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

SENSOR DE DEFORMACIÓN A PARTIR DE ANTENA FLEXIBLE TIPO PATCH

Gabriel Jaime Palacio Tirado

Ingeniería Mecatrónica

Director del trabajo de grado

Alberto Mauricio Arias Correa

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

11/02/2019

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

RESUMEN

Se obtienen mediciones de deformación a partir de una antena tipo Patch. La antena en mención es sometida a diferentes radios de curvatura tanto en sentido cóncavo como convexo, con el fin de recopilar datos de la frecuencia de resonancia en cada una de las curvaturas. El registro de los datos se logra con la ayuda de un analizador de espectros en el rango de 500 KHz a los 5.5 GHz.

En el proceso de diseño de las curvaturas para deformar la antena, se utilizó el programa de diseño CAD Autodesk Inventor Profesional 2016, los cuales fueron impresos en 3D para obtener una estructura de soporte de la antena con los radios de curvatura deseados.

Como resultado se obtienen datos estadísticos de las muestras recopiladas y se realiza un análisis de las gráficas de la frecuencia vs radio de curvatura, observando una variación de la frecuencia de resonancia a medida que la antena es sometida a diferentes radios de curvatura. Lo anterior da muestra de un comportamiento típico de un sensor de deformación.

Palabras clave: Antena, sensor de deformación, estructura circular, frecuencia de resonancia, curvatura.

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

RECONOCIMIENTOS

Agradezco al Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, específicamente al personal del laboratorio del Bloque M- 9811 (Óptica, Fotónica y Visión Artificial) por brindarme el tiempo y el espacio para el desarrollo de mi proyecto de grado.

A los profesores Mauricio Arias y Erick Reyes por compartir sus valiosos conocimientos que me permitieron ir desarrollando paso a paso este proyecto.

Por último, a mis seres queridos por su presencia y apoyo en las horas que le dedique a mi proyecto en vez de compartir con ellos.

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

ACRÓNIMOS

3D Objeto físico o diseño formado en tres dimensiones

PLA Ácido Poliláctico (Polímero)

S11 Parámetro que hace referencia a un coeficiente o pérdidas por retorno.

LCP Polímero cristalino líquido

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

TABLA DE CONTENIDO

SENSOR DE DEFORMACIÓN A PARTIR DE ANTENA FLEXIBLE TIPO PATCH	1
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Objetivo:	6
1.2. Objetivos específicos:	6
1.3. Organización del trabajo.....	6
2. MARCO TEÓRICO	8
3. METODOLOGÍA.....	13
3.1. Dimensiones de antena Patch:	13
3.2. Diseño y fabricación estructuras curvas para sensor de deformación:.....	15
.....	16
3.3. Material empleado en la fabricación de estructuras curvas.	16
3.4. Mediciones Antena sin estructura curva.	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1. Adquisición de Datos sensor de deformación.	20
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	27
5.1. Recomendaciones.....	27
5.2. Trabajo Futuro	27
REFERENCIAS	29

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

1. INTRODUCCIÓN

En el área de las telecomunicaciones la variación de la curvatura de una antena permite registrar modificaciones en la frecuencia de resonancia, las cuales pueden ser aprovechadas como sensor de deformación y de esta forma ser utilizadas por ramas de la ingeniería como la civil y la ingeniería mecánica en el monitoreo del comportamiento de una estructura o elemento de un equipo para prevenir fallas derivadas de una deformación.

De lo anterior, radica la importancia de experimentar con antenas flexibles de bajo costo, fácil fabricación y reducido espacio, que permitan el sensado de pequeñas curvaturas con una buena sensibilidad y confiabilidad que aporten al perfeccionamiento de esta técnica de sensado.

1.1. Objetivo:

- Diseñar un sensor de deformación utilizando una antena tipo Patch y una estructura circular con diferentes radios de curvatura.

1.2. Objetivos específicos:

- Implementar una metodología para medición de deformación a partir de antena tipo Patch flexible y piezas circulares elaboradas en PLA.
- Analizar estadísticamente los resultados obtenidos a partir de las mediciones de deformación obtenidas con diferentes radios de curvatura.

1.3. Organización del trabajo

El presente trabajo se divide en cuatro etapas. En la primera etapa se muestra el marco teórico, en donde se menciona parte del trabajo de grado anterior donde se estudia el diseño de la antena tipo Patch que será utilizada en la caracterización del sensor de deformación a utilizar en este proyecto.

En la segunda etapa, se detalla la metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos del trabajo, en cuanto al diseño y fabricación de las estructuras físicas que permitirán curvar la antena en forma cóncava como convexa. Posteriormente se describe

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

el proceso de medición y registro de la información de las frecuencias de resonancia de la antena al ser curvadas en diferentes radios de curvatura.

En la tercera etapa, se muestran los resultados a través de tablas con datos estadísticos y gráficas que permiten analizar el comportamiento de la antena como sensor de deformación.

En la cuarta y última etapa se concluye el alcance del trabajo experimental realizado, abriendo una ventana hacia trabajos futuros donde es posible añadir mejoras a la metodología desarrollada.

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

2. MARCO TEÓRICO

El presente trabajo parte de una antena tipo Patch previamente fabricada (Orozco, 2016) donde se describe el proceso de diseño y análisis de la antena utilizada en el presente proyecto.

Para el diseño de este tipo de antenas se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

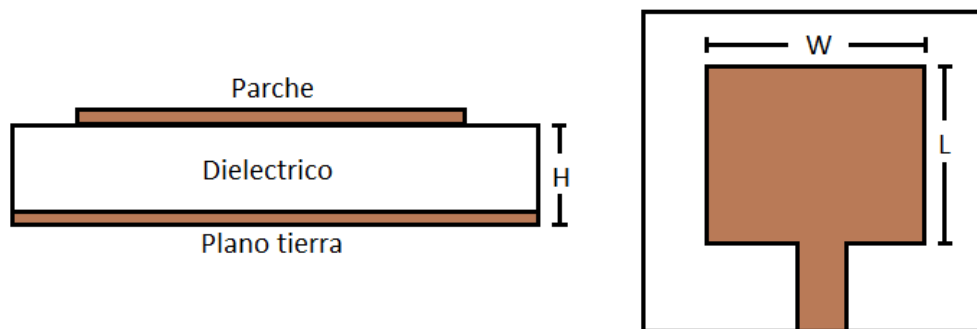


Figura 1. Ejemplo de estructura de una antena tipo Patch

- **Constante dieléctrica efectiva:** Es la constante dieléctrica de un material dieléctrico uniforme, esto genera unas líneas de campo eléctrico con características eléctricas constantes. Para hallar esta constante se utiliza la siguiente formula:

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{1/2}$$

- **Longitud efectiva:** Debido a que la longitud del parche L es menos a la longitud eléctrica de la antena debido a las líneas de campo eléctrico; por ello la longitud efectiva es la longitud física del parche L más un ΔL a ambos lados extremos del parche, para ello se tiene la siguiente formula:

$$L_{eff} = L + \Delta L$$

Para poder hallar ΔL se tiene la siguiente relación con la constante dieléctrica efectiva:

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

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

- **Frecuencia de resonancia:** La frecuencia de resonancia de la antena microstrip rectangular está asociada con su longitud efectiva como se muestra en la siguiente formula:

$$f_r = \frac{C}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{ref}}}$$

Teniendo en cuenta que la velocidad de propagación $C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$

- **Proceso de diseño:** Lo primordial en este proceso de diseño es saber las longitudes del parche W y L_{eff} , para hallar estos dos valores se hará lo siguiente:
Primero se hallará W con la siguiente formula:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Después de esto se determina cual es la constante dieléctrica con la formula mostrada anteriormente; teniendo estos valores se puede calcular de cuanto es el ΔL para así saber la longitud eléctrica de la antena.

Para determinar la longitud efectiva de la antena se utiliza la siguiente formula:

$$L_{ef} = \frac{C}{2f_r\sqrt{\epsilon_{ref}}}$$

Al tener los valores anteriormente mencionados podemos calcular cual va a ser la longitud física del parche de nuestra antena (L) utilizando la siguiente ecuación:

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

$$L_{eff} = L + \Delta L$$

Al tener todos estos parámetros se comienza con la elaboración de la antena. (Ramírez Artunduaga, 2007).

En (López, 2018), los autores proponen un sensor de deformación basado en una antena de microcinta. Correlacionan las medidas de curvatura con el cambio en el coeficiente de reflexión de la antena. La antena se diseñó con un parche rectangular, sobre un material plástico y de alta constante dieléctrica, las frecuencias de operación se encuentran alrededor de 2.6 y 6.1 GHz. El objetivo de este trabajo es analizar los efectos en la frecuencia de resonancia debidos a las deformaciones (curvaturas) aplicadas a la antena y las características estáticas del sensor como la sensibilidad y el rango de operación.

Se diseñó una antena de microcinta con un parche radiante rectangular para una frecuencia de resonancia fundamental de 2.6 GHz. Se utilizó una constante dieléctrica relativa $\epsilon_r = 10.2$ una altura del sustrato dieléctrico de 1.27 mm. En Figura 2 se muestra el diseño esquemático del sensor de deformación propuesto.

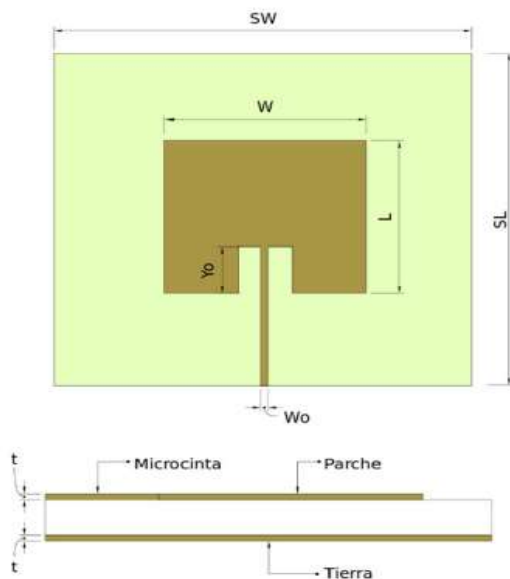


Figura 2. Diseño esquemático del sensor de deformación Propuesto. (López, 2018)

Los autores Construyeron cuatro herramientas de deformación con radios de curvatura diferentes: 40, 35, 30 y 25 mm; elaborados con un material aislante. Las herramientas de deformación tienen un diseño cilíndrico y cuatro brazos que permiten sujetar la antena cuando esta es deformada. (Ver figura 3)

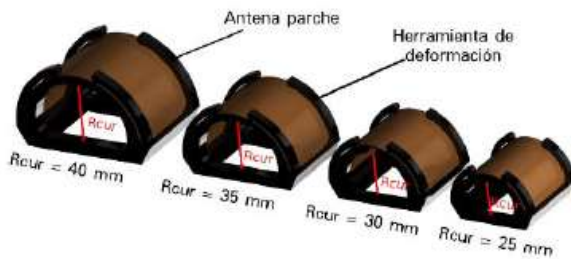


Figura 3. Herramientas de deformación de antenas con radios de Curvatura de 40, 35, 30 y 25 mm. (López, 2018)

Concluyen con resultados de las pruebas experimentales. Encontraron que la frecuencia de resonancia tiende a valores mayores a medida que el radio de curvatura disminuye. Como se observa en la siguiente figura.

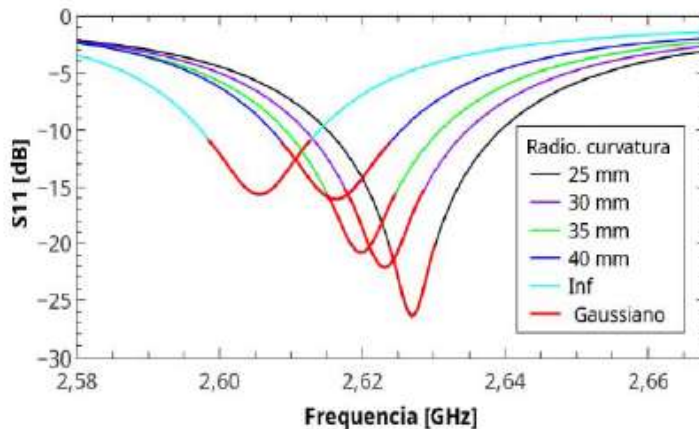


Figura 4. Medidas experimentales del desplazamiento de la frecuencia de resonancia debido a deformaciones aplicadas a la antena. Radios de curvatura aplicados: desde infinito hasta 25 mm. (López, 2018)

En (E. Reyes Vera, 2016) proponen y demuestran el comportamiento de un sensor de curvatura basado en una antena ranurada Bow-Tie (antena similar a la utilizada en el presente proyecto). Al doblar la superficie plana del sensor propuesto, a través de varios radios de curvatura en direcciones opuestas, se producen cambios medibles debido a la estructura anisotrópica del sensor. En una dirección de flexión, el radio de curvatura induce un cambio en la frecuencia de resonancia con una sensibilidad de $-72.9 \text{ MHz / m}^{-1}$ en el rango de 0 a 33 m^{-1} . En la dirección de flexión opuesta, el ancho de banda de la antena aumenta con una sensibilidad de $-27.949 \text{ MHz / m}^{-1}$ en el rango de 0 a -100 m^{-1} . Por lo tanto, el sensor de curvatura propuesto permite identificar la dirección de movimiento en una estructura, por lo que se puede utilizar como sensor de tensión en diferentes aplicaciones.

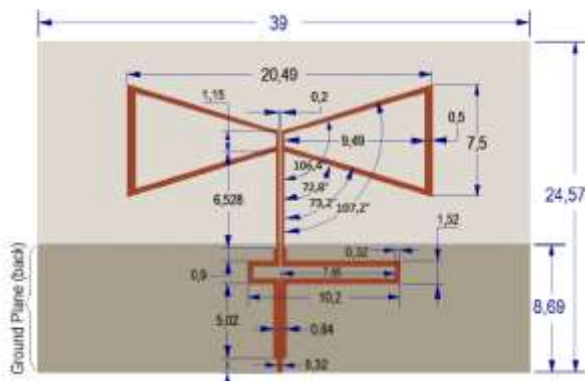


Figura 5. Antena Bow-Tie propuesta. Medidas en mm. (E. Reyes Vera, 2016)

El sensor propuesto tiene un tamaño compacto y una sensibilidad de $-72.9 \text{ MHz / m}^{-1}$ en el rango de 0 a 33 m^{-1} . Los resultados experimentales se resumen en la Figura 6.

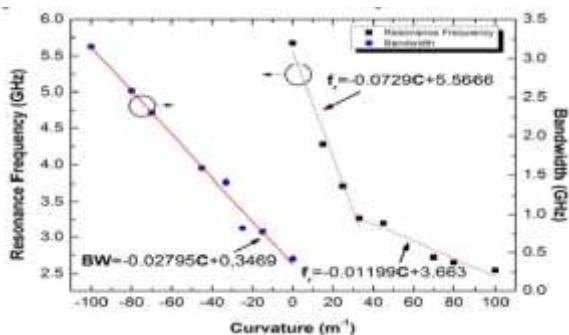


Figura 6. Resultados experimentales para pruebas de curvatura en ambas direcciones. (E. Reyes Vera, 2016)

3. METODOLOGÍA

El proceso de diseño de una estructura curva para el sensor de deformación, inicia con la utilización de una antena previamente fabricada (Orozco, 2016). Se utiliza una antena tipo Patch (Bow_Tie) hecha en material ULTRALAM 3850 (propiedades en tabla 1). Este tipo de material es flexible y posee un dieléctrico con polímero cristalino líquido (LCP) (Rogers Corporation, 2015) . Las dimensiones de la antena son de 35 mm ancho x 25 mm alto (ver figura 1). Permite ser curvadas en una geometría circular tanto en forma cóncava como convexa (ver figura 7,8 y 9).



Figura 7. Antena tipo Patch utilizada



Figura 8. Curvatura Cóncava



Figura 9. Curvatura Convexa

3.1. Dimensiones de antena Patch:

La antena utilizada presenta las siguientes dimensiones en milímetros, las cotas fueron obtenidas con la ayuda del programa CAD Autodesk Inventor Professional 2016.

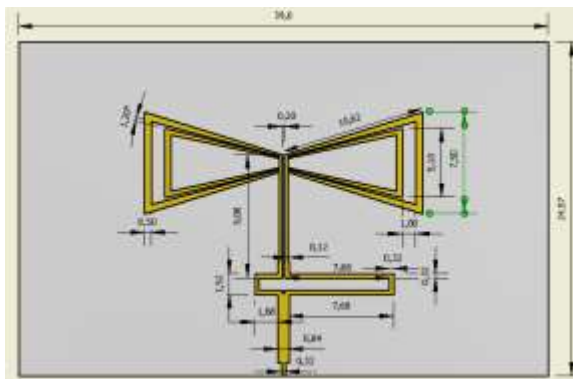


Figura 10. Dimensiones de geometría parte superior de la antena. Medidas en milímetros.

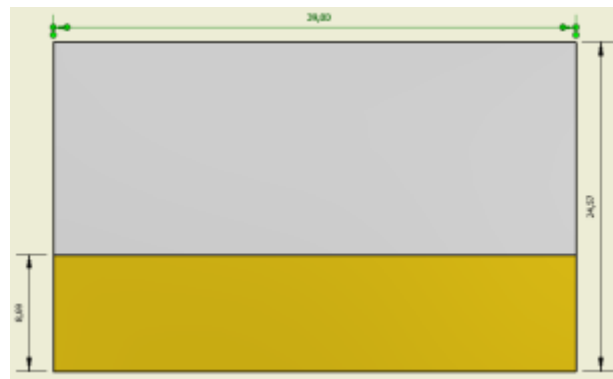


Figura 11. Parte posterior de la antena. Medidas en milímetros

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

Tabla 1. Propiedades materiales ULTRALAM 3850

PROPERTY		TYPICAL VALUE ULTRALAM [®] 3850	UNITS	TEST CONDITIONS
Mechanical Properties				
Dimensional Sta- bility	MD	-0.06	%	IPC 2.2.4 method B
	CMD	-0.03		
Peel Strength		0.95 (8.52)	N/mm (lbs/in)	IPC 2.4.8 (1/2 oz. ED foil)
Initiation Tear Strength, min		1.4 (3.1)	Kg (lbs)	IPC 2.4.16
Tensile Strength		200 (29)	MPa (Kpsi)	IPC 2.4.16
Tensile Modulus		2255 (327)	MPa (Kpsi)	IPC 2.4.19
Density		1.4	gm/cm ³ , Typical	
Thermal Properties				
Coefficient of Thermal Expansion, CTE (30°C to 150°C)	X	17	ppm/°C	IPC 2.4.41.3
	Y	17		
	Z	150		
Solder Float, Method B (288°C)		PASS		
Melting Temperature		315	°C (Typical)	DSC
Relative Thermal Index - RTI	mechanical	190	°C	
	electrical	240		
Thermal Conductivity		0.2	W/m/°K	ASTM C518
Thermal Coefficient of ϵ_r , -50°C to 150°C		(+)24	ppm/°C	IPC 2.5.5.5, 8 GHz
Electrical Properties				
Dielectric Constant, 10 GHz, 23°C (Process)		2.9		IPC 2.5.5.5.1
Dielectric Constant, 10 GHz, 23°C (Design)		3.14		Differential Phase Length Method
Dissipation Factor, 10 GHz, 23°C		0.0025		IPC 2.5.5.5.1
Surface Resistivity		1x10 ¹⁰	MOhm	IPC 2.5.17
Volume Resistivity		1x10 ¹²	MOhm cm	IPC 2.5.17
Dielectric Breakdown Strength		1378 (3500)	KV/cm (V/mil)	ASTM-D-149
Environmental Properties				
Chemical Resistance		98.7	%	IPC 2.3.4.2
Water Absorption (23°C, 24 hrs)		0.04	%	IPC 2.6.2
Coefficient of Hygroscopic Expansion CHE (60°C)		4	ppm/%RH	60°C
Flammability		VTM-0		UL-94
STANDARD THICKNESS		STANDARD SIZE		STANDARD COPPER CLADDING
0.001" (25µm) 0.002" (50µm) 0.004" (100µm)		18" X 12" (457mm X 305mm) panel 18" X 24" (457mm X 610mm) panel Custom sizes available upon request		½ oz. (18µm) Copper Type: Very low profile ED copper per IPC 4562 3.4.5 (<Rz 5.1 mm). Other claddings available.

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

3.2. Diseño y fabricación estructuras curvas para sensor de deformación:

Las estructuras curvas se diseñaron en el programa CAD Inventor Profesional 2016 y posteriormente fabricadas en impresora 3D (equipo marca MAKERBOT, suministrado por el ITM Institución Universitaria. Laboratorio Óptica, Fotónica y Visión Artificial).



Figura 8. Ejemplo de diseño de curvatura realizado en programa CAD Autodesk Inventor profesional 2016 para curvatura. Radio de 17.25 mm

El diseño consta de 14 estructuras curvas con radios de curvatura de: radio infinito, 7.5, 8.75, 10, 11.25, 12.5, 13.75, 15, 16.25, 17.5, 25, 33, 50, 100 [mm].

Con el fin de conservar una simetría en las diferentes curvaturas diseñadas, se aplicó la fórmula de longitud de arco determinada por: $L = Q \times r$ donde L representa longitud de arco, Q ángulo en radianes y r radio de curvatura; en donde L se tomó con un valor constante de 61.08 mm, el cual es suficiente para cubrir la antena en todas sus dimensiones en el material tipo PLA. Por medio de esta fórmula se halla el ángulo de apertura de la estructura a medida que se modifica el radio de curvatura a analizar.

Las 14 estructuras curvas fabricadas permite introducir la antena en una flanja intermedia logrando que la antena adquiriera diferentes curvaturas tanto cóncava como convexa determinadas por radios de: 7.5, 8.75, 10, 11.25, 12.5, 13.75, 15, 16.25, 17.5, 25, 33, 50, 100 [mm] y radio infinito (estructura plana). (Ver figuras 13, 14, 15, 16).

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



Figura 9. Estructura para medición Plana



Figura 14. Estructuras curvas utilizadas. Radios de curvatura desde 7.5 mm a 100 mm.



Figura 15. Acople de antena con estructura curva en forma cóncava.



Figura 16. Acople de antena sobre estructura en posición Convexa.

3.3. Material empleado en la fabricación de estructuras curvas.

Las estructuras para curvar la antena como sensor de deformación fueron fabricadas en material PLA (Hatchbox, 2016) color blanco de 1.75 mm de diámetro. (Ver figura 17 y Propiedades en tabla 2).



Figura 17. Material PLA utilizado en la fabricación de estructuras curvas. (Hatchbox, 2016)

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

Tabla 2. Propiedades físico químicas PLA. (Hatchbox, 2016)

Propiedades físicas y químicas. Material tipo PLA marca HATCHBOX	
Diámetro filamento	1.75 mm
Densidad	1.27 g/cm ³
Forma	Carrete
Color	Blanco
Olor	Sin Olor
Temperatura de fusión	155°C
Propiedades oxidantes	Inflamable/ no es auto-inflamable
Límites de explosión	No aplica
Solubilidad en agua	Insoluble

Posterior al diseño y fabricación de las estructuras de soporte del sensor de deformación, se tomó registro de las frecuencias de resonancia de la antena sin acoplar estructura en PLA.

3.4. Mediciones Antena sin estructura curva.

Con el fin de observar comparativo del cambio de frecuencia de resonancia cuando la antena es curvada, se inició realizando 4 mediciones sin colocarle ninguna estructura de curvatura con el propósito de analizar el comportamiento de la antena al aire.

(Ver figura 18).

En este trabajo se tomaron como objeto de estudio los dos primeros picos que se encuentran en el rango de los 2 GHz a los 5.5 GHz.

Los datos fueron obtenidos con ayuda del analizador de espectros marca FSH 8 Rohde & Schwarz. (Equipo suministrado por el ITM Institución Universitaria. Laboratorio Óptica, Fotónica y Visión Artificial).

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

*Tabla 3. Frecuencias de resonancia para 4 mediciones
Sin estructura curva para pico #1.*

Frecuencias de resonancia pico 1 (GHz)	Decibeles (dB)
3,22199	-19,37528
3,35847	-14,41729
3,36539	-17,11892
3,30934	-20,02594

*Tabla 2. Frecuencias de resonancia de cuatro mediciones
Sin estructura curva para el pico #2.*

Frecuencia de resonancia pico 2 (GHz)	Decibeles (dB)
5,07222	-8,47194
4,61957	-6,03164
4,61944	-6,03265
4,59135	-5,47231

Para el pico uno, se tiene un promedio de frecuencia de resonancia de 3.31379 GHz.

En el pico número 2, se registró un promedio de 4,72564 GHz.

Con base a estudio anterior realizado a este tipo de diseño de antena (Orozco, 2016). Se compara las gráficas de la simulación con la obtenida experimentalmente de forma física en el presente trabajo (ver figuras 18 y 19)

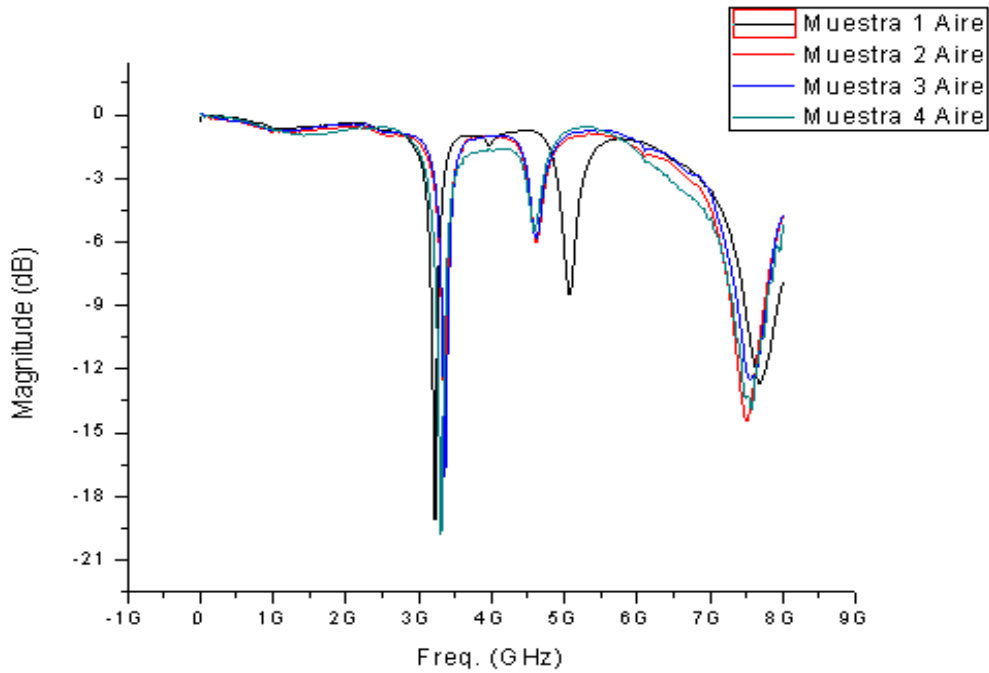


Figura 10. Gráficas de frecuencias de resonancia para mediciones sin estructura curva. 4 mediciones al Aire parámetro S11.

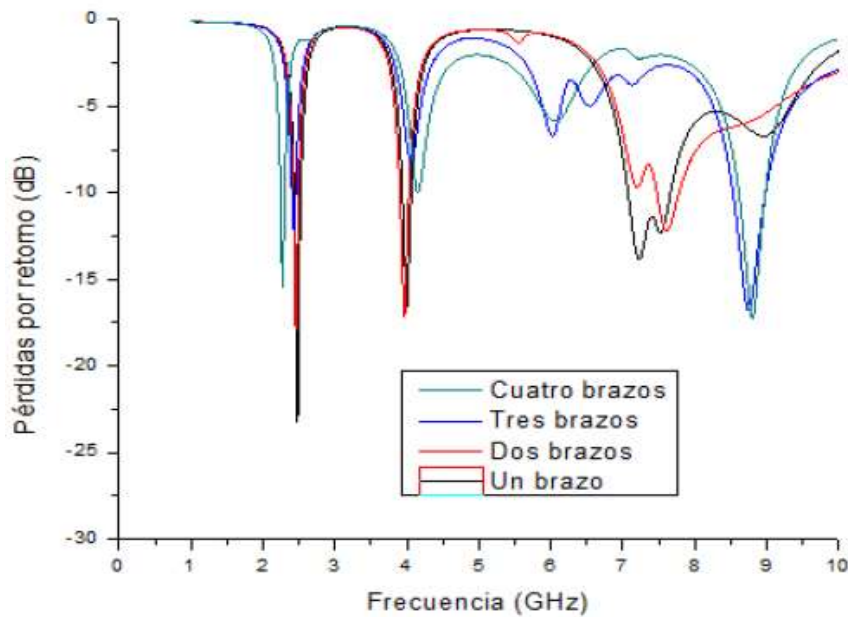


Figura 19. Simulación de trabajo anterior. La línea roja corresponde a la gráfica objeto de estudio en este trabajo. (Orozco, 2016)

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

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Adquisición de Datos sensor de deformación.

Para el registro de las diferentes respuestas en frecuencias de resonancia de las curvaturas de la antena, se utiliza el analizador de espectros marca FSH 8 Rohde & Schwarz.

(Ver figura 20 y 21). Se obtienen 8 datos para cada curvatura en forma cóncava y 8 datos en la posición convexa, para un total de 224 mediciones, las cuales permiten tener una base de datos suficiente, para obtener la Media y desviación estándar que definen los datos de los picos que proporcionan un cambio gradual en la frecuencia de resonancia entre el rango de 500 KHz a los 5.5 GHz.



Figura 20. Equipo analizador de espectros utilizado

```

Measurement Setup
Name : Setup (1)
Date : 07/12/2010
Time : 08:03
Instrument : FSH8 - HS105/020
Firmware Version : V2.80
Instrument Mode : Network Analyzer
Meas Mode : Vector
Bridge Mode : S11
Format : Magnitude
Calibration State : Cal
Aperture Steps : ---
DLink : ---
Downlink : ---
Channel : ---
Center Frequency : 0 GHz
Frequency Offset : 0 Hz
Span : 5 GHz
Ref Level : 2.0 dB
Ref Offset : 0.0 dB
Range : 80 dB
RF Attenuation : Manual
RF Attenuator : 0 dB
Pre-amplifier : Off
RF Input : 50 Ohm
TQ Attenuation : 10.0 dB
TQ Power : -10.0 dBm
TQ Offset : 0.0 dB
RBW : 40 kHz
SMT : 625 ms
Trigger Mode : Free Run
Trigger Level : ---
Trigger Delay : ---
Trace Mode : Clear / Write
Trace Math : Off
Trace Detector : Sample
Limit Line 1 : ---
Limit Line 2 : ---

```

Figura 21. Parámetros de calibración equipo FSH8



Figura 22. Medición de sensor con curvatura

Unos ejemplos de los picos más significativos se observan en la figura 23 y 24. Para cada curvatura de las 224 mediciones se extrae de los dos picos más significativos la frecuencia en donde el valor de magnitud [dB] es menor. Estos valores de frecuencia son registrados en una tabla (ver Tablas 5, 6,7 y 8).

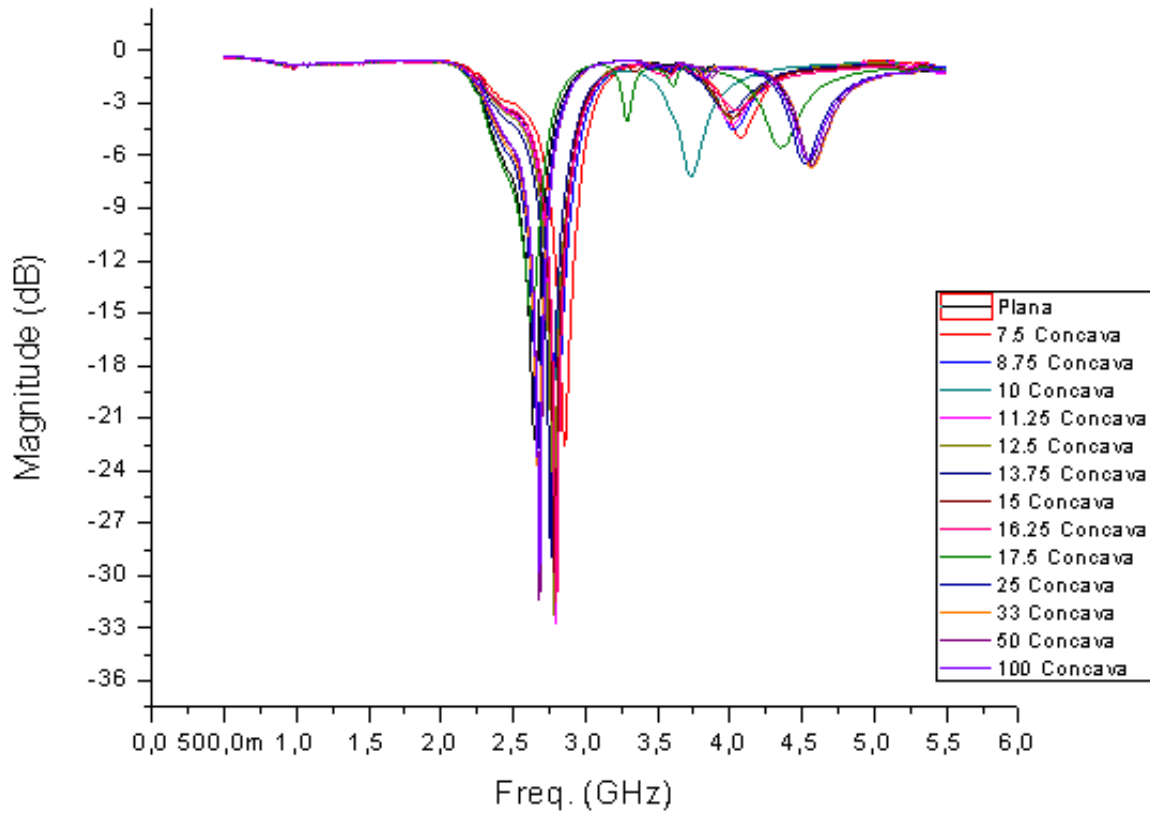


Figura 23. Gráfica del comportamiento del sensor cuando es sometido a cada una de las 14 curvaturas cóncavas. Gráfico de muestra #2 de las 8 tomadas en la práctica. Parámetro S11

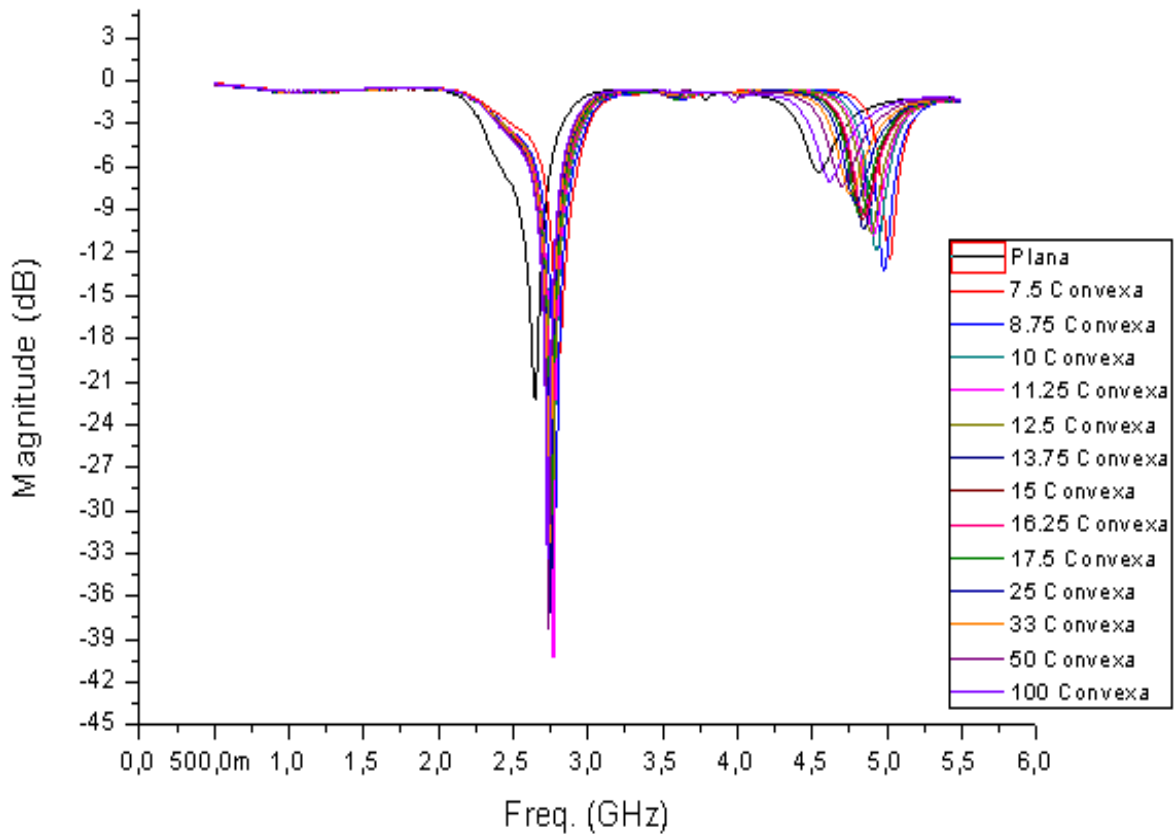


Figura 24. Gráfica del comportamiento del sensor cuando es sometido a cada una de las 14 curvaturas convexas. Gráfico de muestra #2 de las 8 tomadas en la práctica. Parámetro S11.

Las siguientes tablas proporcionan información importante de las 224 mediciones realizadas. Permiten observar el cambio de la frecuencia a medida que varía el radio de curvatura de la antena, tanto en forma cóncava como convexa. Con base en estos datos, se halla el valor de la media y la desviación estándar, los cuales ayudan a verificar que tanto se alejan unos datos de otros y así poder ajustar valores hasta obtener una desviación estándar mínima.

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

Tabla 5. Datos de primer pico de frecuencia para curvatura cóncava.

PICO 1 Concava Radio mm	Muestra 1 GHz	Muestra 2 GHz	Muestra 3 GHz	Muestra 4 GHz	Muestra 5 GHz	Muestra 6 GHz	Muestra 7 GHz	Muestra 8 GHz	Media GHz	Desviación Estandar GHz
Infinito (plano)	2,67943		2,66666	2,6746	2,6746	2,6746		2,6746	2,674081667	0,00411729
7,5	2,85721	2,85714	2,84127	2,86508	2,85714	2,85714	2,84921	2,86507	2,8561575	0,0078645
8,75			2,81746	2,8254	2,84921	2,84921	2,84127	2,82539	2,834656667	0,013672
10	2,79371			2,81746	2,81746	2,82539	2,81746	2,80952	2,8135	0,01091697
11,25			2,81746	2,81746	2,8254	2,82539	2,8254	2,81746	2,821428333	0,00434709
12,5	2,79371		2,78571	2,81746	2,80952	2,80952	2,81746	2,81746	2,807262857	0,01271705
13,75	2,78102			2,80159	2,80159	2,79365	2,80159	2,78571	2,794191667	0,00905462
15		2,79365		2,80158	2,80159	2,80159	2,80159	2,79365	2,798941667	0,00409891
16,25	2,78102	2,79365	2,78571			2,80952		2,80159	2,794298	0,01156894
17,5	2,78102		2,80159					2,80158	2,79473	0,01187321
25	2,65403	2,66666	2,66666	2,66666	2,65873	2,6746	2,65873		2,663724286	0,00692822
33	2,67943	2,68254	2,6746	2,6746	2,6746	2,68254	2,6746		2,677558571	0,00383284
50	2,69213	2,68254	2,68254	2,68254	2,68254	2,68253	2,6746	2,6746	2,6817525	0,00551743
100	2,69213	2,68254		2,69841	2,68254	2,6904	2,6746	2,68254	2,686165714	0,00792283

Tabla 6. Datos de primer pico de frecuencia para curvatura convexa.

PICO 1 Convexa Radio mm	Muestra 1 GHz	Muestra 2 GHz	Muestra 3 GHz	Muestra 4 GHz	Muestra 5 GHz	Muestra 6 GHz	Muestra 7 GHz	Muestra 8 GHz	Media GHz	Desviación Estandar GHz
Infinito (plano)	2,67943		2,66666	2,6746	2,6746	2,6746		2,6746	2,67408167	0,00411729
7,5				2,88095	2,88888	2,83333	2,88888	2,87302	2,873012	0,02313687
8,75	2,79371	2,78571	2,79365	2,80159	2,80159	2,79365	2,80159	2,79365	2,7956425	0,00561144
10	2,76832	2,76984	2,76984	2,7777	2,78571	2,78571	2,78571	2,78571	2,7785675	0,00812548
11,25	2,76832	2,76984	2,76984	2,78571	2,78571	2,78571	2,78571	2,78571	2,77956875	0,0084887
12,5	2,76832	2,7619	2,76984	2,7777	2,77777	2,78571	2,78571	2,77777	2,77559	0,00838466
13,75	2,76832	2,75397	2,76984	2,76984	2,76984	2,76984	2,7619	2,7619	2,76568125	0,00587845
15	2,75562	2,75586	2,7619	2,76984	2,76984	2,76984	2,7619	2,76984	2,76433	0,00633421
16,25	2,76832	2,75396	2,76984	2,76984	2,7777	2,77777	2,76984	2,76984	2,76963875	0,00735649
17,5	2,75562	2,75397	2,7619	2,76984	2,76984	2,76984	2,76984	2,76984	2,76508625	0,00693154
25	2,74292	2,74603	2,7619	2,7619	2,76984	2,7619	2,7619	2,7619	2,75853625	0,00913879
33	2,73022	2,74603	2,75397	2,76984	2,7619	2,76984	2,7619	2,7619	2,75695	0,01335467
50		2,73809	2,7619	2,76984			2,75397	2,75397	2,755554	0,01177254
100		2,73381	2,74603	2,73016	2,74603	2,75396	2,75397	2,73381	2,74253857	0,00992565

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

Tabla 7. Datos de segundo pico de frecuencia para curvatura cóncava.

PICO 2 Concava Radio mm	Muestra 1 GHz	Muestra 2 GHz	Muestra 3 GHz	Muestra 4 GHz	Muestra 5 GHz	Muestra 6 GHz	Muestra 7 GHz	Muestra 8 GHz	Media GHz	Desviación Estandar GHz
Infinito (plano)	4,53337	4,53968	4,46032						4,511123333	0,04410995
7,5		4,07143	4,03175	--	--	--	--	--	4,05159	0,028058
8,75		4,03175	4,02381	--	--	--	--	--	4,02778	0,00561443
10	3,97465		4	--	--	--	--	--	3,987325	0,01792516
11,25	3,98735	4,01587	4,04762	--	--	--	--	--	4,016946667	0,03014942
12,5	4,00005	4,02381	4	--	--	--	--	--	4,007953333	0,0137323
13,75	3,97465	4		--	--	--	--	--	3,987325	0,01792516
15	3,98735	4,03175		--	--	--	--	--	4,00955	0,03139554
16,25	4,00005	4,03175						--	4,0159	0,02241528
17,5	4,00005	4,35714						--	4,178595	0,25250076
25			3,63492	3,70635	3,71428	3,80158	3,70635	--	3,712696	0,05922948
33	4,46988	4,57143	4,49206					--	4,511123333	0,05339156
50	4,54607	4,57143	4,56349						4,56033	0,01297195
100	4,67306	4,54762							4,61034	0,08869947

Tabla 8. Datos de segundo pico de frecuencia para curvatura convexa.

PICO 2 Convexa Radio mm	Muestra 1 GHz	Muestra 2 GHz	Muestra 3 GHz	Muestra 4 GHz	Muestra 5 GHz	Muestra 6 GHz	Muestra 7 GHz	Muestra 8 GHz	Media GHz	Desviación Estandar GHz
Infinito (plano)				3,99206	3,87302		3,88888	3,86507	3,9047575	0,05903724
7,5				4,34921	4,35714	4,41269	4,34127	4,36507	4,365076	0,02805588
8,75				4,34127	4,34921	4,35714	4,34921	4,36508	4,352382	0,00904817
10				4,28571	4,31746	4,30159	4,30952	4,31746	4,306348	0,01328138
11,25				4,23015	4,31746	4,30952	4,29365	4,30159	4,290474	0,03486987
12,5				4,27777	4,30159	4,28571	4,29365	4,29365	4,290474	0,00905299
13,75			4,24603			4,24603		4,246	4,24602	1,7321E-05
15				4,24603	4,25396	4,23809	4,23809	4,24603	4,24444	0,0066395
16,25				4,24603	4,24603	4,24603	4,25397	4,25396	4,249204	0,00434618
17,5				4,20635	4,21429	4,22222	4,2381	4,22222	4,220636	0,01177254
25			4,23016	4,20635	4,21428	4,20634	4,1746	4,1746	4,201055	0,02226075
33			4,18254	4,19841	4,19841	4,19841	4,19841	4,13492	4,18518333	0,02542899
50			4,11905	4,1746		--	4,11904		4,13756333	0,03207469
100					4,15079	4,13492	4,13492		4,14021	0,00916255

Para cada radio de curvatura, junto con la media y la desviación estándar son graficados para observar el comportamiento de la antena al ser curvada.

Las gráficas de las figuras 25 y 26, muestran los resultados del comportamiento del sensor en el primer pico de frecuencia de resonancia (promedio de 2,76 GHz) para los diferentes radios de curvatura en forma cóncava y convexa respectivamente.

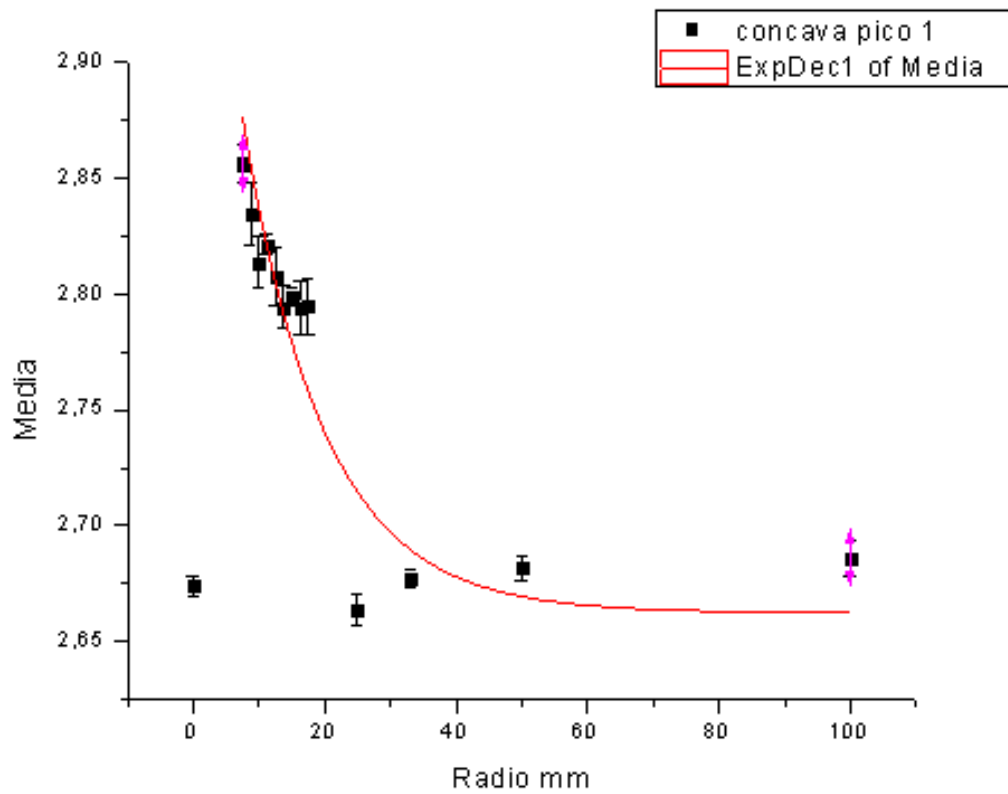


Figura 25. Gráfica Radio, Media, Desviación estándar. Pico 1 cóncava

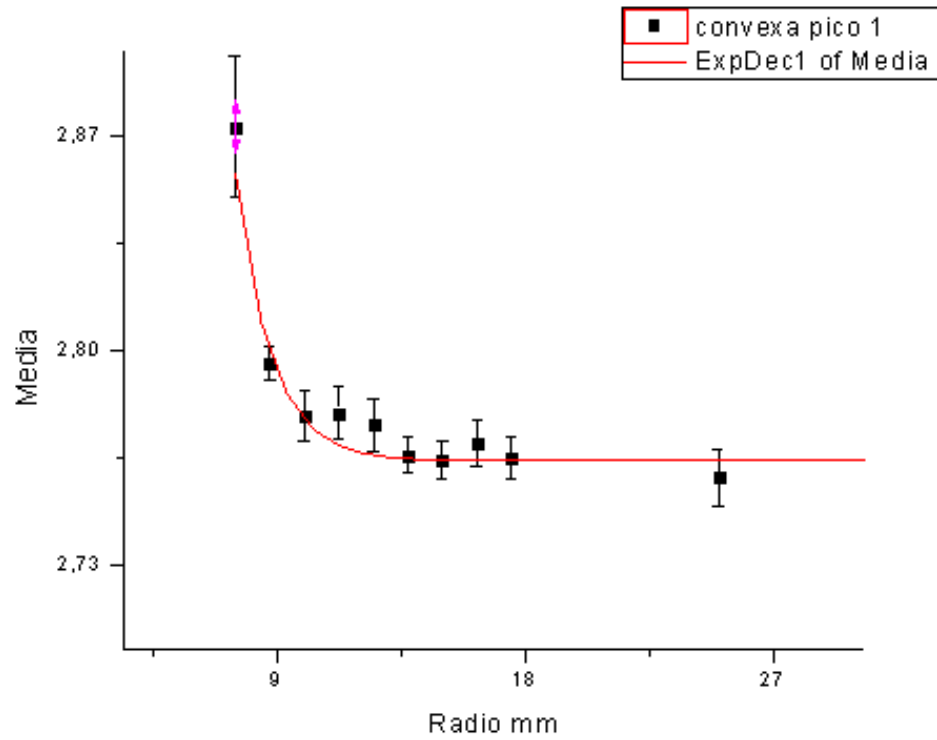


Figura 26. Gráfica Radio, Media, Desviación estándar. Pico 1 Convexa

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

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

El presente trabajo evidencia el comportamiento de un sensor de deformación implementado con una antena Patch tipo Bow_Tie. Luego del análisis de datos obtenidos, se comprueba claramente que al generarse cambios en la curvatura de la antena generan modificaciones en la frecuencia de resonancia. Para este caso, a medida que se aumenta el radio de curvatura con las estructuras diseñadas y fabricadas, se produce una disminución en la frecuencia de resonancia.

El diseño y fabricación de las estructuras que permiten curvar la antena para formar en conjunto un sensor de deformación, demuestran ser un método eficiente que verifica el cumplimiento de lo esperado en cuanto permite mantener la forma curva de la antena respecto al radio de curvatura deseado.

5.1. Recomendaciones

Las respuestas obtenidas en el pico 2 con promedio de frecuencia de resonancia de 4,2 GHz, no proporcionan una secuencia adecuada, proporcionando en algunos casos, datos que se alejan de la media, dando como resultado desviaciones estándar con rangos muy amplios. Se recomienda realizar un análisis más profundo de los datos obtenidos, buscando causas derivadas en la forma de tomar los datos, o si corresponden a comportamientos típicos de este tipo de antena.

5.2. Trabajo Futuro

A raíz de los experimentos implementados en este proyecto, se deja a consideración de trabajos futuros el experimentar con el análisis de curvar la antena en sentido opuesto, es decir, en este caso se realizó curvatura tanto cóncava como convexa a lo largo de la antena.

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

Se propone la deformación a lo ancho, con el fin de completar la caracterización de este tipo de sensor en todas sus direcciones.

Se propone investigar más a fondo la influencia de diferentes materiales diferentes al PLA, como el utilizado en el presente trabajo, para que con base a la permitividad de cada material objeto de estudio, se logre obtener resultados que puedan abrir nuevas respuestas y aplicaciones de ese tipo de sensor.

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

REFERENCIAS

- E. Reyes Vera, B. G. (2016). Curvature sensor based on a flexible Slotted Bow-Tie Antenna. 1.
- Hatchbox. (11 de 2016). *Hatchbox PLA 3D printer filament*. Obtenido de <https://s3-us-west-1.amazonaws.com/mlmpp/3D/Safety+Guides/HATCHBOX+PLA+3D+Printer+Filament+SDS.pdf>
- López, O. D. (2018). Rectangular Patch Antenna Strain Sensor with. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 16, NO. 5,.
- Orozco, B. A. (2016). *DISEÑO Y ANÁLISIS DE ANTENA MULTIBANDA FLEXIBLE TIPO BOW-TIE*. Medellín.
- Rogers Corporation. (2015). *Rogers Corporation*. Obtenido de <https://www.rogerscorp.com/acs/products/63/ULTRALAM-3850HT-Laminates.aspx>

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

FIRMA ESTUDIANTES Camilo Pabero

FIRMA ASESOR Ph.

FECHA ENTREGA: 17/Feb/19

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: _____

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

FIRMA ESTUDIANTES _____

FIRMA ASESOR _____

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: _____