

Structural Health Monitoring Systems of Civil Structures: a literature review.

Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Estructuras Civiles: una revisión bibliográfica.

Autores:

Bacuilima Illescas, Mauricio Andrés
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca-Ecuador

 mauricio.bacuilima.39@est.ucacue.edu.ec

 <https://orcid.org/0000-0003-1976-5612>

Barbecho Chuisaca, Juan
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Maestría en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca-Ecuador

 jbarbecho@ucacue.edu.ec

 <https://orcid.org/0000-0002-3524-4019>

Citación/como citar este artículo: Bacuilima, M. y Barbecho, J. (2022). Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Estructuras Civiles: una revisión bibliográfica. MQR Investigar, 6(3), 1641-1667.
<https://doi.org/10.56048/MQR20225.6.3.2022.1641-1667>

Fechas de recepción: 30-AGO-2022 aceptación: 15-SEP-2022 publicación: 15-SEP-2022

 <https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigador.com/>

Resumen

En la actualidad el monitoreo de salud estructural (SHM) es considerado como un campo de investigación emergente, este permite identificar el estado de salud de una estructura a través del monitoreo del comportamiento estructural, el sistema identifica defectos y daños de una estructura de manera temprana, sin importar que la estructura se encuentre en etapa de construcción o funcionamiento. SHM ha sido aplicado en múltiples estructuras a nivel mundial, desde hace muchas décadas, lo que ha permitido la investigación y el desarrollo de tecnologías eficientes y accesibles. Los resultados obtenidos con la aplicación de SHM han demostrado que es una herramienta que permite una operación segura y una administración eficiente de la estructura, ya que al tener un diagnóstico temprano del estado de salud es posible enfocar los esfuerzos de mantenimiento en los defectos y daños identificados antes de que estos sean visibles a los métodos convencionales, optimizando de esta manera el uso de recursos utilizados en el mantenimiento y potenciación de la infraestructura. Las principales aplicaciones se las ha realizado en estructuras importantes donde no es económicamente viable su reemplazo, sin embargo, su aplicación también es posible en estructuras pequeñas.

Palabras claves: SHM, monitoreo, salud estructural, puente, edificio, túnel.

Abstract

Currently structural health monitoring (SHM) is considered an emerging field of research, this allows to identify the state of health of a structure through the monitoring of structural behavior, the system identifies defects and damages of a structure early, regardless of whether the structure is in the construction or operation stage. SHM has been applied in multiple structures worldwide, for many decades, which has allowed the research and development of efficient and accessible technologies. The results obtained with the application of SHM have shown that it is a tool that allows a safe operation and an efficient administration of the structure, since by having an early diagnosis of the state of health it is possible to focus maintenance efforts on the defects and damages identified before these are visible to conventional methods, thus optimizing the use of resources used in the maintenance and enhancement of the infrastructure. The main applications have been made in supporting structures where their replacement is not economically viable; however, their application is also possible in small structures.

Keywords: SHM, monitoring, structural health, bridge, building, tunnel.

Introducción

SHM es un término que hace referencia a la implementación de un sistema para la identificación de daños, fallas o defectos en infraestructura civil, mecánica o aeroespacial antes de que estos alcancen estados críticos. Esto implica la observación periódica de una estructura o sistema estructural junto a la medición de la respuesta dinámica frente a un estímulo externo, el análisis estadístico de las lecturas obtenidas por el sistema permite determinar el estado actual de salud de la estructura o sistema estructural (Hou et al., 2018). Los sistemas SHM tienen la finalidad de determinar la condición y el comportamiento de la estructura a través del tiempo, esto se lo hace mediante la recolección, procesamiento, interpretación y análisis de lecturas de los parámetros más representativos del estado de salud de una estructura (Felipe & Mejía, 2010).

En la actualidad, el SHM se ha convertido en un campo de investigación emergente, ya que su tecnología permite incorporar nuevos métodos constructivos, la construcción de estructuras livianas y la introducción de un nuevo concepto de seguridad (Lammering, 2013).

Las autoridades, funcionarios, constructores, diseñadores y demás personas relacionadas a la infraestructura civil, han reconocido durante mucho tiempo la importancia del SHM, en virtud de que cada vez se construyen estructuras más grandes y complejas, generándose así, la necesidad de desarrollar sistemas SHM para conocer el comportamiento y rendimiento de las estructuras a lo largo del tiempo. Las aplicaciones a las que actualmente se les ha enfocado a los sistemas SHM es a la evaluación de desempeño estructural, la identificación de daños y el monitoreo permanente (AlHamaydeh & Aswad, 2022).

Estructuras civiles de gran envergadura como puentes, edificios, plantas hidroeléctricas, plantas nucleares, plantas de generación térmicas, entre otros; comprenden estructuras cuyo reemplazo no es económicamente viable; es por ello que el uso de sistemas SHM permite optimizar los procesos de mantenimiento de las estructuras, incrementando su tiempo de vida útil, ya que al conocer el estado de la estructura al instante de la toma de lecturas, se puede ejecutar acciones inmediatas de intervención enfocadas directamente al diagnóstico (Farrar & Worden, 2012). Garantizar una operación segura de las estructuras, desarrollando planes mantenimiento y planificándolos de manera óptima, plantea un desafío tecnológico a diferentes niveles desde la selección y disposición de sensores adecuados, así como el diseño de un sistema de evaluación de salud estructural (Ko & Ni, 2005).

En el SHM el cambio de las propiedades de los materiales, así como el cambio de las condiciones geométricas y de conexión de los sistemas estructurales y la modificación de las condiciones de contorno que afecten de manera negativa el rendimiento del sistema es considerado como el concepto general del daño.(Farrar & Worden, 2006). Los daños que aparecen a nivel de material se los denomina defectos, los daños a nivel de componente y posteriormente a nivel de sistema aparecen cuando los defectos crecen bajo escenarios de carga apropiados.

Un sistema SHM instalado a largo plazo o estacionario permite obtener información periódica actualizada sobre el comportamiento de la estructura a lo largo del tiempo, de esta manera se puede distinguir la evolución del estado de salud de la estructura frente a las condiciones de envejecimiento de sus materiales y la degradación de sus propiedades por condiciones operativas. Bajo condiciones extremas como un evento sísmico de gran magnitud los SHM podrían utilizarse para identificar de manera rápida y casi en tiempo real el rendimiento de la estructura durante el evento, así como su integridad post sismo. Esta cualidad complementada con las evaluaciones visuales de los daños producidos por un terremoto, podrían resultar una herramienta muy útil para identificar rápidamente el estado de salud de la estructura y determinar si es posible su reocupación inmediata, reforzamiento o si es necesaria su demolición (Farrar & Worden, 2012).

El SHM junto al uso del almacenamiento de información en nube y a la tecnología IoT (Internet of things) se están convirtiendo en una herramienta económica e indispensable para garantizar la operación segura y confiable de importantes estructuras como presas, hospitales, puentes, centrales de generación eléctrica, túneles entre otros (Qian et al., 2022).

Desarrollo

Presas

Debido al desastre producido en el Reino Unido en 1984, originado por la falla parcial de la presa Carsington de terraplén de 30m donde fallecieron cerca de 254 personas, este país desarrolló una legislación donde se exige realizar inspecciones regulares a la infraestructura. Esta legislación permite que un ingeniero se pueda certificar como supervisor, siendo este el responsable de la vigilancia continua de la presa y el embalse, además de las actividades de

mantenimiento y la interpretación de los datos operativos y de monitoreo (Brownjohn, 2007). Por lo tanto, debido a la importancia de estas estructuras y a los grandes efectos negativos que podrían causar sus fallas, las presas han sido históricamente monitoreadas, siendo aquí donde desarrollaron los primeros sistemas SHM.

Son varios los países que han desarrollado su legislación para el monitoreo de la salud de las presas y embalses, a nivel internacional existe un organismo conocido como la Comisión Internacional de Grandes Presas, constituido por las comisiones nacionales de los diferentes países miembros, esta organización tiene la misión de liderar el establecimiento de los estándares y pautas para garantizar que las presas se construyan y operen de manera segura, eficiente, económica y ambientalmente sostenible y socialmente equitativa. En Ecuador actualmente no existe una legislación o normativa que regule el monitoreo de las presas y embalses, por lo cual, en cada una de estas estructuras se manejan criterios diferentes para la determinación de la salud estructural y en algunos ni siquiera se tiene un plan de seguimiento.

Varios de los criterios del monitoreo de las presas son aplicables a los SHM actuales como: (i) Cantidad y distribución optimizada de sensores que brinden una información confiable respecto a la seguridad de las presas complementadas con las inspecciones visuales, (ii) recolección automatizada de datos y (iii) interpretación de la información obtenida con relación a los patrones de comportamiento establecidos para una operación segura. Tradicionalmente, el supervisor de monitoreo es quien evalúa las variaciones de los patrones de comportamiento de las presas, para lo cual es necesario que este tenga un conocimiento profundo de la presa y del comportamiento estructural (Salvaneschi et al., 1996). El desarrollo actual de los sistemas SHM está enfocado en automatizar esta evaluación; hoy en día ya existen aplicaciones comerciales que han sido implementadas en diferentes presas del mundo.

En presas se da especial importancia al monitoreo de respuesta dinámica, sobre todo porque los eventos sísmicos de gran magnitud son una seria amenaza a la seguridad de estas estructuras. Los sistemas SHM permiten entender la respuesta de desempeño sísmico de las presas, ya que brindan información valiosa para la calibración de modelos y simulaciones. La estimación de los parámetros fundamentales de vibración de las presas puede ser obtenido a través de las

vibraciones ambientales o por medio de una excitación externa forzada, la información conseguida puede ser utilizada como un indicador de la salud estructural (Xu et al., 2012).

Puentes.

Tradicionalmente, la implementación de estrategias de monitoreo de puentes tiene el objetivo de entender su comportamiento y en casos específicos la información se utiliza para calibrar modelos y simulaciones de respuesta de carga (Ko & Ni, 2005)(Naeim, 2013)(Ubertini et al., 2013)(Costa et al., 2013) .

Una de las primeras estrategias sistemáticas documentadas del monitoreo de puentes se describe en (Carder et al., 1937), donde se llevó un estudio de periodos naturales de vibración de dos puentes en San Francisco, ejecutando diversas campañas de medición durante su fase de construcción, para determinar las probabilidades de daño durante la resonancia entre el suelo y la estructura en el momento de un terremoto.

En el corto de tiempo de vida del puente Tacoma Narrows, se realizaron mediciones de vibración con un enfoque de la salud estructural, antes de que este fracasara por los esfuerzos producidos por el viento (University of Washington Structural Research Laboratory., 1949). Este análisis es de gran importancia en virtud de que hasta la actualidad se realiza monitoreo de los puentes colgantes de gran longitud debido a la susceptibilidad generada por los esfuerzos generados por las cargas de viento.

Al igual que lo sucedido en las presas, los programas de monitoreo permanente de puentes de gran longitud se han convertido en sistemas SHM, y estos han sido implementados en puentes de gran importancia, en países como Japón, China, Italia, Portugal, Estados Unidos, Suiza. Debido a la importancia que tienen los puentes de gran longitud, estos requerirán una alta densidad de sensores para identificar daños y deterioros significativos, sin embargo, si estos se los distribuye de manera óptima se podría reducir significativamente el número y continuar recibiendo información confiable (Ko & Ni, 2005)

Estructuras en alta mar.

El desarrollo de la infraestructura en alta mar tuvo su auge en los años 70, gracias a la crisis energética y al descubrimiento de grandes reservas de petróleo. Las instalaciones eran fabricadas principalmente de hormigón y acero, las cuales llegaban a alcanzar profundidades aproximadas de 150m, estas estructuras al verse sometidas a cargas ambientales extremas generalmente necesitaban de inspecciones periódicas para monitorear su integridad, actividades que resultaban muy costosas y peligrosas, por lo cual creció el interés en los sistemas SHM basados en vibraciones (Coppolino & Rubin, 1980). De igual manera, se pudo probar la eficiencia de los sistemas de medición a través de pruebas realizadas en la plataforma West Sole WE, donde se procedía a retirar de manera intencional elementos y luego se medía la respuesta dinámica de la estructura frente a la excitación ambiental, de esta manera se pudo determinar cuan beneficioso resultaba el sistema para el control de capacidad estructural y el potencial de ayuda para las inspecciones (Kenley & Dodds, 1980).

Posteriormente, aparecieron una amplia gama de técnicas para la identificación de los parámetros modales como el Análisis Modal Operacional, el cual ha permitido obtener resultados fiables del desempeño dinámico de las estructuras (Peeters & Roeck, 2001), sin embargo, un problema particular de las plataformas en alta mar, es que no son estructuras estacionarias y que continuamente sufren cambios estructurales ya sea por ampliaciones o por eliminación de secciones lo que modifica sus propiedades de masa, así como cambios en sus esfuerzos ya sea por incremento o decremento de cargas. De igual manera puede existir errores en las mediciones del sistema por la modificación de la estructura y las cargas, sin que estas sean actualizadas en el sistema SHM.

Torres y edificios.

El monitoreo de edificios se desarrolló sobre la necesidad de entender el comportamiento dinámico de las estructuras durante terremotos y tormentas. Las pruebas dinámicas de vibración permitieron conocer la respuesta dinámica de baja amplitud (Hudson, 1977), sin embargo, es importante poder conocer la respuesta dinámica de alta amplitud de los edificios, la misma que

solo puede ser medida durante eventos sísmicos considerables, es por ello, por lo que se han implementado sistemas SHM estacionarios.

En el estado de California de los Estados Unidos, el California Strong Motion Instrumentation Programme (CSMIP), maneja un programa para la instalación de una red de instrumentos para el monitoreo de grandes eventos sísmicos, información que se difunde a sismólogos, ingenieros, gobiernos locales, personas relacionadas a la construcción y personal de emergencia, los datos son utilizados para el desarrollo de códigos de la construcción, diseño, planificación y la organización de respuesta de emergencia en caso de desastres, este programa se financia a través de los impuestos relacionados a la construcción y el aporte de entidades estatales y federales (Conservation, 2022). El lograr identificar el desempeño estructural a gran escala siempre ha sido el objetivo fundamental de la investigación en la ingeniería sísmica.

La mayoría de los sistemas de monitoreo instalados en edificios tienen el objetivo de mejorar el entendimiento de los mecanismos de carga y respuesta durante eventos sísmicos y excitaciones ambientales extremas como cargas de viento (Hou et al., 2018), permitiendo de esta manera obtener los parámetros fundamentales de vibración e identificar el desempeño sísmico de las estructuras, de esta manera es posible también evaluar también el comportamiento de los dispositivos de disipamiento sísmico, en sistemas SHM estacionarios es factible determinar daños en los elementos y optimizar los trabajos de mantenimiento a través de un enfoque de mantenimiento por condición.

Túneles y excavaciones.

El objetivo principal del monitoreo de túneles es garantizar que la deformación del túnel se mantenga dentro de los rangos permisibles, asegurando de esta manera su estabilidad y de las estructuras contiguas. Si bien es factible dentro de un túnel medir tensiones y esfuerzos, el enfoque de estabilidad está primordialmente dirigido a las deformaciones. El monitoreo de la estabilidad de las estructuras subterráneas durante su construcción suele ser temporal, sin embargo, durante la operación también cuentan con sistemas de monitoreo permanente (Ran et al., 2011).

Existen varios ejemplos de sistemas de monitoreo de salud estructural estacionarios, uno de los más destacables es el realizado en el túnel Seikan (Ikuma, 2005), donde se recabó información del comportamiento del túnel durante varios años, se monitorearon parámetros como filtraciones, análisis químico del agua de las filtraciones, aceleraciones, análisis químico de las inyecciones, evaluación del recubrimiento de concreto. Se realizó el monitoreo de varias secciones transversales del túnel siempre evaluando que las deformaciones del recubrimiento de hormigón se encontraran dentro de los límites máximos permitidos. Se realizó también la medición de los esfuerzos en el recubrimiento de hormigón utilizando sensores de tensión de alta sensibilidad, durante un terremoto las variaciones de los esfuerzos de tensión fueron medidos, estos sensores también permitieron comprobar la elongación y contracción del concreto. La información obtenida durante los catorce años en el túnel Seikan fue confiable y permitió concluir que la estructura del túnel se encontraba en buenas condiciones.

Resultados y discusión

Se presentan casos de estudio recientes que evidencian la experiencia de los autores en SHM, destacando la relevancia y limitaciones del sistema e ilustrando la aplicación de tecnologías recientes.

Sistemas de adquisición de datos.

Los casos de estudio que se presentan a continuación representan la experiencia de los autores en el monitoreo de salud estructural, destacando la relevancia y las limitaciones de SHM e ilustrando la aplicación de las recientes tecnologías.

Centro financiero Ping-An Finance.

Varios estudios se han realizado sobre el centro financiero Ping-An Finance(He et al., 2018)(Li et al., 2017), este es el cuarto edificio más alto del mundo con una altura total de 600m, el cual



tiene un sistema integrado de SHM compuesto de 553 sensores, diseñado para monitorear el comportamiento estructural y las excitaciones externas del edificio durante la etapa de construcción y servicio. Este mega rascacielos tiene un sistema estructural tube-in-tube, la estructura externa está conformada de 8 columnas de hormigón armado con acero conectadas por siete cerchas de banda, mientras que el núcleo interno es formado por muros de corte de hormigón armado. (Li et al., 2018).

El sistema SHM del edificio es la conjunción de diversas tecnologías multidisciplinarias, en las que incluye la red de sensores, la transmisión y procesamiento de señales, el cálculo y análisis, el desarrollo del software y finalmente la evaluación de la salud estructural. El sistema está estructurado en formato modular, el cual se divide en siete módulos de subsistema: sistema de medición de sensores SMS, sistema de adquisición y transmisión de datos DATS, sistema de procesamiento y estimación de datos DPES, sistema de gestión de datos DMS, sistema de soporte y protección SPS, sistema de evaluación de salud estructural SHAS y sistema de control de software SCS.

En la red de sensores se instalaron 13 diferentes tipos, esta amplia red permitió monitorear el rendimiento estructural durante la etapa de construcción y actualmente en servicio realiza en seguimiento la evolución de la salud estructural del edificio a lo largo de su tiempo de vida útil. Durante la etapa de construcción se instalaron 503 sensores e instrumentos y para la fase de operación estos incrementaron a 553 sensores (Tabla 1).

Tabla 1

Detalle de sensores instalados en Ping-An Finance, FBG: Red de Bragg en fibra

Fuente: Elaboración Propia

Tipo de sensor	Parámetro Monitoreado	Etapa		Fabricante	Modelo
		En construcción	En servicio		
FBG Sensor de deformación	Deformación	304	304	Ningbo Technology Ltd, China	CB-FBG-GFRP-W01

FBG Sensor de temperatura	Temperatura	76	76	Ningbo Technology Ltd, China	FBG-T-01
Inclinómetro de fibra óptica	Inclinación	32	32	HBM Fiber Sensing, Germany	FS6400
Estación Total	Inclinación, Nivelación, and Elevación	1	1	Leica Geosystems, Georgia	TS30
Niveles	Asentamiento total	1	1	Leica Geosystems, Georgia	DNA03
Sismografo	Movimiento inducido eventos sísmicos	1	1	Earthquake Administration, China	GDQJ-II
Acelerómetro	Aceleración	N/A	10	Jewell Instruments, New Hampshire	LSMP-2
Sensor de presión de aire	Presión inducida por el viento	N/A	40	Setra Systems, Massachusetts	Setra268
GPS	Desplazamientos e Inclinación	2	2	Leica Geosystems, Georgia	GMX902GG
Estación climatológica	Temperatura, humedad, lluvia y presión del aire.	1	1	Guangdong Meteorological Service, China	WP3103
Anemómetro	Velocidad del viento y dirección.	1	1	Gill Instruments, Hampshire, United Kingdom	Wind Master PRO
Medidor de esfuerzo en refuerzo	Esfuerzo en el refuerzo.	54	54	GEOKON, New Hampshire, USA	BGK-FBG-4911-400
Manómetros de presión	Presión del suelo.	30	30	GEOKON, New Hampshire, USA	BGK-FBG-4800
Total		503	553		

El sistema SHM monitoreó los acortamientos axiales de los elementos verticales producidos por efectos de contracción y fluencia del hormigón, la secuencia de construcción y las diferentes cargas en los miembros estructurales verticales. En la etapa de diseño se previó una “reserva de elevación” que se esperaba sea igual a la deformación vertical acumulada después del primer año de servicio. Para ello se establecieron modelos de elementos finitos a las 25 fases de construcción consecutivas. De igual manera el sistema en etapa de operación del edificio obtuvo lecturas de las respuestas dinámicas generadas por la excitación del tifón Nida,

El SHM del edificio permitió conocer la evolución del comportamiento de la estructura desde su construcción hasta su puesta en servicio, su diseño modular garantiza una independencia eficaz de cada subsistema, la alta cantidad de sensores proporcionó abundante información de

la respuesta estática y dinámica de la estructura, lo que la convierte en un buen referente a escala para edificios altos.

Puente Hell Bridge Test Arena

El Hell Bridge Test Arena, es un puente de armadura de acero, con un vano principal de 35m y un ancho de 4.5m, el puente estuvo en operación por más de 100 años y era parte del recorrido de un tren. Posteriormente este fue retirado y trasladado a tierra, donde lo colocaron sobre cimientos de hormigón, en la actualidad el puente sirve como un laboratorio a gran escala para la investigación y el desarrollo de la identificación de daños y SHM(Svendsen et al., 2021).

El sistema SHM consiste en tres controladores cRIO-9036 para adquirir las mediciones de 58 acelerómetros. Estos sensores se dividieron en dos grupos, el primer grupo estaba compuesto de 40 acelerómetros de un solo eje (Dytran 3055D3) ubicados debajo del tablero del puente para medir la respuesta vertical, el segundo grupo estuvo conformado de 18 acelerómetros triaxiales (Dytran 3583BT y 3233A) ubicados en las paredes norte y sur del puente para medir las respuestas verticales y laterales. Se utilizó un agitador de vibración modal (APS 420) ubicado a la mitad de la luz para excitar de manera vertical al puente.

Se consideraron diez diferentes tipos de estado estructural y se clasificaron en 2 grupos, estados no dañados y estados dañados, se simularon los estados en la estructura retirando pernos de las conexiones. Los daños calificados como altamente avanzados representaban una pérdida total de la funcionalidad de la conexión y por ende a una redistribución de las fuerzas, situación que resultó exigente para la estructura, pero no crítica para la integridad debido a la redundancia inherente del diseño del puente.

Se aplicó un algoritmo de aprendizaje automático con un modelo autorregresivo para extraer las características sensibles al daño de los datos de series temporales, se comparó un algoritmo

de aprendizaje automático no supervisado con cuatro supervisados. El estudio realizó importantes observaciones como que se pueden identificar daños estructurales relevantes realizando una clasificación de los daños, la clasificación de los daños depende en gran medida del algoritmo de aprendizaje que se aplique y por último que un estudio para la identificación de diferentes tipos de daños basado en la precisión de los clasificadores muestra que el daño a las conexiones de refuerzo lateral a menudo se clasifica erróneamente, seguido por el daño a las vigas transversales de largueros, siendo el resto de tipos de daños los que se clasifican perfectamente. Esta información resulta valiosa para el diseño de la configuración y disposición de los instrumentos y sensores, entendiendo cuales son los daños difíciles de detectar y aquellos que no lo son.

El objetivo principal de la investigación del SHM en el puente era disminuir los falsos positivos para evitar gastos económicos innecesarios y falsos negativos para salvaguardar la integridad de los usuarios. En puentes el SHM debe enfocarse principalmente en un algoritmo de aprendizaje no supervisado dado que generalmente solo se dispone de información del estado no dañado de la estructura. El estudio demostró que el daño estructural en puentes que generalmente es causado por fatiga se puede establecer utilizando aprendizaje no supervisado.

Presas en cascada rio Sava.

La investigación se centró en la cuenca baja del rio Sava en Eslovenia, donde existe un sistema de presas en cascada, estas fueron construidas entre los años 1993-2017: Vrhovo HPP (1993), Boštanj HPP (2006), Arto-Blanca HPP (2009), Krško HPP (2012), and Brežice HPP (2017). Todas las presas tienen un diseño similar conformadas por 2 terraplenes en sus estribos y en el centro una sección de presa de hormigón de gravedad, el objetivo principal de todas es la generación eléctrica, todas las centrales tienen turbinas Kaplan.

El estudio comprendió de varias etapas, pero el mayor trabajo se centró en la medición de vibraciones en Brežice HPP, el experimento comenzó durante la fase de construcción y se prolongó durante 3 años. Las propiedades dinámicas se las determinaron a partir de la respuesta

dinámica de la estructura frente al estímulo de las vibraciones generadas por los trabajos de construcción. En la siguiente etapa, las pruebas de puesta en marcha del equipo electromecánico proporcionaron la fase experimental más extensa.

La incorporación de monitoreo dinámico en las actividades regulares de las presas de la cuenca baja del río Sava se basa en la experiencia adquirida en la fase experimental y acorde a las recomendaciones de (ICOLD, 1994) donde se realiza una síntesis de la evolución del envejecimiento de las presas y cuáles son las fallas más comunes en estas, permitiendo de esta manera comprender cuáles son los parámetros principales a ser monitoreados. El objetivo es implementar un sistema de monitoreo dinámico, con costos adicionales mínimos y en la medida de lo posible con el uso de equipos de monitoreo ya instalados en la presa, con la finalidad de comprender el efecto de las cargas operativas en el envejecimiento estructural.

Se puede estimar la condición de los materiales con los cuales fueron construidas la presa observando el comportamiento dinámico de la estructura. Cada una de las presas tiene características modales y rendimiento dinámico únicos, que solamente cambian cuando se modifica propiedades como masa, rigidez o geometría de la estructura, por lo tanto, si existe un daño que modifique algunas de las propiedades también cambiarían los parámetros modales. En teoría si conocemos el comportamiento dinámico de las presas en los estados de construcción y de las pruebas electromecánicas, cualquier cambio en estas se consideraría signo de falla.

Al observar la vibración de la estructura, podemos estimar la condición del material incorporado en la etapa construcción. Cada estructura tiene características modales únicas que cambian solo en caso de que se altere la masa, rigidez o geometría de la estructura. Por lo tanto, si el daño estructural causa una disminución en la rigidez, los patrones de vibración modal de la estructura también cambiarán. En teoría, si conocemos la respuesta del sistema en estado sonoro, con la comparación de los dos estados, los cambios observados en las propiedades modales son indicadores de daño estructural. Por lo tanto, al realizar un monitoreo y observación de vibraciones a largo plazo, podemos evaluar activamente la condición de la estructura de la presa. Debido a la operación con presas, la estructura siempre está sujeta a alguna fuerza de excitación (operación de turbina, reservorio, etc.). Por lo tanto, SHM puede ser implementado, sin interrumpir la operación normal de la central, ya que para un diagnóstico únicamente se utilizaría la vibración ambiental (Klun & Kryżanowski, 2022).

Línea 9 del metro de Barcelona.

La línea 9 del metro de Barcelona conecta las áreas metropolitanas perimetrales con el servicio de metro de Barcelona y está totalmente automatizada, este túnel tiene un diámetro de 11.60m con un recubrimiento de 35cm de espesor, lo que permite que los trenes circulen en dos niveles separados por una losa suplementaria

Sobre la línea 9 se construyó un edificio residencial situado ligeramente por encima del trazado del túnel. Dado el riesgo que generó la construcción de la nueva edificación sobre el túnel de la línea 9 del metro de Barcelona, se implementó un sistema de distribución de sensores de fibra óptica (DOFS) con una resolución espacial de 1cm unido al revestimiento del túnel, con lo cual se pretende monitorear las deformaciones producidas por los trabajos de construcción de la nueva edificación.

Las deformaciones a lo largo del túnel fueron monitoreadas a través de un DOF de 50 m de largo en conjunto con un interrogador de sensores ODiSI-A. El post-procesamiento dio como resultado mediciones de deformaciones a lo largo de toda la longitud de la fibra con una resolución de 1 cm a diferentes intervalos de tiempo. La condición inicial del revestimiento de concreto se encontraba en compresión, por lo tanto, las lecturas de compresión y tensión que registra el sistema de monitoreo representan una variación de su condición inicial, sin embargo, se debe considerar que cuando el sistema presenta lecturas de tensión esto significa que el anillo de hormigón se está descomprimiendo.

Análisis comparativo de sensores.

Los sensores principales son aquellos que miden deformación unitaria y los que miden los parámetros dinámicos.

Sensores de medición de deformación unitaria en SHM

Uno de los principales parámetros que monitorean los sistemas SHM en condiciones estáticas es la deformación unitaria, el cambio de este parámetro puede ocurrir por diferentes motivos, como variaciones en las cargas y la temperatura(Gómez et al., 2021). Existe un amplio número

de sensores para medir los cambios en este parámetro, sin embargo, el principal problema que presentan es la perturbación ambiental generada por el cambio de temperatura, por consiguiente, es complicado diferenciar los cambios de deformación unitaria generados por variación de temperatura y los generados por otros parámetros.

Existen tres principales tipos de sensores eléctrico (Narayanan & Subramaniam, 2017), inalámbrico (Herrasti et al., 2016) y óptico (Gómez et al., 2021). Los de tipo eléctrico son económicos y adecuados para condiciones de carga viva, tienen la capacidad de medir la temperatura y deformación unitaria, pero debido a la tasa de muestreo limitada no son adecuadas para un monitoreo a largo plazo. Los sensores inalámbricos no requieren de cableado para la transmisión de los datos, pero el tiempo de recolección de la información está limitada al tiempo de autonomía de la batería. Los sensores de fibra óptica no se ven afectados por el ruido e interferencias electromagnéticas y se integran muy bien a la estructura y seguimiento a largo plazo (Warsi et al., 2019).

Medición de parámetros dinámicos en SHM

El monitoreo de las propiedades dinámicas de las estructuras permite determinar sus parámetros modales, esto se lo hace a través del monitoreo de la aceleración de la estructura en condiciones de cargas dinámicas y se lo logra mediante el uso de acelerómetros.

Los acelerómetros son parte fundamental de un sistema SHM, permiten identificar la respuesta dinámica de la estructura y la información es utilizada para determinar un diagnóstico del estado de salud de la estructura, en virtud de que generan una gran cantidad de información. Sobre estos sensores se han desarrollado varios dispositivos. Los acelerómetros Inalámbricos son económicos y fiables para la monitorización remota dentro del alcance del sensor, tienen una muy buena precisión y deben recargarse periódicamente (F. Liu et al., 2014).

Se han desarrollado sistemas de monitoreo geodésico para la vigilancia de estructuras, estos utilizan sistemas de navegación mundial por satélite (GNSS) o sistemas de posición global (GPS) (Im et al., 2013). Este sistema mide los movimientos de los puntos monitoreados en tres direcciones en condiciones dinámicas y estáticas, en el dominio de la frecuencia y el tiempo. El

monitoreo con GPS de estructuras de gran altura se las puede llevar a cabo con ayuda de tecnología RTK, de esta manera se mantiene un punto de control estacionario como referencia con las coordenadas predeterminadas. Para obtener las propiedades dinámicas se introdujo un sistema de sensores integrado, el sistema contiene GPS y acelerómetros y ha demostrado aumentar la productividad del sistema SHM(Han et al., 2016).

Los investigadores han centrado su atención en el desarrollo de acelerómetros MEMS, basados en el principio de funcionamiento de los acelerómetros capacitivos, piezoeléctricos y piezorresistivos (Ribeiro & Lameiras, 2019) (Zhang et al., 2022). El acelerómetro MEMS con un ancho de banda pequeño y electrónica de acondicionamiento de señal simple, ha sido diseñado para mejorar la sensibilidad y el consumo de energía, manteniendo un ruido de piso sumamente bajo; esta tecnología se puede utilizar de manera muy eficiente en redes de sensores inalámbricos.(Ribeiro & Lameiras, 2019)

Artículos como (Das & Saha, 2018) han realizado un análisis comparativo de diferentes tipos de sensores de deformación unitaria, aceleración, corrosión y Fiber Bragg Gratings (FBG) en función de su tipo, materiales usados, tipo de detección de daño, principio de funcionamiento ventajas y limitaciones, los cuales se pueden resumir en la Tabla 2

Tabla 2

Análisis comparativo de sensores

Sensores	Tipo	Material	Tipo de Daño	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Sensores basados en imagen	Video y fotografía digital	Cámaras digitales de alta resolución	Detección de patrones de grietas y su evolución	Superposición de imágenes para comparar daños	Sin contacto, no requiere información de frecuencia formas modales.	Sensible a la luz circundante, limitaciones de por ángulos de visión de la cámara y obstáculos que puedan presentarse.
Galga extensiométrica de película delgada	Eléctrica cableada	Película metálica delgada	Deformación unitaria	Cambios de deformación	Económico y Compacto	Sobreestimación de la deformación teórica, distorsión por interferencia electromagnética.
Sensor de lámina gruesa de cerámica	Eléctrica cableada	Material piezorresistivo	Deformación unitaria	Cambio en el voltaje por efecto piezorresistivo	Económico, durable, preciso.	Necesita calibración por efectos atmosféricos, lo

			o grueso de cerámica					que no siempre es factible.
Sensor de grafeno basado en carbono	Eléctrica cableada	Nanomateriales de Carbono Grafeno	Deformación unitaria	Cambio de energía banda electrónica	de la alta sensibilidad.	Liviano, compacto,		Alto costo
Sensor de deformación base de cemento	Eléctrica cableada	Cemento	Deformación unitaria	Cambio en el volumen resistividad eléctrica	de al hormigón de la estructura	Se unen fácilmente al hormigón de la estructura		Restringido a estructuras de hormigón.
Sensor de deformación inalámbrico	Eléctrica inalámbrica	Equipos electrónicos	Deformación unitaria	Identificación de frecuencia radio	de monitoreo	Automatizar el		Necesitan ser recargados
Sensor de emisión acústica	Eléctrica cableada	Material piezoeléctrico, MEMS	Deformación unitaria	Cambio en las ondas elásticas	Daños en amplitud, consumo energía	baja	Perturbaciones por condiciones atmosféricas, debe ser calibrado.	
Acelerómetros inalámbricos	Eléctrica inalámbrica	Equipos electrónicos	Aceleración	Medida de aceleración tres direcciones	de monitoreo de bajo costo			Interferencia de campos electromagnéticos
Acelerómetro basado en GPS	Eléctrica inalámbrica	GPS	Aceleración	Cambio en la frecuencia vibratoria utilizando un filtro digital adecuado	de alta sensibilidad en daños de baja frecuencia		Problemas en alta frecuencia de muestreo y visibilidad satelital	
Sensores de tecnología de sistema microelectromecánico (MEMS)	Eléctrica inalámbrica	Material piezoeléctrico	Deformación, aceleración	Piezoresistividad de y capacitiva	Adecuados en red de sensores inalámbricos, alta sensibilidad y bajo consumo de energía, inmunidad al ruido, compactos			En sistemas inalámbricos necesitan ser recargados

Métodos de evaluación de salud estructural

Existe una amplia variedad de técnicas de identificación de daños, pero de acuerdo con(Shokravi et al., 2020) estas se las pueden clasificar en dos tipos: Técnicas de identificación de daños locales y globales.

Las técnicas de identificación locales identifican los daños en áreas relativamente pequeñas, estas se realizan a través de ensayos no destructivos en zonas específicas de las estructuras, determinadas por la experiencia en otras edificaciones, los ensayos que generalmente se utilizan son de ondas ultrasónicas, campos magnéticos, métodos radiográficos, eléctricos y campo térmico; los métodos locales son muy sensibles y capaces de encontrar pequeños defectos.

Las técnicas de identificación de daños globales se basan en el hecho de que un daño puede modificar las propiedades de la estructura y esto afectar al comportamiento estructural global en términos de tiempo y espacio, los cambios en las propiedades sensibles al daño ayudan a diferenciar entre un estado dañado y no dañado. Las técnicas de daños globales en función de la carga de actuación se los puede clasificar en métodos estáticos y dinámicos(Shokravi et al., 2020).

Los métodos de detección de daño en condición estática se basan en la medición del cambio de la respuesta estática de la estructura, como la capacidad de carga, la deformación, la deflexión y la tensión. Las respuestas estáticas son localmente más sensibles al daño y los parámetros sensibles al daño pueden ser medidos de forma rápida y económica como es el caso de los desplazamientos(Kourehli, 2017).

Los métodos de detección de daños en condiciones dinámicas utilizan las características de vibración de las estructuras para evaluar su estado de salud, por lo cual también se los conoce como métodos de identificación de daños basado en vibraciones (VDD), la premisa principal de estos métodos es estimar las variaciones de los parámetros modales de la estructura. La identificación de los parámetros modales de una estructura es un clásico problema inverso de la dinámica estructural. Las técnicas desarrolladas de identificación modal utilizan la relación entre los parámetros de entrada y salida de la estructura, lo cual es ideal cuando la excitación de la estructura puede ser controlada o medida(Yang & Nagarajaiah, 2013). Sin embargo, en muchas estructuras es sumamente complicado el control de los parámetros de entrada y sus requerimientos computacionales resultan ser muy exigentes, por lo cual se han desarrollado

técnicas de identificación modal analizando únicamente los parámetros de salida (Ibrahim, 1999). En los últimos tiempos han surgido varias técnicas de identificación modal, el análisis de estas se las realiza sobre el dominio del tiempo, dominio de la frecuencia y dominio de tiempo-frecuencia.

Entre los primeros que podemos encontrar es la técnica de Ibrahim S. (ITD) que utiliza el desplazamiento, velocidad o aceleración de la respuesta estructural en vibración libre en el dominio del tiempo para identificar los parámetros modales (D. Liu et al., 2021). La técnica de dominio de frecuencia de selección de picos (PP) es el método más simple y rápido para estimar las propiedades modales de una estructura vibratoria, se basa en la relación de entrada y salida de la densidad espectral de potencia (PSD) en un proceso aleatorio, esta técnica obtiene las frecuencias naturales directamente de los picos de PSD, por lo cual sus resultados son fiables pero limitados a la resolución de PSD (Cárdenas & Medina, 2021). El método de análisis de series de tiempo basado en el modelo de media móvil autorregresiva (ARMA) identifica los parámetros modales a partir de una serie de respuestas de vibración aleatorias (Zhuo et al., 2021). La técnica de identificación de subespacio estocástico (SSI) se basa en el método de identificación de ecuaciones discretas estado espacio en sistemas lineales, adecuado para un sistema de excitación estacionario (F. Liu et al., 2019). La técnica de excitación natural (NExT) reemplaza la respuesta de excitación libre o la función de respuesta de impulso en el análisis modal tradicional en el dominio del tiempo con una función de correlación cruzada entre las respuestas (Caicedo, 2011). La técnica Eigensystem Realization Algorithm (ERA) utiliza los datos de respuesta de impulso o los datos de respuesta libre para formar una matriz de Hankel y utiliza la descomposición de valores singulares para encontrar una implementación mínima del sistema (Ye et al., 2021). La técnica de descomposición del dominio de frecuencia (FDD) es una extensión del método de selección de picos (PP), el propósito principal es desarrollar una descomposición de valor singular en el espectro de potencia de la respuesta en un conjunto de espectros de potencia del sistema de un solo grado de libertad correspondientes a múltiples modalidades (Pallot et al., 2022). El método de descomposición en modo empírico (EMD) descompone la señal multicompetente estacionaria en una serie de funciones de modo intrínseco y un residual. Recientemente se ha desarrollado técnicas de separación ciegas de fuentes (BSS) que se utilizan en la dinámica estructural para la identificación modal, la mayoría de las técnicas BBS analizan cuatro tipos de propiedades matemáticas como la independencia mutua entre las fuentes, estructura temporal de las fuentes, el algoritmo para la extracción de

múltiples señales desconocidas y las fuentes no estacionarias(D. Liu et al., 2021). Varias de las investigaciones recientes se han enfocado en combinar las técnicas descritas para la optimización de procesos y mejorar la precisión de los resultados.

Conclusiones

Los sistemas SHM vienen desarrollándose durante varios años, estos se aplican a diferentes tipos de estructuras, identificando el comportamiento de la estructura y determinando estado de salud de la estructura a lo largo del tiempo.

Se puede observar que el objetivo principal del desarrollo de sistemas SHM para la determinación del estado de salud estructural es garantizar la seguridad del usuario y enfocar las estrategias de mantenimiento sobre un diagnóstico preciso de la estructura, previniendo de esta manera daños mayores en la estructura y optimizando recursos en el mantenimiento.

Las aplicaciones de sistemas SHM se han venido diversificando en varios tipos de estructuras, como se ha podido evidenciar en el desarrollo del artículo y especialmente en los casos de estudio. En Ecuador las aplicaciones principales podrían implementarse en edificios, puentes, presas, túneles y demás estructuras que por su importancia se las pueden considerar como estratégicas. El uso de SHM en el país permitiría mantener un seguimiento adecuado de la evolución de la salud de las estructuras, optimizando de esta manera la utilización de los recursos del estado en materia de infraestructura.

La utilización de los diferentes tipos de sensores va ligado directamente al tipo de estructura, como ocurre en el caso de los túneles donde las lecturas de aceleración no brindan una información útil respecto del estado y la salud del túnel, en virtud de que los efectos de las cargas dinámicas en obras subterráneas no son muy representativos, es por ello, que en obras subterráneas el indicador representativo del estado de salud estructural es la deformación unitaria. Situación opuesta sucede con las edificaciones superficiales donde las cargas dinámicas son de gran importancia en el análisis de las estructuras, en este tipo de estructuras generalmente se utilizan sensores para el monitoreo de la respuesta dinámica, mediante el cual es posible la determinación de los parámetros dinámicos de la estructura los cuales de ser factible se los compara con los parámetros modales iniciales y la variación estos podrían considerarse como signo de fallo.

Los avances tecnológicos han permitido desarrollar sistemas de SHM acoplables a diferentes tipos de estructuras y económicamente accesibles en relación con el costo de las estructuras importantes y estratégicas. Sistemas que dadas sus características pueden ser implementados en Ecuador con el objetivo de optimizar los recursos que se invierten en infraestructura.

Existe una serie de técnicas de procesamiento de información que se adaptan al tipo de estructura, condición y a los daños que se necesitan monitorear. La aplicación e investigación de estas se encuentra en constante desarrollo, sus algoritmos son de libre acceso y totalmente replicables a las condiciones del país, lo cual las vuelven completamente accesibles para la implementación de sistemas SHM.

El desafío para plantearse en posteriores investigaciones es el desarrollo de sistemas accesibles a países en vías de desarrollo, como son la utilización de sensores en placas de Arduino, la transmisión de datos a través de IoT y el almacenamiento de la información en nubes.

Referencias bibliográficas

- AlHamaydeh, M., & Aswad, N. G. (2022). Structural Health Monitoring Techniques and Technologies for Large-Scale Structures: Challenges, Limitations, and Recommendations. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 27(3), 03122004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000703](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000703)
- Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 589–622. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1925>
- Caicedo, J. M. (2011). Practical guidelines for the natural excitation technique (NExT) and the eigensystem realization algorithm (ERA) for modal identification using ambient vibration. *Experimental Techniques*, 35(4), 52–58. <https://doi.org/10.1111/J.1747-1567.2010.00643.X>
- Cárdenas, E. M., & Medina, L. U. (2021). Non-Parametric Operational Modal Analysis Methods in Frequency Domain: A Systematic Review. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 11(1), 34–44. <https://doi.org/10.46604/IJETI.2021.6126>
- Carder, D. S., Carder, & S., D. (1937). Observed vibrations of bridges*. *BuSSA*, 27(4), 267–303. <https://doi.org/10.1785/BSSA0270040267>
- Conservation, D. (2022). *California Strong Motion Instrumentation Program*. <https://www.conservation.ca.gov/cgs/smip>
- Coppolino, R. N., & Rubin, S. (1980). Detectability Of Structural Failures In Offshore Platforms By Ambient Vibration Monitoring. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 1980-May*, 101–110. <https://doi.org/10.4043/3865-MS>



- Costa, B. J. A., Magalhães, F., Cunha, Á., & Figueiras, J. (2013). Rehabilitation assessment of a centenary steel bridge based on modal analysis. *Engineering Structures*, 56, 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.010>
- Das, S., & Saha, P. (2018). A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures. *Measurement*, 129, 68–90. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.008>
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2006). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303–315. <https://doi.org/10.1098/RSTA.2006.1928>
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). Structural Health Monitoring. In *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118443118>
- Felipe, A., & Mejía, R. V. (2010). Estado del arte en monitorización de salud estructural: Un enfoque basado en agentes inteligentes. In *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* (Vol. 20, Issue 1). Universidad Militar Nueva Granada. <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v20n1/v20n1a08.pdf>
- Gómez, J., Casas, J. R., & Villalba, S. (2021). Strain-monitoring of a concrete tunnel lining with distributed optical fiber sensors. *International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure: Transferring Research into Practice, SHMII, 2021-June*, 879–886.
- Han, H., Wang, J., Meng, X., & Liu, H. (2016). Analysis of the dynamic response of a long span bridge using GPS/accelerometer/anemometer under typhoon loading. *Engineering Structures*, 122, 238–250. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.04.041>
- He, Y., Li, Q., Zhu, H., Han, X., He, Y., & Li, X. (2018). Monitoring of structural modal parameters and dynamic responses of a 600m-high skyscraper during a typhoon. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(6), e1456. <https://doi.org/10.1002/TAL.1456>
- Herrasti, Z., Val, I., Gabilondo, I., Berganzo, J., Arriola, A., & Martínez, F. (2016). Wireless sensor nodes for generic signal conditioning: Application to Structural Health Monitoring of wind turbines. *Sensors and Actuators A: Physical*, 247, 604–613. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2016.06.027>
- Hou, S., Zeng, C., Zhang, H., & Ou, J. (2018). Monitoring interstory drift in buildings under seismic loading using MEMS inclinometers. *Construction and Building Materials*, 185, 453–467. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.07.087>
- Hudson, D. E. (1977). Dynamic Tests of Full-Scale Structures. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103(6), 1141–1157. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0002302>
- Ibrahim, S. R. (1999). Fundamentals of Time Domain Modal Identification. *Modal Analysis and Testing*, 241–250. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9_11
- ICOLD. (1994). *Ageing of dams and appurtenant works: review and recommendations*. CIGB.

- Ikuma, M. (2005). Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(2), 143–149. <https://doi.org/10.1016/J.TUST.2003.10.001>
- Im, S. B., Hurlbauss, S., & Kang, Y. J. (2013). Summary Review of GPS Technology for Structural Health Monitoring. *Journal of Structural Engineering*, 139(10), 1653–1664. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000475](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000475)
- Kenley, R. M., & Dodds, C. J. (1980). West Sole WE Platform: Detection Of Damage By Structural Response Measurements. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 1980-May*, 111–118. <https://doi.org/10.4043/3866-MS>
- Klun, M., & Kryżanowski, A. (2022). Dynamic monitoring as a part of structural health monitoring of dams. *Archives of Civil Engineering*, 68(No 1), 569–578. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.140186>
- Ko, J. M., & Ni, Y. Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, 27(12), 1715–1725. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2005.02.021>
- Kourehli, S. S. (2017). Plate-like structures damage detection based on static response and static strain energy using gaussian process regression (GPR). <https://doi.org/10.1080/17415977.2017.1386188>, 26(8), 1198–1213. <https://doi.org/10.1080/17415977.2017.1386188>
- Lammering, R. (2013). Special issue “SHM—structural health monitoring.” *CEAS Aeronautical Journal*, 4(1), 1–1. <https://doi.org/10.1007/s13272-013-0067-y>
- Li, Q., He, Y., Wang, H., Zhou, K., & Yan, B. (2017). Monitoring and time-dependent analysis of vertical deformations of the tallest building in China. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(7), e1936. <https://doi.org/10.1002/STC.1936>
- Li, Q., He, Y., Zhou, K., Han, X., He, Y., & Shu, Z. (2018). Structural health monitoring for a 600 m high skyscraper. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(12). <https://doi.org/10.1002/TAL.1490>
- Liu, D., Tang, Z., Bao, Y., & Li, H. (2021). Machine-learning-based methods for output-only structural modal identification. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(12). <https://doi.org/10.1002/STC.2843>
- Liu, F., Li, H., Li, W., & Wang, B. (2014). Experimental study of improved modal strain energy method for damage localisation in jacket-type offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 72, 174–181. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2014.07.007>
- Liu, F., Wu, J., Gu, F., & Ball, A. D. (2019). An Introduction of a Robust OMA Method: CoS-SSI and Its Performance Evaluation through the Simulation and a Case Study. *Shock and Vibration*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6581516>

- Naeim, F. (2013). Real-Time Damage Detection and Performance Evaluation for Buildings. In *Earthquakes and Health Monitoring of Civil Structures* (pp. 167–196). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5182-8_7
- Narayanan, A., & Subramaniam, K. V. L. (2017). Damage assessment in concrete structures using piezoelectric based sensors. *Revista ALCONPAT*, 7(1), 25–35. <https://doi.org/10.21041/RA.V7I1.173>
- Pallot, J., Ekanayake, C., Ma, H., & Naranpanawe, L. (2022). Application of operational modal analysis to investigate transformer vibration patterns. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 16(10), 1964–1973. <https://doi.org/10.1049/GTD2.12406>
- Peeters, B., & Roeck, G. de. (2001). Stochastic system identification for operational modal analysis: A Review. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 123(4), 659–667. <https://doi.org/10.1115/1.1410370>
- Qian, F., Yuan, T., Zhi-Wei, B., -, A., Li, P., Qu, D., Zhang, L., Xiao-Hua, M., Hai-Xia, G., Yan-Rong, C., Tong, J., Chen, X., & Yu, H. (2022). Research on structural health monitoring method based on the inertial inclination sensor array. *Journal of Physics: Conference Series*, 2264(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2264/1/012003>
- Ran, L., Ye, X. W., & Zhu, H. H. (2011). Long-Term Monitoring and Safety Evaluation of A Metro Station During Deep Excavation. *Procedia Engineering*, 14, 785–792. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.07.099>
- Ribeiro, R. R., & Lameiras, R. de M. (2019). Evaluation of low-cost MEMS accelerometers for SHM: frequency and damping identification of civil structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16(7 CILAMCE 2018), 203. <https://doi.org/10.1590/1679-78255308>
- Salvaneschi, P., Cadei, M., & Lazzari, M. (1996). Applying AI to Structural Safety Monitoring and Evaluation. *IEEE Intelligent Systems*, 11(04), 24–34. <https://doi.org/10.1109/64.511774>
- Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Rahimian Koloor, S. S., & Petrù, M. (2020). Health monitoring of civil infrastructures by subspace system identification method: An overview. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/APP10082786>
- Svendsen, B. T., Petersen, Ø. W., Frøseth, G. T., & Rønnquist, A. (2021). Improved finite element model updating of a full-scale steel bridge using sensitivity analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1944227>
- Ubertini, F., Gentile, C., & Materazzi, A. L. (2013). Automated modal identification in operational conditions and its application to bridges. *Engineering Structures*, 46, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.031>
- University of Washington Structural Research Laboratory. (1949). *Aerodynamic stability of suspension bridges with special reference to the Tacoma Narrows Bridge: a report of an investigation conducted by the Structural Research Laboratory, University of Washington*,

under the direction of the Washington Toll Bridge Act (1949-54. Seattle : University of Washington Press, Ed.). University of Washington Press,.

- Warsi, Z. H., Irshad, S. M., Khan, F., Shahbaz, M. A., Junaid, M., & Amin, S. U. (2019). Sensors for structural health monitoring: A review. *2019 2nd International Conference on Latest Trends in Electrical Engineering and Computing Technologies, INTELLECT 2019*. <https://doi.org/10.1109/INTELLECT47034.2019.8955453>
- Xu, N., Tang, C., Li, H., & Liang, Z. (2012). Application of Microseismic Monitoring Technique in Hydroelectric Projects. *Hydropower - Practice and Application*. <https://doi.org/10.5772/31625>
- Yang, Y., & Nagarajaiah, S. (2013). Blind modal identification of output-only structures in time-domain based on complexity pursuit. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(13), 1885–1905. <https://doi.org/10.1002/EQE.2302>
- Ye, X., Huang, P., Pan, C., & Mei, L. (2021). Innovative stabilization diagram for automated structural modal identification based on ERA and hierarchical cluster analysis. *Journal of Civil Structural Health Monitoring 2021 11:5, 11(5)*, 1355–1373. <https://doi.org/10.1007/S13349-021-00514-8>
- Zhang, G., Moutinho, C., & Magalhães, F. (2022). Continuous dynamic monitoring of a large-span arch bridge with wireless nodes based on MEMS accelerometers. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(7), e2963. <https://doi.org/10.1002/STC.2963>
- Zhuo, Y., Han, Z., Duan, J., Jin, H., & Fu, H. (2021). Estimation of vibration stability in milling of thin-walled parts using operational modal analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(4), 1259–1275. <https://doi.org/10.1007/S00170-021-07051-0>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior, tesis, proyecto, etc.