

# INTERFERÓMETRO DE FIBRA APLICADO COMO SENSOR DE CURVATURAS

## *ALL-FIBER INTERFEROMETER APPLIED AS CURVATURE SENSOR*

**Gilberto González Uresti**

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México  
*gilbertouresti95@hotmail.com*

**Fernando Arturo Armenta Serna**

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México  
*ingfernandoarmenta@gmail.com*

**Yadira Aracely Fuentes Rubio**

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México  
*yfuentes@docentes.uat.edu.mx*

**Luis Antonio García Garza**

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México  
*lgarcia@docentes.uat.edu.mx*

**René Fernando Domínguez Cruz**

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México  
*rfdominguez@docentes.uat.edu.mx*

**Recepción:** 2/noviembre/2021

**Aceptación:** 28/febrero/2022

## **Resumen**

En este trabajo se presenta la fabricación y prueba de un sensor construido de fibra óptica basado en un esquema interferométrico tipo Mach-Zehnder. El sistema es construido mediante la unión consecutiva de segmentos de fibra monomodo-multimodo-monomodo-multimodo-monomodo. Esta geometría permite separar al haz de entrada en dos trayectorias para posteriormente recombinarse y generar la interferencia de ellos. La señal de salida del dispositivo es función de la diferencia de fase de los haces y que a su vez depende de la deformación inducida por curvaturas. Los resultados indican que el arreglo posee una respuesta lineal para curvaturas de 0 hasta  $1.4 \text{ m}^{-1}$  con una sensibilidad de  $-18.7352 \text{ nm/m}^{-1}$  y con una desviación estándar de 0.210 nm. Adicionalmente, el sistema presentado muestra

ser un componente de simple fabricación, bajo costo y con potencial aplicación de ser incorporado en sistemas reales.

**Palabras Clave:** Curvatura, fibra óptica, interferómetro, sensor.

## **Abstract**

*In this work, the manufacture and testing of a sensor made of fiber optics based on a Mach-Zehnder type interferometric scheme are showing. The system is building by the consecutive joining of single-mode-multimode-single-mode-multimode-single-mode fiber segments. This geometry allows the input beam to be separated into two trajectories to recombine and generate interference from them. The device's output signal is a function of the beams' phase difference, which in turn depends on the deformation induced by curvatures. The results indicate that the array has a linear response for curvatures from 0 to  $1.4 \text{ m}^{-1}$  sensitivity of  $-18.735 \text{ nm/m}^{-1}$  and a standard deviation of  $0.210 \text{ nm}$ . Additionally, the presented system shows a component of simple manufacture, low cost, and potential application of being incorporated in real systems.*

**Keywords:** Curvature, fiber optic, interferometer, sensor.

## **1. Introducción**

La fibra óptica, una guía de onda cilíndrica fabricada con Óxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) altamente puro, ha intervenido de una manera sustancial en el terreno de las telecomunicaciones como vehículo de transmisión de información a través de señales ópticas [Udd, 2010]. Sus notables características como inmunidad a ruido eléctrico, bajo peso y costo, alta tasa de transmisión de datos y la posibilidad de multiplexado de señales, hace que sean una alternativa con alto impacto en la actualidad [Joe, 2018].

Adicionalmente, existen fenómenos inherentes en el proceso de propagación de luz dentro de la fibra que pueden ser empleados como un mecanismo de detección de algún agente externo. Es decir, que la fibra óptica puede ser usada como un sensor. De este modo, se han aprovechado estos efectos y se han propuesto sistemas basados en este tipo de guías de onda como dispositivo sensor de temperatura,

aceleración, desplazamiento, presión, fuerza, entre otros [Culshaw, 2010]. Adicionalmente, otro parámetro físico interesante que medir es la curvatura, el cual ya ha sido propuesto empleando fibras de cristal fotónico (PCF) [Martins, 2012], donde su naturaleza con geometría transversal provista de agujeros de aire a lo largo de ella modifica la condición de propagación de la luz al momento de flexionarse. Si bien, el sistema posee un rango sensible de medición, el inconveniente es el tipo de fibra especial micro-estructurada que se requiere.

Una de las técnicas basadas en fibra que se han reportado para medir curvaturas es el efecto de interferencia multimodal [Gong, 2011], en donde la unión de fibras monomodo- multimodo- modo (SMS), generan una estructura tipo filtro. En dicho sistema, la condición de generación de modos de propagación transmitidos depende de la curvatura que ésta posea. Otra técnica es incorporando estructuras periódicas como rejillas de Bragg (FBG) [Jang, 2019] o rejillas de periodo largo (LPG) [Magalhães, 2020]. Sin embargo, algunos de estos sistemas son también sensibles a efectos por cambios de temperatura o requieren un proceso de fabricación específico en la fibra. Adicionalmente, se han propuesto el uso de fibras especiales, empleando núcleo con geometría de tipo anular [Shen, 2020], en donde la fibra como tal funciona como sensor distribuido.

Otra alternativa es el emplear sistemas interferométricos integrados en fibra tipo Sagnac [Gong, 2014], en donde, en un sistema en anillo se genera la interferencia de campos ópticos contrapropagantes. En este sistema, la señal de salida es función entre otros parámetros, de la curvatura inducida en el anillo de fibra. De igual manera, es posible construir un interferómetro tipo Mach-Zehnder (MZI), como el reportado por [Liu, 2012], en donde se presentan dos micro-muecas sobre una fibra estándar monomodo (SMF) a través de iluminación con fuente de luz láser de CO<sub>2</sub>. En este caso, cada micro-muesca funciona como divisor de haz, de tal manera que, a partir de una señal de entrada, ésta es separada en dos haces: uno de los cuales viaja en núcleo y otro en el revestimiento. La segunda micro-muesca actúa como el elemento que recombina los haces y de este modo puedan interferir entre ellos. Si bien el elemento sensor es simple, se requiere de una fuente de luz controlada que permita generar las micro-muecas con la dimensiones y

profundidades deseadas. Una técnica similar basada en el adelgazamiento de dos regiones de la fibra para conseguir un esquema interferométrico tipo MZI es el reportado por [Niu, 2014].

En este trabajo se reporta la fabricación y prueba de un sensor interferométrico en fibra tipo Mach-Zehnder. El sistema consiste en la unión de segmentos de fibra monomodo-multimodo-monomodo- multimodo-monomodo (SM-M-SM-M-SM). Esta geometría permite separar el haz de entrada en dos trayectorias para posteriormente recombinarse y generar la interferencia de ellos. Así, la señal de salida es función entre otros de la curvatura inducida, por lo que el patrón de interferencia se desplaza. De esta manera, al cuantificar el desplazamiento la señal de salida es posible cuantificar la curvatura inducida. El sistema presentado, el cual emplea la unión de fibras convencionales, permite detectar curvaturas en un rango comprendido de 0 a  $1.4 \text{ m}^{-1}$  y mostrando una respuesta lineal a la deformación inducida.

## 2. Métodos

Los dispositivos que permiten generar el fenómeno de interferencia de ondas se le llaman interferómetros y estos se pueden configurar bajo distintas geometrías. En particular, el Interferómetro de Mach-Zehnder convencional consiste en hacer uso de una fuente de luz, dos divisores de haz y de dos espejos, tal y como se muestra en la figura 1 [Hecht, 1998].

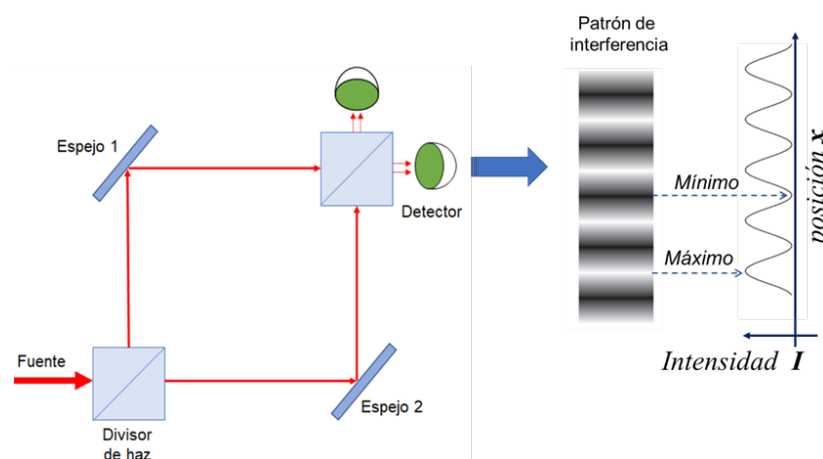


Figura 1 Interferómetro de Mach-Zehnder (MZI) convencional.

En el esquema mostrado, uno de los divisores separa la radiación en dos haces y posteriormente, cada uno de los espejos los direcciona para poder recombinarlos mediante el segundo divisor de haz. Al recombinar los haces de luz, se genera una superposición de ondas la cual es percibida por el ojo humano como mecanismo de detección, una región del espacio donde se proyecta una secuencia alternada de franjas claras y oscuras, denominado patrón de interferencia. Dicho patrón de franjas puede representarse como en términos de la intensidad como una secuencia periódica en la coordenada espacial de elección, ver figura 1. Este mismo sistema es posible implementarlo en fibra óptica, teniendo algunas ventajas como la reducción de componentes ópticos y de dimensiones, lo que permite que sea incorporado de manera portable y más simple. Adicional a lo descrito previamente en la Introducción, se han reportado algunos esquemas interferométricos tipo Mach-Zehnder donde se emplea un segmento de fibras de cristal fotónico empalmado entre dos fibras monomodo SMF [Nazeri, 2020]. En la figura 2 se muestra dicho esquema.

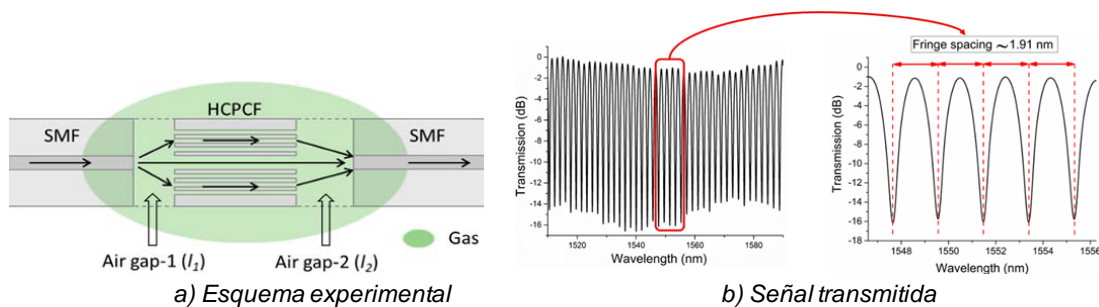


Figura 2 Sistema MZI fabricado con fibra de cristal fotónico [Nazeri, 2020].

Como se aprecia en el esquema de la figura 2a, en el primer segmento de fibra SMF transporta un campo de luz entrante. Al alcanzar su extremo, actúa como una fuente de luz puntual. El modo fundamental que se ensancha y cuando alcanza el segmento de fibra de cristal fotónico, tanto el modo fundamental como orden superior se excitan y se propagan en los núcleos adyacentes al núcleo central. Ambos haces se propagan a lo largo del segmento de la fibra especial y la interferencia óptica ocurre en el segundo espacio debido a la diferencia de fase entre el modo fundamental y los modos de orden superior. El segundo segmento de

fibra SMF colecta la radiación y transfiere el espectro de interferencia y es capturado en su segundo extremo con ayuda de un analizador de espectros óptico. Conviene mencionar que el sistema descrito fue propuesto concretamente como elemento sensor para la detección de gas. En la figura 2b, se aprecia el espectro de salida del sistema y se distingue un comportamiento armónico correspondiente al patrón de interferencia, tal y como se obtiene en su equivalente en propagación libre, ver figura 1. Si bien el sistema posee una característica interesante e innovadora, se requiere del uso de fibra de cristal fotónico, lo cual eleva el costo. Adicionalmente, por la geometría micro-estructurada del segmento de la fibra central, existe una complejidad en el proceso de empalme con los otros dos segmentos debido a que los huecos que posee pueden colapsar y resultar en una estructura irregular. Una alternativa más simple para generar un interferómetro tipo Mach-Zehnder en fibra es a través de la unión consecutiva de fibras monomodo (SMF) y multimodo (MMF), tal y como se indica a en la figura 3.

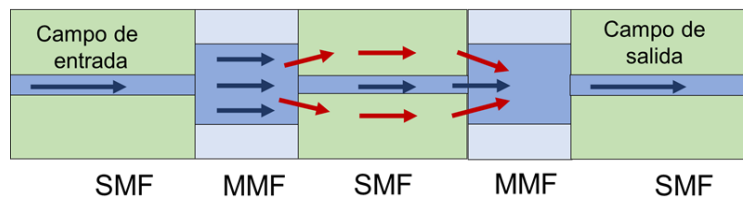


Figura 3 Interferómetro de Mach-Zehnder implementado en fibra.

Tal y como se describe en la figura 3, a partir de un campo de entrada en la fibra SMF, se estimulan modos de propagación cuando pasan hacia el primer segmento MMF. Al llegar al segundo segmento SMF, parte de dichos modos acoplan en el núcleo (líneas en azul) pero parte de propagan en el revestimiento (líneas en rojo), lo que se implica una separación del haz original de entrada. Luego, el segundo segmento de fibra MMF, permite recombinar los haces que han sido separados generando una superposición de ellos. Así, al recolectar la señal en el último segmento de fibra SMF, se obtendrá una señal periódica con un perfil armónico y cuya intensidad total  $I_{total}$  está dado por ecuación 1, [Hecht, 1998].

$$I_{total} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Phi \quad (1)$$

Siendo  $I_1$  e  $I_2$  los campos que se propagan dentro del núcleo y del revestimiento mientras que  $\Phi$  es la diferencia de fase de entre los campos, ecuación 2.

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal de entrada,  $\Delta n$  es el cambio de índice de refracción y  $L$  es la longitud del interferómetro. Si este sistema interferométrico se somete a una flexión ó curvatura externa, la parte interna de la fibra se comprime mientras que la parte externa se estira, por lo que las variaciones estructurales del medio de propagación y, en consecuencia, la distribución del índice de refracción de la sección transversal de la fibra también cambia. Por esta razón, la fase también se modifica generando un corrimiento en el patrón de interferencia. Este es el principio de operación del sistema propuesto. De igual manera que en el sistema descrito en la figura 2, es previsto una señal de salida de tipo armónico para el arreglo establecido en la figura 3.

Para fabricar el interferómetro Mach-Zehnder (abreviado como MZF) en fibra en la geometría propuesta en la figura 3, primero se procedió emplear un cable pigtail de fibra SMF-60 de la marca ®Thorlabs (con diámetros de 125  $\mu\text{m}$  en el revestimiento y 9  $\mu\text{m}$  en el núcleo) provisto con un conector tipo FC/PC en uno de sus extremos. En su segundo extremo que está libre, se prepara para empalmarlo a un primer segmento de fibra MMF (®Thorlabs, 125  $\mu\text{m}$  / 65  $\mu\text{m}$ ) de unos cuantos centímetros de longitud. Lo anterior se logra gracias al uso de una cortadora de precisión y la empalmadora de fusión ambas de la marca ®Fujikura (modelo ®FSM-60S). Posteriormente se corta el extremo MMF de manera que quede una longitud de 1 cm. Posteriormente, se repite el procedimiento de preparación para unir a un segmento de fibra SMF de 1.5 cm y luego se une al segundo segmento de MMF de 1 cm. Finalmente, se prepara y se une a un segundo cable pigtail, igualmente conectorizado con terminales FC/PC. Con este procedimiento, se tiene una estructura la cual posee una secuencia SMF-MMF-SMF-MMF-SMF, la cual se ilustra en la figura 4. Una vez fabricado el interferómetro de Mach-Zehnder en fibra (MZF), se procedió a implementar el sistema de detección de curvaturas. Este sistema experimental es mostrado en la figura 5.

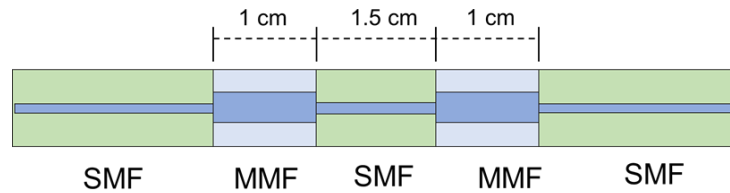


Figura 4 Estructura tipo Mach-Zehnder fabricada en fibra.

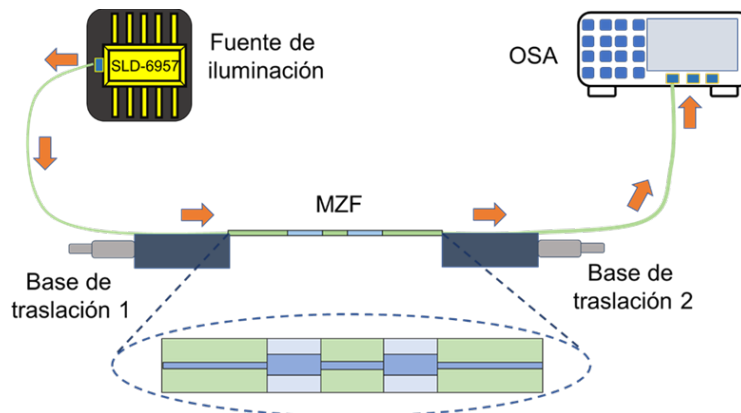


Figura 5 Arreglo experimental empleado para medir curvaturas.

Como se puede apreciar en la figura 5, el sistema experimental consiste en un diodo láser superluminiscente como fuente de iluminación de la marca JDSU Modelo SLD-6957 conectorizado con cables de fibra y provistos de terminales tipo FC/PC. La radiación óptica que emite el SLD, con ancho de banda es 1400 - 1640 nm, se envía por medio del cable de fibra a un extremo de la estructura interferométrica. La radiación que ingresa al MZF y posteriormente emerge él por el segundo extremo, es igualmente conectada con otro cable de fibra FC/PC que conduce la señal hacia el analizador de espectros ópticos OSA de la marca ©Anritsu, modelo MS9740A. Para poder medir curvaturas mediante el MZF, dicha estructura se suspendió mediante 2 bases de traslación micrométricas de la marca Newport. Estas bases tienen una resolución de desplazamiento de 0.01 mm. Cada uno de los extremos de la estructura son inmovilizados en cada base por medio de sujetadores magnéticos, manteniendo la fibra completamente horizontal y en línea recta, la cual es considerada como la posición de inicio. Posteriormente, la base 2 es desplazado hacia la dirección en la que se encuentra la base 1 que permanece fija, provocando que la fibra se curve gradualmente, tal y como se muestra en la figura 6.



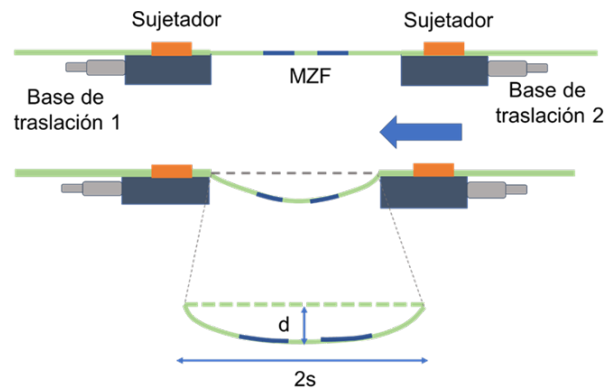


Figura 6 Mecanismo para inducir curvaturas en la estructura MZF.

Conviene mencionar que al tratarse de un sistema interferométrico, puede ser afectado a otras perturbaciones externas. Por esta razón, el mecanismo de curvatura fue aislado de mediante una caja que lo protegiera de corrientes de aire o de variaciones de temperatura, de manera que sólo fuese afectado por efectos de curvatura inducidos.

### 3. Resultados

Antes de proceder a realizar las pruebas, se procedió a obtener el espectro de transmisión de la fuente, el cual se muestra en la figura 7.

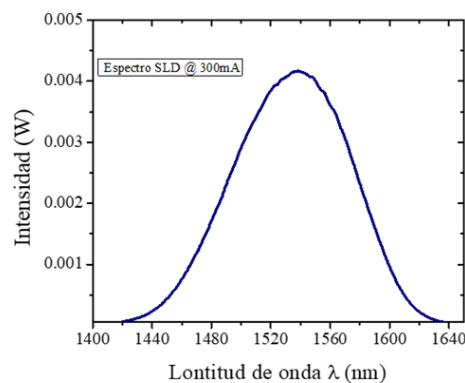


Figura 7 Espectro de transmisión de la fuente (SLD).

De esta gráfica, se observa que este espectro de emisión de la fuente SLD tiene un ancho de banda comprendido de los 1400 a 1650 nm cuando es ajustado a una corriente de salida de 300 mW. Esta intensidad fue seleccionada debido a que se

encuentra en un nivel superior al de la corriente de umbral de emisión (nominalmente a 60 mA), lo que permite que la potencia emitida por el SLD sea estable durante el tiempo de operación. Al centrarse en una banda en el intervalo 1520 a 1560, se aprecia que el comportamiento del espectro que, para fines prácticos, puede considerarse cercano a un perfil uniforme, figura 8.

Una vez montado el sistema descrito en la figura 5, se procedió a obtener el espectro de transmisión y colocada en una posición completamente horizontal y recta, obteniendo la señal transmitida por el dispositivo, tal y como se muestra en figura 9.

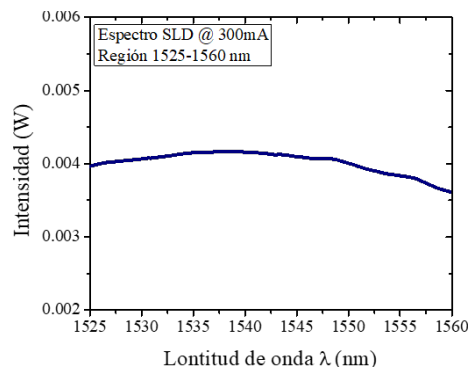


Figura 8 Región del espectro de transmisión del SLD para el intervalo 1525-1560 nm.

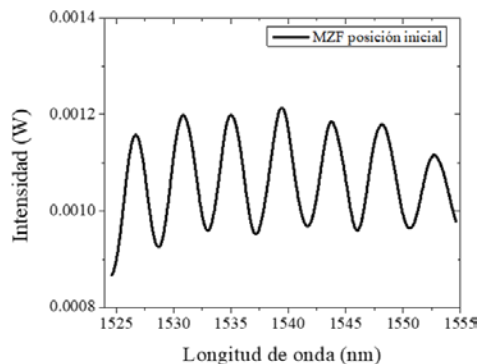


Figura 9 Espectro de transmisión de dispositivo MZF en su posición inicial.

Como se aprecia, de esta gráfica se distingue una señal con un perfil armónico, lo cual es consistente con lo establecido teóricamente en la ecuación 1. Esto es debido a que dado que se induce la interferencia de los campos que son separados y luego recombinados por la propia estructura fabricada. Posteriormente, para poder observar el efecto que provoca el curvar la estructura MZF, se procedió a desplazar

gradualmente la base de traslación micrométrica 2 hacia la base 1 (la cual siempre se mantuvo fija), a partir de la posición inicial considerada cuando la fibra se encuentra completamente horizontal y recta, ver figura 5. En la figura 10 se muestra la lectura de la señal de interferencia para la posición inicial (línea negra, sin curvatura) y cuando es desplazada 50 micras la base 2 hacia la base 1 (línea roja). En recuadro, se muestra los mismos espectros de transmisión para el mismo rango de muestreo comprendido de 1524 a 1555 nm empleado en la figura 9.

De gráfica de figura 10, se consideró como punto de referencia arbitrario la posición de uno de los picos ubicado en 1552.7 nm y se observó que éste se desplaza hacia la izquierda alrededor de 2 nm como consecuencia de flexión inducida. Se continuó obteniendo las trazas respectivas para los desplazamientos realizados en pasos de 50 micras para curvar paulatinamente estructura MZF hasta lograr un desplazamiento total de sólo 800 micras. Una parte de este muestreo se indica en la figura 11, lo cual se seleccionaron sólo algunas cuantas gráficas para fines de una mejor visualización en el desplazamiento del patrón de interferencia.

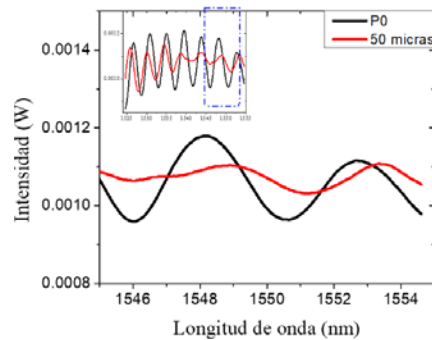


Figura 10 Espectro de transmisión del MZF para dos posiciones.

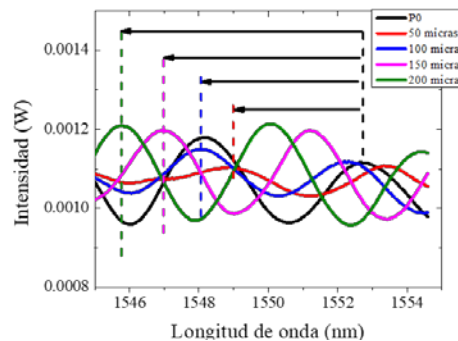


Figura 11 Señales del MZF para cuatro desplazamientos de la base 2 hacia la 1.

## 4. Discusión

Para una descripción más específica, la curvatura inducida  $C$  inducida en la fibra se calcula a partir de parámetros físicos, dados por la ecuación 3, [Niu, 2014].

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2d}{d^2 + s^2} \quad (3)$$

Donde  $R$  es el radio de curvatura del segmento de arco,  $s$  es la mitad de la distancia entre los bordes de las bases de traslación y  $d$  es el desplazamiento de flexión de la fibra transversal a su posición inicial. De lo anterior, los parámetros  $s$  y  $d$  son obtenidos experimentalmente en cada posición de avance de la base 2 hacia la base 1, por lo que es posible calcular tanto  $R$  como  $C$ . Así, a partir de los datos propios del sistema, se calculó los respectivos del radio de curvatura  $R$  para cada posición de la base de traslación 2 al aproximarse a la base 1. Posteriormente se graficó la posición del pico de referencia con respecto a cada valor de curvatura  $C$  inducida en toda la fibra. Estos resultados se muestran en la figura 12.

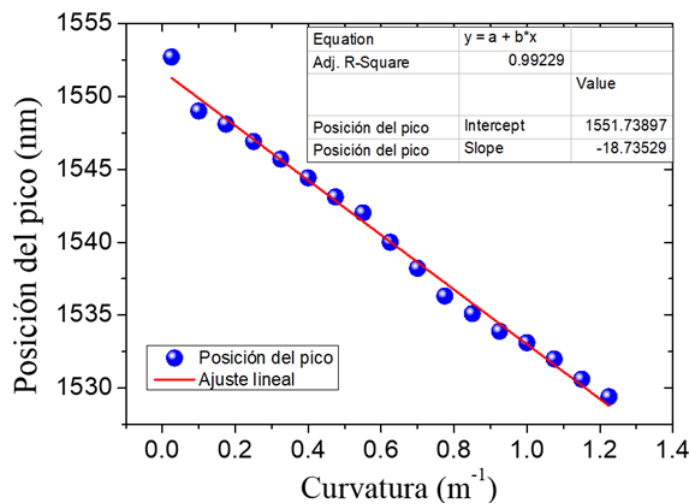


Figura 12 Posición del pico de referencia respecto a la curvatura inducida en el MZF.

De esta última curva experimental, se observa una dependencia proporcional de la posición del pico de referencia con respecto a la curvatura inducida. En consecuencia, se procedió a hacer un ajuste lineal de los datos experimentales empleando el programa computacional Origin®, dando una pendiente de  $-18.7352 \text{ nm/m}^{-1}$ . Este dato, que describe la relación que hay en la posición del pico del punto

de referencia con respecto a los cambios en la flexión inducida, es considerada como la sensibilidad del sistema. El procedimiento descrito se repitió tres veces, obteniéndose una desviación estándar de 0.210 nm. La figura 13 muestra la variación para cada posición del pico de referencia a la curvatura inducida en el MZF. Como se mencionó en la sección anterior, en todo momento de cada una de las pruebas, se mantuvieron las condiciones de aislamiento de variaciones de temperatura y de corrientes de aire que pudieran afectar la experimentación realizada.

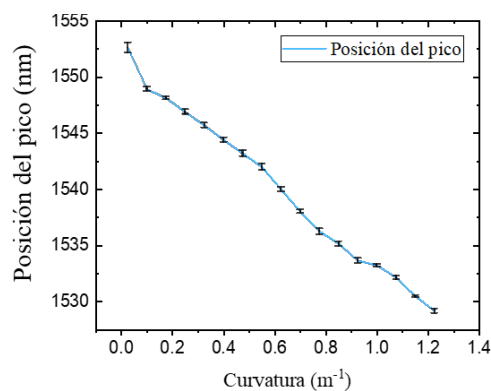


Figura 13 Variación posición del pico de referencia respecto a la curvatura inducida en el MZF después de repetir el experimento en tres ocasiones.

## 5. Conclusiones

En suma, en el presente trabajo se mostró la fabricación y prueba de un dispositivo de tipo interferométrico tipo Mach-Zehnder construido totalmente en fibra (MZF). Dicho componente fue construido por el empalme de consecutivo de segmentos de fibra SMF-MMF-SMF-MMF-SMF. Su principio de operación se basa en que, si la estructura del MZF se somete a flexión externa, la parte interna de la fibra se comprime mientras que la parte externa se estira, por lo que la distribución del índice de refracción de la sección transversal de la fibra cambia y en consecuencia, se visualiza como un corrimiento en el patrón de interferencia. Al someterse a pruebas para detectar curvaturas, los resultados experimentales muestran que el sistema responde linealmente para curvaturas de 0 hasta  $1.4 m^{-1}$  y con una sensibilidad de  $-18.73 nm/m^{-1}$ . Finalmente, las fibras empleadas son de tipo

convencional, lo que facilita, simplifica y reduce considerablemente el costo y que, a diferencia de otros arreglos, no requiere de una preparación especial en la fibra, recubrimientos especiales o equipo fotónicos periféricos adicionales que puedan hacer más compleja la propuesta.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Culshaw B., Fibre optic sensor technology – an engineering reality or a scientific opportunity?. *Proceedings of SPIE*, vol. 7653, article 765304, 2010.
- [2] Gong H., Song H., Zhang S., Jin Y. and Dong X., Curvature Sensor Based on Hollow-Core Photonic Crystal Fiber Sagnac Interferometer. *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 777-780, 2014.
- [3] Gong Y.; Zhao Y.; Rao Y.; and Wu Y., All-Fiber Curvature Sensor Based on Multimode Interference. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, Vol. 23, No. 11, pp. 679-681, 2011.
- [4] Hecht E., *Optics*, Third Edition, Addison-Wesley, 1998.
- [5] Jang M.; Kim S. K., Um S. H.; Yang S. and Kim J., Ultra-high curvature sensors for multi-bend structures using fiber Bragg gratings. *Opt. Express* 27, 2074-2084, 2019.
- [6] Joe H. E., Yun H., Jo S. H., A review on optical fiber sensors for environmental monitoring. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 5, 173–191, 2018.
- [7] Liu Y., Liu B., Miao Y., Zhang H. and Liu J., Effect of bending and orientation on the fiber modal mach–zehnder interferometer. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 54: 136-139, 2012.
- [8] Magalhães R., Silva S. & Frazão O., Curvature Sensor Based on a Long-Period Grating in a Fiber Ring Resonator Interrogated by an OTDR. *Photonic Sens* 10, 1–6, 2020.
- [9] Martins H., Marques M. B., Jorge P., Cordeiro C. M. B., Frazão O., Intensity curvature sensor based on photonic crystal fiber with three coupled cores. *Opt. Comm.*, Vol. 285, 24, 2012.
- [10] Udd E.; Spillman W. B., Jr. (Eds.). *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2010.

- [11] Nazeri K., Ahmed F., Ahsani V., Joe H. E., Bradley C., Toyserkani E., Jun M. B. G., Hollow-Core Photonic Crystal Fiber Mach–Zehnder Interferometer for Gas Sensing. *Sensors* 2020, 20, 2807. <https://doi.org/10.3390/s20102807>.
- [12] Niu L., Zhao C., Gong H. Li Y., Jin S., Curvature sensor based on two cascading abrupt-tapers modal interferometer in single mode fiber. *Opt. Comm.* Vol 333, 11-15, 2014.
- [13] Shen L., Wu H.; Zhao C., Shen L., Zhang R.; Tong W., Fu S. and Tang M., Distributed curvature sensing based on a bending loss-resistant ring-core fiber. *Photon. Res.* 8, 165-174, 2020.