

DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CURVATURA EN FIBRAS ÓPTICAS BASADO EN UN DISPOSITIVO MECATRÓNICO

DESIGN AND INSTRUMENTATION OF A CURVATURE MEASUREMENT SYSTEM IN OPTICAL FIBERS BASED ON A MECHATRONIC DEVICE

Sergio Iván Ramírez Zavala

Universidad de Guanajuato, México
si.ramirezzavala@ugto.mx

Ana Dinora Guzmán Chávez

Universidad de Guanajuato, México
ad.guzman@ugto.mx

Everardo Vargas Rodríguez

Universidad de Guanajuato, México
evr@ugto.mx

Recepción: 12/noviembre/2024

Aceptación: 14/marzo/2025

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo mecatrónico que permite inducir curvatura a una fibra óptica. Para su realización se usaron piezas hechas con impresora 3D. Estas fueron ajustadas a un riel de guía lineal acoplado a un motor a pasos. Se desarrolló una interfaz con el software LabVIEW para controlar el sistema de medición y adquirir la señal óptica en tiempo real con la conectividad a un analizador de espectros ópticos por medio de comunicación GPIB-USB. Se analizó un pico de interferencia de un interferómetro óptico empalmado a la fibra óptica. Con el dispositivo propuesto se logró una desviación estándar menor a 0.135 dBm dentro de un rango de curvatura de 0 a 120 m^{-1} para diferentes resoluciones de desplazamiento lineal y distancias iniciales sin curvatura, mostrando alta repetitividad. Se obtuvo una baja histéresis ya que se alcanzó una desviación estándar menor a 0.46 dBm .

Palabras Clave: Curvatura, Fibra óptica, Impresora 3D, Riel de guía lineal.

Abstract

In this work, the design of a mechatronic device that allows inducing curvature in an optical fiber is presented. To make this device, pieces made with a 3D printer were used. These were adjusted to a linear guide rail which was coupled to a stepper motor. An interface was developed with LabVIEW software to control measurement system and acquire the optical signal in real time with connectivity to an optical spectrum analyzer through a GPIB-USB communication. An interference peak from an optical interferometer spliced to the optical fiber was analyzed. With the proposed device, a standard deviation less than 0.135 dBm was achieved within a curvature range of 0 to 120 m⁻¹ for different resolutions of linear displacement and initial distances without curvature, showing high repeatability. A low hysteresis was obtained as a standard deviation of less than 0.46 dBm was reached.

Keywords: 3D printer, Curvature, Fiber optic, Linear guide rail.

1. Introducción

Hoy en día, la industria y la tecnología han crecido exponencialmente por lo que la automatización de procesos se ha vuelto una necesidad. La automatización y control no se pueden llevar a cabo sin el uso de sensores los cuales son los encargados de capturar los cambios en las magnitudes o señales físicas como lo pueden ser temperatura, presión, aceleración, fuerza, desplazamiento, índice de refracción y curvatura [Culshaw, 2010]. Los sensores al enviar las señales ayudan a los sistemas instrumentados en la toma de decisiones en tiempo real. En este sentido, antes de usar dichos sensores es de gran importancia primero saber su comportamiento por medio de una caracterización confiable. En particular, los sensores ópticos son de gran interés por que éstos presentan innumerables ventajas, tales como inmunes a la interferencia electromagnética, pueden ser usados para implementar elementos de sensado para condiciones extremas, son altamente sensibles, tienen un gran ancho de banda y a su vez pueden ser bastante pequeños. Los cambios en curvatura han sido usados para implementar sensores de tensión mecánica y de vibraciones, los cuales son usados para medir impactos en estructuras civiles, aeroespaciales y aeronáuticas [Acuña, 2006]. Además, las

vibraciones y los cambios de curvatura en estructuras se han usado en el monitoreo y en la generación de alertas ante movimientos sísmicos ocasionales [Rubio-Gleana, 2021]. Se han reportado varias configuraciones para la caracterización de sensores ópticos para medir curvatura. Por ejemplo, se ha propuesto la construcción de un sensor de fibra óptica basado en un esquema interferómetro tipo Mach-Zehnder (MZI) [González-Uresti, 2022] en el cual el sistema es construido mediante la unión consecutiva de varios segmentos de fibra monomodo y multimodo. Para su caracterización, el MZI fue posicionado entre dos bases de traslación micrométricas, las cuales tenían una resolución de desplazamiento de 0.01 mm. Además, [Mao-qing, 2017] propuso un sensor de curvatura basado en un MZI en forma de mariposa hecho de fibra óptica. Para la obtención de resultados, los autores implementaron un sistema para el cual se colocaron dos plataformas de desplazamiento milimétrico y la señal de salida la visualizaron canalizando la señal óptica a un analizador de espectros ópticos. También, se han reportado el uso de cavidades Fabry-Perot para la medición de curvatura [Novais, 2019]. El sensor se fabrica produciendo una burbuja de aire, cavidad entre dos secciones de fibra multimodo. La caracterización en curvatura fue posible con apoyo de una etapa donde se coloca un extremo de la fibra sobre un punto fijo y el otro extremo se coloca a una plataforma de traslación milimétrica. Los resultados se obtuvieron haciendo desplazamientos de 1mm. Además, se reportó otro trabajo con un interferómetro Fabry-Perot toda fibra para detección de curvatura [Monteiro, 2016] para el cual un tubo capilar de sílice se empalmó por fusión entre dos fibras monomodo. Para la caracterización, se realizó una considerable cantidad de mediciones para definir con exactitud el grado de linealidad de la respuesta del sensor. La curvatura se realizó de manera manual haciendo círculos con segmentos de fibra, por lo que los cambios de curvatura fueron cambiando los radios de los círculos, resultando una precisión y resolución bajas. Finalmente [Zhou, 2012] propuso una fibra corta multimodo empalmada a una fibra uniforme con rejilla de Bragg para la medición de la curvatura. Los extremos del sensor se montaron sobre dos plataformas de traslación y moviendo una plataforma en dirección hacia la otra plataforma se cambió la separación entre los extremos generando un cambio de curvatura. La forma de la rejilla ubicada entre las

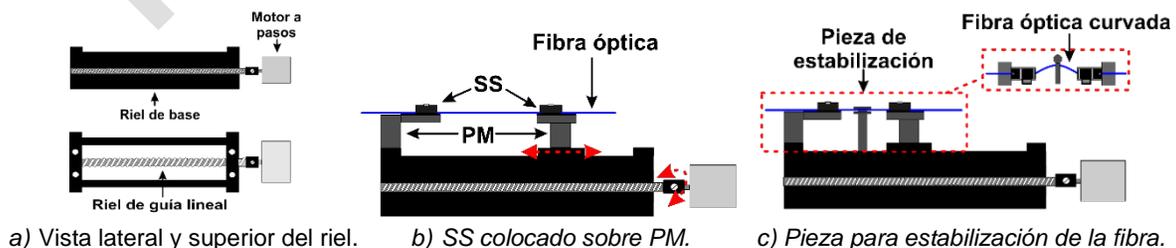
plataformas se aproxima a un arco cuando se curva, de este modo la curvatura en la estructura se puede calcular por la separación correspondiente entre las dos plataformas. En la mayoría de los trabajos antes mencionados y entre otros [Liao, 2020], [Gouveia, 2011], [Wang, 2018], [Sun, 2016], [Zhao, 2017] la resolución no es tan alta porque en la mayoría se usan plataformas milimétricas. En cuanto a la precisión se ve comprometida porque los cambios se hacen de manera manual. En la mayoría de los casos se utilizan plataformas fijas a mesas de experimentación. Cada una de estas plataformas sujetan dos extremos de fibra del sensor y para ir generando cambios en curvatura se van girando tornillos milimétricos de forma manual, de modo que al ir acercando las plataformas entre si se va cambiando la curvatura de la fibra. En otros trabajos se ha posicionado un tornillo en la parte media del sensor el cual se va bajando de forma vertical forzando a la fibra a generar una curvatura [Cano-Contreras, 2014], [Wang, 2018]. Adicionalmente, en todos estos trabajos reportados, la caracterización fue limitada por el número de mediciones o incluso no se menciona la repetitividad del experimento; esto se vio reflejado ya sea porque los cambios de curvatura fueron grandes en un amplio rango de medición o fueron cortos cubriendo un pequeño rango de medición. Además, el análisis de las características del sensor es limitado porque la cantidad de muestras es poca debido a que no se utiliza un sistema automático de adquisición de señales. En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo mecatrónico que permite inducir curvatura a una fibra óptica. Para lograr los objetivos, el trabajo se desarrolló en cuatro etapas. En la primera etapa se presenta el diseño del sistema mecánico el cual servirá para inducir curvatura a una fibra óptica. Este sistema está basado en un riel de guía lineal y piezas hechas de poliláctico e impresas con una impresora 3D. En esta etapa también se acopló un motor a pasos que controla el desplazamiento lineal de un extremo de la fibra óptica. En la segunda etapa se acopla una fuente de luz y un interferómetro óptico a la fibra óptica bajo estudio para generar espectros a diferentes valores de curvatura. En la tercera etapa se propone la programación de la interfaz realizada con el software LabView para controlar remotamente tanto el dispositivo que induce curvatura como la adquisición de espectros ópticos en tiempo real con la conectividad de un analizador de espectros

ópticos (OSA) por medio de un controlador GPIB-USB; y en la cuarta y última etapa se realiza el análisis de las señales adquiridas a diferentes resoluciones lineales y distancias iniciales sin curvatura. Los resultados muestran que para el rango de curvatura de 0 a 120 m^{-1} se obtuvo una alta repetitividad y baja histéresis.

2. Métodos

Para llevar a cabo la instrumentación del sistema mecatrónico y la caracterización de curvatura en una fibra óptica se llevaron a cabo las siguientes etapas:

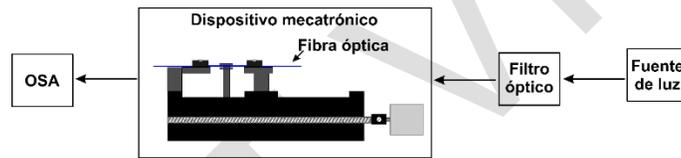
- Etapa 1: En esta etapa se diseñó un dispositivo mecatrónico (Figura 1), el cual permitió sujetar la fibra óptica a modo de que el movimiento que se le aplique horizontalmente permita inducir una curvatura. Para el diseño se siguieron los siguientes pasos, en la Figura 1a se tiene un riel de guía lineal que se acopló un con un motor a pasos en unos de sus extremos. Estos elementos integrados forman un riel de base. Posteriormente (Figura 1b) se seleccionaron soportes de sujeción adecuados para la fibra óptica (SS) y se construyeron dos piezas para el montaje de dichos soportes (PM). Estas piezas fueron hechas de material poliláctico e impresas con una impresora 3D Ender-3. Una de las piezas fue acoplada a un extremo de la guía lineal y la otra pieza se montó sobre el riel de tal manera que se pudiera desplazar para generar curvatura en la fibra óptica. También se diseñó e imprimió en 3D una pieza de estabilización (Figura 1c) que permitiera mantener la fibra óptica curvada dentro de un rango de movimiento controlado. Esta pieza no se acopla al dispositivo directamente, se ancla a la mesa de trabajo cerca del dispositivo.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Pasos que se siguieron para la fabricación del dispositivo mecatrónico.

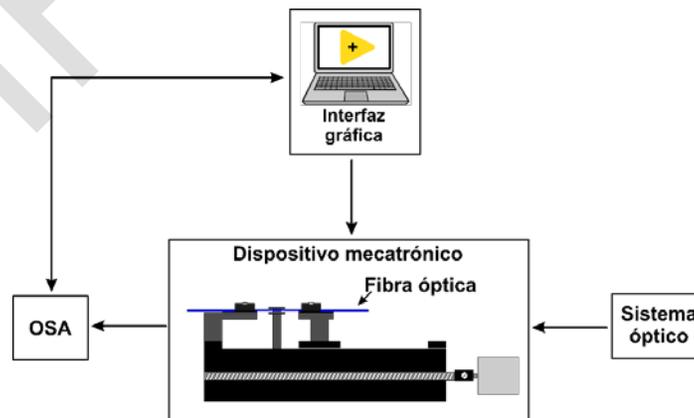
- Etapa 2: En esta etapa se propone el sistema óptico para obtener las señales transmitidas por la fibra óptica bajo estudio a diferentes curvaturas, Figura 2. El sistema requiere de una fuente de luz que es acoplada a un filtro óptico, como por ejemplo una burbuja de aire dentro de la cavidad de una fibra óptica. El filtro también es acoplado a la fibra óptica bajo estudio con la finalidad de que la señal de salida del filtro viaje a través de la fibra óptica para ser modificada cuando la fibra óptica bajo estudio experimente cambios de curvatura. Es importante mencionar que la señal de un filtro óptico tiene máximos y mínimos, lo cual permite ver de manera más clara la atenuación que se tiene en la señal cuando se inducen pérdidas por curvatura con el sistema mecatrónico propuesto. Las señales de salida del filtro se obtienen con un OSA.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Sistema óptico acoplado al dispositivo mecatrónico.

- Etapa 3: En esta etapa se realizó la programación e integración del sistema mecatrónico y óptico para medición de curvatura en la fibra óptica, Figura 3.

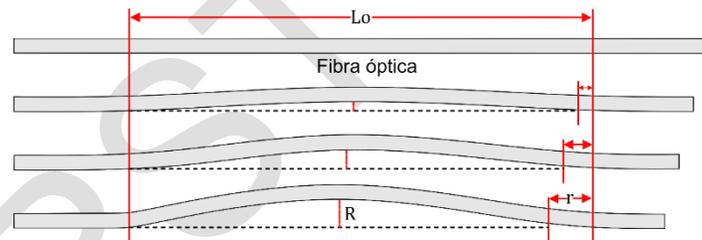


Fuente: elaboración propia

Figura 3 Diagrama esquemático de la instrumentación del sistema de medición.

Para realizar la instrumentación se utilizó el software LabVIEW con el cual se hizo una interfaz gráfica para el control y automatización del dispositivo para inducir la curvatura a la fibra y a su vez tener control en tiempo real del OSA para hacer la adquisición de las señales de manera automática y repetitiva.

- Etapa 4: En esta etapa se hace el análisis de las señales adquiridas, haciendo uso de las medidas de tendencia central y de dispersión. Se obtuvieron señales adquiridas a distintas distancias iniciales (L_0) y diferentes resoluciones de desplazamiento lineal (r). En la Figura 4 se muestra que el radio de curvatura (R) de la fibra óptica está en función de L_0 y r . Para inducir, curvatura, un extremo de la fibra se fija con una de las piezas de sujeción y el otro extremo de la fibra se fija a la pieza de sujeción móvil, obteniendo un desplazamiento de la fibra en forma lineal. La adquisición de las señales es con el objetivo de demostrar la repetitividad y baja histéresis que se alcanza con el dispositivo mecatrónico propuesto para inducir pérdidas por curvatura.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Curvatura de una fibra óptica cuando se desplaza un extremo.

3. Resultados

Diseño del sistema mecánico

Se diseñó un sistema mecatrónico para inducir curvatura de una fibra óptica, por lo que se propuso utilizar un actuador de etapa de riel de guía lineal con un tornillo de bola de 2 mm al cual se acopló un motor a pasos bipolar NEMA 17. Este motor cuenta con un ángulo de paso de 1.8° , es decir que cada una de sus revoluciones la puede subdividir en 200 pasos. Las piezas que se muestran en la Figura 5 permiten controlar y sujetar de manera eficiente la fibra óptica.



a) Sujeción de fibra óptica. b) Bases de acople a riel de guía lineal. c) Pieza para estabilización de la fibra.
Fuente: elaboración propia

Figura 5 Soportes de sujeción para fibra óptica.

En la Figura 5a se presenta la pieza que permite sujetar firmemente la fibra óptica evitando deslizamientos en dirección transversal a la dirección del movimiento de la guía lineal. La pieza que se seleccionó es una pieza de repuesto de una empalmadora de fibras ópticas, la cual realiza la sujeción correcta de la fibra gracias a que cuenta con gomas. En este sentido, al cerrarse la bisagra de la pieza, la fibra queda posicionada entre las gomas. Además, la pieza cuenta con imanes a los costados lo que permite que la bisagra se mantenga cerrada y por tanto la fibra óptica se mantenga fija sin dañarla. La Figura 5b corresponde a las bases diseñadas e impresas en 3D a medida usadas para posicionar las piezas de sujeción de la fibra óptica (Figura 5a). Estas piezas se fijan al riel de base a través de tornillos de fijación, lo cual garantiza un ajuste a nivel y estabilidad al momento del funcionamiento. En la Figura 5c se aprecia una pieza de estabilización diseñada con el objetivo de mantener la fibra óptica en un mismo plano de curvatura. La pieza diseñada e impresa en 3D cuenta con una ranura de aproximadamente 1 mm por donde se pasa la fibra bajo estudio. Esta ranura ayuda a que, al inducir curvatura con el movimiento de la plataforma, la fibra no tenga movimientos bruscos transversales en el sentido del movimiento de la fibra óptica y se mantenga en el mismo plano de curvatura durante el proceso de medición.

En la Figura 6 se presenta el dispositivo ensamblado con las piezas correspondientes para sujetar (Figura 5a) y mantener controlado el plano de curvatura de la fibra óptica (Figura 5c). En la Figura 6a se observa que la pieza de estabilización se ajusta al riel de base, por lo que siempre se mantiene estática. En la Figura 6b se muestra a detalle la sujeción de la fibra óptica con cierta curvatura.

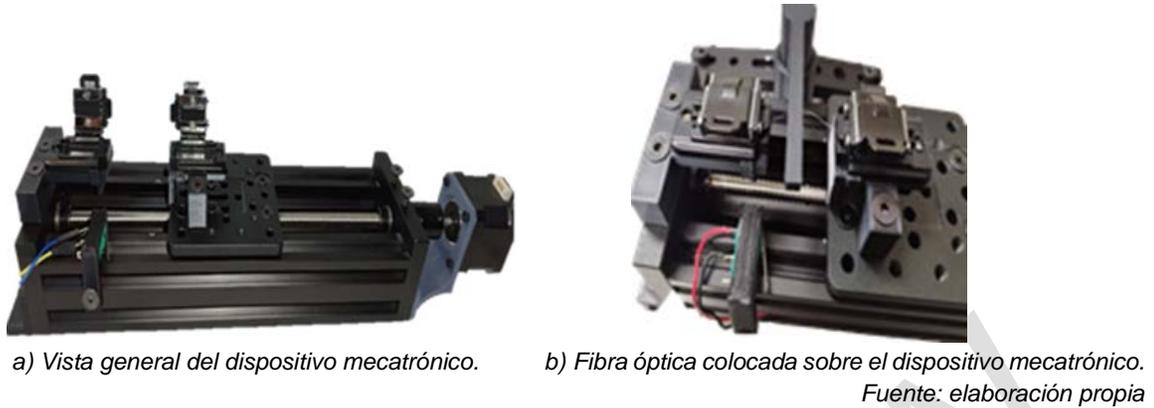


Figura 6 Sistema mecatrónico para inducir curvatura.

A manera de síntesis, en la Figura 7 se muestra el proceso que lleva a cabo el dispositivo mecatrónico para inducir curvatura en la fibra óptica. Inicialmente en la Figura 7a como primer paso se muestra que se posicionan a una cierta distancia las piezas de sujeción que se etiquetan como puntos A y B. El punto A es la pieza fija y el punto B es la pieza que tiene movimiento en dirección al punto A, se observa que las bisagras de las piezas de sujeción están abiertas mientras se ajusta la distancia entre los puntos A y B, y la fibra solo se encuentra sobre de éstas sin ninguna tensión. La distancia entre los puntos A y B es la distancia inicial deseada L_0 .

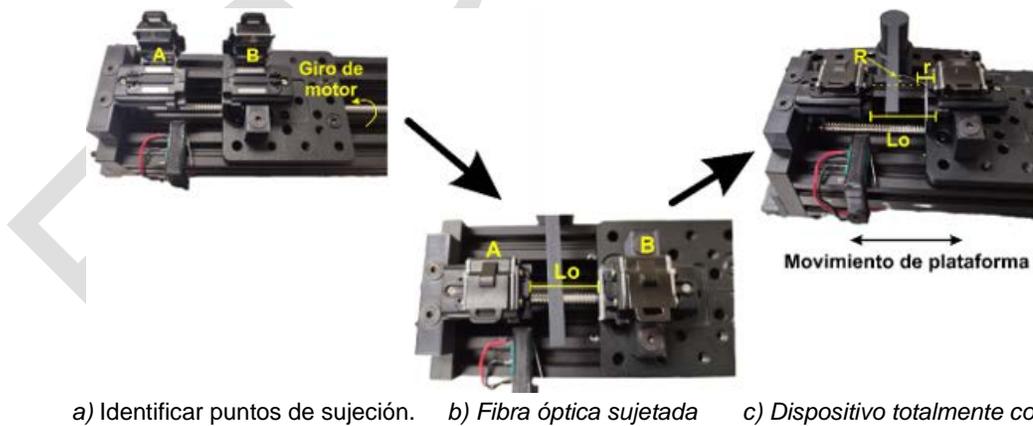


Figura 7 Funcionamiento del sistema mecatrónico para inducir curvatura.

En la Figura 7b se aprecia que una vez ajustada L_0 , se cierran las piezas de tal manera que la fibra óptica quede estirada y alineada horizontalmente dentro de la

ranura formada por las gomas. En esta etapa, en la Figura 7c el dispositivo está listo para recibir la señal eléctrica de control que servirá para seleccionar el valor de r . Como el movimiento es del punto B al punto A, para cada cambio r , se tendrá un incremento en R que representa el radio de curvatura que presenta la fibra óptica.

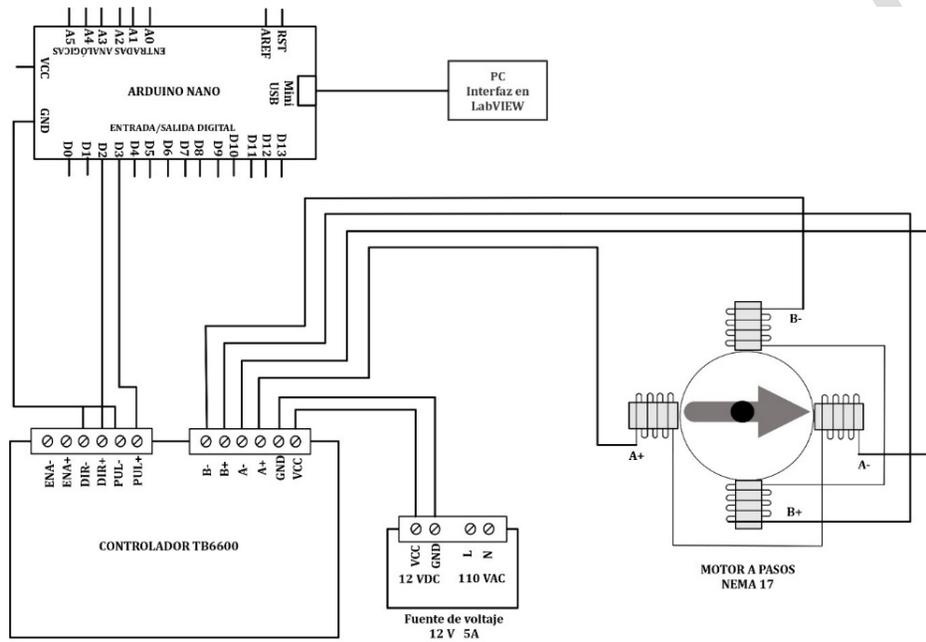
Armado del sistema óptico

El sistema óptico está basado en una fuente de luz de amplio espectro $\sim 1.5 \mu m$. Para esto se acopló un diodo laser de bombeo de $980 nm$ y una potencia máxima de salida de $40 mW$ a un multiplexor por división de onda con longitudes de onda de operación $980/1500 nm$. En el común del multiplexor se empalmó un extremo de fibra dopada con erbio para general luminiscencia a $\sim 1.5 \mu m$; el otro extremo de la fibra se empalmó al puerto 1 de un circulador óptico, esto con la finalidad de que la luminiscencia del erbio viajara al puerto 2 del circulador. En este puerto se acopló una fibra que tiene una burbuja de aire como cavidad interferométrica que genera la señal óptica de entrada a la fibra sensible a la curvatura bajo estudio. La luz reflejada por el interferómetro viaja al puerto 3 del circulador óptico el cual se empalma a un acoplador $90/10$. Aquí, es importante mencionar que no es necesario el acoplador, en este trabajo se dejó porque la salida del 10% se podría utilizar para inyectar luz a otros elementos ópticos. Finalmente, la salida que entrega el 90% de la señal se empalma a la cola de una fibra sensible a curvatura. Esta fibra es la que se coloca en el dispositivo mecatrónico que se encargará de inducir cambios en curvatura. El otro extremo de la fibra sensible a curvatura es la salida que se manda al OSA para la visualización de los espectros que a su vez estará manipulado por una interfaz gráfica con una computadora.

Programación e implementación del sistema mecatrónico y óptico para medir curvatura

En esta etapa se hizo la programación para la adquisición automática de las señales. En este sentido se implementó un código en LabVIEW para la automatización de la etapa de inducción de curvatura; en esta etapa el código se encarga de tomar las decisiones respecto en qué momento debe de incrementar la

curvatura. Se propuso un método para el control del sistema mecatrónico, para el cual su esquema de control se muestra en la Figura 8, donde se visualiza que se tiene como componentes principales un driver para motor a pasos TB6600, un motor a pasos NEMA 17, una tarjeta ARDUINO NANO para enviar las señales de dirección y pulsos de control del motor y comunicación con LabVIEW.

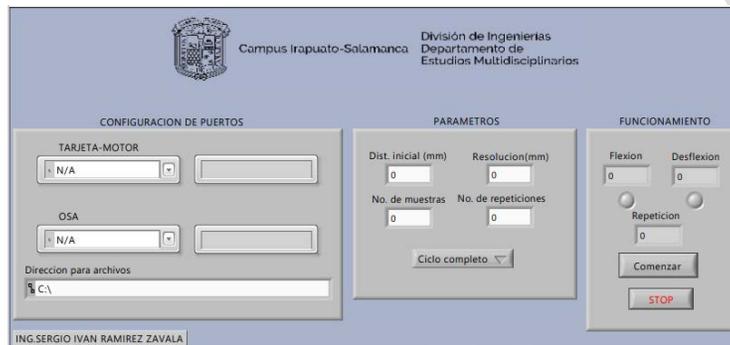


Fuente: elaboración propia

Figura 8 Esquema de control para motor NEMA 17.

La resolución del motor NEMA 17 usando el driver TB6600 puede controlarse con el avance lineal y los pulsos por revolución. Para la adquisición de las señales se configuró el driver TB6600 para 4 micropasos el cual entrega 800 pulsos por revolución que por ende se tienen resoluciones de 4.5×10^{-1} grados por pulso y tomando en cuenta el tornillo de bola de 2 mm del riel se cuenta con 2.5×10^{-6} mm de avance lineal por pulso. Como la intención principal es hacer el análisis de las señales o espectros observando los cambios en longitud de onda induciendo cambios de curvatura en la fibra óptica fue necesario instrumentar un OSA para la captura de espectros en tiempo real por medio de un cable de comunicación GPIB-USB-HS de National Instruments. Para esto se emplean códigos basados en diagramas de bloques para realizar una interfaz (Figura 9) y código que permita

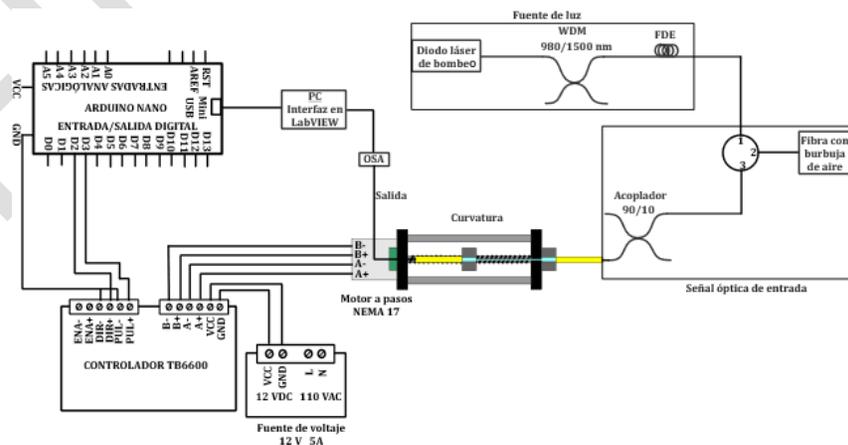
introducir y cambiar parámetros para hacer la automatización de adquisición de señales a diferentes cambios de curvatura. Con esta interfaz se pueden cambiar parámetros como la distancia inicial de separación entre las plataformas en mm que sostienen la fibra a curvar, la resolución, el número de muestras y el número de repeticiones, además de seleccionar si queremos hacer adquisición cada paso en el que la fibra se esté flexionando o al contrario cuando se esté deflexionando, pero también se puede seleccionar hacer la adquisición en ambos sentidos.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Interfaz usada para el control remoto del OSA y la adquisición de espectros.

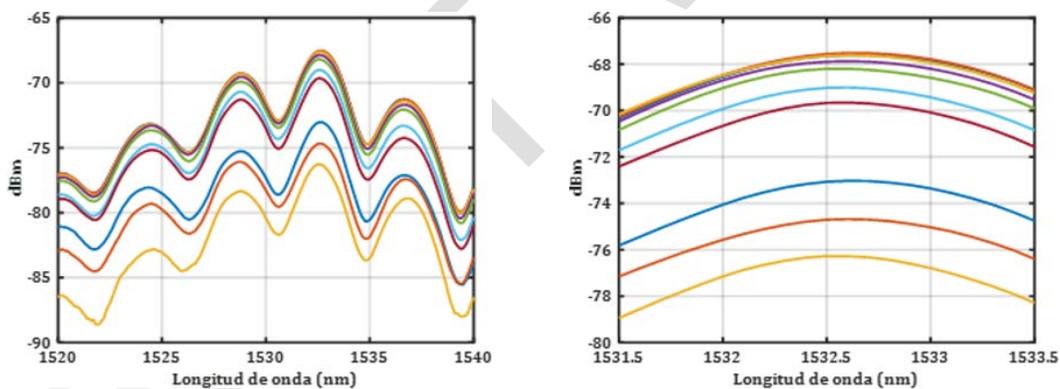
En la Figura 10 se muestra un diagrama general del sistema para inducir curvatura en una fibra óptica y la adquisición de las señales ópticas de salida. El sistema se compone de la parte electrónica de control que se encarga del movimiento del motor a pasos (sistema mecatrónico) y por otro lado el sistema óptico.



Fuente: elaboración propia

Figura 10 Esquema general del sistema para inducir curvatura en fibra óptica.

Para la adquisición de las señales, se planteó el uso de 3 distancias iniciales las cuales son $Lo1 = 30\text{ mm}$, $Lo2 = 25\text{ mm}$, $Lo3 = 20\text{ mm}$. Además, se usaron 5 resoluciones, $r1 = 1\text{ mm}$, $r2 = 0.8\text{ mm}$, $r3 = 0.6\text{ mm}$, $r4 = 0.4\text{ mm}$, $r5 = 0.2\text{ mm}$. El número de muestras varió, esto tomando en cuenta el número de muestras máximas que se podían tomar antes de que la fibra se quebrara. En el modo de adquisición, la interfaz nos permite seleccionar 3 diferentes opciones, el primero se denominó medio ciclo (+), lo que implica que hará adquisiciones mientras flexiona la fibra óptica (F), el segundo modo es medio ciclo (-) donde la adquisición la hará mientras deflexiona la fibra óptica (D), y el tercer modo es ciclo completo, el cual hace adquisición mientras flexiona y deflexiona la fibra óptica (F/D). En la Figura 11 a) se muestran espectros adquiridos con una separación inicial de $Lo = 30\text{ mm}$ entre las plataformas y una resolución $r = 1\text{ mm}$, se muestra que se tienen pérdidas homogéneas. En la Figura 11 b) se muestra las amplitudes de uno de los picos de interferencia de los espectros adquiridos.



a) Espectros adquiridos con $L_o = 30\text{ mm}$

b) Amplitudes de un pico de interferencia.

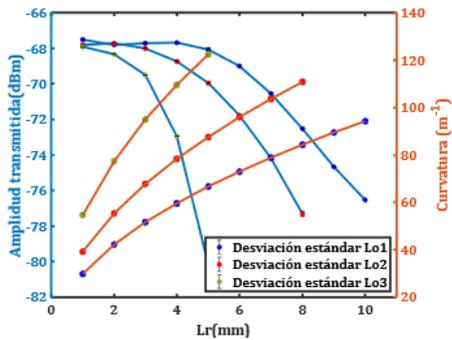
Fuente: elaboración propia

Figura 11 Espectros de interferencia para distintos valores inducidos de curvatura.

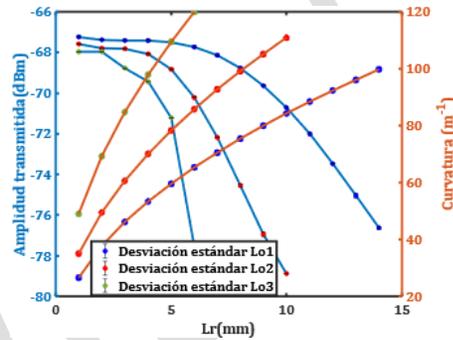
Análisis de las señales adquiridas

Los datos que se analizaron de las señales adquiridas son las amplitudes máximas de uno de los picos de interferencia como se muestra en la Figura 11b. En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos para las distintas Lo y r . En cada sub figura se muestra la amplitud máxima transmitida obtenida al calcular la media aritmética de 5 repeticiones del experimento en función de la distancia recorrida

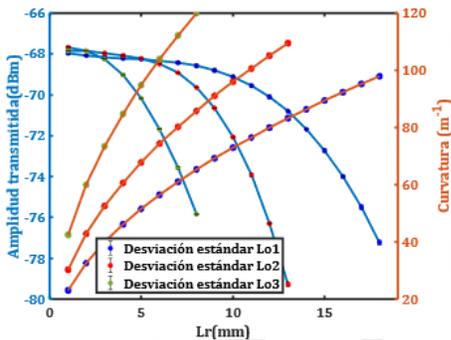
Lr (veces que se recorre la fibra una distancia r), donde L es un número entero. Es importante mencionar que para cualquier resolución r , la distancia lineal recorrida está gobernada por Lr , por ejemplo, para el caso donde $L = 10$ y $r = 1$ mm, significa que la distancia lineal recorrida va desde 1 mm hasta 10 mm. También se muestra el valor de la curvatura en función de Lr .



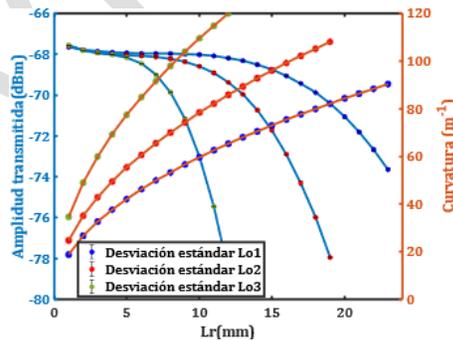
a) Amplitud transmitida y curvatura para $r = 1$ mm.



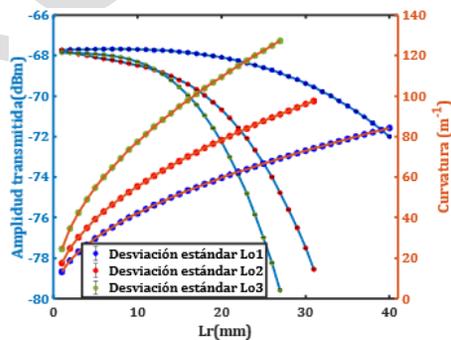
b) Amplitud transmitida y curvatura para $r = 0.8$ mm.



c) Amplitud transmitida y curvatura para $r = 0.6$ mm.



d) Amplitud transmitida y curvatura para $r = 0.4$ mm.



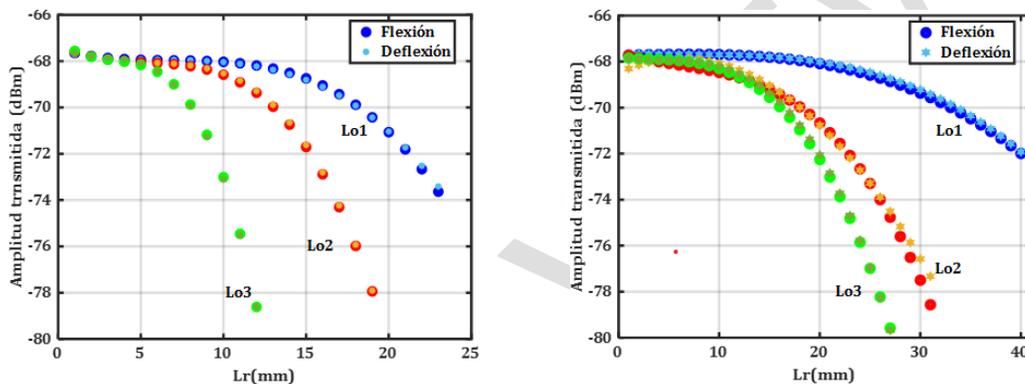
e) Amplitud transmitida y curvatura para $r = 0.2$ mm.

Fuente: elaboración propia

Figura 12 Amplitud transmitida y curvatura en función de Lr .

Para demostrar que se tiene baja histéresis en el proceso de medición, se realizó un análisis con las mediciones cuando la fibra fue flexionada y luego deflexionada

en una sola partida. En la Figura 13 se muestran los resultados de la amplitud transmitida en función de las veces en que se recorrió la fibra para una resolución de 0.4 y 0.2 mm. Para cada resolución se usaron tres distintas distancias iniciales, $Lo1 = 30 \text{ mm}$, $Lo2 = 25 \text{ mm}$, $Lo3 = 20 \text{ mm}$. En la Figura 13a se muestra que se obtiene prácticamente el mismo valor de amplitud tanto en la flexión como en la deflexión para $r = 0.4 \text{ mm}$, lo que indica que el proceso de curvar la fibra es altamente controlado, en la Figura 13b se muestra la comparación entre las amplitudes transmitidas para flexión y deflexión para $r = 0.2 \text{ mm}$.



a) Comparativa en flexión-deflexión para $r = 0.4 \text{ mm}$. b) Comparativa en flexión-deflexión para $r = 0.2 \text{ mm}$.

Fuente: elaboración propia

Figura 13 Amplitud transmitida en función de los valores de r .

Para el análisis se obtuvieron las restas entre los valores de amplitud cuando fue flexionada y deflexionada la fibra. Con estos valores se obtuvo la media aritmética y la desviación estándar de las desviaciones. En la Tabla 1 se muestran los valores correspondientes a las resoluciones de 1, 0.8, 0.6, 0.4 y 0.2 mm. Se observa que la media aritmética va de $0 \leq \bar{x} \leq 0.18$, la mayoría de estos valores están por debajo de 0.09, es decir, prácticamente cero, a excepción de 0.10 que corresponde a $[Lo1, r1]$, 0.12 correspondiente a $[Lo3, r1]$, 0.11 que corresponde a $[Lo1, r4]$ y 0.18 correspondiente a $[Lo1, r5]$. Para la desviación estándar los valores se encuentran entre $0.04 \leq \sigma \leq 0.46$. Aquí es importante resaltar que las desviaciones estándar más pequeñas (0.07, 0.04 y 0.06) corresponden a una resolución $r = 0.04 \text{ mm}$ para $Lo1$, $Lo2$ y $Lo3$ respectivamente; mientras que los valores mayores de desviación estándar se observan para la resolución $r = 1 \text{ mm}$ y son 0.44, 0.34 y 0.46 para $Lo1$,

$Lo2$ y $Lo3$, respectivamente. Se puede observar que los valores de error o desviación estándar van muy ligados con la resolución con la que se trabaje, por lo tanto, a menor resolución la desviación estándar es menor.

Tabla 1 Media aritmética y desviación estándar obtenidos con el análisis de histéresis.

\bar{x} (dBm)/ σ (dBm)	$r = 1\text{ mm}$	$r = 0.8\text{ mm}$	$r = 0.6\text{ mm}$	$r = 0.4\text{ mm}$	$r = 0.2\text{ mm}$
$Lo1$	0.10/0.44	0.09/0.20	0.11/0.22	0 /0.07	0.07/0.05
$Lo2$	0.07/0.34	0.09/0.18	0.04/0.22	0.03/0.04	0.18/0.35
$Lo3$	0.12/0.46	0.06/0.28	0.08/0.42	0.01/0.06	0.08/0.09

Fuente: elaboración propia

4. Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que para las 3 distancias iniciales de separación propuestas ($Lo1$, $Lo2$ y $Lo3$) y para las cinco resoluciones r , al hacer el análisis de histéresis se cuenta con media aritmética prácticamente de 0 y desviaciones estándar por debajo de 0.5, por lo que se puede decir que se tienen resultados aceptables con el sistema propuesto para generar la curvatura en la fibra óptica. Los mejores resultados en cuanto a menor desviación estándar corresponden a las resoluciones de 0.4 y 0.2 mm, por lo que a menor resolución aumenta la repetitividad y disminuye la histéresis. Además, es importante mencionar que las pruebas se realizaron con una fibra sensible a la curvatura por lo que se pretende en un futuro colocar fibras que tengan un adelgazamiento (altamente sensibles a la curvatura) o de igual manera hacer pruebas con fibras que tengan diferentes características como por ejemplo birrefringencia.

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso el diseño e instrumentación de un sistema mecatrónico para inducir curvatura a una fibra óptica. Se demostró que es posible inducir cambios de curvatura con alta repetitividad y baja histéresis para diferentes distancias iniciales a diferentes resoluciones con el uso de equipos mecánicos y electrónicos. La repetitividad del equipo se demostró haciendo uso de dispersión. De acuerdo con los resultados se puede decir que el sistema responde de buena manera al realizar barridos hacia adelante y hacia atrás, siempre teniendo una

coincidencia entre los espectros que se van obteniendo en tiempo real con ayuda de la interfaz gráfica diseñada.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Acuña, R., Causado, J., & Torres, P. I. Sensores de fibra óptica para medición de pequeños desplazamientos basados en pérdidas por curvatura. *Revista colombiana de Física*, vol. 38, n° 2, 2006.
- [2] Cano-Contreras, M., Guzman-Chavez, A.D., Mata-Chavez, R.I., Vargas-Rodriguez, E., Jauregui-Vazquez, D., Claudio-Gonzalez, D., Estudillo-Ayala, J. M., Rojas-Laguna, R. & Huerta-Mascotte, E. All-Fiber Curvature Sensor Based on an Abrupt Tapered Fiber and Fabry-Perot Interferometer. *IEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, n° 22, pp. 2213-2216. 2014.
- [3] Culshaw, B. Fibre Optic Sensor Technology – An Engineering Reality or a Scientific Opportunity?. *Proceedings of SPIE*, vol. 7653, n° 765304. 2010.
- [4] González-Uresti, G., Armenta-Serna, F. A., Fuentes-Rubio, Y.A., García-Garza, L. A., & Domínguez-Cruz, R. F. Interferómetro de fibra aplicado como sensor de curvatura. *Pistas educativas*, vol. 43, n° 141, pp. 504-518. 2022.
- [5] Gouveia, C., Jorge, P.A.S., Baptista, J.M. & Frazão, O. Temperature-Independent Curvature Sensor Using FBG Cladding Modes Based on a Core Using FBG Cladding Modes Based on a Core. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, n° 12, pp. 804-806. 2011.
- [6] Liao, N., Liang, H., Lijuan, M., Xiyuan, W., Zhang, A., Weigou, J., Wei W. & Yuxiang, Y. A sensitivity-enhanced micro-cavity extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic curvature sensor. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 221. 2020.
- [7] Mao-qing, C., Yong, Z., Ri-qing L., & Feng, X. A Novel and Small Curvature Sensor Based on Butterfly-Shape Mach-Zehnder Interferometer. *SPIE*, vol. 10323, n° 103231W. 2017.
- [8] Monteiro, C.S., Ferreira, M.S., Silva, S.O., Kobelke, J., Schuster, K., Bierlich, J. & Frazao, O. Fiber Fabry-Perot Interferometer for Curvature Sensing. *Photonic Sensors*, vol. 6, n° 4, pp. 339-344. 2016.

- [9] Novais,S., Silva,S.O. & Frazao,O. A Self-Referencing Intensity-Based Fabry–Perot Cavity for Curvature Measurement. *IEEE, Sensors Council*, vol. 3, nº 10. October 2019.
- [10] Rubio-Gleana,J., Carmona-Reyes,V.M., Rivera-Olvera,J.N., Higuera-Gonzalez,R.M. & Lopez-Dieguez,Y. Diseño de un sensor de vibraciones y curvaturas de fibras ópticas. *Mexican Optics and Photonics Meeting*, nº MOPM2021-92, p. 104. 2021.
- [11] Sun,C., Wang, M., Liu,J., Ye, S., Liang, L. & Jian, S. Fiber Ring Cavity Laser Based on Modal Fiber Ring Cavity Laser Based on Modal. *IEEE PhotonicsTechnology Letters*. 2016.
- [12] Wang,Q. & Liu,Y. Review of Optical Fiber Bending/Curvature Sensor. *Measurement*, vol. 130, pp. 161-176. December, 2018.
- [13] Zhao,Y., Cai, L. & Xue-Gang L. Temperature-Insensitive Optical Fiber Curvature Sensor Based on SMF-MMF-TCSMF- MMF-SMF Structure. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, vol. 66, nº 1, pp. 141-147. 2017.
- [14] Zhou, W. , Zhou, Y., Dong, X., Shao, L.-Y., Cheng, J. & Jacques, A. Fiber-Optic Curvature Sensor Based on Cladding-Mode Bragg Grating Excited by Fiber Multimode Interferometer. *IEEE Photonics Journal*, vol. 4, nº 3, pp. 1051-1057. 2012.