

Monitoreo estructural basado en sistemas de sensores de fibra óptica*

Structural monitoring based on fiber optic sensor systems

Recibido: junio 3 de 2020 - Evaluado: julio 7 de 2020 -

Aceptado: septiembre 16 de 2020

Juan Sebastián Sanguino-Lemus**

Gustavo Adolfo Hernández-Martínez ***

Karla Cecilia Puerto-López ****

Para citar este artículo / To cite this Article

J. S. Sanguino-Lemus, G. A. Hernández-Martínez, K. C. Puerto-López, “Monitoreo estructural basado en sistemas de sensores de fibra óptica” Revista de Ingenierías Interfaces, vol. 3, no. 2, pp.73-97, 2020.

Resumen

Este artículo presenta un compendio de métodos para realizar monitoreo en diferentes tipos de estructuras mediante sensores de fibra óptica. Para el análisis de los diferentes métodos se analizaron panoramas de todas partes del mundo, teniendo como principal exponente a China por el desarrollo de un mayor número de sistemas y porque sus modelos están a la vanguardia del monitoreo estructural, incluso con gran aplicación en otros países. Se tuvieron en cuenta sistemas desarrollados en los últimos cinco años y se presenta una síntesis de los resultados de dichos sistemas en torno a sus ventajas, beneficios y principales características. Se encontró con este artículo que, ya que el monitoreo estructural atañe a distintas disciplinas, para la investigación de los sistemas de fibra óptica en monitoreo, se tuvieron muy en cuenta igualmente sistemas de otras áreas distintas a la electrónica, como lo son la ingeniería civil, la ingeniería de minas, la ingeniería estructural e incluso la medicina.

Palabras clave: estructural, óptica, monitoreo, fibra, sensores, sistemas.

*Artículo inédito: “Monitoreo estructural basado en sistemas de sensores de fibra óptica”.

**Ingeniero Electrónico, Correo electrónico: juansebastiansl@ufps.edu.co.

**Ingeniero Electrónico, Correo electrónico: gustavoadolfohm@ufps.edu.co.

****Ingeniera Electrónica, Correo electrónico: karlaceciliapl@ufps.edu.co, ORCID0000-0003-3749-676X

Abstract

This article presents a compendium of methods for monitoring different types of structures using fiber optic sensors. For the analysis of the different methods, scenarios from all over the world were analyzed, with China as the main exponent due to the development of a greater number of systems and because its models are at the forefront of structural monitoring, even with great application in other countries. Systems developed in the last five years were taken into account and a synthesis of the results of said systems is presented regarding their advantages, benefits and main characteristics. It was found with this article that, since structural monitoring concerns different disciplines, for the investigation of fiber optic systems in monitoring, systems from other areas other than electronics, such as civil engineering, were also taken into account, mining engineering, structural engineering and even medicine.

Keywords: structural, optics, monitoring, fiber, sensors, systems.

1. Introducción

La tecnología ha acompañado al hombre desde sus inicios para ejecutar diversas tareas que facilitan la vida diaria. El uso de sensores se ha normalizado en los dispositivos personales de uso diario que comúnmente son equipos de comunicaciones, sin embargo, actualmente ha abarcado incluso equipos electrodomésticos mediante la domótica y el internet de las cosas.

El desarrollo de la fibra óptica ha sido de gran utilidad para su aplicación en comunicaciones de alta velocidad. Sin embargo, en el campo de los sensores es común encontrar aplicaciones de fibra óptica ya sea como transductor directamente o como transmisor de datos. La fibra óptica se suele usar para medir deformación, temperatura, presión, humedad, campos eléctricos o magnéticos, gases, vibraciones, entre otros parámetros.

Los sensores de fibra óptica son más conocidos dentro de la comunidad científica como óptodos u optoelectrónicos, y tienen algunas ventajas sobre los sensores tradicionales como el hecho que no producen cortocircuitos, son de menor tamaño, son inmunes a la radiación electromagnética y la emisión de radio frecuencia, su velocidad de respuesta es alta, entre otras

[1]. El Instituto de Acústica CSIC de España ha adelantado un estudio de sensores de fibra óptica para la detección de señales acústicas y elásticas en aire, agua y estructuras vibrantes, mediante hidrófonos, micrófonos y acelerómetros [2].

En el río Papaloapán, en México, se realizó una instalación de sensores de deformación de la estructura utilizando la fibra óptica por su eficiencia, lo que da muestra de la confiabilidad que se tiene a este tipo de sensores en los últimos años [3].

En monitoreo estructural es común el uso de varios sensores para abarcar áreas grandes, lo que acarrea aumentos significativos en los costos de un proceso, además que aumenta la complejidad de los procesos por el manejo de cada sensor individualmente.

El uso de la fibra óptica como sensor intrínseco responde a gran parte de estos problemas, ya que una misma línea de fibra puede usarse para censar áreas más extensas, además que el manejo de una única línea para diversos puntos es más sencillo y eficiente [4]. En conclusión, la fibra óptica como ente sensor se destaca por tener grandes ventajas frente a los métodos de medición tradicionales en cuanto al monitoreo estructural., lo que ha despertado el interés de muchos países en cuanto a la investigación y el desarrollo de sistemas cada vez más eficientes y confiables.

2. Materiales y métodos

El documento presenta una serie de información recopilada de un conjunto de artículos enfocados en temas como: sensores de fibra óptica para el monitoreo estructural, importancia del monitoreo estructural en ingeniería civil o minas y cómo se necesitan otras alternativas de monitoreo estructural más eficientes. Estos artículos fueron seleccionados de bases de datos suscritas tales como IEEE Xplore, ScienceDirect y Scopus, además de Google Académico.

Los artículos seleccionados tienen una fecha de publicación igual o superior al año 2015 facilitando así la adquisición de información reciente relacionada a nuestra problemática, sin embargo, a nivel regional se encontraron pocos artículos y de mayor antigüedad. Posteriormente se

realizó una lectura exhaustiva de cada artículo, identificando los resultados más relevantes para formular hipótesis, conclusiones y recomendaciones.

Para la selección de artículos se tuvo en cuenta el panorama internacional, nacional y local a nivel regional en Norte de Santander sobre la temática planteada. Se distinguió una clara tendencia internacional de mayor fuerza frente a las perspectivas colombianas, por lo que se presenta esta perspectiva dominante en primera instancia. Los artículos están organizados por fecha de más antiguos a más recientes, ya que algunos de ellos abren la puerta a teorías innovadoras para su época, pero que años después consiguieron mejorar o sencillamente se adaptaron a otras tecnologías más eficaces de acuerdo a sus propias investigaciones de vanguardia.

3. Estado del arte

Los sensores de fibra óptica han tenido grandes avances en los últimos años, debido a que los beneficios de estas tecnologías han despertado el interés de muchos países en cuanto a la investigación y el desarrollo. A continuación, se presenta el desarrollo de los sensores de fibra óptica desde los panoramas: internacional, nacional y local (a nivel regional en Norte de Santander).

Panorama internacional

En el año 2015 Francisco Navarro Henríquez presenta una comparativa de los sensores de fibra óptica con su contraparte tradicional. Realiza una descripción de características de algunos sensores y definición de aspectos clave para su adecuado uso en el campo. Los sistemas con sensores ópticos resultan muy útiles en aplicaciones que no pueden ser fácilmente implementadas o no resulta práctico realizarlas con sensores electrónicos convencionales [5].

Desde otra perspectiva, en el 2015, en Singapur, Muneesh Maheshwari, Swee Chuan Tjin, A. Asundi, realizan un análisis sobre los sensores polarimétricos de fibra óptica para la ubicación de grietas y dimensionamiento, debido a que el sensor polarimétrico de fibra óptica (FOPS) es una herramienta atractiva para el monitoreo de daños en estructuras. Sin embargo, el sistema no es capaz de identificar la ubicación del daño y el tamaño de la grieta.

Además, la señal de salida de FOPS es muy ruidosa debido al hecho de que toda la fibra es sensible y capta señales no deseadas en su entorno. Proponen un nuevo diseño de FOPS para el monitoreo estructural donde solo la parte central de FOPS es sensible, manteniendo algunas partes insensibles, lo que permite que el monitoreo estructural use FOPS sensibles solo a la región de interés. Por lo tanto, el método FOPS puede ser usado para localizar grietas en algunas de las estructuras muy importantes [6].

En contraste, un año más tarde, en Inglaterra, Thomas Kissinger, Ricardo Correia, Thomas O. H. Charrett, Stephen W. James y Ralph P. Tatam, describen un enfoque de detección de fibra a partir de una nueva técnica de procesamiento de señal interferométrica de resolución de rango basada en la modulación de frecuencia óptica sinusoidal de un diodo láser rentable. Para su enfoque se tuvo en cuenta que en FSI (Interferometría de segmento de fibra), una cadena de sensores de tensión de fibra óptica de largo calibre está separados por reflectores parciales idénticos. Este enfoque permite mediciones integradas de deformación a lo largo de los segmentos de fibra, eliminando las brechas de detección y la sensibilidad en las homogeneidades encontradas con sensores de fibra localizados [7].

Ese mismo año, en China, Yu Chen, Yael Zilberman, Shideh Kabiri Ameri, Woon Jong Yoon detectan diversas concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3), que son dos biomarcadores importantes de la infección por *Helicobacter pylori* en el estómago, a partir de un sensor de gas gástrico basado en fibra óptica funcionalizada. Para realizar las mediciones, una fibra se ilumina mientras que la otra fibra recoge la luz dispersada hacia atrás y la alimenta al espectrómetro UV-Vis-NIR para medir el cambio en el espectro de luz en función de la concentración de CO_2 o NH_3 . Este método es fácil y flexible y logra una sensibilidad de nivel de ppm a los analitos de gas objetivo. El sensor propuesto se puede integrar en una cápsula fija personalizada para el diagnóstico complementario de la infección por *Helicobacter pylori* para mejorar la precisión de la inspección visual endoscópica [8].

También en el 2016, esta vez desde Alemania, K. Bremer, M. Wollweber, F. Weigand, M. Rahlves, M. Kuhne, R. Helbig, B. Roth, realizan un informe sobre los diferentes sensores de fibra óptica para el monitoreo estructural

en ingeniería civil. Diseñaron un sensor de grietas de fibra óptica que se basa en una estructura de red textil con una fibra óptica integrada diseñada para transferir el alargamiento debido a las grietas de la estructura y dos sensores de humedad de fibra óptica diferentes basado en FBG para detectar el ingreso de humedad en estructuras de edificios basados en concreto, dado que la formación de grietas y el ingreso de humedad es un problema crítico, además analizaron la degeneración de las propiedades mecánicas de los sensores de fibra óptica, por lo tanto, su estabilidad y confianza a largo plazo, dado que los sensores de fibra óptica con recubrimientos poliméricos comunes no son adecuados para este tipo de aplicación, investigaron la degeneración de los sensores de fibra óptica con recubrimientos de carbono debido a la influencia del ambiente del concreto [9].

Desde otro ángulo, en el 2017, Bai-Ou Guan, Long Jin, Linghao Cheng y Yizhi Liang, en China, demostraron la capacidad de los sensores láser de fibra para la detección de ondas acústicas de baja frecuencia y señales de ultrasonido en rangos de frecuencia mayores a 1 MHz y alrededor de 200 kHz hacia diferentes aplicaciones. Para la detección acústica de baja frecuencia, el límite de detección alcanza $74 \mu\text{Pa} / \text{Hz}^{1/2}$ a 1 kHz, que es comparable al ruido marino de orden cero. Para la detección de ultrasonido de alta frecuencia, el sensor láser presenta una capacidad de detección de 40 Pa sobre un ancho de banda de 50 MHz, lo que permite su aplicación como detector de ultrasonido en imágenes foto acústicas. Se demostró la detección de ultrasonido con un láser de fibra empaquetado con polímero a un rango de 100 kHz, que podría encontrar aplicaciones en búsqueda y focalización bajo el agua [10].

En Costa Rica, Yi Cheng Lio Kuan y Pablo Agüero Barrantes en el 2017, presentan un boletín técnico que introduce los aspectos conceptuales del monitoreo de estructuras enfocados a puentes. Proponen un sistema de monitoreo portátil, en lugar de un sistema de monitoreo permanente, con el fin de poder usar estos sistemas en diferentes estructuras. Estos sistemas de monitoreo están compuestos por sensores que deben ser capaces de percibir las aceleraciones inducidas por la carga vehicular y la adquisición de datos se registra de una forma sincronizada vía Wi-Fi [11].

Por otra parte, en Italia, Domaneschi, Sigurdardottir y Glisic, en el 2017

investigaron la detección de daños en estructuras compuestas de concreto y acero que son típicas para puentes y puentes de carreteras.

La investigación combinó los resultados de las mediciones recolectadas por sensores de tensión de fibra óptica de largo calibre, instalados en la estructura monitoreada y un enfoque estadístico. También se preparó y validó un modelo de elementos finitos para profundizar aspectos peculiares de la investigación y la disponibilidad del método. Consiguieron detectar un comportamiento inusual documentado (por ejemplo, daño o deterioro) a través de mediciones de sensores de tensión de fibra óptica de largo calibre y un estudio probabilístico de la densidad espectral de potencia de curvatura dinámica [12].

Otros investigadores chinos, pero con trabajo en Estados Unidos, como Weijie Li, Changhang Xu, Siu Ho, Bo Wang y Gangbing Song, en el 2017, presentaron los resultados de una investigación experimental sobre el monitoreo de la corrosión de un bloque de mortero reforzado con acero a través de la emisión combinada acústica y la medición de la tensión de la rejilla de Bragg. Para sus experimentos se aplica corriente constante a un bloque de mortero para inducir corrosión acelerada. El proceso de monitoreo consta de dos aspectos: iniciación de corrosión y propagación de grietas. La propagación de grietas se puede capturar a través de la emisión acústica correspondiente, mientras que la expansión del mortero debido a la generación de productos de corrosión se controla mediante sensores de deformación de rejilla de fibra Bragg. Se demuestra que las fuentes de emisión acústica provienen de tres tipos diferentes, a saber, la evolución de las burbujas de hidrógeno, la generación de productos de corrosión y la propagación de grietas. También se discuten sus propiedades correspondientes [13].

Desde otro enfoque, en la ciudad de Wuhan, en China, Ciming Zhou, Tao Tian, Li Qian, Dian Fan y Weilong Liang propusieron un novedoso sistema de detección de vibración de fibra óptica basado en interferometría de frecuencia desplazada (FSI) en el año 2017. Dicho sensor se basa en el fenómeno de que la frecuencia de la luz transmitida a través de un segmento de fibra doblada puede ser desplazada por efecto Doppler por la vibración. El cambio de frecuencia Doppler se mide utilizando la demodulación

FSI. En comparación con el sensor de vibración de rejilla Bragg de fibra tradicional, el sensor propuesto es fácil de fabricar, de bajo costo y sin dependencia direccional. Los resultados muestran que el sistema tiene una alta sensibilidad y un amplio rango de frecuencias, limitado solo por el aparato de excitación utilizado en el experimento [14].

En otro orden de ideas, Christopher Baldwin, en el 2018, realiza un análisis sobre las diferentes técnicas de detección usando sensores de fibra óptica, que son aplicados en la industria del petróleo y el gas. El artículo busca proporcionar una visión general sobre diferentes métodos como: Bragg gratings, Raman scattering, Brillouin scattering, Rayleigh scattering and interferometric sensing, métodos utilizados para el monitoreo de tuberías y pozos de petróleo. El autor menciona y resalta que el uso de estos métodos ha demostrado ser una solución viable en muchas aplicaciones, sin embargo, el elevado costo inicial para la aplicación de estos métodos ha llevado que la industria del petróleo considere implementar otras tecnologías tradicionales, debido a que el petróleo ha luchado para encontrar una estabilidad de su precio en el mercado [15].

En otro estudio, José Serracín y José Miranda en el 2018 desarrollaron en Panamá una investigación con el objetivo de encontrar métodos de bajo costo que permitan la ejecución de monitoreo en diferentes estructuras civiles. En este estudio se observa una marcada relación entre el uso de sensores y su capacidad de respuesta debido a las deformaciones que se generan [16].

En Canadá en el 2018, Hua Lu, Xija Gu presentan un nuevo método de prueba que utiliza rejillas de fibra Bragg (FBG) para el monitoreo de fallas en la fabricación de placas de circuito impreso (PCB), bajo operaciones de servicio las estructuras por lo general están sujetas a condiciones complejas como temperatura, humedad y entorno químico, así como la carga mecánica. Las uniones con soldadura en la placa son las más débiles de todos los elementos en la PCB, por lo cual es necesario determinar la fractura inicial con precisión. Los sensores FBG tienen alta sensibilidad, amplio rango dinámico e inmunidad a interferencias electromagnéticas, lo cual hace que esta tecnología sea eficiente para la detección de fallas para la microelectrónica [17].

De vuelta en China, pero esta vez desde la ciudad de Tianjín, en el 2018 Tiegeng Liu, Wanchen Zhang, Shuang Wang y Junfeng Jiang propusieron un sensor Fabry-Perot (FP) de fibra óptica insensible a la temperatura para la medición del nivel de líquido. Mediante la combinación de diferentes férulas, la cavidad FP se fabrica sin un sello para eliminar la influencia del aire residual en la cavidad FP, por lo tanto, la sensibilidad cruzada a la temperatura se reduce significativamente. La cavidad FP abierta constituye una estructura de detección de presión diferencial al mismo tiempo. Para verificar el rendimiento de este sensor, se lleva a cabo un experimento con un sistema de presión y temperatura de fibra óptica. El sensor tiene una buena respuesta lineal monótonica con una precisión inferior al 0.4% F.S. (Escala completa) [18].

Por otra parte, en el mismo año en Israel, Craig Lopatin realiza una investigación sobre las aplicaciones de sensores de fibra óptica en la industria aeroespacial. En este artículo resalta las ventajas de los sensores de fibra óptica para las aplicaciones aeroespaciales en el monitoreo estructural de las alas en las aeronaves, las cuales son: inmunidad a la interferencia electromagnética, facilidad de multiplexación y peso ligero, sin embargo, la aceptación de esta tecnología por parte de la industria aeroespacial ha sido lenta por razones específicas como: la rejilla Bragg de fibra óptica detecta la tensión distribuida, pero es difícil cuantificar el daño, por otra parte otros métodos como el ultrasonido y la corriente parásita proporcionan información sobre los daños. Por lo cual la aplicación de sensores de fibra óptica en esta industria es muy poca, debido a que los métodos actuales tienen claras ventajas sobre la fibra óptica [19].

También en el mismo año, Lun-Kai Cheng, Peter Martijn Toet realizan una investigación sobre el funcionamiento básico de la rejilla Bragg de fibra óptica (FBG). Una vez más, hablan de las ventajas de esta tecnología para realizar una gran red de sensores y la facilidad para integrar cada sensor con diferentes parámetros físicos en un solo sistema de detección multiparamétrica [20].

En el 2019, Haihao Cheng, Shun Wu, Qiang Wang, Shun Wang y Peixiang Lu, nuevamente desde China, realizan un estudio sobre los sensores de fibra óptica debido a sus ventajas intrínsecas de peso ligero, pequeño tamaño,

flexibilidad e inmunidad a la interferencia electromagnética, implementa métodos para la detección de la curvatura y presenta un sensor de fibra óptica para la medición de la curvatura y temperatura con baja sensibilidad cruzada. El dispositivo es compacto, fácil de fabricar y de bajo costo [21].

En Perú, en el 2019, David Fosca Gamarra implementa una estación remota de monitoreo estructural para el seguimiento y control del estado actual de los monumentos de relevancia histórica. El sistema de monitoreo consta de un conjunto de sensores como: Galgas extensiométricas, fibra de Bragg, piezoeléctricos, fibra óptica, celdas fotoeléctricas, RFID, anemómetros, acelerómetros y celdas de carga, que permiten tomar mediciones sobre deformación, desplazamiento, rotación, distorsión, fuerzas, luz, fotones, temperatura, humedad, radiación solar, velocidad de viento, precipitación, cambios de aceleración, velocidad y peso. Dependiendo de la aplicación del sistema de monitoreo, se puede trabajar con diversos sensores para el diagnóstico estructural. El sistema también cuenta con una unidad de centralización y adquisición de datos, tiene una conexión remota vía Wi-Fi a la estación base [22].

En la ciudad de Taiyuan, en China, Jian Li, Tao Yu, Mingjiang Zhang, Jianzhong Zhang, Lijun Qiao y Tao Wang, en el 2019 propusieron experimentalmente un sensor distribuido de fibra óptica basado en la configuración del circuito Raman y la característica de pérdida de fibra para detectar la temperatura y la grieta de la estructura. Los resultados del experimento indican que el coeficiente de pérdida de fibra mantiene una buena variación lineal entre los rangos de grietas de 1.6 mm y 5.6 mm. Los estudios logran la temperatura y la medición de grietas solo por una fibra [23].

En otro estudio realizado en España, Pintado, Frövel y Güemes, en el 2019 desarrollan y evalúan sensores imbebibles en la estructura de tanques criogénicos y basados en fibra óptica para medir simultáneamente deformación, temperatura y posibles fugas de hidrógeno. Presentan algunos resultados correspondientes a la evaluación de los sensores investigados, se consideró que el más adecuado son en redes de Bragg grabadas en el núcleo de fibras ópticas monomodo, debido a su capacidad de operar en ambientes explosivos, su estabilidad a largo plazo y permitir multiplexación, todos

estos requisitos clave para los sensores embebidos y la aplicación buscada [24].

Ese mismo año, desde Beijing, Sheng Liang, Xiaoting Zhao, Ruijun Liu y Xiaodong Zhang propusieron un nuevo nervio auditivo de fibra óptica del suelo (FANG) en el suburbio basado en el sensor de vibración distribuida de fibra óptica (DVS). Los eventos de vibración se analizan en combinación con las condiciones del terreno para reconocer la máquina que trabaja en la fábrica, el apisonamiento y los vehículos que pasan cerca de diferentes áreas y carreteras. El flujo de tráfico se estima mediante el conteo de vibraciones con un error de conteo que se cree que está en un rango aceptable. La distribución y las tendencias de fluctuación del flujo de tráfico estimado son útiles e ilustrativas para el monitoreo del tráfico y el preaviso de eventos especiales, como un accidente [25].

En otro estudio, Ke Xu, Haoying Li, Yingjie Liu y Yujie Wang, nuevamente desde China, en el 2019, demostraron que los sensores de humedad de fibra basados en absorción trabajan cerca de una longitud de onda de 1950 nm, que es un pico de absorción de agua fuerte. Para el experimento se fabrican dos estructuras de sensores que incluyen una fibra cónica y un resonador de nudos de microfibras. Para el sensor de fibra cónica, se ha logrado una sensibilidad de hasta 0.18 mW /% RH a través de la medición de potencia directa. Para el sensor de nudo de fibra, las variaciones de humedad relativa inducen tanto el cambio de la relación de extinción como el cambio de longitud de onda. El rendimiento del sensor para las dos estructuras también se investiga a diferentes temperaturas de 25 ° C a 45 ° C y los resultados indican un impacto insignificante de las variaciones de temperatura [26].

En Santiago de Chile, José Ignacio Seguel, en el presente año ha dado a conocer diferentes métodos de monitoreo y cuál de estos métodos permite estimar de mejor manera el comportamiento estructural ante acciones externas, describe estos métodos y realiza una serie de recomendaciones para la aplicación de un sistema de monitoreo estructural [27].

Por otra parte, Judit Gómez, Joan R. Casas y Sergi Villalba, en el 2020, realizaron la implementación de un sistema sensor de fibra óptica distribuido (DOFS) en el túnel del metro TMB L-9 en Barcelona para fines

de monitoreo de salud estructural, esta implementación muestra un buen desempeño de esta técnica novedosa en el monitoreo de la tensión a lo largo de las secciones afectadas [28].

En otra investigación, Antoine Bassil, Xavier Chapeleau, Dominique Leduc y Odile Abraham desde Francia en el 2020, estudiaron el mecanismo de transferencia de tensión entre un material huésped y una fibra óptica. Este nuevo modelo de transferencia de tensión se examinó mediante la realización de pruebas de división de cuñas en muestras de hormigón equipadas con cables de fibra óptica empotrados y montados en la superficie. Se lograron estimaciones precisas de las aberturas de grietas próximas a la ubicación del cable óptico, así como el monitoreo de la respuesta del cable óptico siguiendo el parámetro de retraso de tensión [29].

En Alemania, en el 2020, Hinrich Grefe, Dennis Weiser, Maja Wanda Kandula y Klaus Dilger proporcionaron información valiosa sobre la acumulación de tensión y tensión térmica a partir del monitoreo de la deformación dentro de una junta adhesiva durante el ciclo de curado. Para ello se tuvo en cuenta que, integrado en una junta híbrida, se puede controlar el proceso de curado térmico del adhesivo. Esta visión detallada de la articulación ayuda a comprender la deformación y, por lo tanto, también la tensión resultante. El análisis del proceso de deformación establece la base para adaptar las técnicas para reducir la deformación inducida térmicamente y, por lo tanto, el esfuerzo resultante [30].

En la ciudad de Zúrich, en Suiza, Fabian Walter, Dominik Gräff, Fabian Lindner y Patrick Paitz demostraron este año que la detección acústica distribuida (DAS) cierra las brechas de observación críticas de los procesos sismogénicos en el terreno alpino. Las mediciones dinámicas de deformación en un cable de fibra óptica de 1 km de largo en una superficie de glaciar producen sismogramas de alta calidad relacionados con el flujo de glaciares y las caídas de rocas cercanas. Los casi 500 canales de cable localizan con precisión una serie de eventos de deslizamiento de los glaciares y revelan fases sísmicas de las que se pueden derivar las propiedades de espesor y material del glaciar y su lecho. Se demostró el potencial de la tecnología DAS para el monitoreo sísmico de la dinámica de los glaciares y los peligros naturales [31].

Entre tanto, en Italia, en el 2020, Marco Domaneschi, Gianni Niccolini, Giuseppe Lacidogna y Gian Paolo Cimellaro presentaron la evaluación estructural y de daños de una viga de hormigón armado sometida a una prueba de flexión de cuatro puntos hasta obtener acero de refuerzo. El progreso del deterioro se controló utilizando diferentes técnicas de pruebas no destructivas. La deformación se midió mediante sensores ópticos de fibra distribuida, incrustados antes del vertido del hormigón. El inicio y la propagación de las grietas fueron monitoreados por sensores de emisión acústica unidos a la superficie del material. Los resultados del sistema de monitoreo integrado se confirman mediante la observación visual del patrón de grietas real [32].

Nuevamente desde Alemania, en el presente año Julia Guffart, Yannick Bus, Marcel Nachtmann y Markus Lettau, dieron muestra del uso de sensores de retrodispersión de fibra óptica para el monitoreo en línea de la concentración de partículas en dispersiones altamente llenas y sistemas de recubrimiento. Se tuvo en cuenta que al miniaturizar la distancia entre las fibras del transmisor y el receptor a $<600 \mu\text{m}$, la luz ingresada también puede penetrar fracciones de fase dispersa alta de hasta el 60%. Debido a la disposición de medición, se pueden encontrar influencias de transmisión y dispersión en la señal resultante. Una posible descripción de la curva de medición no lineal resultante sigue usando un modelo simplificado [33].

En el 2020 Yong Zheng, Zheng-Wei Zhua, Wang Xiaoa, Quan-Xiang Denga, realizan una revisión sobre el desarrollo de dos sensores de fibra óptica (sensores de rejilla de fibra Bragg (FBG) y fibra basada en la pérdida de doblez), estos sensores permiten la predicción de desplazamiento o tensión, para evaluar la seguridad en estructuras como: presas, túneles e ingeniería de excavación. Los autores realizan un análisis comparativo sobre las ventajas y desventajas de estas tecnologías, teniendo en cuenta variables como la sensibilidad, rango de medición, linealidad, parámetros medidos y precio [34].

Perspectiva nacional.

En Colombia la fibra óptica se ha establecido como uno de los sistemas de transmisión de información de más alta velocidad. En los últimos años se

ha distribuido en todo el territorio del país al punto de llegar directamente a los hogares de las personas con normalidad. Sin embargo, su estudio como sensor es un campo poco explorado, por lo que los artículos de investigación al respecto son escasos y en ellos se suelen encontrar adaptaciones de teorías, técnicas y propuestas que ya han sido probadas en otros países.

Como un primer exponente, se puede observar que en la ciudad de Medellín, Francisco Javier Vélez en el 2015 presenta un método no invasivo para la medición de micro deformaciones en estructuras de concreto usando sensores de redes de Bragg en fibras ópticas adheridas a su superficie, en esta investigación realizan mediciones en losas viales de concreto bajo una carga estática de 10 kN, encontrándose una relación aproximada de 2 : 1 entre la deformación registrada por los sensores y los valores arrojados por una simulación computacional con el método de elementos finitos [35].

Desde otra perspectiva, esta vez en la ciudad de Bucaramanga, Laura Andrea Vargas Carvajal, en el año 2016, realiza una propuesta de monitoreo del comportamiento dinámico para la salud estructural del puente Gómez Ortiz en la vía Girón Zapatocha. Realiza un análisis del cambio en diferentes propiedades de una estructura a partir de las mediciones hechas en un mismo punto en diferentes tiempos, Los factores de operación del puente pueden tener un efecto tanto en las frecuencias como en el amortiguamiento asociado a estas, producto de la interacción dinámica entre los vehículos (carga) y la estructura. Es importante conocer esta variación para que el sistema de monitoreo sea confiable [36].

Nuevamente en el 2016, Jorge Eduardo Aristizabal Gil desarrolló un modelo para monitorear el asentamiento diferencial de fundaciones David Alfredo Ochoa Lotero, en Antioquia. Con ello buscaba establecer un esquema de monitoreo de salud estructural para los asentamientos diferenciales de fundación a partir de las deformaciones unitarias de sus vigas de amarre aferentes. Se tuvo en cuenta que, para realizar el análisis de las deformaciones presentes en una viga de fundación, se debe inicialmente contextualizar sobre el diseño de las mismas y cómo se comportan ante las sollicitaciones de una estructura, todo esto como factores preliminares de análisis. Se evidenció a lo largo del proyecto que para los modelos de software es de vital importancia realizar refinamientos en los que se tengan

en cuenta los posibles factores externos que tendrían influencia sobre los resultados, para validar así las suposiciones iniciales planteadas [37].

El siguiente año, Farid Meléndez Pertuz muestra una perspectiva actual de los métodos y técnicas utilizadas para la protección, monitoreo y control de las estructuras de hidrocarburos. Realiza una revisión sistemática de la literatura para identificar las tendencias sobre la integridad estructural de los sistemas de transporte de hidrocarburos y utilizan el método de elementos finitos permite simular el estado tensional del ducto ante desplazamiento impuesto al suelo [38].

Desde el punto de vista de la ingeniería civil, en Bucaramanga, Gina Paola Ramírez en el 2017 propuso una revisión del estado del arte sobre las diferentes tecnologías de sistemas de instrumentación para el monitoreo permanente de la salud estructural de puentes de concreto utilizados en diferentes estructuras a nivel internacional y nacional. Para ello se desarrollaron 3 criterios de análisis: índice de la condición estructural, capacidad estructural y vida residual o vida útil y evaluación estructural, capacidad de carga y vida útil. Finalmente se concluyó que el monitoreo de la salud estructural se puede definir como la detección in situ de características estructurales por medio del uso de equipos no destructivos que permiten obtener la respuesta de la estructura ante cualquier efecto [39].

Panorama local.

A nivel regional el estudio de sensores de fibra óptica es aún más escaso. No obstante, el tratamiento de la fibra óptica como sensor incluye el estudio de ciertos fenómenos de la fibra que afectan su comportamiento. Algunos de estos fenómenos han sido estudiados en la región y se incluyen en este artículo a pesar de tener una longevidad mayor a cinco años, porque creemos que la falta de artículos en este tema es un dato bastante diciente y debe tenerse en cuenta incluyendo los pocos exponentes encontrados.

En primera instancia, encontramos que, en el 2011, el ingeniero Byron Medina Delgado, junto con Jesús Álvarez Guerrero y Neil Guerrero González, investigaron sobre la compensación digital de la dispersión

cromática en sistemas de comunicaciones ópticas basados en algoritmos CMA y MMSE. Dicha investigación tenía como finalidad compensar los efectos causados por la dispersión cromática en sistemas de comunicaciones ópticas. Para ello se simularon dos sistemas de comunicación ópticos: un sistema de transmisión en banda base y uno de radio sobre fibra (RoF). Las simulaciones se realizaron utilizando dos fibras ópticas monomodo estándar de diferente coeficiente de dispersión. Los resultados de las implementaciones permitieron la evaluación del comportamiento de ecualizadores digitales [40].

Dos años después, en el 2013, Carlos Fernando Lozano Lozano y John Sánchez, igualmente de la ciudad de Cúcuta, determinaron perfiles de velocidad de ondas de corte a partir de registros de microtemblores. Se hizo un análisis de registros de microtemblores para la determinación de perfiles de velocidad de ondas de corte, con la ejecución de arreglos lineales y circulares de estaciones sismográficas, con base en la aplicación del método de autocorrelación espacial modificado. Se determinaron cinco arreglos dispuestos en forma lineal con tiempos de registro de 30 minutos para cada distribución ejecutada. En el arreglo lineal realizado en la ciudad de Cúcuta, se obtuvo un perfil compuesto por siete capas con velocidades entre 300 m/s y 750 m/s [41].

De manera más reciente, esta vez en el año 2017, en la ciudad de Cúcuta, los ingenieros: Karla Cecilia Puerto López, Byron Medina Delgado y Luis Leonardo Camargo Ariza, presentaron un artículo sobre el efecto de la dispersión cromática en un sistema híbrido. Con esto se buscaba la presentación de los resultados de la simulación del efecto producido por la dispersión cromática (CD) en la fibra óptica (RoF) y el efecto del ruido en la transmisión inalámbrica (AWGN); en un sistema de comunicación híbrido. Para simular el sistema de comunicaciones se empleó la herramienta Simulink de Matlab en donde se puede implementar cada una de los bloques de un sistema de comunicaciones, utilizando las librerías del software. En consecuencia, se definió que existe un desfase entre la respuesta en el tiempo de la señal con CD (Dispersión cromática) y sin CD, que cambia con respecto a la longitud de la fibra y que se comporta cíclicamente debido a la dispersión cromática [42].

Ése mismo año, los ingenieros: Karla Cecilia Puerto López, Lully Alejandro García Ortiz, Fabián Gómez López y Dinael Guevara Ibarra, publicaron un modelado de los fenómenos no lineales generados por el Efecto electro-óptico Kerr en una transmisión por fibra Óptica. Lo que se buscó fue presentar un estudio, simulación y evaluación de los fenómenos ópticos no lineales, auto-modulación de fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM), presentes en una comunicación por fibra óptica, y generados por el efecto electro-óptico Kerr. Para realizar el análisis y evaluación de los fenómenos no lineales, se realizaron simulaciones en el software Matlab. Para ello se creó una interfaz gráfica de usuario, la cual modela el canal de fibra óptica, junto con los fenómenos no lineales SPM, XPM y FWM. Con este modelo se evidenció la restricción que impone la constante de atenuación α en la potencia de la señal a medida que se propaga por el canal de fibra óptica [43].

Por último, en Norte de Santander, más específicamente, en el municipio de Ocaña, July Andrea Gómez, Haidee Yulady Jaramillo y Anderson Coronel Rojas en el año 2020 formularon un sistema para detección de fallos críticos en tuberías horizontales. Dicho sistema tuvo por objetivo detectar y diagnosticar fallas en tuberías mediante sistemas de datos estadísticos, inteligencia artificial y sistemas expertos. Definió en sus metodologías que los métodos basados en hardware se pueden clasificar según el tipo de sensores y equipos utilizados para detectar la falla. Entre los elementos más comunes para estas tareas se encuentran: el monitoreo acústico, la fibra óptica, sensores de cable, análisis por vibración entre otros. Gracias a la construcción del prototipo se tuvo más claridad en el análisis de fugas en tuberías y en la utilización de dispositivos que convierten señales analógicas en señales digitales [44].

Sin duda alguna los sensores de fibra óptica han revolucionado la industria del monitoreo estructural. Como se evidencia en los artículos consultados, no solo se trata esta temática desde la ingeniería electrónica, sino que se ve claramente que es un tema donde se impone la interdisciplinariedad, de hecho, el desarrollo de sensores de fibra óptica ha permitido grandes avances en la ingeniería civil. Otro de las disciplinas que suscriben esta temática tiene incidencia en la medicina, ya que la fibra óptica por sus cualidades permite monitorear aspectos que tienen repercusión directa en

la salud de las personas, como por ejemplo el nivel de ruido que puede tener un sector o las consecuencias de las vibraciones de una placa de concreto.

Un aspecto muy importante sobre esta temática lo encontramos en el gran aporte que hay en China para la investigación y el desarrollo de los sensores de fibra óptica. Sobresale entre todos los países aportando información relevante que no solo podemos encontrar en su territorio de manera directa, sino que en artículos internacionales fue común encontrar investigadores de este territorio.

Por el contrario, en Latinoamérica estos estudios sobre monitoreo estructural de vanguardia hacen uso de dinámicas ya aplicadas en otros países más desarrollados, pero no se enfocan en la investigación de nuevos avances en el tema. Este destalle puede tener una razón de ser en que en los países latinoamericanos la fibra óptica apenas ha estado dándose a conocer por sus ventajas en telecomunicaciones en los últimos años, mientras que algunos países del primer mundo ya cuentan con estructuras más robustas y tecnologías que evidencian los recursos destinados al desarrollo tecnológico. En Colombia, por ejemplo, aún se cree que la fibra óptica es un medio costoso para un fin (en telecomunicaciones) que puede suplirse mediante mecánicas más conocidas y más económicas. Ahora bien, mencionar su utilización como sensor, como puede verse en los artículos referidos, es un aspecto que está al margen de la necesidad, ya que en el país es común que se descuide el monitoreo de muchas estructuras debido a temas de corrupción y negligencia, incluso.

Uno de los detalles más importantes del monitoreo estructural a partir de fibra óptica es que a través de las diversas tecnologías desarrolladas se puede usar la fibra para transmitir información (como su uso habitual) a la par que se realizan las mediciones pertinentes para las estructuras. Este punto es bastante ventajoso, ya que puede favorecer a las edificaciones que ya cuenten con sistemas de fibra, ampliando su uso y ahorrándose un despliegue de sensores para su monitoreo, claro está, haciendo las adaptaciones pertinentes.

Por otro lado, el desarrollo de estas tecnologías ha adquirido tanta confiabilidad que su utilización en construcciones nuevas es un aspecto

que se puede tener en cuenta desde el momento del diseño, ofreciendo un monitoreo efectivo de gran variedad de parámetros, como son las vibraciones en placas de concreto, la temperatura en estructuras y el ambiente, el nivel de gas de ciertas naturalezas, la radiación electromagnética, el nivel de ruido, la presión en tanques de almacenamiento de líquidos, entre otros factores importantes que anteriormente requerían de sistemas de medición más complejos y menos efectivos.

Finalmente, es importante destacar que el estudio de la fibra óptica como sensor es un tema que ha ido en aumento en los últimos años. Se ha impuesto como un elemento ventajoso sobre los modelos tradicionales y se distingue en la actualidad como una de las mejores opciones, por no decir la mejor, para garantizar un monitoreo estructural de calidad, eficiente y confiable.

Conclusiones

Podemos concluir que el desarrollo de estos sensores en base a la fibra óptica es un tema innovador que se ha impuesto en la industria de las construcciones desde el punto de vista de la seguridad de las mismas en los campos de la ingeniería civil, la ingeniería de minas y la ingeniería electrónica. En el campo de la ingeniería civil y la ingeniería de minas los sensores de fibra óptica han demostrado que son una tecnología factible en aplicaciones para la localización de fracturas a pequeña escala en las estructuras.

Se evidencian claramente las ventajas de la fibra óptica sobre otros modelos de sensores en monitoreo estructural por su capacidad para vigilar áreas más grandes, su velocidad en la transmisión de información, su capacidad para medir gran variedad de variables importantes afines a las estructuras y no solo una variable por sensor, su utilización en otras tareas como las telecomunicaciones, entre otras. Aunque la tecnología de los sensores de fibra óptica evidencia ventajas en diferentes campos de la ingeniería, en la industria aeroespacial esta tecnología tiene una aceptación lenta, esto se debe a la difícil tarea de cuantificar los daños en las alas de las aeronaves, los métodos actuales que se utilizan en la industria aeroespacial para cuantificar los daños son más eficientes.

Referencias

- [1] C. Randhu, La tecnología de los sensores de fibra óptica. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2001.
- [2] F. Montero de Espinosa, “Fibra óptica y ultrasonidos. Hidrófonos, micrófonos y acelerómetros. Fibra óptica y ensayos no destructivos”, *Revista de Acústica*. Vol. 3I. nos 3 y 4, pp. 1-4, 2020.
- [3] Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte, Actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del puente río Papaloapan. Publicación Técnica No. 524, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt524.pdf>
- [4] Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, J. A. Villanueva Hernández, R. A. Vázquez Sánchez, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, C. M. García Lara, y Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, «Sensores de fibra óptica y sus aplicaciones en el medio ambiente», *Espacio I+D*, vol. 2, no. 3, pp. 94-115, 2013, doi: 10.31644/IMASD.3.2013.a06.
- [5] F. Navarro, “Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes”, *TM*, vol. 27, n.o 4, p. 3, nov. 2015, doi: 10.18845/tm.v27i4.2080.
- [6] M. Maheshwari, S. C. Tjin, y A. Asundi, “Efficient design of Fiber Optic Polarimetric Sensors for crack location and sizing”, *Optics & Laser Technology*, vol. 68, pp. 182-190, may 2015, doi: 10.1016/j.optlastec.2014.11.023.
- [7] T. Kissinger, R. Correia, T. O. H. Charrett, S. W. James, y R. P. Tatam, “Fiber Segment Interferometry for Dynamic Strain Measurements”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 19, pp. 4620-4626, oct. 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2530940.
- [8] Y. Chen, Y. Zilberman, S. K. Ameri, W. J. Yoon, J.-J. Cabibihan, y S. R. Sonkusale, «A Flexible Gastric Gas Sensor Based on Functionalized

Optical Fiber», *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 13, pp. 5243-5248, jul. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2544701.

[9] K. Bremer et al., “Fibre Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Building Structures”, *Procedia Technology*, vol. 26, pp. 524-529, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.065.

[10] B.-O. Guan, L. Jin, L. Cheng, y Y. Liang, “Acoustic and Ultrasonic Detection With Radio-Frequency Encoded Fiber Laser Sensors”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 23, n.o 2, pp. 302-313, mar. 2017, doi: 10.1109/JSTQE.2016.2635035.

[11] L. K. Yi Cheng y P. Agüero Barrantes, “Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes”, 2017, vol. 5, p. 14.

[12] Domaneschi, M., Sigurdardottir, D., y Glisic, B., “Damage detection on output-only monitoring of dynamic curvature in composite decks”, *Structural Monitoring and Maintenance*, vol. 4, n.o 1, pp. 1-15, mar. 2017, doi: 10.12989/SMM.2017.4.1.001.

[13] W. Li, C. Xu, S. Ho, B. Wang, y G. Song, “Monitoring Concrete Deterioration Due to Reinforcement Corrosion by Integrating Acoustic Emission and FBG Strain Measurements”, *Sensors*, vol. 17, n.o 3, p. 657, mar. 2017, doi: 10.3390/s17030657.

[14] C. Zhou, T. Tian, L. Qian, D. Fan, W. Liang, y Y. Ou, “Doppler Effect-Based Optical Fiber Vibration Sensor Using Frequency-Shifted Interferometry Demodulation”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, n.o 16, pp. 3483-3488, ago. 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2592538.

[15] C. Baldwin, “Fiber Optic Sensors in the Oil and Gas Industry”, en *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors*, Elsevier, 2018, pp. 211-236.

[16] J. Serracín y J. Miranda, “Avances en el diseño de un sistema de bajo costo para el monitoreo de la salud estructural, a partir de la medición de deformaciones unitarias, utilizando sensores de fibra óptica.”, *Memorias de Congresos UTP*, pp. 96-102, jun. 2018.

[17] H. Lu y X. Gu, “Fiber Bragg Grating Strain Sensor for Microstructure in Situ Strain Measurement and Real-Time Failure Detection”, en *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors*, Elsevier, 2018, pp. 75-96.

[18] T. Liu et al., “Temperature Insensitive and Integrated Differential Pressure Sensor for Liquid Level Sensing Based on an Optical Fiber Fabry–Perot Interferometer”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, n.o 4, pp. 1-8, ago. 2018, doi: 10.1109/JPHOT.2018.2860899.

[19] C. Lopatin, “Aerospace Applications of Optical Fiber Mechanical Sensors”, en *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors*, Elsevier, 2018, pp. 237-262.

[20] L.-K. Cheng y P. M. Toet, “Innovative Fiber Bragg Grating Sensors for Highly Demanding Applications”, en *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors*, Elsevier, 2018, pp. 175-209.

[21] H. Cheng, S. Wu, Q. Wang, S. Wang, y P. Lu, “In-Line Hybrid Fiber Sensor for Curvature and Temperature Measurement”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, n.o 6, pp. 1-11, dic. 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2944988.

[22] D. F. Ramírez, “Implementación de una estación remota de monitoreo estructural para el seguimiento y control del estado actual de los monumentos de relevancia histórica en el Perú”, (Tesis pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, 2019.

[23] J. Li, T. Yu, M. Zhang, J. Zhang, L. Qiao, y T. Wang, “Temperature and Crack Measurement Using Distributed Optic-Fiber Sensor Based on Raman Loop Configuration and Fiber Loss”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, n.o 4, pp. 1-13, ago. 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2931306.

[24] J. M. Pintado, M. Frövel, y A. Güemes, “Supervisión estructural de tanques criogénicos de material compuesto carbono/epoxi para lanzadores reutilizables”, p. 8, 2005.

[25] S. Liang et al., “Fiber-Optic Auditory Nerve of Ground in the Suburb: For Traffic Flow Monitoring”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 166704-166710, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952999.

[26] K. Xu et al., “Optical Fiber Humidity Sensor Based on Water Absorption Peak Near 2- μ m Waveband”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, n.o 2, pp. 1-8, abr. 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2901290.

[27] J. I. S. Anativia, R. R. Saavedra, F. R. Barrales, y F. H. Prado, “Bases metodológicas para implementación de sistemas de instrumentación y monitoreo de salud estructural en tiempo real de puentes en Chile”, p. 107, 2009.

[28] J. Gómez, J. R. Casas, y S. Villalba, “Structural Health Monitoring with Distributed Optical Fiber Sensors of tunnel lining affected by nearby construction activity”, *Automation in Construction*, vol. 117, p. 103261, sep. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103261.

[29] A. Bassil, X. Chapeleau, D. Leduc, y O. Abraham, “Concrete Crack Monitoring Using a Novel Strain Transfer Model for Distributed Fiber Optics Sensors”, *Sensors (Basel)*, vol. 20, n.o 8, abr. 2020, doi: 10.3390/s20082220.

[30] H. Grefe, D. Weiser, M. W. Kandula, y K. Dilger, “Deformation measurement within adhesive bonds of aluminium and CFRP using advanced fibre optic sensors”, *Manufacturing Rev.*, vol. 7, p. 14, 2020, doi: 10.1051/mfreview/2020011.

[31] F. Walter et al., “Distributed acoustic sensing of microseismic sources and wave propagation in glaciated terrain”, *Nat Commun*, vol. 11, n.o 1, p. 2436, dic. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-15824-6.

[32] M. Domaneschi, G. Niccolini, G. Lacidogna, y G. P. Cimellaro, “Nondestructive Monitoring Techniques for Crack Detection and Localization in RC Elements”, *Applied Sciences*, vol. 10, n.o 9, p. 3248, may 2020, doi: 10.3390/app10093248.

[33] J. Guffart et al., “Photometrische Inline-Überwachung der Pigmentkonzentration hochgefüllter Lacke”, *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 92, n.o 6, pp. 729-735, 2020, doi: 10.1002/cite.201900186.

[34] Y. Zheng, Z.-W. Zhu, W. Xiao, y Q.-X. Deng, “Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring”, *Optical Fiber Technology*, vol. 54, p. 102127, ene. 2020, doi: 10.1016/j.yofte.2019.102127.

[35] F. J. Velez, C. M. Serpa, y N. D. Gomez, “Medicao de micro de formaoes nos blocos viales usando redes de Bragg nas fibras óticas”, p. 12, 2010.

[36] L. A. V. Carvajal, “Propuesta de plan de monitoreo del comportamiento dinámico para la salud estructural del nuevo puente Gómez Ortiz en la vía Girón Zapatoca”, p. 154, 2016.

[37] J. E. A. Gil, “Modelo para monitorear el asentamiento diferencial de fundaciones David Alfredo Ochoa Lotero”, p. 73, 2016.

[38] F. Meléndez, J. G. Coneo, Z. Comas, B. Nuñez, y V. Molinares, “Integridad estructural de tuberías de transporte de hidrocarburos: Panorama actual”, *Revista Espacios*, Vol. 38, no. 17, pp. 10, 2017.

[39] G. P. V. Ramírez, “Sistemas de instrumentación para monitoreo permanente de la salud estructural de puentes en”, p. 72.

[40] J. Álvarez, B. Medina, C. M. Serpa y N. Guerrero, “Compensación Digital de la Dispersión Cromática en Sistemas de Comunicaciones Ópticas Basados en Algoritmos CMA y MMSE”,. 2011.

[41] C. Lozano, J. Sánchez, y M. Bermúdez, “Determinación de perfiles de velocidad de ondas de corte a partir de registros de microtemblores en las ciudades de Cúcuta y Neiva, Colombia”, 2013.

[42] K. C. P. López, B. M. Delgado, y L. L. C. Ariza, “Efecto de la dispersión cromática en un sistema híbrido”, *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, No. 24, 2017. doi: 10.24054/16927257.v24.n24.2014.2344.

[43] F. G. López, L. A. G. Ortiz, K. C. P. López, y D. G. Ibarra, “Modelado de los fenómenos no lineales generados por el efecto electro-óptico kerr

en una transmisión por fibra óptica”, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA), vol. 2, no. 28, 2017.doi: 10.24054/16927257.v28.n28.2016.2469.

[44] J. A. Gómez, H. Y. Jaramillo, y A. C. Rojas, “Sistema para detección de fallos críticos en tuberías horizontales”, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1, no. 35,pp. 44-51, 2020.