cual responde de forma lineal con un corrimiento de la frecuencia de aproximadamente 3 MHz cuando la antena es sometida a

un cambio de esfuerzo de 5 mm, y cuando es sometida a 10 mm, el corrimiento será de 6 MHz. En contraste con lo anterior, los resultados en CST muestran un corrimiento de frecuencia de aproximadamente 3 MHz a 5 mm de deformación y 8.1 MHz a 10 mm (ver Figura 7), para un porcentaje de error de 0 % y 35 % respectivamente con la simulación; esta diferencia corresponde a que la gráfica de la fuente de información es tomada de la medición experimental del sensor.

Realizando variaciones en el sentido de la deformación de la Figura 4, se logró identificar que es posible determinar la dirección de la misma; debido a que cuando la deformación se lleva a cabo en la dirección +Z, la frecuencia de resonancia decrece, y cuando se efectúa en el sentido contrario, es decir, en dirección -Z la frecuencia de resonancia crece. Como es evidente, al cambiar la deformación, las magnitudes de las pérdidas por retorno también se ven afectadas, esto se puede deber a que al cambiar la deformación se genere un ligero desacople de impedancias entre la línea de transmisión y la antena.

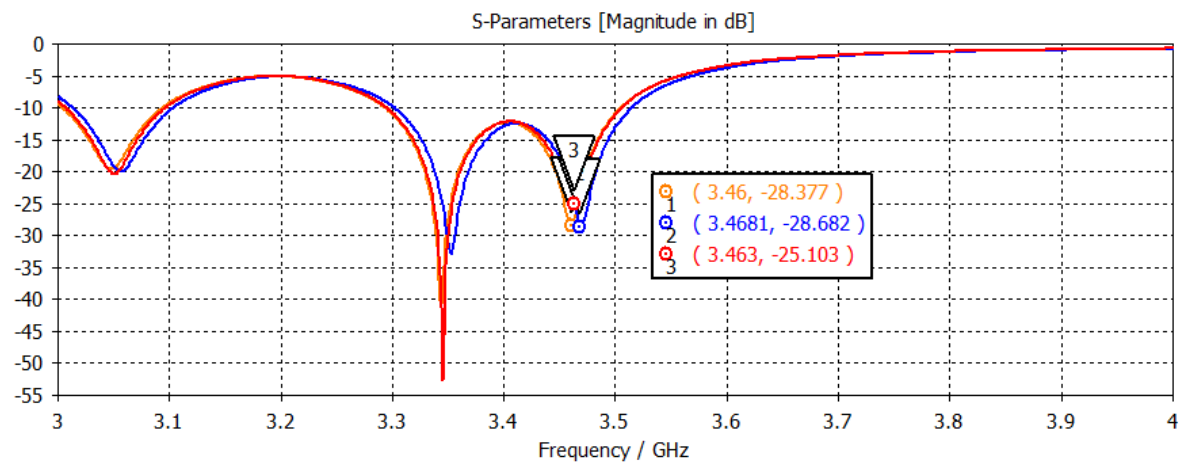


Figura 7. Gráfico de la deformación.

Con el fin de determinar el efecto que tiene la ranura en la antena se procede a realizar un barrido paramétrico de los diferentes valores que puede tomar la ranura. El barrido consiste en poner un parámetro del diseño en función de una variable y colocar valores posibles que pueda tomar. Una ventaja de hacer barridos paramétricos es que la variable puede tomar rangos extensos y a través de la división del rango asignado, se pueden observar de forma detallada los cambios.

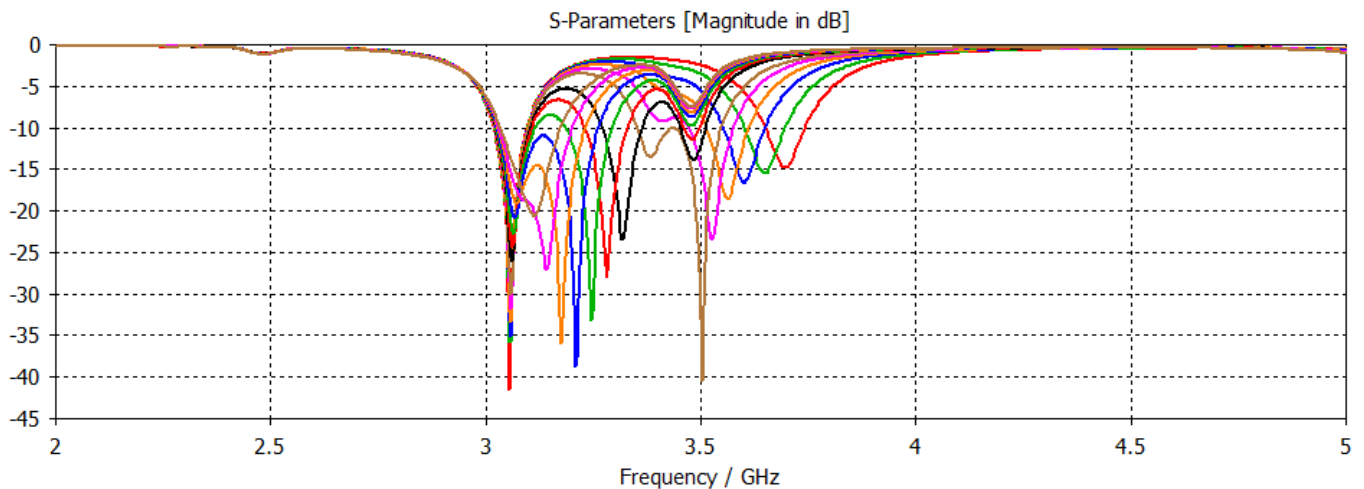


Figura 8. Barrido paramétrico de la ranura.

Color de la línea	Frecuencia 1 [GHz]	Frecuencia 2 [GHz]	Frecuencia 3 [GHz]	Longitud de la ranura [mm]
Rojo	3.056	_____	3.695	22.433
Verde	3.059	_____	3.65	22.863
Azul	3.059	_____	3.602	23.293
Naranja	3.059	_____	3.563	23.723
Rosado	3.059	3.407	3.527	24.153
Café	3.059	3.38	3.503	24.31
Negro	3.062	3.317	3.32	25.443
Rojo	3.060	3.281	3.281	25.873
Verde	3.065	3.245	3.245	26.303

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

Azul	3.068	3.209	3.209	26.733
Naranja	3.071	3.176	3.176	27.163
Rosado	3.088	3.143	3.143	27.593
Café	3.111	_____	3.113	28.023

Tabla 2. Resultados al variar las longitudes de la ranura.

Teniendo en cuenta el resultado anterior se comprueba la función de la ranura y esta no es más que añadir una frecuencia de resonancia a la antena, pues el parche está diseñado para resonar en 1.5 GHz y la ranura en 3.4 GHz. Esta frecuencia es función de tres variables, la primera variable es el largo, la segunda variable el ancho de la ranura y la tercera la altura del parche, pero en este trabajo solo se varió el largo. Para el ejemplo de variar la ranura se analizó que, al tomar valores menores al original, las componentes resonantes disminuyen y a medida que se va aumentando el largo se va añadiendo la frecuencia de 3.4 GHz deseada por los diseñadores del sensor.

También es muy importante observar el cambio de la potencia en las frecuencias resonantes, las cuales varían con la longitud efectiva del parche, lo indicando que las pérdidas por retorno son directamente proporcionales a la longitud de la ranura a excepción de la longitud 24.15 mm en el cual se experimenta un máximo de resonancia. Algo muy interesante a resaltar es que el modo fundamental de la ranura siempre estuvo situado en la misma frecuencia de resonancia, por eso en (Daliri, 2011) utilizan el tercer pico (Ver Figura 6 y Figura 3) pues lo más útil no es fijarse en el modo fundamental sino en otros modos superiores.

Otra variación que se realizó fue cambiar el sustrato por ULTRALAM 3850 (Roggers Corporation, 2016), resaltando respecto al FR-4 en su flexibilidad y permitividad. Teóricamente la frecuencia de resonancia de una antena microstrip es función de las

longitudes del parche y sustrato, pero también esta se relaciona con la permitividad del dieléctrico que hay entre las dos placas de cobre, por lo tanto, en la Figura 8 se nota una diferencia en cuanto a potencia y frecuencia de la ranura.

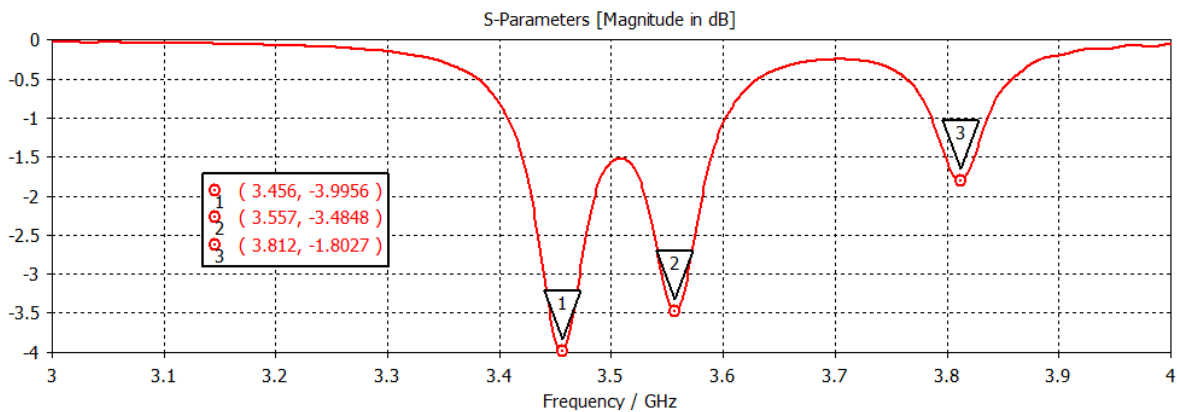


Figura 9. S11 para el diseño original con ULTRALAM 3850.

Comparando este resultado con la frecuencia obtenida con el FR-4 (ver Figura 4) se nota un corrimiento de 106 MHz debido al cambio de propiedades en el material del sustrato, dicho cambio también se ve reflejado en los niveles de potencia; el motivo es que al cambiar las propiedades físicas del material dicha potencia dependerá directamente de la permitividad ya que esta afecta las magnitudes del campo eléctrico y magnético.

Al realizar este cambio de material, se notó un mejoramiento del valor de la frecuencia, aunque el diseño con este material no está resonando con una pérdida significativa ya que no supera los -10 dB en el S11, además, las frecuencias aumentaron, debido a que la frecuencia de resonancia es inversamente proporcional al medio cuadrático de la permitividad relativa del sustrato (ver (1), (2), (3)):

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

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de las simulaciones sin deformar

Partiendo de las modificaciones anteriores, se hicieron unos cambios en el diseño original. En la Figura 10 puede observarse con claridad la estructura propuesta, cuyas dimensiones son resumidas claramente en la Tabla 3. El primero de los cambios introducidos, fue adoptar una longitud de la ranura obtenida en el barrido paramétrico de CST; se toma este valor debido a que en dicha dimensión presenta un pico máximo de resonancia luego de la frecuencia fundamental de la ranura y mejoras en las pérdidas por retorno (ver Figura 8, línea café). También se optó por cambiar por un sustrato más flexible pues se quiere medir la deformación y el FR-4 no permite deformarse porque es demasiado rígido. El ULTRALAM 3850 (Roggers Corporation, 2016) permitirá que la antena pueda ser sometida a cambio de esfuerzo varias veces y en múltiples direcciones volviendo a su estado natural, además se implantaron anillos resonadores extraídos de (Koray Aydin, 2005) con el fin de aumentar la sensibilidad del sensor y disminuir las pérdidas por retorno, Los anillos resonadores anteriormente mencionados están diseñados de manera que sean de un tamaño reducido, en el desarrollo en CST se buscó conservar las características de SRR pero aumentando las dimensiones, multiplicando todo por un factor de escala ($F = 1.5$) con el fin de tener un diseño más fácil de construir. Posteriormente se decidió incrustar los SRR en el parche y su función se traslada a la de los CSRR (ver Figura 10).

En este trabajo se propone implementar un arreglo de anillos complementarios situados en 4 puntos diferentes del sensor (ver Figura 10), con el fin de tratar de evitar el comprometimiento de los anillos en el momento de deformar en alguna de las direcciones (-Z, +Z), y así lograr conservar la respuesta en frecuencia requerida (3,6GHz) y una correcta potencia.

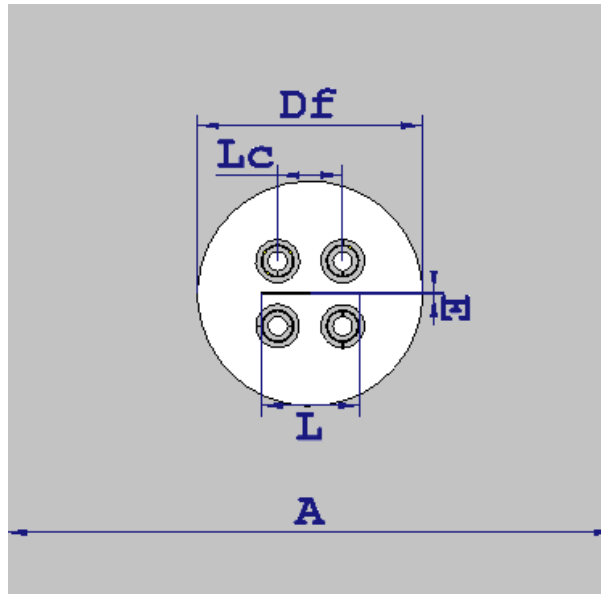


Figura 10. Arreglo de resonadores CSRR.

Parámetro	Dimensión [mm]
A	150
L_c	8
D_f	55.4
E	0.5
L	24.3103

Tabla 3. Parámetros vista XY del sensor.

En este diseño ya se encuentra implementado (Roggers Corporation, 2016) con un grosor del sustrato de $T_h = 0.1 \text{ mm}$ y para el cobre de $T_c = 0.0175 \text{ mm}$; en la Figura 11 se visualiza las dimensiones para cada uno de los parámetros CSRR incrustados en el parche, el valor de cada una se encuentra en la Tabla 4:

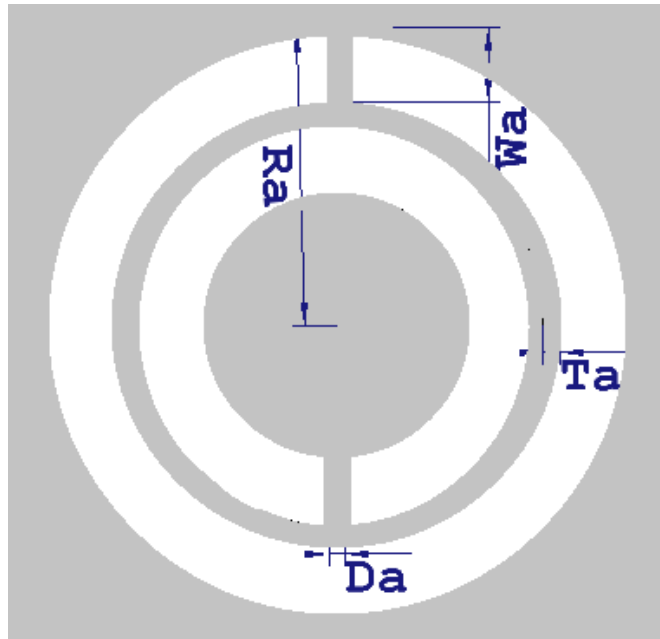


Figura 11. Dimensiones de cada CSRR.

Variable	Valor con factor de escala [mm]
D_a	0.3
W_a	1.35
R_a	5.4
T_a	0.3

Tabla 4. Parámetros de CSRR.

La distancia de ubicación del puerto en nuestro diseño es 8 mm (-Y) y 0 mm (X) desde el centro de la circunferencia del parche, con una impedancia de 50Ω aproximadamente. se continúa adoptando la alimentación del sensor por medio de Feed Point.

Después de implementar el diseño anterior en el software, se simuló la antena esperando obtener dos frecuencias de resonancia, una en 3.5 GHz asociada a la ranura y otra en 3.6

GHz asociada a los resonadores. Sin embargo, al aumentar las dimensiones geométricas de los anillos resonadores, dichas frecuencias presentaron un corrimiento hacia frecuencias más bajas como se puede observar en la Figura 12.

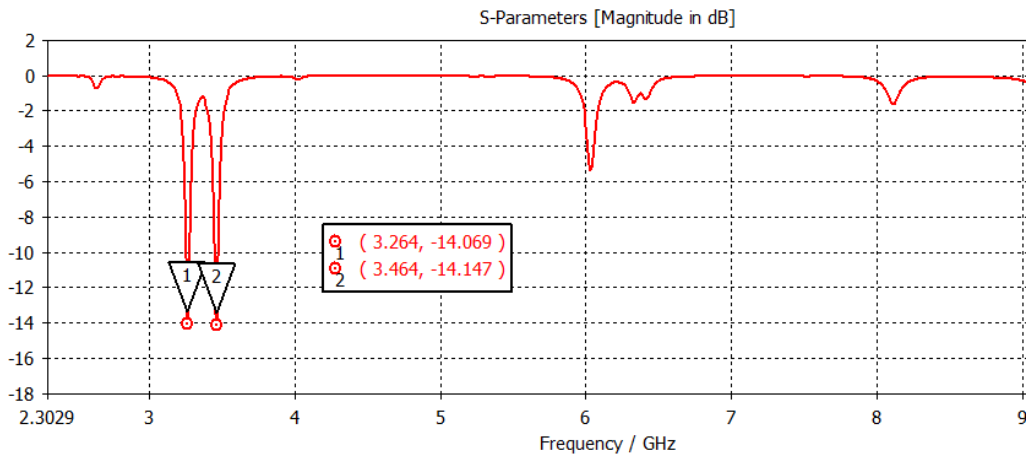


Figura 12. S11 del Diseño final.

Comparando este resultado con lo obtenido con la variación del sustrato (ver Figura 9), se logró reducir las pérdidas por retorno a valores inferiores a -10 dB, lo cual es importante pensando en que a futuro dicho sensor pueda ser interrogado de forma inalámbrica. Donde las frecuencias asociadas a la ranura y al arreglo de CSRR dieron aproximadamente en la región esperada con un error de 3.7 % y 6.74 % respectivamente.

4.2.1 Resultados simulados en deformación dirección -Z.

Al de tener una referencia de medición, se procedió a deformar el sensor en CST mediante un barrido paramétrico especificando una variable en el eje de deformación (-Z). En vista de que nuestro sensor presenta 3 frecuencias de resonancia en la región analizada, se hace necesario analizar los corrimientos de los tres picos de resonancia de forma independiente, ya que cada uno de estos corresponde a diferentes modos de propagación, por ende, presentaran sensibilidades a deformaciones diferentes. También, se analizará la

sensibilidad de cada pico de forma independiente y al final se realizará una comparación entre estas.

En los siguientes incisos se observará como responde nuestro sensor cuando es sometido a deformaciones, para luego ser graficada su respuesta y demostrar de esta forma que el cambio de la frecuencia y la deformación están relacionados y que su comportamiento es totalmente lineal (ver ecuación 9).

4.2.2 Modo fundamental.

Este modo cumple el papel de estabilizar el sensor en una región del espectro, lo cual no presenta ventajas por su poca sensibilidad ante las deformaciones, sin embargo, sigue siendo casi igual de eficiente que (Daliri, 2011) pues la sensibilidad de este sensor es $-3455.4 \text{ ppm}/\mu\epsilon$, siendo la relación de sensibilidad 1.073 veces menos que él. En la siguiente figura se observa la respuesta del sensor a las deformaciones en la dirección indicada por la flecha.

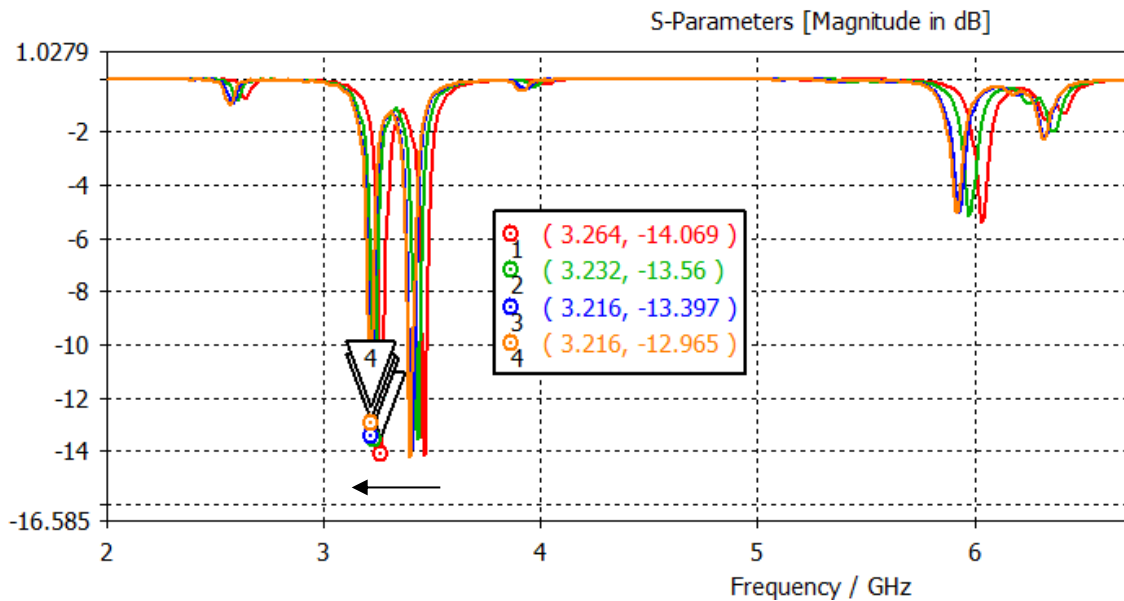


Figura 13. Detalle del primer pico de resonancia.

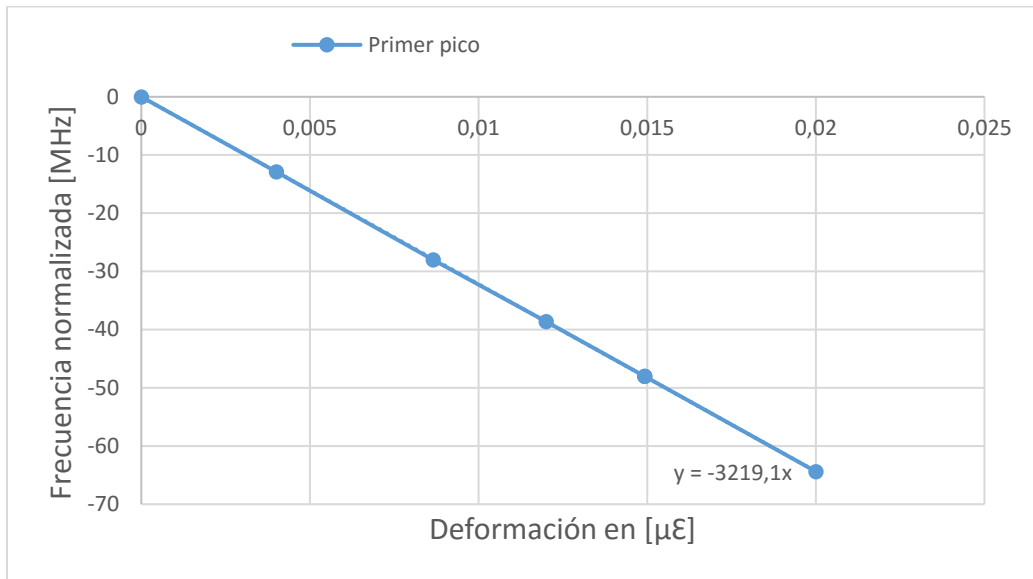


Figura 16. Gráfico de sensibilidad del modo fundamental.

4.2.3 Segunda frecuencia de resonancia.

En esta frecuencia son bajas sus pérdidas por retorno, además este resulta siendo más eficiente que el modo fundamental por su alta sensibilidad la cual corresponde a -3401.7 ppm/ $\mu\epsilon$, concluyendo que este pico se acerca más a el diseño de (Daliri, 2011) con una relación de 1.015 menor que él.

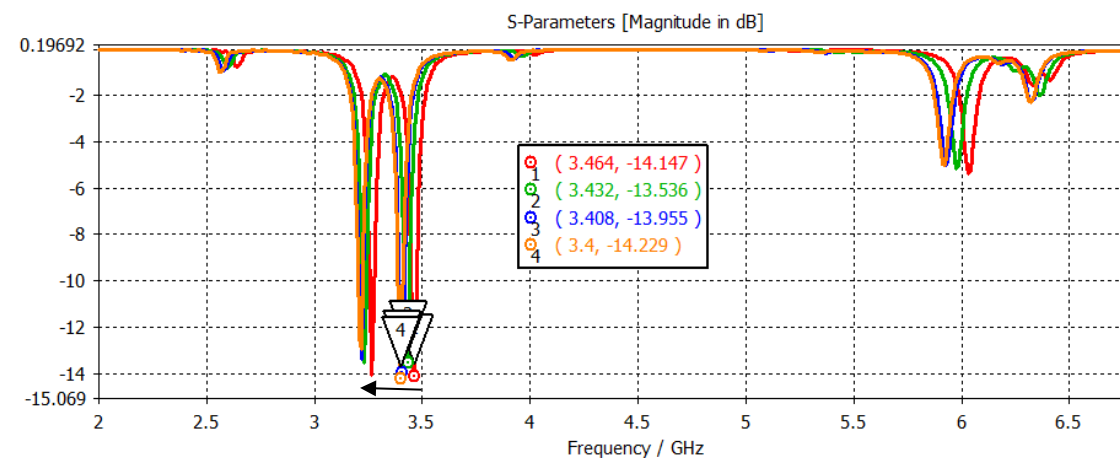


Figura 17. Detalle de la segunda componente resonante.

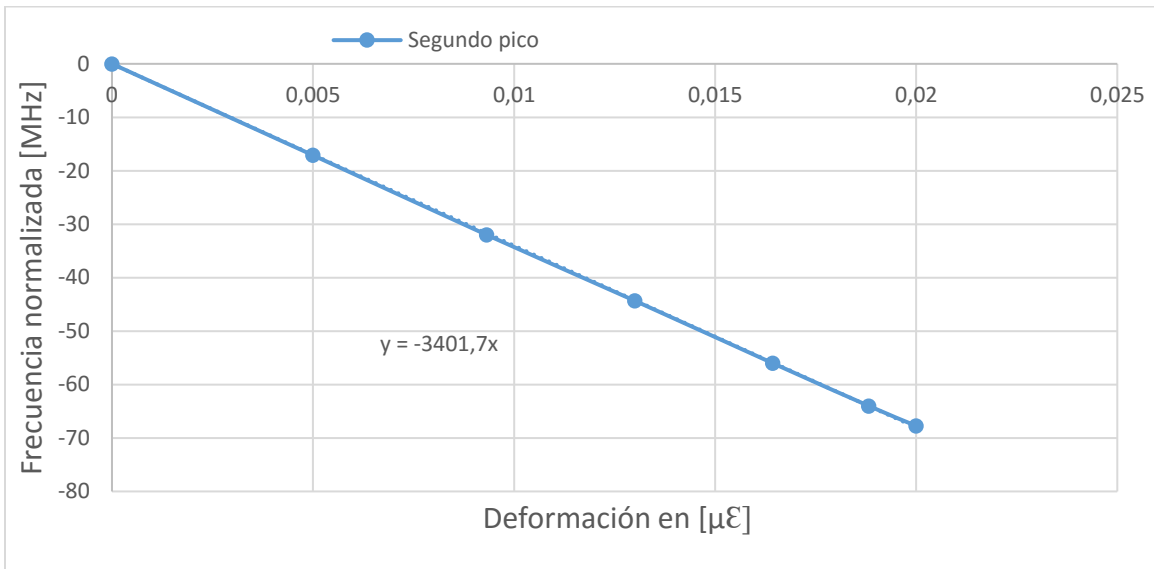


Figura 18. Resultados de sensibilidad segundo pico de resonancia.

4.2.4 Tercer pico de resonancia

Por último, se analizó el comportamiento del tercer pico de resonancia, el cual, a pesar de no tener valores deseados en las pérdidas por retorno, presenta aproximadamente el doble de sensibilidad que todas las componentes mostradas y con una relación respecto al original de 1.72 veces. Adicionalmente, el analizador de redes con el que contamos en la institución (R&S FSH8) tiene la resolución suficiente para lograr medir estos niveles de pérdidas por retorno. Donde el único inconveniente podría presentarse si a futuro se deseara implementarlo de forma inalámbrica, ya que el alcance de la señal sería bajo.

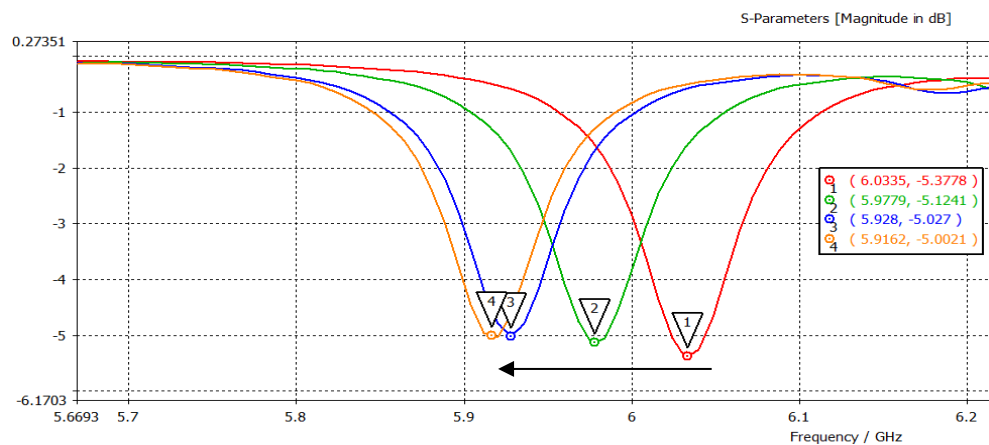


Figura 19. Detalle la tercera frecuencia de resonancia.

Tabla 7. Datos Figura 19 y Figura 20.

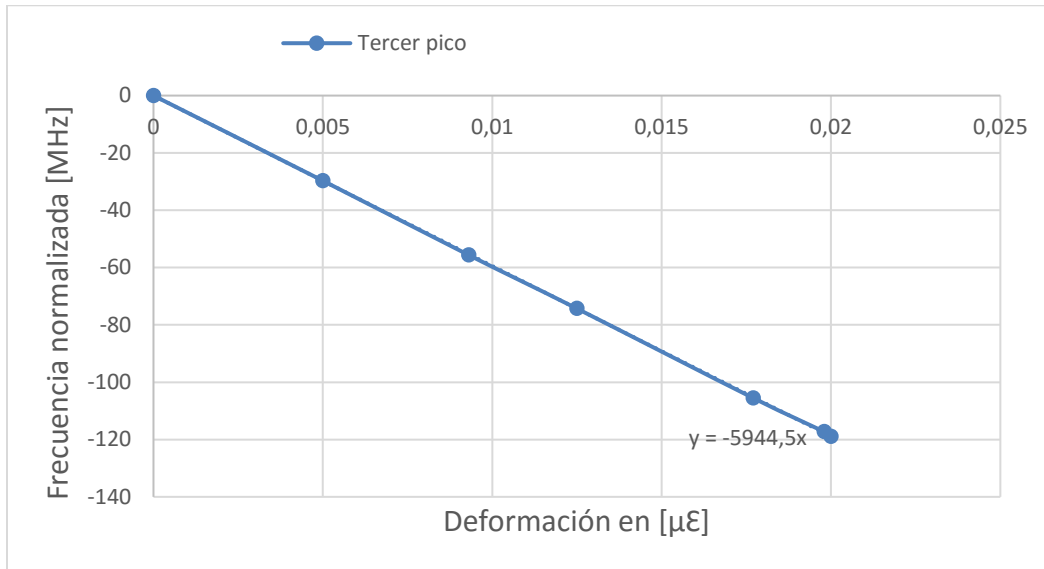


Figura 20. Resultados de sensibilidad tercer pico de resonancia.

4.3 Comparación de sensibilidades.

En la siguiente Figura se muestran las tres graficas de sensibilidad obtenidas de cada pico de resonancia y su respectiva ecuación; concluyendo que entre mayor sea el orden modal del modo de resonancia, habrá mayores cambios frente agentes externos como en este caso se dio con la deformación. Concluyendo que el tercer pico de resonancia presenta mayor sensibilidad, la cual es 1.84 veces mayor que la sensibilidad del primer pico y 1.74 veces la sensibilidad del segundo pico de resonancia de la antena propuesta en este trabajo.

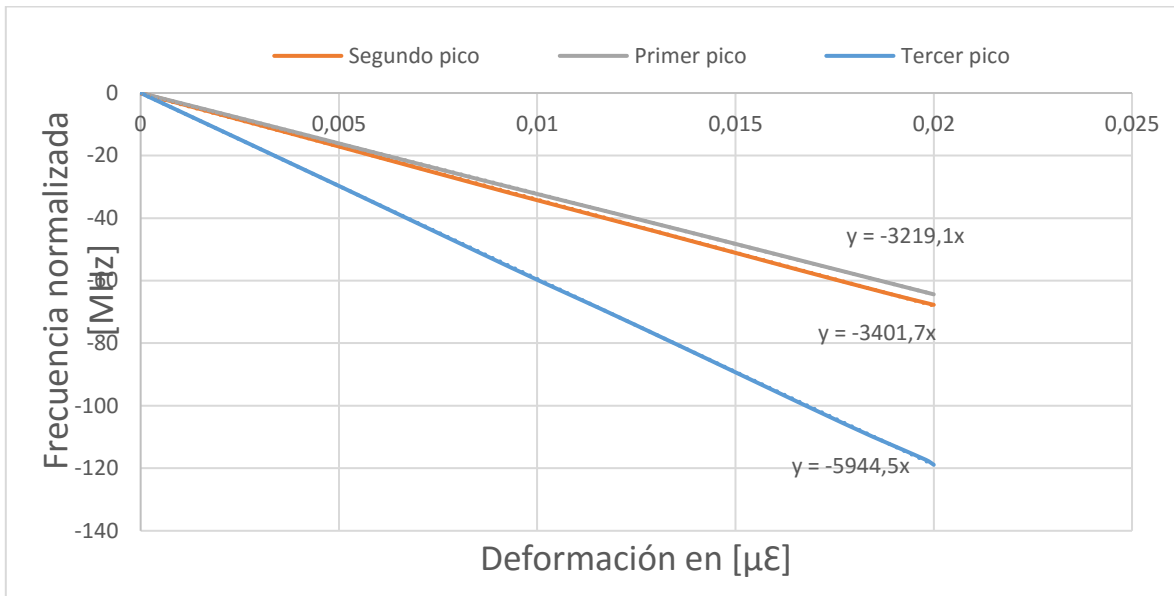


Figura 21. Resultado comparación de sensibilidades de los picos de resonancia de nuestro sensor.

4.4 Fabricación del sensor.

Para la fabricación de nuestra antena, no fue posible emplear la máquina de control numérico (CNC), debido a que el sustrato empleado en nuestro diseño es muy delgado, lo cual hace imposible la fabricación. Por esta razón se utilizó la técnica serigrafía, la cual consiste en la estampación mediante estarcido a través de un tejido de seda.

El primer paso fue exportar una extensión de archivo (.dxf) para ser editado en un software de diseño llamado SOLID EDGE, en el cual se sombreó la parte que iba a ser cobre y después se exporta en un archivo PDF (tamaño real) para imprimir el diseño en papel Albanene. Posteriormente fue llevada la hoja impresa a un fabricante de planchas para circuitos.

Después de tener todos los materiales, el siguiente paso fue colocar la plancha del circuito sobre la lámina de (Roggers Corporation, 2016), luego se esparce la pintura de PVC de manera uniforme sobre el molde con una espátula que ayuda a una mejor impresión y penetración de la seda hacia el ULTRALAM (Ver figura 22).

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



Figura 22. Impresión del parche con técnica de serigrafía.

Lo siguiente fue pintar el plano de tierra con la misma pintura y luego se sumergió el diseño en Cloruro Férrico ($FeCl_3$) durante 30 minutos para que este ácido reaccionara con el cobre y a su vez eliminar la parte sin recubrir con la pintura PVC; posteriormente fue quitada la pintura con una toalla humedecida en XLOL para que fuera más efectiva la limpieza, por último, se procedió a taladrar el agujero del puerto de un milímetro (1 mm) de diámetro mediante un MOTOR TOOL para luego ser insertado y soldado en el sensor a ocho milímetros (8 mm) desde el centro.

4.5 Resultados experimentales del sensor.

Después de haber diseñado, simulado y construido el sensor, se procedió a su debida caracterización del parámetro S11 y mirar en la carta de Smith para ver su impedancia en el analizador de redes vectorial FSH8.

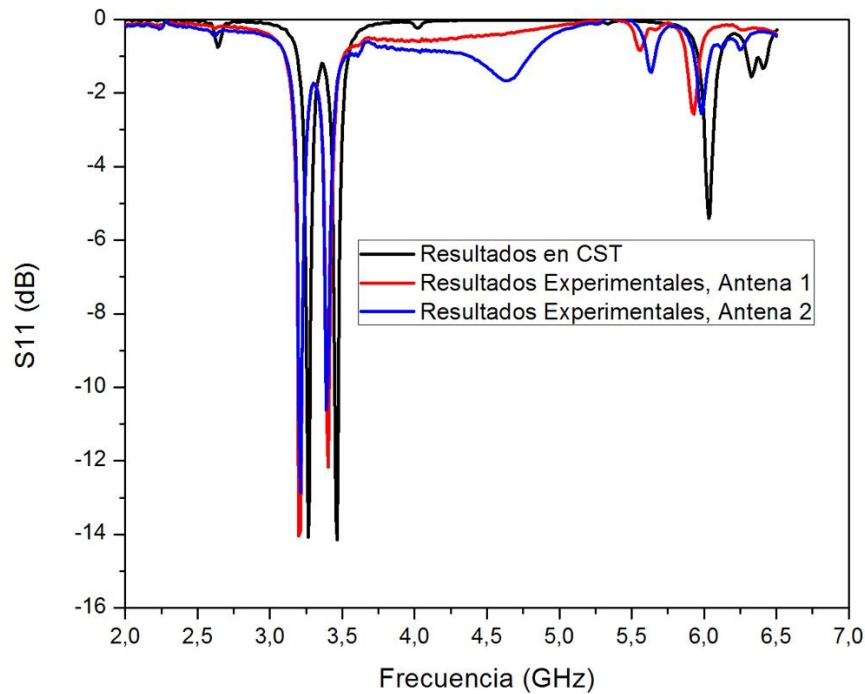


Figura 23. Comparación resultados simulados con resultados experimentales.

Frecuencia	Resultado simulación CST. (GHz)	Resultado Experimental, Antena 1. (GHz)	% error	Resultado Experimental, Antena 2. (GHz)	% error
1	3,265	3,198	2,052	3,215	1,531
2	3,468	3,401	1,931	3,39	2,249
3	6,033	5,923	1,823	5,978	0,911

Tabla 8. Datos Figura 22.

La técnica de serigrafía que es un poco rudimentaria por su poca precisión y alto margen de error comparado con técnicas más avanzadas tecnológicamente, sin embargo, es posible apreciar que los diseños tuvieron muy bajo margen de error (ver Figura 23), de la figura anterior se identifica que la técnica presenta una correcta relación entre ambas antenas,

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

con el fin de analizar esto, se fabricó un par de sensores y de este modo lograr identificar que la técnica fue implementada adecuadamente.

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

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Se logró establecer un procedimiento claro de cómo realizar la simulación de un sensor RF cuando este es sometido a deformaciones. Lo cual se pudo validar a través de la validación de los resultados presentados y publicados previamente en un artículo. Esto sin duda abre la posibilidad que en un futuro se siga trabajando en sensores de deformación, en los cuales se aplique la metodología propuesta por nosotros en esta tesis.
- En este trabajo se diseñó, analizo y fabrico un sensor de deformación altamente sensible, capaz de captar pequeños cambios en deformaciones, resaltando que se logró mejorar la sensibilidad del sensor reportado por Daliri en (Daliri, 2011) y (Ali Daliri, 2010). Esto se logró gracias al arreglo de resonadores grabados en el parche superior, en conjunto con los efectos de la ranura central.
- Los CSRR tienen tres parámetros D_a y T_a que afectan directamente la frecuencia de resonancia, pues la medida de ellos es directamente proporcional a la frecuencia y a las pérdidas por retorno. También W_a tiene su influencia positiva en el comportamiento eléctrico de la antena, ya que a través de las variaciones aplicadas a este parámetro se disminuye la frecuencia y simultáneamente se incrementa la eficiencia de la antena ya que las pérdidas por retorno disminuyen.
- En el trabajo futuro se plantea bajar el pico de resonancia ubicado en 9,5 GHz aproximadamente (no mostrado en el documento) y también aumentar la resonancia del pico mostrado en 6 GHz, ya que ambas resonancias presentan mayor sensibilidad que sus picos anteriores y mayor sensibilidad que (Daliri, 2011). En la parte experimental se sugiere terminar de caracterizar el sensor y comprobar sus respuestas en

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

deformación, también sería posible que este sensor pueda ser monitoreado inalámbricamente y así proponer una red de sensores de este tipo.

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

REFERENCIAS

- Muhsin Ali and Bilal A. Khawaja. (Mayo de 2013). Dual Band Microstrip Patch Antenna Array for Next. *IEEE Xplore*, 1-5.
- Daliri, A. G. (2011). Rerunated Circular Microstrip Patch Antenna Application in Strain Based Structural Health Monitoring. *humsconference*, 1-12.
- Rogers Corporation. (2016). *www.rogerscorp.com*. Obtenido de <https://www.rogerscorp.com/documents/3085/acs/ULTRALAM-3850HT-Laminates-Data-Sheet.pdf>
- Koray Aydin, I. B. (2005). Investigation of magnetic resonances for different. *New Journal of Physics*, 1-14.
- Balanis, C. A. (2005). *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN*. Hoboken, New Jersey: JOHN WILEY & SONS.
- program, U. s. (June de 1973). *Estados Unidos de America Patente nº B73-10179*.
- NASA. (June de 1973). *Microstrip Antennas*. Springfield, Virginia, Estados Unidos de América.
- OZBAY, K. A. (2006). Identifying magnetic response of split-ring resonators at microwave frequencies. *DE GRUYTER*, 1-14.
- Ali Daliri, A. G. (2010). Circular Microstrip Patch Antenna Strain Sensor for Wireless Structural Health Monitoring. *IEEE XPLORE*, 1-6.

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

FIRMA ESTUDIANTES Anderson Valencia
David Jaramillo

Erick Reyes Vera
 FIRMA ASESOR _____

 FECHA ENTREGA: 13/10/2016

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: _____