



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Sensores de fibra óptica para el
monitoreo de la salud
estructural de materiales
compuestos**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera en Telecomunicaciones

P R E S E N T A

Brenda Guadalupe Ramírez Escoriza

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Selene Pérez García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS:

Con todo mi amor y cariño agradezco a mis queridos padres Lorenzo Ramírez y Sara Escoriza por su apoyo incondicional en todos los proyectos que he emprendido, mis triunfos son el resultado de todo su trabajo y esfuerzo, a mi esposo e hijo, Oscar y Christopher Iktan por ser quienes me motivan día a día, con quienes comparto mis alegrías y mi vida entera, a mi hermano Edgar por estar a mi lado en todo momento y a mi sobrina Karina por muchos momentos de diversión.

A mi asesora de tesis Dra. Selene Pérez García, por su confianza, motivación, crítica, experiencia, enseñanza y paciencia ha logrado que yo concluya este trabajo de tesis.

Al Dr. Sergiy Khotyaintsev por su comprensión y apoyo y por las facilidades brindadas en el laboratorio para realizar mi investigación.

A los miembros del jurado, Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero, Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón, M.I. María del Carmen López Bautista e Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo Morales por sus revisiones y sugerencias a esta tesis.

Al Fondo de Colaboración del Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería de la UNAM por apoyo en forma del proyecto “Sistema de detección temprano de riesgos en edificios históricos”.

A la DGAPA PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma del Proyecto de investigación científica “Implementación de un nuevo método para monitorizar el comportamiento de estructuras hasta su falla de elementos de concreto y materiales compuestos, con arreglos de fibras ópticas” con número de referencia IT102515 y PAPIME “Nuevas prácticas de laboratorio con actividades y experimentos virtuales y reales para el mejoramiento de la enseñanza y aprendizaje en dos asignaturas de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones” con número de referencia PE101616.

Índice:

Capítulo 1

Introducción	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Sensores en fibra óptica	1
1.3 Algunos ejemplos de sensores en fibra óptica	3
1.4 Estado del arte de sensores en fibra óptica en materiales compuestos	5
1.5 Conclusiones	8

Capítulo 2

Materiales compuestos	
2.1 Introducción	9
2.2 Materiales compuestos	9
2.2.1 Matriz	10
2.2.2 Refuerzo	14
2.3 Tipos de materiales y algunos ejemplos	19
2.4 Conclusiones	20

Capítulo 3

Desarrollo Experimental	
3.1 Introducción	21
3.2 Embebido de la fibra óptica en el material compuesto	21
3.3 Deformación sobre la placa de fibra de vidrio	25
3.4 Sistemas de transmisión	26
3.5 Fibra óptica	27

3.6	Sistema de detección.	28
3.7	Sistemas en fibra óptica para monitorizar estructuras de materiales compuestos	29
3.8	Resultados experimentales	34
3.9	Conclusiones	40
Capítulo 4		
Análisis de resultados		
4.1	Introducción	41
4.2	Análisis de resultados	41
4.3	Conclusiones	49
Conclusiones generales		51
Referencias		52

Capítulo 1.

Introducción

Por décadas los sensores ópticos han tenido gran interés por investigadores y científicos para ser estudiados. Los sensores de fibra óptica en la actualidad han demostrado ser los más adecuados para monitorizar grandes y pequeñas estructuras, debido a que son suficientemente pequeños para ser integrados en materiales compuestos, usados en una extensa variedad de estructuras soportadas en aviones, naves espaciales, automóviles y barcos.

Estos sensores tienen importantes ventajas sobre los sensores electrónicos:

- Pueden ser hechos de diámetros de $125\ \mu m$ o menos que pueden ser embebidos en muchos tipos de estructuras compuestas sin cambiar las propiedades mecánicas. [1]
- Los sensores de fibra óptica pueden estar en ambientes hostiles. [1]
- Las fibras de vidrio son dieléctricas. [1]
- Tienen alto grado de inmunidad sobre campos electromagnéticos. [1]
- Bajo costo, fabricación y mantenimiento. [1]

Por lo tanto los sensores deben funcionar correctamente en medios internos y externos, para que así mismo asegure su integridad en caso de cualquier desastre natural. Para lograr esto es necesario monitorizar un sistema que proporcione datos precisos y concretos para poder realizar un análisis de la estructura e integridad de la misma, y si es el caso realizar acciones de control correspondientes. [1]

Por lo expuesto anteriormente, en este trabajo de tesis se presenta un método para monitorizar los sensores en fibra óptica embebidos en un material compuesto como lo es la fibra de vidrio, observando las propiedades en la sensibilidad de dicho sensor.

Posteriormente en dicho trabajo de tesis se muestran ejemplos de sensores en fibra óptica, así como un estado del arte de sensores en fibra óptica embebidos en materiales compuestos.

Por otra parte se presenta un procedimiento para embeber la fibra óptica en el material compuesto, además del sistema óptico propuesto para monitorizar estructuras de materiales compuestos, para que finalmente se realice un análisis de resultados de dicho sensor.

1.1 Objetivo

- Obtención de nuevos conocimientos sobre las propiedades de sensores de fibra óptica de tipo intensidad para monitorizar la salud estructural de materiales compuestos.

1.2 Sensores en fibra óptica

Los sensores en fibra óptica se clasifican en dos grandes clases, sensores intrínsecos y sensores extrínsecos dependiendo en función de cómo se realice la medición de una perturbación externa. Esta información puede estar codificada en intensidad, fase, frecuencia, estado de polarización, contenido espectral, etc. Por esta circunstancia hace que sean los más sencillos de diseñar (también se les denomina de primera generación).

Sensores Intrínsecos o “all-fiber sensors”. Utilizan la fibra óptica como guía de onda hasta el lugar donde la magnitud se quiere medir, pero aquí, la perturbación externa actúa directamente sobre la fibra. En otras palabras la luz permanece dentro de la fibra en todo momento.

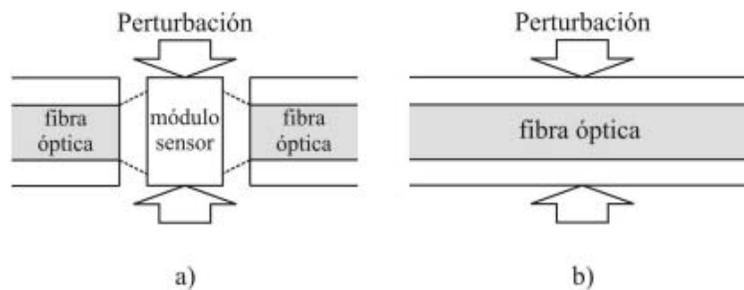


Figura 1.1. Tipos básicos de sensores de fibra óptica: a) extrínsecos, b) intrínsecos. [2]

Esquemas de modulación

Sensores de fibra óptica también pueden subdividirse de acuerdo con el esquema de modulación utilizado.

1. Sensores de intensidad modulada
2. Sensores de fase modulada
3. Sensores de polarización modulada
4. Sensores de frecuencia modulada
5. Sensores de longitud de onda modulada

En sensores de intensidad modulada, miden el cambio en la intensidad de la luz transmitida, estos sensores requieren una fuente de luz más intensa para funcionar, y una ventaja es que son baratos.

Los sensores de fase modulada, se basan en fenómenos de interferencia. En este tipo de sensores la fase de la luz en una fibra de detección se compara con la fase de la luz en una fibra de referencia. Estos sensores son más precisos que los sensores de intensidad modulada y tienen amplio rango dinámico. Las desventajas son las siguientes: son más caros que los sensores de intensidad modulada, requieren una fuente de luz coherente, por lo tanto se requiere un seguimiento de cuántos ciclos de desplazamiento se producen durante las mediciones.

En los sensores basados en polarización, una luz polarizada plana es lanzada en la fibra y el cambio en el estado de polarización se mide como una función del parámetro de perturbación de interés, y por lo tanto una serie de parámetros pueden afectar la polarización de la luz en una fibra para aplicaciones de detección.

Los sensores de frecuencia modulada utilizan efecto Doppler¹ [3], mientras que los sensores de longitud de onda modulada se basan en medir el cambio en la longitud de onda transmitida en respuesta a una perturbación externa.

1.3 Algunos ejemplos de sensores ópticos

Los sensores de fibra óptica están encontrando su camino en un número cada vez mayor de aplicaciones, y los científicos, los ingenieros y diseñadores se aprovechan de sus cualidades únicas, para utilizarlos.

Vigilancia de la contaminación (mar, agua y aire):

- ✓ Detectan sustancias tóxicas.
- ✓ Son rápidos en la medición y la teledetección.

Edificios:

- ✓ Miden tensión en puentes, presas y túneles.
- ✓ Proporcionan ganancia temprana de debilidades en la estructura, de manera que las reparaciones sean menores y de bajo coste.

Ciencias biomédicas:

- ✓ Detección clínica y analítica bioquímicamente importante

¹ El efecto Doppler se trata del cambio aparente en la frecuencia de una onda emitida por una fuente en movimiento. El efecto Doppler aplica tanto para las ondas mecánicas como para las ondas electromagnéticas.

Las siguientes mediciones que van a ser realizadas por los sensores de fibra óptica:

- En vivo el análisis de gases en sangre (es decir, la medición de pH, PO₂, pCO₂).
- El seguimiento del flujo de sangre, la presión arterial, la concentración de hemoglobina en la sangre.
- La cantidad total de proteína, urea, glucosa, colesterol, etc. en la sangre o en la orina.
- Vigilancia de los medicamentos.
- Detección de enfermedades infecciosas.
- La detección de diversas formas de cáncer.
- Control de la temperatura y la presión de los órganos críticos (por ejemplo, cerebro).

Biotecnología:

- ✓ Medición de parámetros físicos y químicos en bioreactores.
- ✓ Pueden ser esterilizados sin problema.
- ✓ Pueden usarse en la detección de O₂, pH, PCO₂, glucosa, etc.

Monitorizar agua subterránea:

- ✓ Control de pH, cloruro y uranio de aguas subterráneas.
- ✓ Monitorizar en tiempo real.

Control de proceso:

- ✓ Realizan mediciones en línea y en la propia fábrica.
- ✓ Pueden ser utilizados en entornos explosivos, durante procesos de temperatura, presión, flujo, etc.

Militar / Aeroespacial:

- ✓ Se utilizan en el giroscopio para la medida de la rotación.
- ✓ Control de vuelo.
- ✓ Monitorización del motor.
- ✓ Pruebas de radiación nuclear.
- ✓ Sistemas de seguridad.

Las plantas de servicios públicos de energía eléctrica:

- ✓ Controla la temperatura en las plantas de energía
- ✓ La intensidad de corriente y la tensión de las centrales eléctricas

Automatización de máquinas:

- ✓ Se mide la posición, la vibración y la tensión de las máquinas.

1.4 Estado del arte de sensores en fibra óptica en materiales compuestos

A continuación se describen algunos de los trabajos relevantes desarrollados sobre sensores en fibra óptica en materiales compuestos.

Fibras ópticas microestructuradas poliméricas altamente birrefringentes embebidas en materiales compuestos. [1]

Los sensores de fibra óptica polarimétricos basados en alta birrefringencia (highly birefringent (HB)) han tenido un gran interés por décadas. En las fibras HB, la diferencia en las velocidades de fase de los dos modos polarizados ortogonalmente es bastante alta y evita el acoplamiento entre esos dos modos. Éstas obtienen una alta birrefringencia interna debido al diseño del núcleo y recubrimiento con geometría no circular, en su mayor parte elíptica.

Se realiza una instalación experimental óptica con el propósito de observar el comportamiento de los modos de más bajo orden en las fibras HB, bajo varias deformaciones externas. También hacen un segundo experimento, en éste miden los efectos de deformación en HB de fibras ópticas poliméricas micro-estructuradas (mPOF), también se agrega a la instalación una placa con fibra óptica embebida en el material compuesto el cual fue fibra de vidrio.

Al realizar el experimento, se compararon las mediciones, concluyendo que en ambos casos el valor resultante de la sensibilidad de tensión es el mismo, y esos a su vez son comparados con el valor de la sensibilidad de tensión longitudinal medida en el espacio libre. Y el resultado de esta comparación es que el valor experimental se encuentra muy por arriba del valor medido en el espacio libre.

Lo que finalmente se concluye que los HB mPOFs muestran un gran incremento en la sensibilidad de tensión longitudinal cuando se embebió la fibra en el material compuesto, debido a la tensión inducida del cambio en la birrefringencia creada por la muestra compuesta.

Sensores ópticos embebidos en materiales compuestos. [4]

En el experimento se introdujeron sensores en fibra óptica dentro de un material compuesto con el propósito de observar el cambio de presión dentro de dicho material y dar seguimiento al comportamiento en el desgaste y separación de las láminas del material compuesto. El principio de la deformación es basada por aproximación por

elementos finitos. La meta es que tan pronto como se aplique una deformación, como respuesta se obtendrá una micro-deformación en la fibra óptica.

Son varias las aplicaciones en diferentes campos por ejemplo, en seguridad, en hidrodinámica midiendo la presión, en presión cartográfica, así como también en barcos, en mástiles de los barcos y estructuras de aviones.

Al realizar el experimento se construye una lámina de fibra de vidrio y resina epoxi con sensores de fibra óptica, se obtiene una curva la cual tiene las características de que el efecto de la presión de la tensión incrementa muy despacio, la cual muestra que hay una fase de polarización, esto es de interés ya que de ahí podemos obtener una correlación. Por otra parte el modelo del principio de deformación tiene como meta evaluar el método de doblar la fibra óptica durante el cambio de presión, usando la aproximación de elementos finitos.

Un segundo experimento es doblar fibras ópticas usando la detección del delaminaje de los compuestos, debido a este proceso, también se obtiene una curva con las siguientes características: el sensor tiene una buena respuesta, la caída óptica decrementa rápidamente, la fibra llega a saturación y se rompe.

Finalmente se concluye que estos primeros resultados son muy favorables por lo tanto podría ser una buena opción para materiales compuestos.

Técnicas de distribución de potencia modal utilizando sensor con fibra óptica embebida. [5]

La técnica de distribución de potencia modal (MPD) es aplicada a una fibra óptica multimodo, embebida en el material compuesto para la caracterización y para monitorizar la estructura, en tiempo real. Estas mediciones en las fibras y la redistribución subsecuente inducida por una perturbación externa indican que esta técnica es más sensitiva para la caracterización de pequeñas estructuras.

Para fabricar el sensor se usó una fibra de dióxido de silicio multimodal de índice escalonado, la cual se embebió en un material compuesto representando a tres dimensiones de la estructura pequeña. Esta muestra fue estudiada usando la técnica MPD para caracterización de pequeñas estructuras. Se utiliza también un arreglo de leds el cual es usado para excitar las fibras. Se realizan diversas mediciones para niveles de tensión altos y se concluye que el MPD es alterado drásticamente. Si incrementan la presión los resultados reflejan más pérdidas.

Un segundo método utilizado es MPR (Redistribución de Potencia Modal), el cual ensancha los ángulos más pequeños, lo que refleja una transferencia de potencia a los modos de orden inferior. Se hace una comparación entre los métodos antes mencionados con el método de modulación de intensidad y se concluye que las técnicas estudiadas son métodos más sensitivos, y el coste de este es bajo, ya que se pueden usar fotodetectores.

En conclusión la técnica MPD muestra que es más sensitivo, simple y de herramientas de costo efectivo para la caracterización de pequeñas estructuras, pero se necesitan más investigaciones para tener una sensibilidad más alta.

Monitorizar la salud estructural de compuestos usando sensores de fibra óptica.[6]

Realizaron un sensor interferométrico de baja coherencia, debido a que tienen una ventaja sobre los demás sensores, proporcionan mediciones inciertas o dudosas. Estos sensores miden el promedio de la tensión sobre la longitud de las fibras sensoras, comúnmente usan una fuente de luz con una longitud de coherencia corta.

El sistema también consiste de un sensor y una fibra óptica de referencia. Los diodos emisores de luz son típicamente usados como fuente de luz porque tienen una longitud coherente corta como un láser. La fibra es embebida en el GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), en donde se espera que haya mayor tensión.

El sistema de medida de la longitud consiste en un LED con una longitud de onda central de 1500 nm y una fibra óptica monomodo (Corning SMF28). Con un acoplador 2x2 que divide por igual la señal que entra de las salidas. Las longitudes de las fibras ópticas de referencia y de la fibra óptica de sensado son obtenidas con los espejos reflectivos de aluminio, en este caso van al final de la fibra óptica y esa es la longitud de cada fibra. Se coloca un fotodetector al final del sistema que recibe la señal óptica para el procesamiento de datos.

Introducir la fibra óptica en una estructura es para monitorizar la deformación que ocurre en una estructura debido a tensión. Originalmente las fibras ópticas de referencia y del sensado son de la misma longitud, produciendo un patrón de interferencia máxima, pero como hay cambios en la longitud entonces este patrón de interferencia comienza a atenuarse. En este sistema la fibra óptica de referencia es cubierta con un tubo de acero inoxidable, en la cual la circunferencia puede ser incrementada usando un actuador piezoeléctrico.

Las ventajas que se tienen con este método es que proporciona tensiones absolutas (valores absolutos) en las mediciones. Este sistema no proporciona valores cualitativos, y se sigue trabajando para diseñar un sistema de accionamiento en el que se pueda supervisar el cambio en la longitud de la trayectoria de referencia, pero finalmente el sistema de detección de fibra óptica de gran calibre tiene el potencial de proporcionar mediciones precisas para la vigilancia de la salud estructural a largo plazo.

1.6 Conclusiones

En la actualidad se siguen investigando y desarrollando técnicas y métodos sobre los sensores de fibra óptica embebidos en materiales compuestos, estos a su vez son cada vez más utilizados en la industria para monitorizar pequeñas y grandes estructuras. El campo de aplicación de los sensores ópticos embebidos en materiales compuestos es

muy amplio, debido a que en la mayoría de los casos las técnicas para medir presiones, temperaturas, intensidades o polarizaciones son sencillas y de bajo costo, así como también son fáciles de manipular y transportar de un lugar a otro.

Capítulo 2.

Materiales compuestos

2.1 Introducción

En el presente, la industria de la ingeniería y construcción obtienen beneficios de los materiales compuestos. En un principio los materiales sólo eran usados como materiales arquitectónicos o decorativos, y posteriormente se utilizaron en aplicaciones estructurales en construcción, aeronáutica y reparaciones tanto estructurales como estéticas, llegando a ser conocidos estos materiales como compuestos estructurales.

Al utilizar los materiales compuestos, las ventajas de estos en la industria son cada vez más evidentes porque se someten a ambientes agresivos, plataformas marinas, refuerzos de estructuras, armaduras activas y pasivas, cables, recubrimientos de túneles, etc.

En el presente capítulo se describen conceptos básicos sobre materiales compuestos y su clasificación.

2.2 Materiales compuestos

Un material compuesto consta de dos o más fases, una de las fases se conoce como discontinua que es llamada refuerzo, el cual tiene la característica de ser un material rígido. Mientras que la otra fase que es continua, es llamada matriz. [7]

La principal característica de los materiales compuestos es que la unión del refuerzo y la matriz tiene una o más fases, las cuales cuentan con propiedades de fuerza, rigidez, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, aislamiento térmico y conductividad térmica, por esta razón son altamente utilizados en la industria.

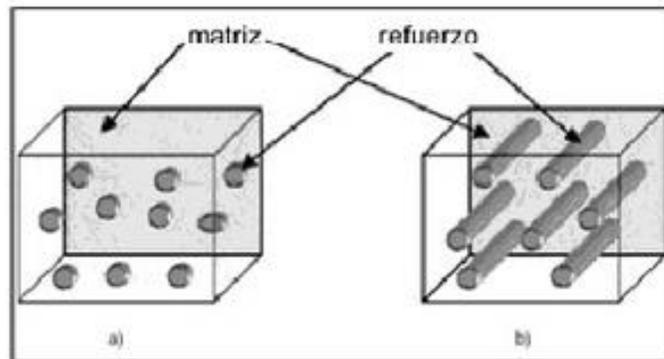


Figura 2.1. Material compuesto. a) Con partículas, b) con fibras. [7]

Estos materiales se pueden utilizar por periodos largos de tiempo y en lugares hostiles, pero cuando se exponen a cambios bruscos de humedad, ésta puede causar daños

internos y acortar su vida útil, para evitarlo se colocan capas protectoras contra la corrosión y se cubren de la luz solar, ya que los rayos ultravioleta hacen que se rompan las cadenas moleculares de los polímeros.

2.2.1 Matriz

La matriz es a menudo, pero no siempre, el compuesto que está en mayor cantidad, por esta razón sus propiedades son mejoradas al momento de incorporar el refuerzo. La matriz es la responsable de soportar toda la carga aplicada, que es transmitida por medio de la interfaz, por lo tanto debe ser deformable, y proteger las fibras del medio externo y mantenerlas unidas. Es por eso que se necesita realizar una minuciosa selección de la matriz y del refuerzo, ya que deben tener una buena compatibilidad. La matriz puede presentarse de tres formas diferentes, cerámica, metálica y polimérica.

Matriz polimérica.

Son las más utilizadas en la actualidad debido a su baja densidad, su maleabilidad y su resistencia al fuego, son ligeros, y resisten la oxidación. Se dividen en termoestables y termoplásticas.

Matrices Termoestables:

Resinas de poliéster insaturado. Las propiedades se presentan a continuación.

Tabla 2.1. Propiedades intrínsecas de la resina de poliéster. [8]

Densidad (g/cm^3)	1.1 – 1.2
Viscosidad 25 °C (cP)	150 - 750
Dureza Barcol ²	30 - 55

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de la resina de poliéster. [8]

Resistencia de tracción (Mpa)	50 - 75
Resistencia Flexión (Mpa)	80 - 150
Módulo de flexión (Mpa)	3500 - 4500

² Medida de la dureza obtenida midiendo la resistencia a la penetración de una punta de acero, bajo la acción de un resorte. [9]

Resinas vinil-éster. Las propiedades se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 2.3. Propiedades de la resina vinil-éster. [9]

Resistencia a la carga (psi)	11 – 12000
Módulo de carga, x 10 e ⁻⁵ (psi)	4.9
Elongación (%)	5 - 8
Resistencia a la flexión (psi)	16 - 18
Módulo de flexión x 10 e ⁻⁵ (psi)	4.5
Temperatura de distorsión	99 - 104
Dureza Barcol	35

Resinas fenólicas. Las propiedades se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Propiedades de resinas fenólicas. [10]

Densidad (<i>gr/cm</i> ³)	1.25 – 1.3
Alargamiento de rotura (%)	< 3
Temperatura de moldeo (°C)	150 - 190
Temperatura de reblandecimiento	100 - 150
Tiempo de almacenamiento	Temperatura ambiente 6 meses

Resinas epoxi: Las propiedades se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.5. Propiedades de la resina epoxi. [10]

Densidad (<i>gr/cm</i> ³)	1.17 – 1.25
Alongamiento de rotura (%)	6 - 8
Temperatura de moldeo (°C)	Temperatura ambiente hasta 170
Temperatura de reblandecimiento	80 - 130
Tiempo de almacenamiento	Bajas temperaturas 6 meses
Resistencia de tracción (Mpa)	90
Módulo de elasticidad (Gpa)	7

Matrices Termoplásticas.

Polipropileno (PP). En la tabla 2.6, 2.7 y 2.8, se presentan las propiedades eléctricas, físicas, y mecánicas del polipropileno

Tabla 2.6. Tabla de propiedades eléctricas [11]

Constante dieléctrica a 1 MHz	2.2 – 2.6
Resistencia dieléctrica ($kV\ mm^{-1}$)	30 - 40
Resistividad superficial (Ω/sq)	10^{13}

Tabla 2.7. Tabla de propiedades físicas [11]

Densidad ($g\ cm^3$)	0.9
Índice refractivo	1.49
Resistencia a los ultra-violeta	aceptable

Tabla 2.8 tabla de propiedades mecánicas [11]

Alargamiento a la rotura (%)	150 - 300
Coefficiente de fricción	01 - 03
Módulo de tracción (GPa)	0.9 – 1.5
Resistencia a la tracción (Mpa)	25 - 40
Resistencia al impacto ($J\ m^{-1}$)	20 - 100

Polietileno tereftalato (PET). Las propiedades se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 2.9. Propiedades del Polietileno tereftalato (PET). [12]

Módulo de elasticidad (MPa)	2300
Resistencia de tensión (MPa)	55
Elongación (%)	200
Gravedad específica	1.3
Temperatura de fusión (°C)	265
Participación aproximada en el mercado	Cerca del 2%

Polycarbonato (PC). Se presentan las propiedades en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Propiedades del policarbonato (PC). [12]

Módulo de elasticidad (MPa)	2500
Resistencia de tensión (MPa)	65
Elongación (%)	110
Gravedad específica	1.2
Temperatura de fusión (°C)	230
Participación aproximada en el mercado	Menos del 1%

Matriz mineral o cerámica.

Resisten temperaturas elevadas por ejemplo para el proceso de fusión se alcanzan temperaturas de 1700°C, pero presentan fragilidad y baja resistencia a choques térmicos. Algunos ejemplos son la alúmina, carburo de silicio y carbono. Algunas de las aplicaciones importantes son aislantes térmicos de un motor de propulsión a chorro de los jets comerciales y de cohetes espaciales y militares, frenos en vehículos de carreras, etc.

Matriz metálica

Presentan conductividad térmica y eléctrica, no absorben humedad y tienen resistencia al desgaste, es un material ligero, pero su precio es alto. Ejemplos:

- Aleaciones de aluminio.
- Aleaciones de titanio.

- Aleaciones de magnesio.

Tienen aplicaciones en la industria aeroespacial automotriz, electrónica, militar y deportiva. En la figura 2.2 se muestran imágenes de los tipos de matriz.

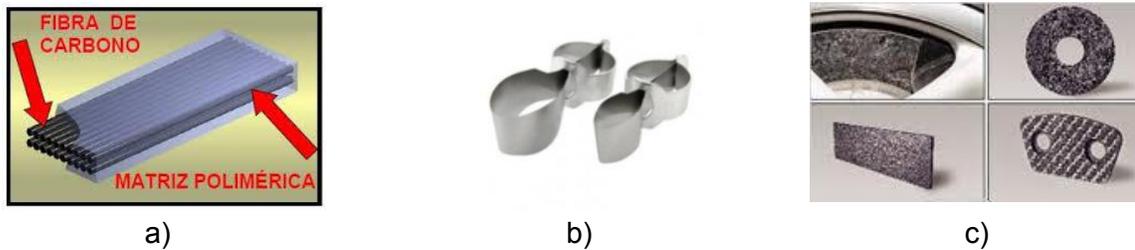


Figura 2.2. Tipos de Matriz a) Matriz polimérica [13], b) Matriz metálica [14], c) Matriz cerámica [15].

2.2.2 Refuerzo

El refuerzo define las características mecánicas del material compuesto como la resistencia y la rigidez, así como también mejora las propiedades de la matriz. Un ejemplo de esto es cuando se usa una matriz polimérica, las fibras son el refuerzo que más se utiliza en la industria.

Un parámetro importante en los refuerzos es su geometría debido a que determina la efectividad del refuerzo. Los refuerzos pueden ser fibra o partícula. Algunos materiales con los que se realizan los refuerzos de los materiales compuestos son:

Fibra de vidrio

Es usada con las matrices poliméricas, es la más utilizada como material aislante, es maleable y barata, es ligera y resistente al fuego, a la humedad y a la corrosión.

El proceso para fabricar el vidrio es mediante la fusión de diversos componentes en un horno, para que posteriormente se realice un estiramiento en hileras, este se recubre con ensimaje (material que protege la superficie del deterioro por fricción o absorción y facilita la unión entre la fibra y la matriz). Este proceso se muestra en la figura 2.3. [16]

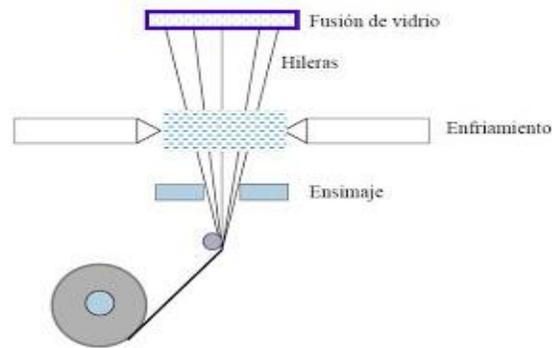


Figura 2.3. Fabricación de la fibra de vidrio. [16]

El vidrio se divide en clases:

- ✓ Clase E (Eléctricos).
- ✓ Clase S (Alta resistencia).
- ✓ Clase C (Químicos).
- ✓ Clase D (Dieléctricos).

1. Clase E. Se utiliza para la fabricación de fibras continuas, es de borosilicato de calcio y aluminio con muy bajo contenido de potasio y sodio.
2. Clase S. Se utilizan en aplicaciones militares y aeroespaciales, son más caros que los vidrios E y son ligeros, pero resistentes.
3. Clase C. Se pueden usar a altas temperaturas ya que el punto de fusión de este es de alrededor de los 2000°C.
4. Clase D. Es dieléctrico y se usan en circuitos electrónicos.

Otras de las características del vidrio que hay que mencionar es que no contribuyen a la combustión, soportan temperaturas muy elevadas como se mencionó anteriormente, tienen enlaces químicos covalentes, puede ser conformado por fusión y moldeo, y son dieléctricos.

En el mercado, la fibra de vidrio tiene diferentes presentaciones, las cuales son:

- Roving. Bobina de hilos continuos (conjunto de filamentos).
- Mat de hilos continuos. Filtro de hilos continuos y aglomerados entre sí mediante un ligante químico. Permite un alargamiento regular en todas las direcciones.

Fibras de boro

Se une con matrices poliméricas, se crean mediante una fase de vapor de boro gaseoso sobre un filamento de wolframio³ [17], que a través de éste se hace circular una

³ El filamento encerrado al vacío en una cápsula de cristal, por el cual pasa una corriente eléctrica hasta que alcanza una determinada temperatura que provoca la emisión de luz visible.

corriente eléctrica, el filamento se transforma en dibujo de wolframio, para que después se ponga sobre él una capa de boro puro.

Fibras de carbono

Tienen flexibilidad, alta resistencia esta propiedad es muy importante para que se realice la unión con la matriz, para generar el material compuesto, tolera altas temperaturas. Sus aplicaciones son en la industria aeroespacial, ingeniería civil, aplicaciones militares y deportes, son caros en comparación con la fibra de vidrio o fibra de plástico, lo que limita su uso.

Fibras orgánicas

Tienen alta resistencia y un alto módulo de elasticidad a partir de la alineación de polímeros. Las más comunes son las fibras de Aramida, las características de éstas son que tienen una baja densidad, alta resistencia y módulo elástico. Además de que son útiles para reforzar los plásticos de los materiales compuestos, también tienen aplicación aeroespacial, marítima, automotriz e industrial. [7]

En la tabla 2.1 se muestran las diferentes matrices, refuerzos y propiedades de los materiales compuestos que se mencionaron con anterioridad.

Tabla 2.1. Diferentes matrices, refuerzos y propiedades de los materiales compuestos. [18]

Material de matriz	Material de refuerzo	Propiedades modificadas
Metal	Fibras de metal, cerámica, carbono, vidrio	Resistencia a temperaturas elevadas Resistencia eléctrica Estabilidad térmica
Cerámica	Partículas, fibras metálicas y cerámicas	Resistencia a temperaturas elevadas Resistencia química Resistencia térmica
Vidrio	Fibras y partículas cerámicas	Resistencia mecánica Resistencia a la temperatura Resistencia química Estabilidad térmica
Orgánicos, termofijos, termoplásticos	Fibras de carbono, vidrio, orgánicas; perlas de vidrio, hojuelas, partículas cerámicas, alambres metálicos	Resistencia mecánica Resistencia a temperaturas elevadas Resistencia química antiestáticas Resistencia eléctrica

Blindaje contra FEM Flexibilidad Resistencia al desgaste Absorción de energía Estabilidad térmica

La gama de aplicaciones de los materiales compuestos es muy grande, algunos ejemplos se muestran a continuación:

1. Eléctricos, electrónicos: [19]

- Aislamiento para la construcción eléctrica.
- Soportes para interruptores de circuitos.
- Soportes para circuitos impresos.
- Antenas.

2. Edificios y obras públicas: [19]

- Chimeneas.
- Moldes de concreto.
- Piscinas.
- Puertas, muebles, baños.

3. Transportes por carretera: [19]

- Componentes de la carrocería.
- Ruedas, radiadores.
- Chasis.
- Cabinas, asientos.
- Remolques.

4. Transportes por ferrocarril: [19]

- Frentes de las unidades de energía.
- Vagones.
- Puertas y asientos.
- Carcasas de ventilación.

5. Transportes marítimos: [19]

- Aerodeslizadores.
- Embarcaciones de rescate.
- Barcos patrulla.
- Barco de arrastre.
- Buques antiminas.

- Barcos de competición.
- Canoas.

6. Transportes por cable: [19]

- Cabinas telefónicas.
- Telecabinas.

7. Transportes aéreos: [19]

- Aviones de pasajeros.
- Parapentes.
- Componentes de aeronaves.
 - ✓ Alerones.
 - ✓ Estabilizadores verticales.
- Helicóptero palas, hélices.

8. Transporte espacial: [19]

- Cohetes.
- Embalses.
- Boquillas.

9. Aplicaciones mecánicas generales: [19]

- Engranajes.
- Rodamientos.
- Carcasas, cubiertas.
- Brazos de un robot.
- Ruedas.
- Tubería.
- Tubos para plataformas marinas.

10. Deportes y recreación: [19]

- Tenis.
- Cañas de pescar.
- Esquí.
- Tablas de surf.
- Patines de ruedas.
- Arcos y flechas.
- Jabalinas.
- Cascos de protección.
- Palos de golf.
- Remos.

2.3 Tipos de materiales y algunos ejemplos

Existen diversos tipos de materiales compuestos los cuales se muestran en el siguiente diagrama:

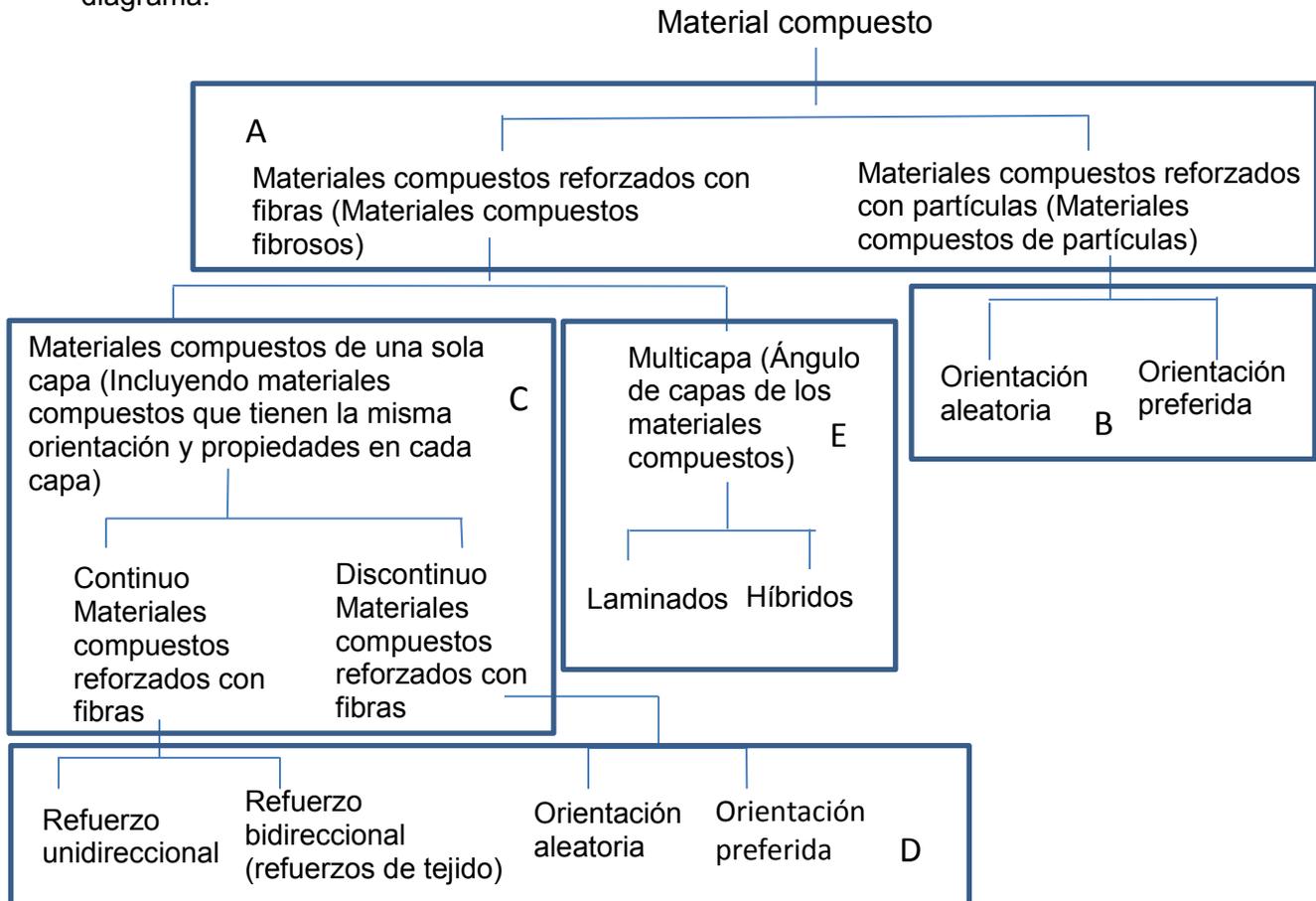


Figura 2.5. Clasificación de los materiales compuestos. [20]

El bloque A de la figura 2.5 presenta como se clasifican los materiales compuestos fibrosos y materiales compuestos de partículas. La característica de los materiales compuestos de partículas es que pueden ser de geometría regular e irregular y se clasifican con una orientación aleatoria o preferida, es decir con una orientación alineada, teniendo prioridad la orientación aleatoria en la industria. Mientras que un material compuesto reforzado con fibras, tiene la característica de tener una longitud mayor que las dimensiones de la sección transversal, sin embargo esta puede variar demasiado.

Este material compuesto reforzado con fibras se divide en dos; materiales compuestos de una sola capa y multicapa los cuales se observan en el bloque C; los primeros contienen fibras largas, a los cuales se les nombra compuestos reforzados con fibras continuas y a los segundos, que son los que contienen fibras cortas, se les llama compuestos de fibra discontinua.

En el bloque D se muestra la orientación de las fibras discontinuas que puede ser aleatoria o preferida. La orientación aleatoria se aproxima a que sea bidireccional del tejido de refuerzo, mientras que la preferida la encontramos con frecuencia en el compuesto de fibra continua que se denomina unidireccional.

El bloque E se compone de materiales compuestos de capas múltiples, que a su vez se clasifican en laminados o híbridos. Los laminados son apilamientos de hojas en una secuencia específica, (llamados también chapas o láminas y unidireccional). Un laminado puede tener entre 4 y 400 capas. Mientras que los híbridos se componen de fibras mixtas, éstas se pueden mezclar capa por capa o dentro de una capa y se benefician de las propiedades de las fibras empleadas.

Otros parámetros que pueden afectar significativamente las propiedades de un material compuesto son la forma, el tamaño, la orientación y la distribución del refuerzo, además de varias características de la matriz tales como el tamaño de grano para matrices policristalinas. Éstos, junto con la fracción de volumen, constituyen lo que comúnmente se llama la microestructura del material compuesto.

La fracción de volumen es generalmente considerado también un parámetro importante que influye en las propiedades del material compuesto. La homogeneidad es una característica importante que determina el grado en que un volumen representativo del material puede diferir en las propiedades físicas y mecánicas del material. La falta de uniformidad en el sistema se debe evitar tanto como sea posible, ya que reduce las propiedades que se rigen por la parte más débil del compuesto.

2.4 Conclusiones.

Los materiales compuestos son cada vez más utilizados en la industria, y sus aplicaciones van en aumento. La ventaja que tienen estos materiales es como su nombre lo indica que nacen de la unión de dos o más fases y como resultado de esto se obtienen materiales más resistentes al desgaste, aislamiento y conductividad térmica y en consecuencia son muy solicitados en el mercado para diversas aplicaciones que van desde cosas utilizadas en casa hasta pequeñas, medianas y grandes empresas.

Capítulo 3.

Desarrollo Experimental

3.1. Introducción

En el presente capítulo se describe la instalación experimental para caracterizar un sensor embebido en una estructura de un material polimérico (fibra de vidrio).

El capítulo se divide en dos partes, la primera parte describe los componentes mecánicos de la instalación y la segunda parte, los componentes ópticos. En la parte mecánica se explica cómo se embebió la fibra óptica en el material compuesto, y cómo es que se ejerció un esfuerzo para obtener una deformación sobre la placa de fibra de vidrio y se muestran los resultados obtenidos.

En cuanto a la parte óptica se explica el sistema utilizado para la caracterización de un sensor óptico embebido en fibra de vidrio, el sensor óptico en términos generales se realizó con un sistema de transmisión, seguido de un arreglo de fibra óptica embebida en fibra de vidrio y un sistema de detección, los cuales se describirán posteriormente con más detalle en este capítulo, para que finalmente se presenten los resultados experimentales.

3.2. Embebido de la fibra óptica en el material compuesto.

En este apartado se describe el procedimiento para embeber la fibra óptica SMF-28 en el material compuesto de fibra de vidrio. Se escogió fibra de vidrio (el cual se le conoce como refuerzo dentro de los materiales compuestos) debido a que es muy buen aislante térmico.

Para poder realizar el procedimiento de embebido de fibra óptica en fibra de vidrio se utilizaron los siguientes materiales:

- a) Fibra de vidrio
- b) Resina de poliéster ortoftálica PP-70x60
- c) Catalizador MEC (Metil Etil Cetona)
- d) Jeringa dosificadora
- e) Guantes
- f) Báscula
- g) Vaso de precipitados
- h) Brocha
- i) Bandeja de plástico
- j) Tijeras
- k) Acetatos
- l) Fibra Óptica (SMF-28 (Single Mode Fiber))

El primer paso para el proceso de embebido de fibra óptica en fibra de vidrio, fue cortar con unas tijeras fragmentos de la fibra de vidrio, todos del mismo tamaño, para formar una placa de 15 *cm* ancho por 25 *cm* de largo.

La fibra óptica utilizada fue SMF-28. Ésta se instaló de dos formas diferentes, el arreglo 1, mostrado en la figura 3.1, tuvo una longitud de 3.5 *m*, la cual se embobinó con 10 vueltas, con un diámetro de 5 *cm*, y el arreglo 2 tuvo una longitud de 2.5 *m* y se dejó la fibra óptica estirada.

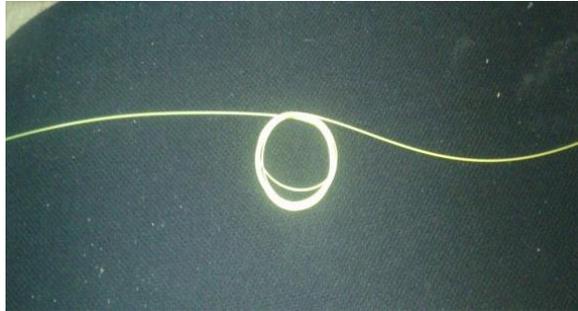


Figura 3.1. Arreglo 1, Fibra óptica SMF-28 ya embobinada.

El segundo paso fue realizar una mezcla entre la resina de poliéster ortoftálica PP-70x60 y el catalizador MEC (Metil Etil Cetona), las cantidades a mezclar de resina y catalizador fueron: por cada 100 gramos de resina se añadieron 30 gotas de catalizador. Esta mezcla entre los materiales compuestos es conocida como la matriz del material compuesto. La mezcla se realizó con el fin de utilizarla como pegamento al apilar los fragmentos de fibra de vidrio, para obtener la placa.

Una vez preparados los dos arreglos de fibra óptica, la fibra de vidrio y la mezcla entre la resina y el catalizador, se embebió la fibra óptica en fibra de vidrio, y para esto se colocó un acetato que fue utilizado como base para colocar sobre un soporte de plástico la placa de fibra de vidrio y se cubrió con la mezcla de resina y catalizador previamente hecha, con ayuda de una brocha, teniendo cuidado de que no se hicieran pliegues y que quedara uniforme la capa de la mezcla con la fibra de vidrio, se colocó otra placa de fibra de vidrio y se repitió el paso anterior. Esto se hizo para que las placas de fibra de vidrio quedaran gruesas, fueran más resistentes y que no se rompieran con facilidad al ejercer una deformación sobre ellas. Este procedimiento se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2. Cubriendo un fragmento de fibra de vidrio con la mezcla entre la resina y el catalizador, utilizando como base un acetato.

Se colocó el arreglo de la fibra óptica, dejando los extremos de la fibra óptica fuera de la placa y de la mezcla, esto para que los extremos puedan ser conectados a un transmisor y a un receptor óptico. Figura 3.3.



Figura 3.3. Colocando la fibra óptica SMF-28 en la fibra de vidrio.

Teniendo las fibras ópticas colocadas correctamente sobre los fragmentos de fibra de vidrio, se puso otra placa de fibra de vidrio sobre la fibra óptica, también apiladas.

Ya que se acomodaron en las placas los dos arreglos de fibra óptica sobre la fibra de vidrio, se apiló el último fragmento de fibra de vidrio en cual se puso nuevamente una capa de resina con catalizador, como se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.4. Colocando el siguiente fragmento de fibra de vidrio.

Finalmente se dejaron secar las placas de fibra de vidrio durante un día. Figura 3.5.



Figura 3.5. Fibra óptica SMF-28 embobinada y embebida en fibra de vidrio, dejándola secar.

3.3. Deformación sobre la placa de fibra de vidrio.

El procedimiento que se describirá a continuación es para ejercer una deformación sobre la placa de fibra de vidrio en la cual se embebió la fibra óptica.

Sobre la mesa óptica se realizó una instalación con dos soportes para que en ellos se colocaran las placas de fibra de vidrio como se muestra en la figura 3.6. En la parte de atrás de la placa se colocó un equipo de medición digital para cuantificar en milímetros la deformación de la placa al ejercer un esfuerzo sobre ésta. En la parte de enfrente de la placa se instaló una solera en v para ejercer tensión sobre un eje de la placa, la solera estaba sostenida sobre un tornillo mecánico (sujeto a la mesa óptica) con el cual se ejercía tensión para deformar la placa del arreglo 1.

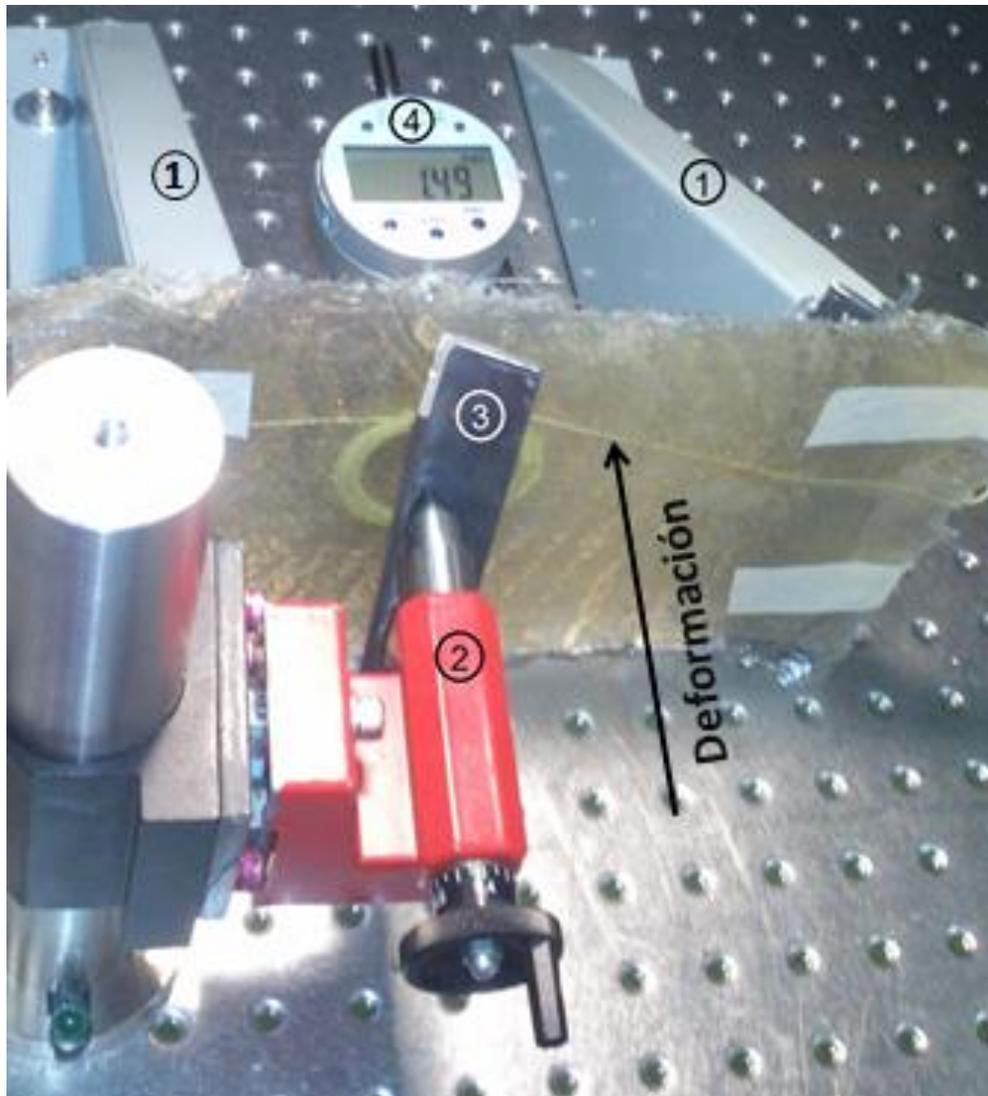


Figura 3.6. 1) Soportes, 2) Tornillo mecánico, 3) Solera en v, 4) Equipo de medición digital.

3.4. Sistema de transmisión

El sistema de transmisión utilizado en la instalación experimental se compone de un láser de luz polarizada, y un modulador óptico a la fuente, (obturador).

En el siguiente diagrama a bloques se muestra el sistema de transmisión que se utilizó:



Figura 3.7. Diagrama a bloques del sistema de transmisión.

- **Fuente óptica.**

Se trabajó con un láser marca JDS Uniphase, Modelo 1136P. El láser se muestra en la figura 3.8, y las especificaciones en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Especificaciones del láser marca JDS Uniphase, Modelo 1136P.

Diámetro (mm)	0.70
Polarización	500:1
Longitud de onda (nm)	633
Tipo de láser	HeNe

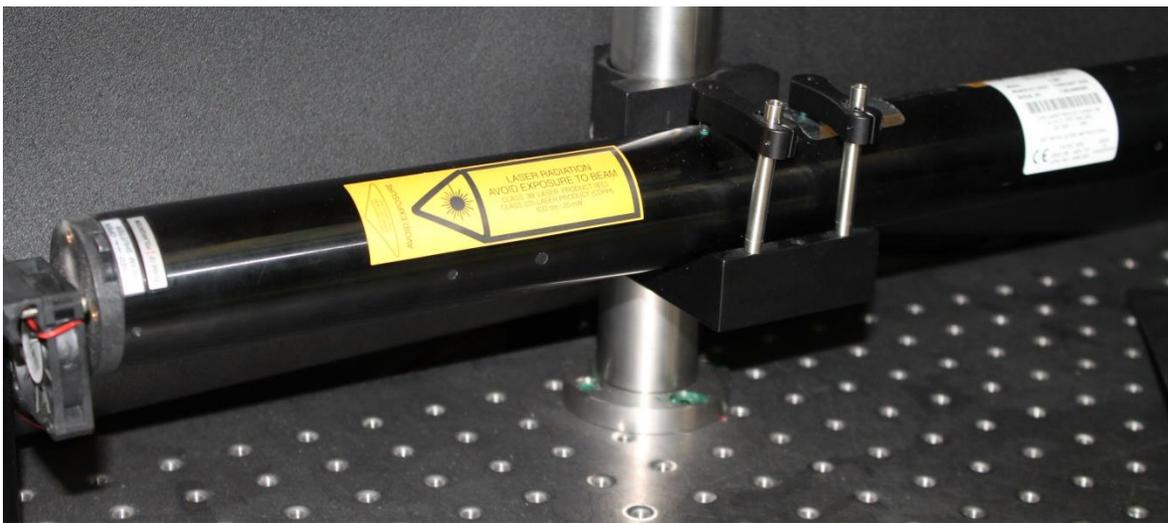


Figura 3.8. Láser utilizado en la instrumentación experimental.

- **Modular óptico a la fuente (obturador).**

Se utilizó un obturador en la instalación ya que se habían realizado diversas pruebas sin éste y en el osciloscopio no se podía asegurar si esa salida que se observaba era de la señal requerida o solamente ruido. La intensidad obtenida con éste fue de 12 V.

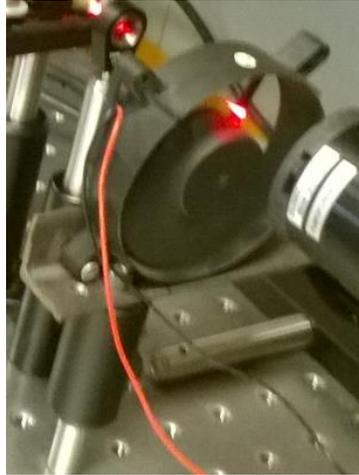


Figura 3.9. Obturador colocado en la instrumentación experimental.

3.5 Fibra óptica

El medio utilizado para realizar el experimento fue la fibra óptica SMF-28 de la marca Thorlabs, ésta se usó en dos arreglos diferentes, uno con fibra óptica embobinada y el segundo con fibra óptica estirada, esta es una fibra monomodo. Las características de la misma se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Especificaciones de la fibra óptica SMF-28, marca Thorlabs.

Apertura Numérica	0.14
Atenuación (dB/m)	≤ 0.18
Rango de temperatura (°C)	-60 a +85 °C
Diámetro del núcleo (μm)	8.2

3.6 Sistema de detección

- **Placa polarizadora.**

Se utilizó una placa polarizadora marca Thorlabs, modelo LPVISB100-MP2, ésta se montó sobre una unidad de rotación modelo RSP1C, marca Thorlabs, para poder rotarla a los grados necesarios.

- **Fotoreceptor.**

El fotoreceptor mostrado en la figura 3.10, marca Thorlabs, modelo PDA36A, se usó como un transductor para convertir la señal de luz en una señal eléctrica. La ventaja de este, es que también amplifica la señal, además de que proporciona un ajuste de ganancia en un rango de 70 dB.

Tabla 3.3. Especificaciones de fotoreceptor marca Thorlabs modelo PDA36A.

Especificaciones	Valor
Rango de longitudes de onda	320 – 1000 nm
Área activa	Ø 0.8 mm
Ancho de banda (DC)	10 MHz



Figura 3.10. Fotoreceptor usado en la instrumentación experimental.

3.7. Sistema óptico para monitorizar estructuras de materiales compuestos.

El sistema óptico se compone de la siguiente manera: un láser; del cual un haz de luz es emitido y éste circula por un modulador óptico a la fuente (obturador), así como también llega a una lente (la cual es un objetivo, marca Thorlabs y modelo E12RMS) que se encuentra instalado entre el obturador y el conector para fibra óptica, con el propósito de concentrar todo el haz de luz en un punto. La fibra óptica es colocada en un conector para fibra óptica, marca Thorlabs, modelo HFC005, mientras que el extremo final de la fibra óptica llega al fotoreceptor, que a su vez se conecta al osciloscopio para medir la intensidad, un diagrama de la instalación se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11. Diagrama a bloques de la instrumentación experimental.

La propuesta anterior fue hecha para un solo acoplamiento, pero en la siguiente propuesta se acopló el haz de luz a dos fibras ópticas. La cual se describe a continuación.

La fuente utilizada fue un láser de luz polarizada, seguido de un obturador. Para probar los dos arreglos de fibra con la misma instrumentación se agregó lo siguiente: para acoplar la luz que emite el láser a dos fibras, se puso un cubo divisor, marca Thorlabs, modelo BSO13, para longitudes de onda de 400-700 nm , y de 20 mm , el cubo tiene una razón de división de 50:50 del haz de luz, la ventaja que se tiene al utilizar éste es que no cambia la polarización, uno de los haces que salía del cubo divisor se incidió en un prisma triangular, marca Thorlabs, modelo PS908, con tamaño de 20 mm , para desviar la trayectoria del haz de luz a 90°. Esta instrumentación se muestra en la figura 3.12.

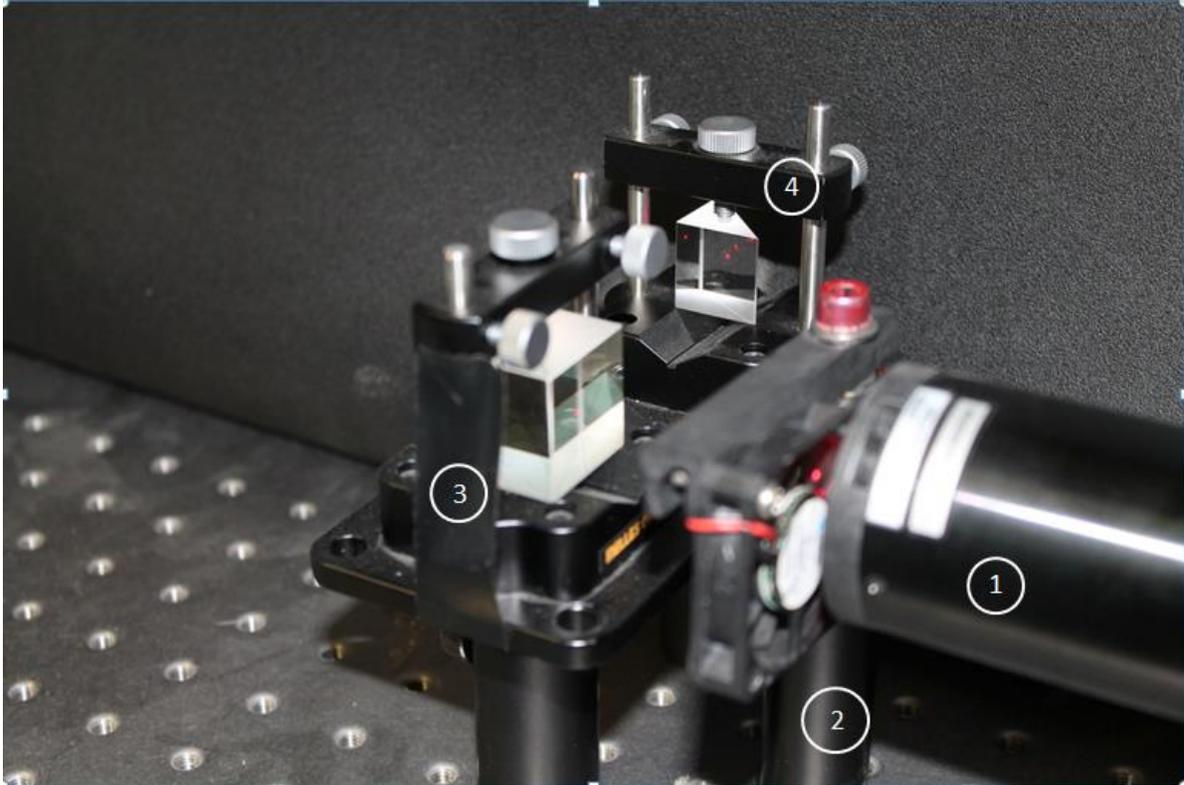


Figura 3.12. 1) Láser, 2) Obturador, 3) Cubo Divisor, 4) Prisma Triangular.

En seguida de estos dos elementos ópticos, se puso un espejo para dirigir el haz de luz hacia la dirección deseada y se puso una unidad de desplazamiento para alinear la lente y la fibra óptica. Se muestra en la figura 3.13 y figura 3.114.

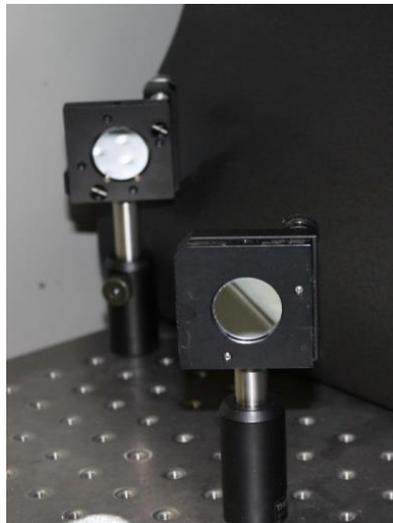


Figura 3.13. Espejos usados en la instrumentación experimental.

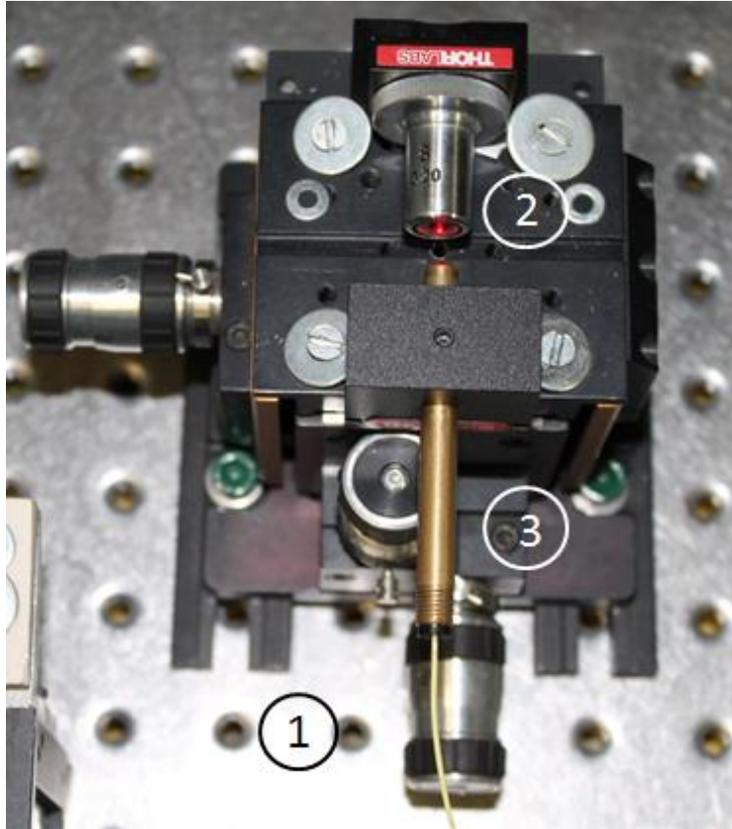


Figura 3.14. 1) Unidad de desplazamiento en tres ejes, 2) Lente, 3) Conector óptico.

En el otro extremo de la fibra óptica se colocó un conector FC/PC el cual se conectó al fotoreceptor, y la salida de éste a un osciloscopio, y se observó la intensidad de la señal requerida. Figura 3.15.

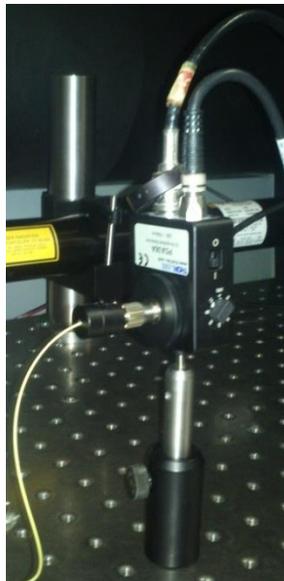


Figura 3.15. Fotoreceptor utilizado en la instrumentación experimental.

La finalidad del experimento es observar cómo cambia la intensidad de la señal y a su vez la sensibilidad del sensor al deformar la placa de fibra de vidrio, se realizan mediciones conforme se fue haciendo una deformación de la placa, y hubo una disminución en la intensidad de la señal óptica que viaja en la fibra, así como también en la sensibilidad.

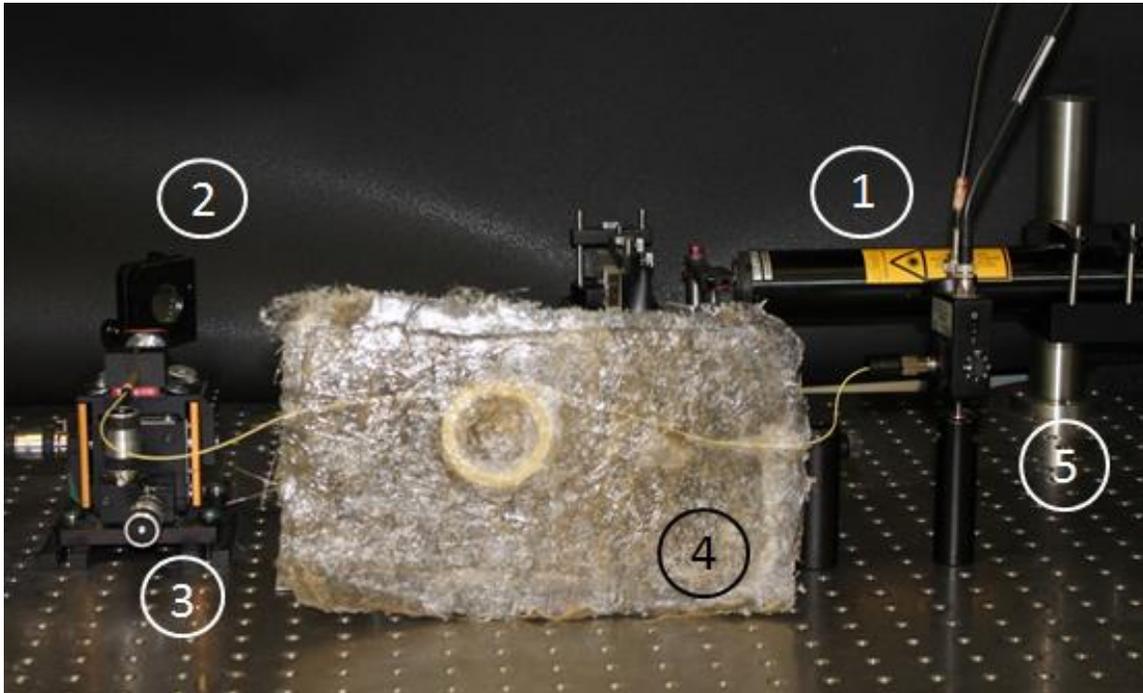


Figura 3.16. 1) Láser, 2) Espejo, 3) Acoplamiento, 4) Arreglo 1 (Fibra óptica embobinada en fibra de vidrio), 5) Fotoreceptor.

Para el arreglo 2, con ayuda del cubo divisor y el prisma triangular, se re-direccionó el haz de luz a la dirección que se necesitaba para obtener un segundo acoplamiento entre el láser y la fibra óptica; con una segunda unidad de desplazamiento en tres ejes, junto con otra lente y otro conector de las mismas características que los elementos que se usaron para el primer acoplamiento, como se muestra en la figura 3.17.

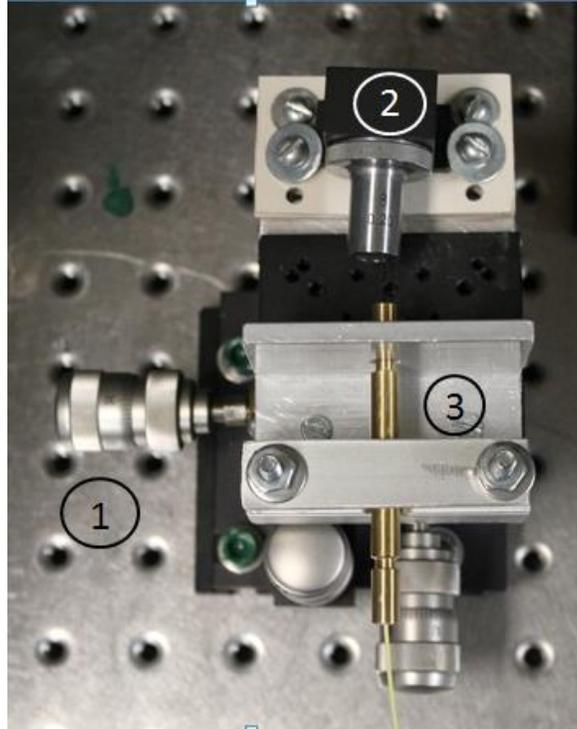


Figura 3.17. Segundo acoplamiento. 1) Unidad de desplazamiento en tres ejes, 2) Lente, 3) Conector.

El arreglo 2 se muestra en la figura 3.18, tuvo una amplitud de $0.1 V$ y tiempo de $0.5 ms$



Figura 3.18. Arreglo 2. Fibra óptica estirada embebida en fibra de vidrio.

3.8. Resultados experimentales

Con el procedimiento mencionado en la sección 3.1, se realizaron las siguientes mediciones.

La primera medición se realizó cuando el extremo final de la fibra óptica SMF-28 se conectó directamente al fotoreceptor, con el arreglo 1.

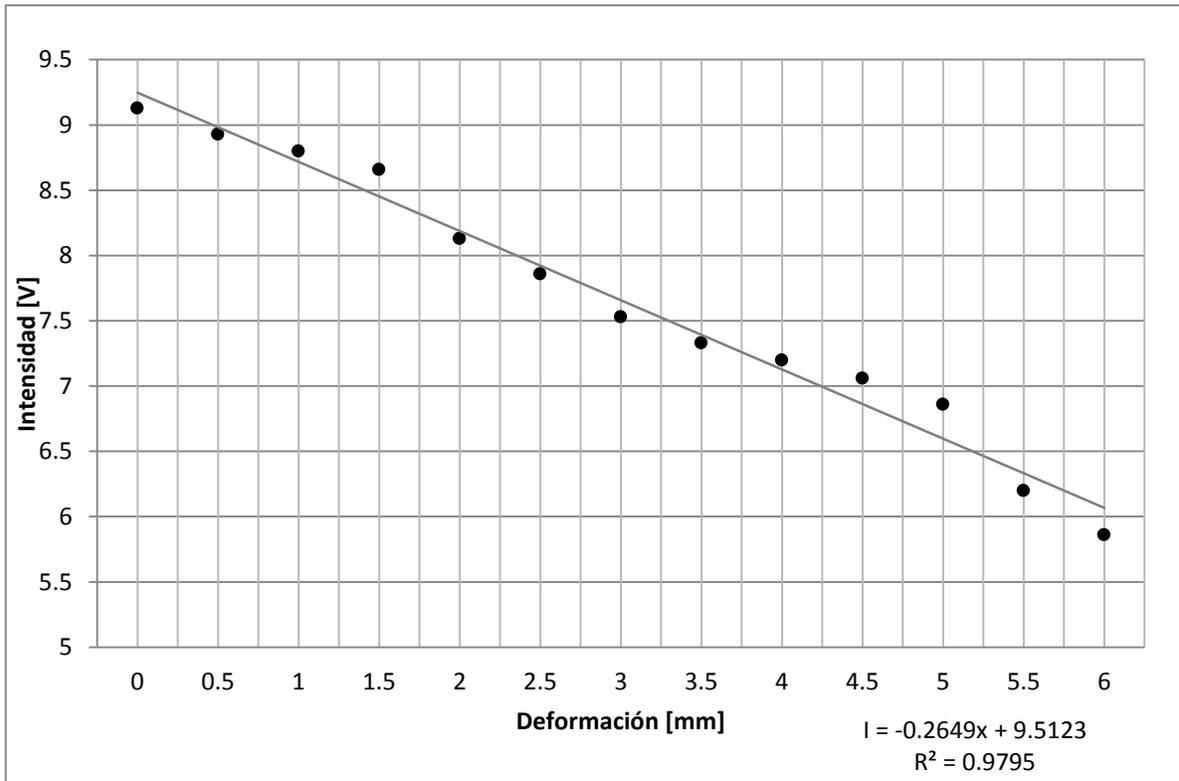


Figura 3.19. Gráfica y línea de tendencia cuando la fibra óptica es conectada directamente al fotoreceptor.

La figura 3.19 muestra que la sensibilidad del sensor fue disminuyendo conforme se realizó una deformación sobre la placa, y sigue un decaimiento lineal.

Las siguientes mediciones tuvieron una variación, la cual fue la siguiente:

Entre el último extremo de la fibra óptica y el fotoreceptor se colocó una placa polarizadora, la cual se rotó a diferentes grados en 0°, 90°, 45°, -45°. Tomando como referencia 0° con respecto al eje x. Ésto se realizó para observar los efectos de polarización en el sensor de fibra óptica de tipo intensidad y el presente estudio nos interesa para saber si se puede modificar la respuesta del sensor, cambiar linealidad, aumentar la sensibilidad, o conocer si la polarización cambia entre un experimento y otro.

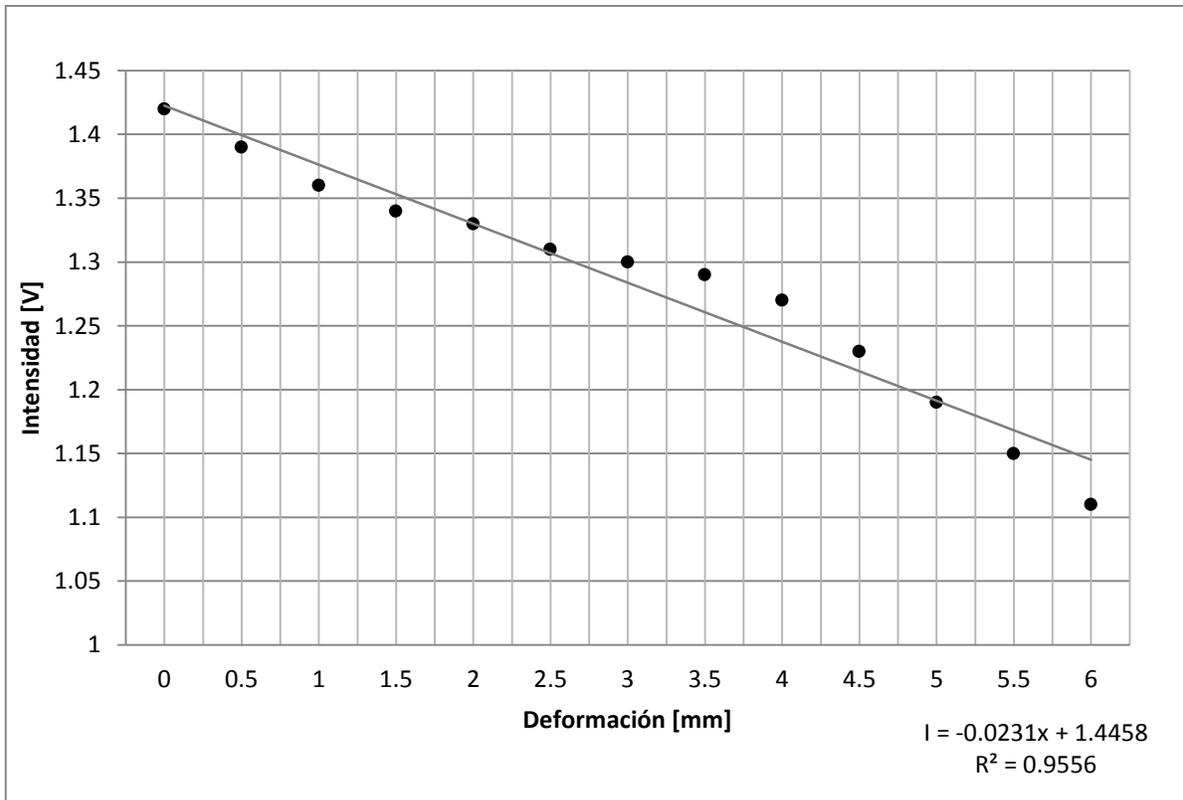


Figura 3.20. Gráfica y línea de tendencia colocando una placa polarizadora a 0°.

La figura 3.20 muestra que hay un cambio en la linealidad de la gráfica, lo que nos indica que al colocar la placa polarizadora a 0° se tiene menor sensibilidad comparada con la de la figura 3.19, ya que dicha sensibilidad disminuye en un 91%.

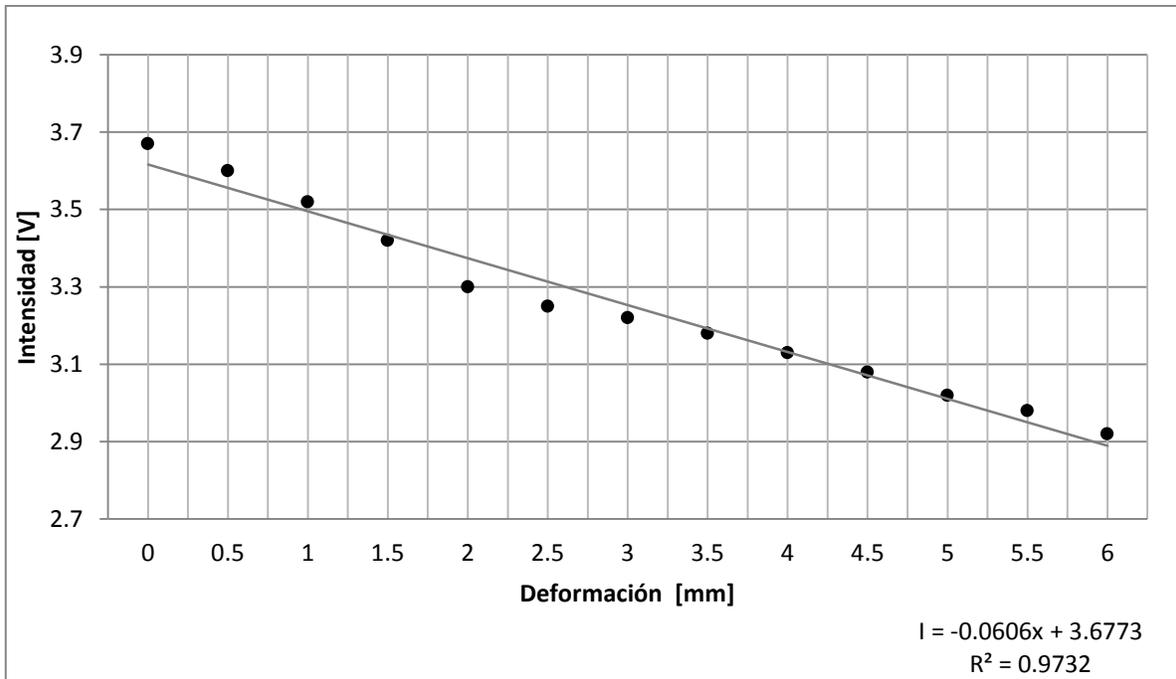


Figura 3.21. Gráfica y línea de tendencia colocando una placa polarizadora a 90°.

La figura 3.21 muestra la tendencia que tiene el sensor colocando una placa polarizadora a 90°. Comparándola con la figura 3.19 se tiene que sigue la misma tendencia de linealidad pero se observa una disminución en la sensibilidad del sensor de 77%.

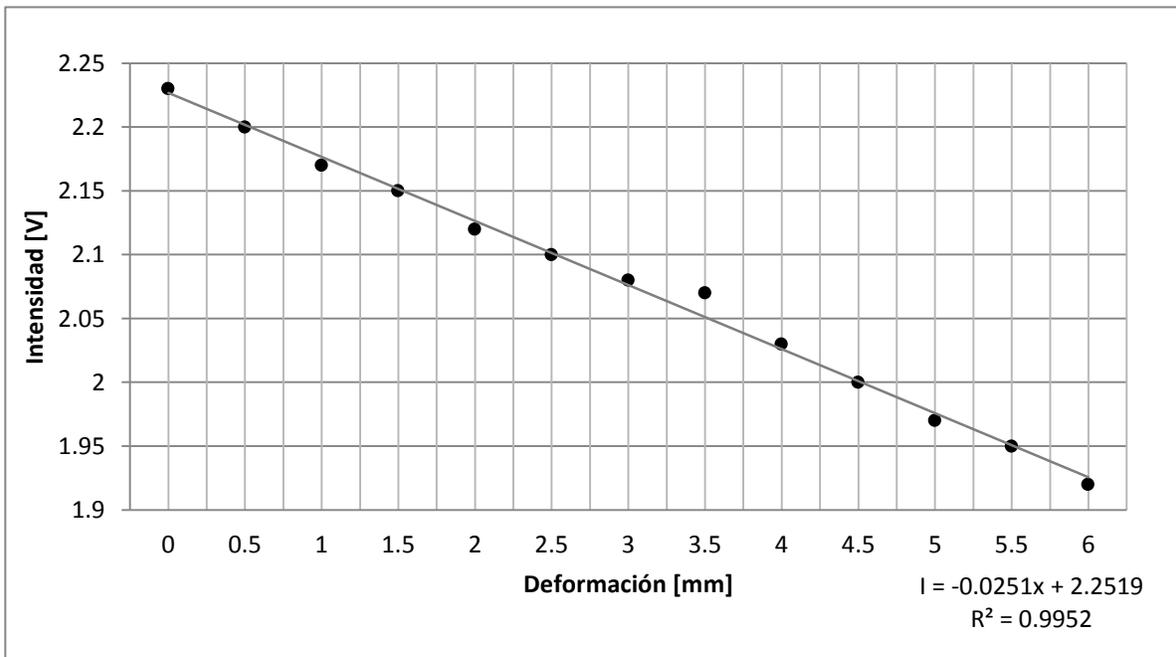


Figura 3.22. Gráfica y línea de tendencia colocando una placa polarizadora a 45°.

La figura 3.22 muestra el comportamiento del sensor al colocar una placa polarizadora de 45°, al compararla con la figura 3.19 se observa que la linealidad es constante, pero la sensibilidad del sensor es menor, debido a que ésta disminuye un 90%.

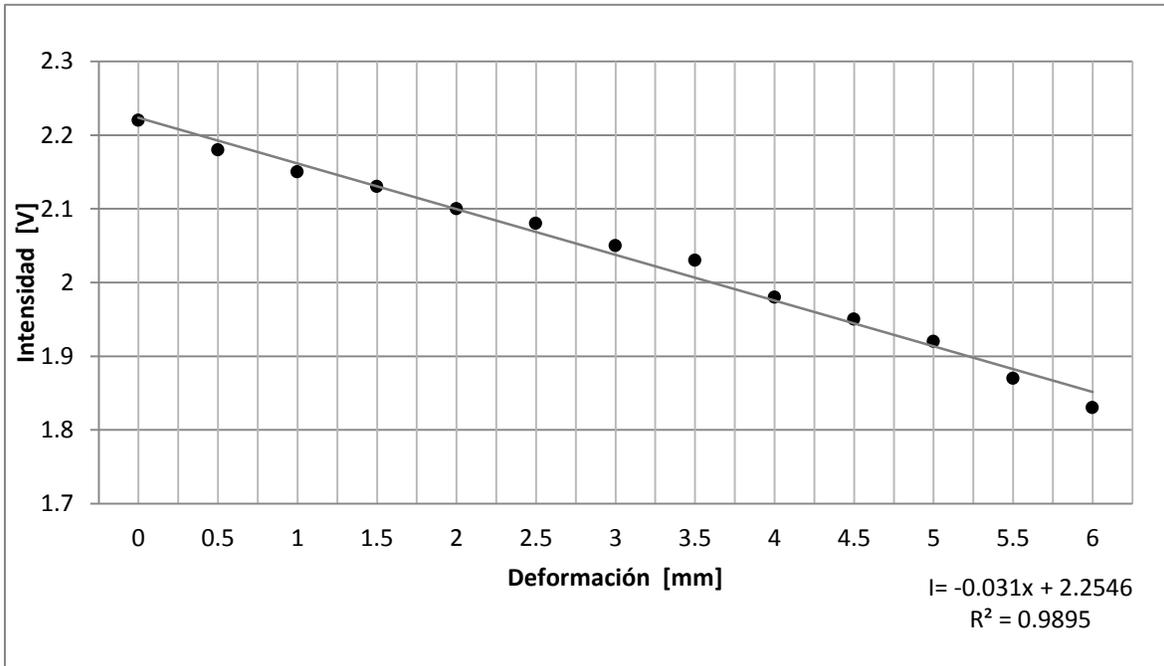


Figura 3.23. Gráfica y pendiente colocando una placa polarizadora a - 45°.

La figura 3.23 muestra una disminución en la sensibilidad del sensor de un 88%, mostrando que ésta es menor con una placa polarizadora de -45°, comparada con la figura 3.19, además de que la linealidad es constante.

Para el segundo experimento se utilizó el arreglo 2, para poder observar las diferencias entre uno y otro. Se realizó el mismo procedimiento para la obtención de datos, primero el extremo receptor de la fibra óptica es conectado directo al fotoreceptor y después con la placa polarizadora colocándola a diferentes grados.

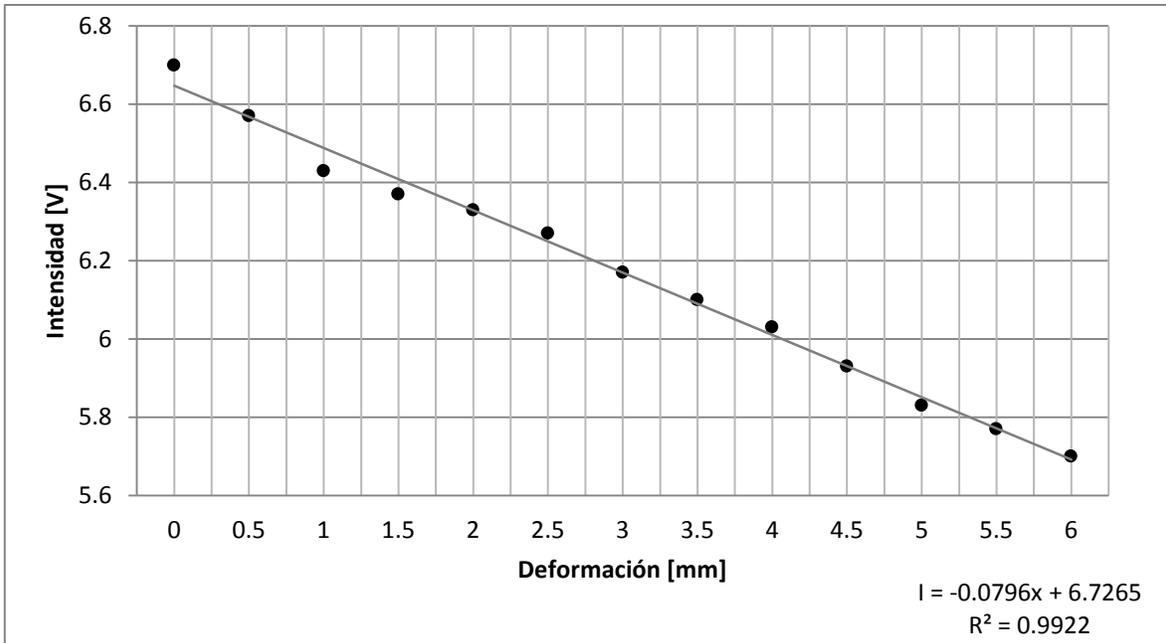


Figura 3.24. Gráfica y línea de tendencia cuando la fibra óptica es conectada directamente al fotoreceptor.

La figura 3.24 muestra el comportamiento de la intensidad del sensor óptico con el arreglo 2. Se observa que la linealidad es constante.

Para las siguientes mediciones utilicé la placa polarizadora colocada a 0° , 90° , 45° y -45° .

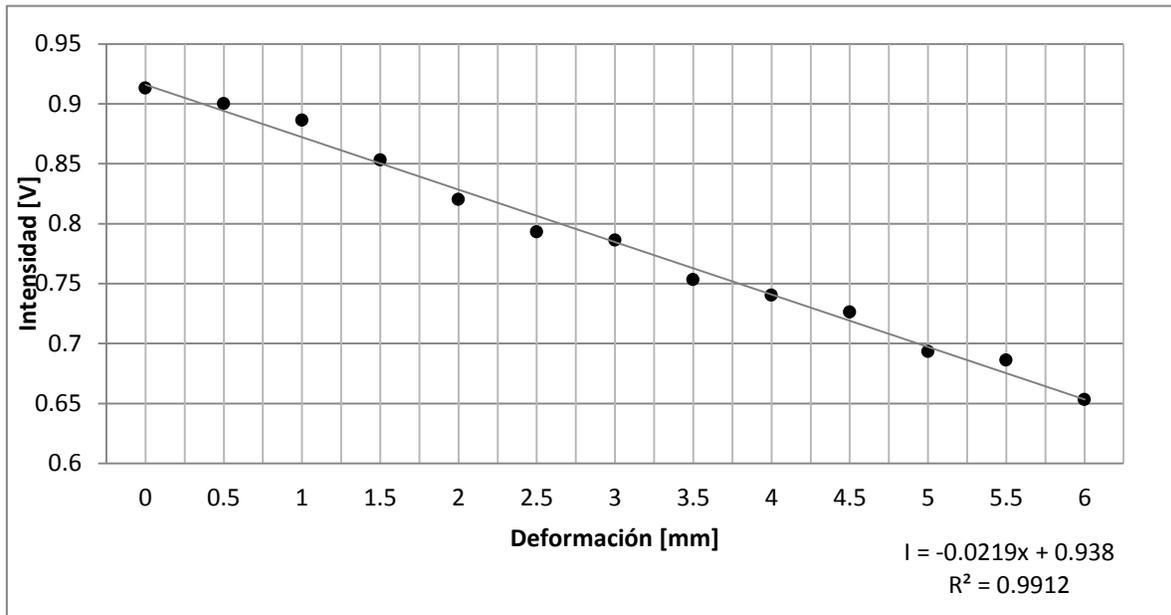


Figura 3.25. Gráfica y línea de tendencia colocando una placa polarizadora a 0° .

La figura 3.25 muestra el comportamiento del sensor óptico, colocando una placa polarizadora a 0°, se observa que al compararla con la figura 3.24, la linealidad no cambia ya que en la mayoría de los puntos tienen una tendencia a ser constante, mientras que en este caso la sensibilidad disminuye un 72%.

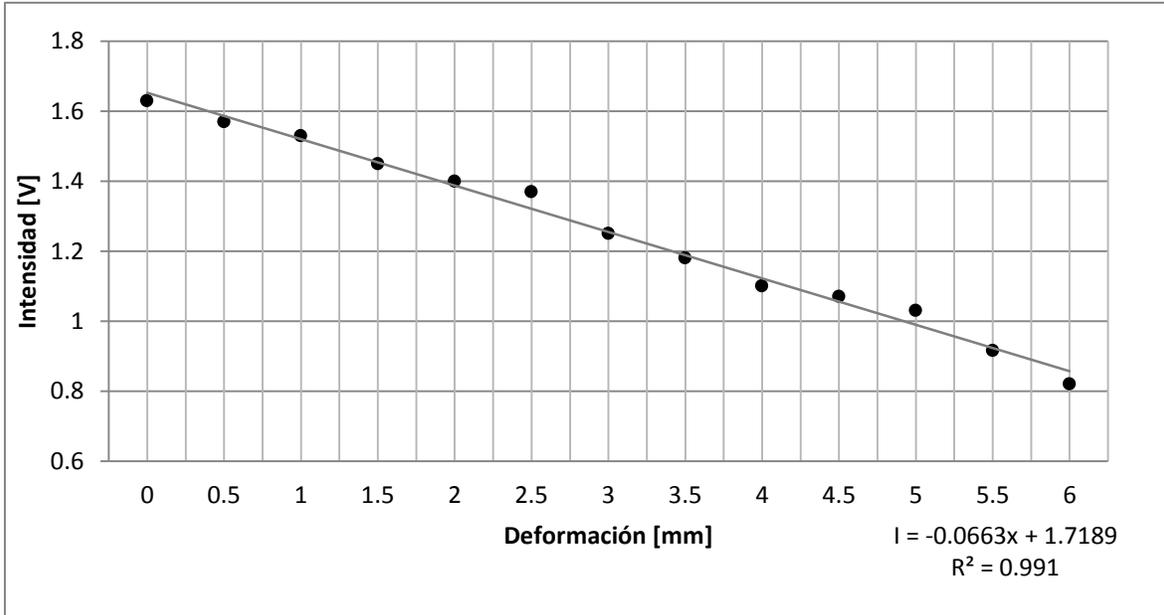


Figura 3.26. Gráfica y línea de tendencia colocando una placa polarizadora a 90°.

Se muestra en la figura 3.26 que la sensibilidad es menor cuando se colocó una placa polarizadora a 90°, comparándola con la figura 3.24 la sensibilidad disminuye un 16%.

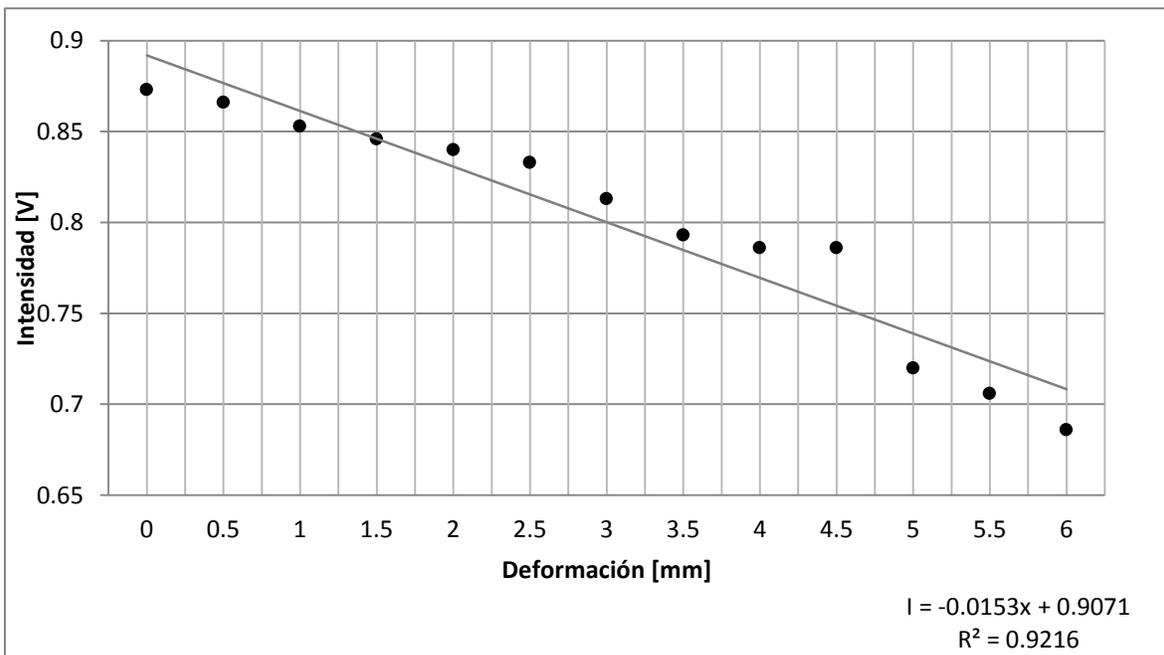


Figura 3.27. Gráfica y línea de tendencia colocando una placa polarizadora a 45°.

La figura 3.27 muestra que al comparar ésta con la figura 3.24 la sensibilidad decae, llegando a disminuir un 81%, por lo tanto ésta al colocar una placa polarizadora a 45° es muy baja.

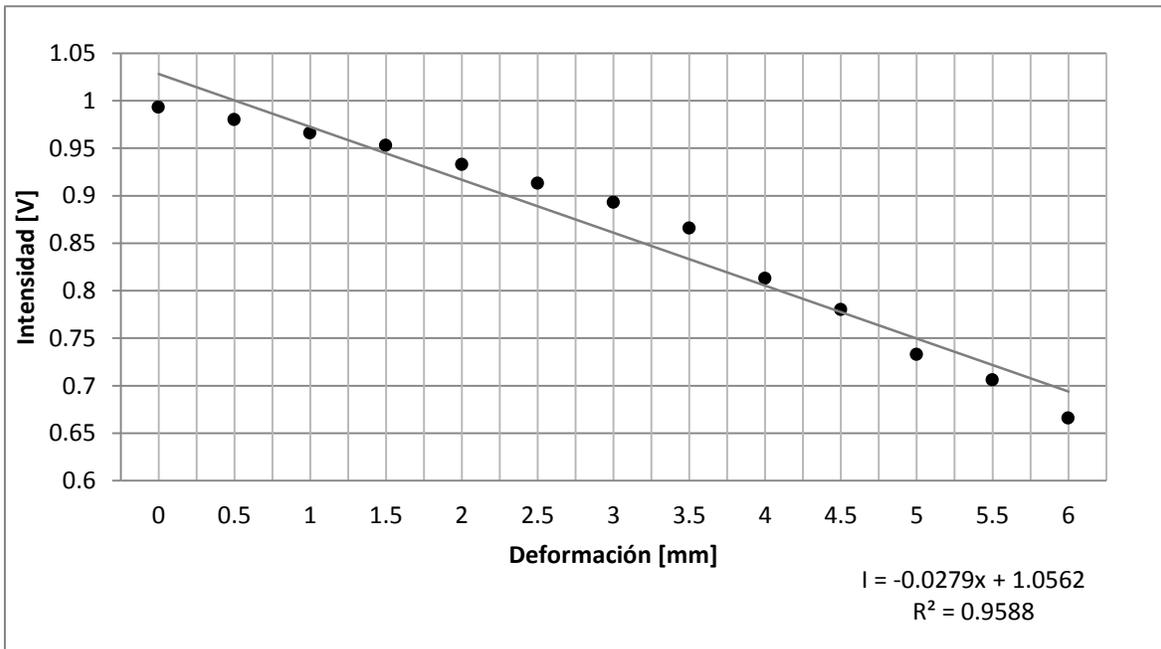


Figura 3.28. Gráfica y línea de tendencia colocando una placa polarizadora a -45°.

La figura 3.28 muestra el comportamiento del sensor óptico con una placa polarizadora a -45°, se observa que hay una disminución en la sensibilidad del sensor de un 65%, y es menor comparándola con la figura 3.24.

3.9. Conclusiones

Trabajar con los materiales compuestos como es la fibra de vidrio y la resina es fácil debido a que se pueden manipular para tener diferentes arreglos embebiendo fibra óptica en estos y así obtener un sensor en fibra óptica, que pueda medir intensidad modulada, fase modulada, polarización modulada o frecuencia modulada.

El sensor midió intensidad, fue sometido a una deformación y de las mediciones obtenidas se concluye que ambos arreglos nos ayudan a observar el comportamiento en la intensidad del sensor, pero al comparar ambos se tiene que el arreglo 1 es el sensor que tienen mayor sensibilidad, ya que el arreglo 2 tienen mayores pérdidas.

Por lo anteriormente expuesto se concluye que al trabajar con un arreglo con fibra óptica embobinada, embebida en un material compuesto que es la fibra de vidrio, se tienen una mayor pendiente, lo que nos indica que el sensor en fibra óptica tiene mayor sensibilidad.

Capítulo 4. Análisis de resultados

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta un análisis de resultados sobre el comportamiento del sensor óptico, dicho análisis se llevará acabo con los datos obtenidos de los experimentos realizados, y representando a éstos con gráficas y tablas. A continuación se explica el procedimiento utilizado para obtener las mediciones correspondientes al arreglo 1 y al arreglo 2.

Para el arreglo 1 y el arreglo 2, se realizaron cinco mediciones; la primera medición se hizo conectando el extremo receptor de la fibra óptica directamente al fotoreceptor. Las siguientes cuatro mediciones se obtuvieron colocando una placa polarizadora entre el extremo receptor de la fibra óptica y el fotoreceptor. Se roto la placa en el plano xy con respecto a x, para tener los grados de 0° , 90° , 45° y -45° . Como se muestra en la figura 4.1.

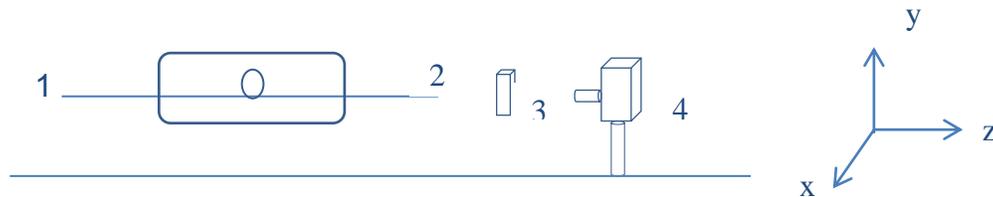


Figura 4.1. Sensor óptico. 1. Fibra transmisora, 2. Fibra receptora, 3. Placa polarizadora, 4. Fotoreceptor.

4.2. Análisis de resultados

Para realizar el análisis se obtuvieron las pendientes de cada una de las gráficas y a partir de éstas se realizó una comparación para observar el comportamiento de la sensibilidad del sensor.

La figura 4.2 presenta de forma gráfica los resultados del arreglo 1, y las pendientes de cada una de las gráficas obtenidas.

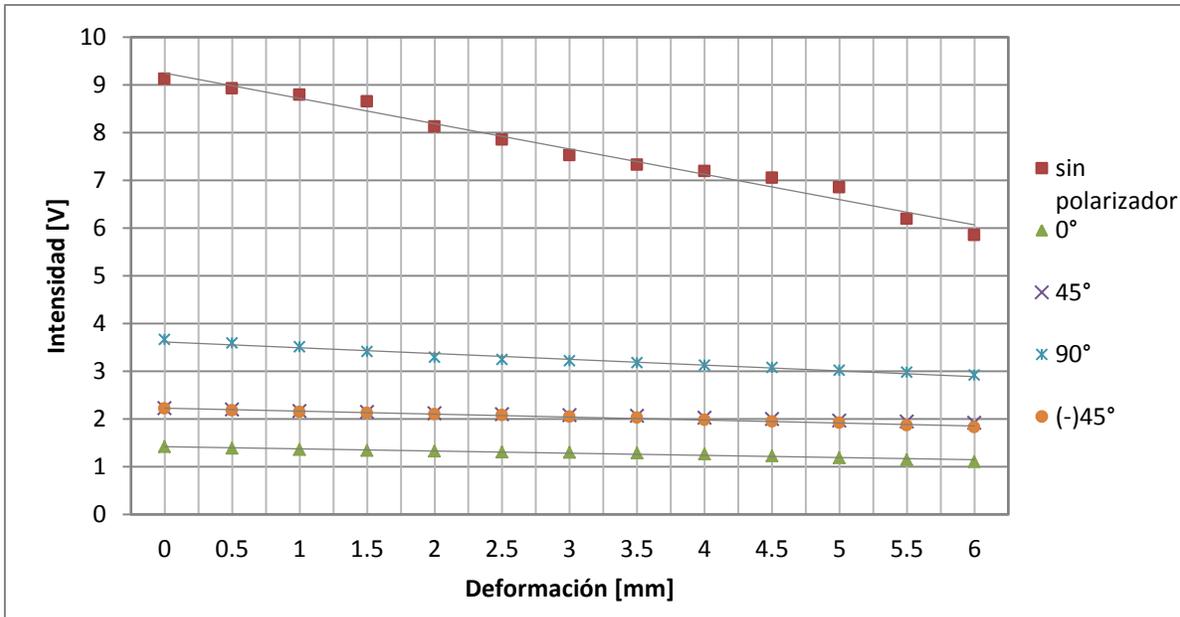


Figura 4.2. Gráficas y líneas de tendencia del arreglo 1.

Las gráficas muestran que la intensidad disminuye conforme se ejerce un esfuerzo en la placa de fibra de vidrio, mientras que las pendientes demuestran la sensibilidad que obtiene el sensor.

La figura 4.2 presenta la gráfica sin placa polarizadora, ésta tiene una pendiente de 91% más grande que la pendiente colocando la placa polarizadora a 0°; al observar la pendiente usando la placa polarizadora a 90°, la sensibilidad disminuye un 77%; mientras que en el caso de las pendientes colocando la placa polarizadora a 45° y -45°, la sensibilidad decae un 90% y un 88% de la sensibilidad total del sensor. Como las pendientes son decrecientes nos indican qué tanto disminuyó la sensibilidad del sensor al aplicar un esfuerzo a la placa de fibra de vidrio, así también se observa que el valor máximo que se alcanzó, fue de 6 mm. Los porcentajes en la disminución de la sensibilidad se observan en la tabla 4.1.

Por otra parte; analizando las gráficas y pendientes se observa que al colocar la placa polarizadora a 90° se tienen máxima intensidad, por lo tanto la pendiente es mayor que las de los demás grados, con un decaimiento en la sensibilidad de un 77% de la sensibilidad total alcanzada por el sensor óptico. Un caso contrario es que al colocar la placa polarizadora a 0° se tiene mínima intensidad teniendo un porcentaje de decaimiento en la sensibilidad de un 91%, esta sensibilidad es muy similar colocando la placa polarizadora a 45° teniendo una disminución de 90%. Otro de los casos que se tienen es cuando se coloca la placa polarizadora a 45°, se observa que la sensibilidad decae un 88%.

La tabla 4.1, muestra la sensibilidad y decaimiento en porcentaje del sensor en fibra óptica para el arreglo 1 al colocar la placa polarizadora a diferentes grados.

Tabla 4.1. Sensibilidad y disminución porcentual de la misma del arreglo 1 al colocar la placa polarizadora.

Arreglo 1		
Placa polarizadora	Sensibilidad [V/mm]	Disminución porcentual [%]
Sin placa	-0.2649	0%
0°	-0.0231	91%
90°	-0.0606	77%
45°	-0.0251	90%
-45°	-0.031	88%

La figura 4.3 presenta de forma gráfica los resultados del arreglo 2, y las pendientes de cada una de las gráficas obtenidas.

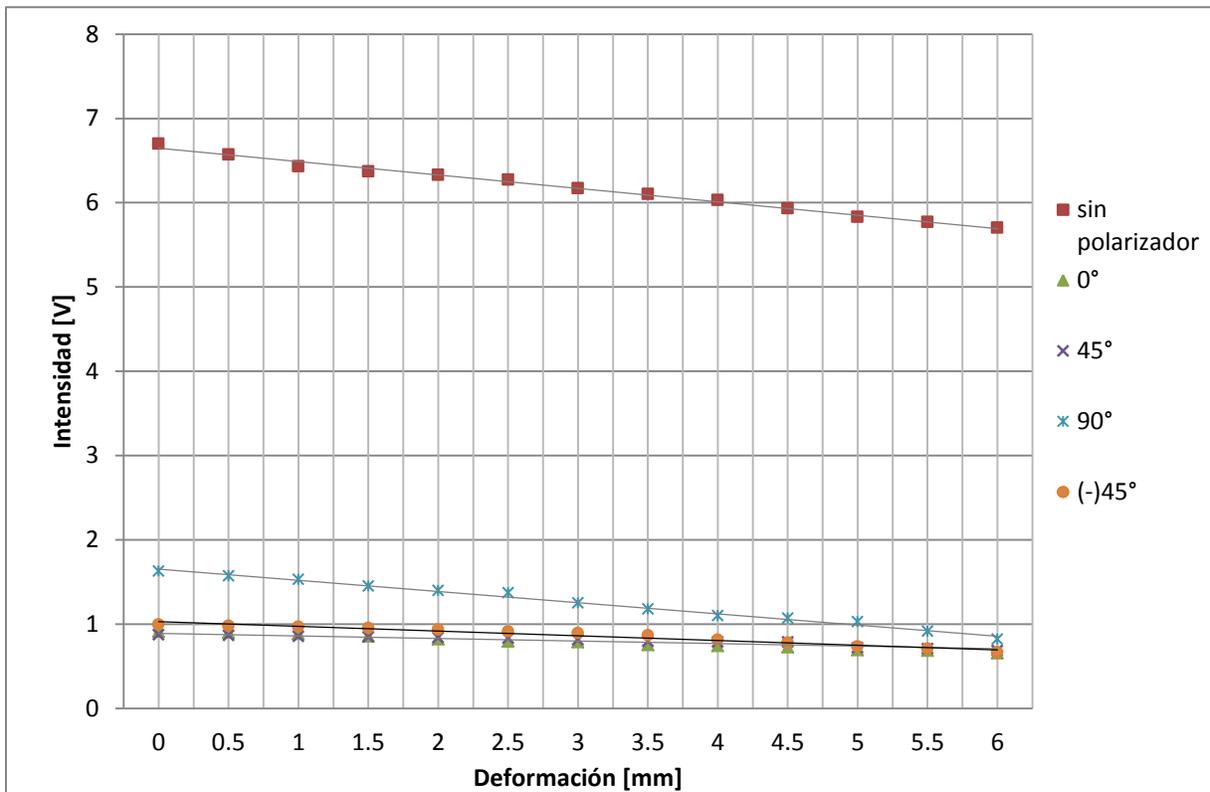


Figura 4.3. Gráficas y líneas de tendencia con el arreglo 2.

En las gráficas se observa que tienen una pendiente decreciente, de forma similar como la figura 4.2. Esto indica que la sensibilidad en el arreglo 2 también disminuye conforme se aplica un esfuerzo, sobre la placa, para obtener una deformación.

Realizando un análisis de las gráficas y pendientes del arreglo 2, se demuestra que también se tiene máxima intensidad al colocar la placa a 90° , teniendo una disminución en la sensibilidad de un 16% del valor total de la sensibilidad alcanzada por el sensor. Por otro lado se observa que al colocar la placa polarizadora a 0° , el decaimiento de la sensibilidad fue de un 72%, cuando se colocó la placa polarizadora a 45° se tiene un decaimiento de 81%. Finalmente colocando la placa polarizadora a -45° se tiene una disminución en la sensibilidad de 65% de la sensibilidad alcanzada por el sensor en fibra óptica. Esto se muestra en la tabla 4.2.

La tabla 4.2, muestra la sensibilidad y disminución en porcentaje de la misma del sensor para fibra óptica para el arreglo 2 al colocar la placa polarizadora a diferentes grados.

Tabla 4.2. Sensibilidad y disminución en porcentaje de la misma del arreglo 2 al colocar la placa polarizadora.

Arreglo 2		
Placa polarizadora	Sensibilidad [V/mm]	Disminución en porcentaje [%]
Sin placa	-0.0796	0%
0°	-0.0219	72%
90°	-0.0663	16%
45°	-0.0153	81%
-45°	-0.0279	65%

En la figura 4.4 se muestran los resultados en forma de gráficas de la comparación del arreglo 1 con el arreglo 2, así como las pendientes obtenidas de las mediciones sin placa polarizadora.

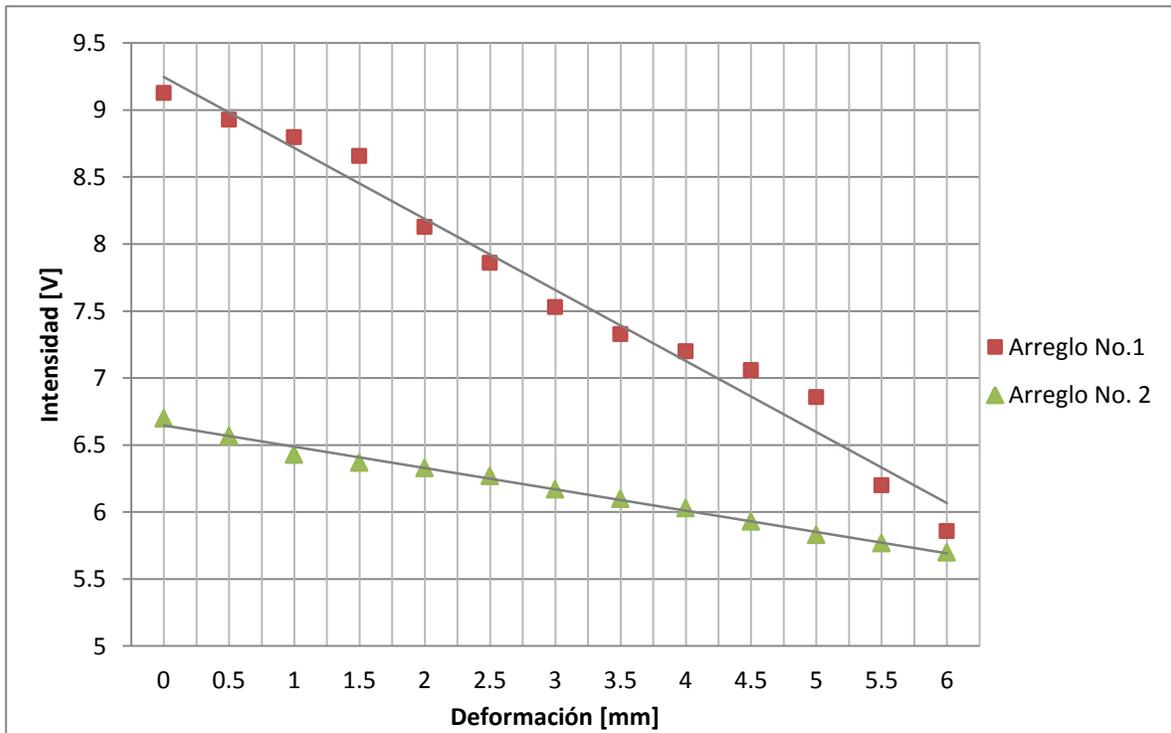


Figura 4.4. Gráficas y líneas de tendencia sin placa polarizadora.

En la figura 4.3, se muestra que la pendiente sin placa polarizadora, es menor comparándola con la pendiente del arreglo 1, esta tiene un decaimiento en la intensidad de 30% de la intensidad total del sensor óptico, una de las razones por las que pasa esto se debe a que un arreglo contiene la fibra embobinada y el otro la fibra estirada, además del proceso de realización del embebido de fibra óptica en la fibra de vidrio.

La figura 4.4 muestra las pendientes de los dos arreglos cuando el extremo receptor de la fibra óptica es conectando directo al fotoreceptor. Se observa que la pendiente en el arreglo 1 es mayor que la pendiente del arreglo 2, ya que la sensibilidad decreció 70%. Por lo tanto de esta figura se demuestra que el arreglo 1 tiene más sensibilidad que el arreglo 2.

En la figura 4.5 se muestran los resultados de la comparación de las pendientes del arreglo 1 con el arreglo 2 al colocar la placa polarizadora a 0° .

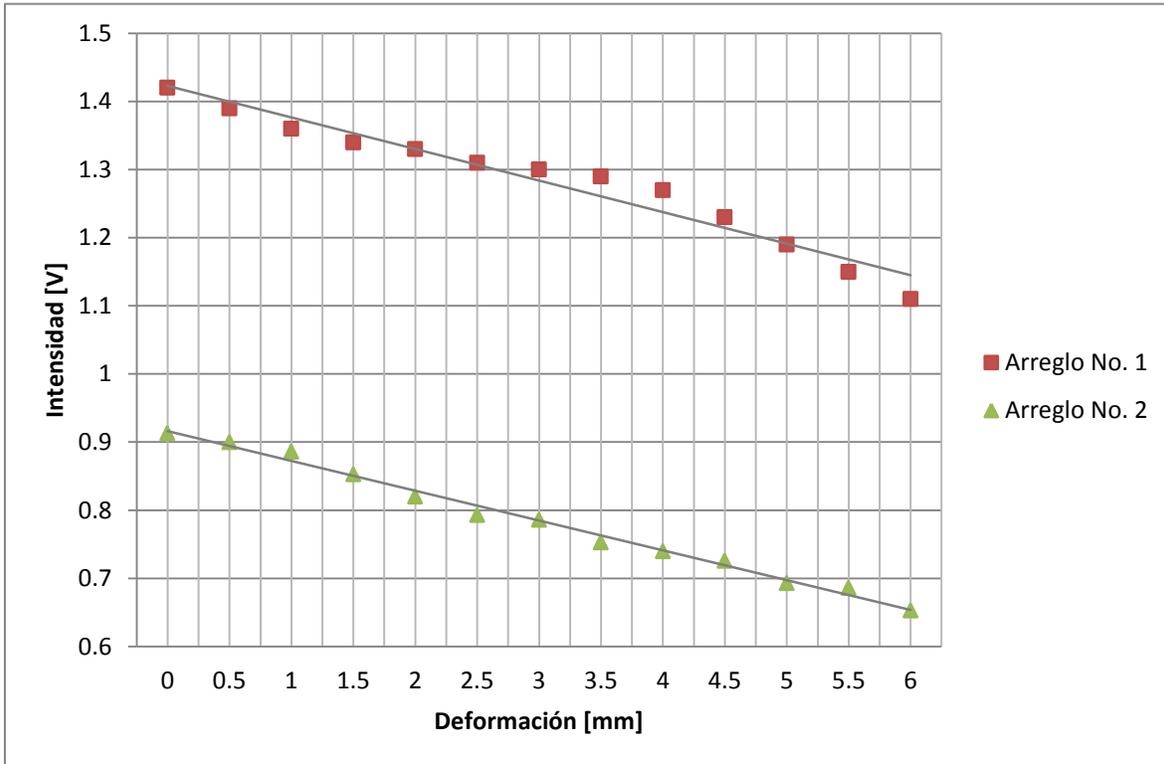


Figura 4.5 Gráficas y líneas de tendencia colocando la placa polarizadora a 0° .

La figura 4.5 muestra una comparación de las pendientes al colocar una placa polarizadora a 0° , el valor de éstas fueron para el arreglo 1 de -0.0231 y para el arreglo 2 es de -0.0219 , siendo más grande la pendiente del arreglo 1, ya que hay una disminución en porcentaje de 5%, se concluye que la sensibilidad es mayor en dicho arreglo; por lo tanto se demuestra que el arreglo 1 tiene más sensibilidad que el arreglo 2.

En la figura 4.6 se presentan los resultados de la comparación de las pendientes del arreglo 1 con el arreglo 2, colocando la placa polarizadora a 45°.

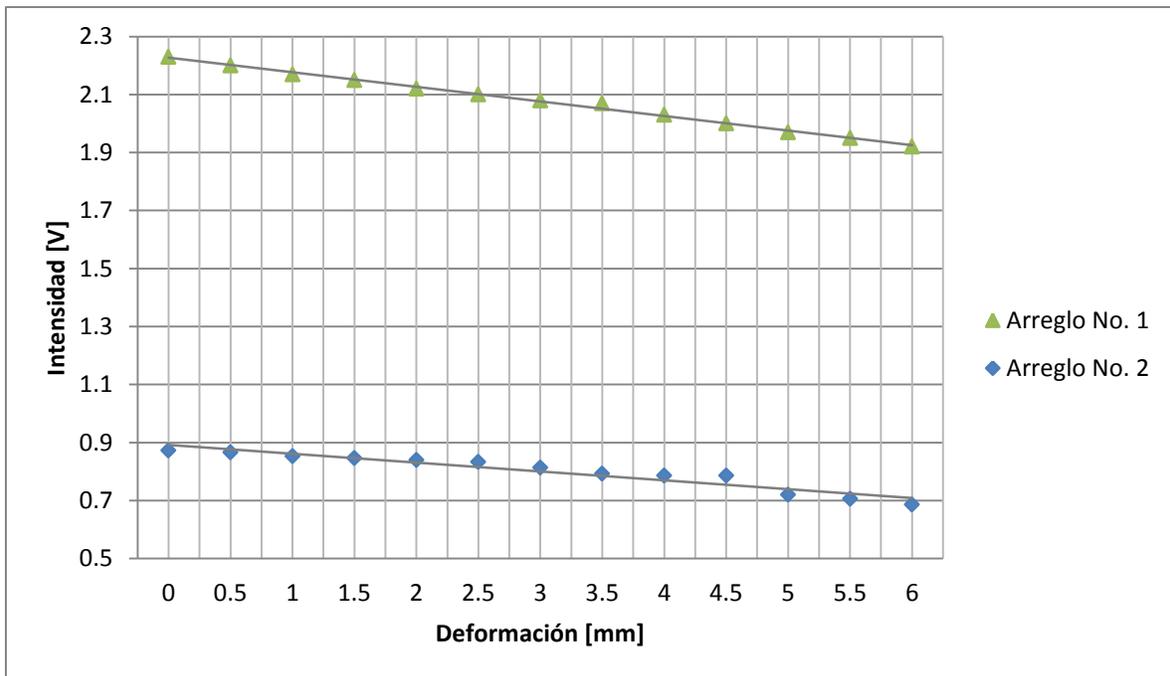


Figura 4.6. Gráficas y líneas de tendencia colocando el polarizador a 45°.

La figura 4.6 muestra la comparación de las pendientes de los dos arreglos colocando una placa polarizadora a 45°, teniendo como valores para el arreglo 1 de -0.0251 y para el arreglo 2 de -0.0153, demostrando nuevamente que la pendiente más grande es del arreglo 1, debido a que el porcentaje en la disminución es de 39%, concluyendo que tienen mayor sensibilidad el arreglo 1.

En la figura 4.7 se presentan los resultados de la comparación de las pendientes del arreglo 1 con el arreglo 2, colocando la placa polarizadora a -45° .

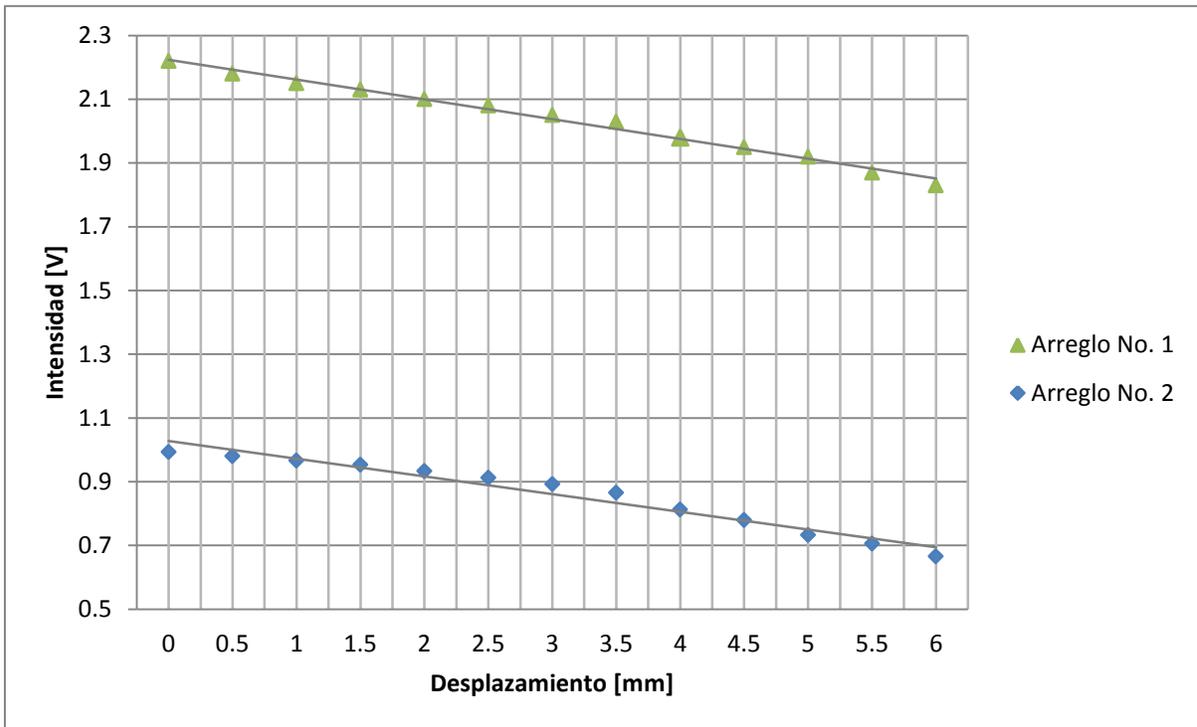


Figura 4.7. Gráficas y líneas de tendencia colocando la placa polarizadora a -45° .

La figura 4.7 muestra que las pendientes tienen el mismo comportamiento, decrecen conforme se aplica un esfuerzo y el valor de éstas para el arreglo 1 es de 0.031 y para el arreglo 2 es de -0.0279 , demostrando que la pendiente del arreglo 1 es mayor, ya que el decrecimiento en la sensibilidad es de 10%, por lo tanto el arreglo que tiene mayor sensibilidad es el arreglo 1.

En la figura 4.8 se presentan los resultados de la comparación de las pendientes del arreglo 1 con el arreglo 2, colocando la placa polarizadora a 90° .

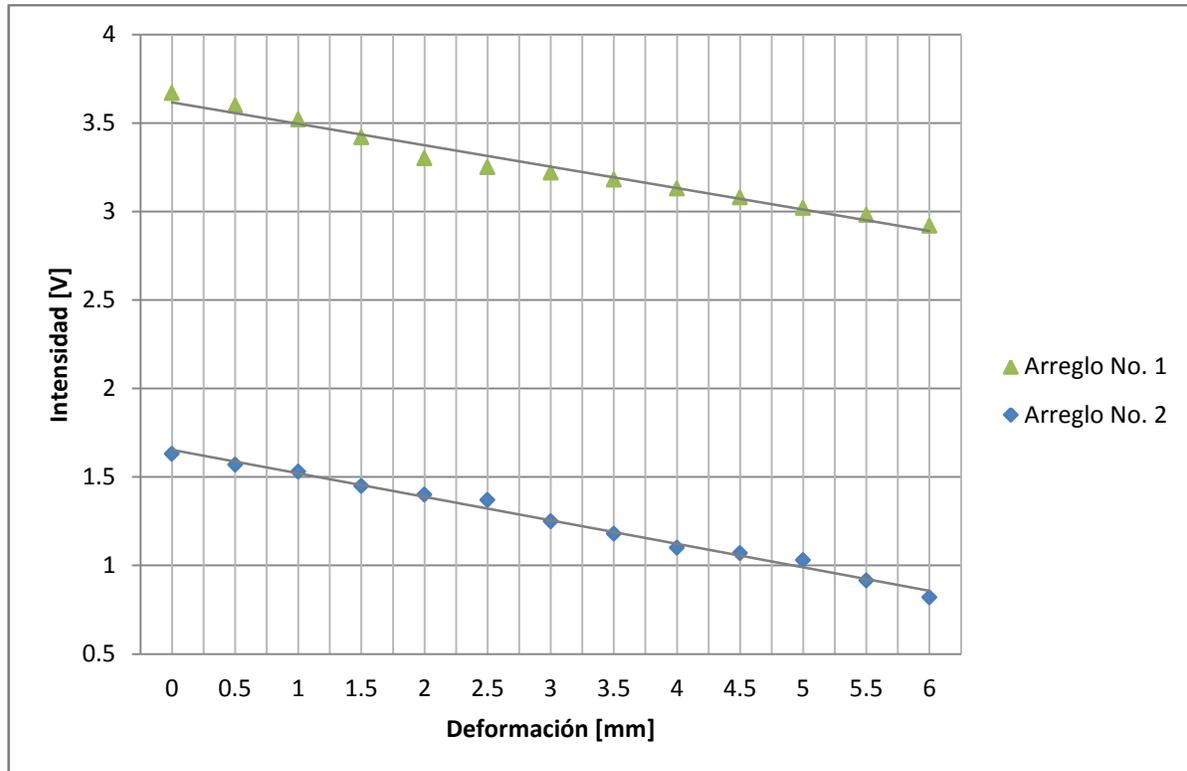


Figura 4.8. Gráficas y líneas de tendencia colocando la placa polarizadora a 90° .

La figura 4.8, muestra un comportamiento decreciente de las pendientes, como en los casos anteriores, se realizó una comparación de éstas y se obtiene que el valor de la pendiente del arreglo 1 es de -0.0606 y del arreglo 2 es de -0.063 , en este caso el arreglo 2 es el que tiene un poco más de sensibilidad, ya que el porcentaje en la disminución es de 9%.

4.3. Conclusiones

Se concluye que el mejor arreglo para poder implementar un sensor de tipo intensidad es el arreglo 1, ya que al hacer dicho análisis se observa que las pendientes del arreglo indican que tiene mayor sensibilidad, mientras que el arreglo 2, tienen las pendientes más pequeñas, esto cuando se midió con el extremo receptor de la fibra óptica conectada directamente al fotoreceptor.

Un segundo análisis es comparar las pendientes del arreglo 1 con las pendientes del arreglo 2, cuando fue colocada una placa polarizadora a 0° , 90° , 45° y -45° . Concluyendo que el arreglo 1, sigue teniendo mayor sensibilidad que el arreglo 2.

Este estudio se hizo para conocer los efectos de polarización en sensores de tipo intensidad y con este análisis se demuestra que la sensibilidad del sensor del arreglo 1 es mayor con la fibra embobinada y además de que la polarización no cambia.

Por lo tanto el sensor funciona para medir la intensidad y de la obtención del análisis de las pendientes se demuestra que el arreglo 1 tiene más sensibilidad que el arreglo 2, debido a que la pendiente es mayor.

Conclusiones generales.

En este trabajo de tesis se realizó un análisis experimental de dos arreglos de fibra óptica embebida en fibra de vidrio.

El primer arreglo consistió de embeber fibra óptica embobinada en el material compuesto que fue fibra de vidrio (arreglo 1), el segundo arreglo fue con fibra óptica estirada embebida en el material compuesto que fue fibra de vidrio (arreglo 2). A partir del análisis mencionado se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ Se realizó una investigación experimental de las características de un nuevo sensor óptico de tipo intensidad embebido en un material compuesto, fibra de vidrio.
- ✓ Al realizar una comparación de pendientes entre los dos arreglos se demuestra que el arreglo 1 tiene menos pérdidas en la sensibilidad del arreglo 2.
- ✓ Al colocar la placa polarizadora a diferentes grados se comprueba que la sensibilidad no mejora, por lo tanto el colocar la placa polarizadora en el sensor no funciona para la sensibilidad.
- ✓ Se mostró la posibilidad de utilizar la fibra óptica embobinada embebida en fibra de vidrio, para obtener una mayor sensibilidad en un sensor.
- ✓ Los nuevos conocimientos obtenidos en el presente trabajo forman una base para el diseño de sensores embebidos en materiales compuestos.

Referencias.

- [1] P. Lesiak; M. Szelaġ; M. Kuczkowski; A. W. Domański and T. R. Woliński, "Highly birefringent polymer microstructured optical fibers embedded in composite materials", *Proc. SPIE 8794, Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, 2013.
- [2] Ing. Gustavo F. Arenas, "Desarrollo de sensores de fibra óptica: aplicación de interferómetro Fizeau al estudio de polímeros" tesis, Universidad Nacional del Mar, Facultad de Ingeniería, Departamento de física, Argentina, 2009.
- [3] Hewitt, Paul G. *Conceptual Physics*. USA, Ed. Prentice Hall, 2002.
- [4] Jean Claud Bocquet, Pierre Lecoy and Didier Baptiste, "Optical sensors embedded in composite materials", *Proc. SPIE 1588, Fiber Optic Smart Structures and Skins IV*, 210 (December 1, 1991).
- [5] P. R. Herczfeld, L. Bobb, M. A. El-Sherif, L. R. Kawase, and F. K. Ko, "Embedded fiber-optic sensor utilizing the modal power distribution technique," *Opt. Lett.* 15, 1990, pp. 1242-1244.
- [6] Rivera, E., Thomson, D.J., Polyzois, D., "Structural health monitoring of composite poles using fiber optic sensors," in *Electrical and Computer Engineering, 2002. IEEE CCECE 2002. Canadian Conference on*, vol.1, pp.479-482, 2002.
- [7] Rodríguez Montes, Julián, Castro Martínez, Lucas, del Real Romero, Juan Carlos, *Procesos Industriales para Materiales Metálicos*, Segunda edición, Ed. Vision Net.
- [8] Gazechim composites Ibérica, "Propiedades resina de poliéster". Septiembre 2013. [Online]. Available: <http://www.gazechim.es/blog/131-resina-poliester1.html>
- [9] Bendezú Reyes, José Humberto, Los plásticos reforzados en fibra de vidrio (PRFV), sus aplicaciones y desarrollo en la industria nacional. Tesis, (Ingeniero Industrial). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería industrial, ON, Perú, 2012.
- [10] A. Besednjak, "Los materiales compuestos". [Online]. Available: <file:///C:/Users/usuario/Downloads/Los%20materiales%20compuestos.pdf>
- [11] Tecnología de los plásticos, "Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, proceso de transformación: Polipropileno". Junio, 2011. [Online]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/06/polipropileno.html>

- [12] Mikell P. Groover, *Fundamentos de Manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*, 1ª. Ed. EUA, Prentice-Hall, 1997.
- [13] “Materiales compuestos de matriz polimérica” [Online]. Available: <http://neetescola.com/materiales-compuestos-de-matriz-polimerica/>
- [14] “Banda matriz metálica” [Online]. Available: <http://nicadent.com/portfolio/banda-matriz-metalica/#prettyPhoto>
- [15] “Composite matriz cerámica” [Online]. Available: <http://www.schunk.es/es/sib/Aplicaciones%20de%20fricci%C3%B3n/schunk01.c.39112.es>
- [16] Tecnología de los plásticos, Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado, “*Materiales compuestos*” [Online]. Available: www.tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/07/materiales-compuestos.html
- [17] X. Fuentes Arderiu, M.J. Castiñeiras Lacambra, J.M. Queralto Compañó, “*Bioquímica clínica y patología molecular*”, 2nd ed. Reverté.
- [18] “Materiales compuestos” [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/raecabrera/capitulo-4-materiales-compuestos-9247042>
- [19] Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai, *Composite materials: Design and applications*, 3ra ed. Ed. CRC PRESS.
- [20] F L Matthews,G A O Davies,D Hitchings,C Soutis, *Finite element modeling of composite materials and structures*, Ed. CRC Press, 2000.