

MEDICIÓN DE VIBRACIONES UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE FIBRA ÓPTICA

VIBRATION MEASUREMENT USING OPTICAL FIBER TECHNOLOGY

Jesús Pérez Toalá

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
m23270369@tuxtla.tecnm.mx

Joel Gómez Pérez

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
joel.gp@tuxtla.tecnm.mx

Jorge Luis Camas Anzueto

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
jcamas@tuxtla.tecnm.mx

Rubén Grajales Coutiño

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx

Pedro Marco Velasco Bolom

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
d09270506@tuxtla.tecnm.mx

Luis Enrique Guillén Ruiz

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
d10270777@tuxtla.tecnm.mx

Recepción: 26/noviembre/2024

Aceptación: 14/marzo/2025

Resumen

En este estudio, se propone un sistema de medición de vibración basado en fibra óptica diseñado para estructuras de ingeniería civil, como puentes y edificios. Este sistema ofrece una notable inmunidad a la interferencia electromagnética y alta fiabilidad. La configuración del medidor aprovecha las propiedades intrínsecas de la fibra óptica para detectar cambios sutiles en las vibraciones de las estructuras, con la capacidad de medir frecuencias en el rango de 0 a 40 Hz. Esto proporciona una herramienta avanzada para la protección y conservación de activos críticos, ya que permite detectar una amplia gama de frecuencias de vibración que pueden indicar

diferentes tipos de daño estructural. Para simular las condiciones de vigas reales y validar la eficacia del sistema, se ha utilizado una viga de PVC en las pruebas experimentales. Este enfoque permite evaluar el desempeño del sensor en un entorno controlado antes de su implementación en aplicaciones de campo.

Palabras Clave: Fibra óptica, Medición, Vibración.

Abstract

In this study, a fiber optic-based vibration measurement system is proposed for civil engineering structures, such as bridges and buildings. This system offers notable immunity to electromagnetic interference and high reliability. The meter configuration takes advantage of the intrinsic properties of optical fiber to detect subtle changes in the vibrations of structures, with the capability to measure frequencies in the range of 0 to 40 Hz. This provides an advanced tool for the protection and preservation of critical assets, as it allows for the detection of a wide range of vibration frequencies that can indicate different types of structural damage. To simulate real beam conditions and validate the system's effectiveness, a PVC beam was used in the experimental tests. This approach allows for evaluating the sensor's performance in a controlled environment before its implementation in field applications.

Keywords: *Fiber optic, Measurement, Vibration.*

1. Introducción

La tecnología óptica ha captado un creciente interés en la comunidad vinculada a la ingeniería civil, ofreciendo nuevas oportunidades para diseñar sistemas que monitoreen fenómenos físicos en construcciones. En particular, el Estado de Chiapas, ubicado en una zona sísmica, ha experimentado movimientos tectónicos que han comprometido la integridad de las estructuras. A medida que estas estructuras se deterioran o empiezan a dañarse, las frecuencias naturales y de operación tienden a cambiar. Esto hace crucial el monitoreo de vibraciones para mantener la seguridad y funcionalidad de los sistemas [Guzmán, 2012]. Por lo cual, es necesario el desarrollo de la investigación de sensores que monitoreen el daño

de estructuras civiles en vigas, hundimiento, inclinación entre otros parámetros que se pueden medir utilizando dispositivos con tecnología de fibra óptica. Estos dispositivos de fibra óptica se basan en el efecto conocido como modulación de fase acústica, que se produce cuando una onda acústica viaja a lo largo de una fibra óptica y modifica su índice de refracción. Este efecto permite que la fibra óptica actúe como un transductor de vibración, convirtiendo las vibraciones mecánicas en cambios en la luz que se transmite a través de ella. Los sensores de fibra óptica, especialmente los sensores de rejilla de Bragg (FBG), se han integrado y utilizado ampliamente en numerosos sistemas de monitoreo de salud estructural para infraestructuras como puentes, represas y túneles. Normalmente, estos sistemas se enfocan en medir la tensión estática y el desplazamiento para detectar y seguir daños por fatiga, identificar grietas y monitorear áreas críticas en busca de cambios estructurales [Luna Innovations, 2020].

Recientemente, la estructura de la fibra óptica monomodo-multimodo-monomodo (SMS) genera interferencia multimodal y se ha desarrollado para que actúe como sensor [Mehta, 2003], [Wang, 2006], [Wang, 2019].

Se ha combinado la tecnología de la fibra óptica con la inteligencia artificial para medir la vibración y detectar con precisión daños en el interior del concreto de puentes colgantes reales [Wasanthi, 2019].

De igual manera se ha desarrollado un prototipo de detección de vibraciones de fibra óptica distribuida en tiempo real basado en la interferencia de Sagnac junto con la reflectometría en el dominio del tiempo óptico, al realizar el modelo experimental se muestran con resultados equivalentes a los obtenidos en los modelos teóricos realizados por ellos mismos [Pan, 2017].

Se ha desarrollado y aplicado detecciones de daños dentro de las estructuras de concreto y vigas de acero utilizando vibraciones fusionado con una red neuronal artificial, la cual, tiene el propósito de localizar el daño que se encuentran en las vigas de acero [Tan, 2019].

Se desarrolló un sensor de vibración utilizando fibra óptica monomodo. Este sensor está basado en reflectometría en el dominio de tiempo sensible a la fase [Novotný, 2021].

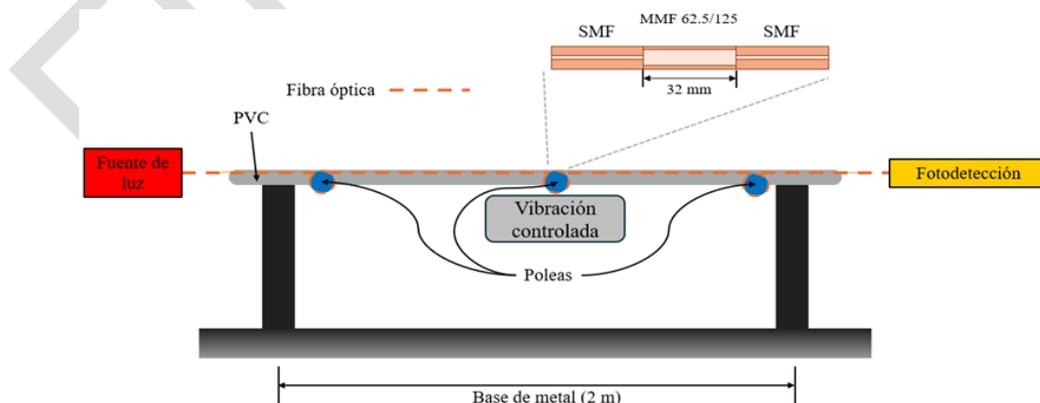
La fibra óptica multimodo ha mostrado tener un mejor comportamiento que una fibra óptica monomodo cuando se le hace un arreglo con un sistema de poleas con un diámetro determinado y así [Camas, 2023].

La fibra óptica estructurada generalmente implica una combinación de diferentes tipos de fibra óptica empalmadas juntas para aprovechar las ventajas de cada tipo en una única configuración. Un ejemplo común de fibra óptica estructurada es la combinación de fibra monomodo (SMF) y fibra multimodo (MMF) en una disposición específica [Chew, 2017].

En este trabajo, se utilizó la estructura de fibra óptica monomodo-multimodo-monomodo como medidor de vibraciones. Esta configuración se seleccionó debido a su capacidad para generar interferencia multimodal, lo que permite una alta sensibilidad en la medición de vibraciones. Los resultados obtenidos demostraron que el medidor tiene un excelente rendimiento en la medición precisa de cambios estructurales. Dicha estructura, en combinación con un sistema de poleas, mostró ser efectiva, mejorando la respuesta del sistema.

2. Métodos

En la Figura 1 se muestra el arreglo experimental para pruebas de lecturas del medidor de vibraciones. Se utilizó un tubo de PVC de 2 m de longitud como parte del experimento debido a su flexibilidad y capacidad de volver a su forma original tras ser flexionado, esto con la finalidad de simular una viga real [Camas, 2023].



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Arreglo experimental para pruebas de laboratorio.

El sistema se compone principalmente de un láser comercial de 980 *nm* (Infrared Laser Diode Module, Laserland), una estructura SMS (Single Mode-Multimode-Single Mode) y un medidor de potencia. La Figura 1 adjunta ilustra el esquema detallado de la estructura SMS. La capacidad de medir vibraciones se debe al segmento de fibra óptica multimodo (MMF) de 62.5/125 empalmado a un segmento de fibra óptica monomodo (SMF). Este segmento empalmado puede considerarse como el medidor principal del sistema. La estructura SMS permite la detección de vibraciones gracias a la interacción entre los modos ópticos de las fibras monomodo y multimodo. En la sección de fibra multimodo, la luz se propaga a través de múltiples modos, y las vibraciones externas alteran estas trayectorias, generando cambios en las propiedades de transmisión de la luz. Estas alteraciones incluyen cambios en la fase y la intensidad de la señal óptica, lo que provoca fluctuaciones en la potencia detectada. El medidor de potencia utilizado capta estos cambios con alta precisión, proporcionando datos cuantitativos sobre las vibraciones presentes. Este sistema permite monitorear vibraciones con una alta sensibilidad, aprovechando los efectos de interferencia multimodal, donde la estructura capta tanto la frecuencia como la amplitud de las vibraciones. Además, es inmune a interferencias electromagnéticas, lo que lo hace ideal para aplicaciones en entornos industriales o de monitoreo estructural donde el ruido externo puede ser problemático. A lo largo de la estructura se colocaron tres poleas, cada una con un diámetro de 3.2 *cm*, distribuidas a lo largo de un tubo de PVC. Estas poleas permiten el movimiento de la fibra óptica a lo largo del tubo, aumentando la sensibilidad del sensor; en cada extremo del tubo de PVC, la fibra óptica fue fijada firmemente utilizando abrazaderas de fibra montables (MFC) [Camas, 2023]. Estas abrazaderas aseguran que la fibra óptica se mantenga tensa y evita cualquier deslizamiento que pudiera comprometer la precisión de las mediciones. La instalación de las poleas y las abrazaderas garantiza un posicionamiento y tensión óptimos de la fibra, lo cual es crucial para el funcionamiento eficiente y preciso del sensor en la medición de vibraciones. Este diseño cuidadoso permite que la fibra responda de manera más efectiva a las perturbaciones, mejorando la capacidad del sistema para registrar incluso las más mínimas variaciones en las condiciones de vibración.

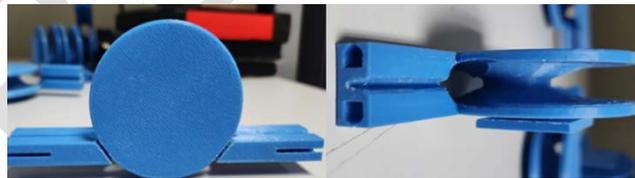
La Figura 2 muestra el MFC, que consta de un imán en el cuerpo de montaje central y un tornillo de sujeción magnética de acero en el brazo de sujeción, lo que permite un ajuste dinámico de la fuerza de sujeción.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Abrazadera de fibra montable.

En la Figura 3 se observa el diseño de las poleas que a través de las cuales pasará la fibra óptica [Camas, 2023]. Dentro de la fibra multimodo, la propagación de la luz ocurre a través de múltiples trayectorias o modos. Cuando esta luz vuelve a entrar en la fibra monomodo, se genera un patrón de interferencia que se puede analizar para detectar cambios en el entorno. Este patrón de interferencia es sensible a varios factores, incluyendo la longitud de la fibra, el índice de refracción del núcleo y los diferentes trayectos ópticos que recorre cada modo de luz. La precisión en la medición de cambios ambientales se logra porque la interferencia resultante refleja las variaciones en estos parámetros.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Polea.

La estructura multimodo-monomodo permite que los diferentes modos de luz interactúen y se combinen de manera específica al regresar a la fibra monomodo, lo que facilita la identificación de cambios en las condiciones ambientales con alta sensibilidad y exactitud. Esta metodología es fundamental para aplicaciones donde es crucial monitorear con precisión las variaciones en el entorno, ya que cualquier cambio en los parámetros mencionados afecta el patrón de interferencia observado.

Para la simulación de vibraciones en el laboratorio, se empleó un motor compensado, mostrado en la Figura 4, debido a su capacidad para proporcionar una solución práctica y eficaz. Este motor permite replicar condiciones de vibración controlada. Una de las características más destacadas del motor compensado es su capacidad para ajustar la frecuencia de las vibraciones mediante el control del voltaje aplicado. Esta capacidad de ajuste facilita la creación de una amplia gama de escenarios de vibración, desde bajas hasta altas frecuencias, según sea necesario para los experimentos. El uso de un motor compensado en el simulador de vibración garantiza que las condiciones de prueba puedan ser reproducidas de manera consistente, permitiendo así una evaluación precisa y repetible de la respuesta del sistema a diferentes niveles de vibración. Además, la versatilidad en el ajuste de frecuencia permite a los investigadores explorar los efectos de diversas amplitudes y frecuencias de vibración sobre los objetos de estudio, mejorando la comprensión de cómo estos factores afectan el comportamiento del sistema.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Simulador de vibración.

Un motor descompensado genera vibraciones usando una masa excéntrica en su eje. Para caracterizarlo, se convirtió la velocidad en revoluciones por minutos (*RPM*) a frecuencia en hertzios (*Hz*) usando la Ecuación 1.

$$\text{Frecuencia (Hz)} = \frac{\text{RPM}}{60} \quad (1)$$

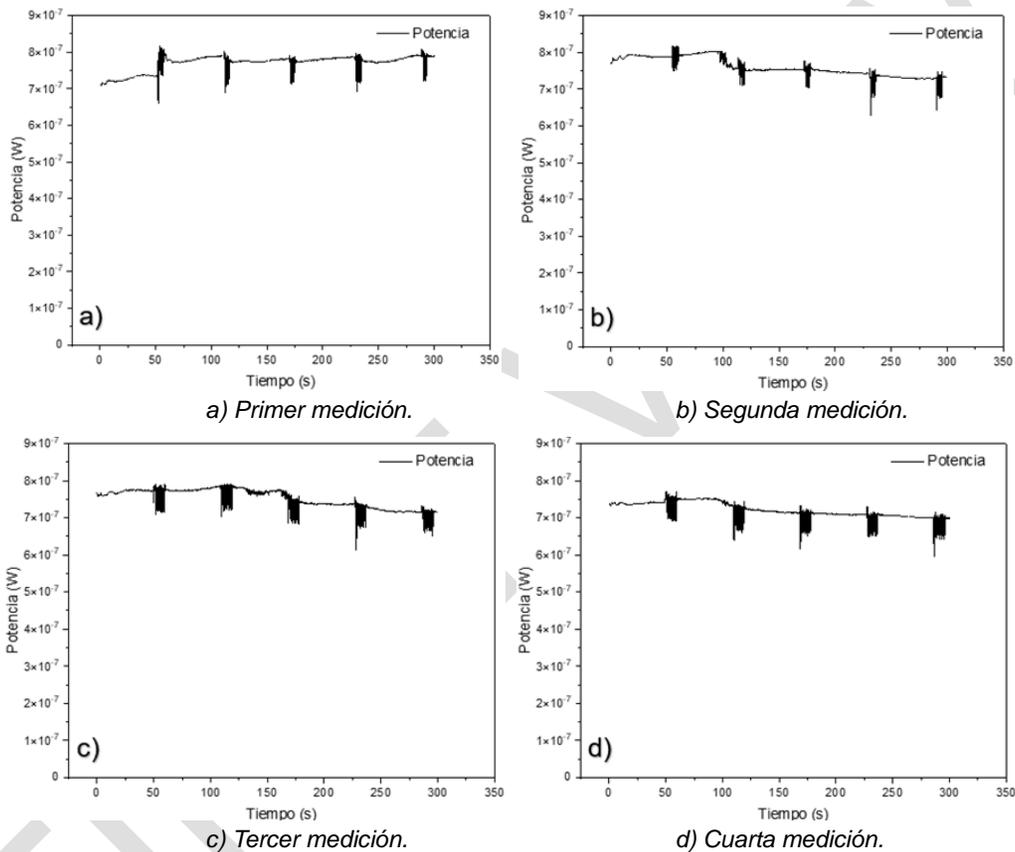
La caracterización se llevó a cabo en un rango de velocidades que permite evaluar el comportamiento del motor tanto en condiciones de baja como de alta frecuencia de vibración. Esto es fundamental para aplicaciones que requieren un rango amplio de frecuencias, como el monitoreo de estructuras civiles, la calibración de sensores de vibración, y la investigación en materiales sometidos a estrés vibratorio.

Como medidor de potencia óptica se utiliza el PM320E de Thorlabs, que proporciona un amplio rango de medición de 100 pW a 200 W , ideal para una variedad de aplicaciones ópticas. A este dispositivo se le conecta el fotodiodo S150C, también de Thorlabs, especializado en mediciones de longitud de onda de 350 nm a 1100 nm , con una alta precisión en rangos de potencia que van desde 100 pW hasta 5 mW . Para la fuente de luz se utilizó un láser de 980 nm . Esta longitud de onda ofrece baja atenuación en fibras ópticas, lo que garantiza una transmisión eficiente y confiable de la luz. Además, la estabilidad y eficiencia energética del láser de 980 nm permiten obtener mediciones precisas en el sistema de sensor. Esta longitud de onda también es compatible con una amplia gama de detectores ópticos, facilitando su integración en sistemas de medición avanzados. Asimismo, la disponibilidad comercial y su costo lo convierten en una opción económica y práctica para distintas aplicaciones.

3. Resultados

El motor descompensado fue instalado cuidadosamente en el conjunto experimental, y la fibra óptica con estructura SMF-MMF-SMF, que actúa como el medidor, se fijó en el mismo arreglo para garantizar que las vibraciones generadas por el motor tuvieran un impacto directo en la fibra. Al inducir vibraciones, se provocaron cambios tanto en la intensidad como en el patrón de interferencia de la luz que se propagaba a través de la fibra multimodo. Estos cambios fueron detectados y analizados minuciosamente. La disposición del motor y la fibra en el mismo arreglo experimental asegura una transmisión precisa de las vibraciones a la fibra óptica, permitiendo una evaluación detallada de cómo estas perturbaciones afectan el comportamiento óptico de la fibra. La estructura SMF-MMF-SMF es particularmente sensible a las variaciones en las condiciones de vibración, lo que la convierte en una herramienta eficaz para el monitoreo y análisis de estas variaciones. Este sistema permite a los investigadores capturar y estudiar con precisión los efectos de las vibraciones sobre el patrón de interferencia, proporcionando datos valiosos para entender mejor las dinámicas de los sistemas sometidos a vibraciones.

Los resultados de las mediciones mostraron una correlación clara entre la frecuencia de vibración generada por el motor y las variaciones en la señal óptica detectada. En la Figura 5 se observa la respuesta del sensor de fibra óptica estructurada SMF-MMF-SMF cuando se le induce una vibración de 16.55 Hz. Se realizaron 4 mediciones; las primeras dos figuras, Figuras 5a y 5b, con perturbaciones cada 55 s y las últimas dos, Figuras 5c y 5d cada 50 s.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Reacción del medidor con vibración de 16.55 Hz.

La Figura 5 muestra la potencia del láser en función del tiempo. Se puede apreciar que, en presencia de vibraciones, la potencia del láser manifiesta una serie de caídas notables. Específicamente, cada vez que se introduce una vibración, la potencia medida disminuye abruptamente, reflejando la sensibilidad del medidor a las perturbaciones externas. Entre estos picos de disminución, la potencia tiende a estabilizarse mientras que, durante las vibraciones.

potencia indica que las vibraciones inducidas afectan directamente la transmisión de luz a través de la fibra óptica, lo cual es captado y registrado por el medidor de potencia. Este comportamiento es característico de sistemas de medición basados en interferometría, donde las vibraciones alteran las condiciones de interferencia de la luz, resultando en variaciones medibles en la intensidad de la señal óptica.

En la Figura 5 se presenta la respuesta a la vibración, donde se observa la variación en la potencia detectada. Sin embargo, para evaluar con mayor precisión la repetibilidad y consistencia de las mediciones, es esencial realizar un análisis estadístico que incluya el cálculo de la varianza. La varianza es un indicador clave para determinar la dispersión de los datos en relación con la media, permitiendo evaluar la estabilidad y confiabilidad del sensor en las condiciones experimentales descritas. En la Tabla 1, se presenta una comparativa que resume las potencias promedio y las varianzas correspondientes para cada medición realizada a una frecuencia constante de 16.55 Hz. Este análisis cuantitativo refuerza los resultados obtenidos y permite validar la capacidad del sistema para ofrecer mediciones consistentes bajo condiciones controladas.

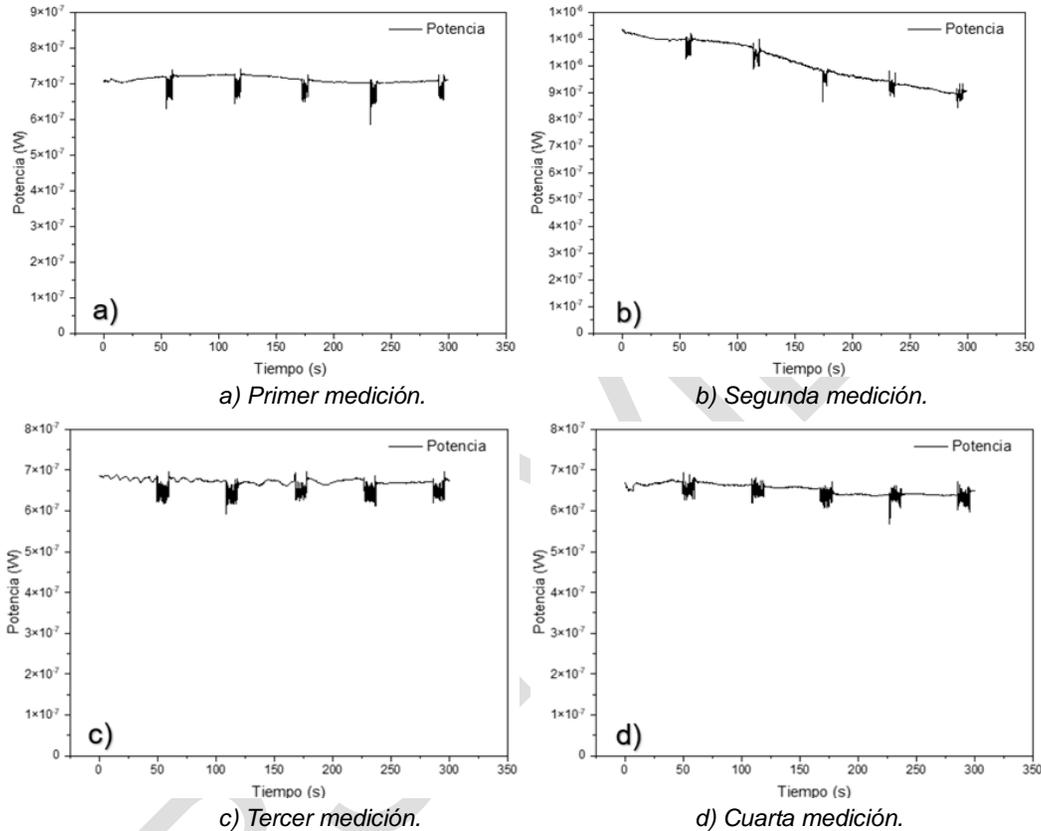
Tabla 1 Resultados de Mediciones y Análisis Estadístico (16.55 Hz).

Medición	Frecuencia (Hz)	Potencia promedio (W)	Varianza
1	16.55	$7.69E - 07$	$4.9919E - 16$
2		$7.59E - 07$	$6.8409E - 16$
3		$7.51E - 07$	$7.1898E - 16$
4		$7.20E - 07$	$4.7832E - 16$

Fuente: elaboración propia

Se realizó una prueba similar en el medidor, pero en esta ocasión se modificó la intensidad de la vibración a una frecuencia de 19.43 Hz. El análisis de los resultados obtenidos se presenta en la Figura 6, se realizaron 4 mediciones; las primeras dos figuras, Figuras 6a y 6b, con perturbaciones cada 55 s y las últimas dos, Figuras 6c y 6d cada 50 s, donde se puede apreciar claramente una disminución en la potencia medida. Este decaimiento en la potencia indica cómo la variación en la frecuencia de la vibración afecta el rendimiento del medidor. En la Tabla 2, se presentan los resultados de las mediciones realizadas bajo distintas frecuencias, manteniendo las

mismas condiciones experimentales descritas previamente. Los resultados obtenidos en las distintas frecuencias permiten observar cómo varían los valores de potencia y su correspondiente varianza. La baja varianza registrada indica a la confiabilidad del sistema en condiciones variables.



Fuente: elaboración propia

Figura 6 Reacción del medidor con vibración de 19.43 Hz.

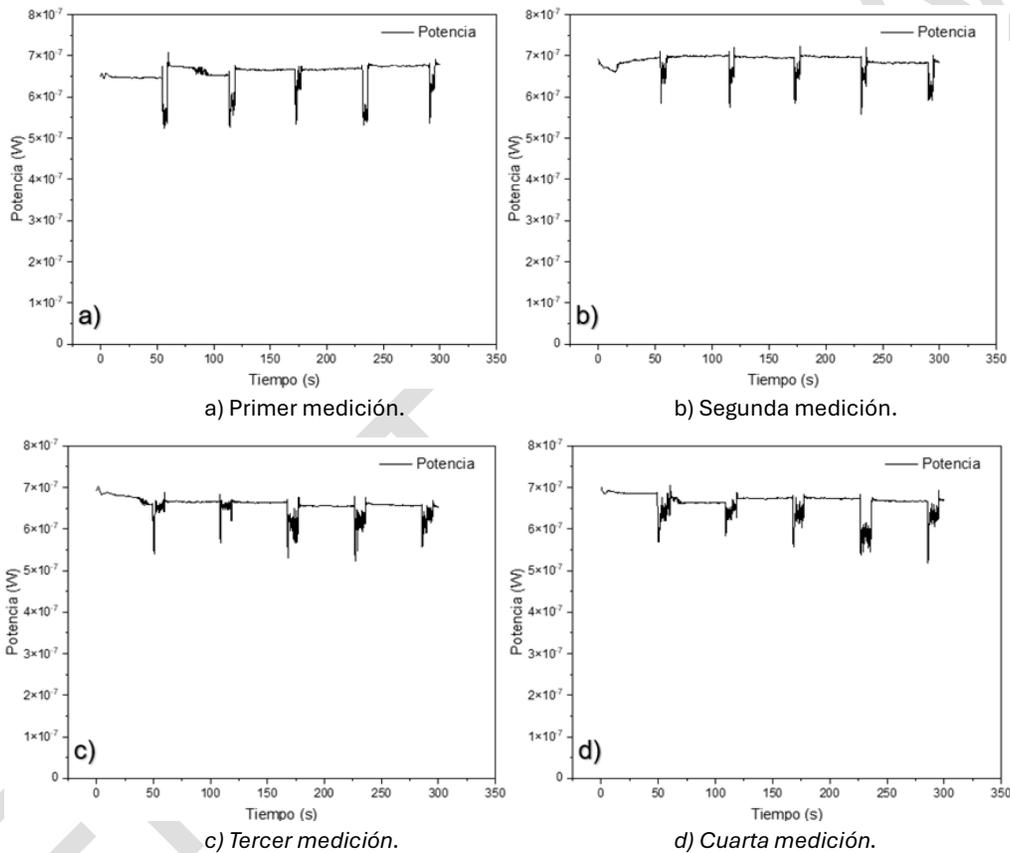
Tabla 2 Resultados de Mediciones y Análisis Estadístico (19.43 Hz).

Medición	Frecuencia (Hz)	Potencia promedio (W)	Varianza
1	19.43	$7.10E - 07$	$1.6112E - 16$
2		$1.01E - 06$	$5.7577E - 16$
3		$6.59E - 07$	$1.6933E - 16$
4		$6.52E - 07$	$1.9095E - 16$

Fuente: elaboración propia

En la Figura 7, se presenta el resultado de la prueba realizada al medidor con una frecuencia de vibración ajustada a 31.20 Hz. El análisis de los resultados obtenidos se presenta en la Figura 7, se realizaron 4 mediciones; las primeras dos figuras,

Figuras 7a y 7b, con perturbaciones cada 55 s y las últimas dos, Figuras 7c y 7d cada 50 s. Se puede observar el comportamiento de la potencia en función de la frecuencia específica. La figura revela cómo la intensidad de la vibración a esta nueva frecuencia afecta el nivel de potencia detectado, permitiendo una comparación directa con los resultados obtenidos a 16.55 y 19.43 Hz. En la Tabla 3, se observa el análisis comparativo correspondiente bajo distintas frecuencias, manteniendo las mismas condiciones experimentales.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Reacción del medidor con vibración de 31.20 Hz.

Tabla 3 Resultados de Mediciones y Análisis Estadístico (31.20 Hz).

Medición	Frecuencia (Hz)	Potencia promedio (W)	Varianza
1	31.20	$6.58E - 07$	$6.4415E - 16$
2		$6.88E - 07$	$3.0675E - 16$
3		$6.58E - 07$	$3.7957E - 16$
4		$6.65E - 07$	$5.414E - 16$

Fuente: elaboración propia

Los valores de varianza obtenidos en la última serie de mediciones reflejan un comportamiento consistente del sistema ante diferentes frecuencias, con ligeras variaciones entre cada medición. Estos resultados refuerzan la estabilidad y precisión del sistema propuesto, dado que las varianzas permanecen dentro de un rango bajo, lo que sugiere que el sistema es capaz de proporcionar mediciones confiables con un alto grado de repetibilidad, incluso ante cambios en la frecuencia de vibración.

Los resultados indican que el medidor de vibración de fibra óptica estructurada SMF-MMF-SMF es altamente sensible a diferentes frecuencias de vibración, con una respuesta particularmente marcada a frecuencias más altas. Las variaciones en la pérdida de potencia del láser bajo diferentes frecuencias reflejan la capacidad del sensor para detectar y responder a vibraciones inducidas, lo que demuestra su potencial para aplicaciones en monitoreo de vibraciones y medición de perturbaciones ambientales en sistemas ópticos.

El análisis de los resultados que muestran la respuesta del medidor de vibración de fibra óptica estructurada SMF-MMF-SMF bajo diferentes frecuencias de vibración revela variaciones significativas en la pérdida de potencia del láser, lo cual indica la sensibilidad del sensor a las perturbaciones inducidas por las vibraciones.

4. Discusión

Los resultados obtenidos con el medidor de vibración basado en fibra óptica han confirmado su capacidad para detectar perturbaciones reales. La sensibilidad, impulsada por la tecnología de interferencia multimodal y la ingeniería de las poleas que guían la fibra óptica, ha demostrado ser efectiva para identificar frecuencias de vibración específicas. Este desempeño es crucial para aplicaciones donde el monitoreo detallado y la respuesta rápida a las vibraciones son necesarios para garantizar la seguridad y el rendimiento de las estructuras. Al compararlo con tecnologías de sensores de vibración tradicionales, como los piezoeléctricos y los acelerómetros, el sensor de fibra óptica presenta varias ventajas notables. A diferencia de los sensores convencionales, que pueden ser susceptibles a interferencias electromagnéticas y desgaste mecánico, el sensor de fibra óptica

muestra una alta inmunidad a estas perturbaciones, lo que contribuye a una mayor estabilidad y durabilidad a lo largo del tiempo. Esta característica hace que el sensor de fibra óptica sea una opción atractiva para entornos industriales exigentes y para aplicaciones científicas donde la precisión es crítica. El sensor de vibración basado en fibra óptica tiene un amplio espectro de aplicaciones potenciales. En el ámbito de la ingeniería civil, puede ser utilizado para monitorear la salud estructural de edificaciones en regiones propensas a sismos, proporcionando datos valiosos para la prevención de daños y el mantenimiento preventivo. En el sector industrial, el sensor puede ser empleado para vigilar el estado de maquinaria, detectando fallos potenciales antes de que se produzcan problemas graves y optimizando el mantenimiento. La detección de vibraciones en el rango de 0 a 40 *Hz* tiene diversas aplicaciones. En monitoreo estructural, las vibraciones típicas oscilan entre 0.1 y 10 *Hz*, permitiendo evaluar la integridad de edificios y puentes. En monitoreo de maquinaria industrial, las vibraciones suelen estar entre 10 y 40 *Hz*, útiles para prevenir fallos mediante mantenimiento predictivo. En sismología, las vibraciones de baja frecuencia, entre 0.1 y 10 *Hz*, permiten detectar movimientos sísmicos. Finalmente, en el monitoreo de vibraciones en vehículos, las frecuencias varían entre 1 y 40 *Hz*, mejorando seguridad y confort.

5. Conclusiones

Las mediciones realizadas con el medidor de vibración basado en fibra óptica, que aprovecha los efectos de interferencia multimodal, han demostrado que el dispositivo opera de manera eficiente y detecta perturbaciones con rapidez. Los resultados obtenidos demostraron que el sistema es capaz de realizar lecturas en un rango de 0 a 40 *Hz*. Este medidor es particularmente adecuado para llevar a cabo mediciones de vibración con alta precisión. Su notable sensibilidad se debe a la ingeniería de las poleas a través de las cuales se dirige la fibra óptica, lo que facilita una identificación precisa y clara de la frecuencia de vibración inducida. Esta capacidad de medición detallada es crucial en aplicaciones donde es esencial conocer con exactitud las características de las vibraciones para asegurar una vigilancia y control efectivos. La confiabilidad del medidor en la identificación de

frecuencias específicas lo convierte en una herramienta valiosa y versátil para diversas aplicaciones tanto en el ámbito industrial como científico, proporcionando datos críticos para la evaluación y mantenimiento de sistemas y estructuras.

Como trabajo futuro, se propone la caracterización del transductor como sensor. Esta etapa es crucial para entender completamente su comportamiento y optimizar su desempeño en aplicaciones específicas. La caracterización permitirá evaluar parámetros clave como la sensibilidad, precisión, rango de medición y respuesta dinámica del transductor. Con esta información, se podrán realizar ajustes y mejoras en el diseño, asegurando que el sensor cumpla con los requisitos necesarios para su implementación en diversos sistemas de monitoreo y control. La fiabilidad del sensor en la medición de frecuencias específicas de vibración lo convierte en una herramienta valiosa en una amplia gama de aplicaciones industriales y científicas.

6. Bibliografías y referencias

- [1] Camas-Anzueto, J. L., A. M. Juan-Jiménez, G. Anzueto-Sánchez, M. Pérez-Patricio, R. Grajales-Coutiño, C. A. Hernández-Gutiérrez, and F. A. Alonso-Farrera, Simple Configuration of a Fiber Optic Sensor for Measuring Deflection in Concrete Beams. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 23, No. 7, 6840-6848. April, 2023.
- [2] Chew, S.P., A.Z. Zulkifli, S.E.F. Masnan, S.M. Akib, S.W. Harun, F.R. Mahamd Adikan, H. Ahmad. Water Wave Gauge Based on Singlemode-Multimode-Singlemode Fiber Structure. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 144, 232-239. 2017.
- [3] Guzmán-Sepúlveda, José Rafael & Sanchez-Mondragon, Jose & Torres-Cisneros, Miguel & Arredondo-Lucio, Jaime & May-Arriola, Daniel. Multimode Interference. *Fiber Optic Vibration Sensor*. *Frontiers in Optics*. 2012.
- [4] Luna Innovations. *Distributed Vibration Monitoring using Fiber Optic Accelerometers*. 2012.
- [5] Mehta, A., W. S. Mohammed, and E. G. Johnson. Multimode interference-based fibre optic displacement sensor. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 15, 1129–1131. 2003.

- [6] Novotný, V., Sysel P., Prokes A., Slavíček K. & Prinosil, J. Fiber Optic Based Distributed Mechanical Vibration Sensing. *Sensors*, Vol. 21, 4779. 2021.
- [7] Pan, C., LIU, X., Zhu, H., Shan, X., & Sun, X. Distributed optical fiber vibration sensor. *Optics Express*, Vol. 25, No. 17, 20056-20070. 2017.
- [8] Tan, Z., Thambiratnam, D., Chan, T., Gordan, M., & Razak, H. Damage detection in steel-concrete composite bridge using vibration characteristics and artificial neural network. *Structure And Infrastructure Engineering*, Vol. 16, 1-15. 2019.
- [9] Wang, Q. and G. Farrell, All-fibre multimode-interference based refractometer sensor: Proposal and design. *Opt. Lett.*, Vol. 31, No. 3, 317–319. 2006.
- [10] Wang, Q. and G. Farrell, Multimode fibre based edge filter for optical wavelength measurement application. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 48, No. 5, 900–902. 2006.
- [11] Wasanthi, R. Wickramasinghe, David P. Thambiratnam, Tommy H.T. Chan, Damage Detection in a Suspension Bridge Using Modal Flexibility Method. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 107, 104194. 2019.