

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES ÓPTICOS

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Nombre y apellidos del autor: Sheyly Dayana Ortiz Reyes
Nombre y apellidos del tutor: Sarmach Ulianov Enriquez
Monterrey, 8 de Junio de 2022



Agradecimientos:

A mi tutor, Sarmach Ulianov Enriquez Sias, por su esfuerzo y dedicación. A mi familia por el apoyo.

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se ha realizado en colaboración con la investigación de sensores ópticos para la medición de curvatura, iniciada en la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Se ha diseñado, fabricado y caracterizado una serie de sensores ópticos MMI de alta sensibilidad para la detección de curvatura, cada uno con distintas configuraciones, desde un sensor MMI convencional hasta sensores MMI con fusión asimétrica de fibra en distintos porcentajes. Para ello, ya se disponía de un previo estudio con sensores MMI, cuyo *know-how*, nos permite seguir con esta nueva investigación. [1]

Para la realización del proyecto se ha usado una plataforma de desplazamiento horizontal, un interrogador óptico PXIe de National Instruments (modelo NI PXIe-4844), un fusionador de fibra de Fujikura y la plataforma LabView, todas estas herramientas junto con los materiales necesarios nos han permitido obtener los resultados que aquí se presentan.

LISTA PALABRAS CLAVE

Fibra óptica, interferencia multimodal, detección de curvatura, sensor, escalón.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	OBJETIVO	8
3.	ESTADO DEL ARTE.....	9
	a. Sensores ópticos.....	9
	b. Sensores MMI	10
	c. Sensores de curvatura.....	11
	d. Sensor MMI con rejilla de Bragg	12
	e. Sensores con fusión asimétrica de fibra	13
4.	METODOLOGÍA	14
	a. Fabricación de los sensores y principio de operación	14
	a.1) Interferencia multimodal y “core-offset”	14
	a.2) Autoimagen 4 ^a ventana	15
	a.3) Rejilla de Bragg.....	15
	a.4) Fabricación	16
	b. Configuración experimental y resultados.....	19
5.	CONCLUSIONES	25
6.	LÍNEAS FUTURAS.....	25
7.	REFERENCIAS.....	25

TABLA DE CONTENIDO

Figura 1: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR (PARTE A) INTEGRADO CON UN ÁPICE DE INTELIGENCIA (PARTE B)	10
Figura 2: ESTRUCTURA TÍPICA DE UN SENSOR MMI - FUENTE: [5]	10
Figura 3: ESTRUCTURA TÍPICA DE UN SENSOR MMI CON NCF - FUENTE: [5]	11
Figura 4: ESTRUCTURA TÍPICA DE UN SENSOR (STMS) - FUENTE: [5]	12
Figura 5: ESQUEMA DEL RECORRIDO DE UN PULSO - FUENTE: [10]	12
Figura 6: ESTRUCTURA DE UN SENSOR SMS CON FBG - FUENTE: [11]	13
Figura 7: ESTRUCTURA DE UN SENSOR CON CO - FUENTE: [13]	13
Figura 8: ESTRUCTURA DE UN SENSOR SMS CON 2 CO - FUENTE: [12]	14
Figura 9: ESTRUCTURA DEL SENSOR PROPUESTO CON 1 ESCALÓN - FUENTE: PROPIA	15
Figura 10: EJEMPLO DE SEÑAL OBTENIDA EN REFLEXIÓN - FUENTE: PROPIA	16
Figura 11: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI - FUENTE: PROPIA	17
Figura 12: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 1 ESCALÓN AL 10% ENTRE SMF Y MMF-NC - FUENTE: PROPIA	17
Figura 13: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 1 ESCALÓN AL 25% ENTRE SMF Y MMF-NC - FUENTE: PROPIA	17
Figura 14: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 2 ESCALONES AL 10%- FUENTE: PROPIA	18
Figura 15: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 2 ESCALONES AL 25% - FUENTE: PROPIA	18
Figura 16: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 1 ESCALÓN AL 10% ENTRE MMF-NC Y SMF - FUENTE: PROPIA	18
Figura 17: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 1 ESCALÓN AL 25% ENTRE MMF-NC Y SMF - FUENTE: PROPIA	19
Figura 18: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL- FUENTE: PROPIA	20
Figura 19: SENSOR MMI CONVENCIONAL. (a) CAMBIO EN POTENCIA DEL PICO 3. (b) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DEL PICO 3. (c) CAMBIO EN POTENCIA DE LA REJILLA DE BRAGG. (d) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DE LA REJILLA DE BRAGG - FUENTE: PROPIA	21

Figura 20: SENSOR MMI CON ESCALÓN AL 25%. (a) CAMBIO EN POTENCIA DEL PICO 1. (b) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DEL PICO 1. (c) CAMBIO EN POTENCIA DE LA REJILLA DE BRAGG. (d) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DE LA REJILLA DE BRAGG - FUENTE: PROPIA 22

Figura 21: SENSOR MMI CON 2 ESCALONES AL 10%. (a) CAMBIO EN POTENCIA DEL PICO 1. (b) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DEL PICO 1. (c) CAMBIO EN POTENCIA DE LA REJILLA DE BRAGG. (d) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DE LA REJILLA DE BRAGG. - FUENTE: PROPIA 23

Figura 22: SENSOR MMI CON 2 ESCALONES AL 25%. (a) CAMBIO EN POTENCIA DEL PICO 1. (b) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DEL PICO 1. (c) CAMBIO EN POTENCIA DE LA REJILLA DE BRAGG. (d) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DE LA REJILLA DE BRAGG. - FUENTE: PROPIA 24

1. INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo se han usado sensores eléctricos para la medición de distintos fenómenos físicos y químicos, debido a sus amplias aplicaciones en la industria, pero por esta misma razón también tienen limitaciones como, la pérdida de transmisión, tiempo de respuesta, sensibilidad a interferencias electromagnéticas, etc. De esta forma, las investigaciones se centran en la búsqueda de alternativas, como pueden ser los sensores ópticos.

Dichos sensores son de gran importancia ya que pueden medir diversas variables físicas o químicas y convertirlas a variables ópticas y posteriormente a variables electrónicas. Además, generan mucho interés en diversos campos debido a sus numerosas ventajas. Entre las principales ventajas destacan, su uso en ambientes peligrosos, su inmunidad a interferencias electromagnéticas, su rápida respuesta, tolerancia a ambientes corrosivos y temperaturas extremas, son livianos y de pequeño tamaño, soportan fuertes vibraciones... Todas estas ventajas hacen posible su uso en refinerías y plantas químicas y de generación de energía, el sector aeroespacial y automovilístico, y además como cabe la posibilidad de multiplexar las señales recibidas de una gran cantidad de sensores, nos permite automatizar y controlar grandes procesos industriales. Estas características permitirán a futuro avanzar a un sinnúmero de posibilidades en la industria. [2]

Sin embargo, las medidas realizadas son función de la intensidad óptica de salida y estas se ven fuertemente afectadas por las fluctuaciones de potencia debidas a la variación de la intensidad de la fuente de luz, variaciones por efecto de curvatura de la fibra, equilibrio modal o propio del medio ambiente.

Algunos sensores ópticos son los basados en estructuras MMI (Interferencia intermodal), estos sensores son de fabricación simple y su producción de bajo costo. La operación de la estructura MMI tiene como único requisito que la guía de onda multimodal (fibra óptica multimodo o fibra multimodo No-Core) pueda soportar varios modos a la vez. Los modos soportados son estimulados y confinados como una solución del campo electromagnético, que en un principio fue la señal de entrada proveniente de la fibra monomodo. La interferencia a lo largo de la fibra multimodo entre los distintos modos creados da paso a la formación de autoimágenes de la señal de entrada a una distancia periódica. Por lo tanto, la longitud de la fibra multimodo debe ser determinada con gran precisión con la finalidad de obtener el punto correcto donde se espera la autoimagen a la salida de la fibra multimodo.

2. OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar un nuevo tipo de sensor para la detección de curvatura, basado en el fenómeno de la interferencia multimodal (MMI) y el uso de rejillas de Bragg (FBG). Adicionalmente, se documentará cada configuración de los distintos sensores aquí presentados.

El estudio se centra en la comparación de los siguientes sensores:

- Sensor MMI con rejilla de Bragg.
- Sensor MMI con un escalón y rejilla de Bragg.
- Sensor MMI con un escalón a ambos lados del sensor y rejilla de Bragg.

Para que esto sea posible el proceso incluye el diseño, la fabricación, la implementación y el estudio experimental de dichos sensores ópticos para sus posibles usos dentro de algún campo de interés como la industria alimenticia, medicina, productos químicos, etc.

3. ESTADO DEL ARTE

a. Sensores ópticos

A lo largo de la historia, los avances tecnológicos siempre han tenido un gran impacto en la industria, no iba a ser de otra forma en el campo de los sensores ópticos.

Estos empezaron a desarrollarse desde 1970, donde comenzaron las primeras publicaciones científicas, desde entonces llevamos más de 50 años en su estudio. Esto se debe a la gran mejora de los componentes principales para el funcionamiento de un sensor, como pudieran ser, la fuente de luz, moduladores, receptores, etc. Además de la creación de componentes específicos para la mejora de los FOSs (Fiber optic sensor). [2]

Su crecimiento en la industria se debe a sus numerosas aplicaciones. En muchos entornos los FOSs se pueden considerar como la única solución aplicable, esto se debe a sus ventajas frente a los sensores convencionales, entre ellas destacan su compatibilidad con sistemas de comunicaciones de fibra óptica, interferencia electromagnética, seguridad en entornos peligrosos, bajo coste, alta sensibilidad y pequeño tamaño. [3]

El principio de funcionamiento de un sensor óptico se basa en la modulación de las propiedades de la luz: longitud de onda, intensidad, fase y polarización. Es decir, el sensor detectará los cambios en dichas propiedades, que se traducen en cambios en el entorno. Aunque el principio de funcionamiento parece sencillo, para poder realizar un buen diseño hay que entender la forma en la que el medio interactúa con el sensor, y como se ve afectada la propiedad o propiedades de la luz en la que nos vamos a fijar [4, p. 13]. Para detectar estos cambios, el sensor se compone de una fuente de luz, que inyectará la luz en la guía de onda óptica, esta guía llevará la luz hasta el modulador, es decir la parte sensible del FOS. Aquí se producirán los cambios en las propiedades de la luz, y finalmente esta señal pasará por un fotodetector. Después de todo este proceso podremos recoger y procesar los datos obtenidos del sensor, provenientes de una señal modulada debido a las perturbaciones del entorno. [2]

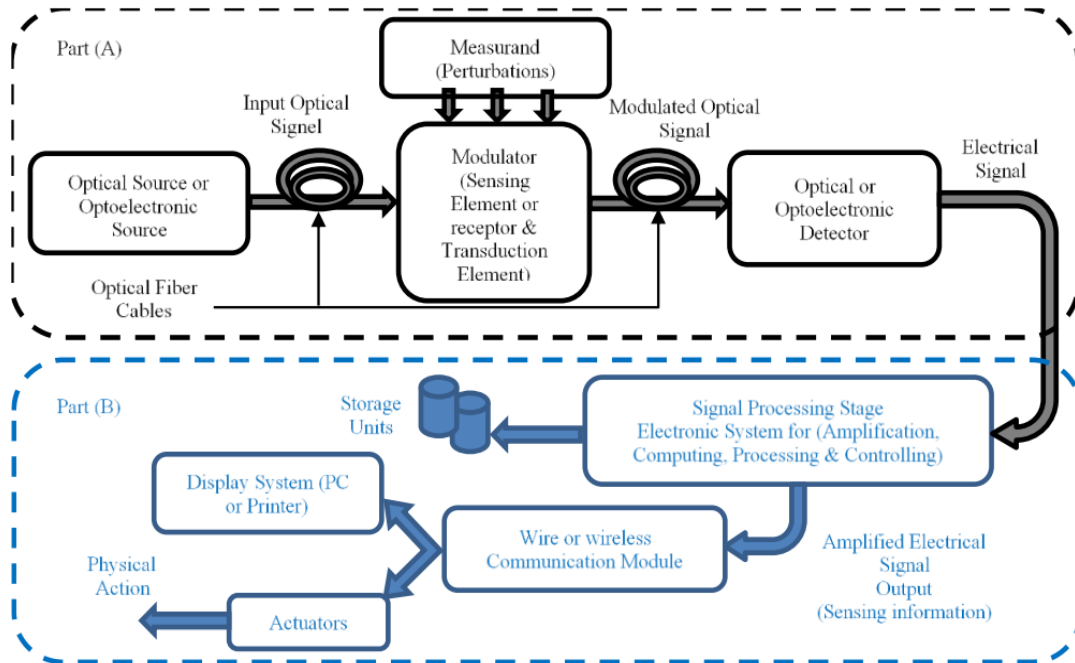


Figura 1: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR (PARTE A) INTEGRADO CON UN ÁPICE DE INTELIGENCIA (PARTE B) - FUENTE: [2]

b. Sensores MMI

Los sensores basados en interferencia multimodal han sufrido un gran auge en los últimos años. Este tipo de sensores llamados comúnmente sensores MMI basan su principio de funcionamiento en el fenómeno de la interferencia multimodal, producida por la interacción de los modos en una guía de onda, por eso es imprescindible usar una guía de onda multimodal como puede ser una fibra óptica multimodo (MMF).

Las principales estructuras de este tipo de sensores son las compuestas por fibra monomodo (SMF), fusionada con MMF, y finalmente SMF, estas estructuras reciben el nombre de single-mode-multi-mode-single-mode (SMS).

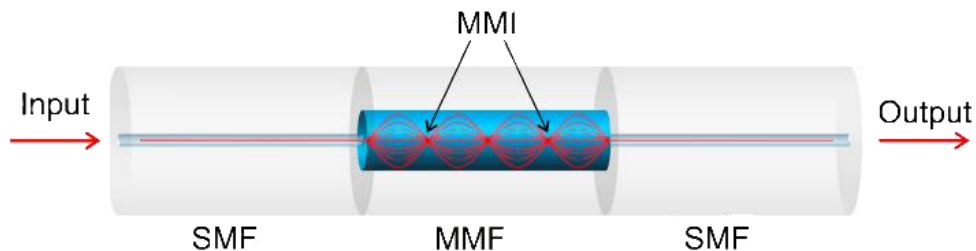


Figura 2: ESTRUCTURA TÍPICA DE UN SENSOR MMI - FUENTE: [5]

Como se aprecia en la figura 2, la parte MMF del sensor permite que los distintos modos que se crean sean soportados, además estos modos son estimulados y confinados como una solución del campo electromagnético, que en un principio fue la señal de entrada que proviene de la fibra monomodo. Esta señal interactúa con el entorno en forma de campo evanescente, de este modo, si el campo evanescente no se propaga hacia el exterior, el sensor no será capaz de detectar los cambios en el ambiente. [5]

La interferencia producida a lo largo de la fibra multimodo entre los distintos modos creados, da paso a la formación de autoimágenes de la señal de entrada a una distancia periódica. Por lo tanto, la longitud de la fibra multimodo debe ser determinada con gran precisión con la finalidad de obtener el punto correcto donde se espera la autoimagen a la salida de la fibra multimodo.

c. Sensores de curvatura

La medición de la curvatura es un tema de gran interés en la industria, ya que, es aplicable en muchos ámbitos, como por ejemplo en el campo de la ingeniería civil, industria automovilística, etc. [6]

Para medir la curvatura se puede hacer uso de sensores MMI porque, se ha demostrado experimentalmente que estos sensores son sensibles a este tipo de deformación física, además tienen una alta capacidad de detección de curvaturas de pequeño radio [7]. Para ello nos fijamos en los cambios que se producen tanto en longitud de onda como en intensidad. [5], [8]

Tampoco es estrictamente necesario usar un sensor MMI convencional, ya que dentro de estos hay muchos más, como sensores MMI con fibra multimodo sin núcleo (NCF), los cuales permiten tener mayor sensibilidad, que en muchos casos es necesaria.

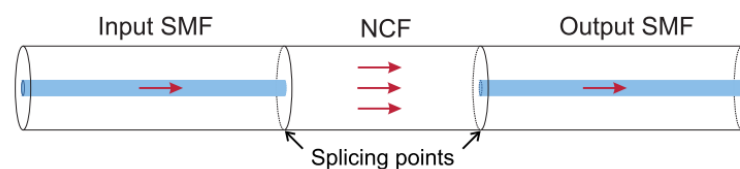


Figura 3: ESTRUCTURA TÍPICA DE UN SENSOR MMI CON NCF - FUENTE: [5]

También encontramos sensores con fibra estrechada (STMS), con ventajas como fácil fabricación y compactibilidad, que permite aumentar la sensibilidad a la hora de medir los cambios en el índice de refracción. [9]

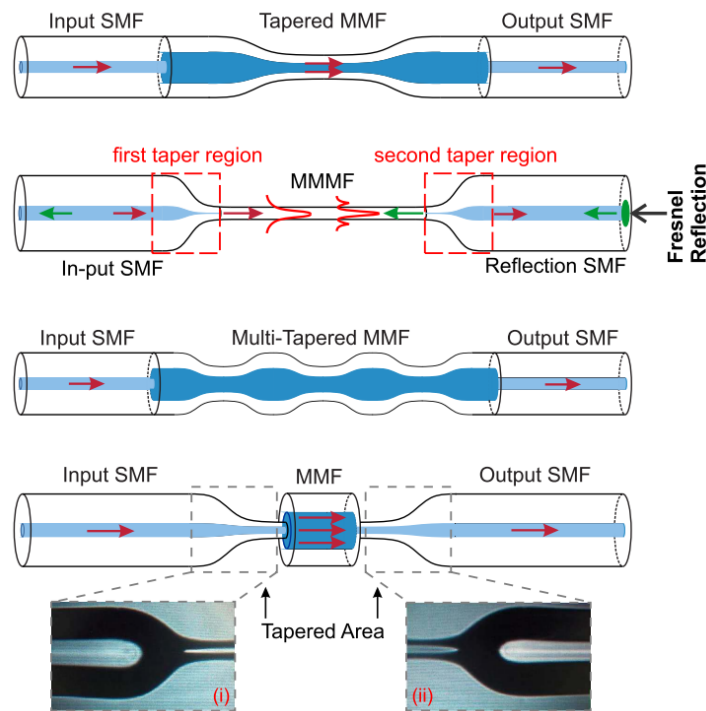


Figura 4: ESTRUCTURA TÍPICA DE UN SENSOR (STMS) - FUENTE: [5]

En este tipo de sensores, hay que tener mucho cuidado, ya que, para realizar mediciones de curvatura, la zona estirada no puede ser demasiado estrecha o se romperá con facilidad. [9]

d. Sensor MMI con rejilla de Bragg

Las rejillas de Bragg (FBG) han experimentado un crecimiento importante durante los últimos años que ha permitido realizar estructuras complejas de redes de comunicación y de sensores hechas con componentes solamente ópticos. [10]

Su uso en los FOSs sirve para recoger los datos obtenidos por el sensor en la señal reflejada. Dicha señal reflejada tendrá una longitud de onda determinada por la rejilla y además será un pulso más estrecho que el generado por la fuente de luz como se aprecia en la figura 5. Otra de sus principales ventajas es su estabilidad en longitud de onda. [11]



Figura 5: ESQUEMA DEL RECORRIDO DE UN PULSO - FUENTE: [10]

Adicionalmente, usar este tipo de tecnología en sensores de curvatura resulta idóneo porque es poco sensible a los cambios de temperatura, y eso lo hace flexible a la hora de su uso en entornos extremos. [11]

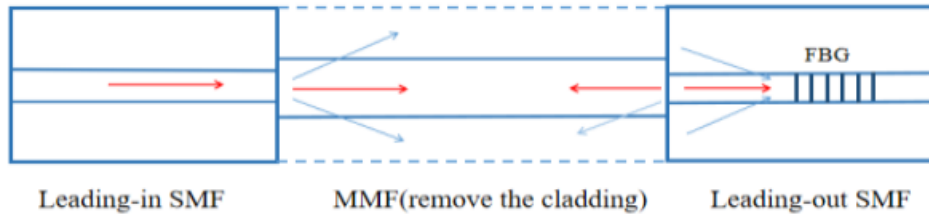


Figura 6: ESTRUCTURA DE UN SENSOR SMS CON FBG - FUENTE: [11]

e. Sensores con fusión asimétrica de fibra

La fusión asimétrica de fibra o escalón (CO) es una estructura prometedora en el campo de los sensores ópticos. Dicha estructura se aplica en los FOSs en caso de necesitar alta sensibilidad, ya que conseguimos separar fácilmente la señal de entrada en modos de núcleo y modos de cubierta, estos últimos interactuarán de forma más fácil y experimentalmente notable con los cambios externos. Así pues, es fácil ver los cambios producidos en los modos de cubierta en comparación a un sensor MMI convencional. [12] , [13]

Para lograr la sensibilidad necesaria, hay dos formas de aplicar la fusión asimétrica:

- Sensor con 1 escalón
- Sensor con 2 escalones

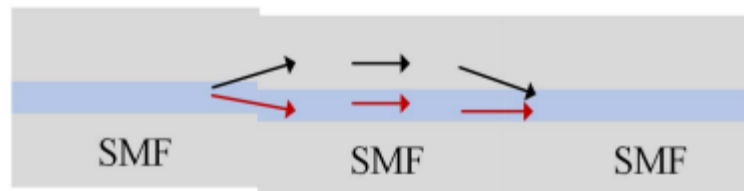


Figura 7: ESTRUCTURA DE UN SENSOR CON CO - FUENTE: [13]

En el caso de que se requiera muy alta sensibilidad se optará por un sensor con 2 escalones como el mostrado en la figura 8.



Figura 8: ESTRUCTURA DE UN SENSOR SMS CON 2 CO - FUENTE: [12]

4. METODOLOGÍA

a. Fabricación de los sensores y principio de operación

a.1) Interferencia multimodal y “core-offset”

En este estudio se hace uso de una fibra multimodo sin núcleo (MMF-NC), ya que al ser una guía de onda multimodo favorece la aparición del fenómeno de la interferencia multimodal. Al usar este principio de funcionamiento, sabemos que los modos de cubierta creados interactuarán con los cambios en el exterior en forma de campo evanescente [5], además induciendo la creación de 1 o 2 escalones al fusionar asimétricamente las diferentes fibras, permitimos que el campo evanescente se irradie mucho más hacia el exterior, obteniendo así más sensibilidad a los cambios.

Se aprecia en la figura 9 como la señal de entrada recorre el camino por la SMF, hasta llegar al escalón donde se crean modos de cubierta, además del modo del núcleo que seguirá su camino por la MMF-NC, los modos de cubierta mientras tanto recorren el camino por le exterior para después reacoplarse en el siguiente tramo de SMF.

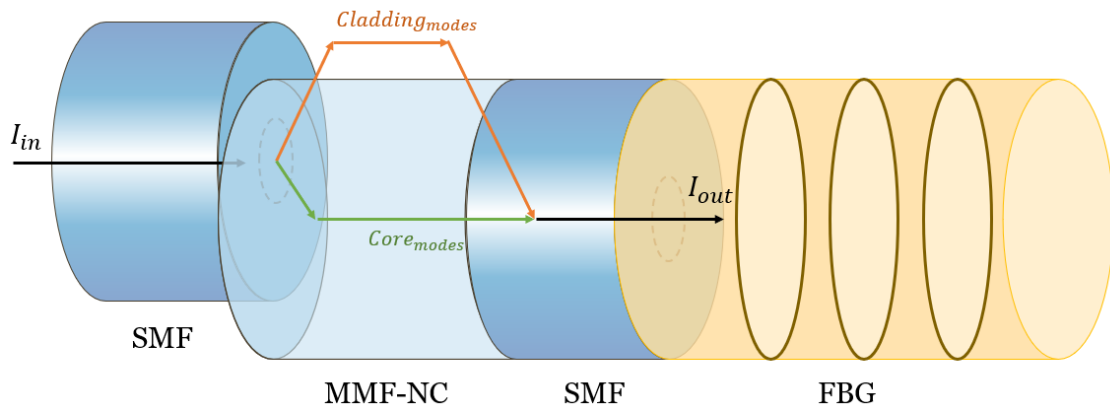


Figura 9: ESTRUCTURA DEL SENSOR PROPUESTO CON 1 ESCALÓN - FUENTE: PROPIA

a.2) Autoimagen 4ª ventana

Al usar el fenómeno MMI se crean periódicamente en la parte MMF-NC del sensor auto-imágenes del campo de entrada. Se sabe que para que este fenómeno de la generación de auto-imágenes ocurra, dicho tramo debe tener una longitud L dada en la fórmula (1).

$$L = \rho \left(\frac{3 L_{\pi}}{4} \right) \quad \text{con } \rho = 0,1,2... \quad (1)$$

Donde L_{π} está definida en la fórmula (2) y ρ corresponde al número de auto-imagen.

$$L_{\pi} \cong \frac{4 n_{MMF} D_{MMF}^2}{3 \lambda_0} \quad (2)$$

Siendo n_{MMF} y D_{MMF} , el índice de refracción efectivo y el diámetro del núcleo efectivo respectivamente, y λ_0 longitud de onda de trabajo. Para obtener al final de la MMF-NC una auto-imágen lo más parecida a la realidad y con pocas pérdidas, se usa la cuarta imagen ($\rho = 4$). [14]

Por lo tanto, en este trabajo al usar una fuente de luz con un rango espectral ancho se toma una longitud de onda media de trabajo de 1520 nm, el índice de refracción efectivo es de 1.33, el diámetro del núcleo efectivo de 125 μm y seleccionando la cuarta auto-imágen, obtenemos una longitud teórica del sensor en la parte MMF-NC de aproximadamente 5.57 cm.

a.3) Rejilla de Bragg

En este estudio se hace uso de una FBG a 1555 nm. Al estar situada al final del sensor nos permite medir en reflexión. Además, su utilización permite

estudiar el efecto que tienen los modos en ella cuando aplicamos curvatura en el sensor. Un ejemplo de las señales recibidas en reflexión se puede ver en la figura 10, donde la rejilla de Bragg se encuentra en 1557 nm, y se aprecia como esta se ve alterada con los cambios en la curvatura, al igual que los modos de cubierta.

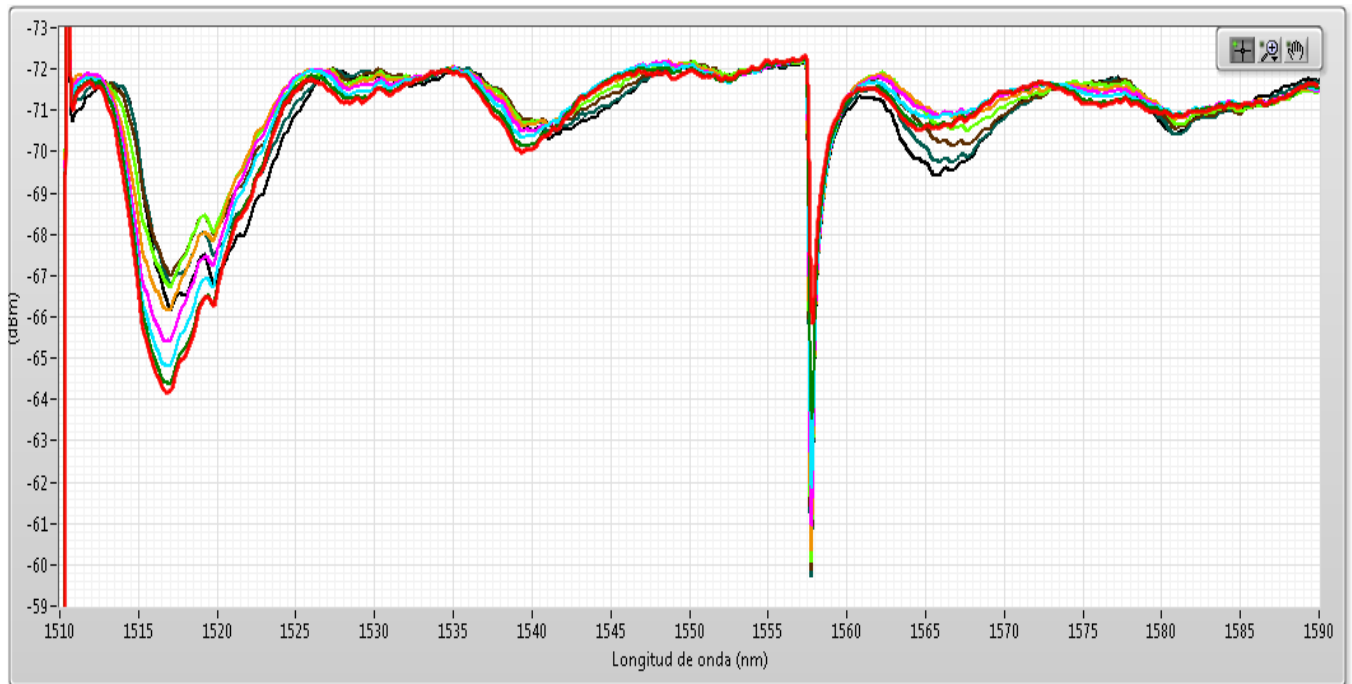


Figura 10: EJEMPLO DE SEÑAL OBTENIDA EN REFLEXIÓN - FUENTE: PROPIA

a.4) Fabricación

La fabricación para cada sensor que aquí se presenta es sencilla. La fibra monomodo estándar usada es de la marca ThorLabs, con diámetro exterior de 125 μm y diámetro interior de 9 μm , y la fibra multimodo sin núcleo (MMF-NC) también es de la misma marca, con diámetro de 125 μm .

Para empezar el proceso de fusión primero hay que desprender la cubierta de la fibra multimodo, una vez hecho esto, cortamos una sección de 5.57 cm y pasaríamos a fusionar. La fusión se hace con una fusionadora comercial de la marca Fujikura modelo 80S.

A continuación, se muestran las distintas configuraciones y procesos de fusión.

- Sensor MMI convencional: El procedimiento es sencillo, hay que ir fusionando las distintas partes que conforman el sensor, desde la fibra monomodo hasta la rejilla de Bragg.

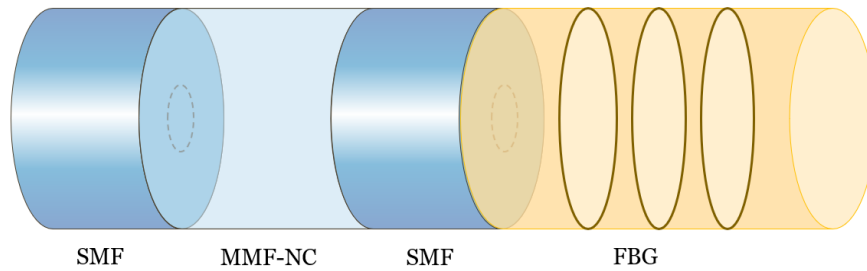


Figura 11: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI - FUENTE: PROPIA

- **Sensor MMI con escalón entre SMF y MMF-NC al 10%:** En este sensor inducimos un escalón entre la primera fibra monomodo y la multimodo sin núcleo, para ello la fusionadora se configura en modo manual. Este escalón es de $12.5\ \mu\text{m}$, el equivalente al 10% del diámetro total.

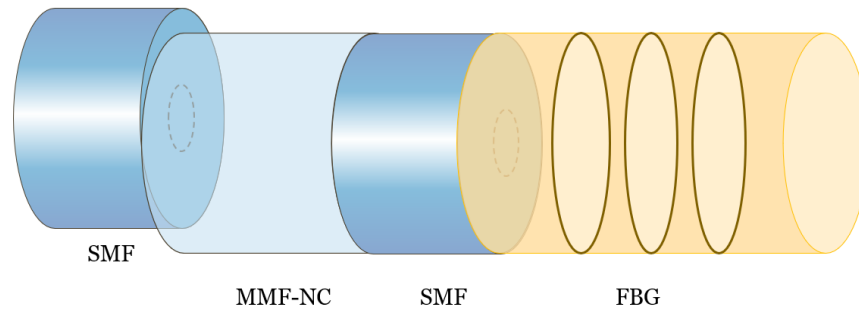


Figura 12: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 1 ESCALÓN AL 10% ENTRE SMF Y MMF-NC - FUENTE: PROPIA

- **Sensor MMI con escalón entre SMF y MMF-NC al 25%:** En esta configuración el proceso de fusión será igual que el anterior, pero el escalón será de $31,25\ \mu\text{m}$, el equivalente al 25% del diámetro.

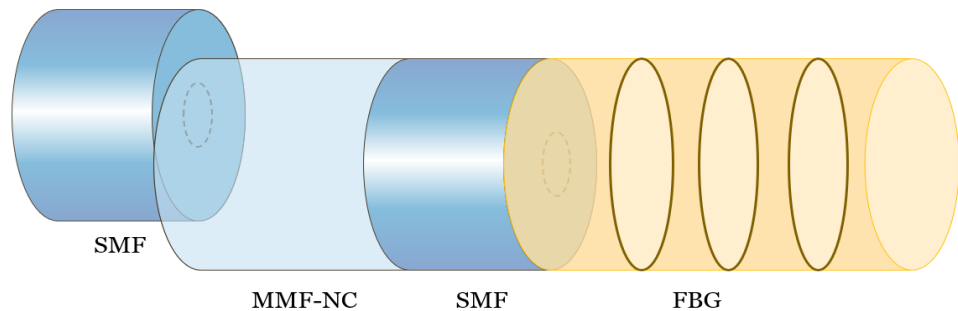


Figura 13: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 1 ESCALÓN AL 25% ENTRE SMF Y MMF-NC - FUENTE: PROPIA

- **Sensor MMI con escalón a ambos lados al 10%:** En este proceso hay que tener especial cuidado, ya que, al inducir 2 escalones, el sensor se vuelve más frágil. Los 2 escalones son de 12.5 μm .

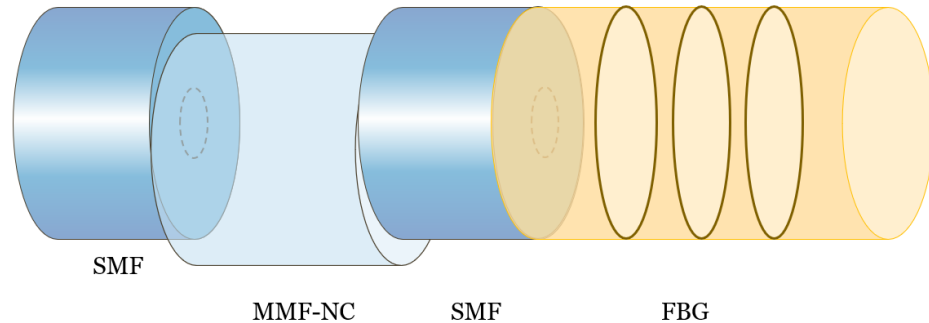


Figura 14: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 2 ESCALONES AL 10%
 - FUENTE: PROPIA

- **Sensor MMI con escalón a ambos lados al 25%:** Inducimos una fusión con 2 escalones de 31,25 μm .

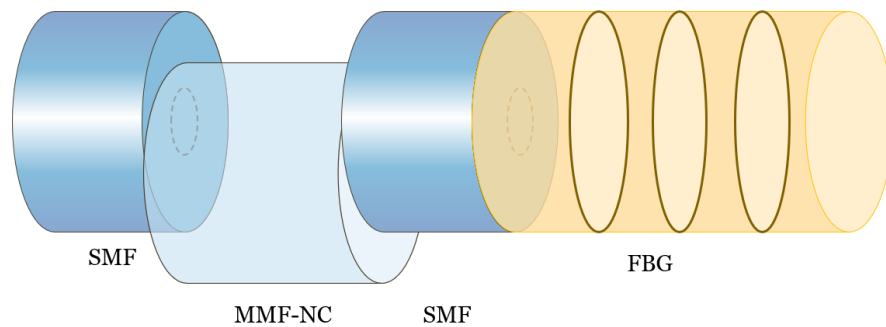


Figura 15: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 2 ESCALONES AL 25%
 - FUENTE: PROPIA

- **Sensor MMI con escalón entre MMF-NC y SMF al 10%:** Fusión con 12.5 μm de desfase entre las fibras.

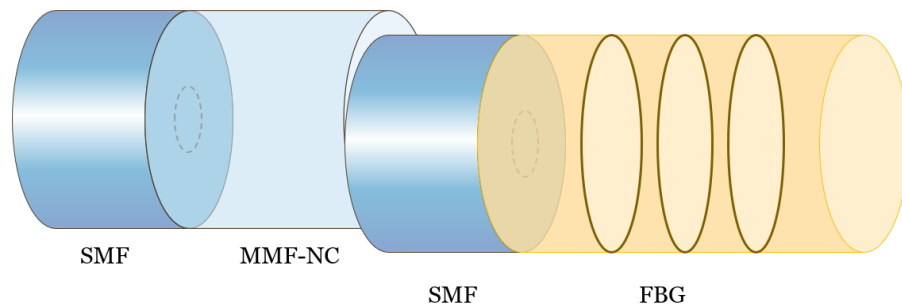


Figura 16: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 1 ESCALÓN AL 10% ENTRE MMF-NC Y SMF - FUENTE: PROPIA

- Sensor MMI con escalón entre MMF-NC y SMF al 25%: Desfase entre las fibras fusionadas de 31,25 μm .

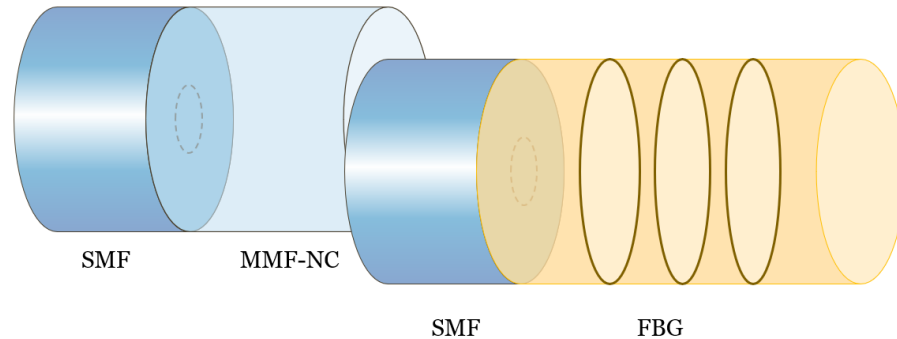


Figura 17: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SENSOR MMI CON 1 ESCALÓN AL 25% ENTRE MMF-NC Y SMF - FUENTE: PROPIA

b. Configuración experimental y resultados

La configuración experimental para la medida de la curvatura se muestra en la figura 17. Se usa el interrogador PXIe-4844, cuya fuente de luz emite con un rango espectral de 1510 a 1590 nm y recoge los datos del sensor a través de la plataforma LabView[®]. Las partes SMF del sensor se sujetan a la plataforma de desplazamiento horizontal, de tal forma que la parte correspondiente a la MMF-NC queda en medio para poder medir los cambios cuando aplicamos curvatura.

La distancia entre las plataformas L, es de 21 cm para el sensor MMI convencional, y de 23 cm para el resto de las configuraciones de los sensores. Para inducir la curvatura del sensor, la plataforma izquierda está fija y la derecha se desplazará X hacia la izquierda, en incrementos de 20 μm cada vez, en un rango de 0 a 160 μm . La curvatura se calcula de forma aproximada con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2h}{h^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (3)$$

Donde R es el radio de curvatura y h es el desplazamiento vertical.

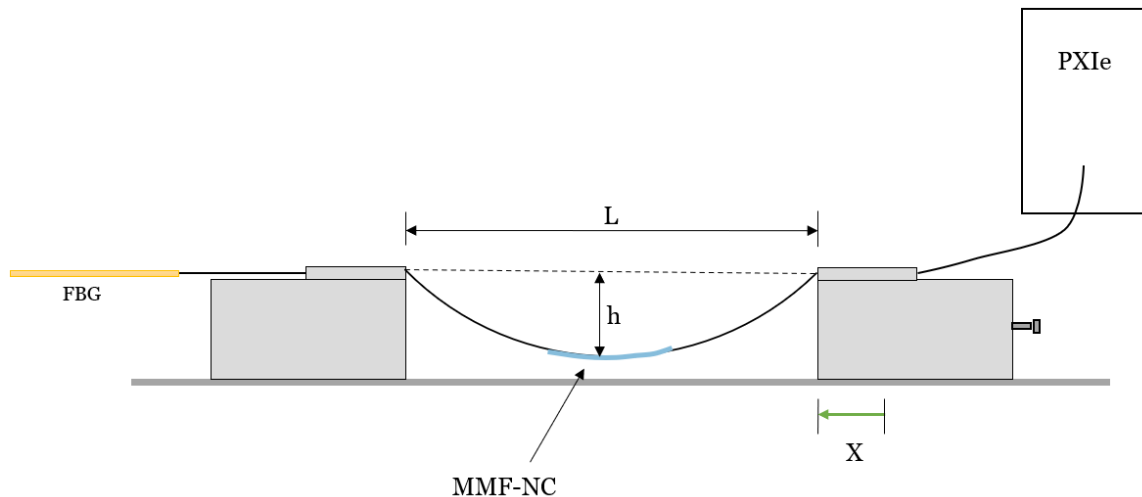


Figura 18: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL- FUENTE: PROPIA

Sabiendo la configuración experimental de todas las medidas del estudio, se procede a presentar los resultados de cada sensor y su configuración.

- Sensor MMI convencional: Esta configuración del sensor presenta tanto cambios en la potencia como en longitud de onda. Se aprecia en la figura 19 (a) como el pico 3, perteneciente a los modos de cubierta, fluctúa en potencia pero adquiere linealidad en el rango de curvatura de $0,8148 \text{ m}^{-1}$ a $1,7094 \text{ m}^{-1}$. En este rango se obtiene una sensibilidad de $1,0327 \text{ dBm/m}^{-1}$. En longitud de onda se aprecia en la figura 19 (b), que el rango lineal no es tan evidente como en potencia, pero aproximaremos la sensibilidad en el rango de curvatura de $1,1746$ a $1,9738 \text{ m}^{-1}$ a $-3,5830 \text{ nm/m}^{-1}$.

Respecto a los cambios en la rejilla de Bragg mostrados en la figura 19 (c) y (d), se ve como son simultáneos a los producidos en el pico 3, y no son tan estables como se esperaría. Pero podemos aproximar su sensibilidad en potencia y longitud de onda, en el rango de curvatura de $1,1746$ a $1,9738 \text{ m}^{-1}$ a $18,1153 \text{ dBm/m}^{-1}$ y $-0,1578 \text{ nm/m}^{-1}$ respectivamente.

Se comprueba así, que la rejilla de Bragg se ve afectada por los modos de cubierta.

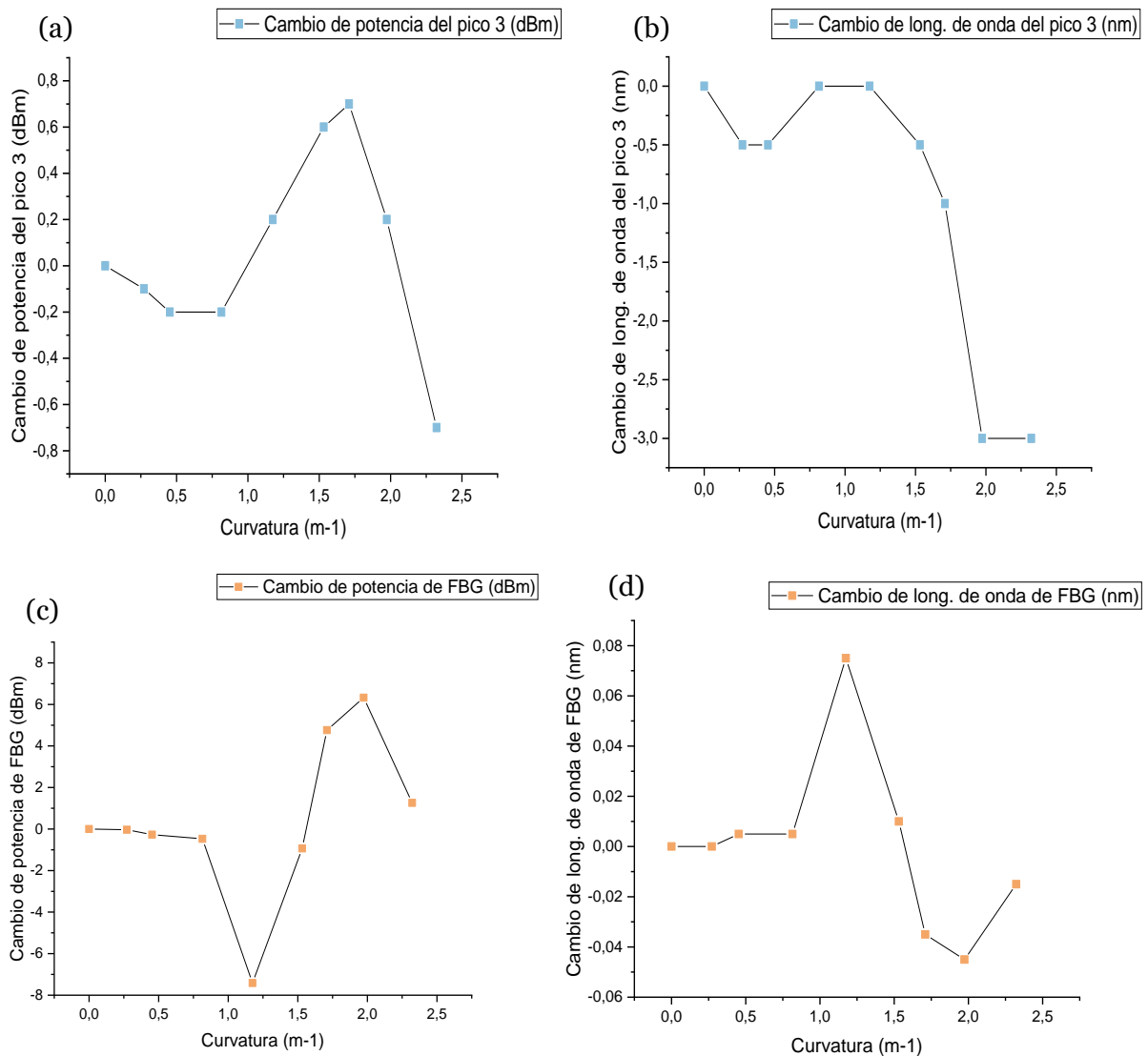


Figura 19: SENSOR MMI CONVENCIONAL. (a) CAMBIO EN POTENCIA DEL PICO 3. (b) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DEL PICO 3. (c) CAMBIO EN POTENCIA DE LA REJILLA DE BRAGG. (d) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DE LA REJILLA DE BRAGG. - FUENTE: PROPIA

- Sensor MMI con escalón entre SMF y MMF-NC al 10%: En esta configuración no se obtienen resultados concluyentes ya que se observa que hay cambios en potencia y longitud de onda, pero los modos de cubierta coinciden en frecuencia con la rejilla de Bragg de tal forma que no se puede estudiar los efectos de la curvatura en cada uno de ellos. Este fenómeno se observa también en el sensor con escalón al 10% entre MMF-NC y la FBG (Figura 15).
- Sensor MMI con 1 escalón entre MMF-NC y FBG al 25%: Como se puede apreciar en la figura 20 (a) el rango lineal de la sensibilidad en potencia se amplió en comparación al sensor MMI convencional. Obtenemos en un rango de curvatura de 1,2040 a 2,3737 m⁻¹ una sensibilidad de 2,2809

dBm/m⁻¹ del pico 1. En longitud de onda, la sensibilidad lineal del sensor en el pico 1, se obtiene en el rango de curvatura de 0,9049 a 1,7219 m⁻¹ siendo 4,0832 nm/m⁻¹.

En la FBG, figura 21 (c) y (d), se observa linealidad a partir de la tercera muestra, tanto en potencia como en longitud de onda, y la sensibilidad obtenida es -8,8838 dBm/m⁻¹ y 0,0853 nm/m⁻¹ respectivamente.

El comportamiento de este sensor se repite también para el presentado en la figura 13.

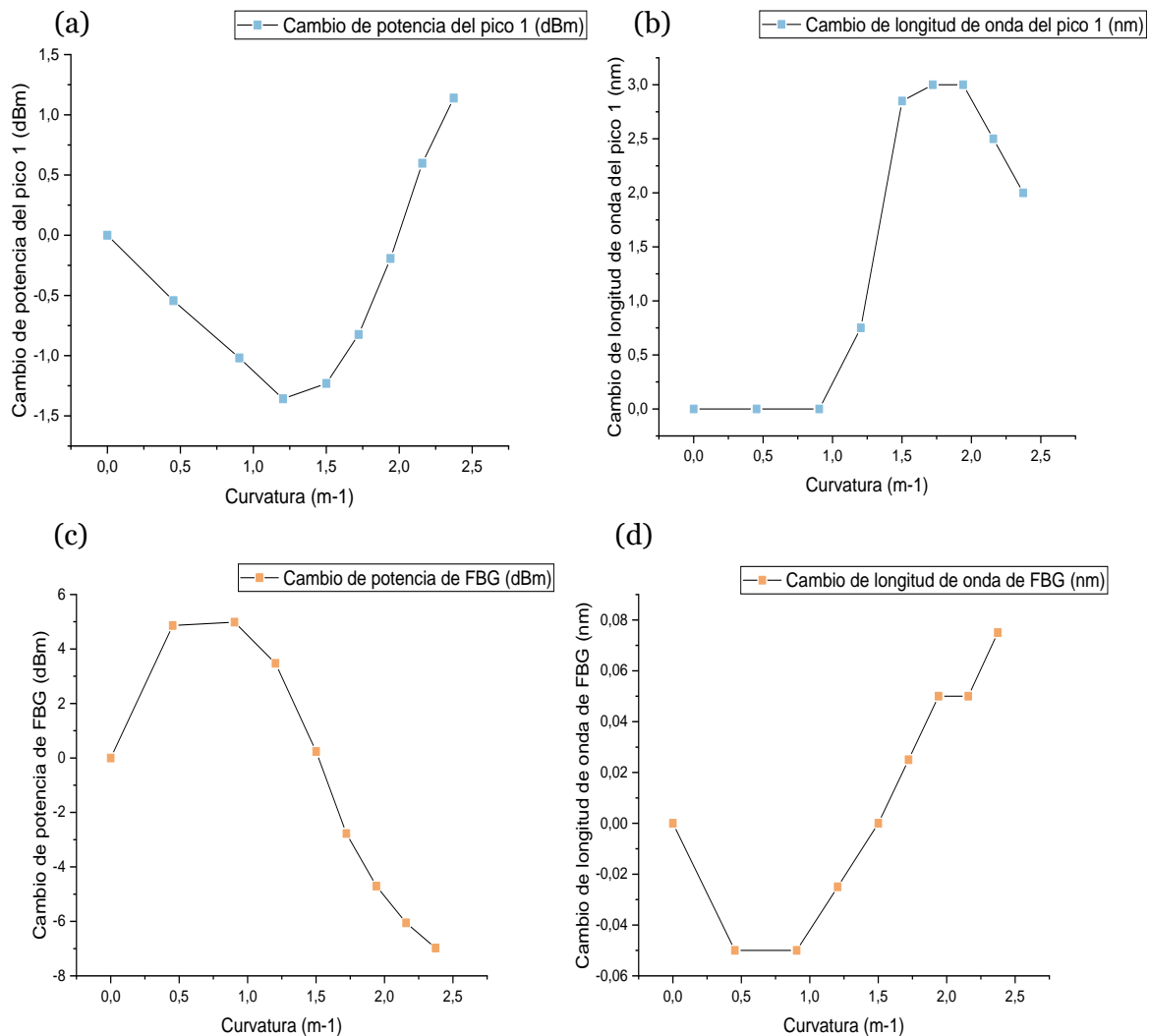


Figura 20: SENSOR MMI CON ESCALÓN AL 25%. (a) CAMBIO EN POTENCIA DEL PICO 1. (b) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DEL PICO 1. (c) CAMBIO EN POTENCIA DE LA REJILLA DE BRAGG. (d) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DE LA REJILLA DE BRAGG. - FUENTE: PROPIA

- Sensor MMI con 2 escalones al 10%: En esta configuración se puede ver como el rango lineal en potencia sigue la línea de tendencia mostrada en la

figura 22 (a), por lo que abarca todas las muestras del experimento, mostrando así una sensibilidad de $-0,8830 \text{ dBm/m}^{-1}$. En longitud de onda el rango de curvatura inicia en $0,6042$ hasta $1,5009 \text{ m}^{-1}$ y la sensibilidad aproximada será de $0,9779 \text{ nm/m}^{-1}$.

En la FBG se observa que la tendencia de las gráficas es en forma de potencia, como se ve en la figura 23 (a) y (b), por lo tanto, la sensibilidad del sensor será de $-2,8179 \text{ dBm}/(\text{m}^{-1})^{3,1704}$ y $0,0353 \text{ dBm}/(\text{m}^{-1})^{2,5145}$ para la potencia y longitud de onda respectivamente.

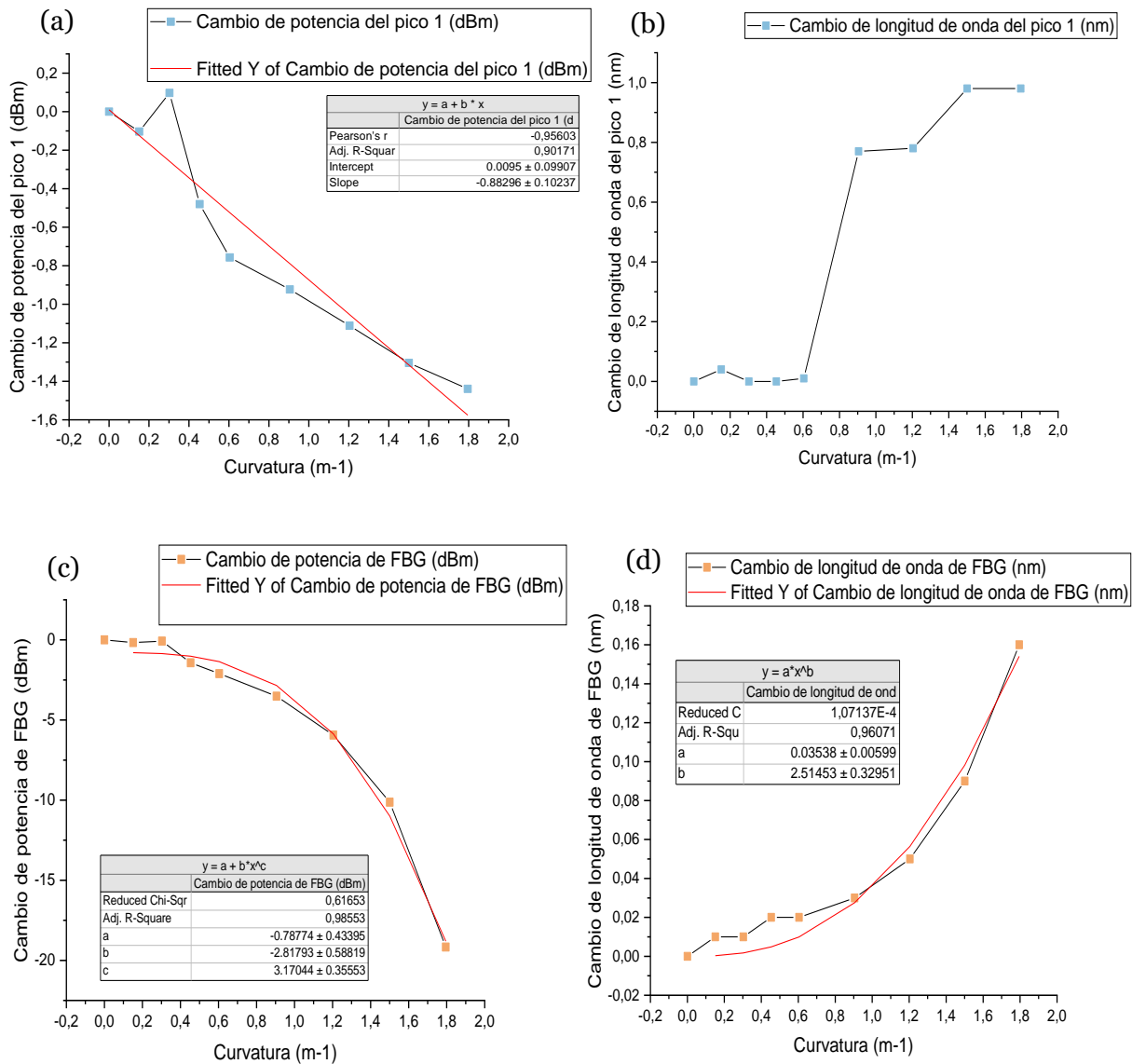


Figura 21: SENSOR MMI CON 2 ESCALONES AL 10%. (a) CAMBIO EN POTENCIA DEL PICO 1. (b) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DEL PICO 1. (c) CAMBIO EN POTENCIA DE LA REJILLA DE BRAGG. (d) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DE LA REJILLA DE BRAGG. - FUENTE: PROPIA

- Sensor MMI con 2 escalones entre al 25%: En esta configuración los cambios de potencia en el pico 1 adquieren un rango lineal desde la primera muestra de curvatura siendo esta el 0, hasta $2,3737 \text{ m}^{-1}$ con una sensibilidad reportada de $-1,1791 \text{ dBm/m}^{-1}$. Por otra parte, los cambios en longitud de onda no siguen ninguna tendencia.

En la rejilla de Bragg los cambios producidos en la potencia se ven modelados por la siguiente fórmula $y = \ln(-12,17889 + 146,74818 \cdot x)$. En el caso de la longitud de onda, su tendencia es en forma de potencia, y la función que sigue es $y = -0,01995 \cdot x^{0,39978}$ y entonces se puede estimar su sensibilidad a $-0,01995 \text{ nm}/(\text{m}^{-1})^{0,39978}$.

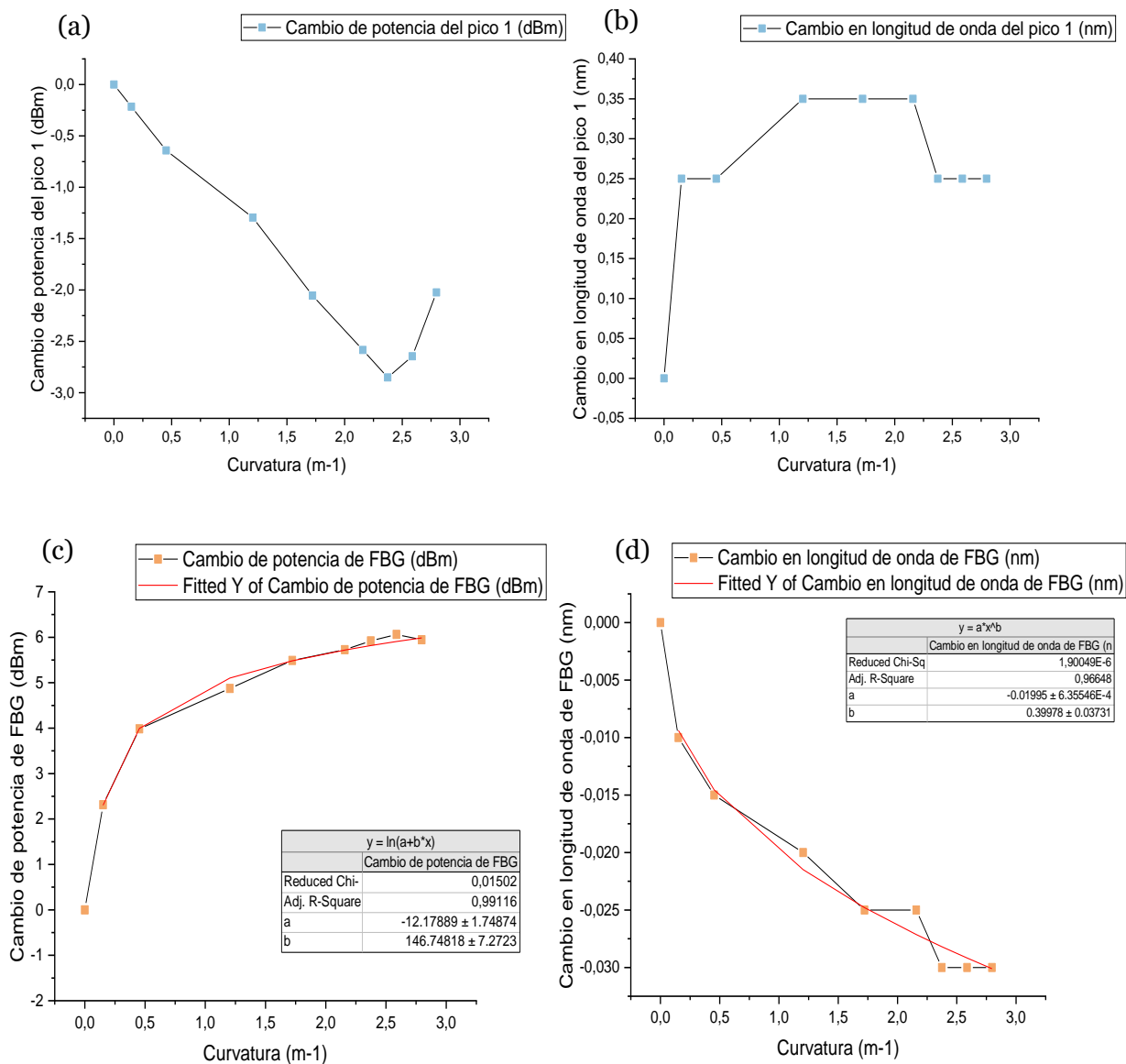


Figura 22: SENSOR MMI CON 2 ESCALONES AL 25%. (a) CAMBIO EN POTENCIA DEL PICO 1. (b) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DEL PICO 1. (c) CAMBIO EN POTENCIA DE LA REJILLA DE BRAGG. (d) CAMBIO EN LONGITUD DE ONDA DE LA REJILLA DE BRAGG. - FUENTE: PROPIA

5. CONCLUSIONES

Habiendo observado y analizado los resultados de los distintos experimentos con las diferentes configuraciones de sensores, se puede concluir que cuanto más inducimos los modos de cubierta, realizando escalones en la estructura del sensor, todos los resultados muestran más tendencia a una determinada expresión (lineal, potencial o logarítmica), y no sólo parte de las muestras como pasa en el sensor MMI convencional con rejilla de Bragg.

Además, se ve claramente como la rejilla de Bragg es afectada por los distintos modos que se propagan y se reacoplan puesto que, aunque es muy estable en frecuencia, la potencia sí se ve afectada. Por lo dicho, su uso nos aporta una gran ventaja y es que los cambios de potencia se ven muy claros. Además, de que nos permite tener una referencia a la hora de analizar el espectro en reflexión.

Las ventajas de esta investigación se resumen claramente en:

- La aplicación de sensores capaces de detectar cambios de curvatura muy pequeños en la industria.
- Fácil fabricación y bajo coste.
- Nuevas configuraciones de sensores MMI.

6. LÍNEAS FUTURAS

Próximamente se quiere ampliar el estudio de estos sensores induciendo en la parte MMF-NC un estiramiento de la fibra y estudiando los resultados y nuevas ventajas que pueda aportar.

7. REFERENCIAS

- [1] S. E. Sías, L. V. Jiménez, C. E. González, R. Domínguez-Cruz, y M. J. E. Betrán, «Interrogador Óptico Aplicado al Sensado Remoto de Líquidos incorporando Efectos MMI en fibras», p. 6.
- [2] M. M. A. Eid, «Optical fiber sensors: review of technology and applications», *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 25, n.º 2, Art. n.º 2, feb. 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v25.i2.pp1038-1046.
- [3] W. Lin, C. Zhang, L. Li, y S. Liang, «Review on Development and Applications of Fiber-Optic Sensors», en *2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics*, may 2012, pp. 1-4. doi: 10.1109/SOPO.2012.6270996.

- [4] «[PDF] Handbook of Optical Sensors by Jose Luis Santos | Perlego». https://www.perlego.com/book/1509659/handbook-of-optical-sensors-pdf?utm_source=google&utm_medium=cpc&campaignid=15913701111&adgroupid=131883401269&gclid=CjoKCQjwma6TBhDIARIsAOKuANw75AwXL7cUypFfw-RxNv-wFq6Ho8TXqtOG5UqV4ZHdotNhAnlNfBcaAnRPEALw_wcB (accedido 29 de abril de 2022).
- [5] K. Wang *et al.*, «Advances in Optical Fiber Sensors Based on Multimode Interference (MMI): A Review», *IEEE Sens. J.*, vol. 21, n.º 1, pp. 132-142, ene. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3015086.
- [6] M. Cano-Contreras *et al.*, «All-Fiber Curvature Sensor Based on an Abrupt Tapered Fiber and a Fabry–Pérot Interferometer», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, n.º 22, pp. 2213-2216, nov. 2014, doi: 10.1109/LPT.2014.2349979.
- [7] Y. Gong, T. Zhao, Y.-J. Rao, y Y. Wu, «All-Fiber Curvature Sensor Based on Multimode Interference», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, n.º 11, pp. 679-681, jun. 2011, doi: 10.1109/LPT.2011.2123086.
- [8] Wenjun Zhou, Yan Zhou, Xinyong Dong, Li-Yang Shao, Jia Cheng, y J. Albert, «Fiber-Optic Curvature Sensor Based on Cladding-Mode Bragg Grating Excited by Fiber Multimode Interferometer», *IEEE Photonics J.*, vol. 4, n.º 3, pp. 1051-1057, jun. 2012, doi: 10.1109/JPHOT.2012.2202895.
- [9] B. Yang *et al.*, «High Sensitivity Curvature Sensor with Intensity Demodulation Based on Singlemode-Tapered Multimode-Singlemode Fiber», *IEEE Sens. J.*, pp. 1-1, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2782241.
- [10] Y. Zhu, H. Qi, y G. Wang, «Temperature characteristic of fiber Bragg grating», en *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Harbin, Heilongjiang, China, ago. 2011, pp. 4020-4022. doi: 10.1109/EMEIT.2011.6023934.
- [11] S. Han, F. Wang, S. Ni, Y. Shen, y S. You, «Optical fiber relative humidity sensor based on FBG embedded in SMS fiber structure», en *2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, ago. 2019, pp. 1-3. doi: 10.1109/ICOON.2019.8934134.
- [12] C. Gouveia, P. A. S. Jorge, J. M. Baptista, y O. Frazao, «Temperature-Independent Curvature Sensor Using FBG Cladding Modes Based on a Core Misaligned Splice», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, n.º 12, pp. 804-806, jun. 2011, doi: 10.1109/LPT.2011.2138125.
- [13] H. Niu *et al.*, «Optical Fiber Sensors Based on Core-Offset Structure: A Review», *IEEE Sens. J.*, vol. 21, n.º 20, pp. 22388-22401, oct. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3110852.
- [14] D. A. Piña-Azamar, L. V. Jiménez, S. E. Sías, R. Domínguez, G. Romero-Galván, y M. J. E. Betrán, «Estructuras de fibra óptica en configuración fuera de eje para la detección de salinidad», p. 7.