



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

CLINÓMETRO ÓPTICO PARA LA MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO VERTICAL EN ESTRUCTURAS CIVILES

Tesis que presenta

Ing. Juan de Jesús Lara Gordillo

Como requisito para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

Director de tesis:

Dr. Jorge Luis Camas Anzueto

Asesores:

Dr. Rubén Grajales Coutiño

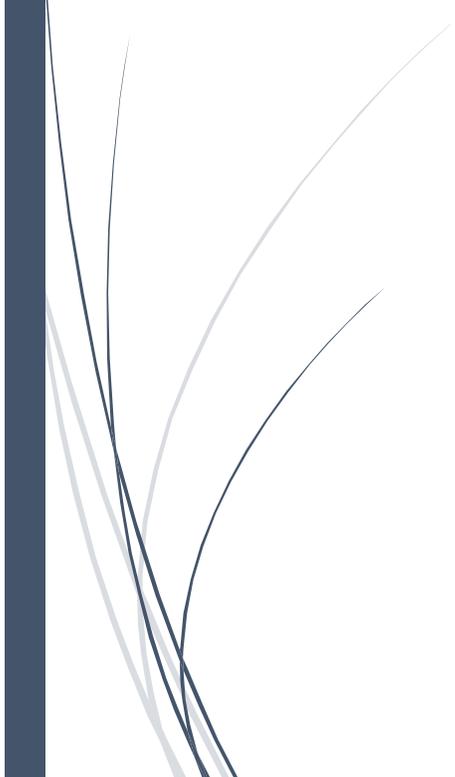
M.C. Rafael Mota Grajales

Tutor:

Dr. Madaín Pérez Patricio

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

marzo 2019



Hoja de autorización

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por estar conmigo, darme la vida y confianza, que me ha permitido superar una etapa más de mi formación profesional. Por hacer todo mucho más abundantemente de lo que pedí en esta etapa de mi vida, según su gracia y misericordia.

A mi familia que siempre ha estado a mi lado, apoyándome con mucho cariño el grado de compromiso que durante muchos años he adquirido con mi profesión.

Al Dr. Jorge Luis Camas Anzueto, por su confianza, apoyo y orientación en la realización de este trabajo de tesis. Por su paciencia y todos los conocimientos brindados. Es un placer conocerlo y trabar con usted.

Deseo expresar mi gratitud a los miembros del comité de tesis: Dr. Rubén Grajales Coutiño, M.C. Rafael Mota Grajales: por sus críticas, ideas y aportaciones en el desarrollo de este trabajo de tesis.

Al Dr. Carlos Ríos Rojas quien brindo su amistad y apoyo personal en la realización de trámites necesarios para la obtención de la beca, supliendo con creces sus funciones en el tiempo que estuvo como coordinador.

A mis compañeros de generación: Antonio Pérez Cruz, Juan Antonio Gutiérrez, Noé Moisés Luna Aguilar, Marco Antonio Palacios Ramos, Gilbert Francis Pérez García; por su apoyo, su compañerismo y su amistad. Que sin duda hicieron de éste el mejor lugar para trabajar y para vivir. Por todos los consejos, ánimos, risas y todos los buenos momentos en las aulas, en el laboratorio y fuera de él. Ha sido una suerte y un placer haber hecho este viaje con todos ustedes.

Al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme el apoyo económico durante la realización de mis estudios de maestría. Siendo beneficiario de su programa de becas con numero de CVU 890637.

Dedicatoria

Al único sabio Dios quien me ha dado gracia, sabiduría y conocimiento; a lo largo de este proceso, colmando así mis días de favorables alegrías para mi futuro ejercicio profesional. Pues sin la ayuda del Todopoderoso nada somos.

A mis padres Juan Abenamar Lara Pinto y Flor de María Gordillo Torres por darme todo su amor y apoyo incondicional, lo que ha permitido alcanzar cada uno de mis logros y metas, a ti Joel Alejandro Lara Gordillo por ser el mejor hermano en la vida. Por su apoyo, paciencia, cariño y comprensión. Eternamente agradecido.

Resumen

En esta investigación se presenta una propuesta experimental del diseño y desarrollo optomecatrónico de un sensor de inclinación (inclinómetro), basado en la modulación de intensidad, la cual se relaciona experimentalmente en función de pérdidas provocadas por macrocurvaturas y tensión en una fibra monomodo y multimodo.

El inclinómetro utiliza un engrane-cremallera, que cuando el eje principal del mecanismo sufre una inclinación, se modifica la trayectoria de la luz debido al cambio de curvatura y tensión en la fibra óptica.

Para la caracterización del sensor se empleó una fuente de luz y un medidor de intensidad para pruebas de laboratorio. Se observó en la configuración experimental propuesta, que a mayor ángulo de inclinación mayor pérdida de intensidad óptica experimenta.

El inclinómetro propuesto aún tiene un prometedor rango de inclinación, ya que permite inclinarse de 0° a 10° en una sola dirección; o de $\pm 5^\circ$ de izquierda a derecha. De todo esto, experimentalmente se obtuvo la ecuación característica de su comportamiento, la resolución y la sensibilidad del inclinómetro. Los resultados de la configuración experimental seleccionada muestran una resolución de 0.25° , una sensibilidad de $0.24083 \text{ mW}/^\circ$, un tiempo de respuesta y recuperación de un milisegundo.

Se realizaron pruebas experimentales para determinar las pérdidas de conexión de la fibra óptica en el mecanismo de inclinación, también se realizó el cálculo de estabilidad temporal, una prueba experimental del tiempo de respuesta y tiempo de recuperación del sensor, además de una prueba de simulación de la vibración de un sismo en tiempo real.

Abstract

This research presents an experimental proposal of the optomechatronic design and development of an inclination sensor (inclinometer), based on intensity modulation, which is experimentally related to losses caused by macrocurvatures and tension in a single-mode and multimode fiber.

The inclinometer uses a gear-rack, which when the main axis of the mechanism suffers an inclination, the light path is modified due to the change of curvature and tension in the optical fiber.

For the characterization of the sensor a light source and an intensity meter were used for laboratory tests. It was observed in the proposed experimental configuration, that the greater the inclination angle the greater the loss of optical intensity it experiences.

The proposed inclinometer still has a promising range of inclination, since it allows tilting from 0° to 10° in one direction; or $\pm 5^\circ$ from left to right. From all this, the characteristic equation of their behavior, resolution and sensitivity of the inclinometer was obtained experimentally. The results of the selected experimental configuration showed a resolution of 0.25° , a sensitivity of $0.24083 \text{ mW} / ^\circ$, a response and recovery time of one millisecond.

Experimental tests were performed to determine the loss of fiber optic connection in the inclination mechanism, the calculation of temporal stability, an experimental test of the response time and recovery time of the sensor was also performed, in addition to a simulation test of the vibration of an earthquake in real time.

Índice general

Agradecimientos.....	III
Dedicatoria.....	V
Resumen.....	VI
Abstract.....	VII
Lista de símbolos.....	XVIII
Nomenclatura.....	XXI
Capítulo 1.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Estado del arte.....	3
1.3 Definición del problema.....	6
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 General.....	7
1.4.2 Específicos.....	7
1.5 Justificación.....	7
1.6 Hipótesis.....	8
Capítulo 2.....	9
2.1 Sistemas optomecatrónicos.....	9
2.2 La luz.....	10
2.2.1 Teorías de la luz.....	10
2.2.2 Espectro electromagnético y características de la luz.....	11

2.3	Fibra óptica	13
2.3.1	Composición de una fibra óptica	13
2.3.2	Propagación de la luz en una fibra óptica.....	14
2.3.3	Fibra multimodo	17
2.3.4	Fibra monomodo	20
2.3.5	Pérdidas de potencia óptica.....	21
2.4	Sensores de fibra óptica	25
2.4.1	Estructura básica de un sensor de fibra óptica	25
2.4.2	Clasificación de los sensores de fibra óptica.....	26
2.4.3	Sensores de intensidad basados en fibra óptica	28
2.4.4	Sensores basados en interferómetros de fibra óptica.....	31
2.4.5	Sensores basados en rejillas de Bragg grabadas en fibra óptica.	38
Capítulo 3	41
3.1	Estudio de generación de inclinación de edificios.....	41
3.1.1	Partes de un edificio.....	41
3.1.2	Daño estructural en columnas después de un sismo.....	42
3.1.3	Normas de reconstrucción de columnas por sismo.....	43

3.2	Desarrollo y construcción de mecanismo	45
3.3	Funcionamiento del arreglo experimental	47
3.3.1	Configuración experimental	47
3.4	Esquema general de configuración experimental	53
3.4.1	Esquemas de configuraciones experimentales.....	55
Capítulo 4	57
4.1	Resultados	57
4.1.1	Resultados con la fuente de luz visible (fuente DH-mini).....	58
4.1.2	Resultados con láser rojo	62
4.1.3	Resultados con láser LPSC-1550-FC	66
4.1.4	Tiempo de respuesta y tiempo de recuperación.....	83
4.1.5	Comportamiento del sensor en tiempo real	87
4.1.6	Pérdidas de potencia óptica por instalación de fibra óptica en mecanismo de inclinación.....	90
Capítulo 5	93
	Conclusiones y recomendaciones	93
Anexo A	96
A.1	Participación al congreso “XV Semana Nacional de Ingeniería Electrónica” ...	96

A.2 Participación al “XV Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico”	97
A.3 Artículo de congreso SENIE 2019	99
A.4 Artículo de congreso CIINDET 2019	100
A.5 Artículo publicado en revista Pistas Educativas Vol. 41, Núm. 134 (2019) Número Especial: Difusión del conocimiento 2019.....	101
Bibliografía	102

Índice de figuras

Figura 2.1 Espectro electromagnético.....	12
Figura 2.2 Estructura de fibra óptica.	13
Figura 2.3 Representación del fenómeno de refracción y reflexión.	14
Figura 2.4 Representación de la reflexión total interna.....	15
Figura 2.5 Reflexión total interna de la fibra óptica.	17
Figura 2.6 a) Perfil de fibra de índice escalón b) Perfil de fibra índice gradual.....	18
Figura 2.7 Propagación de modos en fibra óptica de índice escalón.....	19
Figura 2.8 Propagación de modos en una fibra de índice gradual.....	20
Figura 2.9 Perfil y propagación de modos de una fibra óptica monomodo.	21
Figura 2.10 La luz es dispersada en múltiples direcciones.....	22
Figura 2.11 Pérdidas por reflexión de Fresnel	23
Figura 2.12 Pérdidas por macrocurvaturas.	24
Figura 2.13 Diferencias de pérdidas por flexión.....	24
Figura 2.14 Esquema de un sensor de fibra óptica.....	26
Figura 2.15 Esquema de un sensor de fibra óptica extrínseco.	27
Figura 2.16 Esquema de un sensor de fibra óptica intrínseco.	27
Figura 2.17 Sensor de vibración por modulación de intensidad.	28

Figura 2.18 Sensor de presión por modulación de intensidad.....	28
Figura 2.19 Sensor de nivel con modulación de intensidad.....	29
Figura 2.20 estructura de un sensor de evanescencia.	30
Figura 2.21 Sensor de intensidad por macrocurvaturas.	30
Figura 2.22 Sensor interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica.	32
Figura 2.23 Variación de intensidad a la salida del interferómetro en función de diferencia de fase entre los dos brazos.....	33
Figura 2.24 Sensor interferómetro Michelson de fibra óptica.....	34
Figura 2.25 El efecto Sagnac.	36
Figura 2.26 Configuración típica de un (FOG).	37
Figura 2.27 diagrama esquemático de una rejilla.	38
Figura 2.28 Esquema de un sistema de medición con rejillas de Bragg.....	39
Figura 3.1 Partes de una estructura civil.....	41
Figura 3.2 Accion de sismo y ciclón sobre una estructura civil.	42
Figura 3.3 Tipos de fallas en columnas de concreto.....	43
Figura 3.4 Inclinación de entrepisos por falla de columna.	43
Figura 3.5 Diseño y acotaciones en milímetros de engrane.	45
Figura 3.6 Diseño y acotaciones en milímetros de cremallera.....	46
Figura 3.7 Partes de mecanismo, vista a detalle de polea y sujetador de fibra.	47

Figura 3.8 Fuente de luz DH-mini de Ocean Optics.....	48
Figura 3.9 Fuente de luz LED M365FP1.....	48
Figura 3.10 Láser rojo (630-650 nm).....	49
Figura 3.11 Láser LPSC-1550-FC.....	49
Figura 3.12 Fibra monomodo y multimodo.....	50
Figura 3.13 Fotodiodo S150C.	51
Figura 3.14 Fotodiodo S122C.	51
Figura 3.15 Medidor de potencia PM320E.....	52
Figura 3.16 Medidor de potencia PM100USB.....	53
Figura 3.17 Configuración experimental y puntos de conexión.	53
Figura 3.18 Fibra optica con conectores FC en cada extremo.	54
Figura 3.19 Configuración experimental para fuente de luz DH-mini.....	55
Figura 3.20 Configuración experimental para fuente de luz láser rojo.....	55
Figura 3.21 Configuración experimental para fuente de luz láser LPSC-150-FC.	56
Figura 3.22 Configuración experimental para el interferómetro de Sagnac.....	56
Figura 4.1 Inclínómetro en posición inicial.	57
Figura 4.2 Inclínómetro con rotación.	58
Figura 4.3 Intensidad relativa y espectrómetro de fuente DH-mini.	58

Figura 4.4 Configuración experimental para obtener el cambio del espectro del movimiento del inclinómetro con fuente de luz DH-mini.	61
Figura 4.5 Gráfica del comportamiento del inclinómetro con la fuente DH-mini.	61
Figura 4.6 Intensidad y espectro del sensor inclinado de 0° a 10° con una resolución de 2° con la fuente de luz Dh-mini.	62
Figura 4.7 Intensidad relativa y espectrómetro del diodo láser.....	63
Figura 4.8 Configuración experimental para obtener el cambio en el espectro del movimiento del inclinómetro con láser rojo.	64
Figura 4.9 Cambio de intensidad cuando el ángulo de inclinación se incrementa de 0° a 10°, con resolución de 0.5° con láser rojo.....	65
Figura 4.10 Intensidad y espectro del sensor inclinado de 0° a 10° con una resolución de 2° con el láser rojo.....	65
Figura 4.11 Comportamiento de la temperatura en función de la resistencia del termistor.	67
Figura 4.12 Control de temperatura de láser LPSC-1550-FC.....	68
Figura 4.13 Estabilidad temporal de laser LPSC-1550-FC	69
Figura 4.14 Estabilidad temporal de laser LPSC-1550-FC con acercamiento.....	69
Figura 4.15 Resultados de comportamiento del inclinómetro con fibra monomodo ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.5°.....	71

Figura 4.16 Resultados de comportamiento del inclinómetro con fibra multimodo ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.5°	72
Figura 4.17 Resultados de comportamiento del inclinómetro con interferómetro de Sagnac ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.5°	73
Figura 4.18 Resultados de comportamiento del inclinómetro con fibra monomodo ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.25°	75
Figura 4.19 Resultados de comportamiento del inclinómetro con fibra multimodo ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.25°	76
Figura 4.20 Resultados de comportamiento del inclinómetro con interferómetro de Sagnac ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.25°	77
Figura 4.21 Esquema de configuración para la obtención de estabilidad temporal de las configuraciones de fibra óptica.	79
Figura 4.22 Estabilidad temporal de la fibra monomodo.	80
Figura 4.23 Estabilidad temporal monomodo con acercamiento.	80
Figura 4.24 Estabilidad temporal fibra multimodo.	81
Figura 4.25 Estabilidad temporal fibra multimodo con acercamiento.	81
Figura 4.26 Estabilidad temporal del interferómetro de Sagnac.	82
Figura 4.27 Estabilidad temporal del interferómetro de Sagnac con acercamiento. ..	82
Figura 4.28 Esquema de configuración para la obtención de tiempo de respuesta y tiempo de recuperación.	84

Figura 4.29 Gráfica que ilustra el tiempo de respuesta y el tiempo de recuperación.	85
Figura 4.30 Gráfica que ilustra el movimiento de 0° a 10°, además se observa el valor del tiempo en 0° antes de la inclinación.	85
Figura 4.31 Gráfica que ilustra el momento que el sensor llega a 10°, se observa el valor del tiempo a 10°.....	86
Figura 4.32 Gráfica que ilustra el movimiento de 10° a 0°, se observa el valor del tiempo a 10°.....	86
Figura 4.33 Gráfica que ilustra el movimiento de 10° a 0°, se observa el valor del tiempo a 0°.....	87
Figura 4.34 Comportamiento del sensor en tiempo real en una inclinación de 0° a 10° con resolución de 1°.....	88
Figura 4.35 Respuesta del inclinómetro ante la simulación de un sismo en tiempo real.	90
Figura 4.36 Puntos de conexión de la fibra óptica.....	91
Figura 4.37 Pérdidas de potencia óptica de conexión de fibra óptica en mecanismo de inclinación.....	92

Lista de símbolos

Mayúsculas

AN	Apertura numérica de la fibra
E	Energía del fotón en julios
D	Diámetro de núcleo de fibra óptica
HZ	Ciclos por segundos (Hertz)
P	Potencia (velocidad a la cual se libera energía)
P_d	Potencia que cae en el fotodetector
P_o	Potencia de entrada
R	Radio
L	Longitud del anillo
L_H	Sentido horario
L_{A-H}	sentido antihorario
N	Cambio neto entre haces propagantes
N_M	Número máximo de modos de luz
Z_R	Cambio neto de franjas de interferencia
A	Área encerrada por la bobina

Minúsculas

f	Frecuencia
c	Velocidad de la luz en el medio
h	Constante de Planck
s	Segundos
n	Índice de refracción
n_1	índice de refracción del primer medio
n_2	índice de refracción del segundo medio
n_{ef}	Índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica
v	Rapidez de la luz en el material
km	Unidad de medida en kilómetros
m	Unidad de medida en metros
mm	Unidad de medida en milímetros
cm	Unidad de medida en centímetros
nm	Nanómetro
dB	Decibel
h	Constante de Planck
t	Tiempo

Letras griegas

\varnothing_c	Ángulo crítico de incidencia
\varnothing_1	Angulo de incidencia del primer medio
\varnothing_2	Angulo de incidencia del segundo medio
λ	Longitud de onda de la luz en metros
λ_B	Longitud de onda central de reflexión de una rejilla de Bragg
μm	Micrometro
$\Delta\phi$	Cambio de fase por perturbación externa}
Δt	Cantidad de tiempo que tarda la luz en atravesar el anillo
ΔL	Diferencia total de camino óptico
Δ_B	Periodo de la perturbación
Ω	Velocidad de rotación del anillo

Nomenclatura

CNPC	Comisión nacional de protección civil
EEM	Espectro electromagnético
FBG	(Fiber Bragg Grating) Rejilla de Fibra de Bragg
FOG	Giroscopios de fibra Óptica
LPG	(Long Period Grating) Rejillas de Periodo Largo
MEMS	(Microelectromechanical Systems) Sistemas Microelectromecánicos
NIR	Infrarrojo cercano
OSA	(Optical Spectrum Analyzer) Analizador de espectros ópticos
SHM	(Structural Health Monitoring) Monitoreo de Salud Estructural
SSN	Servicio Sismológico Nacional
TFBG	(Tapered-tilted Fiber Bragg Grating) Rejillas de Bragg de Fibra cónica inclinada
TTL	(transistor-transistor logic) Lógica Transistor Transistor
UV	Ultravioleta
VIS	Visible
YAG	Granate de aluminio itrio

Capítulo 1

Caracterización del proyecto

1.1 Antecedentes

Actualmente el Servicio Sismológico Nacional (SSN) registra en nuestro país en promedio 70 sismos diarios, los cuales son monitoreados a través de sus 109 estaciones remotas. Generalmente los sismos de mayor magnitud tienen epicentros en los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero; estos sismos tienen una magnitud entre 2° a 5.5° en la escala de Richter.

Las estructuras civiles sufren daños que afectan su desempeño ante las acciones sísmicas, entre los que predominan: la edad de la construcción, ausencia de un programa de mantenimiento, la presencia de daños por eventos sísmicos ocurridos previamente, carga extrema, y otros. El daño se acumula gradualmente, aunque en ocasiones no se observen grietas o deformaciones, los daños internos pueden ser suficientes para no resistir un sismo futuro o una falla bajo cargas extremas.

Los sismos en el transcurso de la historia han provocado innumerables desastres, ocasionando en todo momento que las estructuras civiles se deterioren, y pierdan así utilidad y beneficio para el ser humano, por lo cual es importante conocer estos daños para prevenirlos, corregirlos y conocer el estado de dicha estructura en tiempo real.

El proceso de implementar una estrategia de identificación de daños en una estructura se denomina como Monitoreo de Salud Estructural (SHM, Structural Health Monitoring), esta área de investigación busca evaluar en tiempo real, las condiciones de las estructuras, para determinar, cuantificar y localizar daños en la misma, además de predecir la vida útil de la estructura [1]. Las áreas importantes en monitorear en una estructura civil son: cimientos, columnas y vigas.

Por tal motivo surge la necesidad de monitorear la inclinación que sufren las columnas en dichas estructuras, el inclinómetro es el instrumento de medición diseñado y usado en una amplia gama de aplicaciones, para medir con precisión los cambios en la inclinación. El sensor de inclinación (también conocido como inclinómetro) crea un horizonte artificial y mide la inclinación con respecto a este [2].

Los sensores de inclinación convencionales se basan directamente en mecánicos y de gravedad. Los sensores de inclinación mecánicos constan dos barras, un transportador y un nivel de burbuja, mediante el nivel de burbuja se verifica que una de las barras este horizontal (cero grados o punto de referencia), la segunda barra se pone en contacto con el objeto que se pretende medir su inclinación y por medio de un transportador se verifica la inclinación.

Existen también inclinómetros de gravedad o también conocidos como inclinómetros de péndulo, tienen un arco graduado como transportador y un péndulo, el principio fundamental de este inclinómetro es la influencia de la gravedad en el péndulo ante una inclinación. El péndulo tiende a permanecer vertical cuando la carcasa del inclinómetro se gira alrededor de un eje horizontal, en consecuencia, existe una rotación de la carcasa con respecto al péndulo, el arco graduado sirve para conocer dicha inclinación [3].

Los sensores de inclinación de Sistema Microelectromecánicos (MEMS) son de tipo capacitivos, electrolíticos y líquidos. Los sensores capacitivos [4] están diseñados para tomar medidas sin contacto de la inclinación, poseen buena estabilidad, bajo costo y consumo de energía, buena velocidad y resolución, son fáciles de integrar en un circuito impreso o integrados; sin embargo, se ven afectados por la humedad, la temperatura y son sensibles al ruido [5].

Los sensores electrolíticos [6] son baratos y pueden producir mediciones precisas de inclinación; por el contrario, solo tienen excelente repetibilidad e estabilidad a bajas frecuencias, son dispositivos complejos para entender su instalación y operación, se

convierten en dispositivos sensibles a influencias externas e internas. Los sensores líquidos [7] tienen un precio económico, por el contrario, son frágiles y su proceso de ensamblaje es costoso y complejo [5].

1.2 Estado del arte

Los inclinómetros convencionales que se utilizan ampliamente en ingeniería civil para medir la inclinación en columnas no son adecuados para el Monitoreo de Salud Estructural (SHM por sus siglas en inglés, Structural Health Monitoring), porque no permiten el monitoreo en tiempo real, son demasiados voluminosos, requieren transmisiones de largas distancias sin pérdida de señal e interferencia electromagnética, cableado fácil, resistencia ambiental, como ser impermeable, resistente a altas temperaturas y resistente a la corrosión [8].

En los últimos años, los sensores de fibra óptica se han utilizado comúnmente para numerosos tipos de detección física tales como desplazamiento [9] [10], medición de concentración [11], medición de humedad [12], presión [13], temperatura [14], control de nivel de líquido [15] y detección de fuerza transversal [16].

Actualmente los sensores de fibra óptica están siendo utilizados en el área de aplicación de SHM, porque la tecnología de fibra óptica presenta mayores ventajas que los sensores electrónicos convencionales, los sensores de fibra óptica se pueden usar para monitoreo distribuido a gran escala, inmunidad de interferencia electromagnética, alta sensibilidad, peso liviano, buena adaptabilidad en forma, aislamiento eléctrico y una larga vida útil. Los sensores de fibra óptica pueden aumentar o disminuir el número de sensores según los requisitos del sistema. Son fáciles de instalar y pueden ser monitoreados en tiempo real [17].

Los sensores de fibra óptica se emplean en muchas aplicaciones en SHM, como monitoreo de estabilidad de estructuras en áreas de deslizamientos de tierra [18] [19], monitoreo estructural de edificios y carreteras [20], el monitoreo de inclinación de torres

o pilares en puentes [21], en estructuras geotécnicas [22], vibraciones de suelo [23] y otras áreas de monitoreo de salud estructural [24].

Los inclinómetros de fibra óptica se han desarrollado con base a varios esquemas, que incluyen principalmente dos tipos de dispositivos de fibra basados en rejillas e interferómetros. En los últimos años, la mayoría de los inclinómetros de fibra óptica se basan en rejillas de Bragg (FBG) que utilizan diferentes mecanismos de inclinación, Chao et al. investigó un sensor de inclinación de fibra óptica basado en dos flotadores cilíndricos, suspendidos en agua conectados por rejillas de Bragg (FBG), una fuente de luz de banda ancha y un circulador óptico.

La inclinación es proporcionada manualmente rotando el contenedor. La superficie del líquido que se encuentra en el contenedor formará un nuevo plano equilibrado, entonces la fuerza de flotación de los cilindros provocará que uno de los FBG se estire y el otro se contraiga, por lo tanto, ocurre un cambio de longitud de onda, que es monitorizado en un analizador de espectro óptico (OSA) [17].

Moura et al. presentan un inclinómetro óptico basado en rejillas de Bragg desplazadas en fase en una topología cónica, se desarrollaron dos rejillas de Bragg con un láser femtosegundo, la región cónica por medio de una plataforma de procesamiento de vidrio (VYTRAN), ambas con longitudes de 45mm, que difieren solamente en la cintura del cono una con 30 μm y el otro con 50 μm .

Para la interrogación del sensor se utilizó una fuente de luz de banda ancha y un analizador de espectros óptico (OSA), la inclinación se originó por una plataforma rotativa. Cuando el sensor es sometido a una rotación, la región cónica se deforma, lo cual altera las propiedades de las rejillas desplazadas en fase, generando un acoplamiento de luz que se propaga en el núcleo de fibra con el revestimiento, si el cono está doblado, la luz en la región de revestimiento se pierde en el entorno externo y su intensidad disminuye [25].

Algunas estructuras de inclinómetros con FBG que incluyen péndulos verticales [26] [27], existen configuraciones de fibra óptica como rejillas de periodo largo (LPG) [28], también se reportan con rejillas de Bragg de fibra cónica inclinada (TFBG) [29].

El principio de medición de los sensores FBG es recolectar la información, de la variación de la intensidad de salida o el desplazamiento de la longitud de onda; con respecto al ángulo de curvatura. Dichos dispositivos tienen buena confiabilidad, resolución y sensibilidad.

Por el contrario, requieren de una gran integración de detección, con equipo óptico sofisticado como circuladores y analizadores de espectros ópticos (OSA), para la interrogación de los sensores son colocados en plataformas giratorias. Requieren de un complicado proceso de fabricación y herramientas sofisticadas, como plataformas de procesamiento de vidrio (VYTRAN), llamas de hidrógeno para producir una conicidad en la fibra óptica y un láser de femtosegundo para realizar las rejillas de Bragg.

De la misma manera los sensores basados en interferómetros se han propuesto y demostrado, para medir los ángulos de inclinación. Amaral et al. investigó un interferómetro de Michelson, constituido mediante el uso de fibra cónica y rejillas de Bragg como sensor de flexión, el interferómetro se crea en la conicidad de la fibra y un espejo de baja reflectancia.

El estrechamiento acopla una fracción de luz del núcleo a los modos del revestimiento, que se propagarán a lo largo de la cavidad del interferómetro, luego se reflejan en el espejo, logrando interferencia entre el haz del núcleo y los modos de propagación del revestimiento. El eje de rotación/flexión pasa por el centro geométrico del cono, originando un cambio de fase del interferómetro en un rango de 0° a 7° , el procesamiento de la señal se basa en la medición de la potencia óptica, con un analizador de espectros ópticos (OSA) [30].

Nan-Kuang et al. propusieron un interferómetro de Mach-Zehnder, el cual consta de dos acopladores abruptos, que sirven como acopladores de 3 dB, realizados con una llama de hidrógeno y una fuente de luz blanca. El primer acoplado sirve como un divisor de potencia, para separar la luz en dos trayectorias ópticas diferentes, propagándose a través del cambiador de fase a lo largo del núcleo y el revestimiento respectivamente.

El segundo estrechamiento abrupto recombina las señales de núcleo dividido y el modo de revestimiento, para producir interferencias. El desplazador de fase sirve en la generación de una diferencia de fase entre las dos señales divididas, que es necesaria para lograr buena interferencia, el eje de rotación atraviesa el centro del cono, por lo tanto, cuando se inclina a un ángulo el estrechamiento también cambia, afectando el acoplamiento del modo del núcleo a los modos del revestimiento, la respuesta del sensor es registrada por medio de un analizador de espectros ópticos (OSA) [31].

La mayoría de los interferómetros, basan su funcionamiento en la interferencia óptica de múltiples ondas que se propagan en trayectorias diferentes en un segmento de fibra. Existen diferentes tipos de inclinómetros con configuraciones por medio de interferómetros como Michelson [30] [32], Mach-Zehnder [31] [33] [34], Fabry-Perot [35] [36] [37]. Estos tipos de inclinómetros; al igual que los FBG, requieren de equipo sofisticado para su caracterización, detección y riguroso control de fabricación.

Algunos casos reportan que no es posible operarlos de manera remota, lo que lo hace ineficaz en algunas aplicaciones, además si se quiere una precisión y resolución muy grande, el procesamiento de la señal obliga al uso de un analizador de espectros ópticos (OSA) [30].

1.3 Definición del problema

Debido a las constantes vibraciones provocadas por sismos, las columnas sufren daños imperceptibles que deben ser monitoreadas para salvaguardar la integridad de las personas que la habitan.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Desarrollar un clinómetro óptico aplicado a la medición en tiempo real del desplazamiento vertical para estructuras civiles en edificios, basado en la medición de potencia óptica generado por un mecanismo de fotodetección para la generación macrocurvaturas en fibra óptica.

1.4.2 Específicos

- Investigar la generación de inclinación de los edificios
- Diseñar un mecanismo de generación de cambio de un parámetro de la luz que viaja en la fibra óptica.
- Caracterizar el mecanismo en función a la inclinación en pruebas de laboratorio.
- Implementar prototipo y caracterizarlo en una estructura real
- Validar resultados obtenidos

1.5 Justificación

Hoy en día nos encontramos en una zona de la república mexicana con movimientos telúricos, a la cual es un riesgo constante para la población de la región. Debido a esto, la población vive con la incertidumbre que se tiene el no saber si un edificio se encuentra en un estado habitable. Para ello, es necesario utilizar metodologías de precisión para llevar a cabo la validación de la salud de la estructura civil en cuestión.

La tecnología óptica ofrece una resolución de 1×10^{-9} en la medición de desplazamientos ya sea laterales o verticales. El desarrollo de un inclinómetro con tecnología óptica ofrece una solución para tomar mediciones en tiempo real y que estaría ubicado de por vida en la estructura civil.

Esto daría certeza y seguridad de la salud de una estructura civil de un edificio para que la población adquiriera confianza para su estancia en ella.

1.6 Hipótesis

El clinómetro óptico podrá medir desplazamientos con una resolución de $\pm 0.25^\circ$ en estructuras civiles.

Capítulo 2

Fundamento teórico

2.1 Sistemas optomecatrónicos

El término mecatrónica fue usado por primera vez en 1969 por un ingeniero japonés, como la combinación de “meca” de la palabra mecanismos y “trónica” de la palabra electrónica. El término tiene ahora un significado más amplio, describe la integración coordinada y concurrente de diferentes disciplinas como sistemas de control inteligente basados en microcontroladores, sistemas mecánicos, sistemas electrónicos y manufactura de productos y procesos. Como resultado, da mayor flexibilidad, rediseño y reprogramación, y la capacidad de recopilar datos automatizados e informar [38].

El campo de la optomecatrónica es la combinación de la mecatrónica con los efectos relacionados de la óptica para el desarrollo eficiente de sensores. La fibra óptica brinda una gran cantidad de ventajas en comparación con los sensores convencionales, por ejemplos, eléctricos o mecánicos. Las ventajas de las técnicas optomecatrónicas son numerosas: mediciones sin contacto, y por lo tanto generalmente sin perturbaciones; muy alta resolución espacial y temporal; adaptable a superficies técnicas; rígido para uso industrial y excelente duración; y apropiado para diagnósticos de largo alcance, es decir, las distancias de medición pueden ser bastante grandes. Por tal motivo se han convertido en un importante campo de investigación [39].

El sistema optomecatrónico es, por lo tanto, un sistema integrado con elementos ópticos, elementos mecánicos, elementos eléctricos, electrónicos, y un sistema informático. Se han desarrollado productos y procesos con base en tecnología optomecatrónica, a continuación, mencionaremos algunas de estas aplicaciones. La cámara es un producto equipado con varias opciones optoeléctricas y elementos mecatrónicos con la finalidad de que el usuario pueda obtener imágenes de maneras más clara e idónea. Los movimientos mecánicos de un zoom, una lente de enfoque,

una apertura y un obturador están monitorizados y pueden controlarse por medios de pantallas táctiles o botones eléctricos.

La unidad de disco óptico es un sistema optomecatrónico; está compuesto por un cabezal óptico que tiene montado un diodo láser, un servo de foco de haz que mantiene el rayo láser enfocado y un servo que posiciona con precisión el cabezal óptico en la pista deseada [40].

2.2 La luz

2.2.1 Teorías de la luz

Para explicar la naturaleza de la luz los científicos proponen diferentes teorías que han cambiado al largo de la historia, a medida que se van descubriendo nuevas evidencias. La teoría corpuscular planteada en el siglo XVII por el físico Isaac Newton, señalaba que la luz consistía en un flujo de pequeñísimas corpúsculos o partículas sin masa que viajaban por el espacio a velocidad constante, emitidos por diferentes fuentes luminosas. Esta teoría explicaba con éxito la propagación rectilínea de la luz, la refracción y la reflexión, pero no explicaba el fenómeno de interferencias y difracción.

En forma prácticamente simultánea, Huygens proponía una teoría ondulatoria, explicaba la suposición de que la luz emitida por una fuente estaba formada por ondas, que correspondían al movimiento específico que sigue la luz al propagarse a través del vacío en un medio insustancial e invisible llamado éter. Esta teoría fue confirmada casi un siglo después gracias a los experimentos desarrollados por Young (interferencias) y Fresnel (difracción) [41].

En el siglo XIX se produjo un avance sustancial en la comprensión de la naturaleza de la luz. La teoría desarrollada por Maxwell dedujo que las cargas eléctricas oscilantes forman campos eléctricos y magnéticos, que se propagan por el espacio a una velocidad definida. Por lo tanto, la luz es una onda electromagnética transversal que se

propaga perpendicular entre sí. Heinrich Hertz (1887) produjo y detectó estas ondas y estableció que la luz es un tipo de ellas.

Max Planck establece que los intercambios de energía entre la materia y la luz solo son posibles por cantidades finitas o cuantos de luz. Posteriormente, basándose en la teoría cuántica de Planck, en 1905 el físico de origen alemán Albert Einstein presentó una explicación del efecto fotoeléctrico y postuló que la energía de un haz luminoso se hallaba concentrado en pequeños paquetes, a los cuales llamó cuantos de energía y que en el caso de la luz se llaman fotones los cuales viajan en el espacio a una velocidad constante de 300 000 000 m/s. Con esto propuso que la luz se comporta como onda en determinadas condiciones.

Finalmente, Broglie en 1924 unifica la teoría electromagnética y la de los cuantos (que provienen de la ondulatoria y corpuscular) demostrando la doble naturaleza de la luz [42].

2.2.2 Espectro electromagnético y características de la luz

La luz se comporta como una onda electromagnética y pertenece al espectro electromagnético (EEM). Se denomina frecuencia (f) al número de veces que oscila una onda en un segundo. La luz visible tiene una frecuencia de 2.3×10^{14} ciclos por segundos (HZ). Las frecuencias de la luz son mayores que las frecuencias de radio y televisión como se observa en la Figura 2.1.

La longitud de onda electromagnética (λ) es la longitud en metros correspondiente a un ciclo de una onda. La longitud de una onda de la luz visible está en el rango de 330 nm a 770 nm . Se denomina nanómetro a una millonésima parte de metro (nm). Existe una relación matemática entre la frecuencia y la longitud de onda se expresa en la ecuación (2.1). Donde c es la velocidad de la luz en el material en el cual se propaga. Con frecuencia en la luz es normal conocer el valor de la longitud de onda que de su frecuencia.

$$\lambda = c/f \quad (2.1)$$

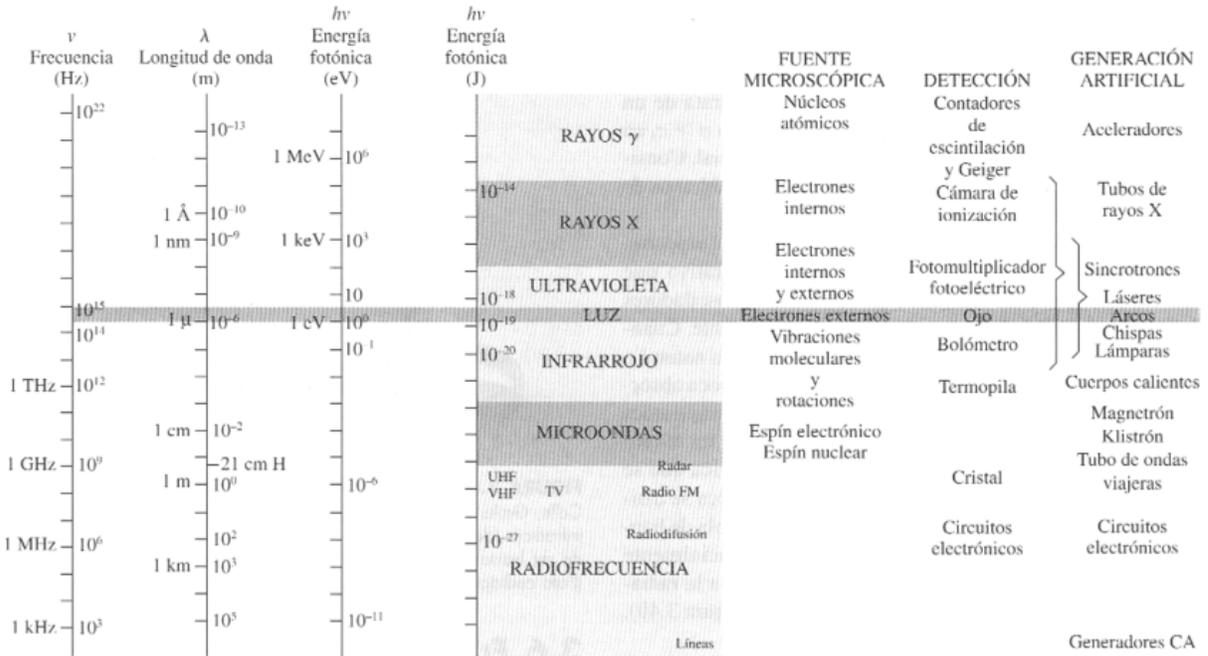


Figura 2.1 Espectro electromagnético.

La luz se transmite en el vacío a “la velocidad de la luz” según la teoría de la relatividad de Einstein a 299.8 Km/s . La luz también se comporta como un fotón y tiene una energía E que se puede calcular usando la ecuación (2.2), expresada en unidades llamadas julios.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

En la formula anterior, h es la constante de Planck, igual a $6.626 \times 10^{-34} \text{ julios/s}$, λ es la longitud de onda de la luz en metros, y c es la velocidad de la luz en el medio en el cual se propaga (en el vacío $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$). La potencia P se define como la velocidad a la cual se libera energía; por lo tanto, la potencia se puede expresar con la ecuación (2.3), donde t es el tiempo y E la energía de un fotón.

$$P = \frac{E}{t} \quad (2.3)$$

Con la formula anterior se puede explicar cómo los detectores son capaces de reconvertir la luz e energía eléctrica [43].

2.3 Fibra óptica

2.3.1 Composición de una fibra óptica

Una fibra óptica consiste en un material transparente cilíndrico y largo que confina y propaga ondas luminosas. Está compuesta de tres capas diferentes: el núcleo central que lleva la luz, el revestimiento que cubre el núcleo, y el recubrimiento que dota de protección al revestimiento [43].

La mayoría de las fibras ópticas están hechas de vidrio, aunque algunas están hechas de plástico. El núcleo y el revestimiento generalmente son vidrio de sílice fundido cubierto por un recubrimiento de un plástico o una cubierta acrílica, que protege la fibra de vidrio del daño físico y la humedad. Algunas fibras totalmente plásticas se utilizan para aplicaciones específicas. Las fibras ópticas de vidrio son el tipo más común utilizado en aplicaciones de comunicación, como se observa en la Figura 2.2 [44].

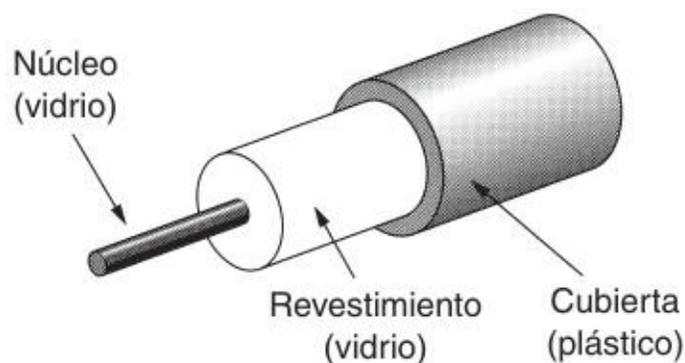


Figura 2.2 Estructura de fibra óptica.

2.3.2 Propagación de la luz en una fibra óptica

La dirección a lo largo de la cual se propagan las ondas de luz se denomina rayo de luz, esto nos determina las características de las fibras ópticas. Cuando un haz de luz cambia de medio, es decir, se encuentra con una superficie de frontera entre dos materiales, la luz es afectada en su velocidad, su dirección del haz y su longitud de onda, permaneciendo constante su frecuencia.

En esta sección usaremos el modelo de la luz basado en rayos para explorar dos de los aspectos más importantes de la propagación de la luz: reflexión y refracción. Cuando un rayo de luz se encuentra entre la frontera que separa a dos materiales transparentes (como el aire y el vidrio), el rayo de luz en general es reflejado parcialmente y también es refractado.

EL ángulo con el cual el rayo de luz choca con la frontera del medio se denomina *ángulo de incidencia*. En la frontera de los dos materiales, el rayo de luz se tuerce antes de seguir su trayectoria al segundo material. Este cambio de dirección se le denomina *refracción*. Además, cuando un rayo de luz pasa de un material a otro diferente, parte de la luz no entra al segundo material, sino que se *reflejada* de vuelta al primero, como se observa en la Figura 2.3 [45].

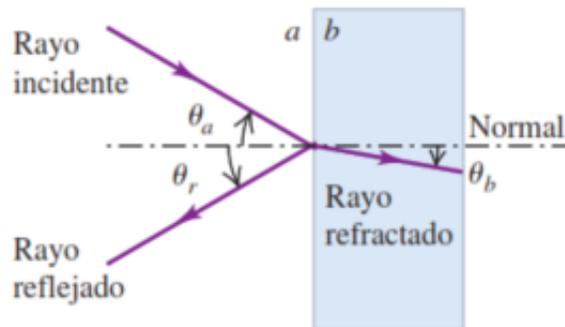


Figura 2.3 Representación del fenómeno de refracción y reflexión.

El *índice de refracción* de un material óptico, denotado por n en la ecuación 2.4, es la razón entre la rapidez de la luz c y v la rapidez de la luz en el material. La luz siempre

viaja con menos rapidez en cualquier material que en el vacío. Por lo que el valor de n en cualquier material es mayor a la unidad, para el vacío, $n = 1$ [45].

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.4)$$

Se ha descrito la forma en que la luz se transmite y se refleja parcialmente en la frontera de dos materiales. Sin embargo, si dos materiales con distintos índices de refracción y en ciertas circunstancias, se logra que toda la luz pueda reflejarse en la interfaz, sin que se transmita nada de ella, aun si el material es transparente. La Figura 2.5 muestra la forma en que esto ocurre.

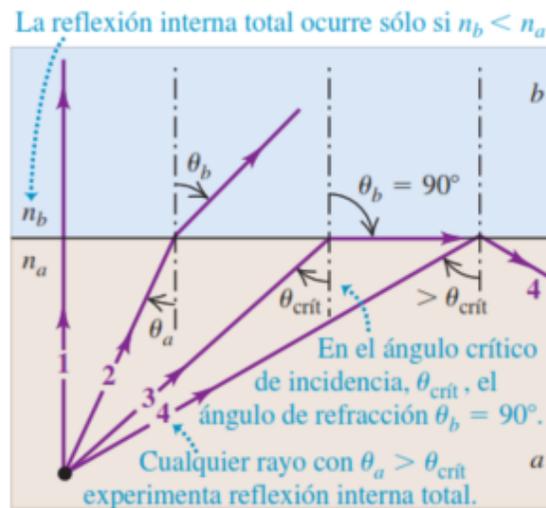


Figura 2.4 Representación de la reflexión total interna.

El *ángulo de incidencia* está relacionado matemáticamente con el *ángulo de refracción* de acuerdo con la ley de Snell (ecuación 2.5).

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (2.5)$$

Donde:

n_1 = índice de refracción del primer medio

n_2 = índice de refracción del segundo medio

ϕ_1 = Ángulo de incidencia del primer medio

ϕ_2 = Ángulo de incidencia del segundo medio

El corte de una fibra óptica es un proceso complicado, el cual requiere seccionar a una fibra óptica de tal manera que produzca una superficie plana y que sea perpendicular a la fibra. La refracción de un rayo de luz ocurre en un extremo de la fibra óptica, cuando el rayo de luz pasa de aire al medio que conforma el núcleo de la fibra.

El guiado del rayo de luz en una fibra óptica es posible a través de un efecto llamado *reflexión total interna*, se logra cuando se cumple la condición $n_1 > n_2$, donde, n_1 es el índice de refracción del núcleo, y n_2 el índice de refracción del revestimiento. El haz de luz viaja a través del núcleo de la fibra mediante una serie de reflexiones sucesivas, a medida que aumenta el ángulo de incidencia del rayo de luz, se alcanza un punto en el cual ya no se refracta al segundo medio y el rayo de luz entra en el cono de aceptación lográndose reflejar en el primer medio, como se muestra en la Figura 2.5.

El haz de luz que es atrapado totalmente dentro de la fibra óptica debe cumplir con un ángulo adecuado, para tener reflexiones sucesivas totales el cual se denomina *ángulo crítico de incidencia* está relacionado matemáticamente por la ecuación 2.6 [43].

$$\phi_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.6)$$

Donde:

θ_c = ángulo crítico de incidencia

n_1 = índice de refracción del primer medio

n_2 = índice de refracción del segundo medio

La *apertura numérica* se suele usar para medir la magnitud del ángulo de aceptación, es la habilidad de la fibra óptica para capturar la luz. Mientras mayor sea la apertura numérica, mayor captura de luz externa tendrá la fibra óptica. La apertura numérica está relacionada matemáticamente por la ecuación 2.7 [46].

$$AN = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (2.7)$$

Donde:

AN = apertura numérica de la fibra

n_1 = índice de refracción del primer medio

n_2 = índice de refracción del segundo medio

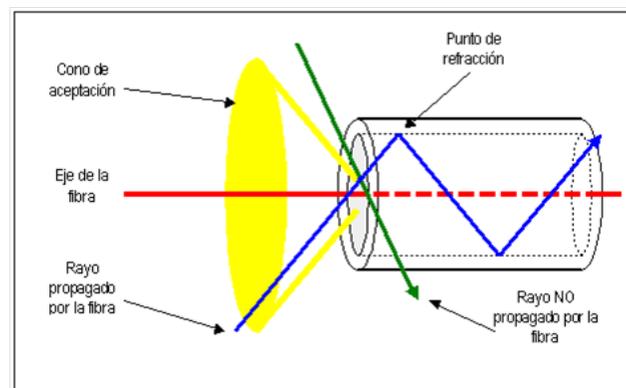


Figura 2.5 Reflexión total interna de la fibra óptica.

2.3.3 Fibra multimodo

Una fibra multimodo es una fibra que puede propagar más de un modo de luz. El número máximo de modos de luz que pueden existir en el núcleo de una fibra se puede determinar matemáticamente por la ecuación 2.8.

$$N_M = 1 + \frac{2D (n_1 - n_2)^{0.5}}{\lambda} \quad (2.8)$$

Donde:

N_M = número máximo de modos de luz

D = diámetro de núcleo

n_1 = índice de refracción del primer medio

n_2 = índice de refracción del segundo medio

λ = longitud de onda de luz

Para una fibra multimodo el número de modos pueden ser fácilmente superior a mil. El número de modos que existen realmente depende de otras características de la fibra y se pueden reducir durante la propagación. Existen dos tipos de fibras multimodo: la fibra de índice de escalón y la fibra de índice gradual. Difieren en los perfiles del índice de refracción de su núcleo y revestimiento [43].

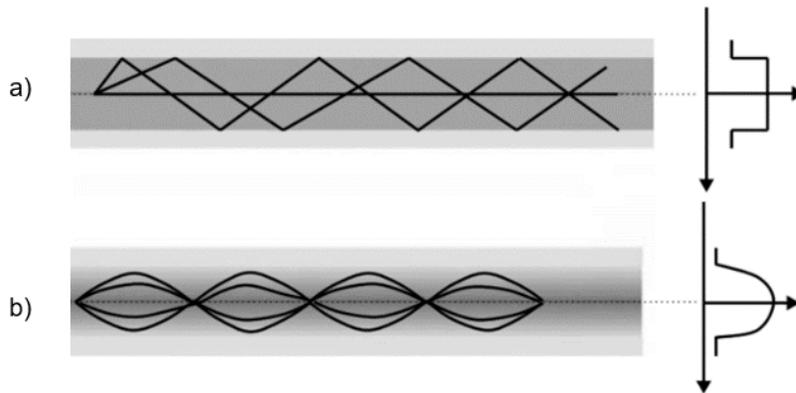


Figura 2.6 a) Perfil de fibra de índice escalón b) Perfil de fibra índice gradual.

2.3.3.1 Fibras de índice escalón

Una fibra óptica escalón es una fibra óptica con índices de refracción del núcleo y del revestimiento diferentes, pero uniformes. En la frontera del núcleo y el revestimiento hay un cambio abrupto en el índice de refracción. El confinamiento de la luz en cualquier fibra de índice escalón se debe a las propiedades de reflexión en la frontera núcleo-revestimiento. Su origen está en la diferencia de los índices de refracción de los materiales.

Los rayos de la luz viajan por caminos muy diferentes en el núcleo de la fibra, por lo tanto, llegarán a su destino en tiempos diferentes. Esto trae como consecuencia que un pulso transmitido se ensanche en el tiempo. Como se muestra en la Figura 2.7 los rayos de luz 1 y 2 empiezan al mismo tiempo en el momento que se refractan en la frontera del núcleo-revestimiento, pero después de viajar por la fibra en trayectorias diferentes; llegan a su destino en tiempos diferentes. Esta distorsión de la señal se le conoce como dispersión modal [43].

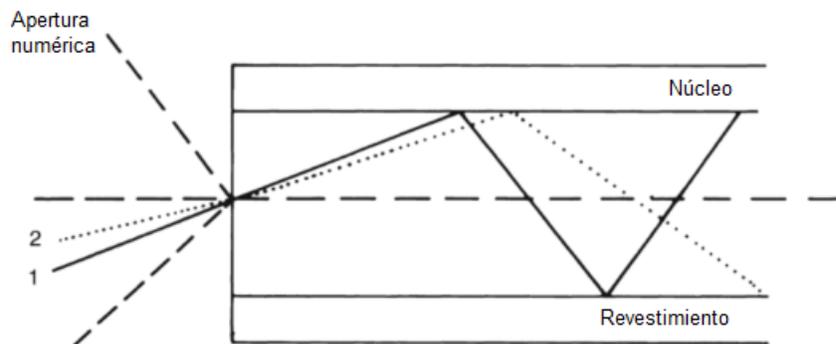


Figura 2.7 Propagación de modos en fibra óptica de índice escalón.

2.3.3.2 Fibra de índice gradual

El índice de refracción del núcleo de una fibra de índice gradual decrece desde el centro hasta el exterior. El índice de refracción del revestimiento es uniforme. La fibra de índice gradual curva los rayos de luz en caminos sinuosos, debido a que el índice de refracción del núcleo no es uniforme (Figura 2.8). La región exterior del núcleo tiene un índice de refracción más bajo que el centro. La luz viaja más rápido en un material con índice de refracción más bajo.

Los rayos de luz de la región exterior del núcleo viajan a una distancia mayor y requieren más tiempo para llegar al final de la fibra. Sin embargo, debido a que la luz viaja más rápido en la región exterior se compensa parcialmente por una velocidad de rayo. Esto reduce la cantidad de ensanchamiento del pulso entre los rayos de luz del centro del núcleo y de la región exterior, por lo que se reduce la dispersión modal. Es

por dicho motivo que este tipo de fibra tiene un ancho de banda de transmisión de datos mayor que una fibra de índice escalón [43].

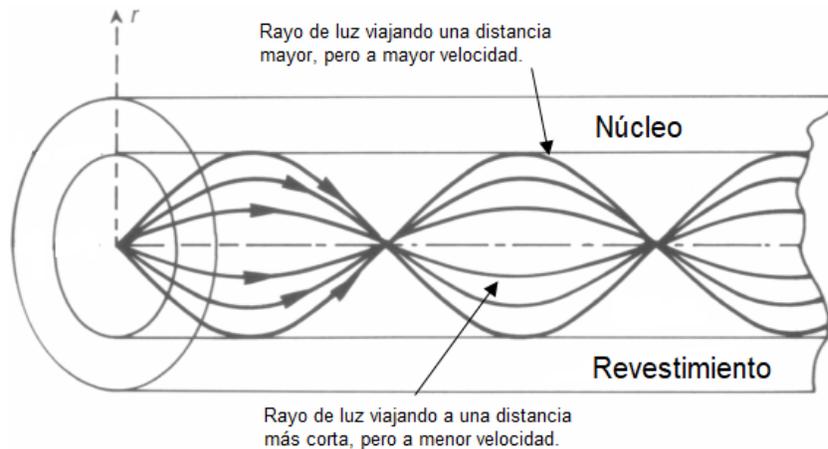


Figura 2.8 Propagación de modos en una fibra de índice gradual.

2.3.4 Fibra monomodo

Una fibra monomodo es una fibra óptica en la que solo se propaga un modo de luz (Figura 2.9). Esto se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño que solo permite un modo de propagación. El tamaño del núcleo de la fibra monomodo está comprendido entre 8 y 10 μm .

El perfil del índice de refracción de una fibra monomodo es similar al de una fibra multimodo de índice escalón. Debido al pequeño tamaño del núcleo, es muy difícil acoplar luz a la fibra. Para lograr este objetivo se usa frecuentemente un láser de estado sólido. Para todas las conexiones y empalmes de la fibra, se deben utilizar componentes de precisión mayor.

Puesto que se propaga por la fibra un único modo, se elimina el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión modal. Esto permite velocidades de transmisión de datos mucho mayores sobre distancias más largas. Las compañías telefónicas son algunos de los principales usuarios de esta tecnología, para el tráfico a largas distancias [43].



Figura 2.9 Perfil y propagación de modos de una fibra óptica monomodo.

2.3.5 Pérdidas de potencia óptica

La potencia generada por la luz que viaja en la fibra óptica se va perdiendo con la distancia. Regularmente en distancias muy largas las pérdidas pueden lograr hasta un 50% (3 dB), las cifras exactas dependen del material de la fibra en uso y la longitud de onda.

Las pérdidas de potencia en una fibra óptica se miden en *decibelios* (dB). Básicamente solo hay dos formas de perder la luz, o la fibra óptica no es lo suficientemente clara (intrínsecas) o la luz se desvía en la dirección incorrecta (extrínsecas).

2.3.5.1 Pérdidas por absorción

Cualquier impureza que quede en la fibra después de la fabricación bloqueará parte de la energía de la luz. Los peores culpables son los iones hidroxilo y restos de metales.

Los iones hidroxilo son en realidad la forma de agua que causa las grandes pérdidas a 1380 nm. De manera similar, los restos de metales pueden causar absorción de energía en sus propias longitudes de onda particulares. Estos pequeños picos de absorción también son visibles.

En ambos casos, es conveniente garantizar que el vidrio no esté contaminado en el momento de la fabricación y que las impurezas se reduzcan lo más posible. Nuestro objetivo es alcanzar niveles máximos de 1 parte en 10^9 para el agua y 1 parte en 10^{10} para las trazas metálicas [47].

2.3.5.2 Dispersión de Rayleigh

Esta es la dispersión de la luz debido a pequeños cambios localizados en el índice de refracción del núcleo y el material de revestimiento. Los cambios son de hecho muy localizados. Hay dos causas, ambos problemas dentro de los procesos de fabricación.

El primero son las leves fluctuaciones inevitables en la "mezcla" de los materiales. Estos cambios aleatorios son imposibles de eliminar por completo. La otra causa son los ligeros cambios en la densidad a medida que el vidrio de sílice se enfría y solidifica. Una de estas discontinuidades se ilustra en la Figura 6.1 y da como resultado que la luz se disperse en todas las direcciones. Toda la luz que ahora se encuentra con un ángulo de incidencia menor que el ángulo crítico puede escapar del núcleo y se pierde.



Figura 2.10 La luz es dispersada en múltiples direcciones.

La cantidad de dispersión depende del tamaño de la discontinuidad en comparación con la longitud de onda de la luz, por lo que la longitud de onda más corta, o la frecuencia más alta, sufre la mayor dispersión [47].

2.3.5.3 Reflexión de Fresnel

Cuando un rayo de luz produce un cambio en el índice de refracción y se acerca a un ángulo cercano al normal, la mayor parte de la luz pasa directamente, pero no toda. Una proporción muy pequeña se refleja fuera del límite.

Este tipo de pérdida es de suma importancia, cuando consideramos que en la propagación de la luz en una fibra óptica sale en un extremo de ella. En ese punto, tenemos una transición repentina entre el índice de refracción del núcleo y el aire

circundante. Este efecto también ocurre en la otra dirección, cuando el rayo de luz trata de ingresar a otra fibra, como se observa en la Figura 2.11.

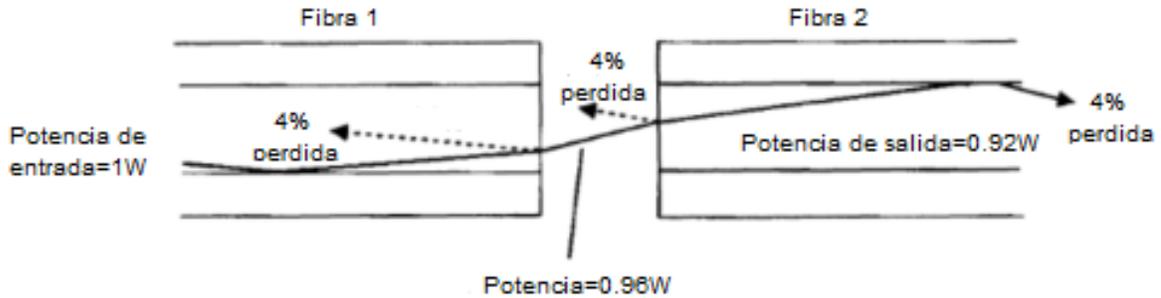


Figura 2.11 Pérdidas por reflexión de Fresnel

La proporción real de la luz está determinada por la cantidad por la cual el índice de refracción cambia en el límite y viene dada por la ecuación 2.9 [47]:

$$\text{Luz reflejada (\%)} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \times 100 \quad (2.9)$$

Donde:

n_1 = índice de refracción de núcleo

n_2 = índice de refracción del aire

2.3.5.4 Pérdidas por flexión (macrocurvaturas)

Una curva cerrada en una fibra puede causar pérdidas significativas, así como la posibilidad de fallas mecánicas. Es fácil doblar un tramo corto de fibra óptica para producir mayores pérdidas que un kilómetro completo de fibra en uso normal. Recuerde que lo normal siempre está en ángulo recto con la superficie del núcleo. Ahora, si el núcleo se dobla, como en la Figura 2.12, el rayo ahora se encontrará en el lado equivocado del ángulo crítico y escapará.

La verdadera respuesta a esto es consultar la especificación del cable de fibra óptica en uso ya que el fabricante considerará las limitaciones mecánicas, así como las pérdidas por flexión.

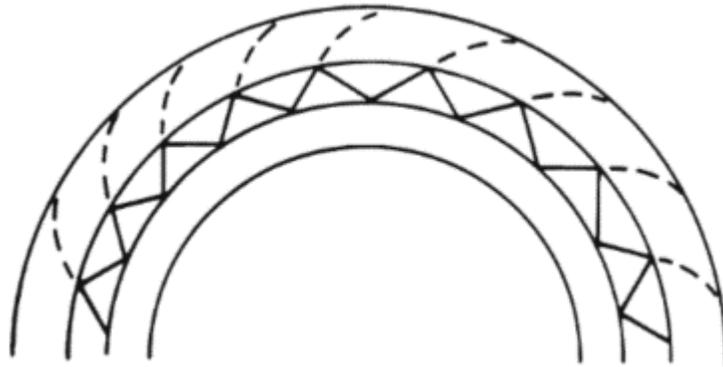


Figura 2.12 Pérdidas por macrocurvaturas.

Una fibra desnuda, y con esto se entiende solo el núcleo/revestimiento y el recubrimiento primario, es segura si el radio de la curva es de al menos 50 mm. Cuanto más cerrada sea la curva, peor serán las pérdidas. El problema de la pérdida de flexión por macrocurvaturas está en gran parte en manos del instalador [47].

2.3.5.5 Pérdidas por flexión (microcurvaturas)

Estos son idénticos en efecto al efecto de macrocurvaturas; pero difieren en tamaño y causa como se observa en la Figura 2.13. Su radio es igual o menor que el diámetro de la fibra desnuda, de hecho, muy pequeño.

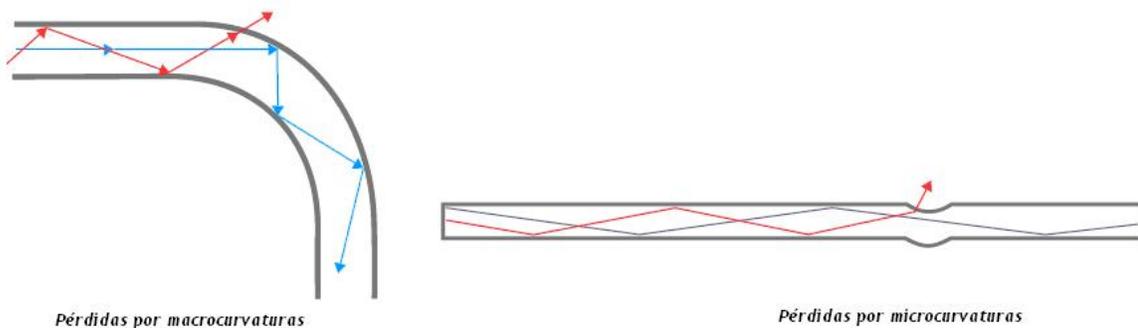


Figura 2.13 Diferencias de pérdidas por flexión.

Estos son generalmente un problema de fabricación. Una causa típica es la expansión diferencial de la fibra óptica y las capas externas. Si la fibra se enfría demasiado, las capas externas se encogerán y se acortarán. Si el núcleo/revestimiento se contrae a una velocidad más lenta, es probable que se doble y cause una microcurvatura [47].

2.4 Sensores de fibra óptica

En los últimos 20 años se han producido dos grandes revoluciones de productos debido al crecimiento de las industrias de optoelectrónica, optomecatrónica y comunicaciones de fibra óptica. La industria de la optoelectrónica ha creado productos como reproductores de discos compactos, impresoras láser, escáneres de códigos de barras y punteros láser. La industria de las comunicaciones de fibra óptica ha revolucionado la industria de las telecomunicaciones al proporcionar enlaces de telecomunicaciones de mayor rendimiento y más confiables con un costo de ancho de banda cada vez menor.

A medida que los precios de los componentes han caído y se han realizado mejoras de calidad, la capacidad de los sensores de fibra óptica para desplazar a los sensores tradicionales para rotación, aceleración, medición de campos eléctricos y magnéticos, temperatura, presión, acústica, vibración, posición lineal y angular, tensión, humedad, la viscosidad, las mediciones químicas y una gran cantidad de otras aplicaciones de sensores. Las ventajas inherentes de los sensores de fibra óptica, que incluyen su capacidad de ser livianos, de muy pequeño tamaño, pasivos, de baja potencia y resistentes a interferencias electromagnéticas, alta sensibilidad, ancho de banda, y robustez ambiental [48].

2.4.1 Estructura básica de un sensor de fibra óptica

El concepto básico de un sensor de fibra óptica se muestra en la Figura 2.14. La luz es emitida de una fuente, la luz es acoplada mediante una interface óptica a una fibra óptica la cual tiene la función de transmitir la luz a un modulador. Los moduladores desempeñan una variedad de funciones, dependiendo del parámetro de un haz de luz que se manipula, como son, modulación de amplitud, fase, frecuencia y polarización de la luz. Los cuales responden a una perturbación física a medir (temperatura, presión, velocidad, posición entre algunas otras). Después de su paso por el modulador la luz es guiada por otra fibra a un sistema de detección de señal o

demodulador óptico, para convertir nuestra señal óptica en señal eléctrica que pueda ser procesada, grabada o exhibida para su observación.

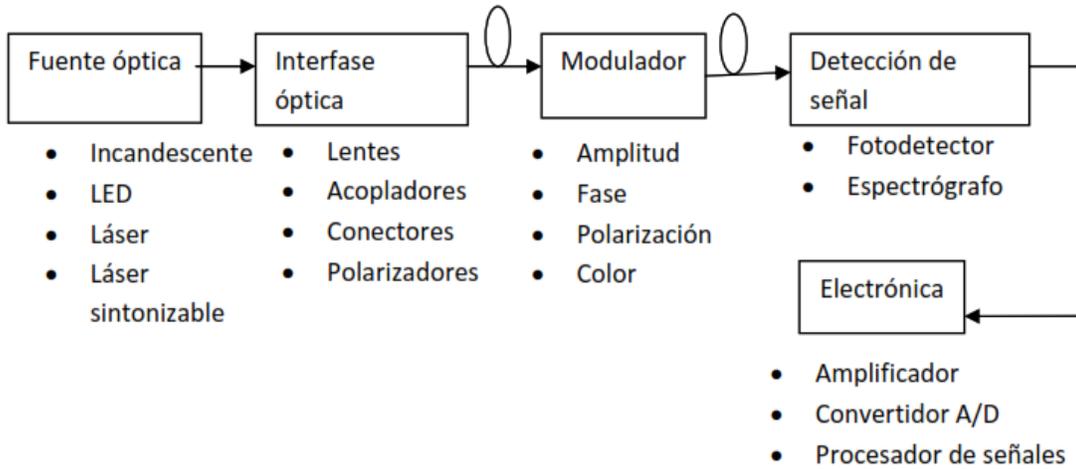


Figura 2.14 Esquema de un sensor de fibra óptica.

2.4.2 Clasificación de los sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica se clasifican por la propiedad que miden, por el campo de aplicación o por el mecanismo de modulación. Los sensores se clasifican en dos grupos dependiendo, si la modulación de la luz es implementada por fuera o dentro de la fibra óptica, esta clasificación origina sensores intrínsecos o extrínsecos.

2.4.2.1 Sensores extrínsecos

Los sensores extrínsecos o híbridos comprenden en aplicaciones en la que la fibra solo se utiliza como una guía de propagación de la luz a una caja negra o un conductor para transmitir la luz, que modula luz de acuerdo a la perturbación que actúa sobre el módulo del sensor y modula la señal de luz dentro de la misma. Esta modulación de la luz ocurre fuera de la fibra a través de un cambio inducido o ambiental, la información podría imprimirse en términos de intensidad, fase, frecuencia, polarización, contenido espectral u otros métodos. Luego, una fibra óptica transporta la luz con la información impresa ambientalmente a un procesador óptico y / o electrónico [46].

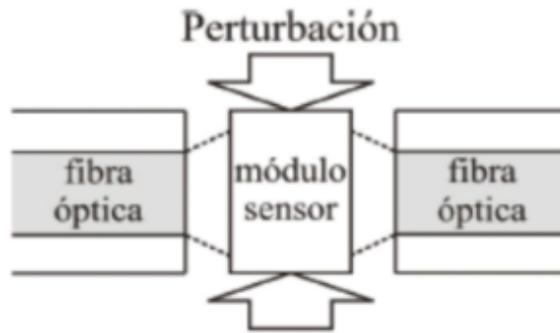


Figura 2.15 Esquema de un sensor de fibra óptica extrínseco.

2.4.2.2 Sensores intrínsecos

Los sensores intrínsecos al igual que los extrínsecos también utilizan la fibra óptica como una guía de propagación de la luz, pero a diferencia del caso anterior, la perturbación actúa directamente sobre la fibra y modula la señal de luz dentro de la misma.

Dado que la luz es la que provee los medios para medir la perturbación externa, existe muchas formas de recibir información de ella como es el caso de: en términos de intensidad, fase, frecuencia, polarización, contenido espectral u otros métodos. En este tipo de sensor la luz permanece dentro de la fibra en todo momento [46].

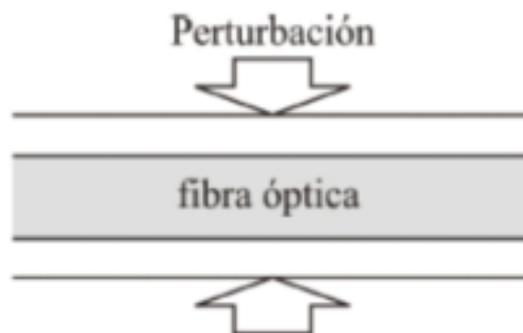


Figura 2.16 Esquema de un sensor de fibra óptica intrínseco.

2.4.3 Sensores de intensidad basados en fibra óptica

En algunos aspectos, el tipo más simple de sensor de fibra óptica es el tipo híbrido que se basa en la modulación de intensidad. La Figura 2.17 muestra un sensor simple de vibración que consta de dos fibras ópticas que se mantienen muy próximas entre sí.

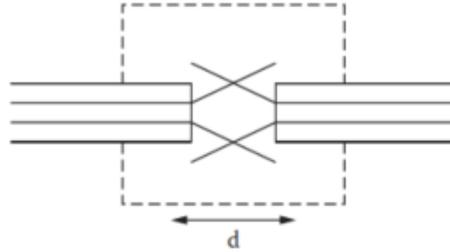


Figura 2.17 Sensor de vibración por modulación de intensidad.

La luz se inyecta en una de las fibras ópticas; cuando sale, la luz se expande en un cono de luz cuyo ángulo depende de la diferencia entre el índice de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra óptica. La cantidad de luz capturada por la segunda fibra óptica depende de su ángulo de aceptación y la distancia “d” entre las fibras ópticas. Cuando la distancia “d” se modula, a su vez resulta en una modulación de intensidad de la luz capturada.

Una variación de este tipo de sensor se muestra en la Figura 2.18, aquí se usa un espejo que está montado de manera flexible para responder a un efecto externo como la presión. A medida que cambia la posición del espejo, la separación efectiva entre las fibras ópticas cambia con una modulación de intensidad resultante.

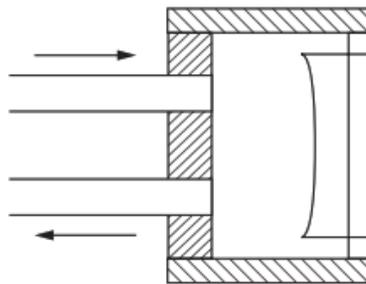


Figura 2.18 Sensor de presión por modulación de intensidad.

Otra clase de sensores de fibra óptica basados en la intensidad se basa en el principio de la reflexión interna total. Este tipo de sensor se puede usar para medir el nivel de líquido, como se muestra en la configuración de la Figura 2.19. Cuando el nivel del líquido golpea el prisma reflector, la luz se filtra en el líquido, atenuando en gran medida la señal.

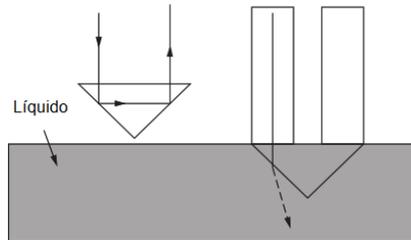


Figura 2.19 Sensor de nivel con modulación de intensidad.

El confinamiento de un haz de luz que se propaga a la región de los núcleos de fibra y la transferencia de potencia de dos núcleos de fibra colocados muy cerca pueden usarse para producir una serie de sensores de fibra basados en evanescencia. La Figura 2.20 ilustra dos núcleos de fibra que se han colocado muy cerca uno del otro.

Para fibra óptica monomodo, la distancia es del orden de 10 a 20 micras. Cuando se usa fibra monomodo, hay una fuga considerable del modo de haz de luz que se propaga más allá de la región central hacia el revestimiento o medio a su alrededor. Si se coloca un segundo núcleo de fibra cerca, esta cola evanescente tenderá a acoplarse cruzadamente al núcleo de fibra adyacente.

La cantidad de acoplamiento cruzado depende de una serie de parámetros, incluida la longitud de onda de la luz, el índice relativo de refracción del medio en el que se colocan los núcleos de fibra, la distancia entre los núcleos y la longitud de interacción. Este tipo de sensor de fibra se puede utilizar para medir la longitud de onda, el filtrado espectral, el índice de refracción y los efectos ambientales que actúan sobre el medio que rodea los núcleos, se han usado para medir parámetros como temperatura, presión y tensión. La dificultad con este sensor, que es común a muchos sensores de fibra, es optimizar el diseño para que solo se detecten los parámetros deseados.

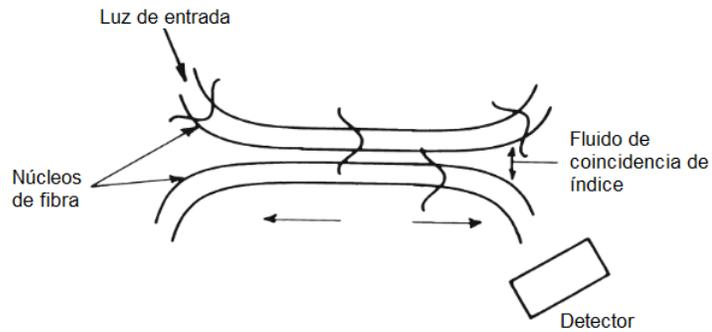


Figura 2.20 estructura de un sensor de evanescencia.

Otra forma en que se puede perder luz de una fibra óptica es cuando el radio de curvatura de la fibra excede el ángulo crítico necesario para limitar la luz al área central y hay una fuga en el revestimiento. La micro o macro flexión de la fibra puede hacer que esto ocurra, con la modulación de intensidad resultante de la luz que se propaga a través de una fibra óptica.

Se ha construido una serie de sensores de fibra basados en macrocurvaturas para detectar vibraciones, presión y otros efectos ambientales. La Figura 2.21 muestra un diseño típico de este tipo de sensores que consiste en una fuente de luz, una sección de fibra óptica colocada en un transductor de microenfoque diseñado para modular la luz en respuesta a un efecto ambiental, y un detector.

En algunos casos, el transductor de curvatura puede implementarse mediante el uso de cableado de fibra especial o fibra óptica que simplemente está optimizado para ser sensible a la pérdida de curvaturas [48].

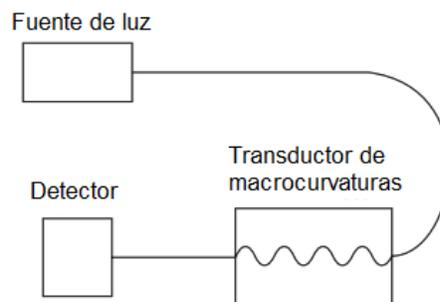


Figura 2.21 Sensor de intensidad por macrocurvaturas.

2.4.4 Sensores basados en interferómetros de fibra óptica

Los sensores interferométricos de fibra óptica son usados cuando se requiere una alta sensibilidad en la detección y bajas pérdidas. Los sensores interferométricos en su mayoría utilizan fibra monomodo porque facilitan su construcción e incrementa su sensibilidad de manera notable, ya que permite la medición de pequeños cambios de fase en la luz que se transmite a través de ella, el cambio de fase es sometido a un parámetro físico que se desea medir.

Las mediciones se logran al comparar la fase de una onda de luz, con otra onda de luz proveniente de la misma fuente, dicha onda no ha estado sujeta a la acción del estímulo. Una de las ventajas que presenta la interferometría por fibra óptica es que presenten problemas de alineación, al tener ausencia de espacio libre en el camino óptico de la fuente, lo cual si logra ocurrir en los interferómetros ópticos convencionales.

Es importante mencionar que en el uso de sensores interferométricos, se requiere de fibras que mantengan el estado de polarización de la luz, para evitar el desvanecimiento de la señal. Si se usa una fibra monomodo estándar, se debe agregar al interferómetro controladores de polarización para reducir los problemas de polarización.

La interferometría basada en fibras ópticas puede ser dividida en dos grandes categorías: aquellas en las que intervienen dos haces interferentes, como las configuraciones tipo Michelson, Sagnac, y Mach-Zehnder; y los interferómetros de múltiples haces, representados mayoritariamente por la cavidad tipo Fabry-Pèrot [48].

2.4.4.1 Sensores interferométricos de Mach-Zehnder

Una de las disposiciones más sensibles para un sensor óptico de fibra es la disposición del sensor interferométrico de Mach-Zehnder (MZ) que se muestra en la Figura 2.22. La luz de una láser pasa a través de un acoplador óptico de fibra, que divide el haz de

luz entrante en dos haces de igual amplitud en los dos brazos de fibra monomodo. Uno de los brazos, llamado brazo de referencia, se mantiene aislado de cualquier perturbación externa. La fibra en este brazo a veces está recubierta con un material para que sea insensible al parámetro de medición.

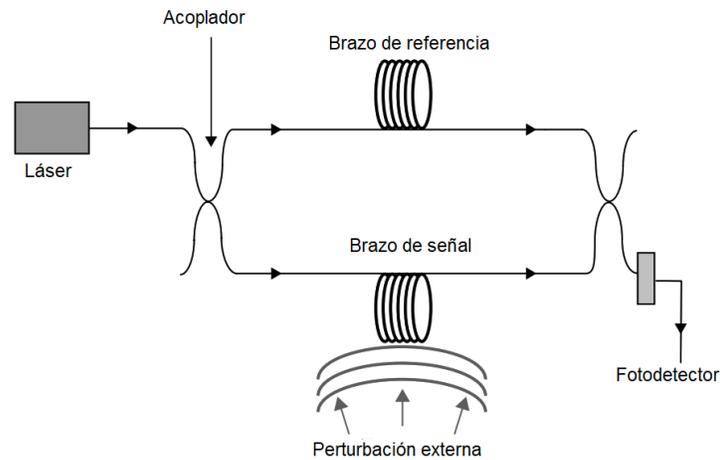


Figura 2.22 Sensor interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica.

El otro brazo, llamado brazo sensor o brazo de señal, está expuesto a la perturbación que se va a medir. Después de atravesar los dos brazos, los haces de luz se recombinan en el acoplador de salida. La luz de salida es detectada por un fotodetector y procesada electrónicamente. En este sensor, los dos brazos de fibra se comportan como las dos rutas de un interferómetro y, por lo tanto, la potencia de la luz de salida que cae sobre el detector dependerá de la diferencia de fase entre los haces cuando entran en el acoplador de salida.

Si las dos fibras tienen exactamente la misma longitud, el haz de luz de entrada completo aparece en la fibra inferior y no sale luz de la fibra superior. Cualquier parámetro externo, como la temperatura o la presión, afecta la fibra sensora cambiando el índice de refracción o la longitud del brazo, cambiando así la diferencia de fase entre los dos haces cuando entran en el acoplador de salida. Esto da como resultado un cambio en la potencia de salida que cae sobre el detector como se muestra en la Figura 2.23 y viene dado por la ecuación 2.10 [46].

$$P_d = P_o \cos^2 \frac{\Delta\phi}{2} \quad (2.10)$$

Donde:

P_d = Potencia que cae en el fotodetector

P_o = Potencia de entrada

$\Delta\phi$ = Cambio de fase por perturbación externa

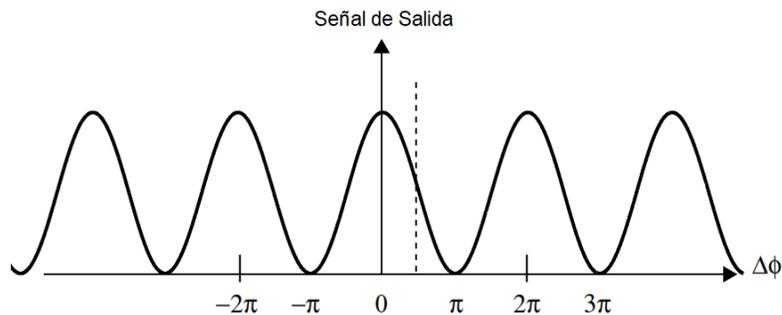


Figura 2.23 Variación de intensidad a la salida del interferómetro en función de diferencia de fase entre los dos brazos.

2.4.4.2 Sensores interferométricos de Michelson

El interferómetro de Michelson en la Figura 2.24 es en muchos aspectos similar al de Mach-Zehnder. La principal diferencia es que se han colocado espejos en los brazos del interferómetro, solo la mitad de la fibra es necesaria para obtener la misma sensibilidad ya que los espejos regresan la luz por la misma fibra. En adición solo se necesita un acoplador.

Esto da como resultado niveles muy altos de reflexión hacia la fuente de luz, lo que degrada en gran medida el rendimiento del receptor. El uso de láseres de anillo YAG (granate de aluminio itrio) bombeados con diodos mejorados; como las fuentes de luz superó en gran medida estos problemas.

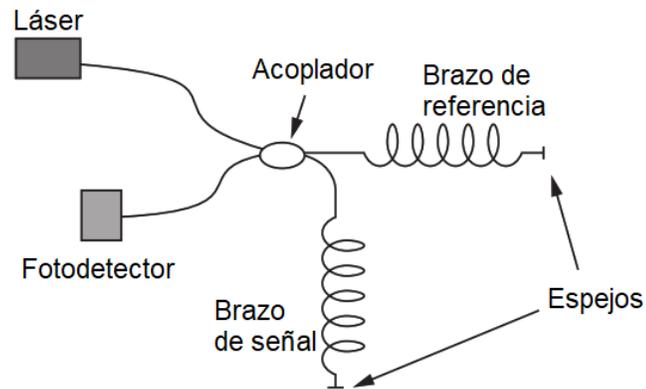


Figura 2.24 Sensor interferómetro Michelson de fibra óptica.

En combinación con la reciente introducción de espejos conjugados de fase para eliminar el desvanecimiento de polarización, el interferómetro de Michelson se está convirtiendo en una alternativa para los sistemas que reducen el costo actual relativamente alto de estos componentes.

Para implementar un sensor de fibra efectivo basado en Mach-Zehnder o Michelson, es necesario construir un transductor apropiado. Esto puede implicar un recubrimiento de fibra que podría optimizarse para la respuesta de campo acústico, eléctrico o magnético [48].

2.4.4.3 Sensores interferométricos basados en el efecto Sagnac

Los sensores ópticos de rotación han realizado sustanciales progresos pues reemplazan los mecanismos convencionales de medición basados en el principio de inercia o de masas giratorias, por propuestas compactas basadas enteramente en tecnología de estado sólido.

En particular para las aplicaciones de guiado inercial, existen dos clases básicas de sensores de rotación que han sido tradicionalmente utilizados:

- Sensores cuya señal de salida es proporcional a la velocidad de rotación (tensión, frecuencia, entre otros.)

- Sensores integradores de velocidad de rotación, en los que la información es dada en términos del ángulo girado.

Estos sensores, utilizados casi con exclusividad en el guiado remoto y en aplicaciones de control, están basados en el efecto Sagnac, para medir la velocidad de rotación. La Figura 2.26 ilustra una derivación simple del efecto Sagnac que se aplica cuando el índice de refracción del medio óptico es 1.

Los haces de luz en sentido horario y anti horario se propagan en direcciones opuestas alrededor de un anillo de radio R . Si el anillo gira a una velocidad Ω en el sentido de las agujas del reloj y la cantidad de tiempo que tarda la luz en atravesar el anillo viene dada $\Delta t = L/c$, donde L es la longitud del anillo y c es la velocidad de la luz en el vacío. El haz que se propaga en el sentido horario viene representado por la ecuación matemática 2.11:

$$L_H = 2\pi R + \Omega R \Delta t \quad (2.11)$$

En tanto que el haz que se propaga en el sentido anti horario le corresponde a la ecuación 2.12:

$$L_{A-H} = 2\pi R - \Omega R \Delta t \quad (2.12)$$

La diferencia total de camino óptico generada entre los dos haces debido a la rotación del anillo lo representa la ecuación 2.13:

$$\Delta L = L_H - L_{A-H} = \frac{2\Omega RL}{c} \quad (2.13)$$

Para tener un sensor de rotación óptico exitoso basado en el efecto Sagnac, se deben idear medios que midan con precisión la diferencia de longitud de la trayectoria inducida rotacionalmente con precisión, mientras se garantice que la rotación es el único efecto ambiental medido.

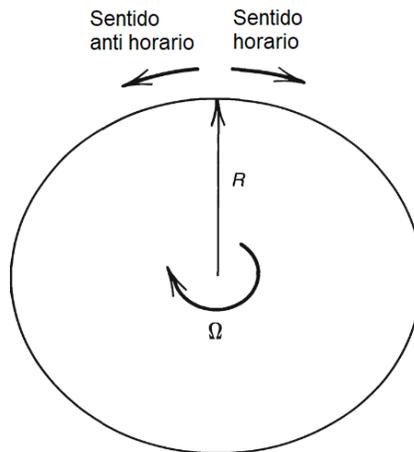


Figura 2.25 El efecto Sagnac.

Los giroscopios de fibra óptica (FOG), mide el efecto Sagnac debido a los cambios en el camino óptico de una bobina de fibra óptica con varias vueltas. La diferencia total de camino óptico en este caso se puede determinar matemáticamente por la ecuación 2.14.

$$\Delta L = \pm \frac{2A\Omega}{nc} 2N \quad (2.14)$$

Donde:

A = área encerrada por la bobina

Ω = velocidad de rotación

n = índice de refracción del núcleo de la fibra

c = velocidad de la luz en el vacío

N = es el factor que determina el cambio neto entre los haces propagantes

El cambio neto de franjas de interferencias que induce la rotación se calcula por la ecuación 2.15.

$$Z_R = \frac{4NA\Omega}{\lambda c} \quad (2.15)$$

Donde:

A = área encerrada por la bobina

Ω = velocidad de rotación

λ = longitud de onda de luz en el vacío

c = velocidad de la luz en el vacío

N = es el factor que determina el cambio neto entre los haces propagantes

La fuente de luz es inyectada mediante un acoplador direccional. Antes de ser dividido, el haz atraviesa un filtro espacial de fibra óptica monomodo junto con un polarizador para asegurar que luego, los haces atraviesen el mismo camino en el bobinado de fibra. De esta manera, se genera la interferencia que posteriormente es llevada al detector donde se registra la intensidad debido a cambios de fase entre los haces inducidos por la rotación.

El modulador en la entrada del anillo tiene la finalidad de agregar un cambio de fase no recíproco a una frecuencia particular, para obtener lecturas fuera de banda base, que puede ser realizado, por ejemplo, introduciendo una modulación de fase oscilatoria [49].

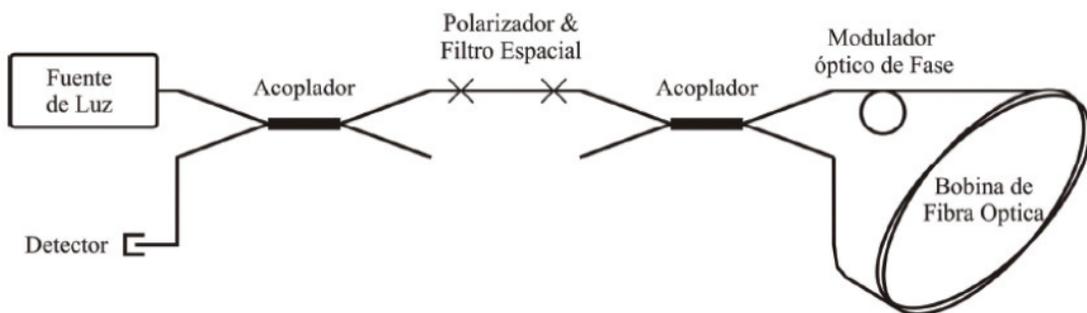


Figura 2.26 Configuración típica de un (FOG).

2.4.5 Sensores basados en rejillas de Bragg grabadas en fibra óptica.

Este tipo de sensores, pueden ser clasificados como sensores espectrales, aunque tienen características muy particulares que reciben un tratamiento particular. En estos dispositivos la fibra óptica tiene un papel central: no solo se comporta como guía de onda segura con bajas pérdidas, sino que su estructura en sí misma es utilizada para la codificación espectral del parámetro a medir, en la Figura 2.27 se aprecia la vista longitudinal de una rejilla de Bragg.

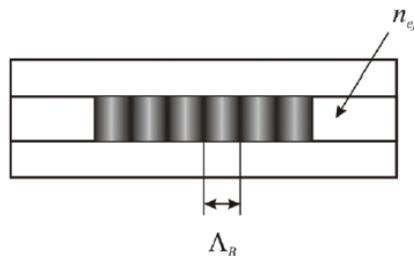


Figura 2.27 diagrama esquemático de una rejilla.

El núcleo de la fibra óptica presenta una perturbación periódica (o aperiódica), del índice de refracción efectivo. Esta perturbación suele extenderse longitudinalmente desde apenas unos milímetros hasta algunos centímetros, con periodos que van desde décimas de micrón a fracciones de milímetro para el caso de rejillas de periodo largo.

La perturbación del núcleo provoca una reflexión de la luz en un rango muy pequeño de longitudes de onda, para las cuales se cumple la condición de Bragg, en tanto que las restantes no resultan prácticamente afectadas. La longitud de onda central de reflexión de una rejilla de Bragg está dado por la ecuación 2.16.

$$\lambda_B = 2\Delta_B n_{ef} \quad (2.16)$$

Donde:

Δ_B = el periodo de la perturbación

n_{ef} = el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica

El ancho de banda de estas redes, típicamente menores al nanómetro, depende tanto del largo como del perfil de modulación del índice. Para su fabricación, es preciso trabajar el núcleo para formar una estructura particular. La técnica básica, a grandes rasgos, se proyecta un patrón de interferencia de haces en el rango UV sobre una fibra óptica especial cuyo índice de refracción es fotosensible (generalmente son dopadas con germanio) a este método se le conoce como fotosensibilidad. Hay dos maneras de lograrlo, ya sea por interferencia de dos haces coherentes, o mediante una máscara de fase.

La Figura 2.28 ilustra un esquema usual muy conocido, en el que se emplean varias rejillas actuando como sensores independientes cada uno con una longitud de onda de Bragg diferente, en tanto que se dispone otra rejilla de Bragg de referencia ubicada entre la salida del acoplador y la entrada del detector. La fuente de banda ancha es aplicada a todos los sensores que actúan como reflectores para cada una de las longitudes de onda respectivas. La respuesta de cada uno de los sensores depende de las condiciones a las que estén sujetos individualmente.

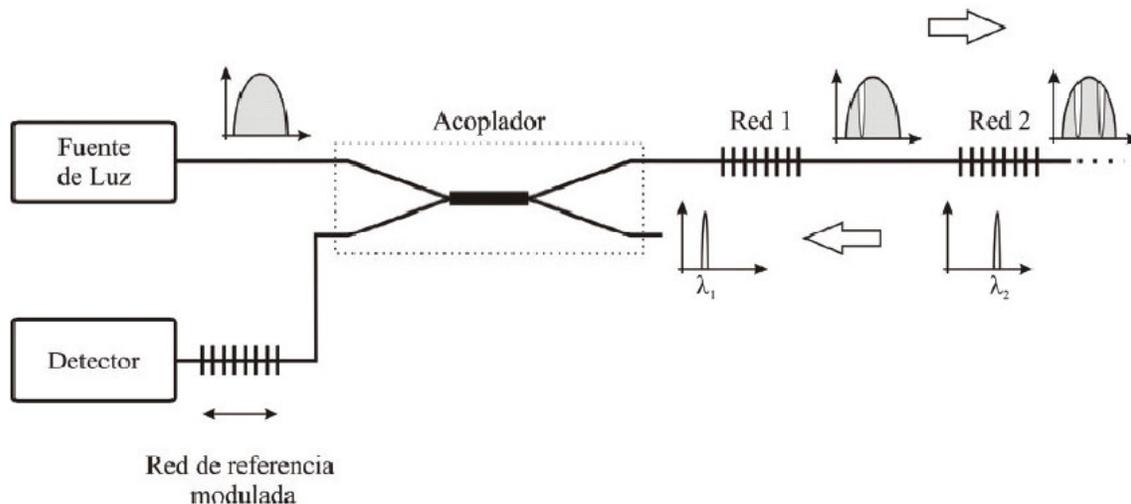


Figura 2.28 Esquema de un sistema de medición con rejillas de Bragg.

Cada rejilla reflejará esta longitud de onda y sus correspondientes variaciones. Se puede observar de una manera sencilla como se modifica el espectro inicial de la fuente, conforme se propaga en cada rejilla. Lo interesante de este diseño, es que cada reflexión en su contra propagación puede atravesar las rejillas anteriores sin sufrir pérdidas considerables. Se emplea otra rejilla de Bragg como referencia que puede ser usada como sintonizador, ajustando su respuesta mediante métodos mecánicos como actuadores piezoeléctricos, tornillos micrométricos, entre otros.

De esta forma, en la salida del acoplador están presentes todas las longitudes de onda correspondientes a cada sensor. Para acceder a la información de todas y cada una de ellas, puede recurrirse a un espectrómetro, en cuyo caso es posible conocer el estado de los “n” puntos de medición en simultáneo.

Esta técnica, aunque muy conveniente, no siempre es posible debido al costo elevado del equipo instrumental. Sin embargo, existe otra manera de detección más ingeniosa que implica un barrido en longitud de onda dentro de la ventana de trabajo del sistema. Exige algunas consideraciones adicionales, pero es una solución mucho más económica [49].

Capítulo 3

Metodología

3.1 Estudio de generación de inclinación de edificios

3.1.1 Partes de un edificio

La construcción de un edificio se ve determinada por una serie de factores, como los materiales de construcción disponibles, las características del suelo y las condiciones climáticas (aparte de otros factores tan limitantes como el presupuesto). No obstante, todos los edificios tienen elementos comunes entre sí. Los siguientes elementos de un edificio son comunes a todos como se observa en la Figura 3.1.

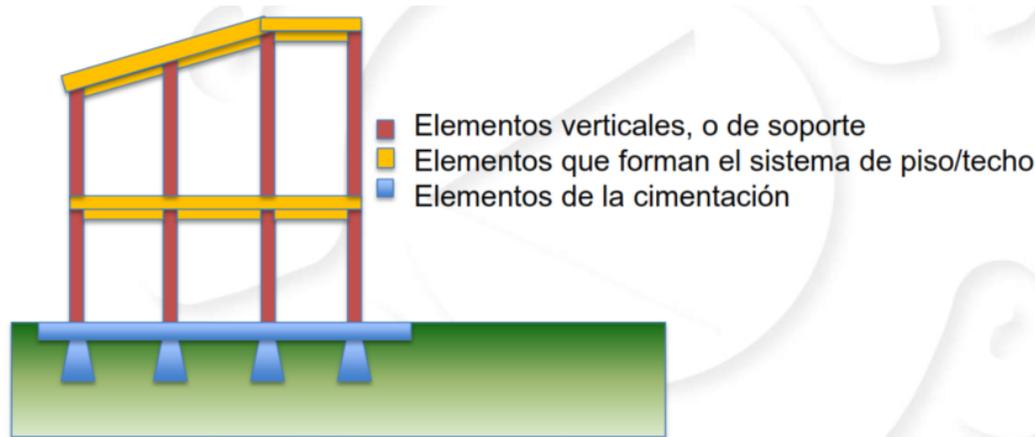


Figura 3.1 Partes de una estructura civil.

Los elementos verticales que conforma un edificio son las columnas, cuya función es la de soportar cargas o el peso de otras partes de la estructura, los principales esfuerzos que soporta son compresión y pandeo. Los elementos que forman parte del sistema de piso y techo, lo conforman principalmente las vigas, sirven para soportar el peso de los pisos y transmitirlo a los pilares, las vigas están sometidas a esfuerzos de flexión. Los cimientos son la parte más baja de la estructura, encargándose de soportar y estabilizar a todo el edificio, normalmente soporta esfuerzos de compresión [50].

3.1.2 Daño estructural en columnas después de un sismo

Las estructuras de las edificaciones siempre estarán sujetas a fuerzas y cargas, algunas de ellas estarán siempre sujetas a fuerzas y cargas, algunas de ellas siempre actuando como las cargas correspondientes a su propio peso, el peso de los usuarios y los muebles que requieren; otras fuerzas o cargas aparecerán en las estructuras solo cuando ocurre un fenómeno natural como un sismo o ciclón (véase la Figura 3.2).

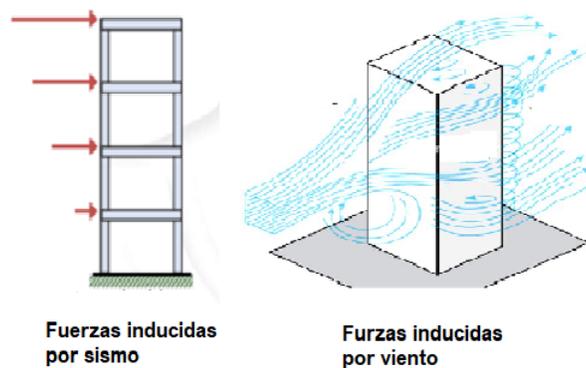


Figura 3.2 Acción de sismo y ciclón sobre una estructura civil.

El comportamiento de las estructuras depende de varios factores entre los que están: aceleraciones máximas del terreno, periodo dominante del movimiento del suelo y del periodo de vibrar del edificio.

Según la Coordinación Nacional de Protección civil de México (CNPC), catalogan en primer orden de importancia de los elementos estructurales a las columnas. Tal relevancia de importancia de las columnas en una estructura civil se debe a que las columnas pueden sufrir fallas como: compresión, cortante, adherencia y flexión (véase la Figura 3.3) [50]. La falla en columnas es frecuente durante un sismo y causa mucho colapso en las edificaciones.



Figura 3.3 Tipos de fallas en columnas de concreto.

3.1.3 Normas de reconstrucción de columnas por sismo

La inclinación o desplome de un edificio puede representar la falla de algunos elementos estructurales como vigas, columnas o muros estructurales. En la Figura 3.4 se muestran algunas partes de la estructura o la estructura en su conjunto con inclinación.

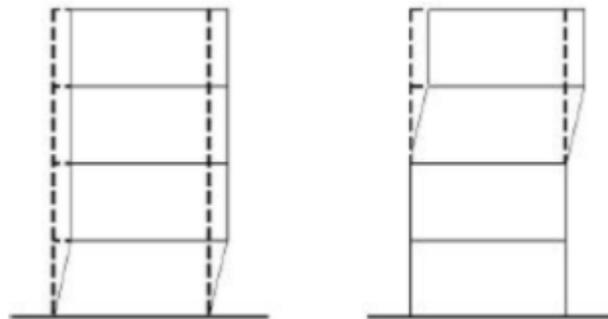


Figura 3.4 Inclinación de entrepisos por falla de columna.

Cuando la edificación ha sufrido colapso parcial o esta inclinada se considera insegura o que representa riesgo, dependiendo del mecanismo de falla, el porcentaje del área afectada, el piso o nivel donde ocurre, entre algunas otras. Pues el peso de la parte afectada puede generar momentos adicionales sobre la estructura, especialmente en columnas y vigas adyacentes; provocando el volcamiento de la edificación o se puede producir el colapso total a causa de una réplica.

Es importante anotar que la ocurrencia de colapso o inclinación de la edificación son condiciones bastantes críticas que requieren de criterio y experiencia para descalificarlas como importantes en la hora de definir el nivel de riesgo que representan [51].

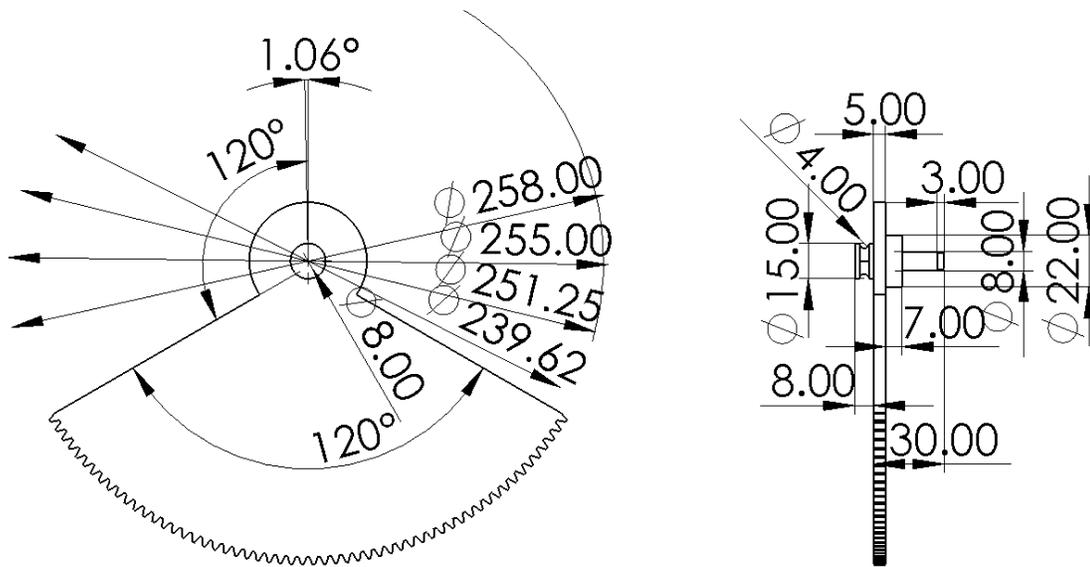
En las normas de reconstrucción, la definición de la relación de del edificio es la relación entre el desplazamiento del edificio y la altura. Como nivel de referencia, existen algunos ejemplos en la literatura que indican que, para edificaciones de varios pisos si la inclinación del edificio excede $1/40$ veces la altura se deberá considerar como de alto riesgo la condición de estabilidad de la estructura y se alcanzará el estándar de reconstrucción. Se podrá tolerar un margen de deformación mayor para estructuras livianas de uno y dos pisos en madera o bahareque, que para aquellas estructuras de muchos pisos, no dúctiles y pesadas, como es el caso de concreto o mampostería no reforzada.

Por ejemplo, el edificio tiene 100 m de altura, y cuando el edificio está inclinado 1 m, la relación de inclinación del edificio es 1%. Si la inclinación excede $1/40 = 0.025$, es decir que el desplome máximo permitido es 2.5 m, para considerar la norma de reconstrucción. Al realizar los cálculos matemáticos de un triángulo rectángulo se llega al valor de 1.43° como inclinación máxima permitida [17].

3.2 Desarrollo y construcción de mecanismo

El esquema del sensor de inclinación propuesto, consta de un mecanismo compuesto por un piñón (engrane de dientes rectos), que engrana con una barra dentada (cremallera) de forma que cuando el piñón gira, la barra dentada se desplaza longitudinalmente. Para que el engranaje sea posible y el piñón pueda deslizarse sobre la cremallera, es necesario que tanto el piñón como la cremallera posean el mismo módulo.

Se fabricó un engrane y una cremallera de dientes rectos, con un módulo idéntico para ambas piezas. El engrane tiene un diámetro exterior de 251.25 mm, 5 mm de espesor (véase la Figura 3.5). En el eje del engrane se diseñó una polea de 8 mm de espesor y un diámetro de 15 mm, la polea tiene la función de sostener y generar una curvatura diferente a la fibra óptica, cuando el mecanismo está en movimiento, la polea se observa en la Figura 3.5 b.



a) Vista frontal de engrane

b) Vista lateral de engrane

Figura 3.5 Diseño y acotaciones en milímetros de engrane.

El engrane es incrustado en un rodamiento (balero) que se encuentra incrustado en la base del mecanismo, tiene la función de rotar al engrane. Además, se incorpora un

sujetador para el eje de inclinación, tiene la función de mantener al eje en la posición deseada y transmitir la rotación al rodamiento, para el giro del engrane esto se ilustra en la Figura 3.7 a.

La cremallera tiene una longitud de 220 mm y 7 mm de espesor, cuenta con una ranura de 190 mm de largo; se desplaza longitudinalmente sobre dos soportes que se encuentran en la base del mecanismo (véase la Figura 3.6), la cremallera posee dos sujetadores de fibra óptica, los cuales son primordiales para mantener a la fibra óptica sin movimiento como se observa en la vista a detalle B de la Figura 3.7 a.

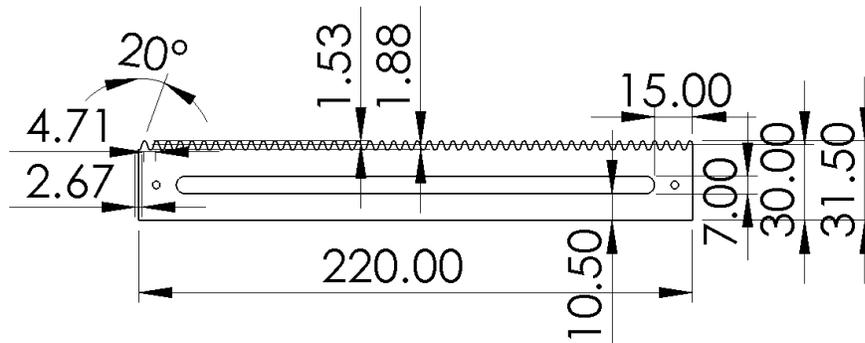


Figura 3.6 Diseño y acotaciones en milímetros de cremallera.

El eje de inclinación es el encargado de la rotación del engrane y por ende el engrane transmite la rotación en desplazamiento lineal a la cremallera. El eje es el que proporcionara la inclinación deseada al momento de caracterizar el mecanismo (véase la Figura 3.7). En la Figura 3.7 b se observan dos soportes (Soporte 1 y Soporte 2) cuya función es primordial para el soporte y desplazamiento lineal de la cremallera.

La base del mecanismo es la pieza que mantiene unidas por medio de un rodamiento al engrane y por medio de dos soportes a la cremallera. Las bases de sujeción se emplean para mantener a todas las piezas que conforman el mecanismo en una posición estable. La base del mecanismo y las bases de sujeción pueden observarse en la Figura 3.7 a.

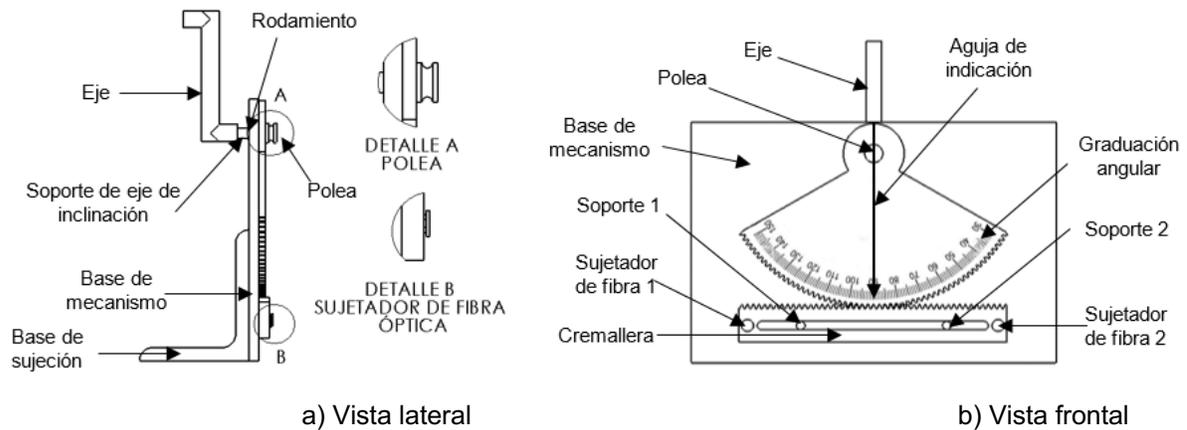


Figura 3.7 Partes de mecanismo, vista a detalle de polea y sujetador de fibra.

3.3 Funcionamiento del arreglo experimental

3.3.1 Configuración experimental

Con respecto al desplazamiento angular, el mecanismo cuenta con una aguja de indicación incrustada sobre la base del mecanismo, esta se mantiene inmóvil durante la inclinación. Para conocer el desplazamiento angular, se instaló una graduación angular sobre una cara del engrane, la cual esta indica cuantos grados fueron desplazados con respecto a la vertical (véase la Figura 3.7b).

En este diseño, el mecanismo tiene movimiento en dos direcciones, ya sea a la izquierda o derecha.

3.3.1.1 Fuentes de luz empleadas

- *Fuente de luz (DH-mini)* incluye tanto una bombilla de deuterio como una bombilla halógena para mediciones de UV-VIS-NIR. Hay dos formas de controlar la fuente usando los botones del panel frontal o las entradas TTL en el panel posterior, tiene un rango espectral de 200-2500 nm, tiene un tiempo de estabilización de 6 minutos a 20 °C, es alimentado con 12 V, la cual tiene una fibra óptica especializada con la entrada de un conector tipo FC al final de la

fibra, el ambiente de operación de la fuente óptica es de 5-35 °C (véase la Figura 3.8).



Figura 3.8 Fuente de luz DH-mini de Ocean Optics

- *M365FP1* el LED de fibra de Thorlabs tiene una longitud de onda nominal de 365 nm, genera más de 9.8 mW de potencia y está montado en el extremo de un disipador de calor. La salida es compatible con conectores de fibra SMA. Este LED debe ser alimentado con una corriente constante que no debe exceder los 1400 mA. La fuente de corriente debe poder suministrar esta corriente a un voltaje directo de 3.75 V.



Figura 3.9 Fuente de luz LED M365FP1.

- *Láser rojo* es un módulo de diodo láser de 10 W que da un láser rojo de 600-650 nm de longitud de onda. El cual contiene en su interior disipadores y ventiladores de refrigeración que garantizan una mejor disipación durante el trabajo. Contiene un adaptador de corriente de uso práctico, la distancia focal es ajustable en el extremo de láser.



Figura 3.10 Láser rojo (630-650 nm).

- *Láser LPSC-1550-FC* los diodos láser en espiral monomodo de Thorlabs son diodos empaquetados en TO estándar que se han colocado en una fibra monomodo de 1 m de longitud con un conector tipo FC. El parámetro operativo para una configuración típica es de 1.5 V de alimentación y una corriente de 40 mA, lo cual genera una longitud de onda de 1550 nm a la salida de la fibra óptica. Tiene una potencia óptica de 50 mW en su configuración típica antes descrita, para un correcto uso del láser debe operar entre 0 a 50 °C.

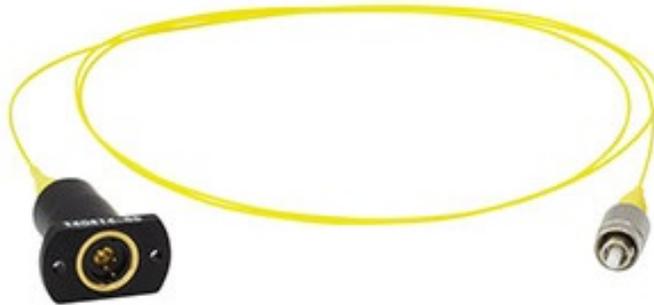


Figura 3.11 Láser LPSC-1550-FC.

3.3.1.2 Fibras ópticas utilizadas

- *Fibra monomodo* el cable óptico simplex OFNR de Condumex contiene una cubierta de PVC en color amarillo, 9 μm de diámetro en el núcleo, 125 μm de diámetro del revestimiento que sirve para proteger a la fibra óptica, que a su vez

cuenta con una protección primaria de 242 μm que protege a la fibra óptica de una ruptura.

- *Fibra multimodo* el cable óptico simplex OFNR de Condumex contiene una cubierta de PVC en color celeste, 50 μm de diámetro en el núcleo, 125 μm de diámetro del revestimiento que sirve para proteger a la fibra óptica, que a su vez cuenta con una protección primaria de 242 μm que protege a la fibra óptica de una ruptura.

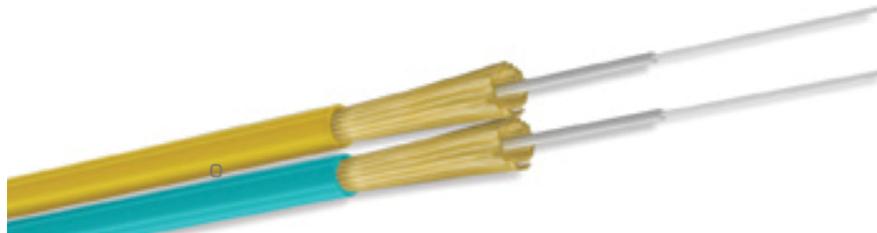


Figura 3.12 Fibra monomodo y multimodo.

3.3.1.3 Fotodiodos empleados para la medición de intensidad óptica

- *S150C* el fotodiodo está diseñado para aplicaciones basadas en fibra en el rango de longitud de onda VIS y NIR sin tener un cable perturbador entre el cabezal del sensor y la consola del medidor de potencia. El cabezal está calibrado espectralmente en todo el rango operativo de longitud de onda y detecta la luz desde nano vatios hasta 5 mW. El S150C viene con adaptadores de fibra FC y SMA. Detecta en un rango de onda de 350-1100 nm. Otros adaptadores de fibra como SMA, ST, LC y SC están disponibles como accesorios y se pueden cambiar fácilmente sin herramientas. La carcasa del sensor está equipada con un conector sub-d con mecanismo de auto fijación. El S150C es compatible con todas las nuevas unidades de visualización Thorlabs. Una memoria no volátil en el conector del sensor contiene datos de información del sensor y los datos de calibración, el conector es de tipo sub-D.



Figura 3.13 Fotodiodo S150C.

- S122C está diseñado para mediciones de potencia óptica de uso general. La cabeza está optimizada para espesores pequeños para caber en espacios reducidos. El fotodiodo de alta sensibilidad con gran área activa en combinación con un filtro ND absorbente permite mediciones de potencia de hasta 50 mW en aplicaciones de fibra y espacio libre. Un objetivo de visualización VIS / IR anular extraíble permite centrar convenientemente el haz medido en el área activa del fotodiodo. El fotodiodo absorbe luz de 700-1800 nm. La carcasa del S122C incluye una entrada roscada en el eje con la abertura de entrada de luz que es compatible con cualquier número de accesorios roscados como SMA, ST, LC y SC. El S122C es compatible con todas las nuevas unidades de visualización Thorlabs. Una memoria no volátil en el conector del sensor contiene datos de información del sensor y los datos de calibración, el conector es tipo sub-D.



Figura 3.14 Fotodiodo S122C.

3.3.1.4 Medidores de potencia óptica

- *PM320E* es un medidor de potencia y energía de doble canal de Thorlabs que ofrece muchas funciones que no se encuentran en los dispositivos portátiles. Es ideal para mediciones ópticas precisas, caracterización de láser y fotodiodos, mediciones de ciclo de vida y muchas más aplicaciones en el laboratorio. La operación manual intuitiva con la gran pantalla gráfica, la compatibilidad con los fotodiodos convencionales y las excelentes capacidades remotas permiten una fácil integración del sistema. Tiene un rango de potencia óptica de 100 pW – 200 W.

Los sensores calibrados se conectan a través de dos conectores sub-D en el panel posterior. Los PM320E se controlan localmente a través del panel frontal, que cuenta con una gran pantalla LCD de 240 x 128 píxeles, o de forma remota a través de USB 2.0.



Figura 3.15 Medidor de potencia PM320E

- *PM100USB* es un medidor de potencia y energía compatible con todos los sensores fotodiodos, térmicos y piroeléctricos de la serie C de Thorlabs. Esta interfaz puede ser operada y alimentada por una PC a través del puerto mini-USB. Una velocidad de lectura de 300 muestras por segundo permite el monitoreo activo de la señal mientras la interfaz está en uso. Los sensores son conectados en la parte posterior ya que cuenta con un conector tipo sub-D para la lectura de los datos en la interfaz gráfica.



Figura 3.16 Medidor de potencia PM100USB

3.4 Esquema general de configuración experimental

Con el fin de caracterizar el mecanismo de inclinación se empleó la configuración experimental que se observa en la Figura 3.17. La fibra óptica de prueba fue de 1.5 m de longitud, que a los extremos cuenta con conectores FC (véase la Figura 3.18).

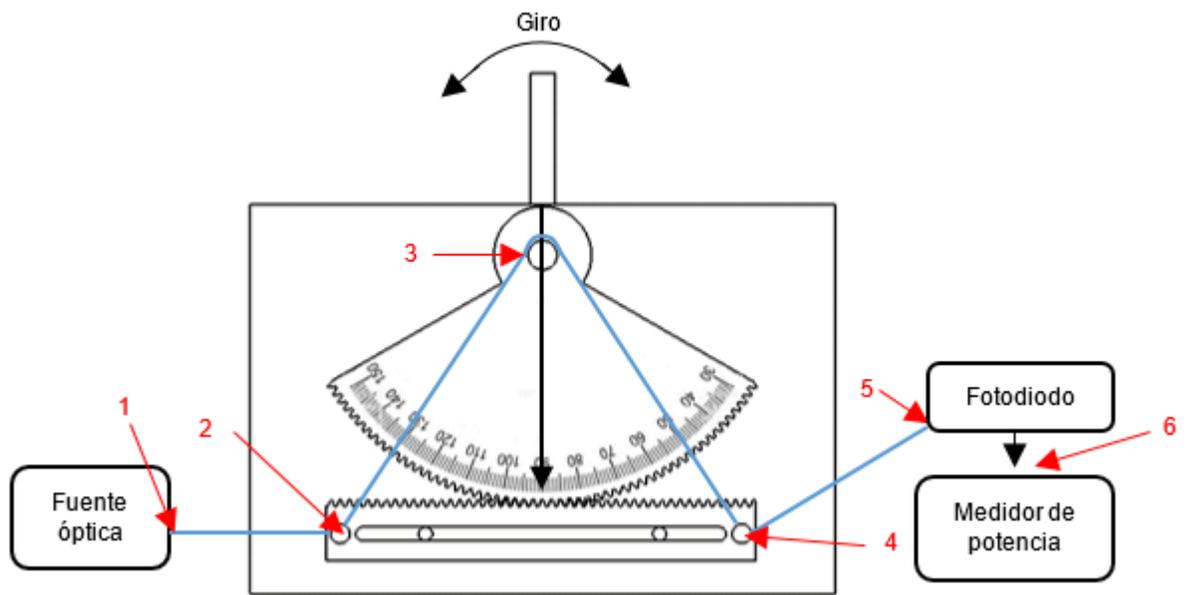


Figura 3.17 Configuración experimental y puntos de conexión.



Figura 3.18 Fibra optica con conectores FC en cada extremo.

Cabe mencionar que tanto la fuente de luz y el sistema de fotodetección cuentan con una fibra óptica especial que incluye conectores FC, y que, mediante un adaptador para este tipo de conectores, la luz se introduce a la fibra de prueba que se encuentra en la cremallera y es guiada hasta el fotodetector.

Se utilizaron las fuentes de luz mencionadas en el apartado 3.3.1.1, una de ellas es la DH-mini de Ocean Optics tiene una fibra óptica especial acoplada para la adecuación de la luz y acepta la conexión del conector tipo FC. Las demás fuentes de luz tienen un conector tipo FC a la salida de su fibra óptica.

La detección de intensidad óptica de la señal de salida, se llevó a cabo con los fotodiodos S150C (para la fuente DH-mini y láser rojo) y S122C (para el láser LPSC-1550-FC).

El montaje de la configuración experimental son 6 puntos de conexión de la fibra óptica, señalados por las flechas de color rojo de la Figura 3.17, la conexión se vuelve simple debido a los conectores FC; solamente requieren de un roscado manual del conector hacia la entrada de los dispositivos.

Todas las configuraciones experimentales constarán de 6 puntos de conexión. El primer punto de conexión, es la fuente de luz (DH-mini, láser de 650 nm, o en su defecto el láser LPSC-1550-FC) dependiendo de la configuración experimental, con un conector FC de la fibra óptica, el segundo punto, es el primer sujetador de fibra óptica, el tercer punto, colocar la fibra óptica sobre la polea, el cuarto punto, es el segundo sujetador de fibra óptica, el quinto punto, es la conexión al fotodiodo (S150C

y S122C) también dependerá de la configuración experimental, con el segundo conector FC de la fibra óptica y el sexto punto, es la conexión del conector tipo sub-D del fotodiodo, con el medidor de intensidad (PM320E y PM100USB) como se observa en la Figura 3.17.

3.4.1 Esquemas de configuraciones experimentales

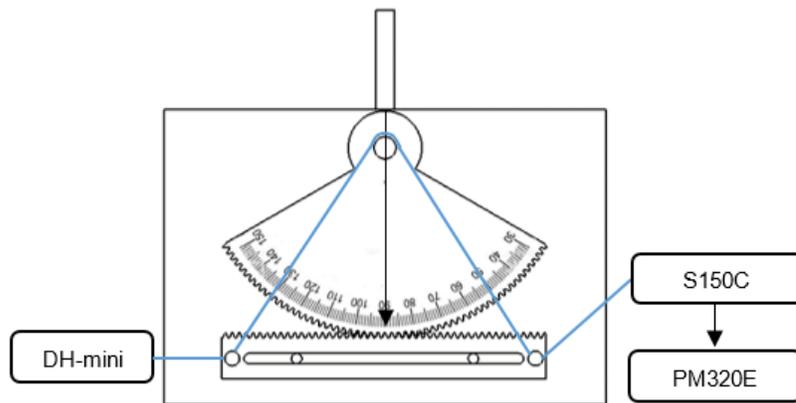


Figura 3.19 Configuración experimental para fuente de luz DH-mini.

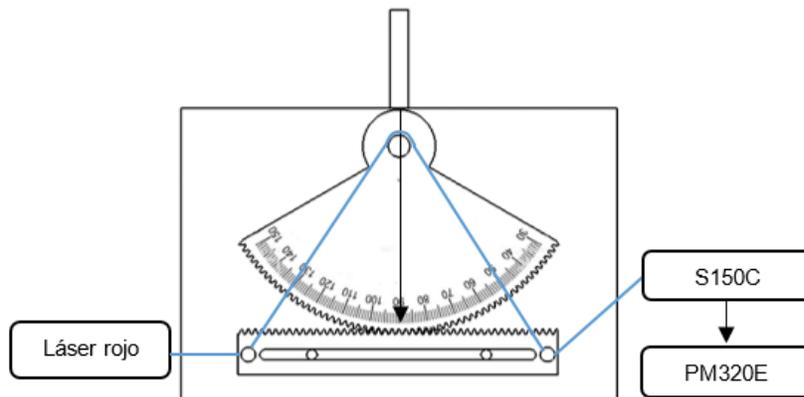


Figura 3.20 Configuración experimental para fuente de luz láser rojo.

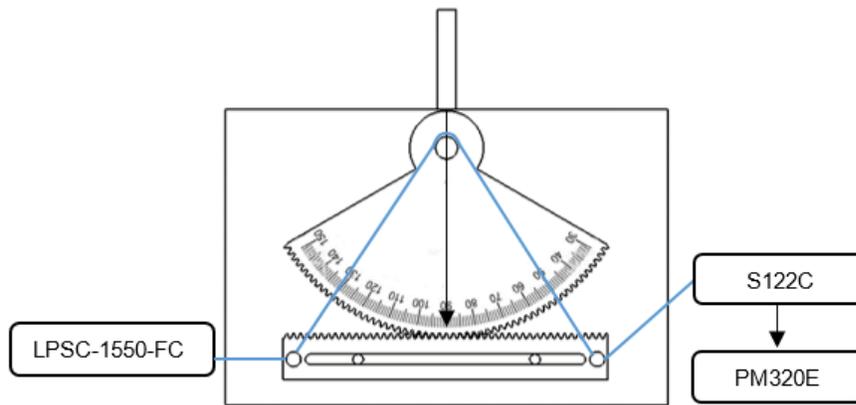


Figura 3.21 Configuración experimental para fuente de luz láser LPSC-150-FC.

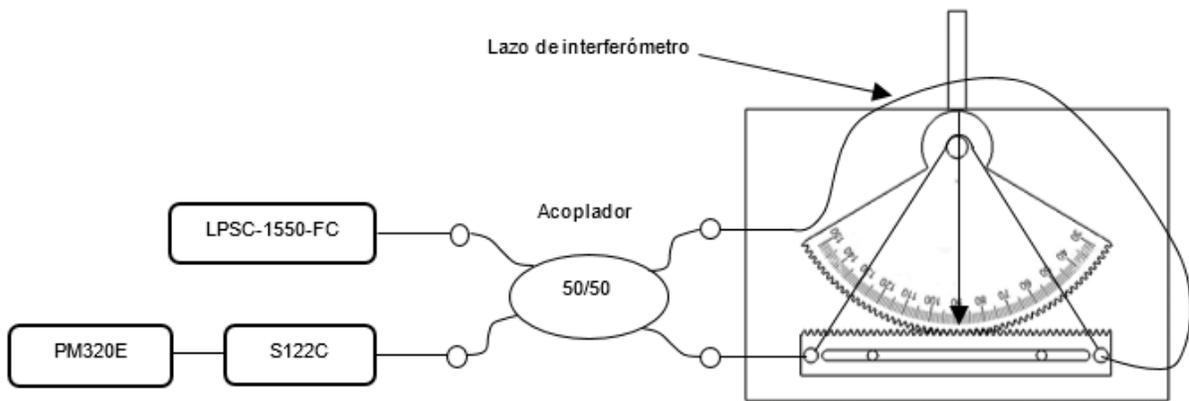


Figura 3.22 Configuración experimental para el interferómetro de Sagnac.

La Figura 3.22 muestra la implementación de un interferómetro de Sagnac, en la cual se emplea un acoplador 10202A-50-FC de Thorlabs el cual tiene un conector FC en la entrada y un conector FC en la salida. Se recurrió a este tipo de acoplador debido a que solo acepta un rango de onda de 1310 y 1550 nm. El lazo del interferómetro se realizó con fibra monomodo, con una longitud de 1.5 m.

Capítulo 4

Análisis de resultados

4.1 Resultados

La Figura 4.1 muestra la posición inicial del inclinómetro. Cuando el eje presenta una inclinación, este tensa uno de los lados de la fibra óptica AB (derecha) o BC (izquierda), como se observa en la Figura 4.2. Cuando esto sucede, esta tensión genera pérdida de intensidad en la salida de la fibra óptica y es medida por el fotodetector. Una de las ventajas de este mecanismo es que detecta inclinación en ambos sentidos de rotación.

En las pruebas experimentales, el sensor se inclinó de 0° a 10° de forma manual, con diferentes resoluciones que serán descritas a continuación, el medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda específica desde el panel frontal, esto depende del tipo de fuente de luz a utilizar de acuerdo a la configuración experimental, con el objetivo de capturar la máxima intensidad a la salida de la fibra óptica.

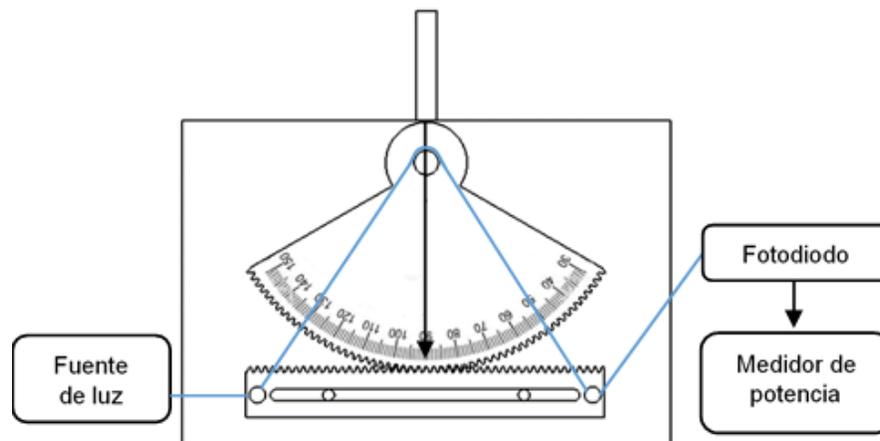


Figura 4.1 Inclinómetro en posición inicial.

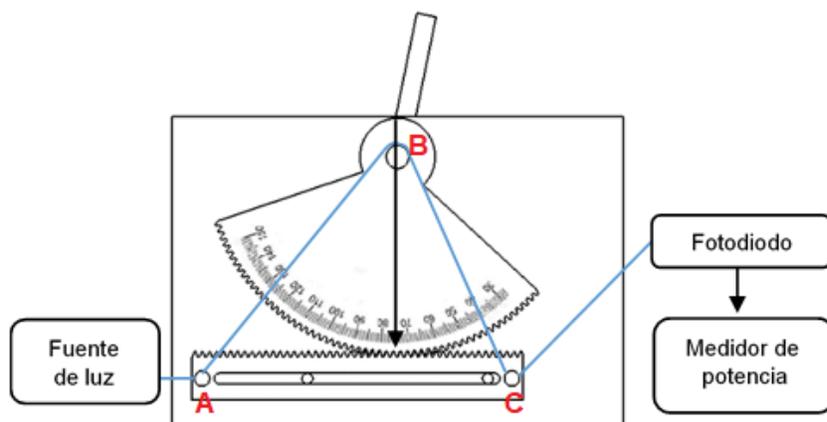


Figura 4.2 Inclinómetro con rotación.

4.1.1 Resultados con la fuente de luz visible (fuente DH-mini)

La conexión de la fibra y los elementos ópticos se realizó con base en la Figura 3.19. El medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda de 600 nm, debido a que el espectro de la fuente de luz (véase la Figura 4.3), indica que a esa longitud de onda es donde existe mayor intensidad de luz, y por consiguiente, al seleccionar esa longitud de onda se obtendrá mayor sensibilidad al momento de inclinar el sensor. En la tabla 1.1, se presentan las mediciones realizadas por el inclinómetro en grados y la relación de valores de intensidad a la salida de la fibra óptica por grado desplazado. La fibra óptica empleada para esta sección es la fibra multimodo descrita en la sección 3.3.1.2.

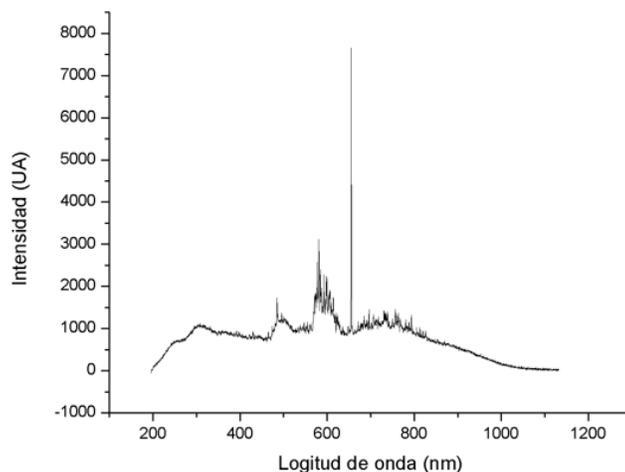


Figura 4.3 Intensidad relativa y espectrómetro de fuente DH-mini.

Tabla 1.1 Resultados de inclinación del sensor.

Grados de inclinación (°)	Intensidad óptica (nW)
0	28.71
1	28.54
2	28.34
3	28.12
4	27.96
5	27.74
6	27.51
7	26.96
8	26.73
9	26.46
10	26.09

Con los valores de la tabla 1, se construyó una gráfica donde se observa claramente la disminución de la intensidad en función al desplazamiento angular (véase la Figura 4.5). La gráfica se construyó colocando en el eje de la variable independiente (eje x) el rango de mediciones de desplazamiento angular (°) y en el eje de la variable dependiente (eje y) el valor correspondiente a la intensidad (nW).

Esto con el fin de obtener la ecuación por ajuste lineal que representará el valor correspondiente a cierto ángulo de inclinación dado por el inclinómetro. Con la ayuda de la gráfica generada se comprobó que el comportamiento se aproxima a la linealidad en la salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados con un ajuste de R^2 de 0.98639.

La ecuación de la recta para el inclinómetro obtenida por ajuste es:

$$y = 28.815 - 0.232x \tag{4.1}$$

La ecuación 3.1 describe el comportamiento del sensor de inclinación que se observa en la gráfica de la Figura 4.5. Es una función lineal de la forma $y = mx + b$ donde, el termino independiente representa la intensidad inicial de la fibra óptica y el signo negativo indica que la función es decreciente; es decir, que al aumentar los grados desplazados se tendrá mayor pérdida en la intensidad óptica.

Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular de 0.232 nW/° .

En la gráfica de la Figura 4.6 se realizó una prueba experimental, solamente con el fin de observar el comportamiento del espectro óptico, que sufre la luz en la fibra óptica al momento de inclinar el sensor, cabe mencionar que, en el diseño final, el inclinómetro no requerirá de un espectrómetro.

Para la medición del espectro óptico se recurrió al espectrómetro HR4000CG-UV-NIR de Ocean Optics, donde el inclinómetro varió de 0° a 10° con una resolución de 2° , la imagen muestra la atenuación de intensidad óptica al variar el ángulo de inclinación del mecanismo. Para llevar a cabo esta prueba experimental se recurrió a los 7 puntos de conexión que se observa en la Figura 4.4.

El primer punto de conexión, es la fuente de luz DH-mini con un conector FC de la fibra óptica, el segundo punto, es el primer sujetador de fibra óptica, el tercer punto, colocar la fibra óptica sobre la polea, el cuarto punto, es el segundo sujetador de fibra óptica, el quinto punto, es la conexión del espectrómetro (HR4000CG-UV-NIR) con el segundo conector FC de la fibra óptica, el sexto punto, la conexión del extremo del cable USB tipo B al espectrómetro, el séptimo punto, la conexión del USB tipo A a la computadora con el software de adquisición de datos (Spectra Suite de Ocean Optics).

Al igual que la fuente de luz DH-mini el espectrómetro cuenta con una fibra óptica especializada para la captación de la luz tiene en su extremo un adaptador de fibra óptica para conector tipo FC.

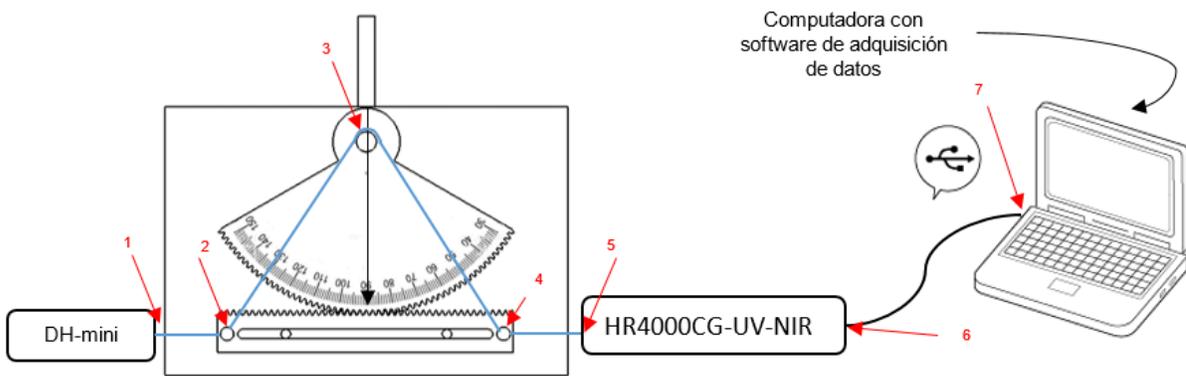


Figura 4.4 Configuración experimental para obtener el cambio del espectro del movimiento del inclinómetro con fuente de luz DH-mini.

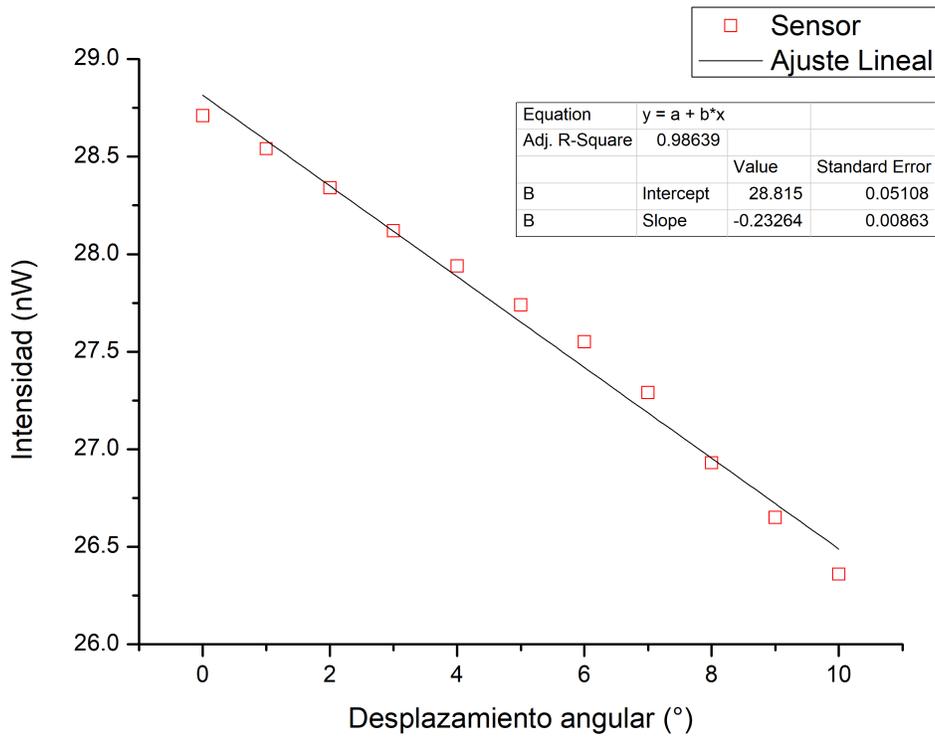


Figura 4.5 Gráfica del comportamiento del inclinómetro con la fuente DH-mini.

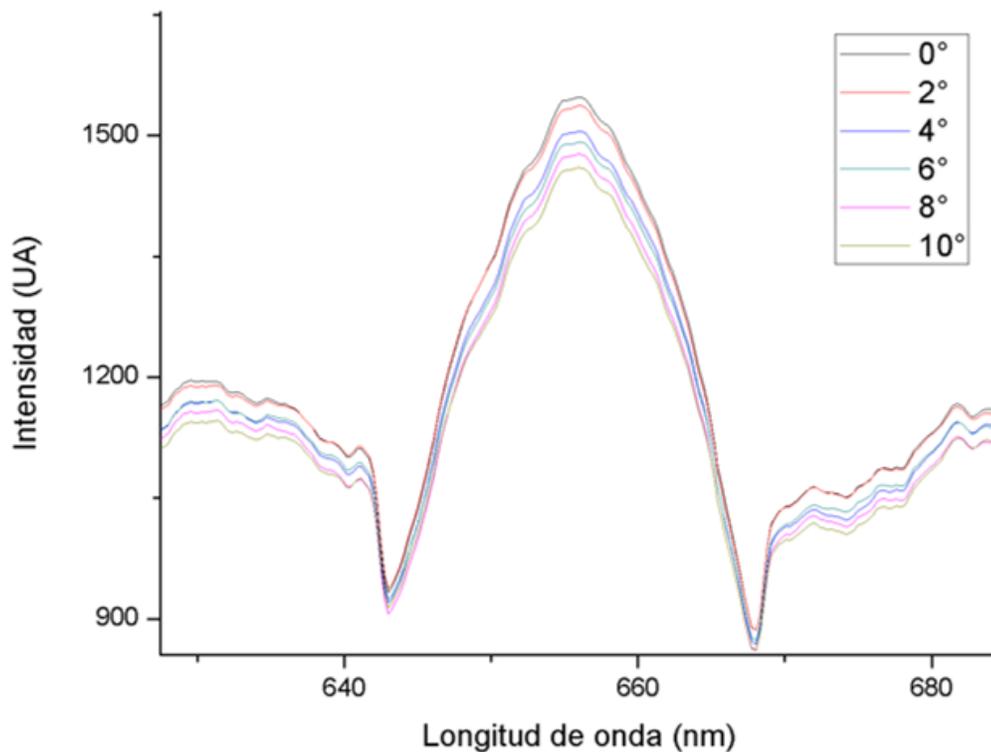


Figura 4.6 Intensidad y espectro del sensor inclinado de 0° a 10° con una resolución de 2° con la fuente de luz Dh-mini.

4.1.2 Resultados con láser rojo

La conexión de la fibra y los elementos ópticos se realizó con base en la Figura 3.20. El medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda de 600 nm, debido a que el espectro del láser rojo (véase la Figura 4.7), indica que a esa longitud de onda es donde existe mayor intensidad de luz, y por consiguiente, al seleccionar esa longitud de onda se obtendrá mayor sensibilidad al momento de inclinar el sensor. La fibra óptica empleada para esta sección es la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2.

En la sección anterior 4.1.1 se describió toda la serie de pasos para obtener la ecuación que describe el comportamiento del sensor con la configuración experimental. En los apartados siguientes se omitirán algunas tablas y descripciones para obtener la ecuación característica de la configuración experimental, ya que el

procedimiento es exactamente el mismo para todas las configuraciones, solamente se escribirá lo que realmente es relevante en cada una de las configuraciones.

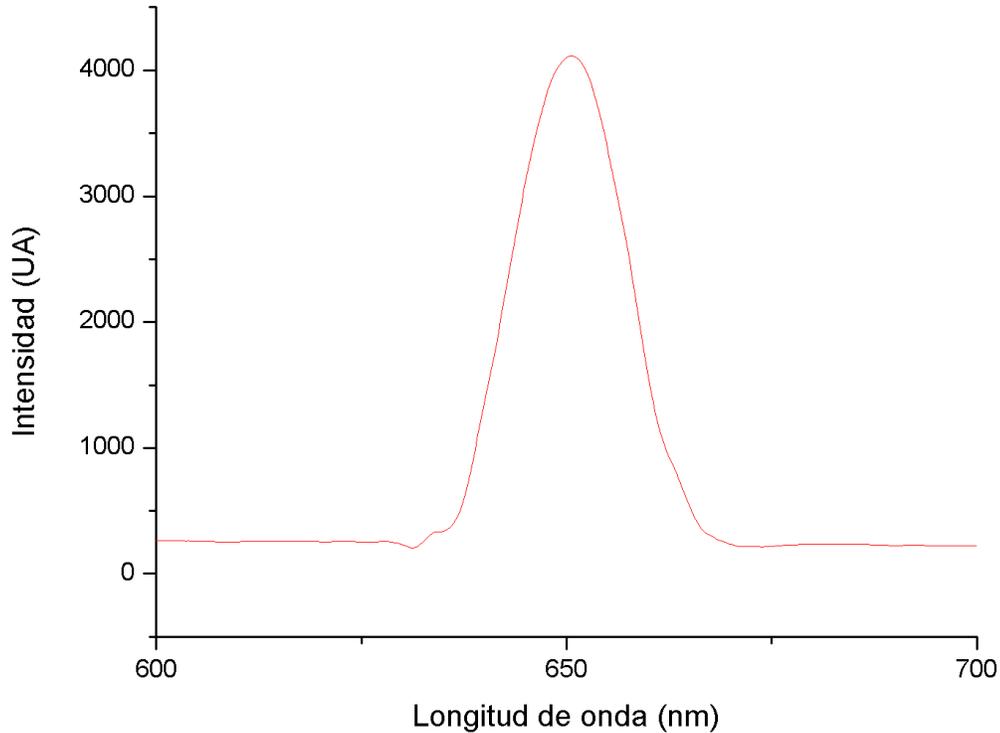


Figura 4.7 Intensidad relativa y espectrómetro del diodo láser.

Se construyó una gráfica donde se observa claramente la disminución de la intensidad en función al desplazamiento angular (véase la Figura 4.9). Con la ayuda de la gráfica generada se comprobó que el comportamiento se aproxima a la linealidad en la salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados con un ajuste de R^2 de 0.97662. La ecuación de la recta para el inclinómetro obtenida por ajuste es:

$$y = 29.73 - 0.37x \quad (4.2)$$

En la gráfica de la Figura 4.10 se realizó una prueba experimental, solamente con el fin de observar el comportamiento del espectro óptico que sufre la luz en la fibra óptica al momento de inclinar el sensor, cabe mencionar que, en el diseño final, el inclinómetro no requerirá de un espectrómetro.

Para la medición del espectro óptico se recurrió al espectrómetro HR4000CG-UV-NIR de Ocean Optics, donde el inclinómetro varió de 0° a 10° con una resolución de 2° , la imagen muestra la atenuación de intensidad óptica al variar el ángulo de inclinación del mecanismo. Para llevar a cabo esta prueba experimental se recurrió a los 7 puntos de conexión que se observa en la Figura 4.8.

El primer punto de conexión, la conexión del diodo láser con un conector FC de la fibra óptica, el segundo punto, es el primer sujetador de fibra óptica, el tercer punto, colocar la fibra óptica sobre la polea, el cuarto punto, es el segundo sujetador de fibra óptica, el quinto punto, es la conexión del espectrómetro (HR4000CG-UV-NIR) con el segundo conector FC de la fibra óptica, el sexto punto, la conexión del extremo del cable USB tipo B al espectrómetro, el séptimo punto, la conexión del USB tipo A a la computadora con el software de adquisición de datos (Spectra Suite de Ocean Optics).

El espectrómetro cuenta con una fibra óptica especializada para la captación de la luz tiene en su extremo un adaptador de fibra óptica para conector tipo FC.

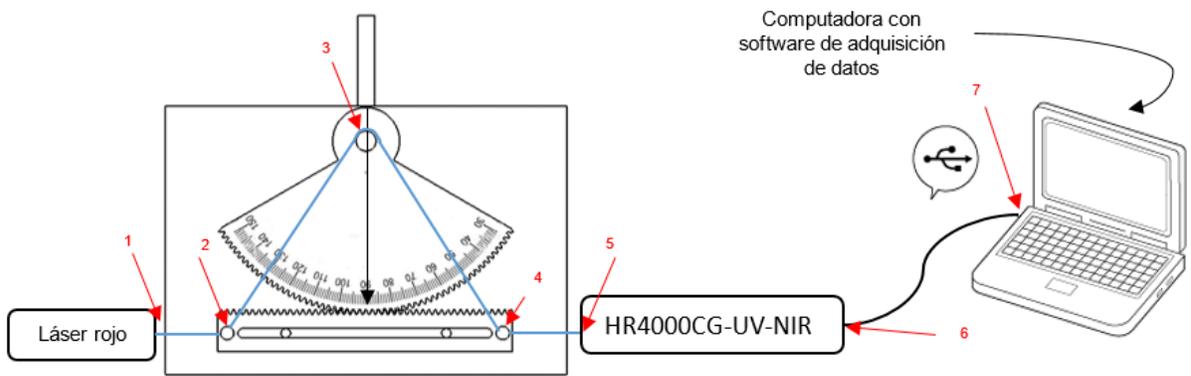


Figura 4.8 Configuración experimental para obtener el cambio en el espectro del movimiento del inclinómetro con láser rojo.

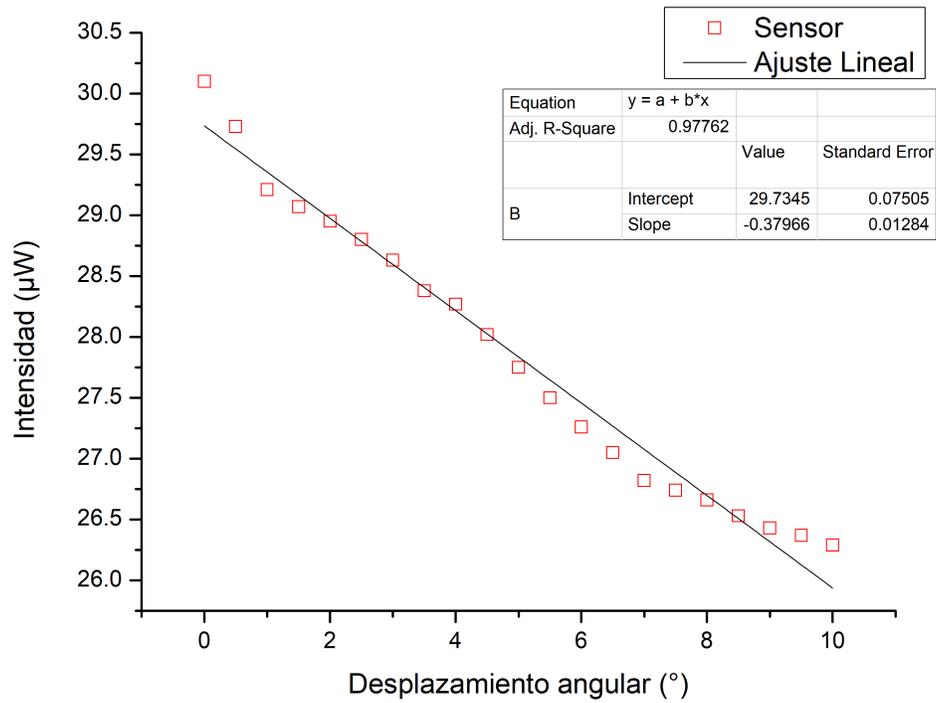


Figura 4.9 Cambio de intensidad cuando el ángulo de inclinación se incrementa de 0° a 10°, con resolución de 0.5° con láser rojo.

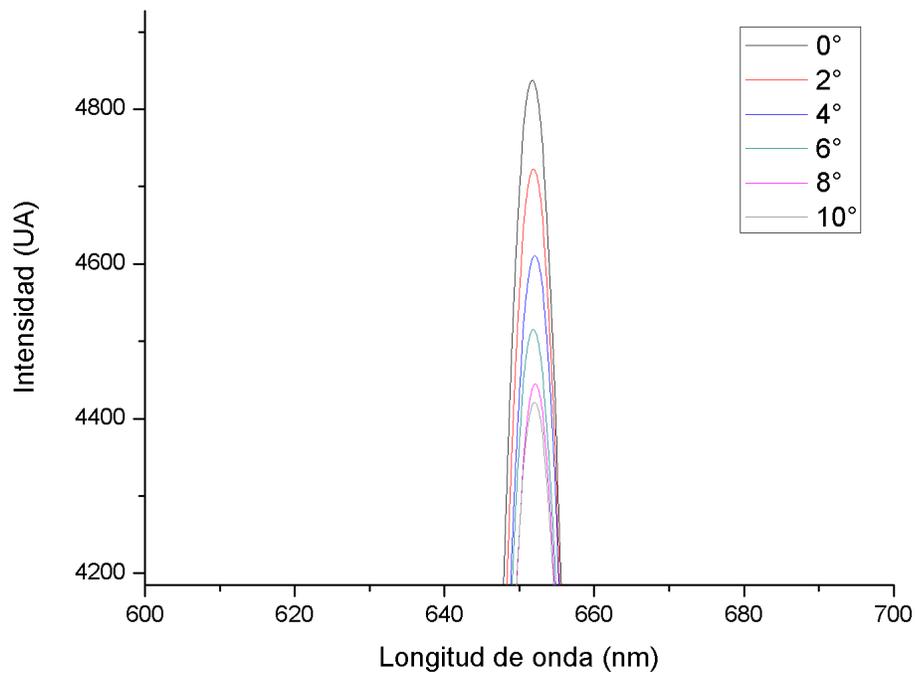


Figura 4.10 Intensidad y espectro del sensor inclinado de 0° a 10° con una resolución de 2° con el láser rojo.

4.1.3 Resultados con láser LPSC-1550-FC

Es necesario mencionar que la estabilidad de la intensidad de un diodo láser depende en gran medida de la calidad de la electrónica del controlador. Dada la alta sensibilidad de la longitud de la onda del láser a las fluctuaciones de la corriente de inyección y los cambios de temperatura, originan un cambio de intensidad en la salida del láser.

La longitud de onda necesita estabilidad de control de temperatura, y fluctuaciones de corriente que no excedan el nivel de μA . En un sensor de fibra óptica por cambio de intensidad, requiere de un control extremadamente preciso de la temperatura del diodo láser y un bajo nivel de ruido electrónico, lo que resulta en dispositivos caros.

El ajuste de la emisión del láser se logra cambiando la temperatura de la unión del diodo o variando la corriente del diodo. Las capacidades de ajuste de intensidad de los diodos láser proporcionan un rango de ajuste más amplio para aplicaciones versátiles.

En las pruebas anteriores del inclinómetro, no se tenía contemplado el efecto que ejerce la temperatura en una fuente de luz, por tal motivo se implementó un circuito de control de temperatura para el láser LPSC-1550-FC, mediante un método confiable, simple y barato para estabilizar la intensidad de salida de un diodo láser.

El proceso se llevó a cabo mediante el control automático de temperatura del diodo láser. Por lo que el láser es montado en un enfriador que es controlado por corriente que circula a través de él. Este enfriador consta de un cooler por el cual circulará la corriente y de un termistor por el cual podemos observar la variación de la resistencia según el cambio de temperatura que este experimente. Entonces, mediante el cambio de la resistencia podemos ver el cambio de la temperatura en que se encuentra el láser en ese momento.

A temperatura ambiente la resistencia del termistor puede variar, ya que la temperatura ambiente puede cambiar de una hora a otra o de un día a otro, y por consiguiente en

casi todo el año este es cambiante. Por lo que la corriente que se necesita para alcanzar una determinada temperatura en el láser tampoco va a ser constante.

Por ejemplo si quisiéramos sintonizar el láser en una longitud de onda específica y para ello la temperatura del láser debe estar en 17 °C, la resistencia del termistor debe de estar en 12 kΩ (véase la Figura 4.11), tenemos que ir incrementando la corriente e ir midiendo la resistencia del termistor para ver como baja la temperatura, sin embargo, esto no es el problema.

El problema es que esa corriente si permanece constante, debido al cambio de la temperatura ambiente, calentamiento de equipos y otros factores más cambian la temperatura del entorno, y repercutirá en un cambio de resistencia en el termistor, por lo que siempre hay que estar monitoreando la resistencia del termistor para saber si estamos en el rango de selección de longitud de onda deseado. Si la temperatura aumenta la resistencia baja y esto nos lleva a incrementar la corriente en el cooler para mantenerlo en el rango establecido.

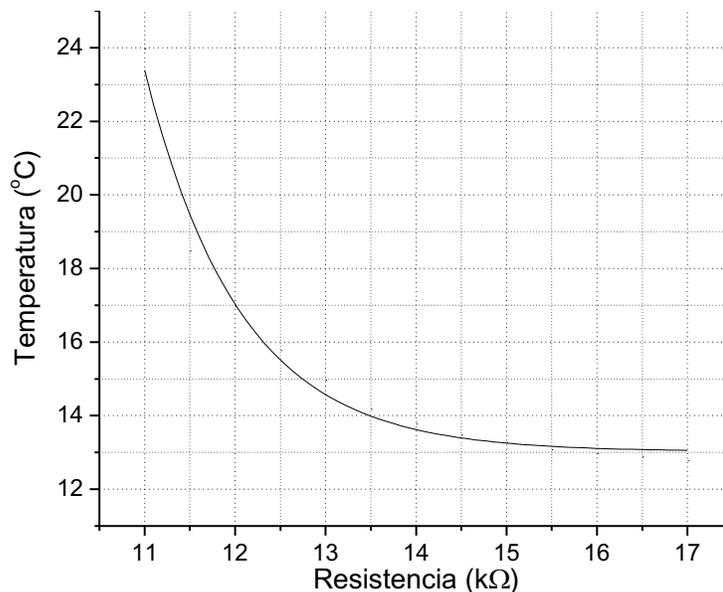


Figura 4.11 Comportamiento de la temperatura en función de la resistencia del termistor.

La temperatura se controló desde un voltaje a través del termistor desde un refrigerador comercial donde se instaló el diodo láser, el circuito de control (comparadores de voltaje) son los que generan el cambio de voltaje en la salida de un regulador LM317 dependiendo del cambio de la resistencia del termistor del enfriador.

Si se desea conocer todo el sistema de funcionamiento y control de temperatura consultar la referencia [52]. El diagrama completo del control de temperatura se muestra en la Figura 4.12.

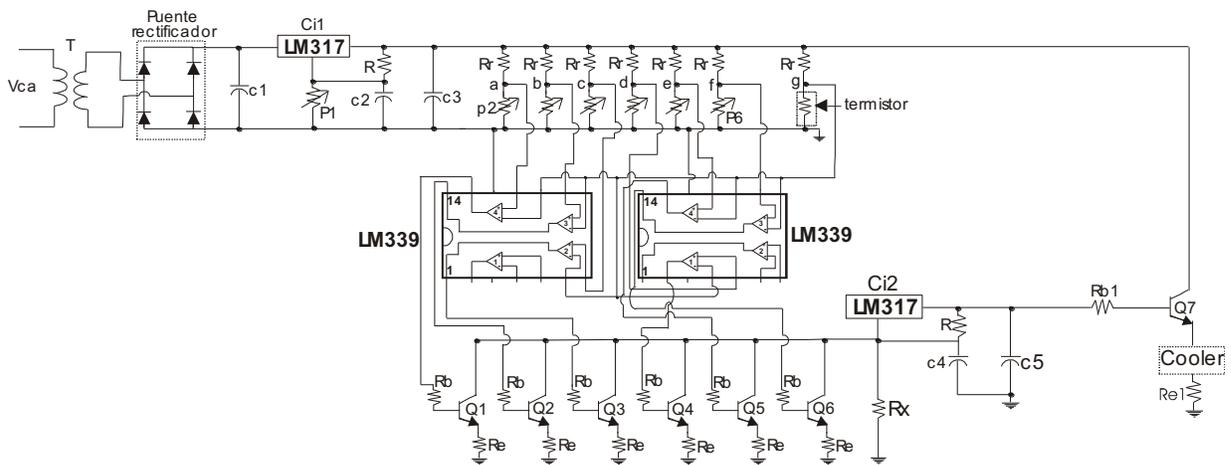


Figura 4.12 Control de temperatura de láser LPSC-1550-FC.

La gráfica que representa la estabilidad del láser LPSC-1550-FC con controlador de temperatura implementado se observa en la Figura 4.13. Para hacer énfasis de cuál es el mínimo cambio de la intensidad del láser con respecto al tiempo, se hizo un acercamiento a la gráfica de la Figura 4.13 y se generó la gráfica de la Figura 4.14, en la cual se observa claramente que después de 25 minutos se logra la estabilidad del láser, teniendo un cambio mínimo 3 diezmilésimas de mW. Con esto se puede garantizar que el cambio de intensidad que se le generará a la fibra óptica es propiamente por el mecanismo de inclinación (engrane-cremallera) y no por el cambio de temperatura que existe en el ambiente.

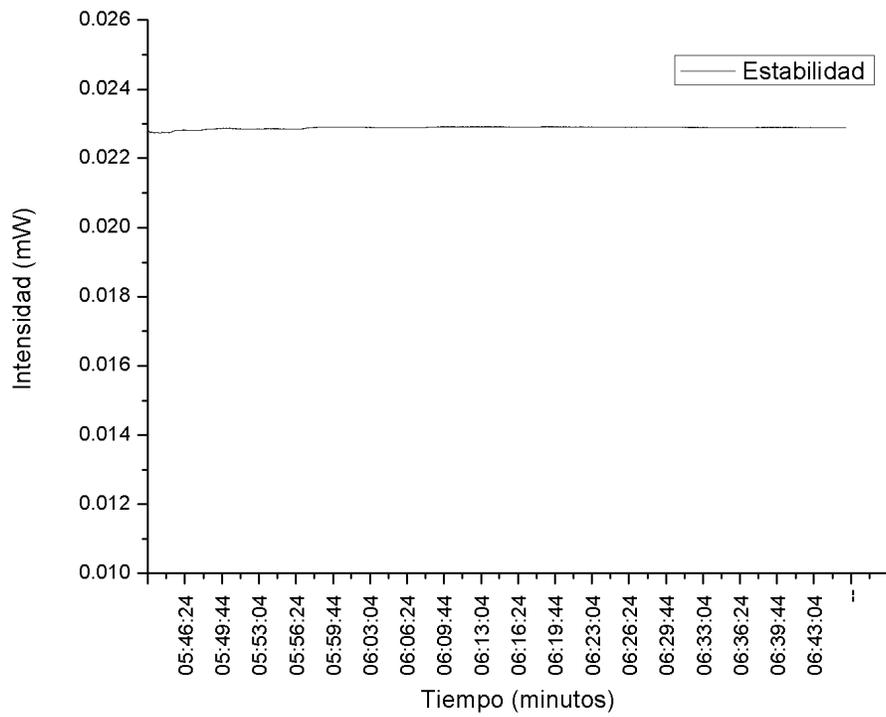


Figura 4.13 Estabilidad temporal de laser LPSC-1550-FC

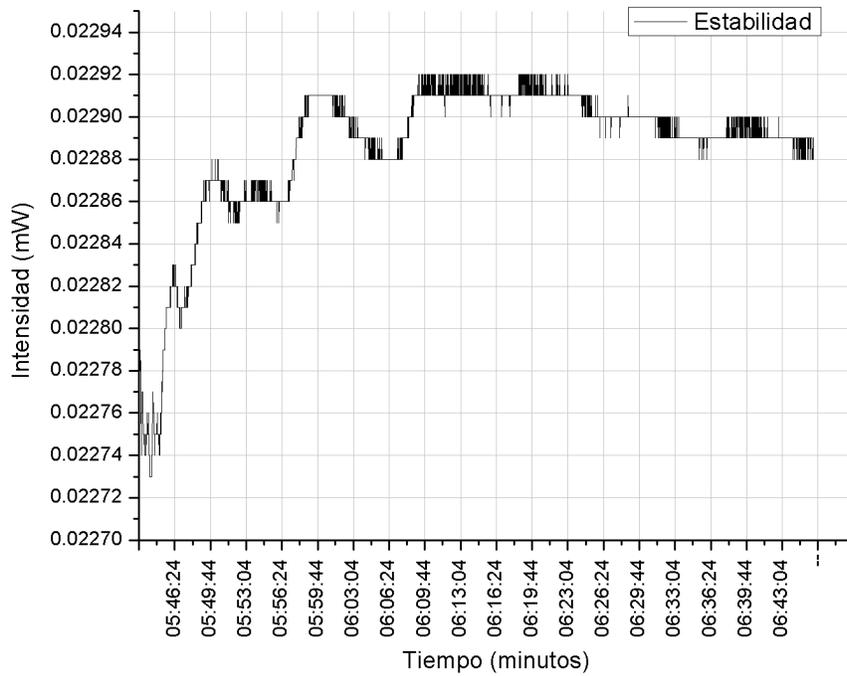


Figura 4.14 Estabilidad temporal de laser LPSC-1550-FC con acercamiento.

La conexión de la fibra y los elementos ópticos se realizó con base en la Figura 3.21. El medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda de 1550 nm, de acuerdo a las especificaciones del fabricante la longitud de onda típica se encuentra a 1550 nm, indica que a esa longitud de onda es donde existe mayor intensidad de luz, y por consiguiente, al seleccionar esa longitud de onda se obtendrá mayor sensibilidad al momento de inclinar el sensor.

Para pruebas experimentales el sensor se varió de 0° a 10°, con una resolución de inclinación de 0.5° y 0.25°, los cuales se presentarán en los apartados 4.1.3.1 y 4.1.3.2.

4.1.3.1 Resultados con resolución de 0.5°

4.1.3.1.1 Resultados con fibra monomodo

La fibra óptica empleada para esta sección es la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2. Se construyó una gráfica donde se observa claramente la disminución de la intensidad en función al desplazamiento angular (véase la Figura 4.15).

Con la ayuda de la gráfica generada se comprobó que el comportamiento se aproxima a la linealidad en la salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados con un ajuste de R^2 de 0.9647 para la recta de la ecuación (4.3) y 0.9545 para la ecuación (4.4).

La ecuación (4.4) es el comportamiento del sensor en un desplazamiento de 10° a 0°, con lo cual se corrobora que el sensor tiene reversibilidad, pues al tomar las medidas de 10° a 0° se observa poca variación con los resultados que se obtuvieron al inclinar de 0° a 10°.

La ecuación de la recta para el inclinómetro obtenida por ajuste es:

$$y = 2.8752 - 0.192x \quad (4.3)$$

$$y = 2.8895 - 0.197x \quad (4.4)$$

Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular de 0° a 10° es de 0.192 mW/° y de 0.197 mW/° para el de desplazamiento de 10° a 0°.

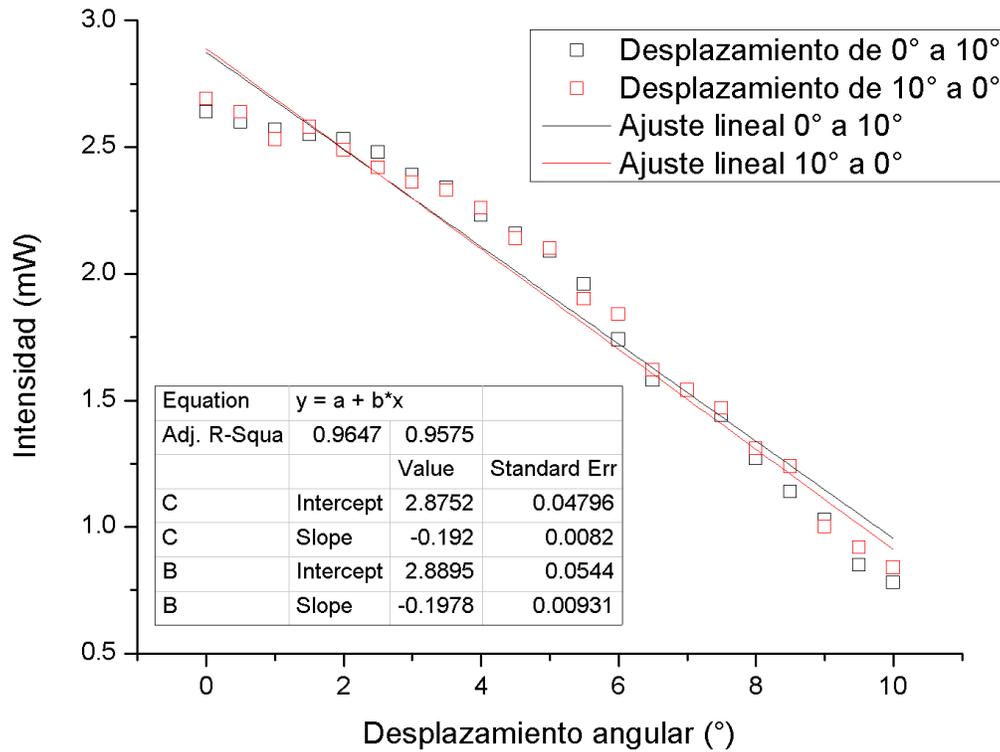


Figura 4.15 Resultados de comportamiento del inclinómetro con fibra monomodo ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.5°.

4.1.3.1.2 Resultados con fibra multimodo

La fibra óptica empleada para esta sección es la fibra multimodo descrita en la sección 3.3.1.2. Se construyó una gráfica donde se observa claramente la disminución de la intensidad en función al desplazamiento angular (véase la Figura 4.16).

Con la ayuda de la gráfica generada se comprobó que el comportamiento se aproxima a la linealidad en la salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados con un ajuste de R^2 de 0.97942 para la recta de la

ecuación (4.5) y 0.98576 para la ecuación (4.6). La ecuación (4.6) es el comportamiento del sensor en un desplazamiento de 10° a 0°.

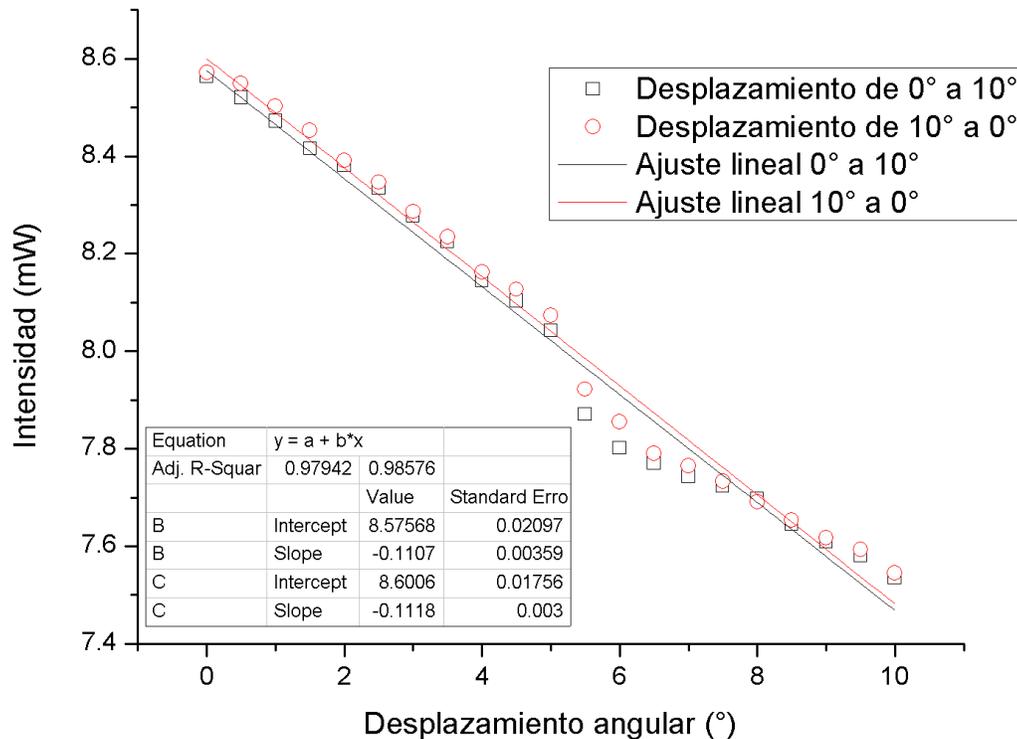


Figura 4.16 Resultados de comportamiento del inclinómetro con fibra multimodo ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.5°.

La ecuación de la recta para el inclinómetro obtenida por ajuste es:

$$y = 8.57568 - 0.1107x \quad (4.5)$$

$$y = 8.60060 - 0.1118x \quad (4.6)$$

Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular de 0° a 10° es de 0.1107 mW/° y de 0.1118 mW/° para el de desplazamiento de 10° a 0°.

4.1.3.1.3 Resultados con interferómetro de Sagnac

La conexión de la fibra y los elementos ópticos se realizó con base en la Figura 3.22. La fibra óptica empleada para esta sección es la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2. Se construyó una gráfica donde se observa claramente la disminución de la intensidad en función al desplazamiento angular (véase la Figura 4.17).

Con la ayuda de la gráfica generada se comprobó que el comportamiento se aproxima a la linealidad en la salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados con un ajuste de R^2 de 0.98207 para la recta de la ecuación (4.7) y 0.9873 para la ecuación (4.8). La ecuación (4.8) es el comportamiento del sensor en un desplazamiento de 10° a 0° .

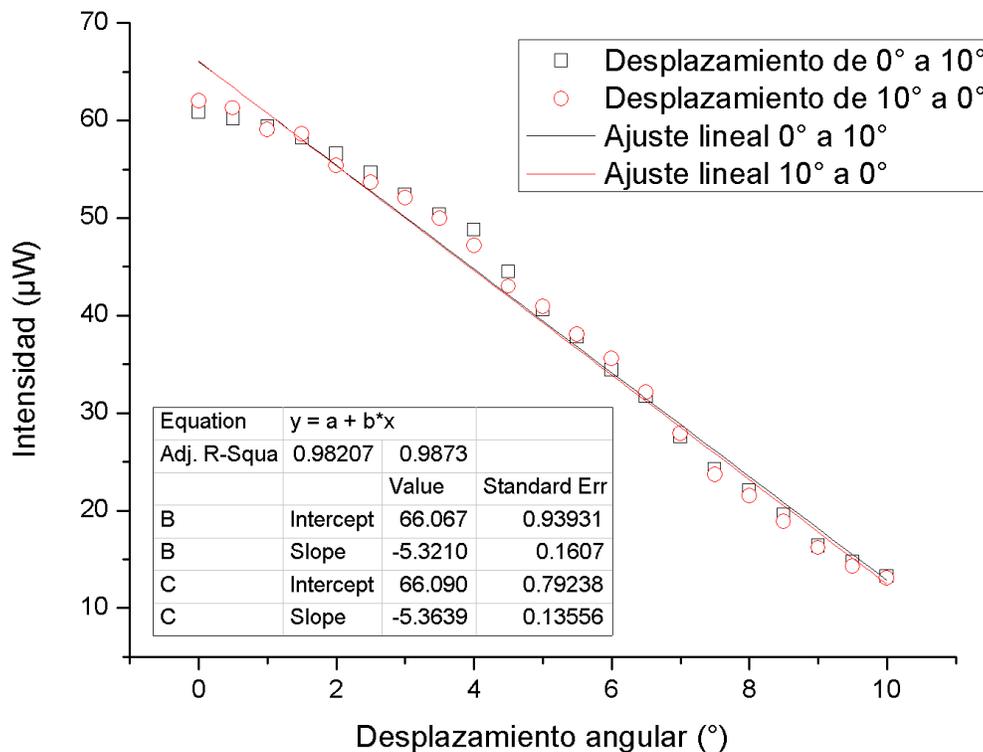


Figura 4.17 Resultados de comportamiento del inclinómetro con interferómetro de Sagnac ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.5° .

La ecuación de la recta para el inclinómetro obtenida por ajuste es:

$$y = 66.067 - 5.3210x \quad (4.7)$$

$$y = 66.090 - 5.3639x \quad (4.8)$$

Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular de 0° a 10° es de 5.3210 $\mu\text{W}/^\circ$ y de 5.3639 $\mu\text{W}/^\circ$ para el de desplazamiento de 10° a 0°.

4.1.3.2 Resultados con resolución de 0.25°

4.1.3.2.1 Resultados con fibra monomodo

La fibra óptica empleada para esta sección es la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2. Se construyó una gráfica donde se observa claramente la disminución de la intensidad en función al desplazamiento angular (véase la Figura 4.18).

Con la ayuda de la gráfica generada se comprobó que el comportamiento se aproxima a la linealidad en la salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados con un ajuste de R^2 de 0.97368 para la recta de la ecuación (4.9) y 0.97644 para la ecuación (4.10). La ecuación (4.10) es el comportamiento del sensor en un desplazamiento de 10° a 0°.

La ecuación de la recta para el inclinómetro obtenida por ajuste es:

$$y = 3.04317 - 0.24083x \quad (4.9)$$

$$y = 3.08188 - 0.24350x \quad (4.10)$$

Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular de 0° a 10° es de 0.24083 $\text{mW}/^\circ$ y de 0.24350 $\text{mW}/^\circ$ para el de desplazamiento de 10° a 0°.

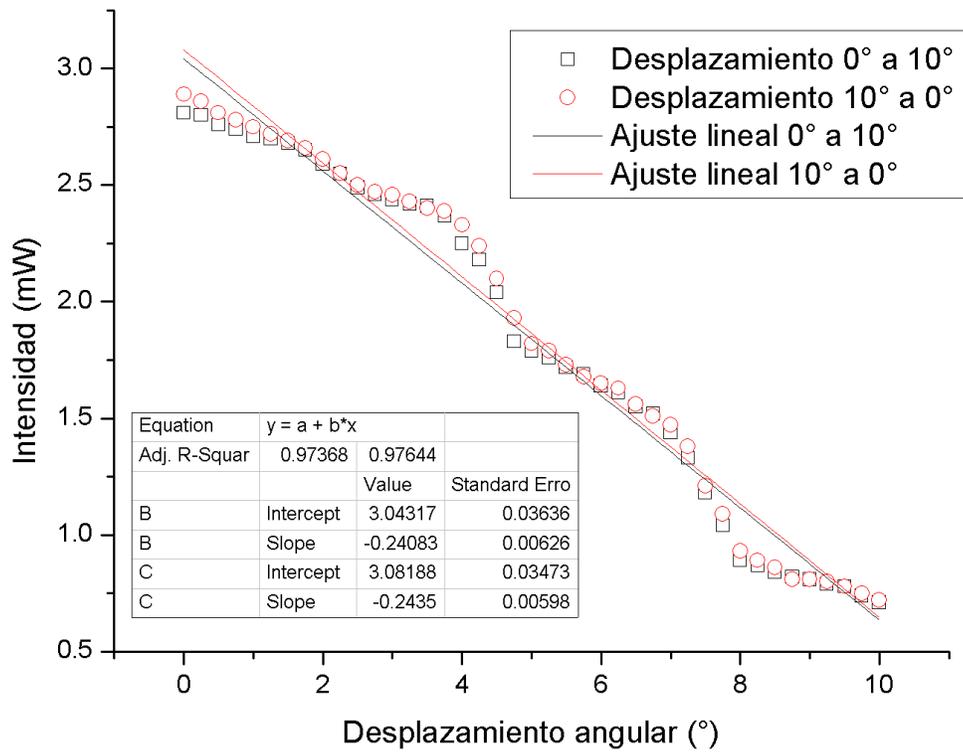


Figura 4.18 Resultados de comportamiento del inclinómetro con fibra monomodo ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.25°.

4.1.3.2.2 Resultados con fibra multimodo

La fibra óptica empleada para esta sección es la fibra multimodo descrita en la sección 3.3.1.2. Se construyó una gráfica donde se observa claramente la disminución de la intensidad en función al desplazamiento angular (véase la Figura 4.19).

Con la ayuda de la gráfica generada se comprobó que el comportamiento se aproxima a la linealidad en la salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados con un ajuste de R^2 de 0.99037 para la recta de la ecuación (4.11) y 0.98702 para la ecuación (4.12). La ecuación (4.12) es el comportamiento del sensor en un desplazamiento de 10° a 0°.

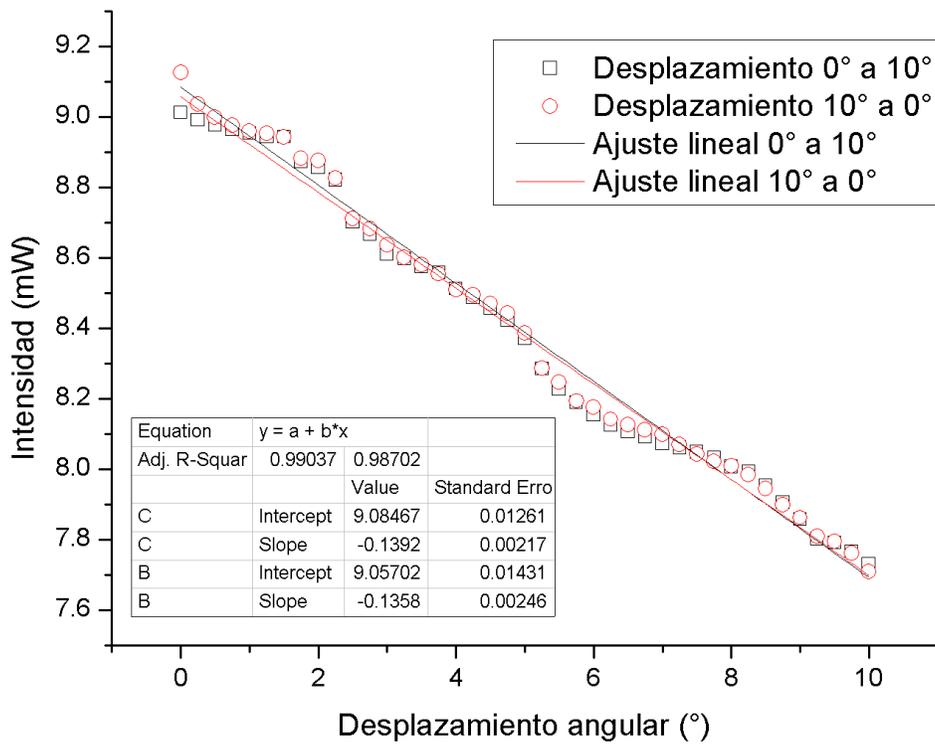


Figura 4.19 Resultados de comportamiento del inclinómetro con fibra multimodo ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.25°.

La ecuación de la recta para el inclinómetro obtenida por ajuste es:

$$y = 9.08467 - 0.1392x \quad (4.11)$$

$$y = 9.05762 - 0.1358x \quad (4.12)$$

Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular de 0° a 10° es de 0.192 mW/° y de 0.197 mW/° para el de desplazamiento de 10° a 0°.

4.1.3.2.3 Resultados con interferómetro de Sagnac

La conexión de la fibra y los elementos ópticos se realizó con base en la Figura 3.22. La fibra óptica empleada para esta sección es la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2. Se construyó una gráfica donde se observa claramente la disminución de la intensidad en función al desplazamiento angular (véase la Figura 4.20).

Con la ayuda de la gráfica generada se comprobó que el comportamiento se aproxima a la linealidad en la salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados con un ajuste de R^2 de 0.98158 para la recta de la ecuación (4.13) y 0.98279 para la ecuación (4.14). La ecuación (4.14) es el comportamiento del sensor en un desplazamiento de 10° a 0° .

La ecuación de la recta para el inclinómetro obtenida por ajuste es:

$$y = 60.7314 - 5.7393x \quad (4.13)$$

$$y = 61.6125 - 5.8163x \quad (4.14)$$

Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular de 0° a 10° es de $5.7393 \mu W/^\circ$ y de $5.8163 \mu W/^\circ$ para el de desplazamiento de 10° a 0° .

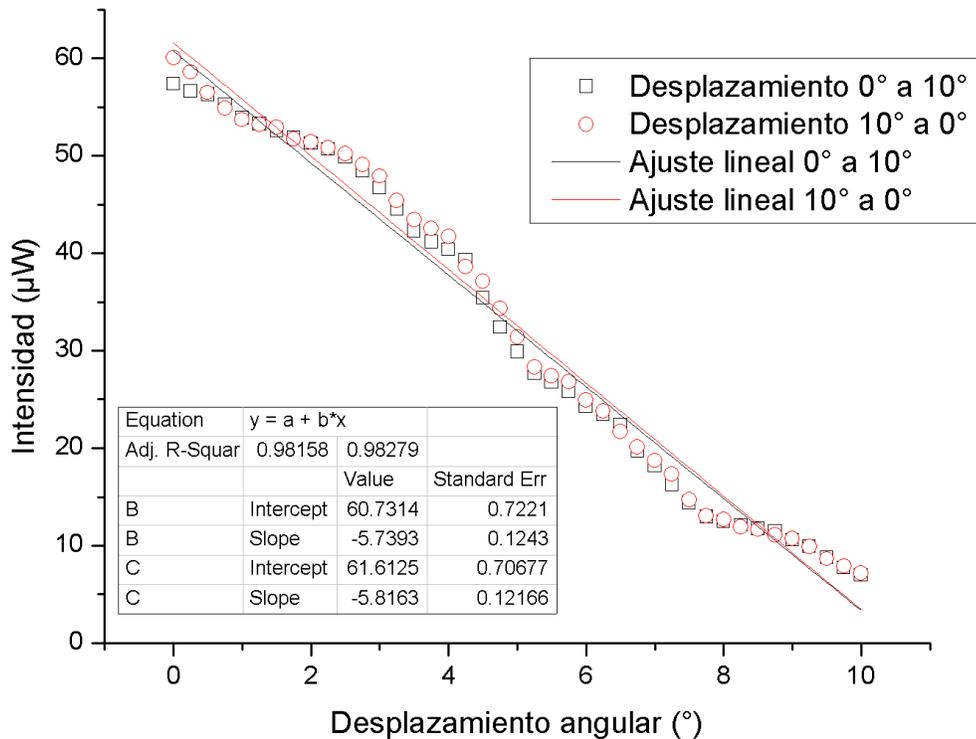


Figura 4.20 Resultados de comportamiento del inclinómetro con interferómetro de Sagnac ante la inclinación del mecanismo en una resolución de 0.25° .

4.1.3.3 Estabilidad temporal de medición

La estabilidad temporal se refiere al grado en que un instrumento de medición arrojará el mismo resultado en diversas mediciones y permanece invariable.

Para saber en cuanto tiempo se alcanza la estabilidad temporal ante una inclinación del mecanismo, se realizó la prueba experimental para cada una de las configuraciones de fibra óptica. La prueba experimental se realizó de la siguiente forma para todas las configuraciones de fibra.

El tiempo de estabilidad de las configuraciones ópticas del sensor de inclinación se calculó con las fibras descritas en la sección 3.3.1.2, con la configuración experimental de la Figura 4.21, se utilizó el láser LPSC-1550-FC de Thorlabs y se recolectaron datos de manera remota a través de USB 2.0 en tiempo real del medidor de potencia (PM320E).

El primer punto de conexión, es el láser LPSC-1550-FC con un conector FC de la fibra óptica, el segundo punto, es el primer sujetador de fibra óptica, el tercer punto, colocar la fibra óptica sobre la polea, el cuarto punto, es el segundo sujetador de fibra óptica, el quinto punto, es la conexión del fotodiodo con el segundo conector FC de la fibra óptica, el sexto punto, es la conexión del conector tipo sub-D del fotodiodo (S122C), con el medidor de intensidad (PM320E), el séptimo punto, es la conexión del extremo del cable USB tipo B al medidor de potencia (PM320E), el séptimo punto, la conexión del USB tipo A a la computadora con el software de adquisición de datos (PM320E-Datalog).

El medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda de 1550 nm, debido a las especificaciones del fabricante indica que la longitud de onda típica del láser es 1550 nm y es donde existe mayor intensidad de luz, y por consiguiente, al seleccionar esa longitud de onda se obtendrá mayor sensibilidad al momento de inclinar el sensor.

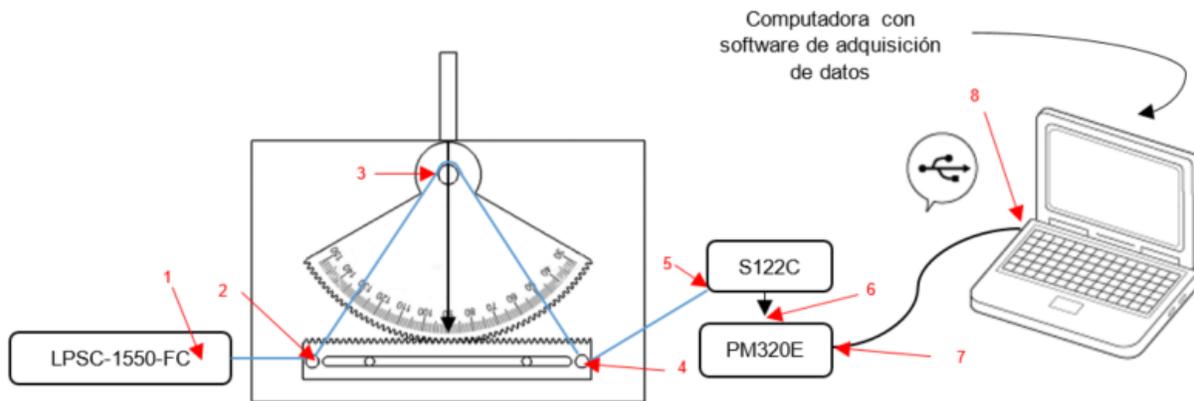


Figura 4.21 Esquema de configuración para la obtención de estabilidad temporal de las configuraciones de fibra óptica.

Primero se estabilizó la intensidad del láser óptico en un tiempo aproximado de 25 minutos, para realizar las pruebas experimentales. Se colocó al inclinómetro en 0° , en las gráficas se puede observar una intensidad inicial, después el mecanismo es inclinado a 10° y se mantiene inmóvil durante 1 hora aproximadamente, mientras que los datos son almacenados en tiempo real por el medidor de potencia (PM320E).

Cuando el inclinómetro está en la posición de 10° nos arroja una intensidad, pero esta intensidad aun no es la correspondiente a 10° , debemos esperar un tiempo para que el medidor de potencia arroje la misma intensidad óptica, a ese tiempo de estabilidad de la intensidad óptica se le conoce como estabilidad temporal. Las gráficas muestran un decrecimiento de intensidad óptica al momento de inclinar el sensor a 10° y muestran el tiempo en el que logran la estabilidad temporal cada una de las configuraciones.

A continuación, se muestran los resultados de la estabilidad temporal de la fibra monomodo, multimodo e interferómetro de Sagnac. Se presenta cada una de las gráficas, acompañadas de una segunda gráfica con acercamiento, para poder visualizar el cambio de la intensidad óptica y saber el momento exacto en el que la intensidad permanece invariante en el tiempo.

4.1.3.3.1 Estabilidad temporal fibra monomodo

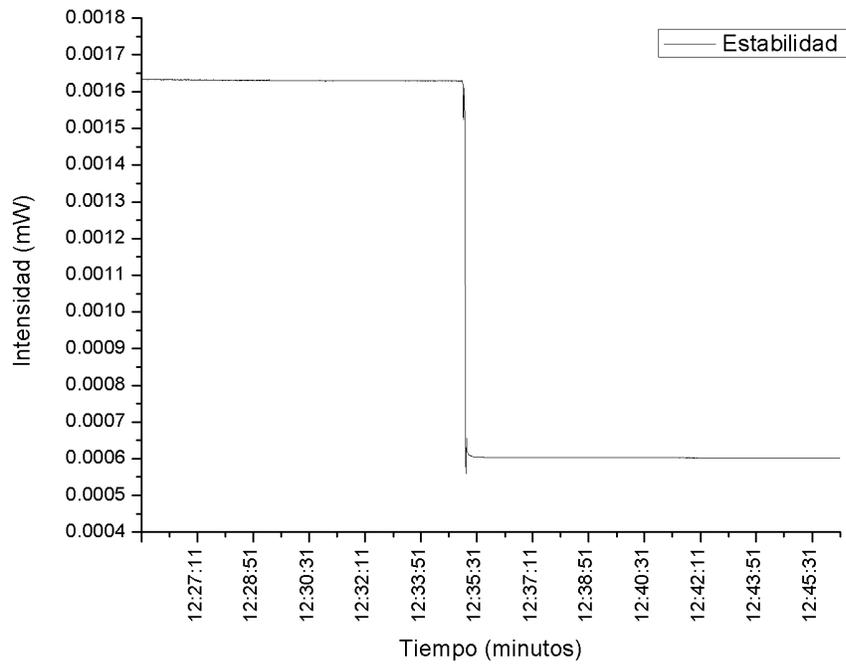


Figura 4.22 Estabilidad temporal de la fibra monomodo.

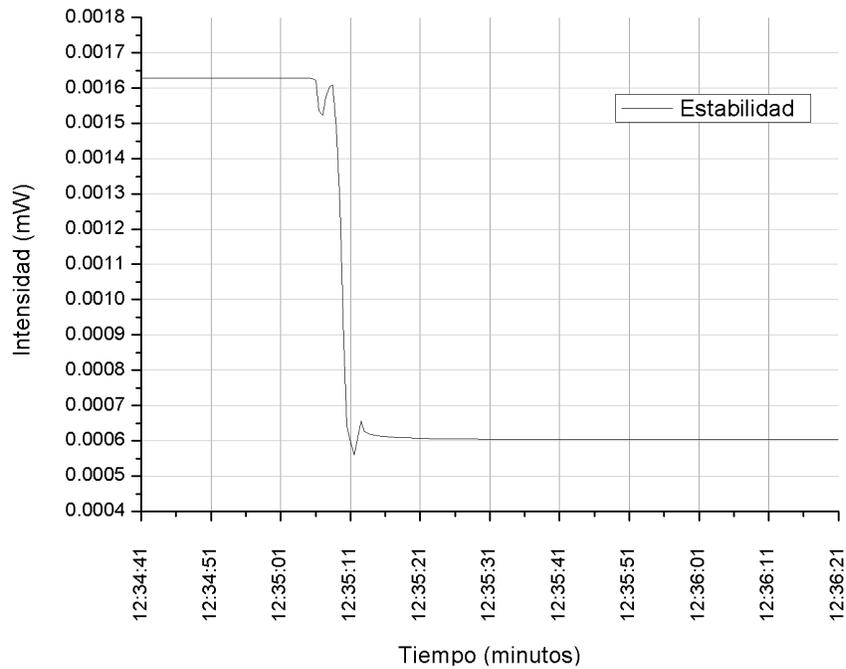


Figura 4.23 Estabilidad temporal monomodo con acercamiento.

4.1.3.3.2 Estabilidad temporal fibra multimodo

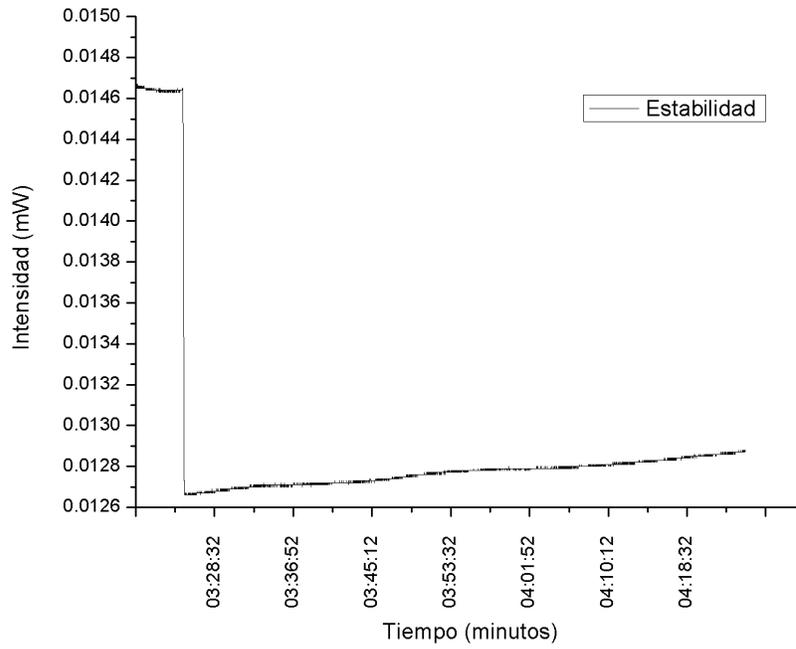


Figura 4.24 Estabilidad temporal fibra multimodo.

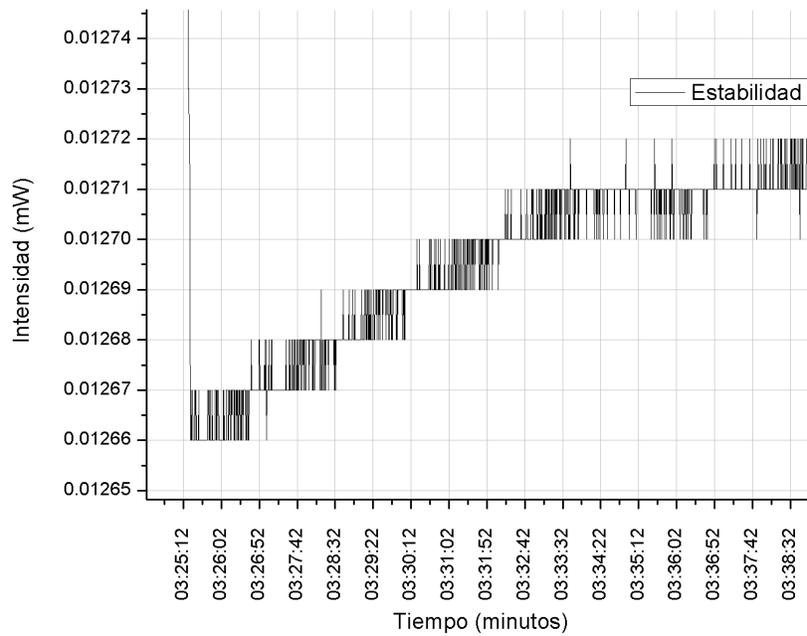


Figura 4.25 Estabilidad temporal fibra multimodo con acercamiento.

4.1.3.3.3 Estabilidad temporal interferómetro de Sagnac

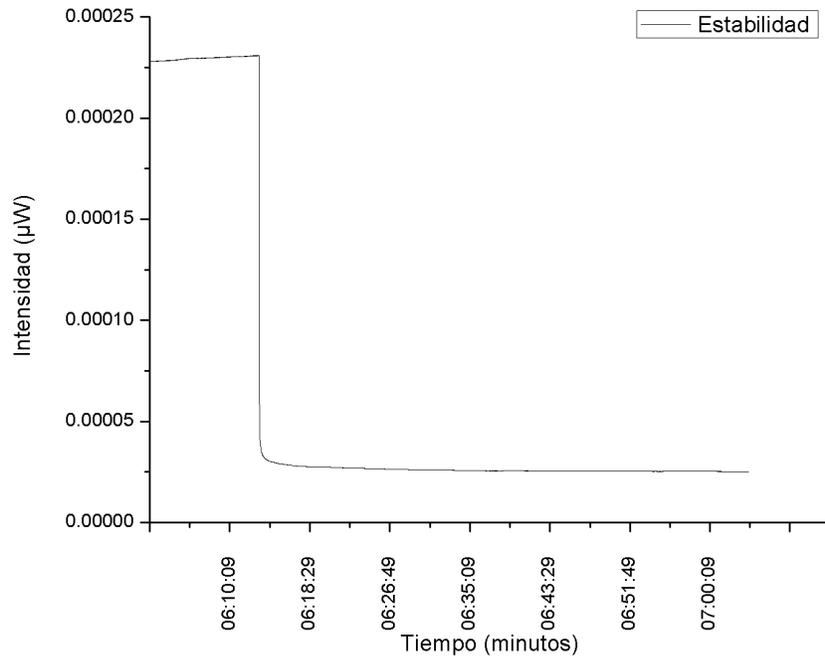


Figura 4.26 Estabilidad temporal del interferómetro de Sagnac.

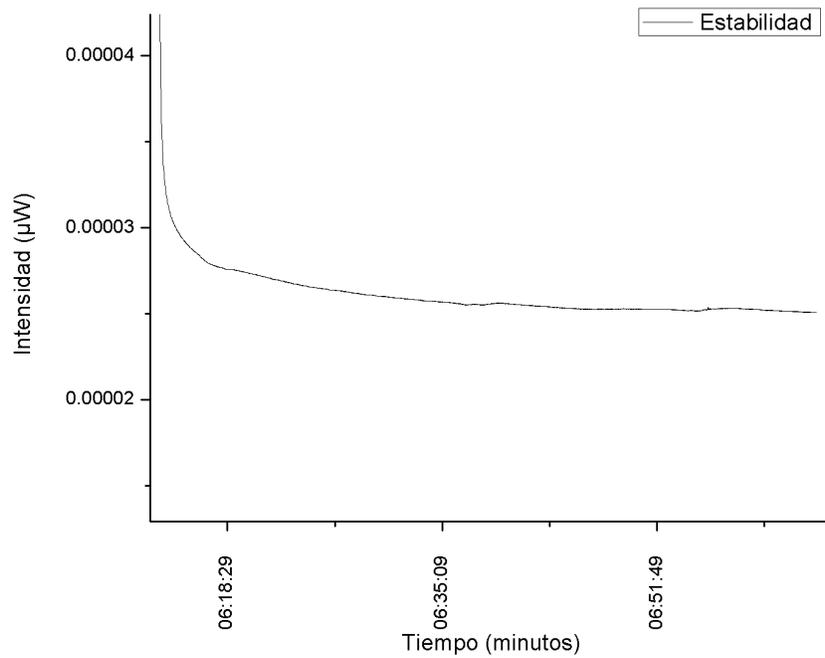


Figura 4.27 Estabilidad temporal del interferómetro de Sagnac con acercamiento.

Las gráficas de estabilidad nos proporcionan la información del tiempo que se debe considerar para realizar la medición del desplazamiento. En la Tabla 4.1 se observa el tiempo de estabilidad de cada una de las configuraciones de fibra óptica.

Tabla 4.1 Resultados de inclinación del sensor.

Configuración experimental	Estabilidad temporal (minutos)
Láser LPSC-1550-FC	25
Monomodo	1
Multimodo	Constante cambio
Interferómetro de Sagnac	30

4.1.4 Tiempo de respuesta y tiempo de recuperación

El tiempo de respuesta del sensor de inclinación se calculó con la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2, con la configuración experimental de la Figura 4.28, se utilizó el LED M365FP1 de Thorlabs y se recolectaron datos de manera remota a través de USB 2.0 en tiempo real del medidor de potencia (PM320E).

El primer punto de conexión, es el LED M365FP1 con un conector FC de la fibra óptica, el segundo punto, es el primer sujetador de fibra óptica, el tercer punto, colocar la fibra óptica sobre la polea, el cuarto punto, es el segundo sujetador de fibra óptica, el quinto punto, es la conexión del fotodiodo con el segundo conector FC de la fibra óptica, el sexto punto, es la conexión del conector tipo sub-D del fotodiodo (S150C), con el medidor de intensidad (PM320E), el séptimo punto, es la conexión del extremo del cable USB tipo B al medidor de potencia (PM320E), el séptimo punto, la conexión del USB tipo A a la computadora con el software de adquisición de datos (PM320E-Datalog).

El medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda de 365 nm, debido a las especificaciones del fabricante indica que la longitud de onda típica del LED es 365 nm y es donde existe mayor intensidad de luz, y por consiguiente, al seleccionar esa longitud de onda se obtendrá mayor sensibilidad al momento de inclinar el sensor.

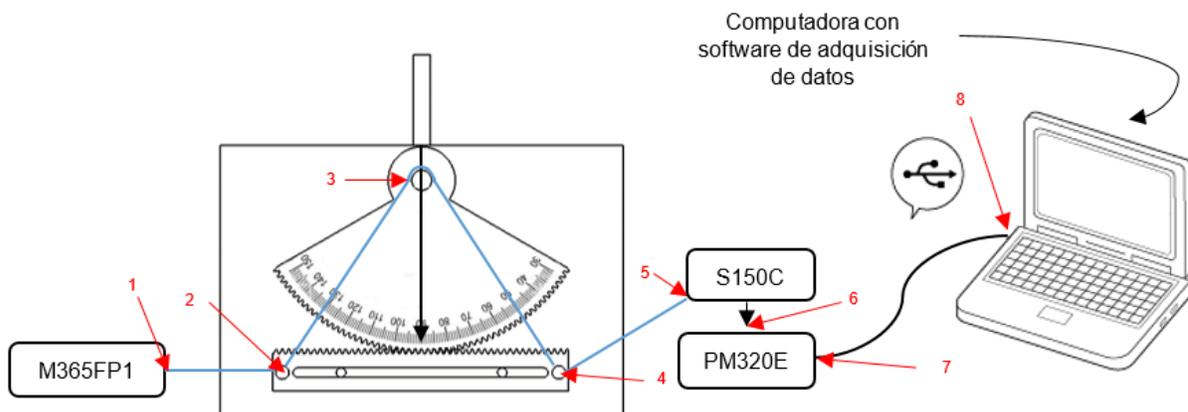


Figura 4.28 Esquema de configuración para la obtención de tiempo de respuesta y tiempo de recuperación.

El tiempo de respuesta hace referencia al tiempo que transcurre en responder a los cambios de la variable detectada en un mínimo tiempo. Para saber el tiempo de respuesta el inclinómetro se colocó en la posición de 0° y se desplazó de manera rápida a 10° , se esperó un lapso de tiempo y se hizo un desplazamiento de 10° a 0° , este fenómeno se ve gráficamente en la Figura 4.29.

La Figura 4.30 se observa el tiempo de respuesta, es decir el tiempo que tarda en pasar de 0° a 10° , se puede apreciar el posicionamiento de un puntero en la parte superior con el fin de conocer el tiempo que este tiene a 0° , la Figura 4.31 se observa el cambio del puntero en la parte inferior de la gráfica, es decir cuando este llega a 10° , el tiempo en el que se efectuó el cambio de 0° a 10° es de manera instantánea, con una duración de un milisegundo.

El tiempo de recuperación se observa en la imagen 4.32, es decir el tiempo que tarda en pasar de 10° a 0° , se posicionó el puntero en la parte inferior para conocer el tiempo que este tenía a 10° , al momento de efectuar la inclinación a 0° la potencia óptica tiende a incrementar, en la Figura 4.33 se coloca el puntero en el tiempo de 0° de inclinación, el tiempo que transcurre de 10° a 0° es de un milisegundo.

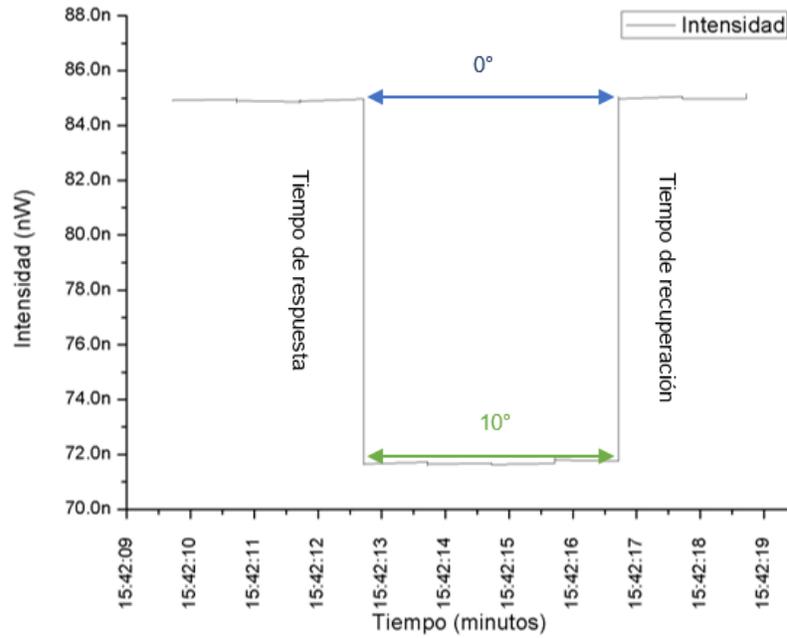


Figura 4.29 Gráfica que ilustra el tiempo de respuesta y el tiempo de recuperación.

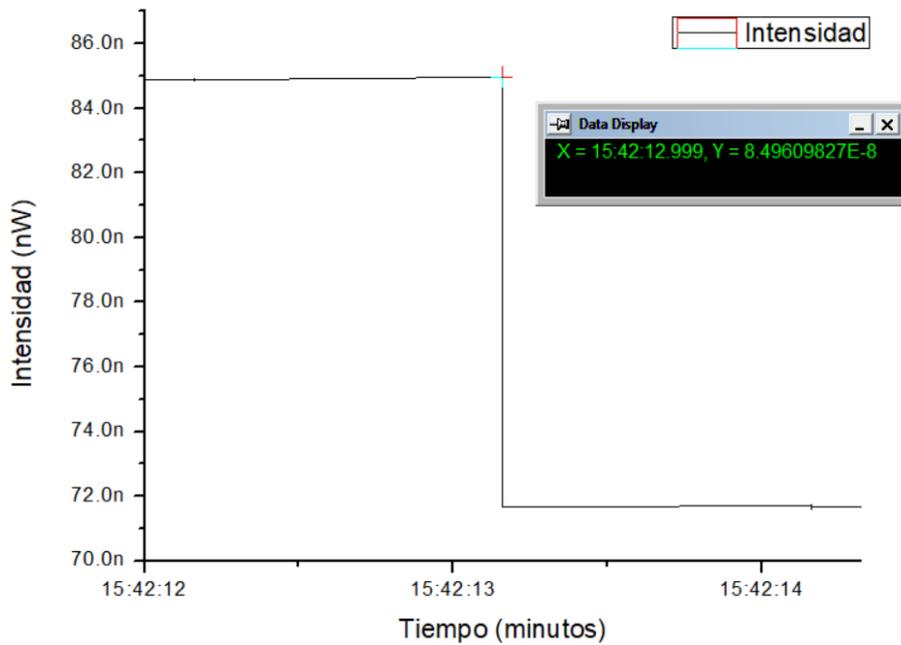


Figura 4.30 Gráfica que ilustra el movimiento de 0° a 10°, además se observa el valor del tiempo en 0° antes de la inclinación.

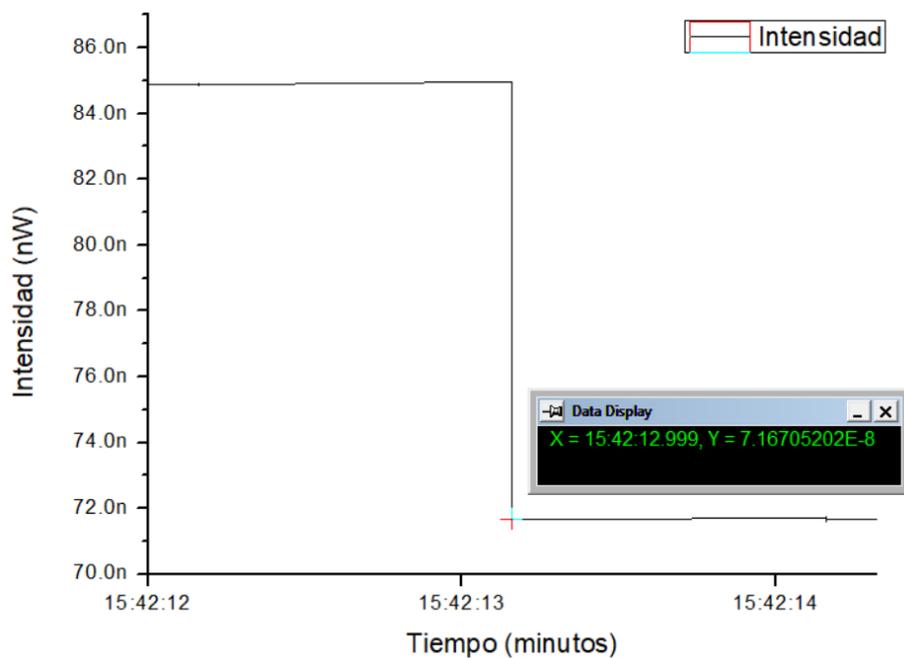


Figura 4.31 Gráfica que ilustra el momento que el sensor llega a 10°, se observa el valor del tiempo a 10°.

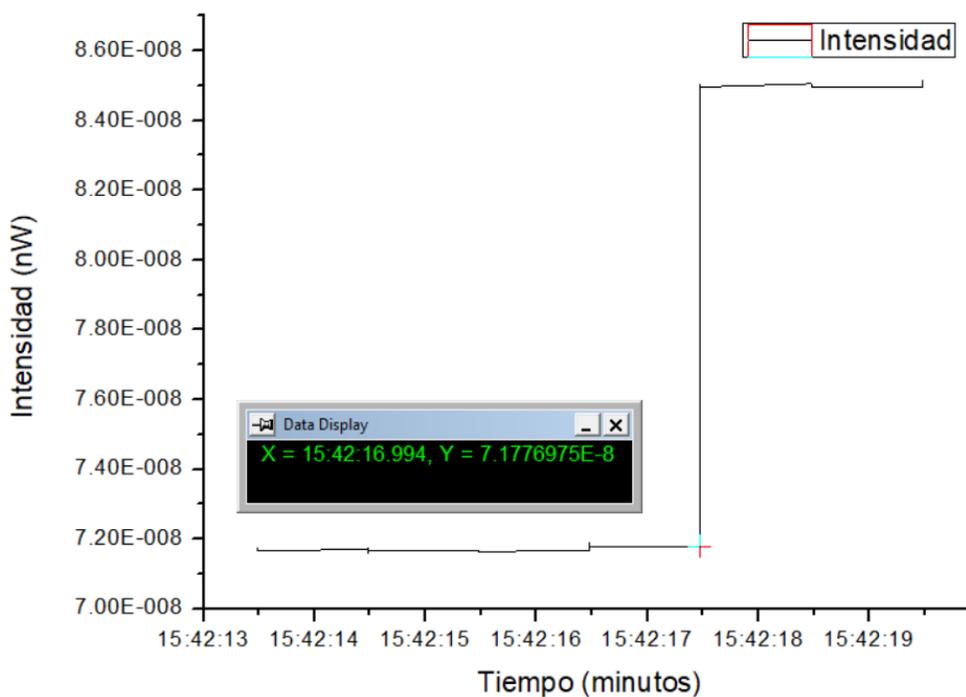


Figura 4.32 Gráfica que ilustra el movimiento de 10° a 0°, se observa el valor del tiempo a 10°.

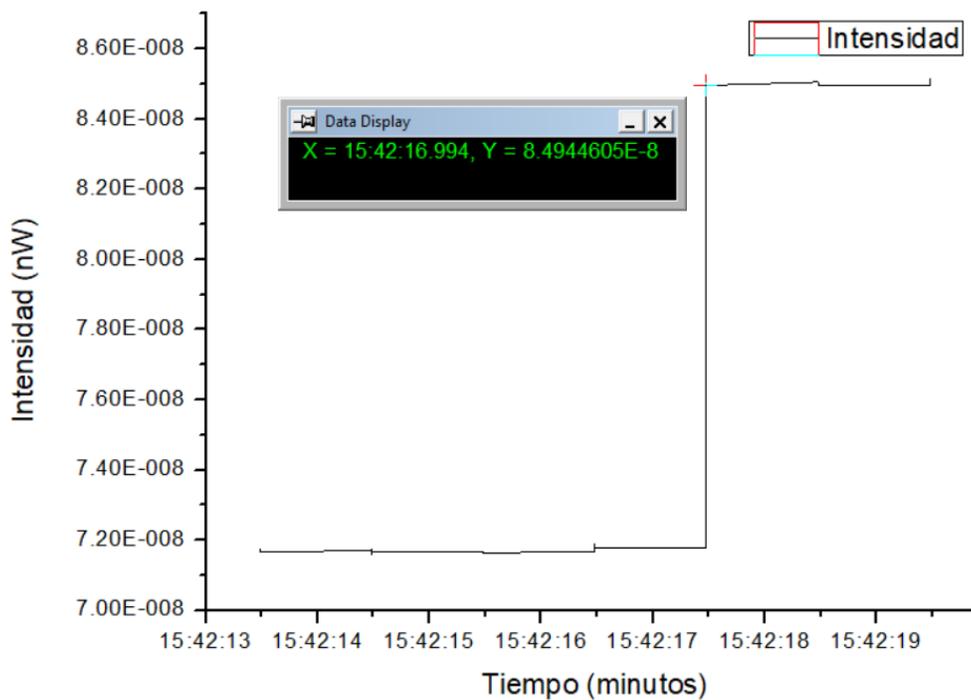


Figura 4.33 Gráfica que ilustra el movimiento de 10° a 0°, se observa el valor del tiempo a 0°.

4.1.5 Comportamiento del sensor en tiempo real

4.1.5.1 Movimiento escalonado del inclinómetro con una resolución de 1°

El comportamiento del sensor en tiempo real ante la inclinación se realizó con la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2, con la configuración experimental de la Figura 4.28, se utilizó el LED M365FP1 de Thorlabs y se recolectaron datos de manera remota a través de USB 2.0 en tiempo real del medidor de potencia (PM320E). El medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda de 365 nm.

Se realizaron diferentes pruebas de laboratorio para conocer cuál es el comportamiento del sensor en tiempo real y así entender de una manera más evidente el comportamiento del inclinómetro. En la prueba de laboratorio el inclinómetro se varió de 0° a 10° con una resolución de 1°, en cada inclinación se esperó un tiempo promedio de 15 segundos para observar el cambio de potencia óptica en cada grado de inclinación.

La gráfica de la Figura 4.34 es la demostración de la inclinación del sensor en tiempo real, en la figura se puede apreciar que para cada grado de inclinación le corresponde una única potencia óptica.

En la gráfica se representa cada uno de los grados de inclinación desde 0° a 10° . Con esta grafica también podemos observar el aumento de la tensión de la fibra óptica, ya que en los primeros escalones de la gráfica se observa que no tienen mucha altura, pero a partir del 7° el escalón es más pronunciado y por consecuencia se genera mayor pérdida de potencia óptica.

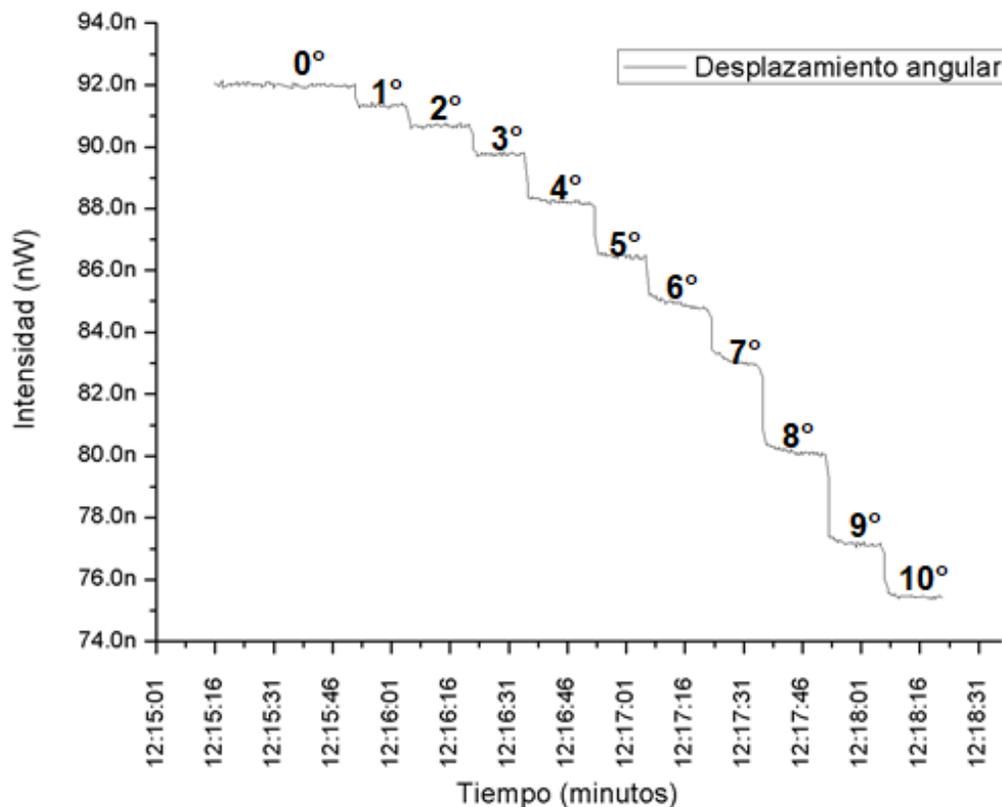


Figura 4.34 Comportamiento del sensor en tiempo real en una inclinación de 0° a 10° con resolución de 1° .

4.1.5.2 Respuesta del inclinómetro ante simulación de un sismo en tiempo real

El comportamiento del sensor en tiempo real ante la simulación de un sismo se realizó con la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2, con la configuración

experimental de la Figura 4.28, se utilizó el LED M365FP1 de Thorlabs y se recolectaron datos de manera remota a través de USB 2.0 en tiempo real del medidor de potencia (PM320E). El medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda de 365 nm.

La Figura 4.35 representa la respuesta del inclinómetro ante la simulación de la vibración de un sismo, se sabe que la vibración de la tierra produce liberación de energía en todas las direcciones desde su origen en formas de ondas. Las estructuras civiles sufren movimientos en diferentes direcciones que no se pueden predecir y su daño es evaluado después que se produce la vibración.

La prueba experimental se realizó con el movimiento del mecanismo de manera aleatoria de izquierda a derecha por un tiempo de aproximadamente 1 minuto, considerando que cuando se mueve una columna durante la vibración de un sismo, no se sabe qué dirección toma está moviéndose en diferentes direcciones hasta que el sismo finalice.

La grafica de la Figura 4.35 muestra una intensidad inicial en los primeros segundos esa intensidad corresponde al grado y potencia de referencia, segundos más adelante se presenta la simulación de una vibración sísmica, durante esta simulación, la intensidad óptica está en constante cambio debido al movimiento de la columna por la vibración sísmica.

Cuando la vibración termina la columna y el mecanismo vuelve a una posición fija, si la columna tuvo una inclinación durante el sismo, se verá reflejado en el cambio de intensidad en la salida de la fibra óptica, si esta no sufrió una inclinación mantendrá la misma intensidad de referencia que tenía antes de la vibración sísmica.

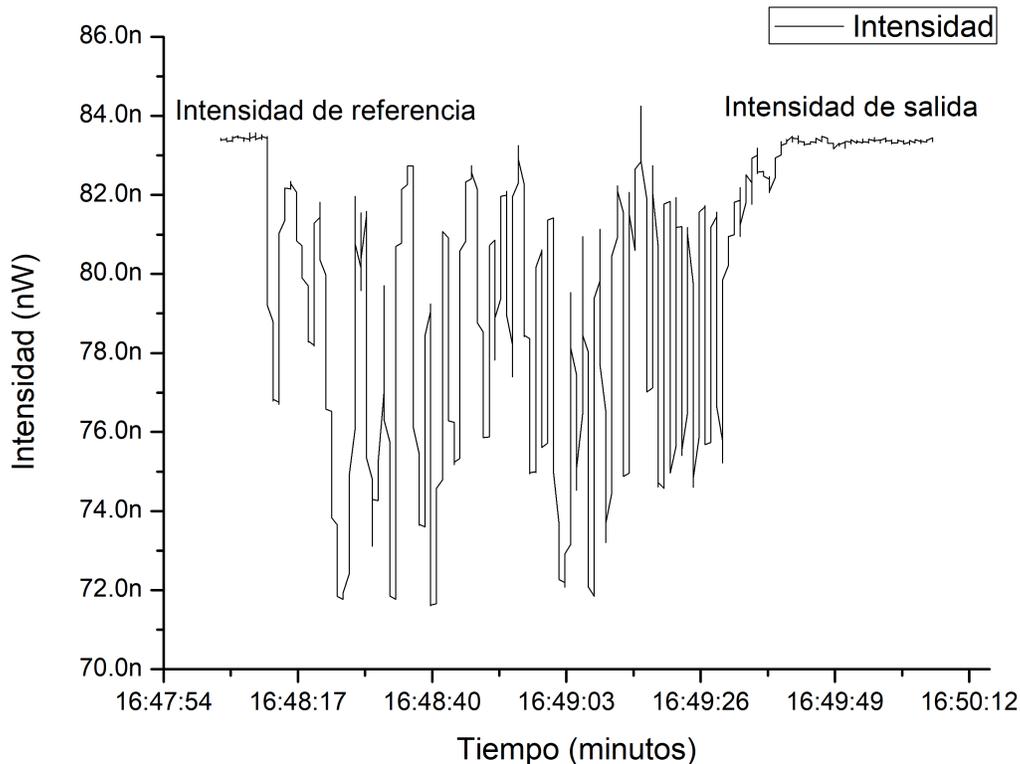


Figura 4.35 Respuesta del inclinómetro ante la simulación de un sismo en tiempo real.

4.1.6 Pérdidas de potencia óptica por instalación de fibra óptica en mecanismo de inclinación

Las pérdidas de potencia óptica por causa de las conexiones de la fibra óptica con el mecanismo de inclinación se realizaron con la fibra monomodo descrita en la sección 3.3.1.2, con la configuración experimental de la Figura 4.28, se utilizó el LED M365FP1 de Thorlabs y se recolectaron datos de manera remota a través de USB 2.0 en tiempo real del medidor de potencia (PM320E). El medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda de 365 nm.

La gráfica de la Figura 4.37 demuestra la pérdida de potencia en la fibra óptica en cada punto de conexión que se observa en la Figura 4.36, como se observa en la figura existen 3 puntos de pérdidas por conexión de la fibra óptica, el primer punto de

conexión es el primer sujetador, el segundo punto de pérdida de potencia óptica es la polea y el tercer punto es el segundo sujetador.

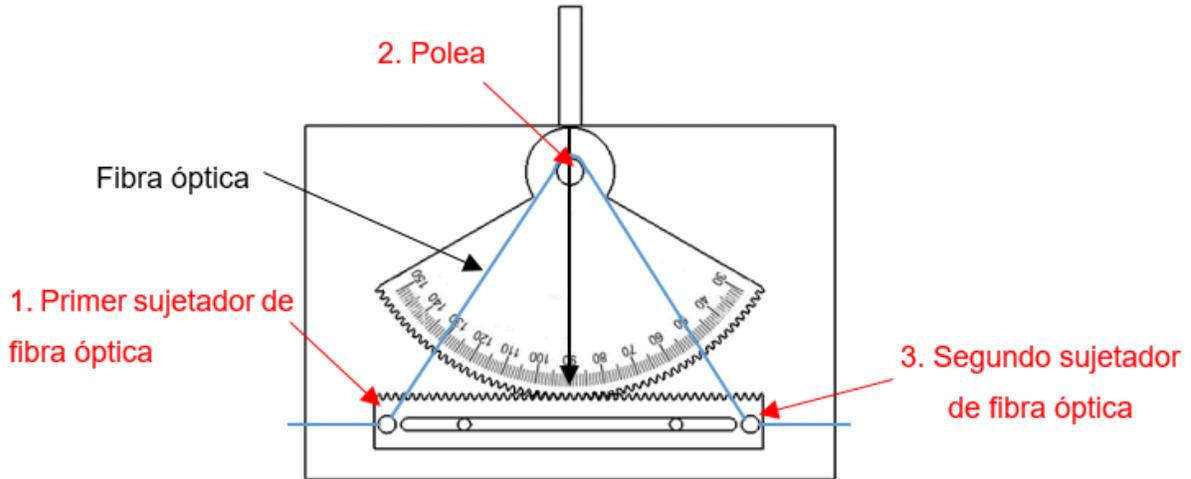


Figura 4.36 Puntos de conexión de la fibra óptica.

La prueba experimental de la gráfica de la Figura 4.37 se realizó de la siguiente forma, la primera potencia que se observa en la gráfica corresponde a la fibra completamente extendida, sin ninguna curvatura y sin el paso en ningún punto de conexión, es la potencia que entrega la fuente de luz en la fibra óptica. En la gráfica tiene el nombre de fibra extendida.

La segunda potencia óptica que se observa es la potencia que se origina con el ajuste del primer sujetador de fibra óptica, cuando este presiona la fibra óptica y añade una curvatura en dirección a la polea, pero sin pasar por ella. En la gráfica tiene la leyenda de primer sujetador.

La mayor pérdida de potencia óptica ocurre cuando la fibra óptica hace contacto con la polea, porque en la polea se origina a la fibra óptica una curvatura de menor radio a comparación de los sujetadores de fibra óptica; lo cual originará una mayor pérdida de potencia óptica.

Como se observa en la gráfica la tercera potencia óptica, es cuando la fibra óptica está presionada con el primer sujetador de fibra y está en contacto con la polea, pero aún no está presionada con el segundo sujetador de fibra óptica. Esta pérdida tiene la leyenda en la gráfica de polea.

La cuarta potencia óptica, es cuando la fibra óptica está presionada con el primer sujetador de fibra óptica, está en contacto con la polea y también se encuentra presionada con el segundo sujetador de fibra óptica. Esta pérdida tiene la leyenda en la gráfica de segundo sujetador. La cuarta potencia es la potencia inicial al momento de caracterizar el inclinómetro.

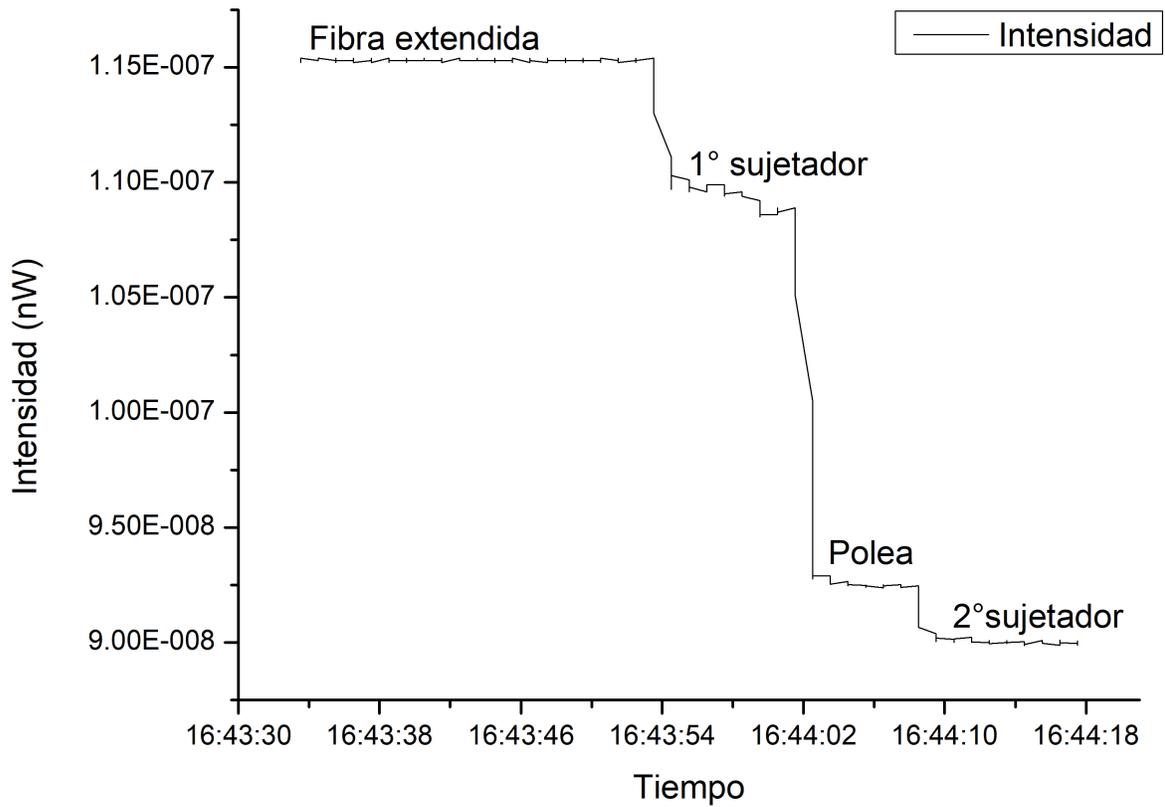


Figura 4.37 Pérdidas de potencia óptica de conexión de fibra óptica en mecanismo de inclinación.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Se desarrolló y caracterizó un sensor de inclinación, el cual provoca pérdida de intensidad óptica en una fibra multimodo estándar a través de un mecanismo de inclinación, basado principalmente por un engrane-cremallera.

Como resultado de la configuración experimental, cuando el eje del mecanismo sufre una inclinación, el engrane presentó una rotación y la cremallera un desplazamiento lineal, a medida que se incrementó el ángulo de rotación la fibra óptica se estiró sin perder ninguna de sus propiedades físicas, ocasionando que la polea originara una curvatura y un cambio de tensión en la fibra óptica.

Esto provocó que, a un ángulo de mayor inclinación, se obtuviera alta tensión en la fibra óptica y menor intensidad óptica; por el contrario, a un ángulo de menor inclinación, se obtuvo una baja tensión en la fibra óptica y consecuentemente mayor intensidad óptica.

Sin embargo, el mecanismo de inclinación comenzó a originar un cambio obvio de tensión significativa a partir del quinto grado, es decir, que a partir de este detectó una disminución de intensidad coherente. El inclinómetro propuesto aún tiene un prometedor rango de inclinación, ya que permite inclinarse de 0° a 10° en una sola dirección; o de $\pm 5^\circ$ de izquierda a derecha.

De todo esto, experimentalmente se obtuvo la ecuación característica de su comportamiento, la resolución y la sensibilidad del inclinómetro. La resolución del inclinómetro es de 0.25° , la sensibilidad de $0.24083 \text{ mW}/^\circ$ para la configuración de la fibra monomodo, para la fibra multimodo de $0.192 \text{ mW}/^\circ$ y para el interferómetro de Sagnac $5.7393 \mu\text{W}/^\circ$.

Para tomar la medición correcta se necesita conocer la estabilidad temporal del láser, tiene un tiempo de estabilidad temporal de 25 minutos, la estabilidad temporal de la fibra monomodo es de 1 minuto, de acuerdo a las pruebas experimentales la fibra multimodo no alcanza una estabilidad; se mantiene en constante cambio, mientras que el interferómetro de Sagnac tiene una estabilidad temporal de 30 minutos.

De acuerdo a las configuraciones experimentales, la fibra monomodo es la configuración más apropiada para una implementación en la vida real, ya que mantiene buena sensibilidad al igual que las otras configuraciones, pero merito a su rápido tiempo de estabilidad y su invariable potencia óptica con el paso del tiempo.

Se realizó la prueba experimental para determinar las pérdidas de conexión de la fibra óptica, dando a conocer que la mayor pérdida de conexión se encuentra en el ajuste de la fibra óptica con la polea, los sujetadores de fibra también ocasionan pérdidas de potencia óptica en el momento que presionan a la fibra óptica. Además de esto, se comprobó que el mecanismo de inclinación produce solo una única potencia óptica para cada grado de inclinación,

Se realizó la prueba experimental para el cálculo del tiempo de respuesta y tiempo de recuperación en tiempo real del inclinómetro, para ambos casos el resultado es un milisegundo. La respuesta del inclinómetro es satisfactoria logrando pruebas experimentales de la simulación de un sismo en tiempo real.

En comparación con los sensores informados anteriormente; la interrogación del sensor se realiza con técnicas más baratas y más prácticas que un analizador de espectros ópticos (OSA), no requiere de un complicado proceso de fabricación y no depende de equipo óptico sofisticado para su construcción. Por esta razón, dicho dispositivo puede operarse como un sensor de inclinación de buena sensibilidad con ventajas de fácil fabricación y bajo costo.

Los resultados experimentales muestran que el diseño del sensor es factible para un rango de ángulo de inclinación de $\pm 5^\circ$. Por lo tanto, el sensor de inclinación de este estudio es suficiente para la aplicación de detección de inclinación en edificios, de acuerdo a las normas de reconstrucción de edificios.

Es posible un progreso futuro del sensor de inclinación, como mejorar la estructura mecánica para incrementar su sensibilidad, resolución y medir la inclinación tanto en "x" como en "y".

Los sujetadores de fibra óptica podrían ser modificados, para garantizar la misma posición en la instalación de la fibra óptica con el mecanismo de inclinación. Además, garantizar que los sujetadores tengan la misma presión de sujeción a la fibra óptica en cada prueba experimental, para procurar tener la misma potencia de referencia.

Es factible el cambio de la fuente y el medidor de potencia por un láser y fotodiodos comerciales, también el desarrollo de una interfaz de usuario y comunicación remota para toma de mediciones y almacenamiento de datos.

Anexo A

Productos logrados en la investigación

A.1 Participación al congreso “XV Semana Nacional de Ingeniería Electrónica”



Figura A.1 Constancia de participación como ponente en congreso SENIE 2019 y hace constar que fue incluido en las memoria del mismo .



Constancia

Artículo: **23 - Inclinómetro óptico utilizando fibra óptica monomodo para el monitoreo de desplazamiento vertical de estructuras civiles**

Autores: **J. Lara, J. Camas, R. Grajales, R. Mota, M. Pérez**

Área: **Mecatrónica**

El Comité Técnico del **XV Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2019**, que se llevó a cabo del 2 al 4 de octubre de 2019 en la ciudad de Cuernavaca Morelos México, hace constar que el artículo citado fue presentado de acuerdo con el programa técnico del congreso e incluido en las memorias del mismo.

La presente se expide para los fines que a los autores convengan.

Cuernavaca Morelos México, a 4 de octubre de 2019.

Atentamente

Dr. Rafael Castellanos Bustamante
Presidente del Comité Técnico CIINDET 2019



Figura A.3 Constancia que acredita presentación de artículo e inclusión a memoria de congreso.

A.3 Artículo de congreso SENIE 2019

Caracterización de un inclinómetro óptico para desplazamiento vertical de estructuras civiles

Characterization of an optical inclinometer for vertical displacement of civil structures

Juan de Jesús Lara Gordillo

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
j.j.laragordillo@gmail.com

Jorge Luis Camas Anzueto

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
jcamas@ittg.edu.mx

Rubén Grajales Coutiño

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
rgrajales@ittg.edu.mx

Rafael Mota Grajales

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
rmota@ittg.edu.mx

Madain Pérez Patricio

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
mperez@ittg.edu.mx

Resumen

En este artículo, se presenta un sensor de inclinación de fibra óptica basado en la modulación de intensidad. El sensor de inclinación se compone de un engrane y una cremallera, cuando el eje del mecanismo sufre una inclinación, el engrane tiene una rotación y la cremallera tiene un desplazamiento lineal, a medida que se incrementa el ángulo de rotación, la fibra óptica se estira, ocasionando que cambie la tensión en la fibra óptica, logrando pérdida de potencia óptica. El sensor propuesto puede detectar un rango de inclinación de -5° a $+5^\circ$ y alcanzar una sensibilidad de $0.26 \text{ nW} / ^\circ$.

Palabras Claves: Inclinómetro, fibra óptica, macrocurvatura.

Figura A.3 Artículo de congreso SENIE 2019

A.4 Artículo de congreso CIINDET 2019

Inclinómetro óptico utilizando fibra óptica monomodo para el monitoreo de desplazamiento vertical de estructuras civiles

J. Lara^{1,*}, J. Camas¹, R. Grajales¹, R. Mota¹, M. Pérez¹

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

*j.laragordillo@gmail.com

Resumen— En este artículo, se propone un sensor de inclinación de fibra óptica basado en la modulación de intensidad. El sensor de inclinación se compone de un engrane y una cremallera, cuando el eje del mecanismo sufre una inclinación, el engrane tiene una rotación y la cremallera tiene un desplazamiento lineal, a medida que se incrementa el ángulo de rotación, la fibra óptica se estira, ocasionando que cambie la tensión y el recorrido de la luz en la fibra óptica, logrando pérdida de potencia óptica. El sensor propuesto puede detectar un rango de inclinación de $\pm 5^\circ$ y alcanzar una sensibilidad de $0.37 \mu W/^\circ$.

Palabras clave. Inclinómetro, fibra óptica, macrocurvatura.

1. Introducción

Los sensores de inclinación (también conocidos como inclinómetros) son de gran importancia para muchas aplicaciones en la ingeniería para medir con precisión la desviación angular de un objeto en un plano o en una línea.

Actualmente los sensores de fibra óptica están siendo utilizados en el área del Monitoreo de la Salud Estructural (SHM por sus siglas en inglés, Structural Health Monitoring) de obra civil, se emplean en muchas aplicaciones, se han utilizado para monitorear la estabilidad de las estructuras en áreas de deslizamientos de tierra [1][2], monitoreo estructural de edificios y carreteras [3], el monitoreo de inclinación de torres o pilares en puentes [4], en estructuras geotécnicas [5] y otras áreas de monitoreo de salud estructural [6].

Las estructuras civiles sufren factores que afectan su desempeño ante las acciones sísmicas, entre los que destacan: la edad de la construcción, ausencia de un programa de mantenimiento, la presencia de daños por eventos sísmicos ocurridos previamente, carga extrema, y otros. El daño a las estructuras civiles se acumula gradualmente, aunque en ocasiones no se observe un daño estructural relevante como grietas o deformaciones, la estructura civil sufre daños internos que quizá no pueda resistir sismos en un futuro o una falla desastrosa bajo cargas extremas.

Una sección importante para el monitoreo de una estructura civil es la inclinación de columnas. Los inclinómetros miden el ángulo de inclinación con respecto a un horizonte artificial, los sensores de inclinación convencionalmente se basan principalmente en los sensores de inclinación electrolíticos, líquidos y los capacitivos. Los sensores de inclinación convencionales presentan desventajas como interferencia electromagnética, dependencia de la temperatura y humedad, problemas de fragilidad y procesos caros de ensamblaje [7].

Sin embargo, los sensores con tecnología de fibra óptica han demostrado un gran potencial cuando son comparados con los sensores de inclinación convencionales porque la tecnología de fibra óptica presenta mayores ventajas como inmunidad de interferencia electromagnética, los sensores de fibra óptica se pueden usar para monitoreo distribuido a gran escala, alta sensibilidad, peso liviano, buena adaptabilidad en forma, aislamiento eléctrico y una larga vida útil, son fáciles de instalar y pueden ser monitoreados en tiempo real [8].

En los últimos años, los clinómetros de fibra óptica se han desarrollado ampliamente debido a los méritos de la inmunidad a la interferencia electromagnética, un cableado fácil de los muchos sensores que estarán instalados en numerosos puntos críticos. Los inclinómetros de fibra óptica se han desarrollado en base a varios esquemas, que incluyen principalmente dos tipos los basados en rejillas y los basados en interferometría.

Moura et al. presentan un inclinómetro óptico basado en rejillas de Bragg desplazadas en fase en una topología cónica, se fabricaron dos rejillas de Bragg (FBG) de fase gradual cónica, ambas con una longitud de 45mm, que difieren solamente en la cintura del cono: una con $30 \mu m$ y el otro con $50 \mu m$. Para la interrogación del sensor se utilizó un analizador de espectros óptico (OSA), para la rotación del sensor se empleó una plataforma rotativa, cuando el sensor es sometido a una inclinación, la región cónica se deforma, lo cual altera las propiedades de la rejillas desplazadas en fase, genera un acoplamiento de la luz que se propaga en el núcleo de la fibra con el revestimiento, si el cono está doblado, la luz en la región de revestimiento se pierde en el entorno externo y su intensidad disminuye [9].

Chung-Ru Chao et al. investigó un sensor de inclinación de fibra óptica basado en dos flotadores cilíndricos suspendidos en agua, conectados por rejillas de Bragg (FBG) cuando al sensor se le aplica una inclinación, la superficie del líquido que se encuentra en el contenedor formará un nuevo plano equilibrado y cambiará la altura del líquido en diferentes partes del contenedor. Entonces la fuerza de flotación de los cilindros provocará que uno de los FBG se estire y el otro se contraiga, por lo tanto, se genera un cambio de longitud de onda [8].

Amaral et al. investigó un interferómetro de Michelson constituido mediante el uso de la fibra cónica y las rejillas de Bragg (FBG) como sensor de flexión, el interferómetro se crea en la conicidad de la fibra y el espejo de baja reflectancia. El estrechamiento acopla una fracción de la luz del núcleo a los modos del revestimiento que se propagaran a lo largo de la

A.5 Artículo publicado en revista Pistas Educativas Vol. 41, Núm. 134 (2019) Número Especial: Difusión del conocimiento 2019

Pistas Educativas, No. 134, noviembre 2019, México, Tecnológico Nacional de México en Celaya

**CARACTERIZACIÓN DE UN INCLINÓMETRO ÓPTICO
PARA DESPLAZAMIENTO VERTICAL DE ESTRUCTURAS
CIVILES**

*CHARACTERIZATION OF AN OPTICAL INCLINOMETER FOR
VERTICAL DISPLACEMENT OF CIVIL STRUCTURES*

Juan de Jesús Lara Gordillo

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, México
j.j.laragordillo@gmail.com

Jorge Luis Camas Anzueto

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, México
jcamas@ittg.edu.mx

Rubén Grajales Coutiño

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, México
rgrajales@ittg.edu.mx

Rafael Mota Grajales

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, México
rmota@ittg.edu.mx

Madain Pérez Patricio

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, México
mperez@ittg.edu.mx

Recepción: 21/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

En este artículo, se presenta un sensor de inclinación de fibra óptica basado en la modulación de intensidad, la cual se relaciona experimentalmente en función de pérdidas provocadas por macrocurvaturas en una fibra multimodo. El inclinómetro utiliza un engrane-cremallera, que cuando el eje principal del mecanismo sufre una inclinación, se modifica la trayectoria de la luz debido al cambio de curvatura en la fibra óptica. Para la caracterización del sensor se empleó una fuente de luz y un medidor de intensidad para pruebas de laboratorio. Se observó en la configuración experimental propuesta, que a mayor ángulo de inclinación mayor pérdida de intensidad óptica experimenta. Los resultados experimentales mostraron que el

Pistas Educativas Vol. 41 - ISSN: 2448-847X
Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-120613261600-203
<http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>

~341~

Figura A.3 Artículo de revista pistas educativas

Bibliografía

- [1] C. R. Farrar y K. Worden, «An introduction to structural health monitoring. In New Trends in Vibration Based Structural Health Monitoring,» *Springer*, pp. 1-17, 2010.

- [2] Y. Baoyin, F. Lishuang, W. Xiao, L. Weifang y J. Hongchen, «Micro-grating tilt sensor with self-calibration and direct intensity modulation,» *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 126, nº 1, pp. 144-147, 2015.

- [3] H. L. Che y M. K. Shu, «Micro-impedance inclinometer with wide-angle measuring capability and no damping effect,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 143, nº 1, pp. 113-119, 2008.

- [4] L. Jinxing, M. Takahiro, K. Fusao, L. Xuefeng, K. Ken y U. Toshitsugu, «Fabrication of two-axis quartz MEMS-based capacitive tilt sensor,» *IEEE Transactions on Sensors and Micromachines*, vol. 128, nº 3, pp. 85-90, 2008.

- [5] Z. W. Zhong, L. P. Zhao y H. H. Lin, «Development and investigation of an optical tilt sensor,» *Optics Communications*, vol. 261, nº 1, pp. 23-28, 2006.

- [6] H. Jung, C. J. Kim y S. H. Kong, «An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 139, nº (1-2), pp. 23-30, 2007.

- [7] H. Xu, Y. Zhao, K. Zhang, Z. Wang y K. Jiang, «A liquid MEMS inclinometer sensor with improved sensitivity,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 285, nº 1, pp. 369-377, 2019.
- [8] L. Yeon-Gwan, J. Hong-Kyu, K. Dae-Hyun y K. Chun-Gon, «Development of a mirror mounted fiber optic inclinometer,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 184, pp. 46-52, 2012.
- [9] J. Li, H. Neumann y R. Ramalingam, «Design, fabrication, and testing of fiber Bragg grating sensors for cryogenic long-range displacement measurement,» *Cryogenics*, vol. 68, pp. 36-43, 2015.
- [10] Q. Jiang y D. Hu, «Microdisplacement sensor based on tilted fiber Bragg grating transversal load effect,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, nº 9, pp. 1776-1779, 2011.
- [11] L. B. Melo, J. M. M. Rodrigues, A. S. F. Farinha, C. A. Marques, L. Bilro, N. Alberto y R. N. Nogueira, «Concentration sensor based on a tilted fiber Bragg grating for anions monitoring.,» *Optical Fiber Technology*, vol. 20, nº 4, pp. 422-427, 2014.
- [12] Y. Zhao, Y. Yuan, W. Gan y M. Yang, «Optical fiber Fabry–Perot humidity sensor based on polyimide membrane: Sensitivity and adsorption kinetics.,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 281, pp. 48-54, 2018.
- [13] E. A. Al-Fakih, N. A. A. Osman, F. R. M. Adikan, A. Eshraghi y P. Jahanshahi, «Development and validation of fiber Bragg grating sensing pad for interface

pressure measurements within prosthetic sockets.,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n° 4, pp. 965-974, 2015.

- [14] Y. L. Chou, C. W. Wu, R. T. Jhang y C. C. Chiang, «A novel optical fiber temperature sensor with polymer-metal alternating structure.,» *Optics & Laser Technology*, vol. 115, pp. 186-192, 2019.
- [15] C. A. F. Marques, G.-D. Peng y D. J. Webb, «Highly sensitive liquid level monitoring system utilizing polymer fiber Bragg gratings,» *Opt. Express*, vol. 23, pp. 6058-6072, 2015.
- [16] X. Hu, D. Saez-Rodriguez, C. Marques, O. Bang, D. Webb y P. Mégret, «Polarization effects in polymer FBGs: Study and use for transverse,» *Opt. Express*, vol. 23, pp. 4581-4590, 2015.
- [17] C.-R. Chao, L. Wei-Lun y L. Tsair-Chun, «Design and Testing of a 2D Optical Fiber Sensor for Building Tilt Monitoring Based on Fiber Bragg Gratings,» *Applied System Innovation*, vol. 1, n° 1, pp. 2-8, 2018.
- [18] P. Ferdinand, «Optical fiber Bragg grating inclinometry for smart civil engineering and public works,» *Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors*, vol. 4185, 2000.
- [19] H.-F. Pei, J.-H. Yin, H.-H. Zhu, C.-Y. Hong, W. Jin y D.-S. Xu, «Monitoring of lateral displacements of a slope using a series of special fibre Bragg grating-based in-place inclinometers,» *Measurement Science and Technology*, vol. 23, n° 2, p. 025007, 2012.

- [20] C. K. Y. Leung, K. T. Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel, Z. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H. C. Wu y M. Imai, «optical fiber sensors for civil engineering applications,» *Materials and Structures*, vol. 48, nº 4, pp. 871-906, 2015.
- [21] J. R. Casas y P. J. Cruz, «Fiber optic sensors for bridge monitoring,» *Journal of bridge engineering*, vol. 8, nº 6, pp. 362-373, 2003.
- [22] Pei, Hua-Fu, Yin, Jian-Hua y W. Jin, «Development of novel optical fiber sensors for measuring tilts and displacements of geotechnical structures,» *Measurement Science and Technology*, vol. 24, nº 9, p. 095202, 2013.
- [23] T.-C. Liang y L. Yung-Li, «Ground vibrations detection with fiber optic sensor,» *Optics Communications* , vol. 285, nº 9, pp. 2363-2367, 2012.
- [24] M. Guo-ming, L. Cheng-rong, Q. Jiang-tao, J. Jian y C. Yang-chun, «A Fiber Bragg Grating Tension and Tilt Sensor Applied to Icing Monitoring on Overhead Transmission Lines,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. XXVI, nº 4, pp. 2163-2170, 2011.
- [25] J. P. Moura, S. O. Silva, M. Becker, M. Rothhardt, H. Bartelt, J. L. Santos y O. Frazão, «Optical inclinometer based on a phase-shifted Bragg grating in a taper configuration,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. XXVI, nº 4, pp. 405-407, 2013.

- [26] R. Yang, H. Bao, S. Zhang, K. Z. Y. Ni y X. Dong, «Simultaneous measurement of tilt angle and temperature with pendulum based fiber Bragg grating sensor,» *IEEE Sensors Journal*, vol. XV, n° 11, pp. 6381-6384, 2015.
- [27] B. J. Peng, Y. Zhao, Y. Zhao y J. Yang, «Tilt sensor with FBG technology and matched FBG demodulating method,» *IEEE Sensors Journal*, vol. XI, n° 1, pp. 63-66, 2006.
- [28] Y. Wang, C. L. Zhao, L. D. X. Hu, Y. Jin, C. Shen y S. Jin, «A tilt sensor with a compact dimension based on a long-period fiber grating,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, n° 9, p. 093106, 2011.
- [29] C. Guo, D. Chen, C. Shen, Y. Lu y H. Liu, «Optical inclinometer based on a tilted fiber Bragg grating with a fused taper,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, n° 4, pp. 405-407, 2013.
- [30] L. M. N. Amaral, O. Frazao, J. L. Santos y A. L. Ribeiro, «Fiber-optic inclinometer based on taper Michelson interferometer,» *IEEE Sensors Journal*, vol. XXI, n° 9, pp. 1811-1814, 2011.
- [31] N. K. Chen, Z. Z. Feng, J. J. Wang, S. K. Liaw y H. C. Chui, «Interferometric interrogation of the inclination and displacement of tapered fiber Mach-Zehnder interferometers,» *IEEE Sensors Journal*, vol. XIII, n° 9, pp. 3437-3441, 2013.

- [32] D. Inaudi y B. Glisic, «Interferometric inclinometer for structural monitoring.,» *In 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, vol. OFS 2002 , n° Cat. No. 02EX533, pp. 391-394, 2002.
- [33] O. Frazão, R. Falate, J. L. Fabris, J. L. Santos, L. A. Ferreira y F. M. Araújo, «Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper,» *Optics Letters*, vol. 31, n° 20, pp. 2960-2962, 2006.
- [34] C. L. Lee, W. C. Shih, J. M. Hsu y J. S. Horng, «Asymmetrical dual tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for fiber-optic directional tilt sensor,» *Optics express*, vol. XXII, n° 20, pp. 24646-24654, 2014.
- [35] Z. Feng, T. Gang, M. Hu, X. Qiao, N. Liu y Q. Rong, «A fiber inclinometer using a fiber microtaper with an air-gap microcavity fiber interferometer,» *Optics Communications*, vol. 364, pp. 134-138, 2016.
- [36] Y. Yang, X. Ma, K. Chen, E. Wang, Z. Yu y Q. Yu, «A high-resolution dynamic fiber-optic inclinometer,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 283, pp. 305-312, 2018.
- [37] C. Li, X. Li, X. Yu, X. Peng, T. Lan y S. Fan, «Room-Temperature Wide Measurement-Range Optical Fiber Fabry–Perot Tilt Sensor With Liquid Marble,» *IEEE Sensors Journal*, vol. XVIII, n° 1, pp. 170-177, 2017.

- [38] W. Bolton, Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario, México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., 2013.
- [39] W. K. Alexander, «Introducción al número especial sobre "Optomechatronics",» *Sensors*, vol. XIV, nº 4, pp. 6302-6304, 2014.
- [40] H. Cho., Opto-mechatronic systems handbook : techniques and applications, CRC PRESS, 2002.
- [41] J. S. Raymond A. Serway, Física 7ta. Edición (Vol.1), Pearson Educación. , 2008.
- [42] E. Hecht, Óptica, Madrid: ADDISON WESLEY IBEOAMERICANA, S.A., 2000.
- [43] B. Chomycz, Instalaciones de Fibra Óptica Fundamento, técnicas y aplicaciones, Mc Graw Hill, 1998.
- [44] J. Hayes, Fiber Optics Technician's Manual, 2nd Edition, Delmar Thomson Learning, 2000.
- [45] Z. Sears, Física universitaria, con física moderna volumen 2, México: Perason Educación, 2009.
- [46] K. Thyagarajan y A. Ghatak, Fiber optic essentials, WILEY-INTERSCIENCIE; A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2007.

- [47] C. John, Introduction to Fiber Optics 2nd Edition, Newnes, 2001.
- [48] S. Yin, P. B. Ruffin y F. T. Yu, Fiber Optics Sensors second Edition, Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- [49] E. UDD y J. W. B. SPILLMAN, FIBER OPTIC SENSORS, An Introduction for Engineers and Scientists Second Edition, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., publication, 2011.
- [50] Centro Nacional de Prevención de Desastres, «[WWW.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx),» Coordinación Nacional de Protección Civil, 24 Junio 2016. [En línea]. Available: http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Enaproc/EvaluacionEstructuras_.pdf. [Último acceso: 12 Diciembre 2019].
- [51] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Manual de campo para la inspección de edificaciones después de un sismo, Manizales: Copyplus Ltda, 2003.
- [52] C.-A. J. & A.-S. G., «Reliable Wavelength Locking of a Distributed Feedback Diode Laser for an Efficient Erbium Doped Fiber Amplifier in Reflective Configuration,» *International Journal of Optomechatronics*, vol. VI, pp. 253-263, 2012.