

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 Luís 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

Madaín 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

inclinómetro proporcionaba un rango de medición de 0 a 10° con una sensibilidad de 0.232 nW/°.

Palabras Claves: Fibra multimodo, inclinómetro, macrocurvatura.

Abstract

In this article, an optical fiber inclination sensor based on intensity modulation is presented, which is experimentally related to losses caused by macrocurvatures in a 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 in curvature 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. Experimental results showed that the inclinometer provided a measuring range of 0 to 10° with a sensitivity of 0.232 nW/°.

Keywords: *Inclinometer, macro-curvature, multimode fiber.*

1. Introducción

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, existen daños internos que pueden ser suficientes para no resistir un sismo futuro o una falla bajo cargas extremas. Los sismos en el transcurso de la historia provocan 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 salud estructural, 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, las áreas importantes en monitorear en una estructura civil son: cimientos, columnas y vigas [Farrar, 2010].

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. Este crea un horizonte artificial y mide la inclinación con respecto a este [Yao, 2015].

Los sensores de inclinación convencionales se basan directamente en capacitivos, electrolíticos y líquidos. Los sensores capacitivos 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 [Zhong, 2006], [Liang, 2008].

Los sensores electrolíticos 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 [Zhong, 2006], [Jung, 2007]. Los sensores líquidos tienen un precio económico, por el contrario, son frágiles y su proceso de ensamblaje es costoso y complejo [Xu, 2019]. Actualmente los sensores de fibra óptica están siendo utilizados en el área de aplicación del Monitoreo de Salud Estructural (SHM, Structural Health Monitoring) de obra civil, porque la tecnología de fibra óptica presenta mayores ventajas que los sensores convencionales, estos se pueden usar para monitoreo distribuido a gran escala, inmunidad de interferencia electromagnética, alta sensibilidad, peso liviano, aislamiento eléctrico, larga vida útil, fáciles de instalar y pueden ser monitoreados en tiempo real [Chao, 2018].

En los últimos años, la mayoría de los inclinómetros de fibra óptica se basan en rejillas de periodo largo (LPG), [Wang, 2011], rejillas de Bragg (FBG) que utilizan diferentes mecanismos de inclinación, los ejemplos incluyen sensores con

flotadores cilíndricos suspendidos en agua, conectados por rejillas de Bragg, [Chao, 2018], algunas estructuras incluyen péndulos verticales [Yang, 2015], [Peng, 2006] y diferentes configuraciones de fibra óptica, como rejillas de Bragg desplazadas en fase en una topología cónica (PS-FBG), [Moura, 2013], en rejillas de Bragg de fibra cónica inclinada (TFBG) [Guo, 2015].

El principio de medición de los sensores FBG es recolectar la información, de la variación de la intensidad de salida o el desplazamiento de longitud de la 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). Exigen de un difícil 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, con frecuencia las caracterizaciones son en plataformas giratorias.

De la misma manera los sensores basados en interferómetros se han propuesto y demostrado, para medir los ángulos de inclinación. 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 diferentes configuraciones como interferómetros de Michelson, [Amaral, 2011], [Inaudi, 2002], interferómetros de Mach-Zehnder, [Chen, 2013], [Frazão, 2006], [Lee, 2014] e interferómetros de Fabry-Perot, [Feng, 2016], [Yang, 2018], [Li, 2018]. 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) [Amaral, 2011]. Por lo tanto, si el ángulo de inclinación se puede obtener a partir del cambio en la intensidad de luz de salida medida con un instrumento estándar, el sistema se vuelve más útil y económicamente viable.

Para resolver estos problemas, se desarrolló y caracterizó un inclinómetro de fibra óptica basado en la modulación de intensidad de la luz de salida de una fibra multimodo estándar.

En este artículo se presenta un inclinómetro óptico fabricado con tecnología de fibra óptica. El sensor de fibra propuesto utiliza un mecanismo que presenta un movimiento lineal a través de un juego de engranes y que está relacionado con la inclinación en grados. Este mecanismo es parte fundamental en el diseño del inclinómetro, ya que éste ejerce una modificación en la curvatura en una sección de la fibra, la cual experimenta una pérdida en la intensidad y que está relacionada con los grados de inclinación. Más detalles del principio, análisis y resultados experimentales se demuestran en el documento.

2. Métodos

Principio de Funcionamiento

Un cable de fibra óptica puede no seguir una trayectoria rigurosamente recta; y por lo tanto surgirán curvaturas. En específico, las condiciones de reflexión total interna suponen un núcleo y cubierta totalmente recta. Sin embargo, cuando la fibra tiene una curvatura, el ángulo de cada reflexión ya no es el mismo entre una reflexión y otra (Figura 1).

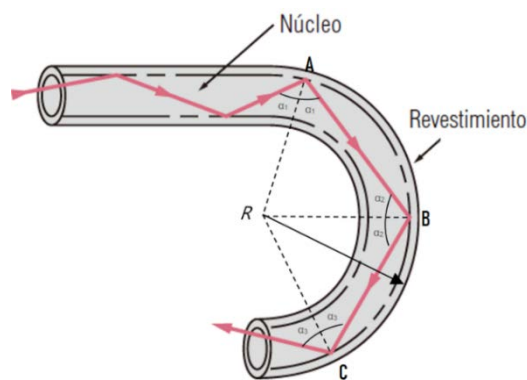


Figura 1 Fibra con radio de curvatura R .

En la figura 1, el rayo llega en A, B, C con ángulos α diferentes. En el ángulo α_3 es muy pequeño para que ocurra una reflexión total interna, y la luz queda confinada

en el revestimiento. Por lo tanto, hay una pérdida de luz e intensidad óptica. Si el radio de la curvatura R no es muy pequeño (poca curvatura), el valor de R que produce una atenuación de -3 dB del flujo energético transmitido este dado aproximadamente por la ecuación 1.

$$R \approx 10 \frac{a}{(A.N)^2} \quad (1)$$

Donde:

R : Radio de curvatura

a : Radio del núcleo

$A.N$: Apertura numérica de la fibra óptica.

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 de 1.5 para ambas piezas. El engrane tiene un diámetro exterior de 251.25 mm, 5 mm de espesor (Figura 2). 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.

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.

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 (Figura 2a), la cremallera posee dos sujetadores de fibra óptica, los cuales son primordiales para mantener a la fibra óptica sin movimiento (Figura 2b).

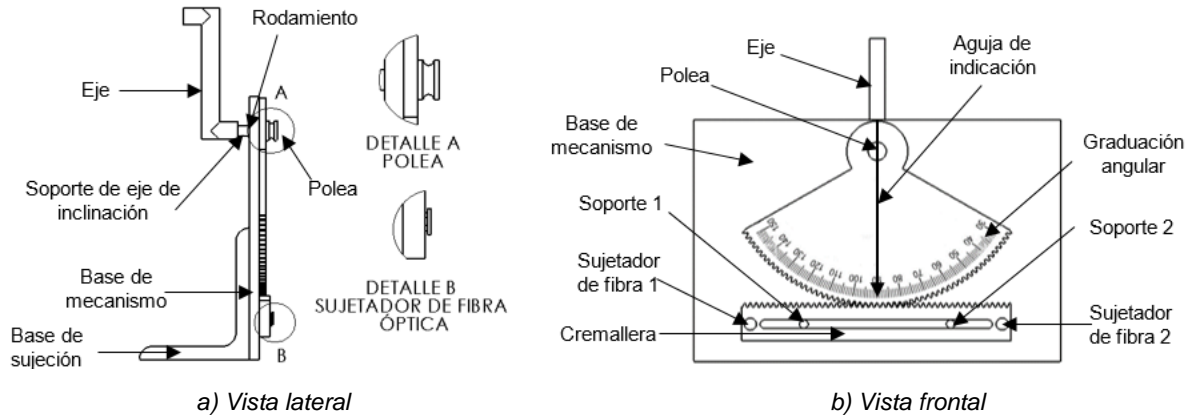


Figura 2 Partes de mecanismo, vista a detalle de polea y sujetador de fibra.

Funcionamiento del Arreglo 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 (Figura 2b).

En este diseño, el mecanismo tiene movimiento en dos direcciones, ya sea a la izquierda o derecha. Con el fin de caracterizar el mecanismo de inclinación; se utilizó una fibra óptica multimodo de 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. La fibra óptica de prueba fue de 1.5 m de longitud, que a los extremos cuenta con conectores FC (Figura 3a).

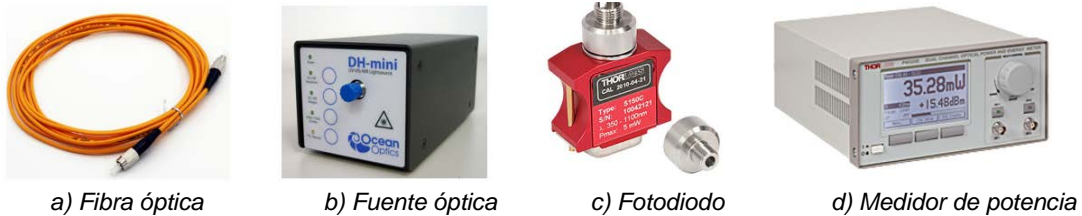


Figura 3 Instrumentos ópticos para caracterización de sensor.

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 utilizó una fuente de luz DH-mini de Ocean Optics (Figura 3b), con rango de onda de 200-1100 nm. La detección de intensidad óptica de la señal de salida, se llevó a cabo con un fotodiodo S150C de Thorlabs (Figura 3c). Este fotodiodo cuenta con una entrada para fibra óptica de conector FC y un conector sub-D para transmisión de datos, y su rango de detección de longitud de onda está de 350 – 1100 nm. Este es conectado a un medidor de intensidad óptica PM320E de Thorlabs (Figura 3d), el cual acepta los fotodiodos con conectores sub-D, se controla localmente a través del panel frontal, para el monitoreo cuenta con una pantalla LCD de 240 x 128 píxeles, o de forma remota a través de USB 2.0.

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 4, la conexión se vuelve simple debido a los conectores FC; solamente requieren de un roscado manual del conector hacia la entrada de los dispositivos.

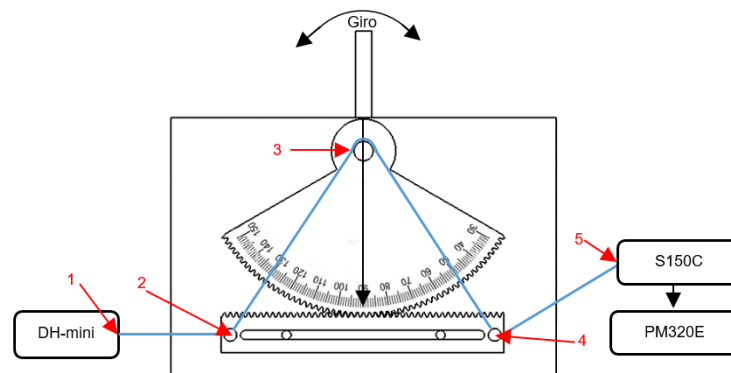


Figura 4 Configuración experimental y puntos de conexión de equipo óptico.

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 fotodiodo (S150C), 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), figura 4.

3. Resultados

La figura 5 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 6. 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.

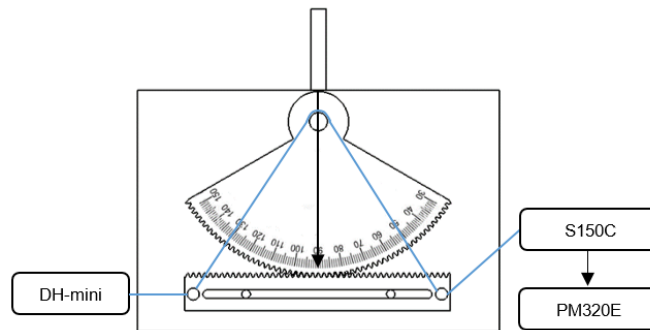


Figura 5 Inclinómetro en posición inicial.

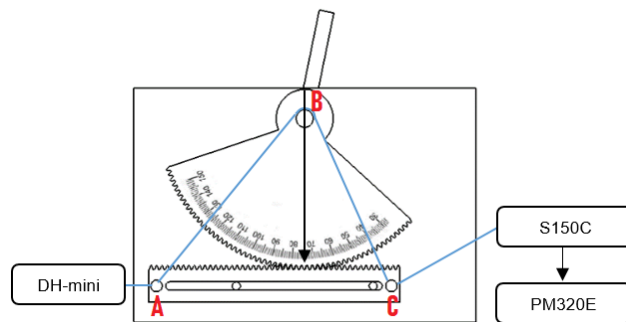


Figura 6 Inclinómetro con rotación.

En las pruebas experimentales, el sensor se inclinó de 0° a 10° de forma manual, con una resolución de un grado, y el medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda específica desde el panel frontal, con el objetivo de capturar la máxima intensidad a la salida de la fibra óptica.

Se seleccionó a una longitud de onda de 600 nm, debido a que el espectro de la fuente de luz (Figura 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. En la tabla 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.

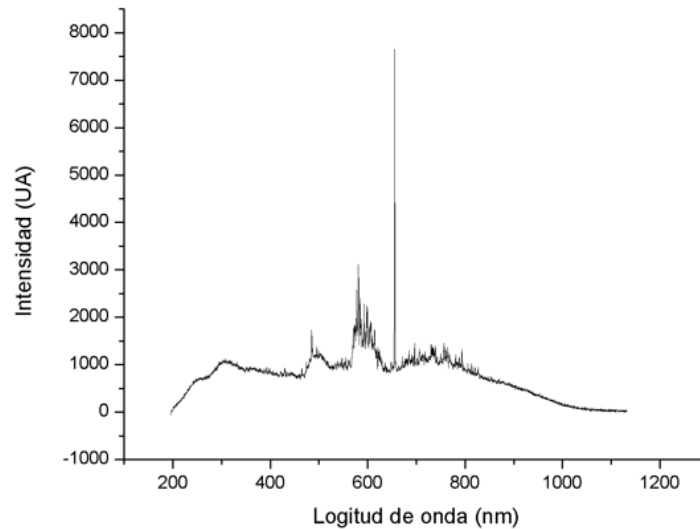


Figura 7 Intensidad relativa y espectrómetro de fuente DH-mini.

Tabla 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 (Figura 8). 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.

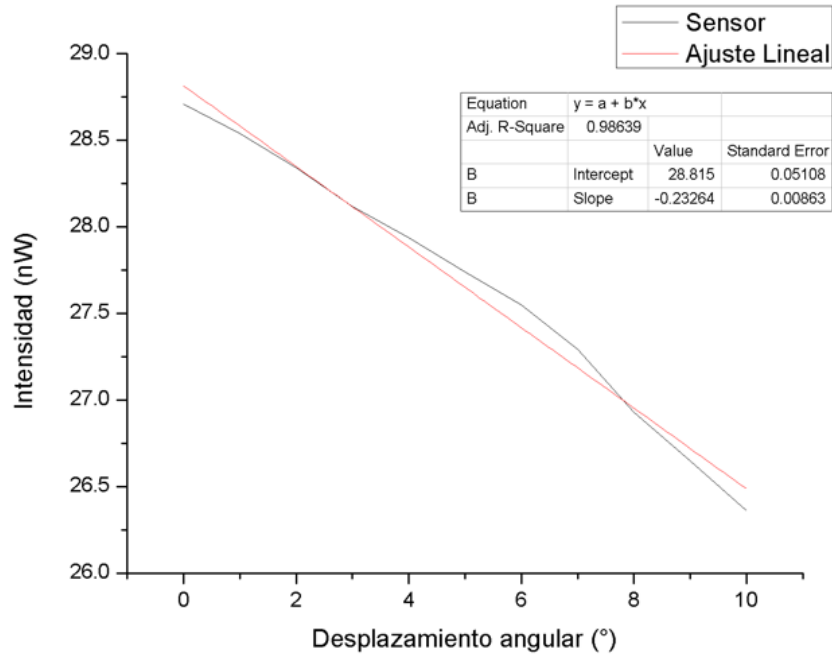


Figura 8 Gráfica del comportamiento del inclinómetro.

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 recta para el inclinómetro obtenida por ajuste está dada por ecuación 2.

$$y = 28.815 - 0.232x \quad (2)$$

La ecuación 2 describe el comportamiento del sensor de inclinación que se observa en la gráfica de la figura 8. 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 9 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.

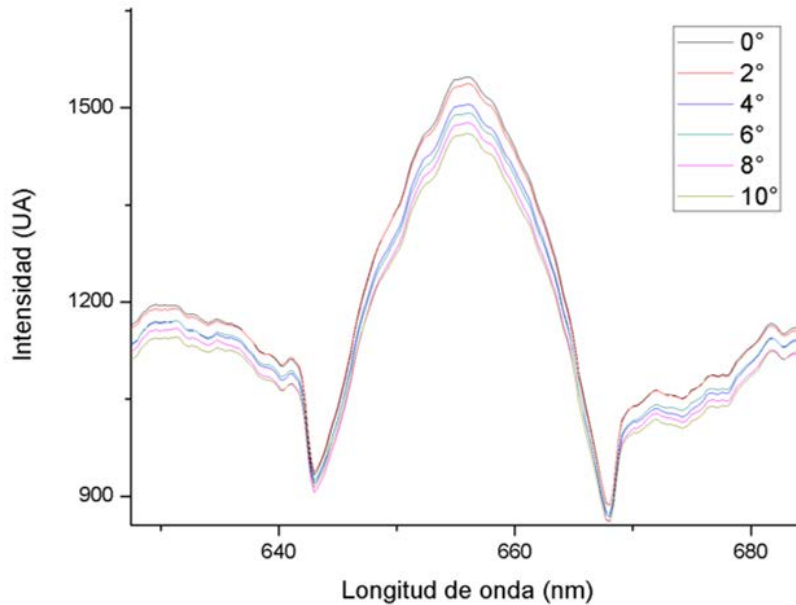


Figura 9 Espectro de la fuente de luz ante la inclinación del sensor.

4. Discusión

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. De todo esto, experimentalmente se obtuvo la ecuación característica de su comportamiento y la sensibilidad del inclinómetro, que es de 0.232 nW/° .

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.

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.

En las normas de construcción, la relación de inclinación del edificio es la relación entre el desplazamiento del edificio y la altura. 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 del edificio excede $1/40$, es decir, la inclinación alcanza 1.43 grados, se alcanzará el estándar de reconstrucción.

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.

5. Conclusiones

En este documento, se investigó experimentalmente un sensor de inclinación basado en un mecanismo de inclinación engrane-cremallera. En el esquema propuesto las pérdidas de intensidad son causadas por macrocurvaturas, el cual deriva la relación entre ángulo de inclinación e intensidad de la luz transmitida. Como resultado de la configuración experimental, cuanta más inclinación experimente el mecanismo, generará mayor pérdida de intensidad óptica. Los resultados experimentales muestran que la sensibilidad del ángulo de inclinación es

0.232 nW/°, con un rango de inclinación de 0° a 10°. 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”. Es factible el cambio de la fuente y el medidor de potencia por un láser y fotodiodos comerciales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, además al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Chiapas por el financiamiento otorgado para llevar a cabo la realización del proyecto con número de registro ID 2019-1040, y al CONACYT por otorgar la beca a estudiante de Maestría.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Chen, N. K., Feng, Z. Z., Wang, J. J., Liaw, S. K., & Chui, H. C. (2013). Interferometric interrogation of the inclination and displacement of tapered fiber Mach-Zehnder interferometers. *IEEE Sensors Journal*, 13(9), 3437-3441.
- [2] Amaral, L. M. N., Frazao, O., Santos, J. L., & Ribeiro, A. L. (2011). Fiber-optic inclinometer based on taper Michelson interferometer. *IEEE Sensors Journal*, 11(9), 1811-1814.
- [3] Chao, C. R., Liang, W. L., & Liang, T. C. (2018). Design and Testing of a 2D Optical Fiber Sensor for Building Tilt Monitoring Based on Fiber Bragg Gratings. *Applied System Innovation*, 1(1), 2.
- [4] Feng, Z., Gang, T., Hu, M., Qiao, X., Liu, N., & Rong, Q. (2016). A fiber inclinometer using a fiber microtaper with an air-gap microcavity fiber interferometer. *Optics Communications*, 364, 134-138.
- [5] Frazão, O., Falate, R., Fabris, J. L., Santos, J. L., Ferreira, L. A., & Araújo, F. M. (2006). Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper. *Optics Letters*, 31(20), 2960-2962.
- [6] Farrar, C. R., & Worden, K. (2010). An introduction to structural health monitoring. In *New Trends in Vibration Based Structural Health Monitoring* (pp. 1-17). Springer, Vienna.

- [7] Guo, C., Chen, D., Shen, C., Lu, Y., & Liu, H. (2015). Optical inclinometer based on a tilted fiber Bragg grating with a fused taper. *Optical Fiber Technology*, 24, 30-33.
- [8] Inaudi, D., & Glisic, B. (2002, May). Interferometric inclinometer for structural monitoring. In 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002 (Cat. No. 02EX533) (pp. 391-394). IEEE.
- [9] Jung, H., Kim, C. J., & Kong, S. H. (2007). An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 139(1-2), 23-30.
- [10] Lee, C. L., Shih, W. C., Hsu, J. M., & Horng, J. S. (2014). Asymmetrical dual tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for fiber-optic directional tilt sensor. *Optics express*, 22(20), 24646-24654.
- [11] Li, C., Li, X., Yu, X., Peng, X., Lan, T., & Fan, S. (2017). Room-Temperature Wide Measurement-Range Optical Fiber Fabry–Perot Tilt Sensor With Liquid Marble. *IEEE Sensors Journal*, 18(1), 170-177.
- [12] Moura, J. P., Silva, S. O., Becker, M., Rothhardt, M., Bartelt, H., Santos, J. L., & Frazão, O. (2013). Optical inclinometer based on a phase-shifted Bragg grating in a taper configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(4), 405-407.
- [13] Liang, J., Matsuo, T., Kohsaka, F., Li, X., Kunitomo, K., & Ueda, T. (2008). Fabrication of two-axis quartz MEMS-based capacitive tilt sensor. *IEEE Transactions on Sensors and Micromachines*, 128(3), 85-90.
- [14] Peng, B. J., Zhao, Y., Zhao, Y., & Yang, J. (2006). Tilt sensor with FBG technology and matched FBG demodulating method. *IEEE Sensors Journal*, 6(1), 63-66.
- [15] Wang, Y., Zhao, C. L., Hu, L., Dong, X., Jin, Y., Shen, C., & Jin, S. (2011). A tilt sensor with a compact dimension based on a long-period fiber grating. *Review of Scientific Instruments*, 82(9), 093106.
- [16] Nerou, J. P., & Busto, O. M. G. (1991). *Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas*. Trillas.
- [17] Zhong, Z. W., Zhao, L. P., & Lin, H. H. (2006). Development and investigation of an optical tilt sensor. *Optics communications*, 261(1), 23-28.

- [18] Xu, H. Y., Zhao, Y. L., Zhang, K., Wang, Z. X., & Jiang, K. (2019). A liquid MEMS inclinometer sensor with improved sensitivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, 285, 369-377.
- [19] Yang, R., Bao, H., Zhang, S., Ni, K., Zheng, Y., & Dong, X. (2015). Simultaneous measurement of tilt angle and temperature with pendulum-based fiber Bragg grating sensor. *IEEE Sensors Journal*, 15(11), 6381-6384.
- [20] Yang, Y., Ma, X., Chen, K., Wang, E., Yu, Z., & Yu, Q. (2018). A high-resolution dynamic fiber-optic inclinometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 283, 305-312.
- [21] Yao, B., Feng, L., Wang, X., Liu, W., & Jiao, H. (2015). Micro-grating tilt sensor with self-calibration and direct intensity modulation. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(1), 144-147.