

DETECCIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS A BAJAS FRECUENCIAS BASADAS EN ESTRUCTURAS DE FIBRA ÓPTICA

DETECTION OF LOW FREQUENCY ACOUSTIC WAVES BASED ON FIBER OPTIC STRUCTURES

Olga Lidia Zamora Bautista

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
olgalidia.zamora@gmail.com

Flora García García

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
floragarciax91@hotmail.com

Gerardo Duran Martínez

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
gera.duran.mz@gmail.com

René Domínguez Cruz

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

Gerardo Romero Galván

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
gromero@uat.edu.mx

Recepción: 5/noviembre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

En este trabajo se presenta la construcción de un sistema basado en fibra óptica y su prueba en la detección de ondas acústicas a bajas frecuencias. Dicho arreglo consiste en una estructura formada por un segmento de fibra multimodo (MMF) sin recubrimiento unida en sus extremos a otras dos de fibra estándar (SMF), en el cual se hace propagar una señal óptica proveniente de un diodo láser superluminiscente. Este arreglo fue suspendido en el aire y al cual se le sometió a la acción de un tren de ondas acústicas de baja frecuencia en un rango de 10 a 100 Hz. La interacción de dicho tren con la estructura en fibra permite que el acoplamiento de modos dentro del segmento MMF se perturbe, logrando que aparezca una variación de tipo

sinusoidal en la señal transmitida. Se observa además que la amplitud de esta variación se atenúa a una razón exponencial conforme la frecuencia de incrementa, estimando un tiempo característico de 14.215 s. Este hecho permite sugerir a este sistema como una herramienta indirecta en la detección de las señales acústicas a baja frecuencia. La importancia de detectar este tipo de señales es atractiva en muchos campos debido a sus aplicaciones como lo es en la industria eléctrica, pruebas de materiales, ingeniería civil, la industria aeroespacial y procesamiento de metales entre otros.

Palabras Claves: Diodo laser superluminiscente, fibra óptica, fibra multimodo, fibra estándar, ondas acústicas.

Abstract

In this paper we present the construction of a system based on optical fiber and their testing for detection of acoustic waves at low frequencies. The system consists of a structure formed by a segment of multimode fiber (MMF), without a coating embedded at its ends to two others of standard fiber (SMF), in which an optical signal is propagated from a superluminescent laser diode. This SMF-MMF-SMF element was suspended in the air and. This array was suspended in the air and a train of low frequency acoustic waves interact with this structure in a range of 10 to 100 Hz. The interaction of this wave train with the fiber structure allows the optical coupling of modes within the MMF segment to be disturbed, leading a sinusoidal variation in the transmitted signal. We observe the amplitude of this variation is attenuated to an exponential ratio as the frequency is increasing, with a characteristic rate around 14.215 Hz^{-1} . This fact suggests that our system could be consider as an indirect tool in the detection of acoustic signals at low frequency. The importance of detecting this type of signals is attractive in many fields due to its applications such as in the electrical industry, material testing, civil engineering, the aerospace industry and metal processing among others.

Keywords: *acoustic waves, fiber optic, multimode fiber, standard fiber, superluminescent laser diode.*

1. Introducción

En una era donde los rigurosos requisitos de seguridad impulsan la demanda de equipos de monitoreo resistentes y confiables, los sensores de fibra óptica (SFO) han asumido un papel preponderante como alternativas importantes a las opciones eléctricas convencionales. Su facilidad de integración y ligereza combinada con alta sensibilidad, la solidez y la inmunidad al ruido eléctrico han permitido que los SFO en las últimas décadas encabecen la vanguardia de la investigación científica. Esto dio lugar a la aparición de un gran abanico de soluciones para detectar cantidades físicas variadas tales como longitud, temperatura, presión o salinidad, etc. [Ha, 2012]. En particular, en el campo de la detección acústica se han utilizado fibras ópticas para la investigación, con el fin de desarrollar instrumentos precisos para el seguimiento de procesos de degradación en estructuras a gran escala, incluidos edificios, puentes y aviones [Wild, 2008].

Concretamente, la medición de las ondas acústicas permite describir y cuantificar el sonido a partir de su propagación. A través de estas mediciones se obtienen lecturas que ayudan a identificar cuando una onda acústica puede provocar daños tanto en el medio ambiente como en el ser humano, así como anticipar cualquier situación de riesgo. Como ejemplo, en la rama de la geología y sismología son importantes estas mediciones para comprender, analizar y detectar el comportamiento de la propagación de ondas a través de los movimientos de las placas tectónicas de nuestro planeta [Martínez, 2017], [Michaud, 2009]. No solo ello, la detección de señales acústicas y vibratorias posee importancia en aplicaciones directas en diversas áreas, como el monitoreo estructural, la salud, la bioimagen, la navegación y la industria aeroespacial [Byoung, 2003].

De manera general, existen diferentes técnicas para la medición de ondas acústicas tales como instrumentos para medir el ruido, algunos ejemplos son, el sonómetro utilizado para medir los niveles de presión sonora, en un determinado lugar y momento. Analizador de frecuencias, el cual representa los componentes espectrales de una señal, estos cuentan con sensores para señales acústicas o eléctricas. Adicionalmente, el dosímetro, es usado para calcular el ruido a la que una persona está sometida, es práctico y permite medir todo tipo de ruidos. Por otro

lado, tenemos el decibelímetro instrumento que permite medir el nivel de presión acústica, expresado en dB, proporcionando mediciones objetivas y reproducibles del nivel de presión acústica [Millan, 2012]. Sin embargo, el inconveniente de este tipo de dispositivos es la limitación de trabajo en cuanto a los diferentes tipos de ambiente de acuerdo con los entornos, como lo son: la humedad, la corrosión, los gases, los choques eléctricos producidos por los campos electromagnéticos debido al uso de electricidad por mencionar algunos, en cambio la fibra óptica no se limita a funcionar en ambientes normales [Mejía, 2013], [Byounggho, 2003].

En cuanto a técnicas basadas en fibras ópticas, se han reportado algunas propuestas para la detección de ondas acústicas. Actualmente, se pueden encontrar numerosos trabajos en este campo, empleando algunas configuraciones interferométricas como Mach-Zehnder [Hernández, 2013], Michelson [Hong, 2011], Sagnac [Rivera, 2013] y Fabry-Pérot [Lima, 2009], mientras que otras exploran las posibilidades ofrecidas por sensores de rejilla Bragg en fibra (FBG) [Wada, 2012]. Sin embargo, las limitantes de estos componentes es el rango de detección, la baja sensibilidad, alta inestabilidad, el alto costo que implica su fabricación o bien los componentes requeridos.

En este trabajo se presenta un sistema de detección alterna de ondas acústicas de baja frecuencia fabricado con fibra multimodo (MMF) sin recubrimiento empalmado a dos segmentos estándar de fibra monomodo o estándar (SMF). Este arreglo de fácil construcción permite la interferencia multimodal a lo largo del tramo MMF, operando como un filtro. El sistema es perturbado por medio de un tren de ondas acústicas. La interacción de dicho tren con la estructura en fibra permite que el acoplamiento de modos dentro del segmento MMF se perturbe y se induzca en él una variación de tipo sinusoidal. Dicha amplitud de esta variación se atenúa respecto a la frecuencia externa aplicada, hecho que se interpreta como la detección del frente de onda acústico.

2. Métodos

A continuación, se describe los elementos teóricos en los que se basa este trabajo. La técnica de Interferencia Multimodal (MMI) en fibras se apoya en el

principio fundamental denominado generación de autoimágenes, el cual es un fenómeno propio de las guías de onda integradas, en donde el perfil del campo de entrada se replica en intervalos periódicos a lo largo de la dirección de la propagación de la propia guía de onda. La autogeneración de la imagen se debe a las interferencias constructivas y destructivas que se presentan a lo largo de la propia guía de onda [Soldano, 1995]. Lo anterior se aprecia mediante el análisis de la propagación modal en guías ondas planas.

En la figura 1 se muestra la estructura típica SMF-MMF-SMF, en el cual el perfil de entrada se producirá en la interfaz entre la guía de onda monomodo y la guía de onda multimodo. Esta onda se replicará en la interfaz y de manera periódica a lo largo del segmento MMF. Si dicho segmento MMF posee la longitud correcta, el campo de entrada original se replicará justo en la entrada del segundo segmento SMF.

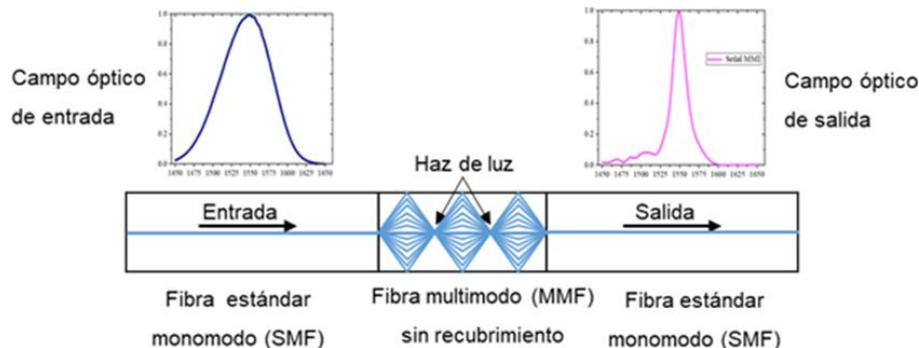


Figura 1 Estructura típica SMF-MMF-SMF para la generación de interferencia multimodal.

La sección de fibra multimodo puede transportar múltiples modos de propagación, por lo que un campo de entrada acoplado a la sección MMF puede ser reproducido en una sola o múltiples autoimágenes en un intervalo periódico a lo largo de la propia MMF. Con el objetivo de obtener una sola imagen, la diferencia de la fase entre todos los modos de propagación deben ser un número entero que sea un múltiplo de 2π , por consiguiente, todos los modos pueden interferir en la fase y en la forma en el que el campo de entrada puede ser reproducido.

La longitud del segmento de la fibra MMF en que se formaran las autoimágenes está dada por ecuación 1 [Soldano, 1995].

$$L = p \left(\frac{3L_{\Pi}}{4} \right), \quad P = 0,1,2, \dots \quad (1)$$

Donde L_{Π} es la longitud del barrido, la cual se expresa por ecuación 2.

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

Siendo n_{MMF} y D_{MMF} los correspondientes índices de refracción y el diámetro del núcleo de la sección MMF, respectivamente; λ_0 representa la longitud de onda específica a la que se desea establecer la estructura SMF-MMF-SMF y p corresponde a él orden de la autoimagen que se desea reproducir [Soldano, 1995], [Mejía, 2013]. Como se aprecia, este elemento de fibra dispone de la característica de que sólo una longitud de onda λ_0 es la que satisface la condición establecida en la ecuación 1, por lo que si se tiene un amplio espectro de entrada del sistema MMI (ver perfil del campo óptico de entrada, figura 1), sólo una parte de él se transmitirá (ver perfil del campo óptico de salida, figura 1). Dicho de otro modo, el arreglo SMF-MMF-SMF opera como si se tratase de un filtro ajustado a la longitud de onda λ_0 , cuya característica ha sido ampliamente propuesta y desarrollada como dispositivo sensor en otras aplicaciones [Soldano, 1995], [Mejía, 2013].

3. Resultados

Fabricación del Elemento Sensor

Como primer paso, se procedió con la construcción del elemento sensor de ondas acústicas. Para ello, se siguió una estructura tipo SMF-MMF-SMF descrita previamente en la figura 1, empleando dos segmentos de fibra estándar modelo SMF-28 de 30 cm de longitud cada uno, así como otro segmento de fibra multimodo sin revestimiento modelo NC-MMF-125. Dichas fibras pertenecen a la marca comercial Thorlabs. Para que el esquema citado funcione como filtro, se requiere que la longitud del segmento NC-MMF sea cortado con una longitud tal que permita la transmisión a una longitud de onda λ_0 deseada.

Para determinar la longitud de este último segmento, se consideró una longitud de onda de operación de $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$, un índice de refracción efectivo de $n_{MMF} =$

1.444 y un diámetro efectivo $D_{MMF} = 125 \mu m$. Con estos parámetros de diseño y utilizando la ecuación 1, se obtuvo que la longitud del segmento de fibra MMF es de $L = 5.58 cm$. La estructura mencionada fue elaborada con una cortadora de precisión modelo CT-30 y unidas en sus extremos mediante una empalmadora de fusión 70-S, ambas de la marca Fujikura. Los extremos finales del dispositivo fabricado fueron unidos a su vez por cables de fibra tipo pigtail provistos con conectores FC/PC para su fácil conexión con otros componentes.

Una vez realizado el dispositivo, se conectó en uno de los extremos hacia una fuente de luz superluminiscente (SLD) Marca Thorlabs con un ancho espectral que va de los 1420 nm a los 1640 nm. Posteriormente, el segundo extremo del elemento MMI fue conectado a un analizador de espectros ópticos (OSA, Marca Anritsu modelo MS9740A) para recolectar la señal transmitida por el dispositivo, tal y como se muestra en la figura 2. El espectro de la fuente y la señal transmitida por el elemento MMI son mostrados en la figura 3.

Como se observa en la figura 3, se muestra el ancho de banda del campo de entrada (línea negra). De dicho campo, sólo una parte del espectro es el que transmite a través del elemento formado SMF-MMF-SMF (línea roja), debido a que sólo una longitud de onda satisface la ecuación 1. Como se indicó al final de la sección anterior, el sistema MMI construido opera como un filtro selectivo de acuerdo con los parámetros físicos de diseño indicados.

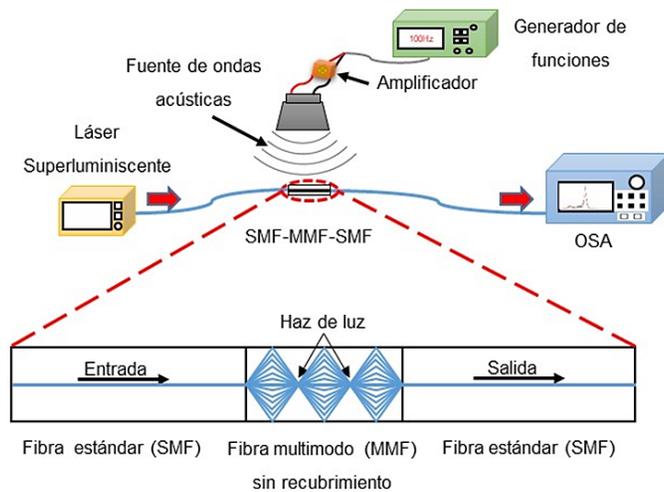


Figura 2 Arreglo experimental implementado para medición de ondas acústicas.

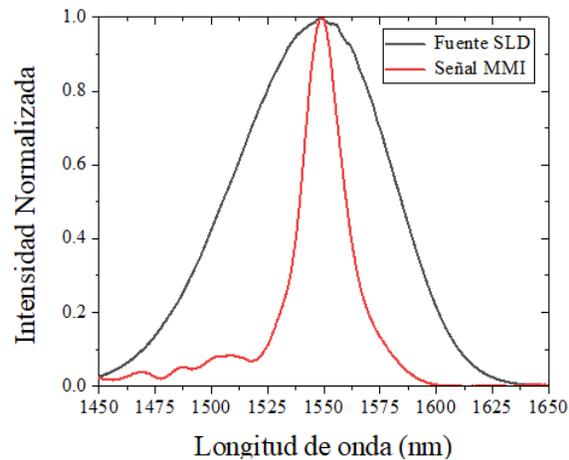


Figura 3 Espectros de la fuente de radiación láser y de la estructura MMI.

Prueba del Elemento Sensor

La siguiente etapa posterior a la fabricación del dispositivo sensor, fue probarlo en un sistema para la detección de señales acústicas. Para ello, se colocó una fuente de ondas acústicas de manera transversal a la estructura MMI a sólo 2 mm de distancia del arreglo de fibra construido (ver parte superior de figura 2). Esta fuente de ondas acústicas se implementó con tres componentes principales: un generador de funciones digital de la marca Tektronix, una etapa de amplificación y un altavoz. Para la etapa de amplificación de potencia, se empleó un circuito integrado TDA2005A el cual es un dispositivo electrónico utilizado en aplicaciones convencionales de sonido estéreo. El dispositivo puede operar con un potencial eléctrico de carga de hasta 18 V como máximo y un mínimo de 8 V. Cuenta además con una ganancia de potencial eléctrico de retroalimentación de 50 dB a 1 kHz de frecuencia en condiciones de prueba. El circuito amplificador de potencia esta alimentado con una fuente de voltaje directo de 12 V y cuenta además con 7 condensadores electrolíticos: 2 de 100 μ F, 2 de 220 μ F, 2 de 2.2 μ F y 1 de 10 μ F. Dichos condensadores electrolíticos son utilizados como filtros de alimentadores de corriente, donde se usan para almacenar la carga, moderar el potencial eléctrico de salida y las fluctuaciones de corriente en la salida rectificada. Por último, se conectó a la salida de este amplificador un altavoz cuya impedancia es de 4 Ω y una potencia de salida de 20 W. Una vez construido el sistema de generación acústico, se propagó un tren de ondas que interactuara con el elemento sensor de fibra MMI,

con rango de frecuencia de 1 a 100 Hz y a una amplitud de 18 vpp y 20.2 vpp. Esta última etapa es considerada como la fuente de perturbación acústica externa. Al activar la fuente de perturbación acústica sobre el elemento MMI, se observa la presencia de una variación periódica en el perfil de la señal óptica transmitida. Dicha señal se logra visualizar mediante un analizador de espectros ópticos (OSA), tal y como son descritas en la figura 4.

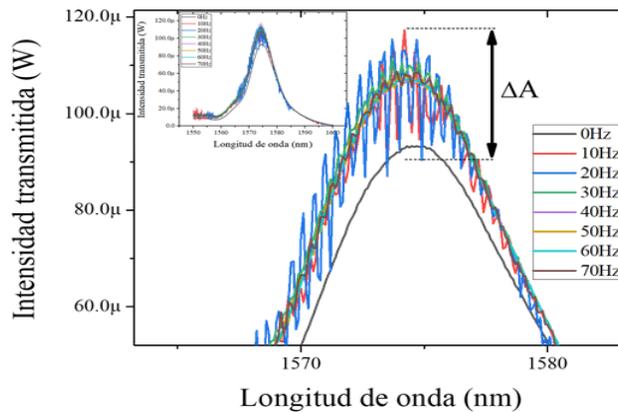


Figura 4 Oscilaciones en la señal transmitida por el elemento MMI (recuadro) debido a perturbaciones acústicas.

Como se observa, al perturbar el elemento MMI con señales acústicas en un rango de 10-70 Hz, se generan oscilaciones igualmente periódicas sobre la señal transmitida. Estas oscilaciones poseen un perfil de tipo periódico, cuya amplitud es establecida como ΔA . Se procedió entonces a adquirir los espectros de transmisión para cada intervalo de 10 Hz, frecuencia aplicada al altavoz, que fue el límite permitido por el generador de funciones. Así mismo, se observó que la amplitud ΔA de estas oscilaciones en la señal transmitida disminuyen a medida que la frecuencia del tren de onda acústico se incrementa, tal y como es mostrado en la figura 5.

Es importante mencionar que los valores de la amplitud ΔA mostrada en la figura 5, fueron tomados justo en el máximo, del pico de transmisión en cada espectro monitoreado. A partir de ello y observando su comportamiento, se procedió a hacer un ajuste a una curva con decaimiento exponencial mediante el programa de cómputo Origin-Pro® versión 8.5 (línea roja, figura 5). De dicho ajuste, se obtiene que el parámetro característico de decaimiento de la amplitud ΔA es de alrededor

de 14.215 Hz^{-1} . Debido a que, para frecuencias de monitoreo superiores a 100 Hz la amplitud ΔA se redujo a cero, se decidió sólo mostrar en este documento las curvas representativas arriba indicadas.

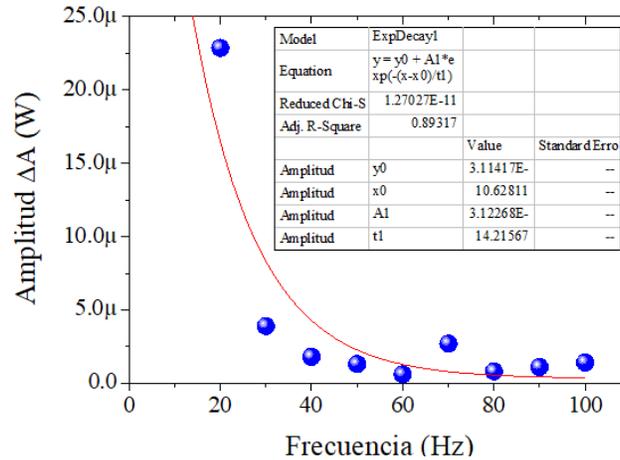


Figura 5 Comportamiento de la amplitud de la señal del MMI respecto a la frecuencia.

4. Discusión

Como se observa en la figura 4, al interactuar el tren de onda acústico sobre el componente MMI fabricado en fibra, aparece una perturbación igualmente periódica en la señal transmitida por él MMI (ver recuadro de la figura 4). Al hacer un acercamiento de dichas señales centrada en la longitud de onda del pico transmitido, se aprecian con más detalle las perturbaciones mencionadas (figura 4) y cuya amplitud de estas oscilaciones se definió como ΔA . Como se indicó en la sección anterior, se observó que dicha amplitud ΔA se redujo prácticamente a cero cuando la frecuencia de la oscilación en el altavoz se incrementa por encima de los 100 Hz. Al hacer un gráfico con los datos obtenidos, se observa una dependencia de tipo exponencial (figura 5) en una región de bajas frecuencias comprendidas de 10 a 70 Hz. Este comportamiento puede explicarse cómo sigue. El aire que circunda a la fibra óptica antes de ser perturbado por las ondas acústicas dispone de un índice de refracción, el cual puede asumirse como constante. Sin embargo, al perturbar dicha sección de aire con un tren de ondas acústicas, éste posee una

modulación en índice de refracción, debido a que se trata de ondas longitudinales formadas por secciones de compresión y expansión de aire. Este hecho es ampliamente conocido y es la forma de propagación común de cualquier perturbación acústica. A partir de ello, las capas de aire alrededor de la fibra NC-MMF, modifican la condición de reconstrucción de autoimágenes establecidas por las ecuaciones 1 y 2. Ello en consecuencia induce que la señal transmitida sea perturbada con la misma frecuencia del agente externo y dependiente de la frecuencia de oscilación con que se perturba. Es importante mencionar que el elemento sensor MMI fue probado para rangos superiores al presentado en este trabajo (hasta 50 kHz) y las oscilaciones en la señal transmitida permanecieron sin alteración alguna. Este comportamiento puede atribuirse a que, en rangos de frecuencia superiores, las ondas de compresión y de expansión de las masas de aire inducidos por el altavoz oscilan a una frecuencia a las que el elemento MMI es inerte a dichos campos acústicos.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta la construcción y prueba de un elemento de interferencia multimodal fabricado en fibra probado para la detección de ondas acústicas a baja frecuencia. En los datos experimentales obtenidos, se observó que al inducir una perturbación acústica periódica al arreglo SMF-MMF-SMF, se inducen oscilaciones dentro del propio espectro de transmisión. El comportamiento se atribuye a que el medio que rodea a la sección de fibra NC-MMF, está formado por secciones de compresión y expansión de aire, el cual es característico de ondas longitudinales. Bajo dicha condición, aparece dentro de la señal transmitida una oscilación igualmente periódica. Sin embargo, la amplitud de dichas oscilaciones se reduce conforme se incrementa la frecuencia del tren de onda acústico inducido. Se observa también que la disminución de dicha amplitud tiene un comportamiento de tipo exponencial, cuyo tiempo característico obtenido mediante un ajuste es de 14.215 Hz^{-1} . Este comportamiento puede ser asumido como un mecanismo indirecto para la detección de ondas acústicas a bajas frecuencias. Consideramos que la contribución de este trabajo reside en reportar el monitoreo de ondas acústicas a

baja frecuencia a través de mecanismos indirectos basados en sistemas optoelectrónicos de simple fabricación. Es importante mencionar que futuros experimentos se realizarán disponiendo de una fuente de perturbación que permita ajustar a intervalos de frecuencia más pequeños que los presentados en este documento. Así mismo, conviene indicar que la técnica mostrada es factible de diseñar e implementar. Cabe mencionar que la fabricación de este sensor es de bajo costo, de fabricación simple, no ocupa otros componentes de fibra sofisticados, no es invasivo y es amigable con el medio ambiente.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 57 –79, 2003.
- [2] Ha Lee Byeong, Ho Kim Young, Seob Park Kwan, Beom Eom Joo, Jin Kim Myoung, Sup Rho Byung, and Young Choi Hae. Interferometric fiber optic sensors, *Sensors* 12 (3), 2467-2486, 2012.
- [3] Hernández-Serrano, A. I. et al, Robust optical fiber bending sensor to measure frequency of vibration, *Optics and Lasers in Engineering*, 51(9): 1102–1105, 2013.
- [4] Hong, X. et al, Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection, *Applied Optics*, 50(22): 4333–4338, 2011.
- [5] Lima, S. E. U., et al, Extrinsic and intrinsic fiber optic interferometric sensors for acoustic detection in high-voltage environments, *Optical Engineering*, 48(2): 024401, 2009.
- [6] Martínez Q. Carina. Teorías que marcaron el estudio científico de los sismos, DGDC-UNAM, 2017.
- [7] Michaud F., Ratzov G., Sallares V., Collot J.-Y., Pazmino N., De la Torre G. Métodos e instrumentación acústica para la exploración en geofísica marina, Institut de recherche pour le développement (France), 2009.
- [8] Rivera, J. L. et al, Adaptive Sagnac interferometer with dynamic population grating in saturable rare-earth-doped fiber, *Optics Express*, 21(4): 4280–4290, 2013.

- [9] Mejía Aranda A. R., Basurto Pensado M. A., Antúnez Cerón E. E., Castro Gómez L. L., Urquiza Beltrán G., Rodríguez J. A., García J. C., Sánchez Mondragón J. J., Ruiz Pérez V. I. Fiber Optic Pressure Sensor of 0-0.36 psi by Multimode Interference Technique, *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 11, 697-698, 2013.
- [10] Millan Esteller J. M. Instalaciones de megafonía y sonorización, *Parainfo*, 22-24, 2012.
- [11] Soldano B. Lucas and Pennings Erik C. M. Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications. *J. Of Lightwave Tech*, Vol. 13, No. 4, April 1995.
- [12] Wada, A. S. et al, Optical fiber vibration sensor using FBG Fabry-Pérot interferometer with wavelength scanning and Fourier analysis, *IEEE Journal Sensors*, 12(1): 225–339, 2012.
- [13] Wild G. and Hinckley S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state of-the-art, *IEEE Sensors Journal* 8 (7), 1184-1193 (2008).