

Descripción de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural en Puentes

Alejandro Martínez Pilonieta

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Estructuras

Director

Luis Eduardo Zapata Orduz

Doctor en ingeniería civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2020

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Marco Teórico.....	24
2. Objetivos.....	28
2.1 Objetivo General.....	28
2.2 Objetivos Específicos.....	28
3. Tipos de Sensores	29
3.1 Sensores de fibra óptica	29
3.1.1 Capacidades de medición y ventajas de sensores de fibra óptica.	32
3.1.2 Tipo de sensores de fibra óptica.....	33
3.1.2.1 Sensor de rejilla de fibra Bragg.	33
3.1.2.2 Sensor elastomagnético.....	36
3.1.2.3 Sensores distribuidos.	40
3.1.2.4 Interferómetros de Fabry Perot.	42
3.1.2.5 Interferómetros Mach-Zehnder.....	43
3.2 Sensores inalámbricos.....	46
3.3 Sensores de medición remota.....	47
3.4 Tecnologías Emergentes	47

3.4.1 Tipos de sistemas.	47
3.4.1.1 Sensor de laser de escaneo.	47
3.4.1.2 Acelerómetros.	49
3.4.1.3 Emisión acústica.	50
3.4.1.4 Control de corrosión.	52
3.4.1.5 Termografía infrarroja.	53
3.4.1.6 Sensor de fatiga electroquímica.	55
3.4.1.7 Método ultrasonido.	57
3.4.1.8 Medida de potencial de media celda.	58
3.4.1.9 Método de impacto-eco.	60
4. Metodología de Detección de Daños en la Estructura	62
4.1 Estrategias de tiempo	62
4.1.1 Monitoreo a corto plazo.	62
4.1.2 Monitoreo a largo plazo.	63
4.1.3 Monitoreo periódico o activado.	63
4.2 Escala de monitoreo en la estructura	63
4.3 Niveles generales de detección de daños	64
4.4 Metodología detallada de detección de daños basados en vibraciones.	64
5. Etapas en el Establecimiento de Monitoreo en Puentes.	66
5.1 Línea Base.	67
5.2 Estructura modular para implementación de monitoreo en puentes	68

6. Análisis de Datos y Evaluación de Condición	69
6.1 Identificación modal de entrada- salida	69
6.1.1 Excitación por vibradores en puentes.	70
6.1.2 Excitación por desplazamiento en puentes.	71
6.1.3 Excitación por impacto en puentes.	71
6.2 Identificación modal de solo salida.....	73
6.2.1 Pruebas de vibracion ambiental en puentes.	73
6.3 Métodos de análisis dinámicos aplicados al estudio de puentes.....	74
6.3.1 Método de selección de picos.	74
6.3.2 Técnica de disminución aleatoria.....	76
6.3.3 Método de descomposición del dominio de frecuencia.	79
6.3.4 Métodos de análisis de sensibilidad.....	80
6.3.5 Métodos de análisis por Wavelets.....	81
6.4 Metodologías en el procesamiento de señales	82
7. Antecedentes Internacionales.....	83
7.1 Sistema de red inalámbrica de sensores.....	83
7.2 Sistema de viento y de vigilancia de la salud estructural.....	86
7.3 Aplicación del método de vibraciones ambientales.....	88
7.4 Análisis Experimental de vibraciones en un puente colgante de largo alcance.....	89
7.5 Monitoreo por vibraciones en el Puente Ruta Nacional No.32 Costa Rica	92
7.6 Puente Río Papaloapan	94
7.7 Puente Tianjin Yonghe	96

7.8 Puente sobre el río Cumberland.....	98
8. Análisis Crítico	99
8.1 Análisis de la infraestructura de puentes en Colombia.....	99
8.2 Necesidades actuales en el monitoreo estructural en Colombia.....	101
8.3 Análisis de costos asociados a instrumentación de sistemas de monitoreo estructural en puentes	102
8.4 Análisis normativo para monitoreo de puentes en Colombia	103
9. Conclusiones.....	104
Referencias Bibliograficas	106

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Distribución de los diferentes tipos de sensores en puentes.....	16
Figura 2. Distribución de los diferentes tipos de sensores en puentes.....	17
Figura 3. Componentes de las cámaras de imágenes infrarrojas.	18
Figura 4. Sistema de detección de emisiones acústicas.	18
Figura 5. Dispositivo de ensayos eco impacto.....	19
Figura 6. Clasificación atendiendo a su funcionamiento.....	20
Figura 7. Sensores atendiendo a la señal que proporcionan.	20
Figura 8. Sensores atendiendo a los elementos de fabricación.....	21
Figura 9. Sensores atendiendo a la naturaleza de funcionamiento.	21
Figura 10. Esquema del sistema de monitoreo con fibra ópticas.....	22
Figura 11. Estructura de la fibra óptica.....	29
Figura 12. Descripción del funcionamiento del sistema de sensores de fibra óptica.	30
Figura 13. Principio de funcionamiento de los sensores ópticos basados en rejilla de fibra Bragg.	34
Figura 14. Funcionamiento del sensor de rejilla de fibra Bragg.....	35
Figura 15. Curva típica para un material ferromagnético.	38
Figura 16. Descripción esquemática de la estructura del sensor EM.	39
Figura 17. Representación esquemática de un sensor distribuido.	40
Figura 18. Funcionamiento del sistema BOTDA.	41

Figura 19. Esquemas de los espejos y capas espaciadoras.	42
Figura 20. Esquema del interferómetro Mach- Zehnder.....	44
Figura 21. Esquema de un modulador Mach-Zehnder.....	45
Figura 22. Ejemplos de dispositivos para escaneo láser terrestre en el mercado.	49
Figura 23. Estructura típica de un instrumento para medir EA.	51
Figura 24. Espectro electromagnético. 1: Rayos X; 2: Ultravioleta; 3: Visible; 4: Infrarrojo; 5: Microondas; 6: Ondas de radio.	54
Figura 25. Grietas en un muro analizada mediante termografía infrarroja.	55
Figura 26. Esquema de los sistemas basados en EFS	56
Figura 27. Diagrama de bloques de imágenes ultrasónicas.	57
Figura 28. Principio y componentes principales del potencial de media celda	59
Figura 29. Esquema de la configuración de prueba para estimar la profundidad de la grieta.	61
Figura 30. Procedimiento para realizar un monitoreo de salud estructural en puentes.	69
Figura 31. Configuración del Martillo de impacto vista longitudinal.	72
Figura 32. Configuración del martillo de impacto vista transversal.	73
Figura 33. Principio de la técnica de disminución aleatoria.	76
Figura 34. Sistema de red inalámbrica.....	84
Figura 35. Diagrama de bloques de la plataforma SmartBrick.....	85
Figura 36. Distribución de sensores implementados en el puente Tsing Ma.....	87
Figura 37. Modelo de elemento finitos del puente colgante Throgs Neck.	90
Figura 38. Distribución de acelerómetros para cerchas y de refuerzo de la torre del puente Throgs Neck.	91
Figura 39. Vista en perfil del puente Ruta Nacional 32, Costa Rica.	93

Figura 40. Sistema de monitoreo sobre el puente Ruta Nacional No.32, Costa Rica.....	94
Figura 41. Instrumentación puente Río Papaloapan.....	95
Figura 42. Localización de los sensores instalados en el puente Tianjin Yonghe.....	97
Figura 43. Puente sobre el río Cumberland.	98

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Características de los sensores FBG, FP, BOTDA.....	31
Tabla 2. Interpretación las medidas de del potencial de corrosión	58
Tabla 3. Niveles de inspección en puentes según su técnica y criterio de análisis.....	67
Tabla 4. Métodos para el procesamiento de señales	82
Tabla 5. Modos de frecuencias verticales y transversales del puente.....	92
Tabla 6. Comparación de frecuencias de pruebas de campo y FE calibradas	99
Tabla 7. Costo de implementación de sistemas de monitoreo en puentes	103

Resumen

Título: Descripción de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural en Puentes*

Autor: Alejandro Martínez Pilonieta**

Palabras Clave: monitoreo de puentes, comportamiento dinámico, sistemas de instrumentación.

Descripción:

Actualmente, el acelerado crecimiento en la construcción de puentes de gran longitud alrededor del mundo, ha dificultado desarrollar óptimos monitoreos de salud estructural en puentes, dada esta problemática surge la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que permitan controlar la veracidad de las hipótesis realizadas en la construcción de la estructura, de esa manera permite obtener información relevante del comportamiento del puente durante su vida útil con la finalidad de detectar daños. Es necesario conocer los efectos que las fuerzas dinámicas producen en los puentes para poder detectar e identificar a tiempo posibles daños presentes en la estructura, es un tema de gran importancia para conocer el comportamiento estructural a través de instrumentación sísmica.

El estudio se enfoca en la descripción de los sistemas de monitoreo continuo de la salud estructural en puentes y de sus tecnologías emergentes de mayor implementación a nivel mundial en la actualidad, que permiten identificar cambios en las propiedades dinámicas y estáticas asociados a daños, logrando ubicarlos en la estructura. La finalidad del presente trabajo es presentar las ventajas que trae consigo la implementación de los sistemas de monitoreo en puentes para garantizar la integridad estructural durante toda su vida útil, controlando parámetros de cargas de servicio, acciones ambientales, corrosión y humedad.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Doctor en ingeniería Civil.

Abstract

Título: Description of Structural Health Monitoring Systems In Bridges*

Author: Alejandro Martinez Pilonieta**

Keywords: Bridges monitoring, dynamic behavior, instrumentation systems.

Description:

Currently, the rapid growth in the construction of bridges of great length around the world, has made it difficult to develop optimal structural health monitoring in bridges, given this problem the need arises to develop new technologies that allow to control the veracity of the hypotheses made in the construction of the structure, that way it allows to obtain relevant information of the behavior of the bridge during its useful life with the purpose of detecting damages. It is necessary to know the effects that dynamic forces produce on the bridges to be able to detect and identify in time possible damages present in the structure, it is a topic of great importance to know the structural behavior through seismic instrumentation.

The study focuses on the description of the continuous monitoring systems of structural health in bridges and their emerging technologies of greater worldwide implementation today, which allow to identify changes in the dynamic and static properties associated with damage, managing to locate them in the structure. The purpose of this work is to present the advantages that comes with the implementation of the monitoring systems in bridges to guarantee the structural integrity throughout its useful life, controlling parameters of service loads, environmental actions, corrosion and humidity.

* Monograph

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Doctor en ingeniería Civil.

Introducción

Los puentes son estructuras cuya finalidad es materializar una plataforma de paso con el fin de superar obstáculos. Durante toda su historia estas estructuras han ido evolucionando respecto a sus materiales (madera, piedra, acero, concreto reforzado) y su tipología (puentes rectos, en arco y atirantados) con la finalidad aumentar su resistencia según las solicitaciones (Viartola, 2015).

En el siglo XIX el puente metálico permitió aumentar de forma considerable la relación capacidad/peso propio de la estructura, con el desarrollo del hormigón armado se logró construir puentes principalmente con luces importantes en forma de arco para evitar las deformaciones por flexión. Dada la complejidad constructiva de los puentes en arco surge la necesidad de implementar nuevas técnicas y reaparece el pretensado, que proporciona la facilidad de emplearlo *in situ* para puentes de luces moderadas y prefabricados para puentes de grandes luces (Manterola, 1984).

Los puentes colgantes permitían resolver de forma sencilla la construcción de grandes luces de una forma económica, pero en su época no se tenía conocimiento respecto a la necesidad de rigidizar el tablero por tal razón muchos de los puentes presentaron daños e incluso colapsaron por el efecto de la resonancia, entre ellos se destacan el puente suspendido de Broughton (Reino Unido, 1831), el puente de Menai (Reino Unido, 1839); el puente Tacoma (EEUU, 1940). Los efectos aero elásticos evidenciaron que se requería rigidizar a torsión el tablero del puente para evitar que las frecuencias de flexión y torsión, fueran próximas entre sí (Cilento, 2013).

El monitoreo de la salud estructural en puentes son técnicas implementadas a detectar fallas en la estructura principalmente generadas por eventos sísmicos, por medio de análisis de

variaciones en parámetros definidos dentro de la línea base, por medio de métodos de modelación analíticos e interpretación de datos, comparando las propiedades dinámicas de la estructura en diferentes etapas de su vida útil, a través de cotejo de información del comportamiento de la estructura con modelación del análisis estructural de elementos finitos (Viviescas, Carrillo & Vargas, 2018).

Por tal razón la correcta intervención del monitoreo estructural en puentes para evitar daños tiene gran importancia hoy en día. Estas deficiencias estructurales son ocasionadas por factores externos (movimiento sísmico, carga muerta, carga viva, inundaciones o envejecimiento), que generan daño en elementos estructurales causando fracturas. Los momentos y las fuerzas de corte pueden generar grietas a flexión o por corte respectivamente, reduciendo la capacidad inicial de la estructura, lo que permite evaluar la integridad global por medio de sensores ubicados en zonas estratégicas previamente establecidas (Ayyildiz et al., 2019).

En la Figura 1, se ilustra la ubicación y los tipos de sensores de mayor aplicación en la actualidad en puentes, entre ellos se encuentran: anemómetros, acelerómetros 3D, sensores de temperatura, sistema global de posicionamiento (GPS, por sus siglas en inglés), celdas de control de corrosión.

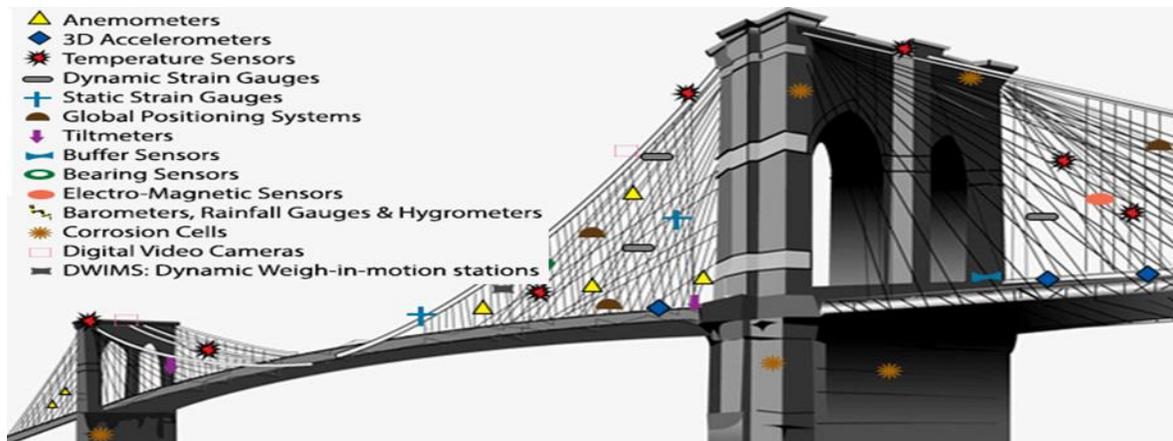


Figura 1. Distribución de los diferentes tipos de sensores en puentes. Fuente: Adaptado de <https://www.vackergroup.ae/our-products/monitoring-systems/structural-health-monitoring/structural-health-monitoring-2/>

Con el fin de mantener la seguridad de la estructura y reducir costos en la reparación, la vigilancia de la salud estructural tiene gran importancia en la actualidad, su objetivo se centra en realizar diagnósticos en tiempo real de los daños, la integridad de la estructura y el potencial de fallo. Su medición se basa en evaluar las variables físicas como la tensión, la vibración y el estrés. Las cuales se obtiene por sensores y sistemas de instrumentación (Lin et al., 2014).

La Figura 2 describe el procedimiento de análisis del monitoreo estructural, el sistema sensorial mide parámetros del medio ambiente y los entrega al sistema de adquisición de datos, posteriormente convierte las señales recogidas en datos digitales y trasmite al sistema de procesamiento y análisis. El total de la información es entregada al sistema de almacenamiento. Finalmente el sistema de evaluación permite valorar el estado físico de la estructura permitiendo detectar posibles daños por medio de una evaluación de riesgos (Zengshun Chen et al., 2017).

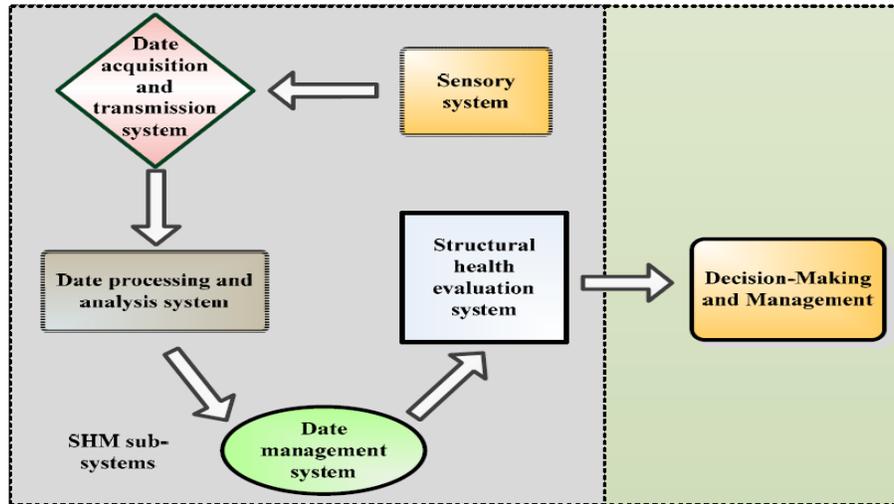


Figura 2. Distribución de los diferentes tipos de sensores en puentes. Adaptado de Chen, Z., Zhou, X., Wang, X., Dong, L., y Qian, Y. (2017). Deployment of a Smart Structural Health Monitoring System for Long-Span Arch Bridges: A Review and a Case Study. SENSORS, 17(9).

Los sistemas de monitoreo de salud estructural en la actualidad emplea métodos no destructivos para evaluar las condiciones de servicio de las estructuras de forma ágil y económica, analiza las zonas críticas de los elementos con la finalidad de detectar cambios en sus propiedades dinámicas y estáticas que representen potenciales fallas (Sun, Huang, Su, y Wang, 2018). Existen varios métodos no destructivos entre los más comunes se encuentran:

- La termografía infrarroja su función es detectar delaminaciones en las estructuras de concreto, por medio de imágenes infrarrojas se obtiene información de la ubicación y el tamaño de los daños de los elementos de la estructura, la Figura 3 describe los componentes de la cámara de imágenes infrarrojas (Hiasa et al., 2017).



Figura 3. Componentes de las cámaras de imágenes infrarrojas. Adaptado de Revillas, S. M., & Center, I. T. (2011). Guía de la termografía infrarroja: Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética. Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. Móstoles, Madrid, España.

- Emisión acústica son una fuente de ondas elásticas transitorias generadas por la liberación de energía en el proceso de deterioro de elementos que componen la estructura, estas ondas de tensión se originan por cambios estructurales que afectan al material de los elementos, la Figura 4 describe el esquema de detección de emisión acústica (Parks, Papulak, y Pantelides, 2016).

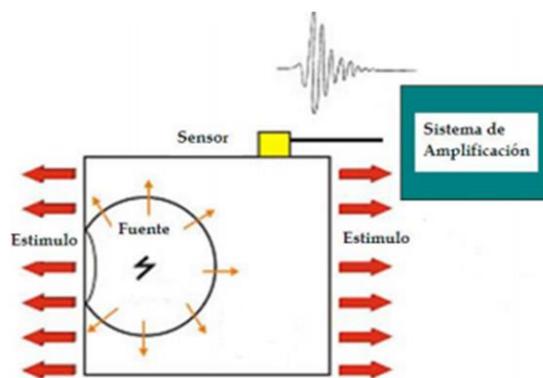


Figura 4. Sistema de detección de emisiones acústicas. Adaptado de Aguirre Morales, D. D. (2011). Estudio del crecimiento subcrítico de grietas en papel: análisis estadístico y correlación por emisión acústica (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

- Los método eco impacto se aplica para determinar la profundidad de las grietas en el concreto, la delaminación en la cubierta del puente y daños por corrosión, estos son los problemas más comunes en puentes de concreto ya que reduce su rigidez y expone a la estructura a medios agresivos, la Figura 5 ilustra el dispositivo para ensayos eco impacto en el concreto (Kachanov et al., 2019).



Figura 5. Dispositivo de ensayos eco impacto. Adaptado de <https://www.cotecno.cl/nuestros-productos/eco-impacto-sistema-de-ensayo-para-concreto-h-2851/>

Los métodos no destructivos emplean diferentes tipos de sensores que se clasifican en cuatro grupos, según su funcionamiento como activos o pasivos, los activos son los que requieren de fuentes externas de energía para su funcionamiento mientras que los pasivos no requieren, ver Figura 6. Según las señales que proporcionan se clasifican en analógicos o digitales, los analógicos toman infinitos de valores máximos o mínimos y los digitales solo pueden tomar valores de 0 o 1, ver Figura 7. Según su fabricación pueden ser mecánicos, capacitivos, piezoeléctricos, inductivos, ópticos entre otros, ver Figura 8. y según su naturaleza de funcionamiento se encuentran los sensores fotoeléctricos, sensores de temperatura, sensores de presión, y sensores químicos, ver Figura 9 (Serna, Ros y Rico, 2010).

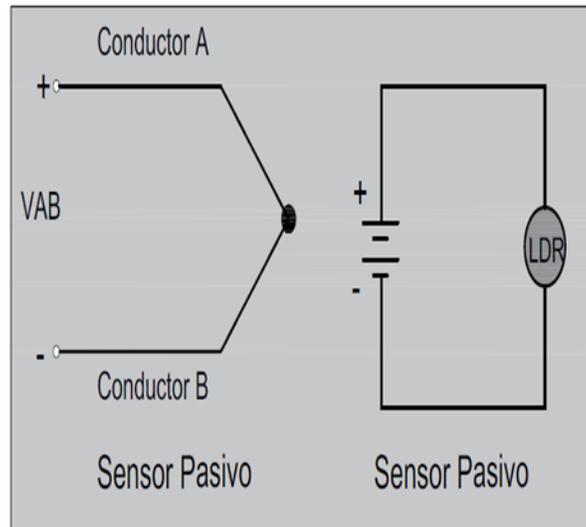


Figura 6. Clasificación atendiendo a su funcionamiento Adaptado de Serna, A., Ros.F y Rico, J. Guía Práctica de Sensores, cap1.Los sensores y su clasificación. 2010.

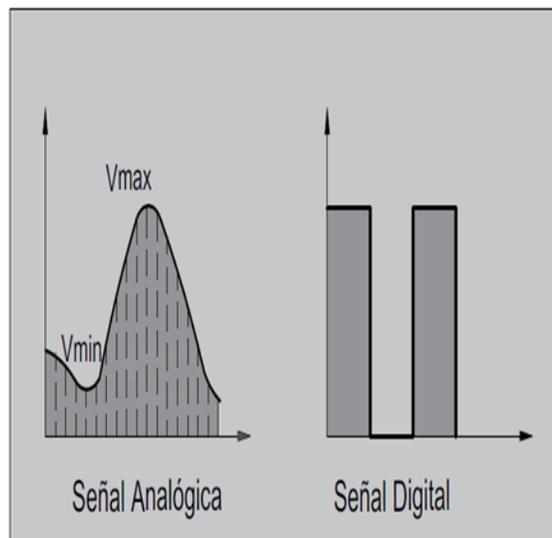


Figura 7. Sensores atendiendo a la señal que proporcionan. Adaptado de Serna, A., Ros.F y Rico, J. Guía Práctica de Sensores, cap1.Los sensores y su clasificación. 2010.

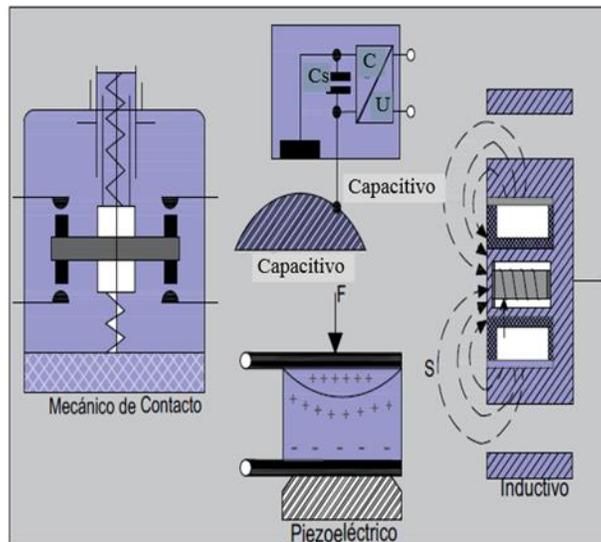


Figura 8. Sensores atendiendo a los elementos de fabricación. Adaptado de Serna, A., Ros.F y Rico, J. Guía Práctica de Sensores, cap1.Los sensores y su clasificación. 2010.

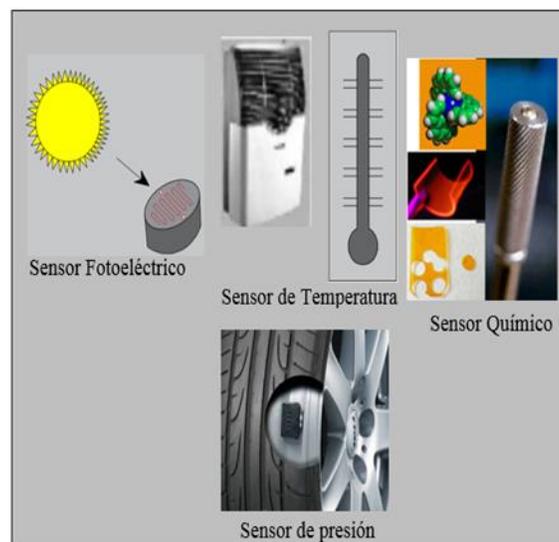


Figura 9. Sensores atendiendo a la naturaleza de funcionamiento. Adaptado de Serna, A., Ros.F y Rico, J. Guía Práctica de Sensores, cap1.Los sensores y su clasificación. 2010.

La Figura 10 describe el funcionamiento del sistemas de monitoreo estructural compuesto por sensores de deformación de fibra óptica, este sistema no presenta interferencia electromagnética

ni de radiación, poseen una alta resistencia a la corrosión y a la sensibilidad, son instrumentos pequeños que permite que su campo de acción sea amplio. Estos sensores se pueden incorporar en el concreto lo que permite que los elementos como vigas o pilas pueden ser analizados constantemente y de forma automática (Porco, Montero y Romano, 2013).

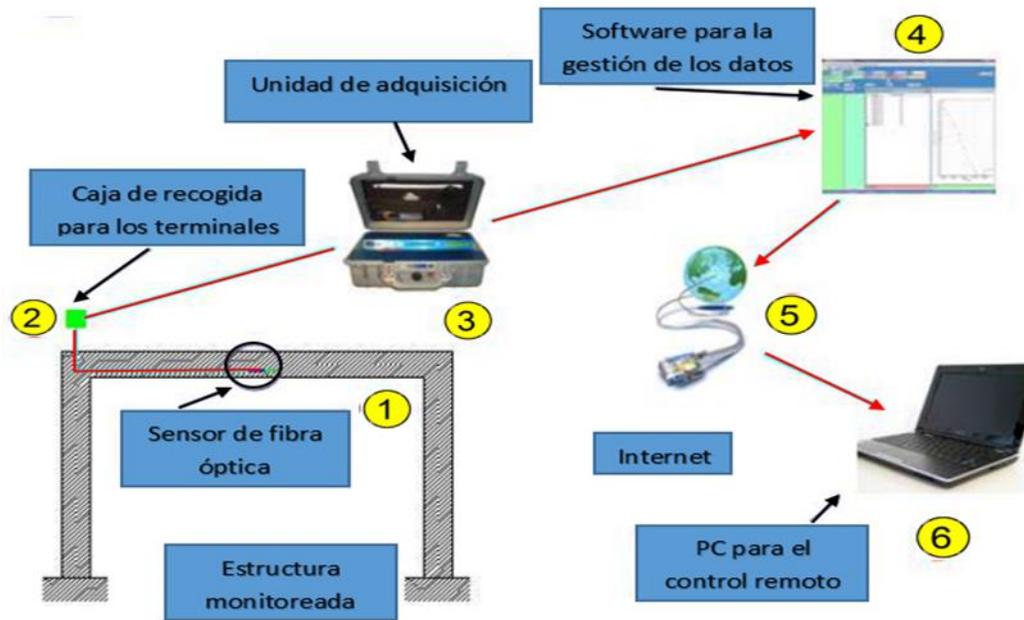


Figura 10. Esquema del sistema de monitoreo con fibra ópticas. Adaptado de Porco., Montero y Romano. Las técnicas de ensayos no destructivos para el control de materiales y de estructuras de ingeniería civil. En: IX Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales (CORENDE) y JORNADAS DE SOLDADURA. Mar de la Plata, Argentina. Octubre 2013.

El avance en tecnologías del monitoreo estructural en puentes, permiten recolectar información en tiempo real de la condición física de la estructura especialmente cuando se presentan eventos sísmicos que afecten la integridad estructural del puente. Adicionalmente por medio de registros históricos del comportamiento del puente se identifican puntos vulnerables con

el objetivo de realizar los planes de mantenimiento preventivo, y finalmente se podrá controlar las cargas excesivas en los puentes debido al tránsito de vehículos, a través de los sistemas dinámicos de pesaje garantizando que la vida útil del puente sea mayor (Perez Cardozo et al., 2012).

El objetivo de esta monografía, es realizar la descripción técnica de los principales sistemas de monitoreo continuo de la salud estructural en puentes y de sus tecnologías emergentes de mayor implementación a nivel mundial en la actualidad, para ello se describen los componentes típicos de los sistemas de monitoreo, las tecnologías emergentes de recolección y análisis de datos, así mismo de presentar la experiencia a nivel mundial en la implementación de sistemas de instrumentación para el monitoreo continuo en puentes.

En definitiva, esta monografía es una oportunidad para divulgar sobre la importancia de la instrumentación de sistemas de salud estructural en puentes de grandes longitudes, para garantizar la integridad estructural, permitiendo realizar reparaciones sobre los daños detectados en la estructura.

1. Marco Teórico

Detección de daño

El daño se define como un cambio en las propiedades dinámicas o estáticas del sistema, que afecta de forma negativa el desempeño actual y futuro de la misma, se representa por la reducción en el módulo de elasticidad del material siguiendo el principio de las deformaciones equivalentes (Lemaitre, 2012). Para lograr detectar algún cambio en el sistema se requiere realizar una comparación entre el estado inicial que se supone como la condición sin daños y el estado final que se supone como la condición afectada del sistema (Lazcano et al., 2011).

La comunidad aeronáutica inició el estudio de la detección de daño basado en vibraciones en los años 70's, logrando detectar daños por fatiga en diferentes componentes de los paneles de fuselaje (García Alonso, 2016). Por otra parte la ingeniería civil inició el monitoreo de puentes en los años 80's analizando las vibraciones de la estructura por medio de técnicas que examinan los parámetros estructurales como masa, rigidez y amortiguamiento, realizando comparaciones de la respuestas dinámicas del sistema con las respuesta obtenida de un modelo dinámico, que se representa por la ecuación 1 (Doyle, 2009).

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{0\} \quad Ec. (1)$$

Donde

$[M]$ = Matriz masa estructural

$\{\ddot{u}\}$ = Aceleración

$[K]$ = Matriz de rigidez

$\{u\}$ = Desplazamiento

Técnicas globales de detección de daño

Estas técnicas proporcionan información general del comportamiento de la estructura, por medio de redes de sensores distribuidos, mediante mediciones dinámicas analizando las variaciones de parámetros modales como las frecuencias, los factores de amortiguamiento y las formas modales, por medio de variables físicas de la estructura (masa, rigidez y amortiguamiento). Esta técnica determina de forma inmediata la presencia de un daño en la estructura sin localizarlo ni evaluarlo por medio de cambio de frecuencia naturales. Dentro de este grupo se encuentra el criterio de escala modal y el criterio de aseguramiento modal (Robinson Barrera et al., 2014).

Técnicas de ubicación del daño

Se basa en realizar un análisis modal de mayor complejidad por medio de una apropiada instrumentación, con la finalidad de asociar la ubicación geométrica del daño con la coordenada del vector que presenta una mayor variación (Acevedo et al., 2017).

Criterio de aseguramiento modal coordinado (COMAC)

Esta técnica tiene correlación de 1 cuando no existen daños en la estructura, su finalidad es identificar variaciones significativas en los vectores característicos, asociando la localización del daño con las coordenadas donde se presentan dichas variaciones, la ecuación 2 representa el criterio COMAC (Montalvão, Maia, y Ribeiro, 2006).

$$COMAC(j) = \frac{(\sum_{j=1}^{n_{CMP}} [(\Phi_A)_{ij}(\Phi_x^*)_{ij}])^2}{\sum_{j=1}^{n_{CMP}} |(\Phi_A)_{ij}|^2 \sum_{j=1}^{n_{CMP}} |(\Phi_x)_{ij}|^2} \quad Ec. (2)$$

Donde

(Φ) = Desplazamiento en el j-ésimo punto del i-ésimo modo

$(\Phi)_A$ = Desplazamiento inicial sin presentar daños en el elemento

$(\Phi)_x$ = Desplazamiento final con daños en el elemento

n_{CRP} = Número de modos de vibración de la estructura utilizados en la técnica

Cambio en la forma de los modos de vibración

Por medio de esta técnica se logra localizar de forma aproximada los daños en los elementos al analizar los cambios de los modos de vibración. Esta técnica detecta las máximas diferencias en los nodos que presentan daños, la ecuación 3 representa el cambio en la forma de los modos de vibración (Fox, 1992).

$$\{RD\}_i^j = \frac{\{\Phi_0\}_i^j - \{\Phi_D\}_i^j}{\{\Phi_0\}_i^j} \quad Ec. (3)$$

Donde

$\{\Phi_0\}_i^j$ = Forma normalizada del i-ésimo modo dinámico en el j-ésimo punto sin daño en la estructura

$\{\Phi_D\}_i^j$ = Forma normalizada del i-ésimo modo dinámico en el j-ésimo punto con daño en la estructura

Cambio en la pendiente de los modos de vibración

Este método deduce que donde se presenta una mayor distancia al realizar la comparación entre las pendientes de modos de vibración de una estructura sin daños con una estructura con

daños, es el lugar aproximado donde se encuentra el daño estructural, la ecuación 4 representa el cambio de pendiente de los modos de vibración (Perez Cardozo et al., 2012).

$$\{m_{ji}\} = \frac{\{\Phi\}_i^{j+1} - \{\Phi\}_i^j}{x_2 - x_1} \quad Ec. (4)$$

Donde

x_1 y x_2 = Distancia entre dos puntos consecutivos e instrumentados en el puente

Φ_{ij} = Valores característicos del punto j para el i-ésimo modo

Por medio de la siguiente ecuación 5 se realiza la comparación de las pendientes:

$$\Delta_m = \frac{\{m_{ji}\}_0 - \{m_{ji}\}_D}{\{m_{ji}\}_0} \quad Ec. (5)$$

Donde

$\{m_{ji}\}_0$ = Pendientes de modos de vibración sin daños de la estructura

$\{m_{ji}\}_D$ = Pendientes de modos de vibración con daños de la estructura

2. Objetivos

2.1 Objetivo General.

Realizar la descripción técnica de los principales sistemas de monitoreo continuo de salud estructural en puentes y de sus tecnologías emergentes de mayor implementación a nivel mundial.

2.2 Objetivos Específicos.

- Describir los componentes típicos de los sistemas de monitoreo de salud estructural en puentes de mayor implementación a nivel mundial en la actualidad.
- Realizar la descripción de tecnologías emergentes para la recolección de datos en el monitoreo de salud estructural.
- Presentar la experiencia a nivel mundial en la implementación de sistemas de instrumentación para el monitoreo de la salud estructural en puentes.

3. Tipos de Sensores

3.1 Sensores de fibra óptica

La fibra óptica está conformada por un núcleo, una corteza y uno o dos revestimientos. El núcleo normalmente es de vidrio óptico de entre 10 y 100 μm de diámetro, el cual permite que la luz viaje a lo largo de toda su longitud. La corteza es de vidrio óptico de hasta 125 μm de diámetro. La fibra óptica posee un revestimiento de plástico de hasta 250 μm con un índice de refracción menor que el de su núcleo, con el objetivo de minimizar las pérdidas a medida que la luz se propaga en la fibra, la estructura de la fibra óptica se describen en la Figura 11 (Frövel, 2006).

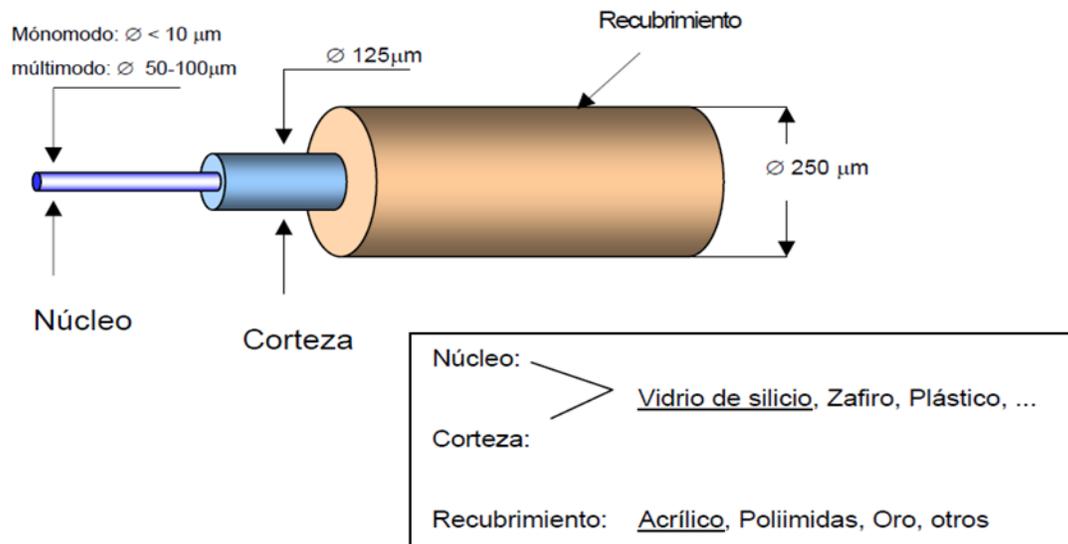


Figura 11. Estructura de la fibra óptica. Adaptado de Frövel, M. (2006). Sensores de fibra óptica tipo redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas (Phd, E.T.S.I. Aeronáuticos (UPM)). Recuperado de <http://oa.upm.es/459/>

En el mercado existen fibras de dos tipos de materiales: las fibras en vidrio puro (FOS, por sus siglas en inglés), que permiten realizar monitoreo *in situ* en tiempo real las cuales permiten transmitir la luz a grandes distancias con un porcentaje de pérdidas muy bajo, y las fibras de plástico (POF, por sus siglas en inglés), son especialmente ventajosas por tener excelente flexibilidad, fácil manipulación, grandes diámetros que soportan radios de curvatura más pequeños que el vidrio aunque pueden presentar distorsión y atenuación de la luz con un porcentaje de pérdidas mayor a las fibras FOS (Cennamo et al., 2016).

Su concepto se basa en la interacción de la fibra (luz guiada) con un parámetro externo que transporta la señal de la luz desde la fuente al detector, posteriormente se extrae toda la información del proceso de medición por medio de la señal óptica modulada, la Figura 12 describe el funcionamiento básico de la fibra óptica (Hui Li & Jinping Ou, 2016).

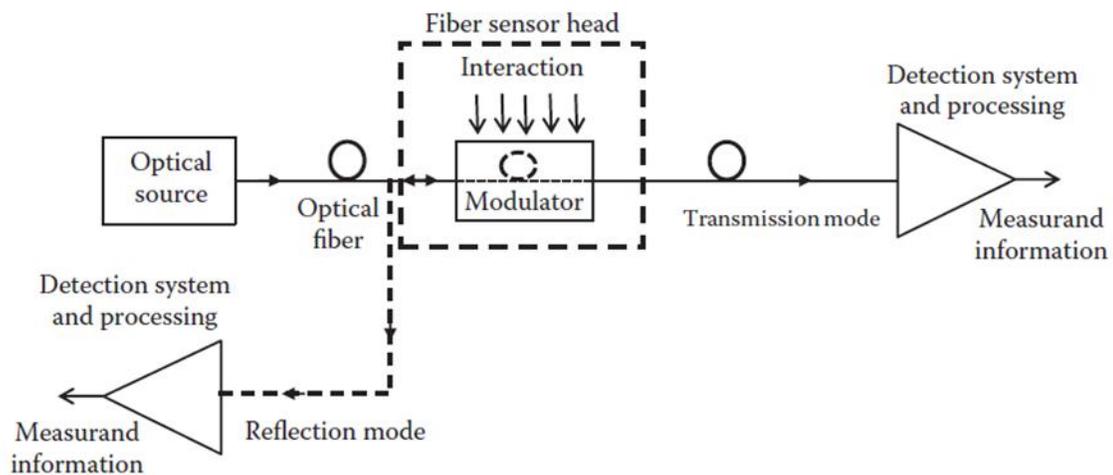


Figura 12. Descripción del funcionamiento del sistema de sensores de fibra óptica. Adaptado Rajan, Ginu, & Prusty, B. G. (2016). Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods. Boca Raton: CRC Press, Cap3. pp43

Dentro de los sensores de fibra óptica de mayor empleo en la actualidad se encuentran: la rejilla Fibra Bragg (FBG, por sus siglas en inglés), la fibra óptica distribuida, los interferómetros de fibra Fabry-Perot (FP, por sus siglas en inglés) y los sensores de análisis de dominio de tiempo óptico de Brillouin (BOTDA, por sus siglas en inglés); son dispositivos de fácil aplicación que permiten obtener información detallada y precisa del comportamiento dinámico y estático de la estructura, en la actualidad tiene un gran potencial para su uso en aplicaciones de ingeniería civil (Ginu Rajan & Prusty, 2016). La Tabla 1, describe el tipo de medición, la resolución y la técnica de interrogación de los sensores FBG, FP, BOTDA.

Tabla 1.

Características de los sensores FBG, FP, BOTDA

Type of sensor	Type	Measurement type	Resolution	Interrogation technique
FBG	QD	ε t d	High	Wavelength
FP	Point	ε t	High	Phase
BOTDA	D	P ε t	Low (0.5m)	Frequency

Nota: Adaptado Sasy Chan, Y. W., & Zhou, Z. (2014). Advances of FRP-based smart components and structures. Pacific Science Review, 16(1), 1-7.

Donde

D = Distribuido

QD = Cuasi-distribuido

ε = Ceba

t = Temperatura

d = Desplazamiento

p = Presión

BOTDA= Análisis de dominio de tiempo óptico Brillouin

3.1.1 Capacidades de medición y ventajas de sensores de fibra óptica. Los sensores de fibra óptica no presentan interferencia electromagnética ni de radiación, poseen una alta resistencia a la sensibilidad y a la corrosión. Su campo de acción es amplio comúnmente son usados dentro de los sistemas de monitoreo de salud estructural para detectar cambios de desplazamiento, temperatura y tensión. Otras aplicaciones se encuentran en el campo aeroespacial, en procesos industriales (Yang Zhang et al., 2018).

Los sensores de fibra óptica tienen la capacidad de medir parámetros físicos y químicos, este proceso depende de la adecuada selección del sensor de fibra a emplear, entre ellos se encuentran (Rajan et al., 2012).

- Rotación, aceleración
- Tensión, presión y fuerza
- Acústica y vibración
- Temperatura, humedad
- Viscosidad y pH
- Campo eléctrico y magnético
- Campo de biodetección: productos químicos y elementos biológicos como el ADN, virus únicos y bacterias.

Dado a los avances en el desarrollo de fibras ópticas su aplicación se ha extendido en el monitoreo estructural y aplicaciones biomédicas, sus ventajas respecto a los sensores convencionales son: (Hernández Pérez, 2018).

- Resistencia a interferencia electromagnéticas
- Alta sensibilidad y ancho de banda
- Resistencia a ambientes hostiles
- Peso liviano
- Posibilidad de detección multifuncional
- Fácil integración en una amplia variedad de estructuras

3.1.2 Tipo de sensores de fibra óptica

3.1.2.1 Sensor de rejilla de fibra Bragg. Los sensores de rejilla de fibra Bragg se desarrollaron en los años 80's para la aplicación en el campo de las telecomunicaciones como filtros para el procesamiento de señales ópticas, tiempo después se descubrió el potencial de medida para determinar variaciones de temperatura y deformaciones en los materiales (Frövel, 2006).

El funcionamiento de los sensores FBG se basa en aplicar un haz de luz sobre el sensor FBG el cual refleja una banda muy estrecha de longitudes de onda, mientras que los demás componentes espectrales del haz de luz pasa sin presentar atenuación alguna, modulando de forma periódica el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, la Figura 13 describe el funcionamiento de la red Bragg de la fibra óptica (Causado-Bulevas et al.,2011).

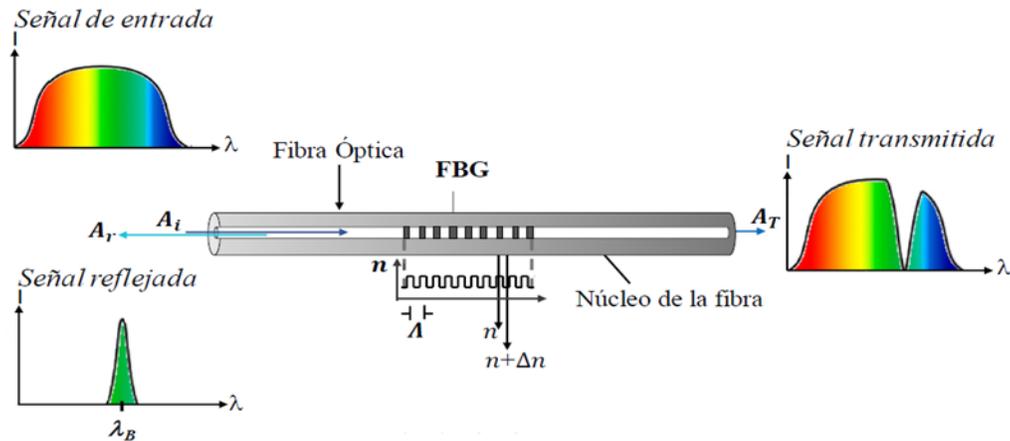


Figura 13. Principio de funcionamiento de los sensores ópticos basados en rejilla de fibra Bragg. Adaptado de Yandy, M., & María, A. (2018). Diseño, desarrollo, caracterización y análisis de sensores de fibras ópticas: Aplicación al estudio de materiales y estructuras (Tesis, Universidad Nacional de La Plata).

El FBG se define como un índice de refracción modulado que emplea luz ultravioleta que recorre periódicamente el elemento, mide campos estáticos y dinámicos como la tensión y la temperatura. El sensor de rejilla de fibra Bragg determina la deformación de un sólido debido a la tensión, por medio de la ecuación 6 (J. Kim et al., 2017).

$$\varepsilon = \frac{dl}{l_0} = \frac{\sigma}{E} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde

dl = Cambio de longitud

σ = Esfuerzo mecánico

l_0 = Longitud inicial

E = Modulo de Young

Cuando la fibra óptica recibe la longitud de onda de luz de banda ancha, la rejilla de fibra Bragg hace que las ondas de luz se reflejen con una banda estrecha como se muestra en la Figura 14. La longitud de onda central de luz reflejada λ_b presenta variaciones con la separación entre los planos de rejilla Λ y con el índice de refracción de la fibra óptica n_{eff} , en este método se asume que la fibra óptica no presenta pérdidas en la frecuencia de interés además solo pueden soportar un modo de transmisión propagante, la ecuación 7 describe la longitud de onda reflejada de la siguiente manera (Triana-Infante et al., 2014).

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \quad \text{Ec.(7)}$$

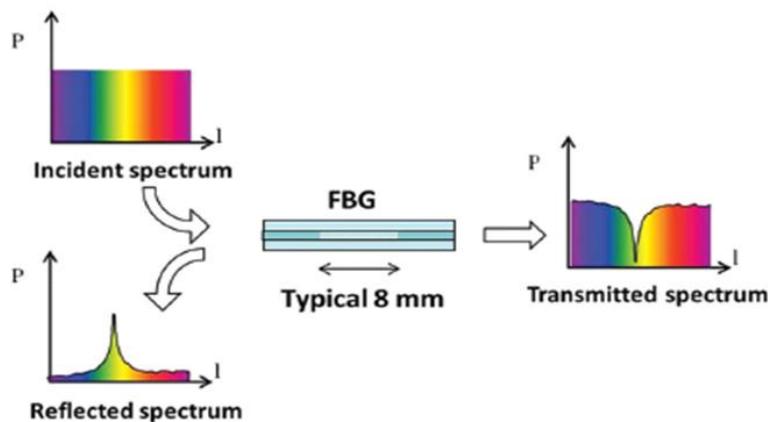


Figura 14. Funcionamiento del sensor de rejilla de fibra Bragg. Adaptado de Kim, J., Kim, J., Shin, K.-J., Lee, H., & Park, S. (2017). ANN-based tensile force estimation for pre-stressed tendons of PSC girders using FBG/EM hybrid sensing.

La rejilla se ve afectada por causa en la variación de temperatura (ΔT) y tensión ($\Delta \epsilon$), lo que genera que el índice de refracción y de longitud se vean afectados. De esta manera la variación en la longitud de onda central del BG, $\Delta \lambda$, queda expresada por medio de la ecuación 8 (Jae-Min Kim et al., 2012).

$$\frac{\Delta_\lambda}{\Delta_b} = (1 - p_e)\Delta_\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta_T \quad Ec. (8)$$

Donde

p_e = Cte. de tensión – óptica efectiva

Δ_ε = Cambio de tensión

α = Coeficiente de expansión térmica de la fibra

ξ = Coeficiente termoóptico (aproximadamente $8,6 \times 10^{-6}$ fibra de sílice germania)

Δ_T = Cambio de temperatura

El cambio de tensión en la ecuación 8 es resultado de acciones externas, pero se excluye un cambio de temperatura porque la tensión térmica se considera en el segundo término. De la ecuación 8, el cambio de tensión se puede calcular en función de un cambio en la longitud de onda central en el espectro de la onda de luz reflejada, si la temperatura está controlada (Lan et al., 2014).

3.1.2.2 Sensor elastomagnético. La teoría del dominio magnético postula que todo material está compuesto por regiones denominadas dominios, totalmente magnetizadas y alineadas con el estado de magnetización local, por medio de la interacción entre el estrés y la energía magnética se genera el fenómeno elasto- magnético, las magnetizaciones del dominio de Weiss se guían desde la dirección inicial hacia el campo aplicado mediante el desplazamiento de la pared y la rotación del dominio, el esfuerzo mecánico en función de la magnetostricción y la magnetización se determina según la ecuación 9 de la siguiente manera (Jiles, 2015).

$$\sigma = \frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{J_s^2}{3\lambda_s\mu_0} \quad Ec. (9)$$

Donde

σ = Esfuerzo mecánico

J_s = Polarización magnética

λ_s = Magnetostricción de saturación

μ_r = Permeabilidad del material ferromagnético

μ_0 = Permeabilidad de vacío

La magnetización de un material ferromagnético depende de la intensidad del campo magnético H (Amperio- vueltas/m) y la densidad del flujo B (Webers/ m²). El sensor elastomagnético (EM, por sus siglas en inglés) se basa en la propiedad elasto-magnética, donde μ (tensor de permeabilidad magnética) puede variar respecto a las características del material (homogéneas e isotrópicas) reduciendo la relación a su forma escalar siendo μ el escalar, ver ecuación 10. En la Figura 15 se puede evidenciar que la permeabilidad no es constante y depende de la intensidad del campo siendo μ la relación de B / H (Sumitro et al., 2002).

$$B = \mu H \quad Ec. (10)$$

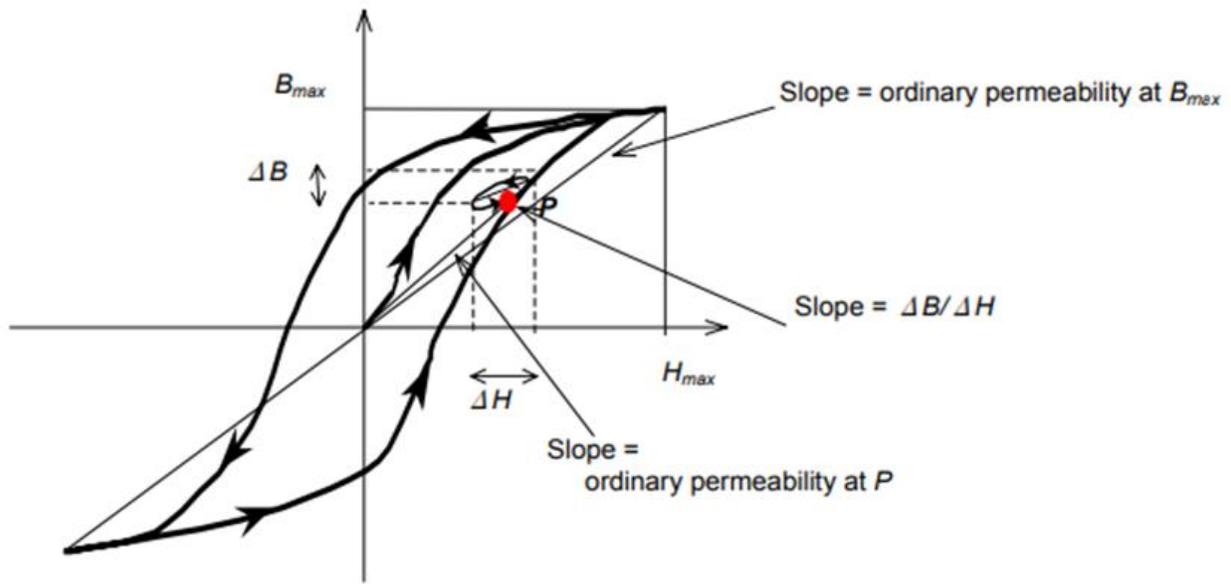


Figura 15. Curva típica para un material ferromagnético. Adaptado de Sumitro, S., Jarosevic, A., & Ming, I. Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement.

El sensor elastomagnético está compuesto por una bobina primaria la cual magnetiza el material ferromagnético y una secundaria que mide la fuerza electromotriz que se aplica, siendo directamente proporcional a la tasa de cambio de campo magnético aplicado y la permeabilidad relativa, el principio operativo es introducir las fuerzas H a la bobina primaria que a su vez produce una salida de voltaje (V_{out}) por la bobina secundaria debido a la inductancia mutua, donde el voltaje de salida varía con la permeabilidad μ_r del núcleo de acero ver Figura 16, se describe la forma de calibrar el voltaje de salida para medir la tensión aplicada (σ) por medio de la ecuación 11 (Lynch et al., 2008).

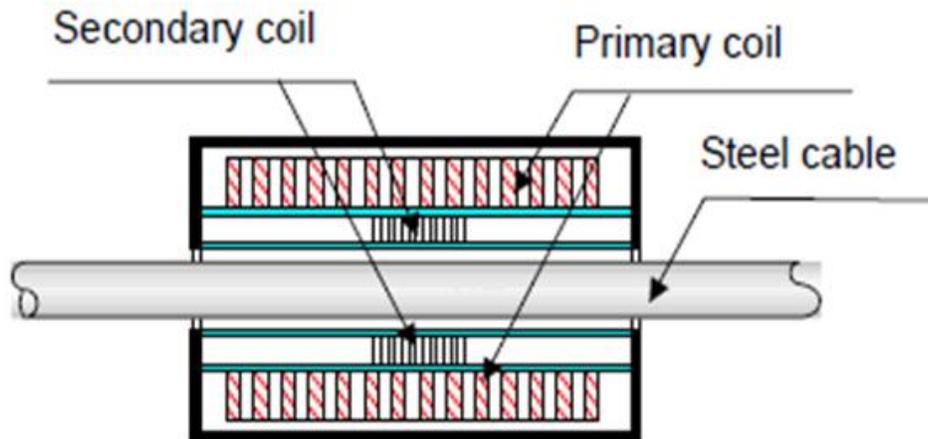


Figura 16. Descripción esquemática de la estructura del sensor EM. Adaptado de Sumitro, S., Jarosevic, A., & Wang, M. L. (2002). Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement. The First fib Congress, Concrete Structures in the 21th Century, Osaka, 13–19.

$$\mu = (\sigma, T) = 1 + \frac{A_0}{A_f} \left[\frac{V_{out}(\sigma, T)}{V_0} - 1 \right] \quad Ec. (11)$$

Donde

T = Temperatura

σ = Tension aplicada

A_0 = Área transversal de la bobina secundaria

A_f = Área trasversal del material ferromagnético

V_{out} = Voltaje secundario integral con una hebra o barra de refuerzo en el solenoide

V_0 = Voltaje integrado sin la barra de refuerzo en el solenoide

3.1.2.3 Sensores distribuidos. Los sensores de deformación distribuida, monitorean la deformación unidimensional y analizan la integridad de la estructura en datos de reconocimiento, localización y cuantificación de los cambios locales de tensión, generados por daños en sus elementos (Wang et al., 2017).

El sistema de sensores distribuidos permite estudiar cambios en la temperatura, tensiones y vibraciones de los elementos de la estructura, el análisis de estos parámetros lo hace sin el uso de sofisticados algoritmos ofreciendo ventajas en términos de fiabilidad y versatilidad (Wild & Hinckley, 2008).

La Figura 17 representa el funcionamiento básico del sensor distribuido, está compuesto por un cable de conexión con sensores distribuidos en toda su longitud que mide las deformaciones, la información es transmitida a la unidad de lectura siendo inmunes a la interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés), lo que hace que su proceso de instalación y operación sea más sencillo (Glisic & Inaudi, 2012).

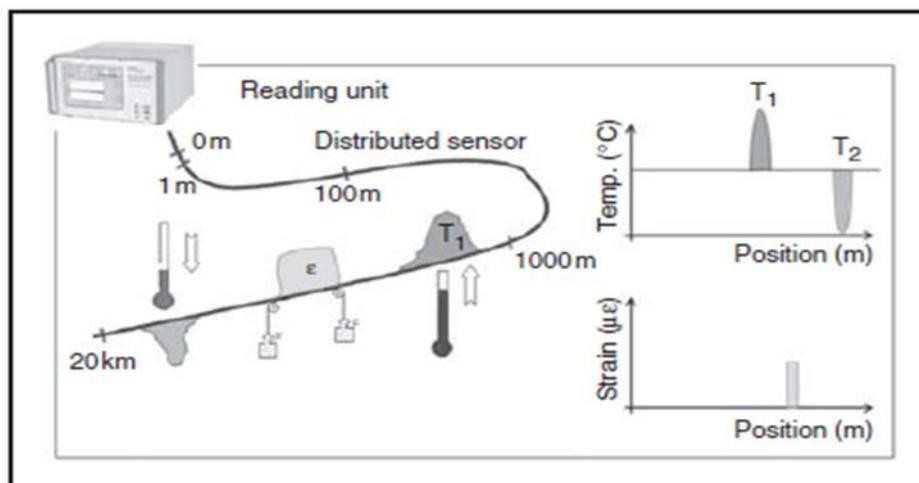


Figura 17. Representación esquemática de un sensor distribuido. Adaptado Glisic, B., & Inaudi, D. (2012). Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors. Structural Health Monitoring.

Uno de los principios físicos detrás de los sensores distribuidos se basa en la dispersión de Brillouin, la estimulación activa de la dispersión de Brillouin se logra mediante el uso de dos ondas de luz ópticas. La primera es el pulso óptico generalmente llamada luz de bomba y la segunda es la señal óptica de onda continua llamada señal de sonda. La energía de los dos haces de luz se transfieren una vez se produzca la dispersión (Yang Zhang et al., 2018).

Este sistema es sensible tanto en tensión y temperatura, se debe realizar una compensación en la temperatura para evitar la tensión. Para este propósito, se instala un sensor de temperatura distribuido por separado cerca del sensor de tensión, suponiendo que ambos sensores estarán sujetos a las mismas variaciones de temperatura, la Figura 18 describe el funcionamiento del sistema BOTDA de sensores distribuidos (Thévenaz, 1999).

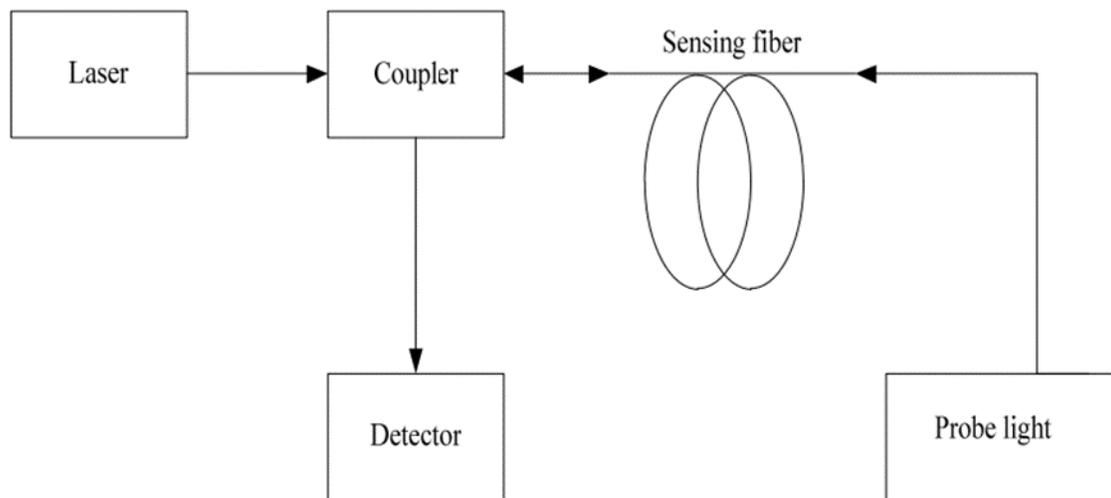


Figura 18. Funcionamiento del sistema BOTDA. Adaptado de Yang Zhang, Yaoyu Cao, Yushuang Zhu, Lin Gui, & Jiancun Zuo. (2018, enero 1). Distributed Brillouin scattering optical fiber strain sensor technology. Presentado en 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC).

Como resultado, la fibra se comporta como un medio activo por el pulso de la bomba, amplificando la onda de la sonda a medida que se desplaza a lo largo de la fibra óptica. La ganancia experimentada por la onda de la sonda tiene una dependencia típica de Lorentz en el cambio de frecuencia de la bomba-sonda, alcanzando su máximo cuando esta última coincide con el parámetro relacionado con las propiedades ópticas y elásticas de la fibra (Minardo et al., 2018).

3.1.2.4 Interferómetros de Fabry Perot. Los interferómetros Fabry-Pérot (FPI, por sus siglas en inglés), se componen por medio de dos espejos dieléctricos ubicados en forma paralela, separados entre sí por medio de un espaciador normalmente de SiO_2 depositado en un sustrato, un rayo láser de escaneo se refleja de forma múltiple por medio de los espejos lo que permite medir la intensidad de la luz reflejada, por medio de una onda de ultrasonido que modula la distancia entre los espejos cambiando la longitud del camino del láser, ver Figura 19 (Martin et al., 2017).

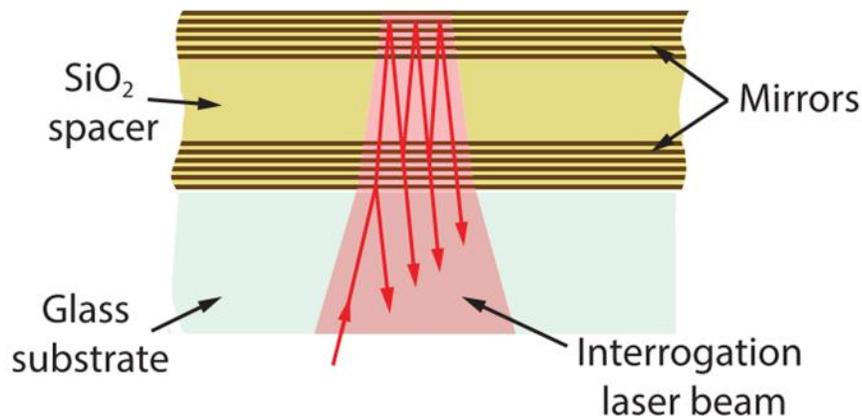


Figura 19. Esquemas de los espejos y capas espaciadoras. Adaptado de Martin, E., Zhang, E. z., Guggenheim, J. a., Beard, P. c., & Treeby, B. e. (2017). Rapid Spatial Mapping of Focused Ultrasound Fields Using a Planar Fabry-Pérot Sensor. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.

Este sistema de sensores puede detectar ultrasonido con alta sensibilidad en un rango de frecuencia de banda ancha en elementos pequeños, además tiene un amplio campo de aplicación para calibración de hidrófonos, caracterización de campos de ultrasonido, frecuencia en imágenes fotoacústicas, medición de temperatura y presión acústica para caracterización de propiedades acústicas de los materiales (Ramasawmy et al., 2019).

La sensibilidad del sensor Fabry- Pérot depende de la sensibilidad óptica cuando se presenta el cambio de potencia óptica, reflejada por desplazamiento y la sensibilidad de fase acústica (Martin et al., 2017). Sin embargo las mediciones de los campos ultrasónicos presentan afectaciones por la estructura multicapa de los sensores Fabry - Pérot, para ello se emplean modelos analíticos que eliminan las interferencias generadas por el ruido (Hurrell & Rajagopal, 2017).

3.1.2.5 Interferómetros Mach-Zehnder. El principio del interferómetro de Mach-Zehnder se basa en la división de amplitud de ondas, es decir, es un dispositivo que emplea el fenómeno de la interferencia de ondas para detectar variaciones generadas en la temperatura, en la longitud y presión por medio del cambio en la sensibilidad, como una diferencia de fase entre la medición y la fibra de comparación (Bernal, ,2016).

El principio se basa en dividir el haz de luz entrante en dos partes, una parte se transmite y la otra se refleja, la fuente de luz se divide por medio de dos acopladores, el primer acoplador subdivide en dos el haz de luz con la finalidad de garantizar que la intensidad que se transporta por medio de las dos fibras ópticas sean iguales sin presentar pérdidas importantes, si lo anterior se cumple, el segundo acoplador recombina los haces de luz obteniendo el valor máximo de la

intensidad de salida, la Figura 20 describe el principio del interferómetro de Mach-Zehnder (Yandy & María, 2018).

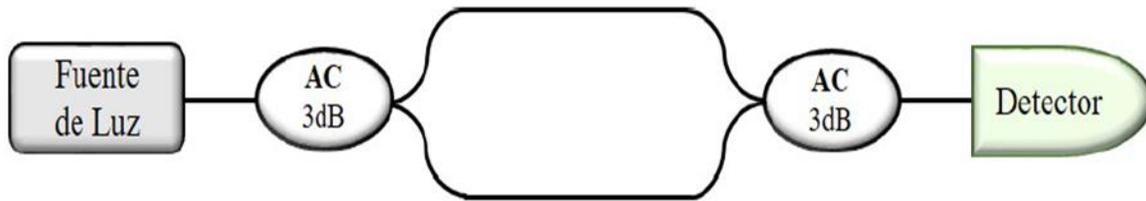


Figura 20. Esquema del interferómetro Mach- Zehnder. Adaptado de Yandy, M., & María, A. (2018). Diseño, desarrollo, caracterización y análisis de sensores de fibras ópticas: Aplicación al estudio de materiales y estructuras (Tesis, Universidad Nacional de La Plata).

La Figura 21 describe la entrada óptica del interferómetro Mach- Zehnder se divide en ruta 1 y ruta 2 con la ayuda de las guías de onda ópticas. Inicialmente, las señales ópticas en cada ruta o camino tienen la misma fase ϕ_1 y ϕ_2 , por lo tanto, $\phi_1 - \phi_2 = 0$ (Arreaga & Luis, 2018). La señal de salida del interferómetro Mach- Zehnder está dada por la ecuación 12 (Quintela et al., 2000).

$$I_{out} = I_0[I - V\cos(\Phi_1 - \Phi_2)] \quad Ec. 12$$

Donde

I_0 = Irradiancia de la señal de entrada al interferómetro

$\Phi_1 - \Phi_2$ = Diferencia de fase entre las señales de cada uno de los brazos en el segundo acoplador

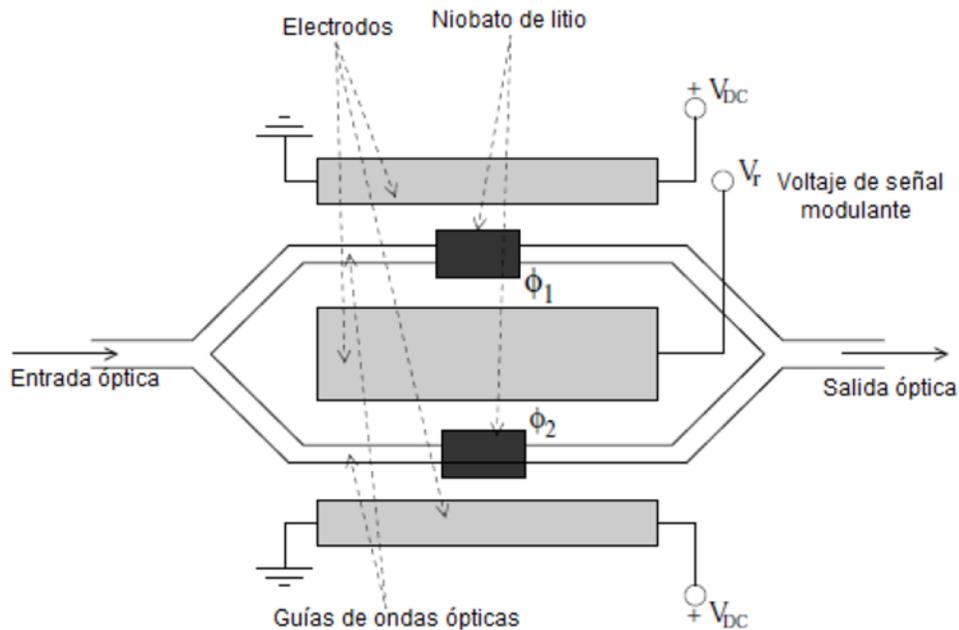


Figura 21. Esquema de un modulador Mach-Zehnder. Adaptado de Arreaga, A., & Luis, J. (2018). Análisis comparativo del rendimiento de los moduladores Mach-Zehnder y electroabsorción para comunicaciones.

El recubrimiento en la fibras es de material magnetostrictivo al interactuar en un campo magnético ejerce fuerzas sobre la fibra y produce variaciones en el índice de refracción y en la longitud, logrando aumentar la sensibilidad de medición (Galindo, 2007).

La intensidad de la corriente se determina por medio de la relación conocida del campo magnético y la corriente, la fase inducida puede ascender hasta 100 rad/A por cada metro de longitud de fibra (Dandridge et al., 1980). Otro método para medir la intensidad de la corriente es analizar el cambio de temperatura, la corriente se conduce en la fibra de medición que está revestida con un material metálico, el cambio en la temperatura varía la longitud de la fibra óptica, y presenta un cambio de fase según la intensidad de la corriente actual (Hesse, 1984).

3.2 Sensores inalámbricos

Los sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) permiten realizar monitoreos a grandes estructuras especialmente en puentes al no emplear cableado, lo cual implica una reducción en los costos y fácil empleo permitiendo realizar el análisis sísmico en la estructura, los sensores inalámbricos no se refieren a un sensor en específico sino a unidades de procesamiento y transmisión inalámbrica de datos, que permite conectar con sensores tradicionales electrostáticos como lo son, los deformímetros, acelerómetros, inclinómetros entre otros, además permiten determinar parámetros dinámicos como frecuencia, amortiguamiento y formas modales del puente, por medio del empleo de métodos y modelos matemáticos rigurosos (Lynch & Loh, 2006).

Un sensor inalámbrico provee una plataforma de computación y comunicación inalámbrica entre los nodos de los sensores, el nodo host o anfitrión y el usuario final así mismo, la integración de un núcleo de procesamiento y computación en el mismo sensor inalámbrico lo convierte en una unidad inteligente que permite ejecutar algoritmos paralelos para el monitoreo y detección de daños, y el control en tiempo real en una estructura (Qin, Li, Qian & Lau, 2001).

Presenta falencias en la estabilidad de transmisión durante el monitoreo continuo, pues, la transmisión inalámbrica puede presentar interferencias cuando se presenta tormentas eléctricas o lluvias de intensidad excesiva, además no poseen una fuente de energía continua y estable. Este último tipo de fuente se puede lograr mediante una línea de alimentación o también existe otras soluciones como el uso de paneles solares o recolectores de energía vibratoria proveniente de la estructura misma (Doebling, Farrar, & Prime, 1998).

Se han realizado investigaciones enfocadas en la optimización del uso de energía, desarrollo e implementación de algoritmos paralelos de computación explotando al máximo la

capacidad del microcontrolador, mejoras en la estructura y protocolo de transmisión, y en el control activo o semi-activo de la estructura mediante sistema inalámbrico.

3.3 Sensores de medición remota

En los últimos años se ha extendido el uso de dispositivos de medición remota los cuales permiten medir los cambios de posición de puntos específicos de una estructura en el tiempo real mediante, por ejemplo, el sistema de posicionamiento global GPS, radares, técnicas de interferometría de microondas, métodos óptico-electrónicos como mediante ondas láser y el método de correlación de imágenes digitales, etc.

3.4 Tecnologías Emergentes

3.4.1 Tipos de sistemas. En la actualidad existen una gran variedad de sensores aplicados al monitoreo en puentes, los cuales poseen procesos físicos y químicos diferentes, que ayudan a obtener información relevante durante el análisis sísmico, con la finalidad de controlar las características de la estructura (Gastineau et al., 2009).

3.4.1.1 Sensor de laser de escaneo. El principio de los sensores de escaneo laser de detección de luz y rango (LIDAR, por sus siglas en inglés), se basa en la detección de luz y rango, permite extraer información sobre un objeto principalmente por medio de la relación de la retrodispersión a la radiación incidente en la longitud de onda del láser y depende solo del ángulo

de incidencia entre la superficie normal y el rayo láser que viaja desde el objeto permitiendo obtener la ubicación tridimensional 3D del daño (Pfeifer et al., 2007).

Por medio de haz de luz generado por el rayo láser reflejado por un diodo el sistema LIDAR permite adquirir información de la amplitud del rayo láser, en términos de coordenadas 3D e intensidad, evitando que se creen nubes de puntos arbitrarios que impiden analizar puntos en específicos (Schulz, 2008).

El sistema del láser escáner terrestre (TLS, por sus siglas en inglés) está compuesto por sensores ubicados en trípodes que miden el tiempo que tarda el pulso de laser en ir al elemento objeto de análisis y su respectivo retorno calculando la distancia según la velocidad de desplazamiento del haz de luz o la diferencia de fase de la amplitud máxima en la luz reflejada para medir la distancia entre ambos (Gastineau et al., 2009).

El sistema TLS analiza el desplazamiento y las deformaciones estáticas 3D en la estructura, a través del registro periódico de coordenadas que permiten conocer el estado de la estructura en cualquier instante de tiempo (Park et al., 2007), en la Figura 22 se presentan algunos ejemplos de dispositivos para escaneo laser, la Figura 22(a) ilustra el dispositivo Trimble Gx, su método de escaneo es el tiempo de vuelo, la distancia máxima de escaneo es de 200 metros y su precisión de escáner 3D es de 12mm/100m; la Figura 22(b) ilustra el dispositivo Leica ScanStation este dispositivo usa el mismo método de escaneo que el Trimble Gx, la distancia máxima de escaneo es de 300 metros y su precisión 6mm/50m; la Figura 22(c) ilustra el dispositivo FARO LS 880 HE su método de escaneo se basa en diferencia de fase, la distancia máxima de escaneo 76 metros y no posee la función 3D; la Figura 22(e) describe el dispositivo Z+F IMAGER 5006 posee en mismo método de escaneo que el FARO LS880 HE, su distancia máxima de escaneo es 79 metros, no posee opción 3D (Mechelke et al.,2007).

(a) Trimble Gx (b) Leica ScanStation (c) FARO LS880 HE (d) Z+F IMAGER 5006



Figura 22. Ejemplos de dispositivos para escaneo láser terrestre en el mercado. Adaptado de Mechelke, K., Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. COMPARATIVE INVESTIGATIONS INTO THE ACCURACY BEHAVIOUR OF THE NEW GENERATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING SYSTEMS.

Este método TLS presenta limitaciones al no ser un sistema de medida con prisma, por tal razón depende directamente de las propiedades físicas del rayo como lo son: la coherencia espacial, de la distancia y del ángulo de incidencia del rayo láser al objeto a analizar, de esta manera determina la posición en función de la intensidad de la señal reflejada. Estas limitaciones de visibilidad en muchas ocasiones presenta mejores resultados, al realizar escaneos parciales desde varios puntos para luego unificarlos en el mismo sistema de coordenadas (Ramos et al., 2015).

3.4.1.2 Acelerómetros. Los acelerómetros son dispositivos electromecánicos que se emplean para el análisis sísmico de estructuras, permiten detectar las fuerzas estáticas (gravedad) y las fuerzas dinámicas (vibraciones y movimiento) de la aceleración en uno, dos o tres ejes (Bernard & Touboul, 1991). Estos transductores están formados por un cristal de material piezoeléctrico el cual al aplicarle una fuerza determinada, produce una diferencia de potencial

proporcional a dicha fuerza, la señal de voltaje es recogida por un amplificador de carga, el cual produce una señal amplificada (S.-Y. Chen et al., 2016).

Este sistema tiene propiedades que permiten comportarse como un sistema lineal invariable en el tiempo (LTI, por sus siglas en ingles), siendo una señal estocástica la que excita al sensor además la señal de salida del sensor es de carácter aleatorio que obtiene los datos de la frecuencia que se desea determinar, con el objetivo de analizar estos tipos de señales a través de relaciones matemáticas que permiten hallar sus transformadas y realizar el análisis en el dominio de frecuencia (Diez Zaldívar, 2014).

Los acelerómetros son empleados para medir propiedades dinámicas y resonancias inducidas por el viento, por medio de análisis de las aceleraciones en diferentes instantes de tiempo y barridos a altas frecuencias, logra crear historiales de tiempo de alta resolución de aceleración conociendo la masa de la estructura o de un elemento de ella, esta aceleración produce una fuerza en el sensor que crea una corriente o un cambio en ella (Kuang et al., 2011).

Adicionalmente evalúa la deformación, las deflexiones máximas, nivel de vibración y agrietamiento del concreto. El uso del acelerómetro permite que la toma de información sea precisa, y permite calcular los desplazamientos a través de integración numérica (Park et al., 2007).

3.4.1.3 Emisión acústica. Los sensores de emisión acústica (EA) permiten obtener información de la ubicación de daños presentes en la estructura generados principalmente por fuerzas sísmicas, tales como grietas de fatiga, falla de las uniones; además permite conocer áreas de corrosión reduciendo el área de la zona a ser evaluada. Aunque para determinar el tamaño de los daños requiere la implementación de otros métodos de escaneo no destructivos que permitan conocer el tamaño de los daños reduciendo el área de la zona a ser evaluada (Chang & Liu, 2003).

Su metodología se basa en detectar daños por medio del análisis de cambios en las propiedades del material, a través de ondas EA que son ondas de tensión generadas por la liberación rápida de energía de deformación que se presenta por los cambios microestructurales del material atribuidos a daños estructurales (Vahaviolos, S.J, 1996). Por medio del análisis del tiempo de llegada, intensidad y velocidad se logra detectar la ubicación del daño, adicionalmente se emplean herramientas para eliminar posibles interferencias por medio de transformadas de wavelet, transformadas de Fourier y espectros de potencia (Parks et al., 2016).

La Figura 23 describe la estructura típica de los instrumentos para medir emisiones acústicas, está compuesta por un sensor encargado de detectar los eventos EA, que convierte el movimiento de un material en señales eléctricas; posee un preamplificador y amplificador principal, dado que las señales EA son débiles; y finalmente las señales pasan por un filtro pasa bandas, que elimina las interferencias generadas por el ruido de la señal extraída, otorgando una mejor calidad de los datos para su posterior análisis (Pérez & Mauricio, 2017).

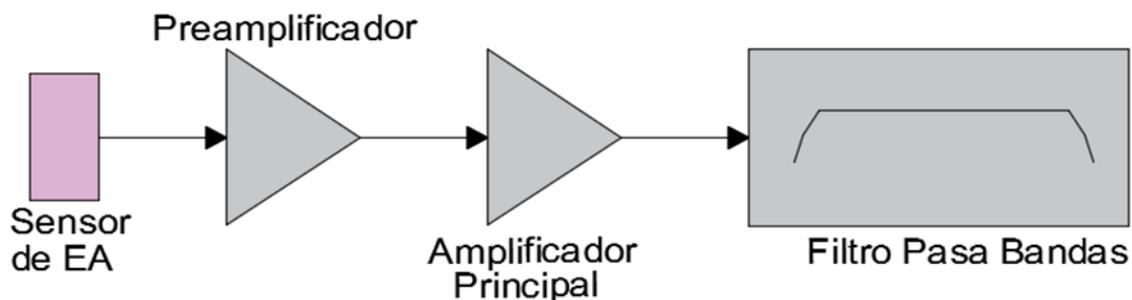


Figura 23. Estructura típica de un instrumento para medir EA. Adaptado de Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (Eds.). (2008). Acoustic emission testing. Springer Science & Business Media.

El método EA puede emplearse para evaluar el deterioro en el concreto debido a la sobreexposición de los elementos de la estructura al fuego, a través de mediciones rápidas que permiten evaluar la integridad y el nivel de daño de la estructura (Ha et al., 2016). El método AE

cambió el enfoque de realizar monitoreos de la salud estructural, al sustituir el uso de métodos destructivos como los métodos de resistencia de perforación, perforaciones centrales, pruebas de resistencia a la tracción en refuerzo de acero (Colombo & Felicetti, 2007).

Existen diversos métodos EA que se emplean para el estudio del monitoreo de daños en tiempo real (Sikdar et al., 2018). La técnica de hora de llegada (TOA, por sus siglas en inglés), consiste en calcular el tiempo de llegada de la señal AE en cada uno de los sensores según el tipo de onda utilizada, esta técnica se aplica en estructuras homogéneas e isotrópicas (X. Li & Dong, 2014). El Delta T-Mapping (DTM, por sus siglas en inglés): se usa en estructuras complejas según su geometría y se basa en el mapeo de las fuentes artificiales AE; la técnica de correlación de parámetros (PCT, por sus siglas en inglés) se basa en la relación empírica entre amplitudes de señal de AE variables, con parámetros de señal de diferente ubicación en un objeto (Al-Jumaili et al., 2016).

3.4.1.4 Control de corrosión. La corrosión de las estructuras se monitorea por medio de la técnica de impedancia electroquímica, la cual mide la velocidad de pérdida de masa del elemento debido a la corrosión, este fenómeno se genera por la presencia de sal en el aire, la humedad relativa y la temperatura donde se encuentra expuesta la estructura (Nishikata et al., 2014).

Por medio del monitor de corrosión atmosférica (ACM, por sus siglas en inglés) se monitorea el estado y la velocidad de la corrosión de los materiales (Pongsaksawad et al., 2017). El ACM está compuesto con una célula galvánica, en la cual la corriente pasa a través de ella y el metal del ánodo se corroe, con el objetivo de medir la velocidad de corrosión en función del tiempo por medio de un único sensor de corriente (Du et al., 2018). Una vez el metal entra en contacto con soluciones acuosas de electrolitos, se genera una reacción electroquímica, que deteriora el

metal haciendo que pierda electrones y se convierta en un ion metálico (Mz^+), lo que produce la corrosión del material (Tsuru et al., 1995). La densidad de corriente galvánica (I_{corr}) registrada por el proceso de reducción en el cátodo también da información de la actividad corrosiva (González et al., 2004).

Existe una técnica electroquímica denominada polarización lineal donde se aplica un escaneo potencial a un elemento sensor corrosivo, y se evalúa la respuesta de corriente resultante. Este proceso se aplica por etapas, iniciando por debajo del potencial de corrosión libre y terminando por encima del potencial de corrosión libre (Betti, 2014).

Por otro lado, respecto a las medidas requeridas para el estudio de la durabilidad que se llevan a cabo en el hormigón que recubre las armaduras, los factores que controlan la velocidad de corrosión y que pueden ser monitorizados son la resistividad eléctrica del concreto y el transporte de oxígeno (Yoo et al., 2003).

3.4.1.5 Termografía infrarroja. La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo se ha utilizado para la inspección de estructuras civiles con resultados satisfactorios y su aplicación específica en la inspección de puentes está cada vez más consolidada (Meola et al., 2002). Este método es una técnica prometedora para las pruebas no destructivas y la evaluación de materiales, por medio de las imágenes infrarrojas se obtiene información de la ubicación y el tamaño de los daños de los elementos de la estructura (Halabe et al., 2003).

La función de la termografía infrarroja es detectar deterioros, delaminaciones en las estructuras de concreto, por medio de imágenes infrarrojas siendo un método sin contacto y de fácil aplicación para la recolección de datos e identificación de una amplia gama de estructuras de concreto al mismo tiempo (Hiasa et al., 2017).

La termografía infrarroja detecta la radiación y la intensidad en la superficie, las variaciones en la intensidad generalmente indican presencia de anomalías en el concreto (delaminaciones o desprendimiento debido a la corrosión en el elemento (Maser Kenneth R. & Roddis W. M. Kim, 1990).

Todos los objetos con temperatura por encima del cero absoluto (0 K) emiten radiación en la banda infrarroja del espectro electromagnético, de acuerdo con la longitud de onda, la radiación infrarroja está en el rango de 0.75 a 1000 μm , ubicado entre la banda visible y la microondas, ver Figura 24 (Clark et al., 2003).

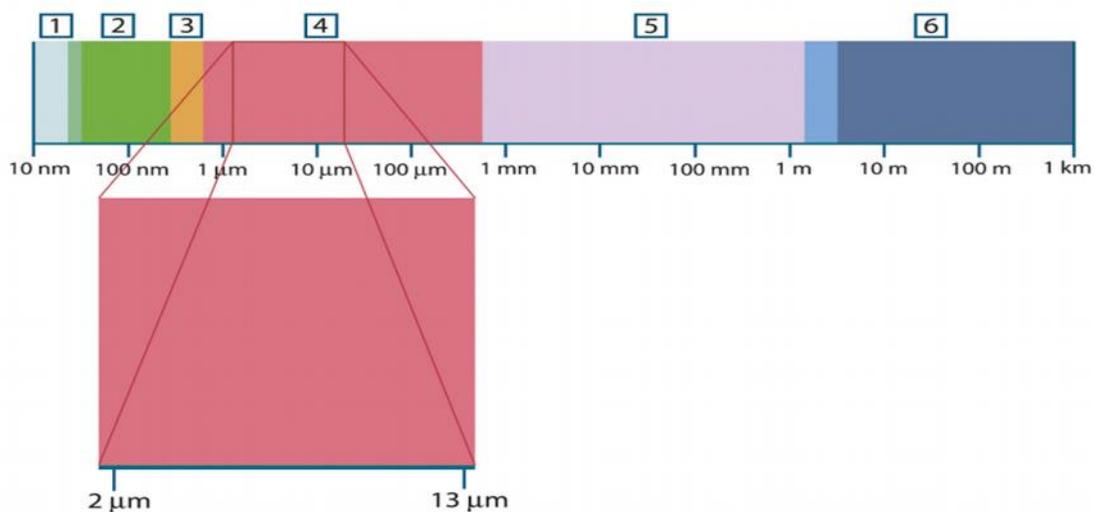


Figura 24. Espectro electromagnético. 1: Rayos X; 2: Ultravioleta; 3: Visible; 4: Infrarrojo; 5: Microondas; 6: Ondas de radio. Adaptado de (FLIR-Forward Looking Infrared. (2013), “User’s manual FLIR Exx Series” (Wilsonville, United States: FLIR), p. 100).

Adicionalmente esta práctica se debe realizar en el horario nocturno en estructuras que están expuestas al sol durante todo el día, debido a que el espesor aumenta el máximo volumen de

almacenamiento de calor entregando de esta forma datos confiables, ver Figura 25 (Monteagudo Viera, 2010).

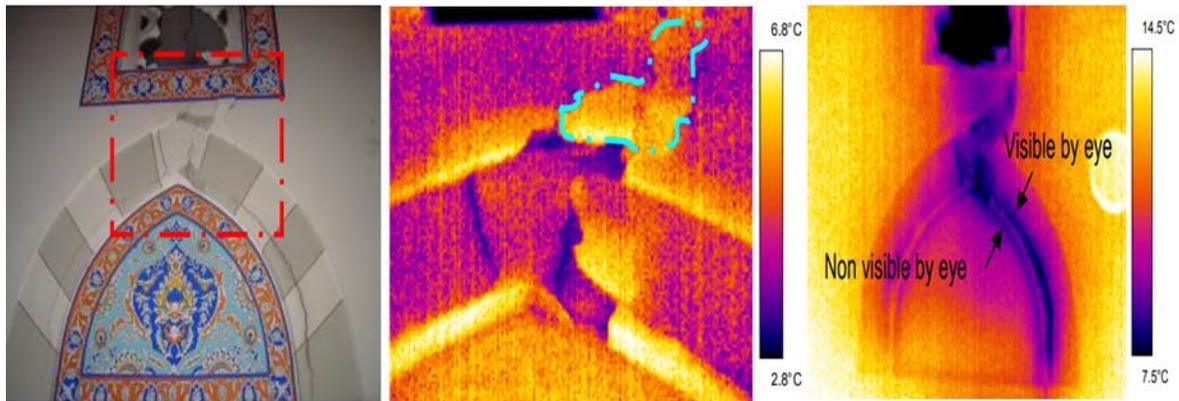


Figura 25. Grietas en un muro analizadas mediante termografía infrarroja. Adaptado de Tavukçuoğlu, A., Akevren, S., & Grinzato, E. (2010). In situ examination of structural cracks at historic masonry structures by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing. *Journal of Modern Optics*, 57(18), 1779-1789.

3.4.1.6 Sensor de fatiga electroquímica. El sistema de sensores de fatiga electroquímica (EFS, por sus siglas en inglés) es un método no destructivo, su función es detectar crecimiento de fisuras en el metal por fatiga o zonas susceptibles a presentar daños por fatiga generados principalmente por eventos sísmicos, las fluctuaciones son el resultado del estrés cíclico y pueden ser indicativas de daño por fatiga y crecimiento de grietas por fatiga (Gastineau et al., 2009).

Durante el monitoreo se asigna una matriz de sensores EFS a cada zona de interés en la estructura, el sistema posee dos sensores llenos de electrolitos a base de agua, un potencióstato cuyo objetivo es aplicar un voltaje constante de polarización entre la estructura y los sensores, posee un software de recolección y un sistema de análisis de datos (Phares, 2007).

El funcionamiento del sistema EFS se basa en polarizar anódicamente los sensores que entran en contacto con la zona de interés a ser monitoreada con un pequeño voltaje aplicado que causa una película de óxido pasivo, la corriente que fluye genera estrés en la punta de la grieta debido a la plasticidad que hace que la película se rompa identificando actividad y presencia de grietas por fatiga (Miceli, M, 2008).

La pasivación del material recién expuesto en la punta de una grieta por fatiga creciente, cambia la respuesta de resistencia de los sensores, lo que indica una grieta activa en crecimiento, y la extensión del cambio durante los ciclos puede indicar la tasa de crecimiento de grietas. La Figura 26 ilustra el concepto general de los sistemas basados en EFS (Miceli et al., 2016).

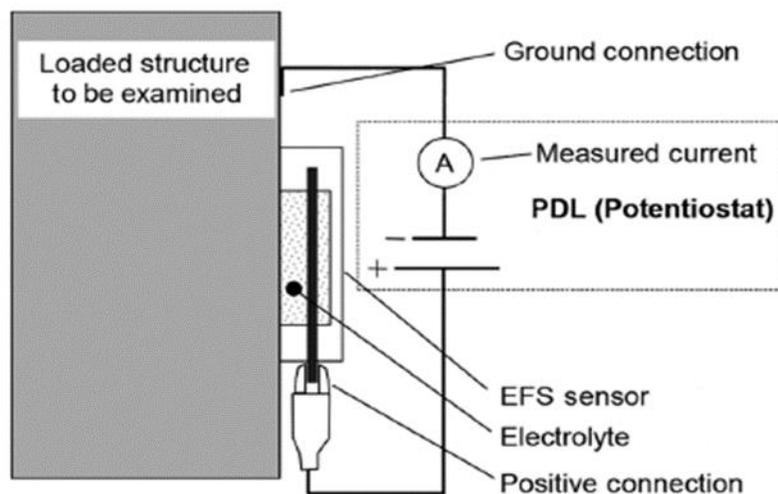


Figura 26. Esquema de los sistemas basados en EFS Adaptado de Miceli, M., Moshier, M. A., Nelson, L., & Brinkerhoff, R. (2016). Innovative technology for continuous fatigue crack condition monitoring of bridges: long-term electrochemical fatigue sensor (LTEFS). *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 58(7), 351-359.

3.4.1.7 Método ultrasonido. Por medio de las imágenes ultrasónicas C-scan se logra ubicar daños presentes en los elementos del puente, como huecos en la lechada y corrosión en los tendones de los puentes postensados tan solo con realizar una única prueba (Iyer et al., 2005).

Las muestras se pasan por medio de un foco de haz acústico y los datos obtenidos son captados por un transductor receptor, las muestras se escanean mecánicamente mientras el haz se desplaza en toda la superficie en el eje longitudinal permitiendo que el foco del transductor logre obtener información de corrosivos y grietas en el concreto en términos de tamaño de falla, distancia y profundidad. La Figura 27 describe el procesamiento de datos en el método de ultrasonido (Sinha et al., 2003).

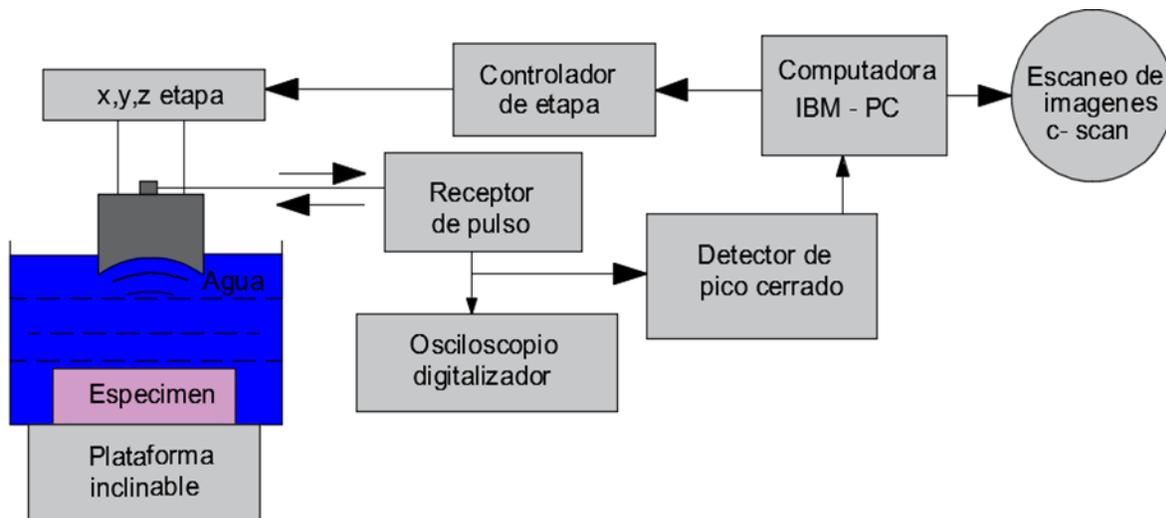


Figura 27. Diagrama de bloques de imágenes ultrasónicas. Adaptado de Iyer, S. R., Sinha, S. K., & Schokker, A. J. (2005). Ultrasonic C-scan imaging of post-tensioned concrete bridge structures for detection of corrosion and voids. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(2), 79-94.

Por medio de la propagación de ondas acústicas de alta frecuencia permite obtener valores representativos para determinar la homogeneidad del material analizado tan solo con

realizar una única medida, aunque no permite medir directamente la resistencia del concreto, se logra obtener un valor aproximado de la resistencia por medio de curvas de convergencia con un margen pequeño de error (Henry, 2003).

La velocidad de propagación ultrasónica durante el proceso de fraguado presenta un aumento a medida que el concreto gana resistencia, debido a que la velocidad de propagación es proporcional al aumento de resistencia mecánica del material (Ortega & Ripani, s. f.). Para mejorar la precisión, se implementan procedimientos iterativos para compensar el hecho de que, en presencia de daños, la onda no siempre se propaga en línea recta (Aggelis et al., 2009).

3.4.1.8 Medida de potencial de media celda. Es un método no destructivo para evaluar la corrosión de las barras de acero antes de detectar visualmente el daño en la superficie de la estructura de concreto y está estandarizada por (ASTM, C(2009).876-09), la Tabla 2 da los parámetros para el electrodo de sulfato de cobre-cobre, calomel y el cloruro de plata- plata según ASTM, C 876-09, (Yodsudjai & Pattarakittam, 2017).

Tabla 2.

Interpretación las medidas de del potencial de corrosión

<i>Cu/CuSO₄</i>	<i>Calomel (SCE)</i>	<i>Ag/AgCl</i>	<i>Interpretación</i>
E>-200 mV	E>-126 mV	E>-119 mV	Mayor del 90% de que no ocurra corrosión
-200 mV<E<-350 mV	-126 mV<E<-276 mV	-119 mV<E<-269 mV	La actividad de corrosión es incierta
E<-350 mV	E<-276 mV	E<-269 mV	Mayor del 90% de probabilidad de que no ocurra corrosión

Nota: Adaptada de Bjegovic, D., Mikulic, D., & Sekulic, D. (2000, October). Non destructive corrosion rate monitoring for reinforced concrete structures. In 15th World Conference on Non-Destructive Testing (pp. 642-652).

La Figura 28 describe el método de potencial de media celda el cual consiste en sumergir una varilla de metal en una solución de sus propios iones con la finalidad de obtener un potencial de referencia constante, se conecta la varilla de metal con el acero de refuerzo por un voltímetro, y la solución de iones se conecta al agua de los poros a través de humedad porosa, logrando hacer mediciones de potencial y correlacionar los potenciales medidos con corrosión observada en el refuerzo (Iyer, Sinha, & Schokker, 2005).

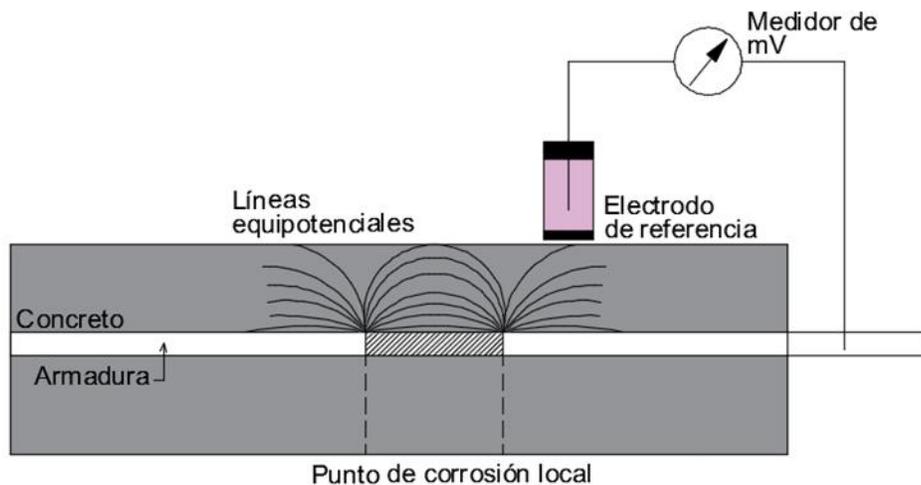


Figura 28. Principio y componentes principales del potencial de media celda. Adaptado de Raupach, M. (2003). Half-cell potential measurements–Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures*, 36, 461-471.

Este método se puede emplear durante toda la vida útil de la estructura con temperatura ambiente superior a $+2^{\circ}\text{C}$ y que sus elementos de concreto no posean capas adicionales (asfalto o pinturas), ya que generan errores en la toma de datos haciendo que el monitoreo sea ineficaz (Elsener et al., 2003).

Cuando se presenta corrosión uniforme los datos analizados de los potenciales en la superficie del concreto son muy cercanos al potencial en la interfaz del acero a diferencia de la

corrosión no uniforme, los potenciales difieren sustancialmente a la interfaz del acero al depender directamente del espesor y la resistencia del concreto (Kranc & Sagues, 1994).

3.4.1.9 Método de impacto-eco. El método de impacto-eco es un método no destructivo de fácil aplicación con poco margen de error aunque posee limitaciones en el uso en estructuras compactas las cuales han dificultado evaluar los espectros de frecuencia propia con picos de resonancia (Kachanov et al., 2019).

El método de impacto-eco tiene gran importancia en la detección de daños generados por eventos sísmicos como la pérdida de la capacidad de carga en la estructura, además se emplea para determinar la profundidad de las grietas en el concreto, la delaminación en el tablero del puente y daños por corrosión (Gucunski et al., 2006).

Consiste en dejar caer un martillo que genera un impacto mecánico en la superficie del elemento de concreto produciendo tres tipos de ondas (dilatacional (P), ondas distorsivas (S) y onda Rayleigh (R)) (Sun et al., 2018).

Las ondas P y S están asociadas con el desplazamiento de partículas en sentido paralelo y perpendicular respectivamente, según la dirección de propagación (Liu et al., 2019), una vez llegue la onda P a la grieta esta se reflejará por el límite de la grieta y luego se propagará como una onda difractada, determinado el tiempo de llegada de la onda P, por medio de un receptor ubicado en la superficie del elemento, la Figura 29 describe el funcionamiento del método de impacto-eco (Sansalone & Streett, 1997).

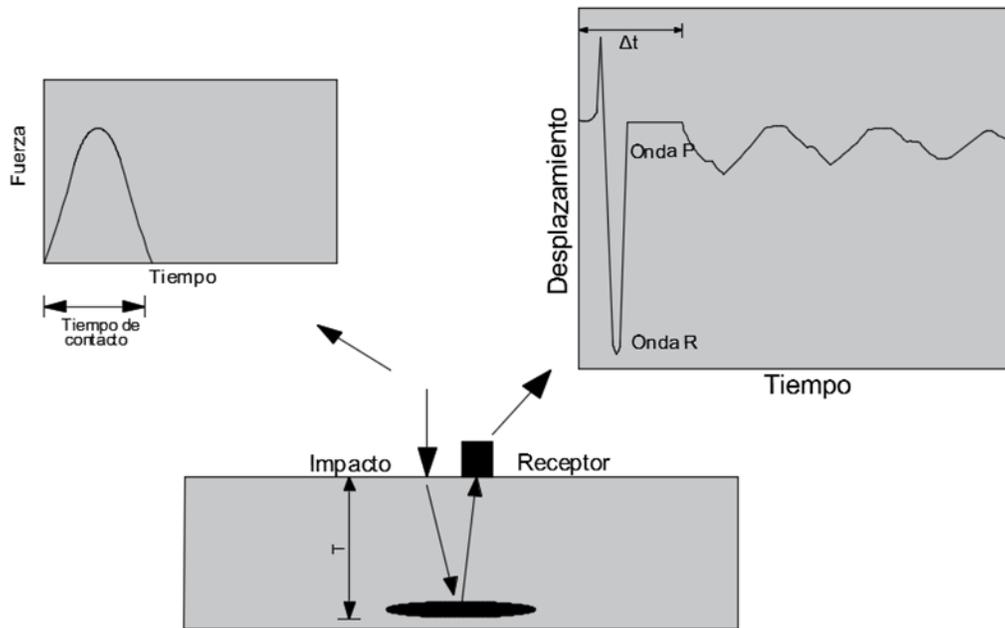


Figura 29. Esquema de la configuración de prueba para estimar la profundidad de la grieta. Adaptado de Liu, Y.-L., Shi, J.-J., Huang, J.-Q., Wei, G.-S., & Wu, Z.-X. (2019). Grouting Defect Detection of Lapped Bar Connections Based on Impact-Echo Method. SHOCK AND VIBRATION, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1934240>.

Una vez conocida la velocidad de la onda P por medio de la ecuación 13 (Sansalone & Streett, 1997), posteriormente se determina la profundidad del daño presente en el elemento de la estructura por medio de la ecuación 14 (Carino Nicholas J., 2000).

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu)(1-2\nu)}} \quad Ec. (13)$$

Donde

E = Módulo de Young

ν = Coeficiente de Poisson

ρ = Densidad del material

$$T = \frac{C_p * t}{2} \quad Ec. (14)$$

Donde

T = Profundidad del daño

t = Tiempo de recorrido total

4. Metodología de Detección de Daños en la Estructura

4.1 Estrategias de tiempo

El monitoreo estructural se caracteriza según la duración y la frecuencia de las mediciones, se dividen en tres categorías, monitoreo a corto; largo plazo; periódico y activado. El tipo de monitoreo depende directamente del fenómeno que se requiera estudiar en la estructura, generalmente el análisis de crecimiento de fisuras se realiza por medio de monitoreo a largo plazo mientras que el análisis de amortiguamiento del puente se realiza a corto plazo (Mufti et. Al., 2006).

4.1.1 Monitoreo a corto plazo. Este tipo de monitoreo se emplea cuando se requiere examinar la estructura en un momento específico y se tiene incertidumbre acerca de posibles daños, generalmente se usa para evaluar los cambios de carga de tráfico, cambio del sistema estructural o reforzamiento de una estructura.

4.1.2 Monitoreo a largo plazo. Se considera que un monitoreo es a largo plazo cuando se lleva a cabo durante un periodo de años a décadas, gracias a los avances significativos en los sistemas de monitoreo de salud estructural en puentes ha permitido que este tipo de monitoreo se puede implementar de forma satisfactoria especialmente cuando los cambios de la carga y de temperatura son lentos o si las cargas no son predecibles, además de monitorear los daños presentados en la estructura debido a fenómenos ambientales como sismos, huracanes, inundaciones.

4.1.3 Monitoreo periódico o activado. El monitoreo periódico frecuente recopila datos a intervalos de tiempo regulares y generalmente se emplea cuando las cargas son estáticas y el fenómeno monitoreado cambia gradualmente, mientras que la supervisión periódica activada recopila datos en un evento específico cuando un parámetro a analizar supera el umbral siendo su intervalo de muestreo definido por la naturaleza dinámica del parámetro a estudiar.

4.2 Escala de monitoreo en la estructura

Local: monitoreo que se centra en una ubicación específica en el puente; Los ejemplos incluyen monitoreo para evaluar el crecimiento de una grieta conocida, pandeo local, corrosión en ubicaciones específicas y mediciones de deformación.

Miembro: monitoreo que se centra en un miembro específico o una región del tamaño de un miembro de un puente; por ejemplo, distribuciones de deformación o desviaciones de un miembro particular.

Global: monitoreo que se centra en la salud general de todo el puente; Los ejemplos incluyen frecuencias naturales y formas de modos, distribuciones de desviación de puentes, emisiones acústicas, distribuciones de temperatura y perfiles de viento.

4.3 Niveles generales de detección de daños

En el proceso de monitoreo de estructuras existen dos tipos de daño, lineal y no lineal. El daño lineal es aquel que se presenta en la estructura pero no afecta sus propiedades elásticas y permite que las ecuaciones que representan el movimiento total de la estructura se sigan implementando. El daño no lineal es aquel que las ecuaciones de movimiento cambian por completo debido principalmente a la variación de la respuesta dinámica (Farrar, Charles, Doebling & Scott ,1997). Por lo general, el monitoreo de la salud estructural se realiza, tomando el daño lineal debido a las dificultades en el modelado con daño no lineal (Rytter, 1993).

Nivel 1: Determinación de la existencia de daño en la estructura.

Nivel 2: Nivel 1 más la localización geométrica del daño

Nivel 3: Nivel 2 más la cuantificación del daño.

Nivel 4: Nivel 3 más la predicción del tiempo de vida restante de la estructura, también conocido como prognosis.

4.4 Metodología detallada de detección de daños basados en vibraciones

a. Inspección visual de la estructura

Si el daño presente en la estructura no es detectado visualmente se requiere empezar con el proceso de detección de daños basados en vibraciones. En caso contrario, se pueden emplear métodos de

detección local con el objetivo de localizar y determinar la magnitud del daño de forma precisa (Lazcano et al., 2011).

b. Investigación de la respuesta dinámica de la estructura previa al daño

Si no es posible obtener la respuesta dinámica de la estructura se recomienda empezar con el proceso de detección aplicando métodos de detección basados en la Transformada Wavelet, este método no requiere conocer el estado previo del daño, además de desarrollar modelos no detallados de elementos finitos de la estructura, donde se emplee las condiciones dinámicas previas al daño (Lazcano et al., 2011).

c. Puesta de práctica de los métodos de detección de daño basados en vibraciones.

- i. Estimación preliminar mediante métodos y cambio en las matrices de flexibilidad.
- ii. Implementación de los métodos de Índice de Daño y Curvaturas por medio del Enfoque Mixto. En cada método aplicado se requiere que se analice el mayor número de formas modales, y detectar previamente las coordenadas de los puntos de inflexión de las formas y curvaturas modales. Además se debe poner atención a los resultados obtenidos en la forma modal fundamental, pues es la más exenta de presentar dispersión no relacionada al daño presente en la estructura, causados por la localización del mismo o por errores en los valores utilizados. Si los datos modales contienen aun un porcentaje apreciable de ruido, éstos métodos serán los más apropiados.
- iii. En caso de presentarse dispersión como los ilustrados anteriormente para los métodos de curvaturas e Índice de Daño (solo si estos no son cercanos a los extremos del elemento), se recomienda implementar los métodos basados en la transformada Wavelet, con las recomendaciones mencionadas anteriormente.

d. Iteraciones necesarias

Si la detección y localización del daño se ha comprobado por más de un método de detección, se considera que el daño fue caracterizado exitosamente. En cambio, si los métodos arrojan localizaciones posibles del daño, se deben repetir las pruebas de vibración en la estructura con los sensores de medición en posiciones más cercanas a la posible localización del daño, de manera que iteraciones sucesivas de los pasos 2, 3 y 4 detectaran exitosamente la localización del daño (Lazcano et al., 2011).

5. Etapas en el Establecimiento de Monitoreo en Puentes

Para obtener la condición estructural de un puente se puede realizar a través de dos tipos de modelos, modelos probabilísticos y modelos de elementos finitos. Los modelos probabilísticos se emplean en puentes de corto y mediano alcance, los cuales requieren de datos determinísticos (tipo, tamaño, edad y daños identificados en el puente) y datos probabilísticos (propiedades del material, el efecto de envejecimiento de los materiales, la fatiga, las cargas externas y los daños no identificados), además permiten ser mejorados conforme se conozcan más datos de las inspecciones que posteriormente son introducidos en el sistema, calculando la confiabilidad del puente considerando los datos estadísticos para algunas variables por medio de un proceso de simulación Monte Carlo. Los modelos de elementos finitos se emplean para puentes de largo alcance o especiales, los cual son calibrados con datos determinísticos, estos modelos se emplean para lograr reproducir la respuesta lineal ante acciones dinámicas de la estructura, con el fin de comparar las características calculadas con las experimentales (Balankin et al., 2003).

5.1 Línea Base

El Instituto Mexicano de Transporte propuso implementa el sistema de administración de puentes (SIAP-IMT) el cual implementa tres diferentes niveles de inspección en puentes descritos en la Tabla 3. Los cuales evalúan las condiciones estructurales del puente por medio de pruebas dinámicas y una base de datos que almacena datos de diseño, especificaciones técnicas, planos, historiales de inspección y mantenimiento, al igual de registro fotográfico de la estructura, donde se compara el comportamiento estructural después de eventos sísmicos o en periodos definidos. Para ello se requiere conocer los parámetros de diseño de la misma, el empleo de modelos matemáticos, toma de mediciones y recopilación de datos, que posteriormente se realizará la calibración del modelo de elementos finitos para optimizar la predicción de deflexiones e indirectamente, obtener resultados lo más cercanamente posibles a la realidad, aunque intrínsecamente todo modelo posee hipótesis y aproximaciones que son ineludibles y que marcan una restricción entre la coincidencia de lo real y lo modelado (Carrion et al, 2006).

Tabla 3.

Niveles de inspección en puentes según su técnica y criterio de análisis

Nivel de inspección	Técnica de inspección	Criterio de análisis
General	Visual	Índice de la condición estructural
Detallada	Pruebas dinámicas, estáticas, semiestáticas y pruebas de carga Evaluación de corrosión	Capacidad estructural, y vida residual o vida útil
Especial	Según se requiera	Evaluación estructural, capacidad de carga, y vida útil

Nota: Adaptado de Niveles de inspección en los puentes. Adaptado de Publicación Técnica No 302, Qro 2006. Secretaría de comunicaciones y transportes Instituto Mexicano del Transporte. (Metodologías de inspección no destructiva aplicables a sistemas de gestión de puentes. p.34

5.2 Estructura modular para implementación de monitoreo en puentes

- Módulo de acceso y transferencia de información a la base de datos enfocados en datos históricos, planos, reportes, análisis estadístico entre otras.
- Módulo de captura de datos de inspección.
- Módulo de análisis general, se emplea en revisiones periódicas por medio de inspección visual, siguiendo un procedimiento definitivo y sistemático, que implementa parámetros de evaluación para evitar valoraciones subjetivas que ayuden a cuantificar el daño en la estructura.
- Módulo de análisis detallado, evalúa parámetros de rigidez estructural de toda la estructura calculados a partir de pruebas dinámicas, cargas estáticas o semiestáticas.
- Módulo de análisis estructural, que incluye el módulo de capacidad de carga y estimación de vida útil, con el objetivo de predecir a un mediano plazo las necesidades de mantenimiento, rehabilitación o reposición de puentes en el desempeño actual y futuro.
- Módulo para la asignación de prioridades, que abarca el módulo económico, con el objetivo de estimar el costo de cada concepto y tener un idea del monto total requerido para jerarquizar los proyectos y programas necesarios.
- Módulo para la generación de programas de inspección, programas de obra y proyectos.

La Figura 30. Resume el procedimiento requerido para establecer un monitoreo integral en puentes capaz de obtener información relevante acerca del estado actual de la estructura en términos dinámicos y estáticos.

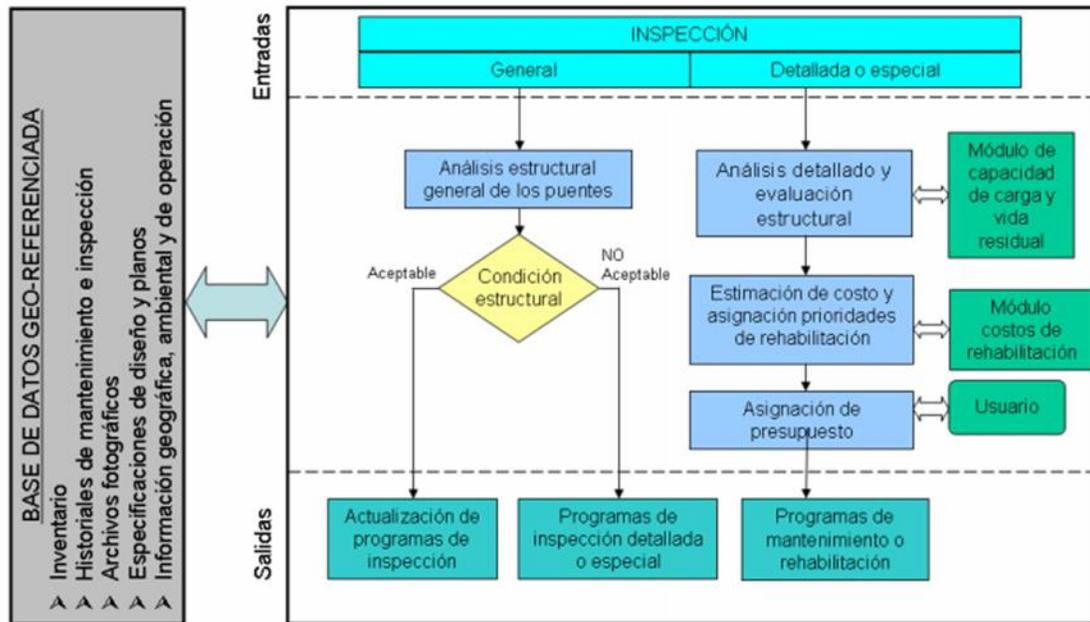


Figura 30. Procedimiento para realizar un monitoreo de salud estructural en puentes. Adaptado de Carrión Viramontes, F. J., Quintana Rodriguez, J. A., López López, J. A., Balankin, A., & Samayoa Ochoa, D. (2006). Metodologías de Inspección no Destructiva Aplicables a Sistemas de Gestión de Puentes. Publicación Técnica, (302).

6. Análisis de Datos y Evaluación de Condición

6.1 Identificación modal de entrada- salida

Esta técnica se basa en la estimación de un conjunto de funciones de respuesta de frecuencia (FRF) las cuales relacionan la fuerza aplicada y la respuesta correspondiente en varios pares de puntos a lo largo de la estructura con una amplia resolución espacial. Por medio de diferentes técnicas (impacto, desplazamiento, vibradores), proporcionan una entrada de banda ancha logrando excitar

diferentes modos de vibración del puente, aunque su resolución de frecuencia de las estimaciones espectrales son relativamente bajas, impide estimar de forma precisa los factores de amortiguamiento modal y por su baja energía impide excitar algunos modos relevantes de vibración de la estructura.

6.1.1 Excitación por vibradores en puentes. Esta técnica permite realizar análisis modal y determinar las funciones de respuestas en frecuencias o funciones de transparencia, además de tener control sobre la señal de excitación al conocer la fuerza aplicada a la estructura, empleando señales aleatorias o barrido senoidal en un rango de frecuencia preestablecido permitiendo estudiar la frecuencia natural del puente (Aktan, Lee, Chuntavan, & Aksel, 1994).

Esta técnica emplea vibradores servo-hidráulicos o electromagnéticos que permiten aplicar fuerzas máximas de 5 a 90 kN, aunque se convierte en una técnica tediosa en su aplicación debido al manejo y colocación de los vibradores en la estructura aumentando su costo (Deger, Cantieni & Pietrzko, 1994). El uso de péndulos en puentes permite estudiar las frecuencias naturales de forma exacta y económica, se basa en cambiar la masa y longitud con el objetivo de variar la frecuencia de vibración de la estructura aunque no se logra realizar el análisis de funciones de transferencia y el análisis modal completo, existe el método del “chasquido” propuesto por French y Gordon que permite determinar coeficientes de amortiguamiento de estructuras a través de señales de excitación amónica con variación en el tiempo que logran excitar los modos de vibración de interés, logrando que las amplitudes de cada modo de vibración sean de magnitud adecuada para realizar la medición una vez la excitación se haya detenido (French & Gordon, 1995).

6.1.2 Excitación por desplazamiento en puentes. Esta técnica se basa en aplicar una fuerza estática en el centro del puente generando un desplazamiento estático, la carga se libera de forma instantánea lo que genera que posteriormente el puente tienda a recuperar su punto de equilibrio, a través de un dispositivo se aplica la fuerza que produce la deflexión en el puente librando la carga de forma instantánea.

Esta técnica permite aplicar las cargas de forma vertical u horizontal sobre el puente obteniendo diferentes modos de vibración de la estructura con muy buenos resultados entre ellos los coeficientes de amortiguamiento de la estructura, además esta técnica es apropiada para estudios de laboratorio, con puentes a escala o puentes cortos ya que en campo los desplazamientos que se requieren producir en el puente tienden a ser complejos elevando los costos de la pruebas (Douglas & Reid, 1982) (Douglas, Maragakis & Nath, 1990).

6.1.3 Excitación por impacto en puentes. Esta técnica se basa en golpear el puente con un martillo de impacto con una masa proporcionada al tamaño del mismo, la fuerza de excitación producida se mide por medio de un transductor de fuerza colocado en la punta del martillo, en ocasiones emplean acelerómetros que son instalados sobre el otro extremo del martillo para medir directamente la aceleración de la excitación, además de medir la fuerza de inercia de la masa fuera del plano del transductor, esta técnica posee limitaciones en su aplicación para puentes de grandes longitudes debido a que entre más grande sea el puente requiere el uso de martillos con mayor masa, se recomienda el uso de este método para puentes menores de 30 metros de longitud, la Figura 31 describe la configuración del martillo de impacto (Green, 1995).



Figura 31. Configuración del Martillo de impacto vista longitudinal. Adaptado de Green, M. F. (1995, February). Modal test methods for bridges: a review. In PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING (pp. 552-552). SPIE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL.

El sistema está compuesto por un amortiguador que absorbe la energía del impacto el cual aumenta el tiempo de duración del impulso de excitación, una celda de carga y una interfase compuesta de hule de 25 mm de espesor para evitar que se presente rebote de la masa, ver Figura 32, además posee limitaciones debido a que se debe controlar de manera precisa el tiempo de duración del pulso (t_0), por medio de la ecuación 23 se logra excitar las frecuencias importantes del puente (Agardh, 1994).

$$t_0 \leq \frac{0.44}{f_{max}} \quad Ec. (23)$$

Donde

f_{max} = Frecuencia más alta que se desea excitar, en Hz

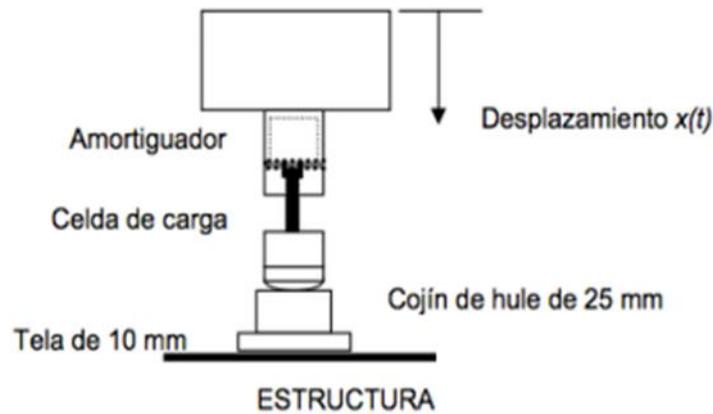


Figura 32. Configuración del martillo de impacto vista transversal. Adaptado de Agardh, L. (1994, March). Impact Excitations of Concrete Highway Bridges. In Proceedings of the 12th International Modal Analysis (Vol. 2251, p. 1329).

6.2 Identificación modal de solo salida

La naturaleza de la excitación ambiental se define por la entrada múltiple y contenido de frecuencia de banda ancha, estimulando un número significativo de modos de vibración a través de métodos de identificación modal de solo salida, donde se asume la entrada de excitación como un ruido blanco gaussiano medio cero, lo que permite interpretar la excitación real como la salida de un filtro adecuado excitado con la entrada de ruido blanco.

6.2.1 Pruebas de vibración ambiental en puentes. Las pruebas de vibraciones ambientales (AVT, por sus siglas en inglés) sobre una estructura no requiere de excitación artificial, por el contrario emplea la excitación producida por el viento o el tráfico vehicular y por medio de transductores y convertidores A/D miden con precisión los niveles muy bajos de

respuesta dinámica de la estructura, lo que permite identificar las propiedades modales de grandes puentes durante el transcurso de la vida útil (CUNHA & CAETANO, 2006).

Las AVT permiten realizar pruebas sobre la estructura sin interrumpir su uso normal obteniendo buenos resultados, es un método de fácil empleo y significativamente más económico que los métodos que utilizan vibraciones inducidas que requieren de equipos extremadamente costosos y pesados que generalmente no se encuentran en la mayoría de laboratorios dinámicos. Aunque dada su naturaleza, la excitación producida por el ambiente normalmente no es controlada, se genera un problema de estabilidad del estado de vibraciones por tal motivo se pueden generar amplitudes de excitación diferentes en cada toma de datos, produciendo pequeños cambios en las frecuencias naturales del puente (Araujo, Rondón & Cho, 2010).

Este método emplea sensores de referencia en posiciones fijas y conjuntos de sensores móviles en diferentes puntos de medición en la estructura, el número de puntos requeridos dependen de la resolución espacial para caracterizar la forma de modos de vibración más importantes, y los puntos de referencia deben estar alejados de los puntos nodales, además las AVT emplean acelerómetros de equilibrio de fuerza que permiten realizar mediciones en rango de 0-50 Hz , son dispositivos insensibles a vibraciones de alta frecuencia las cuales se transmiten a un sistema de adquisición de datos a través de cables eléctricos relativamente largos (Cunha & Caetano, 2005).

6.3 Métodos de análisis dinámicos aplicados al estudio de puentes

6.3.1 Método de selección de picos. El método de selección de picos calcula los picos de las densidades espectrales de potencia normalizadas promedio (ANPSD, por sus siglas en inglés)

al convertir las aceleraciones obtenidas al dominio de frecuencia por medio de la transformada de Fourier discreta (DFT, por sus siglas en inglés) siendo estas las frecuencias naturales del sistema (De Roeck et al., 2000).

Su función es ayudar a determinar que frecuencias pueden considerarse naturales, por medio de la premisa que la función experimental de respuesta de frecuencia (FRF, por sus sigla en inglés) obtiene valores extremos cercanos a las frecuencias naturales, es decir la frecuencia con la que se produce el valor extremo se puede considerar como la frecuencia del sistema (Bendat & Piersol, 1980).

Adicionalmente este método de identificación supone que la respuesta dinámica en resonancia solo está determinada por un modo. La validez de esta suposición aumenta a medida que los modos de vibración de la estructura discrepan entre si y su amortiguación es menor (Peeters et al., 1998).

La selección de picos es una técnica que emplea algoritmos de dominio de frecuencia, por su fácil aplicación y su velocidad de procesamiento es alta sin embargo, estos algoritmos implican promediar información temporal, descartando así la mayoría de sus detalles, lo que genera que el método de análisis para escoger picos se convierta en un análisis subjetivo (Ren & Zong, 2004).

Aunque el enfoque del método de selección de picos ha demostrado ser confiable en la identificación de parámetros modales para puentes de largo alcance, el empleo de otros métodos de identificación más rigurosos generan ventajas al simplificar el proceso de identificación modal con mejores resultados generalmente cuando los modos de la estructura están estrechamente espaciados (Zhang, Prader, Moon, et al., 2013).

6.3.2 Técnica de disminución aleatoria. La técnica de disminución aleatoria es un método de procesamiento de datos cuya función es obtener la respuesta de vibración libre de un sistema a partir de una o más respuestas aleatorias estacionarias (Xiang & Zhong, 2017).

Además tiene como premisa extraer una gran cantidad de segmentos de tiempo de la señal, que posteriormente se promedian incluyendo el valor inicial registrado, lo que genera que la parte aleatoria de las respuestas desaparezcan del sistema, quedando tan solo las respuestas a las condiciones iniciales como se muestra en la Figura 33 (Kölling et al., 2014).

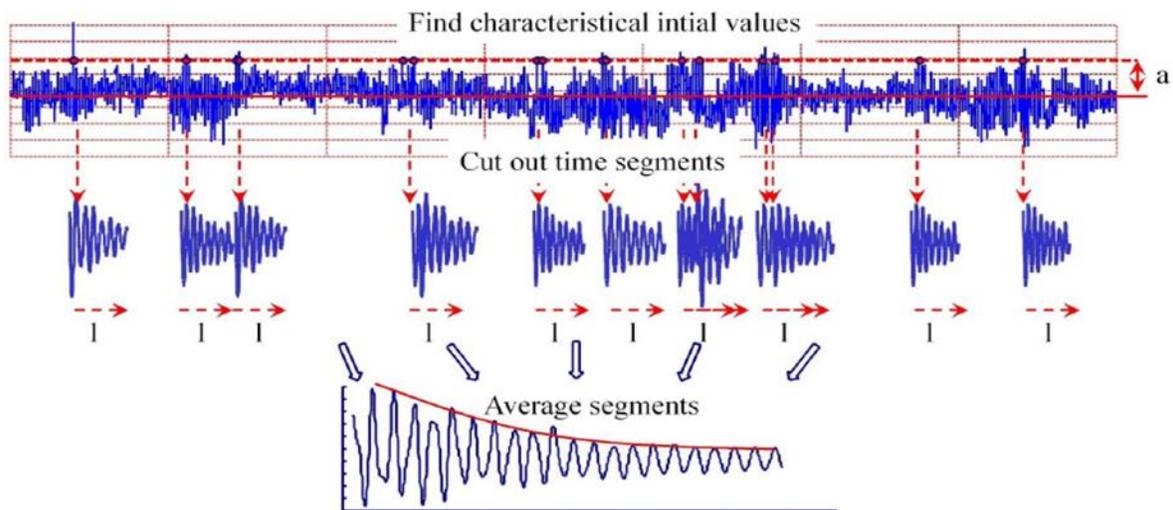


Figura 33. Principio de la técnica de disminución aleatoria. Adaptado de Berlin, B. (2014). Application of the random decrement technique for experimental determination of damping parameters of bearing structures.

Se ha demostrado que la parte determinista que queda es la respuesta de descomposición libre asociada con la condición inicial, a partir de la cual los parámetros modales y las características de amortiguación se pueden extraer de la siguiente manera, la ecuación 15 describe la vibración forzada que considera las cargas de las fluctuaciones aleatorias del sistema (Xiong et al., 2017).

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + Ky(t) = F(t) \quad Ec. (15)$$

Donde

M = Matriz de masa

D = Matriz de coeficiente de amortiguación

K = Matriz de rigidez de la estructura

$y(t)$ = Vector de desplazamiento

$\dot{y}(t)$ = Vector de velocidad

$\ddot{y}(t)$ = Vector de aceleración

$F(t)$ = Vector de carga externa no estacionaria de media cero

Para lograr la vibración libre se requiere reemplazar el vector variable por el decremento aleatorio (RD, por sus siglas en inglés) determinando las frecuencias y el amortiguamiento como se muestra en la ecuación 16, siendo t el cambio de tiempo inicial de partida donde se analiza en N diferentes instantes de tiempo de partida (Jian Xie & Xiaoru Wang, 2016).

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + Ky(t) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N F(t_i + t) \quad Ec. (16)$$

Donde

M = Matriz de masa

$\ddot{y}(t)$ = Vector de aceleración

D = Matriz de coeficiente de amortiguación

$\dot{y}(t)$ = Vector de velocidad

K = Matriz de rigidez de la estructura

$y(t)$ = Vector de desplazamiento

N = Número de puntos de activación

$F(t)$ = Vector de carga externa no estacionaria de media cero

t_i = Son las instancias de tiempo que satisfacen la condición de activación en la estación

La ecuación 17 describe la respuesta de descomposición libre del vector de disminución aleatoria que se obtiene del promedio de las respuestas con las condiciones iniciales preinscritas, este proceso separa la parte aleatoria asociada a la excitación de la parte determinista, siendo esta última la respuesta de descomposición libre del vector de disminución aleatoria (Lee et al., 2002).

$$z(t, x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(t + t_i, x) \quad Ec. (17)$$

Donde

$y(t, x)$ = Es la medida en x

t_i = Son las instancias de tiempo que satisfacen un prescrito
condición de activación en una estación principal

N = Número de puntos de activación

t = Variable tiempo

La elección de las condiciones iniciales es primordial para garantizar la estabilidad de método del decremento aleatorio siendo las condiciones de desplazamiento nulo y velocidad positiva propuestas (COLE, 1973) y el número de puntos de activación N también es crítico para obtener una estimación de amortiguamiento estable y relevante (Jeary, 1997).

6.3.3 Método de descomposición del dominio de frecuencia. El método de descomposición del dominio de frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés) utiliza funciones de respuesta de frecuencia las cuales son medidas directamente, lo que proporciona la eliminación de posibles errores producidos por el análisis modal (Klerk et al., 2005). Los procedimientos basados en el dominio de la frecuencia son menos sensibles a los parámetros de diseño del algoritmo, pero proporcionan una resolución de frecuencia menor y, por lo general, no son tan precisos (Carbone et al., 1999).

El método de dominio de frecuencia se basa en la evaluación de sus componentes espectrales y permite realizar el análisis en tiempo real por medio del empleo de la transformada de Fourier que realiza el análisis espectral de forma rápida (Marple & Carey, 1989).

Por tal razón se presenta una amplitud de forma del modo alrededor el daño que se estima por medio de datos de vibración, el procesamiento de datos se convierte en un problema para definir la matriz modal de datos obtenidos, empleado el método de descomposición de frecuencia se llega a la ecuación 19 (Yamamoto et al., 2018).

$$\bar{y}(w)\bar{y}^T(w) = U(w)\Sigma(w)U^T(w) \quad Ec. (19)$$

Donde

$\bar{y}(w)\bar{y}^T(w)$ = Espectros de potencia cruzada

$U(w)$ = Forma del modo estimado

$\Sigma(w)$ = Espectros de potencia cruzada de las coordenadas de base

(w) = Modo predominante en la frecuencia

6.3.4 Métodos de análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad se implementa para incrementar la confianza en términos de precisión en un modelo, además se considera un estudio cuantitativo o cualitativo de las relaciones que se generan por medio de la información que entra y sale de un modelo, tomando los parámetros de entrada más influyentes en la variabilidad de los parámetros de salida (Roddam, 2005).

El método de análisis de sensibilidad global, permite determinar de manera cuantitativa los parámetros de entrada, los cuales varían al mismo tiempo en rangos de incertidumbre diferentes afectando el desempeño del modelo (Iooss & Lemaître, 2015).

El primer paso a paso que requiere el sistema de sensibilidad es determinar los parámetros de entrada que se van a analizar; definir el rango de variación a cada parámetro de entrada; generar la matriz de estados operativos por medio de la técnica de muestreo; evaluar la muestra en el modelo y por último analizar los resultados empleando la técnica de sensibilidad (Saltelli, Ratto, Campolongo, Cariboni, Gatelli & Tarantola, 2008).

Cuando se identifican los elementos estructurales principales, se determinan el subconjunto de frecuencias por medio del estudio de sensibilidad para las cuales el subconjunto de elementos de rigidez son significativos estableciendo el nivel de cambio de la frecuencia respecto a la rigidez. La ecuación 20 describe la matriz de sensibilidad (Carrion Viramontes et al., 1999).

$$S = \left\{ \frac{\omega_i}{k_j} \right\} \quad Ec. (20)$$

Donde

$\omega_i = (i = 1, \dots, m)$ vector de parámetros modales

$k_j = (j = 1, \dots, m)$ vector de parámetros estructurales (Masa, rigidez o amortiguamiento)

6.3.5 Métodos de análisis por Wavelets. Este método analiza señales empleando escalas de tiempo y frecuencia, conformadas por funciones con propiedades que sirven de base ortogonal para expresar cualquier función en términos de la base establecida, las wavelets son funciones analizadoras que se emplean para representar datos o representar otras funciones, adicionalmente permiten aproximar datos que presentan discontinuidad de acuerdo al uso de escalas (Carrion Viramontes et al., 1999).

El análisis wavelet por medio del análisis de los desplazamientos nodales permite detectar las grietas por fatiga presentes en la estructura que generan cambios en frecuencias de resonancia y errores dentro del análisis modal experimental (Farrar & Doebling, 1997).

La transformada Wavelets permite conocer las características de localización de frecuencia en el tiempo y descubrir las posiciones de singularidades y discontinuidad en una señal (Calandra et al., 2013). Las Wavelets Ψ_s se construyen por medio de una wavelets madre Ψ como se expresa en la ecuación 21 (Algaba et al., 2012).

$$\Psi_{u,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{x-u}{s}\right) \quad Ec. (21)$$

Donde s es la escala que aporta información de la frecuencia y u es la translación que aporta información del tiempo- espacio aplicando la transformada continua Wavelet de una función $f(x)$ queda definida en la ecuación 22.

$$CWT_f(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi^*\left(\frac{x-u}{s}\right) dx \quad Ec. (22)$$

Donde

CWT_f = Coeficientes de transformada continua Wavelets Ψ

Ψ^* = Conjugado de la función Wavelet Ψ

Dentro del grupo de wavelets existen dos categorías de funciones; las de valor real o complejo, la mayoría de las Wavelets son de valor real, sin embargo, las de valor complejo evitan que se presenten oscilaciones falsas en los coeficientes de la transformada Wavelets por medio del cambio de fase que presenta entre las parte real e imaginaria (Daubechies, 1988).

6.4 Metodologías en el procesamiento de señales

Existen varios métodos matemáticos para procesar señales desde un sistema de monitoreo de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) que permiten analizar la frecuencia, amortiguación y el daño producido en las estructuras por medio del análisis de los datos de vibraciones obtenidos en un sistema SHM, la Tabla 4 describe los métodos según sus ventajas y desventajas (Zengshun Chen et al., 2017).

Tabla 4.

Métodos para el procesamiento de señales

Métodos	Ventajas	Desventajas
Serie estadística de tiempo (STS)	Modelo lineal y fácil implementación	Sensible al ruido; Solo se utiliza para sistemas lineales.
Filtro Kalman (KF)	Buena relación señal-ruido; Buena estimación del cambio en el tiempo.	Pérdida de tiempo; Requiere calibración de parámetros; Velocidad de convergencia limitada y precisión de seguimiento
Transformada rápida de Fourier (FFT)	Modelo no lineal; Modelar sistemas lineales y no lineales; Facilidad de implementación;	No aplicable para sistemas complejos; Requiere calibración para encontrar el orden del modelo; Sensible al ruido; Solo representación de dominio de frecuencia
Clasificación de señal múltiple (MUSIC)	Alta resolución en dominio de frecuencia; Se pueden estimar modos muy separados	Requiere mucho tiempo.
Transformada rápida de Fourier a corto plazo (SFFT)	Facilidad de implementación; Representación de dominio de frecuencia de tiempo;	Requiere gran cantidad de muestras; Resolución limitada de frecuencia de tiempo;

Métodos	Ventajas	Desventajas
	Sencillez	No aplicable para señales no lineales y transitorias.
Transformada de Wavelet (WT)	Buena resolución de frecuencia de tiempo; Buena relación señal-ruido; tiene varios áreas de aplicación	Requiere varios niveles de descomposición; El "efecto final" es significativo
Transformada S (ST)	Buena resolución de frecuencia de tiempo; El espectro se puede localizar en el dominio del tiempo	Pérdida de tiempo; Requiere calibración
Rápida transformada S (FST)	Ahorrar tiempo; Buena resolución de frecuencia de tiempo; El espectro se puede localizar en el dominio del tiempo	La aplicación en sistemas SHM necesita exploración
Transformada Hilbert- Huang (HHT)	Buena resolución de frecuencia de tiempo; Alta relación señal / ruido; Método adaptativo; Facilidad de implementación	Modo de mezcla; Requiere calibración
Separación de fuente ciega (BSS)	Buena relación señal-ruido; Se pueden estimar modos muy separados; Buena precisión para separar componentes de frecuencia	Requerir calibración Las señales no lineales y transitorias no pueden analizarse adecuadamente

Nota: Elaboración propia. Adaptado de Chen, Z., Zhou, X., Wang, X., Dong, L., & Qian, Y. (2017). Deployment of a Smart Structural Health Monitoring System for Long-Span Arch Bridges: A Review and a Case Study. *SENSORS*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/s17092151>

7. Antecedentes Internacionales.

7.1 Sistema de red inalámbrica de sensores

La red de sensores inalámbrica está compuesta por medio de pequeños nodos sensores también llamados motes conectados de forma inalámbrica que recopilan información de cambios dinámicos o estáticos que se presentan en la estructura, posteriormente transmite los datos procesados a la

estación base con la finalidad de realizar el análisis del daño presente en la estructura (Puccinelli & Haenggi, 2005).

El sistema de red inalámbrica (WSN, por sus siglas en ingles) proporciona beneficios en la instalación, mantenimiento y tiempo de durabilidad del sistema, aunque presentan problemas generados por perturbaciones ambientales durante la transmisión de datos (S. Kim et al., 2006). Los sistemas WSN necesitan el empleo de rutas de múltiples “saltos” que se obtienen por medio de receptores que entran en funcionamiento, es decir cuando un receptor presenta perturbaciones por ondas electromagnéticas enruta a otros receptores creando saltos, ver figura 34 (Reyer et al., 2011).

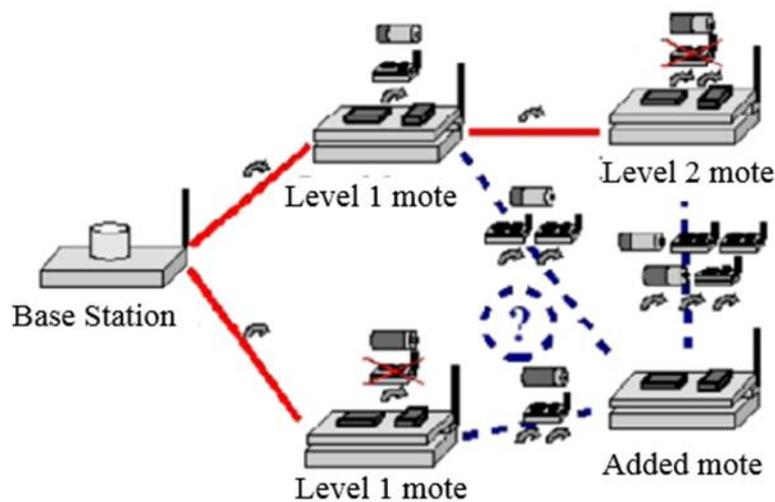


Figura 34. Sistema de red inalámbrica. Adaptado de Reyner, M., Hurlebaus, S., Mander, J., & Ozbulut, O. e. (2011, enero 1). Design of a wireless sensor network for structural health monitoring of bridges. Presentado en 2011 Fifth International Conference on Sensing Technology (ICST 2011). <https://doi.org/10.1109/ICST.2011.6137033>

El sistema de plataforma de base SmartBrick implementado en puentes está compuesto por sensores internos y externos en la estructura para permitir monitorear los fenómenos ambientales

y estructurales como las tensiones, vibraciones, inclinaciones y temperatura (T. Harms et al., 2009). Los datos obtenidos por medio de los sensores internos y externos previamente ubicados en la estructura son recopilados en la estación base que procesa los datos y comunica alertas tempranas de posibles daños a través de transceptores inalámbricos Zigbee por medio de enlace GSM/GPRS de teléfono celular (mensaje de texto y/o correo electrónico), la Figura 35 representa la red SmartBrick que proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) basada en web para la descarga de datos y gráficos, respaldada por un back-end de procesamiento (Tyler Harms et al., 2010).

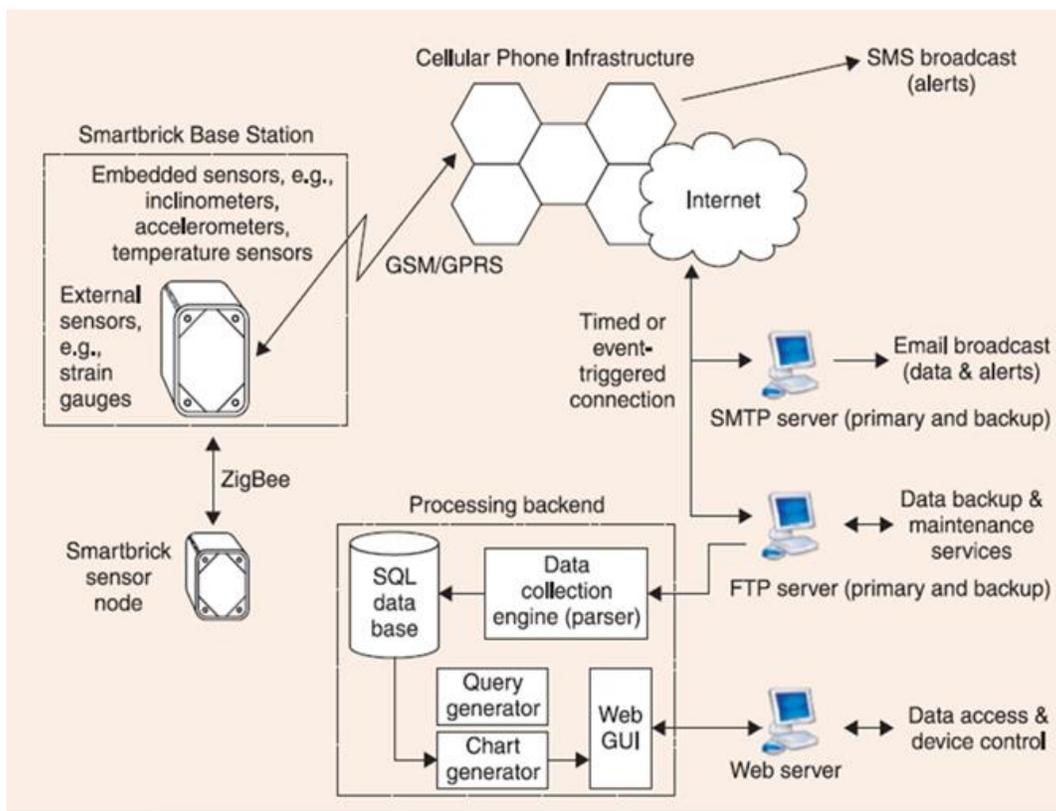


Figura 35. Diagrama de bloques de la plataforma SmartBrick. Adaptado de Harms, Tyler, Sedigh, S., & Bastianini, F. (2010). Structural Health Monitoring of Bridges Using Wireless Sensor Networks. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 13(6), 14-18. <https://doi.org/10.1109/MIM.2010.5669608>

7.2 Sistema de viento y de vigilancia de la salud estructural

El sistema de monitoreo de salud estructural y Eólica *in situ* (WASHMS, por sus siglas en inglés) se emplea en puentes de largo alcance ubicados en zonas propensas a fuertes vientos, con la finalidad de evaluar su desempeño en tiempo real a largo plazo evaluando las respuestas dinámicas y los diferentes tipos de cargas *in situ*, lo que permite realizar un análisis preciso de los daños generados por fatiga inducidos por el viento (Zhiwei Chen, 2010).

El sistema WASHMS está compuesto por seis subsistemas; el subsistema sensorial (SS, por sus siglas en inglés); el subsistema de adquisición y transmisión de datos (DA&TS, por sus siglas en inglés); el subsistema de procesamiento y control de datos (DP&CS, por sus siglas en inglés); el subsistema de evaluación (SHES, por sus siglas en inglés); el subsistema de gestión de datos (PDAS, por sus siglas en inglés); por último el subsistema de inspección y mantenimiento (PIMS, por sus siglas en inglés), cada subsistema trabaja de forma autónoma e independiente (K. Y. Wong & Ni, 2009).

El funcionamiento se basa en la recolección y entrega de señales del subsistema SS al subsistema DA&TS; posteriormente convierte las señales recogidas en datos digitales y transmite los datos al subsistema DP&CS por medio de fibra óptica el cual realiza el control global del post procesamiento y almacenamiento de datos, el subsistema SHES realiza la evaluación de la salud del puente y genera los informes del monitoreo; el subsistema PDAS se utiliza para medir las fuerzas de tensión en los cables y ayuda a identificar las características dinámicas globales de los puentes, por último el subsistema PIMS facilita el mantenimiento y la inspección de la información almacenada en el sistema (K.-Y. Wong, 2004).

El puente colgante de Tsing Ma en Hong Kong posee una longitud total de 2300 metros y 41 metros de ancho, su tramo principal es de 1377 de metros longitud entre sus dos torres, en la parte superior está compuesto por dos calzadas de tres carriles en ambos sentidos y en la parte inferior posee dos calzadas cubiertas de uso mixto (vehicular y ferrocarril), que permiten que los vehículos transiten por ellas cuando la velocidad del viento es alta (Beard & Young, 1993).

El sistema del monitoreo del puente Tsing Ma está compuesto por un total de 300 sensores que monitorean las cargas de viento, temperatura, tráfico, arrasamiento, desplazamiento y tensión en los cables, dentro de este grupo se encuentran acelerómetros, medidores de deformación, transductores de desplazamiento, sensores de nivel, sensores de temperatura, anemómetros, sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) y sensores de pesaje en movimiento, la Figura 36 ilustra la ubicación y el tipo de sensor instalado en el puente (Z.-W. Chen & Wang, 2013).

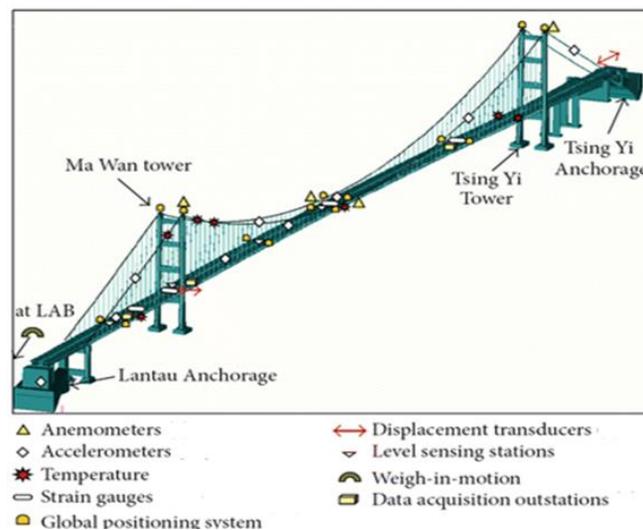


Figura 36. Distribución de sensores implementados en el puente Tsing Ma. Adaptado de Chen, Z. W., & Wang, X. M. (2013). Probabilistic Fatigue Assessment Based on Bayesian Learning for Wind-Excited Long-Span Bridges Installed with WASHMS. *International Journal of Distributed Sensor Networks*

La primera etapa de análisis del sistema WASHMS se basa en las cargas de viento, temperatura, tráfico y cargas sísmicas; la segunda etapa es el análisis estático y dinámico global de la estructura y por último se analizan los parámetros de salida, configuración geométrica, fuerzas del cable, distribución de tensión / estrés, y estimación de estrés por fatiga (K.-Y. Wong, 2004).

7.3 Aplicación del método de vibraciones ambientales

La línea base del puente Gómez Ortiz ubicado en la vía que comunica Girón y Zapoteca se realizó por medio de mediciones de vibraciones ambientales producidas por el viento y el flujo de vehículos sin incluir las solicitaciones sobre el terreno al suponer empotramiento en la base de la estructura, aplicando métodos de selección de picos, descomposición en el dominio de la frecuencia, descomposición en el dominio de la frecuencia mejorada (EFDD, por sus siglas en inglés) e identificación del subespacio estocástico (SSI, por sus siglas en inglés), por medio de sensores triaxiales cada uno conformado por acelerómetros sísmicos que analizan en las direcciones u,v,w , y complementado por una sistema GPS que toma coordenadas ayudando a correlacionar la información de cada sensor. Por medio de estos métodos se logra obtener los valores de frecuencia con un margen de error de 6.91% con el 48.3% de participación de la masa, pero en las fracciones de amortiguamiento modal se genera mayor incertidumbre (Alvaro Viviescas Jaimes et al., 2018).

7.4 Análisis Experimental de vibraciones en un puente colgante de largo alcance

Los puentes colgantes presentan modos de vibraciones verticales, torsionales y laterales; debido a la excitación generada por viento o por el tráfico de vehículos a alta velocidad que generan vibraciones con amplitudes considerables, para ello se requiere analizar la estructura a escala completa y evaluar la confiabilidad de los supuestos empleados en el análisis de elementos finitos (Abdel-Ghaffar & Housner, 1977).

El puente colgante Throgs Neck localizado en la ciudad de Nueva York (EEUU) conecta los distritos de Queens al sur y el Bronx al norte, la longitud de su luz principal entre sus dos torres es de 550 metros y su longitud total es de 887 metros, posee tres carriles en cada sentido separadas por una barrera de 1.2 metros (Haight Roger et al).

El análisis de vibraciones del puente Throgs Neck implementó análisis de elementos finitos usando software para analizar los cables principales del puente, sus fuerzas longitudinales y desplazamientos. El análisis de las torres simulando un evento sísmico y teniendo en cuenta, la interacción suelo estructura determinando la masa estructural por medio de planos, la Figura 37 representa el modelo de elementos finitos del puente colgante Throgs Neck.

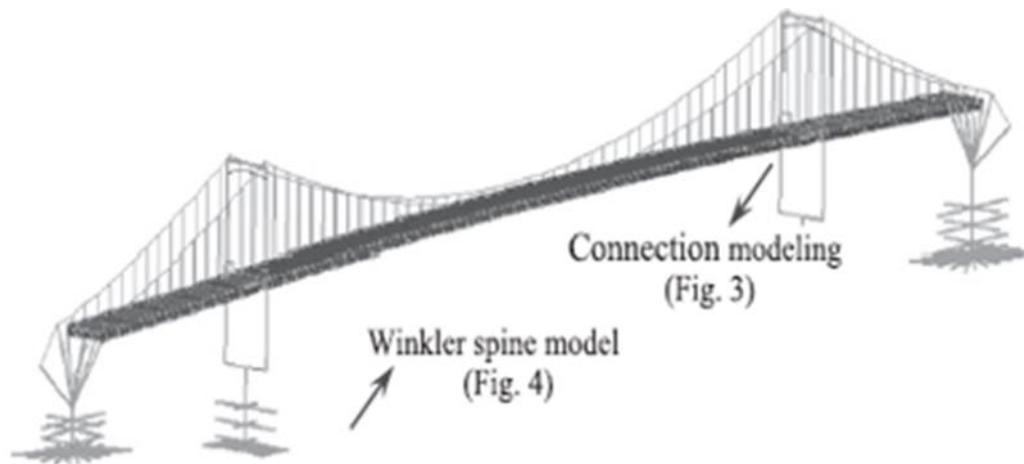


Figura 37. Modelo de elemento finitos del puente colgante Throgs Neck. Adaptado de Zhang, J., Prader, J., Grimmelsman, K. A., Moon, F., Aktan, A. E., & Shama, A. (2012). Experimental vibration analysis for structural identification of a long-span suspension bridge. *Journal of Engineering Mechanics*.

Por medio de acelerómetros sísmicos se analiza las vibraciones y las cargas ambientales del puente, mientras que el sistema de adquisición de datos registra las señales analógicas de vibración, se instalaron en total 45 acelerómetros uniaxiales en 10 estaciones en dirección longitudinal, transversal y vertical en el puente, adicionalmente se instalaron acelerómetros en las dos torres, se asignaron cuatro estaciones de medición ubicada en cada torre en diferente altura, cada estación está compuesta por tres acelerómetros colocados en forma longitudinal y transversal ver Figura 38 (Zhang, Prader, Grimmelsman, et al., 2013).

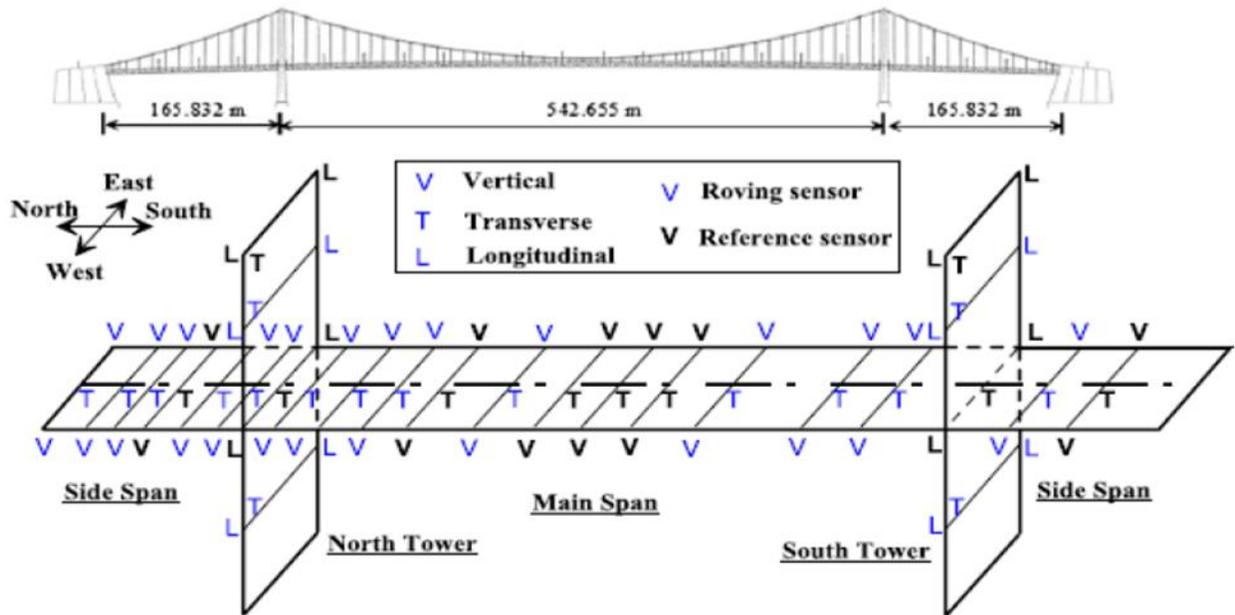


Figura 38. Distribución de acelerómetros para cerchas y de refuerzo de la torre del puente Throgs Neck. Adaptado de Zhang, J., Prader, J., Grimmelsman, K. A., Moon, F., Aktan, A. E., & Shama, A. (2012). Experimental vibration analysis for structural identification of a long-span suspension bridge. *Journal of Engineering Mechanics*.

El el posprocesamiento se emplearon métodos de estabilización para identificar parámetros modales (peak picking, PolyMAX y CMIF) los cuales garantizan mayor confiabilidad de los resultado de identificación modal, generalmente cuando se presentan interferencias de señal, la Tabla 5 resume los modos de frecuencias verticales y transversales en el puente (Zhang, Prader, Grimmelsman, et al., 2013).

Tabla 5.

Modos de frecuencias verticales y transversales del puente

Experimental (Hz)				
Mode	PolyMAX	Peak picking	Complex mode indicator function	Finite element analysis (Hz)
1 st vertical	0.187	0.183	0.195	0.189
2nd vertical	0.216	0.219	0.219	0.218
3 rd vertical	0.310	0.305	0.305	0.310
4 th vertical	0.391	0.378	0.378	0.444
5 th vertical	0.444	0.440	0.439	0.443
6 th vertical	0.624	0.623	0.610	0.610
1 st transverse	0.150	0.159	0.146	0.152
2 nd transverse	0.467	0.476	0.512	0.483
3rd transverse	-	0.794	0.793	0.756
4th transverse	1.009	1.025	1.025	1.054
5th transverse	1.451	1.538	1.550	1.630

Nota: Adaptado de de Zhang, J., Prader, J., Grimmelman, K. A., Moon, F., Aktan, A. E., & Shama, A. (2012). Experimental vibration analysis for structural identification of a long-span suspension bridge. *Journal of Engineering Mechanics*.

Los parámetros modales de las torres presentan inconvenientes en la toma de información al poseer amplitudes pequeñas al tener mayor rigidez lo que hace difícil realizar el análisis de vibraciones ambientales. Adicionalmente por el tránsito de vehículos se presentan variaciones lo que hace que las intensidades de la torre sean diferentes en periodos de alto flujo de tráfico. Por tal razón se necesitó un sistema de procesamiento riguroso para identificar los modos de las torres.

7.5 Monitoreo por vibraciones en el Puente Ruta Nacional No.32 Costa Rica

El puente Ruta Nacional No.32 conecta el distrito de Siquirres con el distrito de San José, Costa Rica. Su método constructivo se basó en la técnica de voladizos sucesivos construyendo las pilas (6 en total) y posteriormente los tramos parciales en las dos direcciones. Su longitud total es de 287.5 metros, su ancho de calzada es de 8.55 metros conformado por dos carriles uno en cada

sentido, posee 7 tramos donde el tramo de mayor longitud es el tramo No.3 con una longitud de 88.60 metros, en la Figura 39 se ilustra la vista en perfil del puente (Lui-Kuan, et.al., 2015).

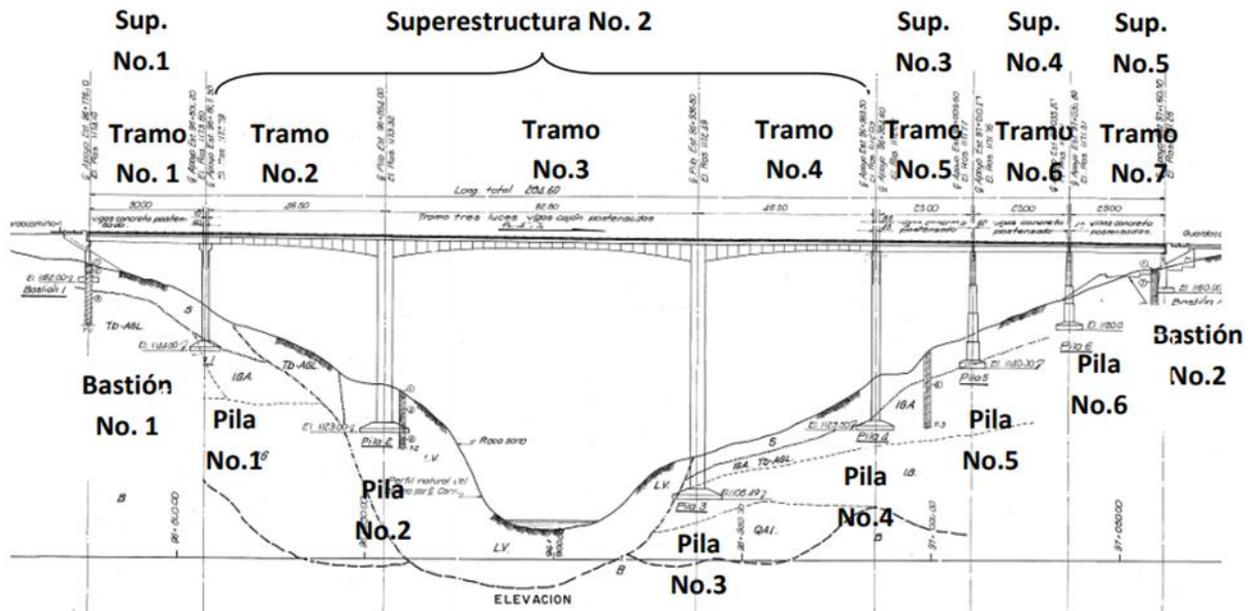


Figura 39. Vista en perfil del puente Ruta Nacional 32, Costa Rica. Adaptado de Lui-Kuan, Y. C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2015). MONITOREO ESTRUCTURAL DE LA SUPERESTRUCTURA NO. 2 DEL PUENTE SOBRE EL RÍO VIRILLA RUTA NACIONAL NO. 32. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

El monitoreo se realizó por etapas debido a la cantidad limitada de sensores, los acelerómetros se ubicaron en la acera con el objetivo de evitar obstruir el tráfico vehicular. El primer tramo monitoreado fue el tramo 3 donde se registraron 26 puntos en el sentido vertical y 6 puntos en el sentido transversal, el segundo monitoreo se implementó el tramo 2 donde se registraron 18 puntos en el sentidos vertical y 5 puntos en el sentido transversal generados por la carga vehicular, por medio de unidades de adquisición de datos instaladas previamente en el puente se almacenan las aceleraciones verticales y horizontales generadas sobre el puente, determinando

parámetros dinámicos que permiten evaluar el comportamiento estructural del puente en tiempo real, la Figura 40 muestra el sistema implementado en el puente Ruta Nacional No.32 (Lui-Kuan & Agüero-Barrantes, 2017).

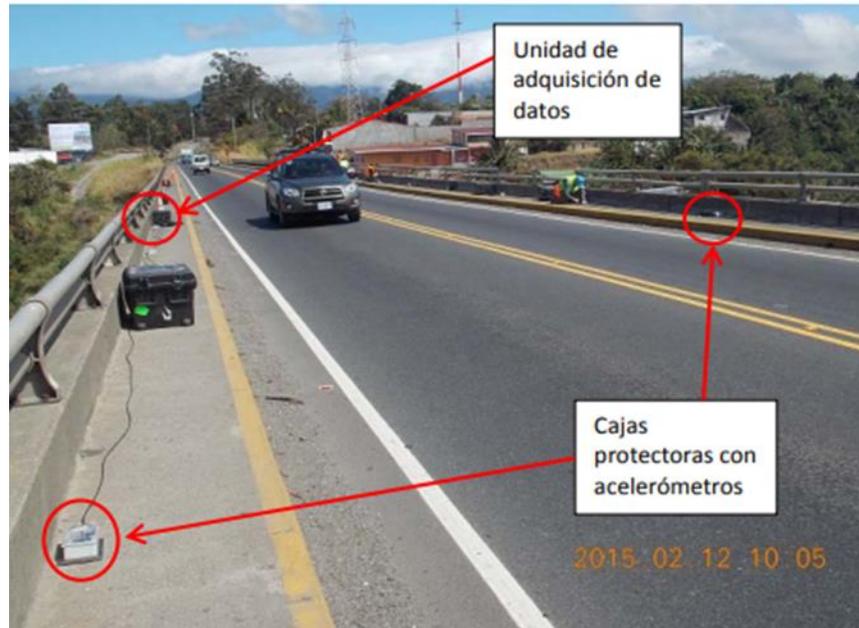


Figura 40. Sistema de monitoreo sobre el puente Ruta Nacional No.32, Costa Rica. Adaptado de Lui-Kuan, Y. C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2015). MONITOREO ESTRUCTURAL DE LA SUPERESTRUCTURA NO. 2 DEL PUENTE SOBRE EL RÍO VIRILLA RUTA NACIONAL NO. 32. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

7.6 Puente Río Papaloapan

El puente atirantado Río Papaloapan conecta a Tinaja con Acayucan, en el estado de Veracruz en México, su longitud principal es de 407.21 metros, posee 112 cables distribuidos en 8 semiarpas cada una de ellas constituida por 14 cables. En el año 2000 el puente Río Papaloapan presentó el

desprendimiento en el tirante 11 de la semi-arpa 7 lo que generó deformación permanente en el centro de la luz principal del puente (Quintana Rodriguez et al., 2015).

Por tal razón se vio la necesidad de realizar el monitoreo de los elementos estructurales y de la tensión axial generada en los tirantes del puente, se instalaron 24 extensómetros de deformación para monitoreo de los elementos de concreto. En cada una de las vigas principales se instalaron 10 sensores de deformación, cada uno a 30 metros a lo largo del puente y en la cara interna de las torres 2-3 se instalaron 4 sensores de deformación separados uno del otro aproximadamente a 20 metros de altura, como se ilustra en la Figura 41 (Quintana Rodriguez et al., 2018).

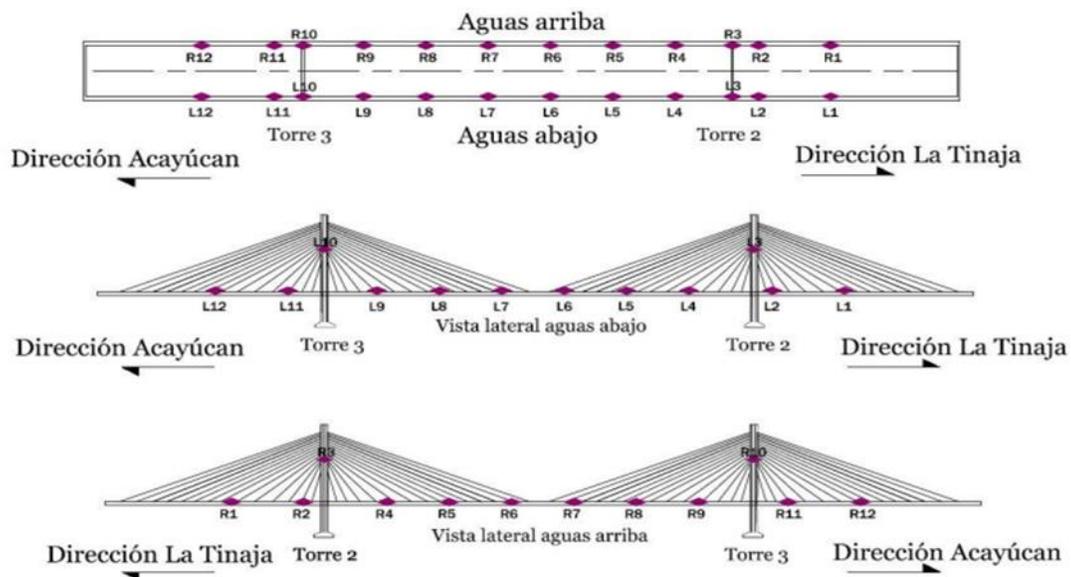


Figura 41. Instrumentación puente Río Papaloapan. Adaptado de QUINTANA RODRIGUEZ, J. A., et al. ACTUALIZACION Y SEGUIMIENTO DE LOS INDICES DE DESEMPENO ESTRUCTURAL DEL PUENTE RIO PAPALOAPAN. PUBLICACION TECNICA, 2018, no 524.

Adicionalmente se instalaron 24 acelerómetros de fibra óptica en los tirantes del puente de los cuales 16 fueron instalados en los tirantes R4-R11 de cada semi-arpa del puente ubicados en la mitad de la longitud de cada tirante y los 8 acelerómetros restantes se ubicaron en las torres 2-3, con la finalidad de evaluar las respuestas dinámicas de aceleración en la dirección longitudinal y transversal. Posee 8 inclinómetros ubicados en la parte superior de las torres 2-3, se implementaron estaciones climatológicas para evaluar los fenómenos ambientales compuesto por 5 sensores de temperatura, Finalmente dispone de 1 sensor de desplazamiento ubicado en la junta de expansión dirección a Acayúcan, 1 multiplexor y 1 interrogador (Crespo et al.,2014).

Las estrategias de monitoreo implementadas se clasifican en tres categorías; la primera categoría: estrategia de monitoreo local que analiza el comportamiento de la estructura a través del análisis estadístico de los datos de cada sensor de acuerdo a su tipo; la segunda categoría: estrategia de monitoreo global, analiza el comportamiento de la estructura a través del análisis de la información de grupos de sensores del mismo tipo y finalmente la tercera, se basa en el monitoreo de predicción e históricas donde se analiza la información obtenida de cada sensor de forma local y global, lo que genera tendencia en el comportamiento del puente en tiempo real por medio de técnicas de detección de daño y simulación Monte Carlo (Quintana Rodriguez et al., 2015).

7.7 Puente Tianjin Yonghe

El puente Tianjin Yonghe es uno de los primeros puentes atirantados construidos en China puesto en servicio en 1987, ubicado en la provincia de Tianjin en China del Norte con una longitud total

es de 385 metros conformado por tres tramos. Después de 19 años de servicio la estructura presentó daños superiores a los estimados en los cables y fisuras en la viga sobre la luz central.

El sistema de monitoreo implementado en el puente Tianjin Yonghe está compuesto por un total de 150 sensores y sistemas de adquisición de datos, posee sensores de fibra óptica con el objetivo de analizar las tensiones presentadas en las secciones de las vigas con presencia de fisuras, 6 acelerómetros uniaxiales instalados en los cables del puente para evaluar las fuerzas de tensión generadas por la vibración y un acelerómetro biaxial en la punta de la torre sur, 2 sensores electromagnéticos en los cables para medir tensiones, 14 acelerómetros ubicados en la luz principal del puente para estudiar las aceleraciones verticales y un sensor de temperatura en la mitad de la luz central, en la punta de la torre sur se instaló un anemómetro que mide la velocidad del viento, la Figura 42 describe la ubicación de los sensores instalados en el puente (Li et al., 2010).

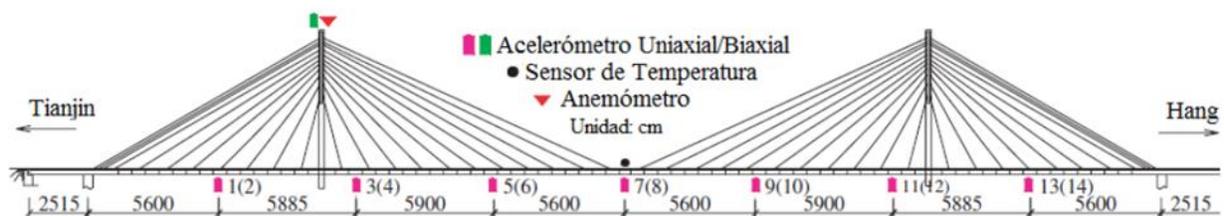


Figura 42. Localización de los sensores instalados en el puente Tianjin Yonghe. Adaptado de Li, H., Li, S., Ou, J., y Li, H. (2010). Modal identification of bridges under varying environmental conditions: temperature and wind effects. *Structural Control and Health Monitoring*. 17(5). 495-512.

A través de los cambios presentados en las frecuencias fundamentales se logra establecer la presencia de daños, por lo tanto los métodos implementados para la localización de daños en la estructura se basan en vibraciones operacionales teniendo en cuenta los parámetros dinámicos, por

lo cual el análisis previo de la ubicación de los sensores en el puente es relevante para identificar fallas probables.

7.8 Puente sobre el río Cumberland

El puente sobre el río Cumberland, Nashville Tennessee, posee 6 luces con una longitud total de 509 metros de longitud, la superestructura está compuesta por dos vigas con altura variable, riostras, rigidizadores y el sistema de piso, ver Figura 43. Se desarrolló un análisis sísmico el cual incluyó, pruebas de vibraciones ambientales para determinar las características dinámicas del puente como frecuencias, formas modales y porcentajes de amortiguamiento modal, modelamiento en FE que se calibro sobre los resultados de pruebas de vibraciones ambientales, selección del movimiento sísmico y evaluación de seguridad sísmica del puente. Antes de realizar la calibración se realizó un estudio de paramétrico donde se evaluó la sensibilidad de los parámetros donde solo los modos y frecuencias con mayor participación fueron usados en el proceso de calibración (Ren, Zatar & Harik, 2004).



Figura 43. Puente sobre el río Cumberland. Adaptado de Ren, W. X., Zatar, W., & Harik, I. E. (2004). Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge. *Engineering Structures*, 26(5), 631-640.

Se implementaron los métodos de Peak Picking en el dominio de la frecuencia y el método SSI en el dominio del tiempo, la tabla 6 describe las frecuencias de pruebas de campo y los modelos de elementos finitos calibrados.

Tabla 6.

Comparación de frecuencias de pruebas de campo y FE calibradas

Modo	Modelo FE (Hz)	Peak- picking (Hz)	Identificación del subespacio estocástico	
			Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento %
Primera vertical	0.875	0.886	0.875	0.6
Segundo vertical	1.413	1.417	1.417	1.6
Tercero vertical	1.778	1.783	1.780	1.3
Primero transversal	1.383	1.383	1.382	1.2
Segundo transversal	1.989	1.900	1.915	1.1
Tercero vertical	2.601	2.633	2.625	1.0
Primero longitudinal	2.853	2.850	2.850	3.4

Nota: Adaptado de Ren, W. X., Zatar, W., & Harik, I. E. (2004). Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge. *Engineering Structures*, 26(5), 631-640.

El estudio permitió determinar que los tres tramos continuos del puente pueden permanecer en el rango elástico sin ninguna interrupción de tráfico debido a la excitación sísmica del primer nivel, mientras que existe la probabilidad de presentar daños debido a la excitación sísmica de segundo nivel.

8. Análisis Crítico

8.1 Análisis de la infraestructura de puentes en Colombia

A través de los años en Colombia se vio la necesidad de crear un sistema encargado de la inspección general de puentes, para ello en el año 1996 se desarrolló en el Instituto Nacional de

Vías (INVIAS), el Sistema de Administración de Mantenimiento de Puentes de Colombia (SIPUCOL) que tiene como finalidad realizar el inventario de todos los puentes administrados por el INVIAS con luces mayores a 10 metros de longitud. Este sistema se enfoca en realizar la inspección principal y especial de puentes al igual de mantenimientos rutinarios para evitar posibles daños en la estructura, dentro de sus funciones se encuentra la identificación de puentes que requieren prioridad de reparación y reforzamiento, realiza los diseños pertinentes para el reforzamiento requerido de puentes con presencia de daños y finalmente realiza el control de presupuestos, costos y avances de obras de nuevos proyectos (Sistema de Administración de Mantenimiento de Puentes de Colombia [SIPUCOL],1996).

Dado este paso en la supervisión de puentes en Colombia SUPICOL permite que se tenga información relevante de los estudios de ingeniería estructural con el objetivo de conocer la capacidad de carga de cada puente , lo que permite analizar la viabilidad de otorgar permisos para el transporte de carga extrapesadas y extradimensionadas que circulen por carreteras nacionales, departamentales o municipales, al igual de limitar la carga de servicio generado por deterioro en los elementos que conforman el puente, Resolución N° 1528,(2017).

En Colombia según SIPUCOL aproximadamente el 63% de las superestructuras de los puentes de la red vial nacional son de concreto reforzado, mientras que el 24% son en concreto preesforzado, los demás materiales empleados en la superestructura son acero y concreto (mixto), acero y ladrillo; adicionalmente el 48% de los estribos fueron construidos con concreto reforzado, el 46% con concreto ciclópeo y el resto son en mampostería, ladrillo y tierra armada; finalmente el 76% y 18% de las pilas fueron construidas con concreto reforzado y concreto ciclópeo respectivamente, el resto son en mampostería y ladrillo (Muñoz, E & Gómez, D, 2013).

En Colombia aunque el crecimiento actual de construcción de puentes de grandes longitudes va en aumento, se estima que en 30 proyectos de corredores viales dentro de las obras de cuarta generación (4G) se desarrollen alrededor de 918 puentes que permitan interconectar las principales ciudades del país reduciendo el tiempo y el costo de transporte (Agencia Nacional de Infraestructura [ANI], 2018).

Por tal razón implementar sistemas de monitoreo de salud estructural en puentes es de suma importancia en la actualidad y se requiere que la implementación en Colombia sea más rigurosa para garantizar la vida útil de los puentes que actualmente se encuentran en servicio, evaluando sus condiciones estáticas y dinámicas con el objetivo de detectar daños de forma temprana y realizar las respectivas reparaciones.

8.2 Necesidades actuales en el monitoreo estructural en Colombia

Aunque existan técnicas que permiten llevar a cabo el seguimiento y evaluación de parámetros estructurales del puente, algunas técnicas no son las más apropiadas de implementar debido a sus limitaciones, entre ellas se encuentra la inspección visual que permite realizar una inspección local en una zona determinada de la estructura, pero no logra la cuantificación precisa de los parámetros de interés (frecuencias, formas modales, amortiguamiento, tensiones), lo que impide realizar un monitoreo continuo en el tiempo, es decir se debe conocer cada técnica debido a que no todas son aplicables en determinados escenarios lo que generaría datos erróneos en los monitoreos estructurales.

Para ello se debe conocer las carecías presentes en los distintos sistemas de monitoreo de puentes para evitar inconformidad con los resultados o poca confianza en las mediciones, dado

que en Colombia la implementación de sistemas de monitoreo es baja se debe tener en cuentas las siguientes carencias en los sistemas de monitoreo (inaudi,1997).

- Dificultad de realizar mediciones remotas a grandes distancias.
- Alta sensibilidad a interferencias electromagnéticas generadas por fenómenos naturales (tormentas) y líneas eléctricas.
- Alta sensibilidad a factores ambientales como la humedad y la temperatura lo que puede llegar a generar alteraciones en las medidas obtenidas.
- Elevados costos en el mantenimiento y operación de los sistemas de monitoreo.
- Complejidad en su uso, lo que genera que se tenga experiencia en el manejo del sistema y en la interpretación de sus medidas.

8.3 Análisis de costos asociados a instrumentación de sistemas de monitoreo estructural en puentes

No cabe duda los beneficios que se generan por la instrumentación en puentes, un factor importante a evaluar es el costo de la misma, al igual de los costos de operación y mantenimiento de los sistemas de monitoreo. Aunque estos deben ser financiados por el propietario de la estructura en este caso por el gobierno nacional, se evidencia que no se cumple con la instrumentación en Colombia debido a la inexistencia de normativa para tal fin, el costo de los sistemas de monitoreo en puentes dependen de la etapa en la que se encuentra la estructura a ser instrumentada, la Tabla 7 define el costo aproximado según la etapa en la que se emplea el sistema de monitoreo y los beneficios que trae (Inaudi, 2011).

Tabla 7.

Costo de implementación de sistemas de monitoreo en puentes

Etapa del puente	Costo de la implementación del sistema de monitoreo	Beneficios
Monitoreo en la salud estructural del puente durante la construcción y vida temprana	0.5% al 3% del valor total de construcción del puente	Detectar anomalías durante el proceso constructivo, permitiendo realizar reparaciones oportunas y económicas
Monitoreo en la salud estructural del puente en uso	2.0% al 5.0% del valor total de construcción del puente	Definir la línea base y evaluar el desempeño actual y futuro de la estructura.
Monitoreo en la salud estructural del puente en etapa de deterioro o posibilidad de demolición	3.0% del valor previsto para su reconstrucción	Determinar el estado real del puente y evaluar la viabilidad de repotenciar la estructura evitando la construcción de un puente nuevo

La inversión adicional en equipos para monitoreo de salud estructural en puentes es recompensada con el ahorro en inspecciones que permiten detectar y localizar daños presentes en los elementos estructurales del puente y la efectividad que se tiene para evitar desastres, un ejemplo claro de implementar sistemas de monitoreo de salud estructural en puentes a bajo costo y desarrollado con tecnología propia en Colombia, es el puente el Hormiguero localizado en la vía Calí- Puerto Tejada sobre el río Cauca (Marulanda et.,2000).

8.4 Análisis normativo para monitoreo de puentes en Colombia

En Colombia, aun no se encuentra estandarizada la implementación de sistemas de monitoreo de salud estructural en puente, esto se ve reflejado en los pocos casos de instrumentación realizados en el país, aunque para edificaciones el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10) en el capítulo A.11.2 denominado “Colocación de instrumentos sísmicos” especifica el número de dispositivos requeridos, teniendo en cuenta la zona de amenaza sísmica en donde se encuentra ubicada la estructura, el área total construida y los números de pisos que tenga la edificación.

Para ello en Colombia el SIPUCOL debe implementar manuales técnicos de los diferentes tipos de sistemas de monitoreo presentes en el mercado según su aplicación y naturaleza, para ello se debe unir a entidades internacionales encargadas de estudiar y tecnificar estos tipos de tecnologías para lograr desarrollar manuales técnicos que se adapten a las necesidades de los puentes existentes en Colombia.

9. Conclusiones

La técnica de inspección visual se queda corta a la hora de detectar fallas presentes en los puentes, por ello el monitoreo de salud estructural, es un método confiable que aplica un gran número de técnicas de análisis que permite detectar y evaluar la estructura en tiempo real con la finalidad de predecir cambios en su respuesta que pueden estar asociados con presencia de daño.

Los sistemas de monitoreo estructural implementados en la actualidad se enfocan en el campo inalámbrico distribuido, adicionalmente deben garantizar que cada uno de los sensores del sistema trabaje como agente inteligente garantizando su funcionamiento autónomo, de esta manera minimizará el consumo de potencia ampliando su vida útil.

El sistema de monitoreo estructural analiza el comportamiento de la estructura por medio de cargas servicio, acciones ambientales, temperatura, humedad; al igual que las propiedades de los materiales como lo son la resistencia a tracción, compresión y módulo de elasticidad. Utilizando métodos no destructivos con sensores distribuidos en la estructura se logra detectar la ubicación con las características del daño analizando los cambios en las propiedades estáticas y dinámicas, reduciendo los costos de inspección.

Una de las mayores ventajas de implementar un sistema de monitoreo continuo es que permite conocer en tiempo real el estado de la estructura y en el caso de presentar daños tomar las medidas correctivas a tiempo.

Para el desarrollo normativo en Colombia se recomienda apuntarle a puentes singulares, teniendo en cuenta las experiencias que se tienen en la implementación de monitoreo de salud estructural en puentes a nivel mundial.

Referencias Bibliograficas

- A, J. M., Thomson, P., & C, J. M. (2000). Monitoreo de Salud Estructural. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 2(2), 40-46. <https://doi.org/10.25100/iyc.v2i2.2342>
- Abdel-Ghaffar, A. M., & Housner, G. W. (1977). *AN ANALYSIS OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A SUSPENSION BRIDGE BY AMBIENT VIBRATION MEASUREMENTS*. <https://trid.trb.org/view/69505>
- Acevedo, H. G. S., Uscátegui, J., & Gómez, S. (2017). Metodología para la detección de fallas en una estructura entramada metálica empleando las técnicas de análisis modal y PSO. *Revista UIS Ingenierías*, 16(2), 43-50. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017004>
- Agardh, L. (1994, March). Impact Excitations of Concrete Highway Bridges. In *Proceedings of the 12th International Modal Analysis* (Vol. 2251, p. 1329).
- Aggelis, D. G., Shiotani, T., Momoki, S., & Hirama, A. (2009). Acoustic Emission and Ultrasound for Damage Characterization of Concrete Elements. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 106(6), 509-514.
- Aktan, A. E., Lee, K. L., Chuntavan, C., & Aksel, T. (1994, January). Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities. In *Proceedings-spie the International Society for Optical Engineering* (pp. 462-462). SPIE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL.
- Algaba, M., Solís, M., & Galvín, P. (2012). Wavelet Based Mode Shape Analysis for Damage Detection. En R. Allemang, J. De Clerck, C. Niezrecki, & J. R. Blough (Eds.), *Topics in*

- Modal Analysis II, Volume 6* (pp. 377-384). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2419-2_38
- Al-Jumaili, S. Kh., Pearson, M. R., Holford, K. M., Eaton, M. J., & Pullin, R. (2016). Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 72-73, 513-524. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.11.026>
- Alvaro Viviescas Jaimes, Julián Carrillo, & Laura Andrea Vargas Carvajal. (2018). Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental. *Inge-Cuc*, 1, 52. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.05>
- Araujo, I. G., Rondón, E. M., & Cho, G. C. (2010). Pruebas de vibración ambiental en puentes. *Revista UIS Ingenierías*, 9(1), 55-68
- Arreaga, A., & Luis, J. (2018). *Análisis comparativo del rendimiento de los moduladores Mach-Zehnder y electroabsorción para comunicaciones ópticas*. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/11146>
- Ayyıldız, C., Erdem, H. E., Dirikgil, T., Dugenci, O., Kocak, T., Altun, F., & Gungor, V. C. (2019). Structure health monitoring using wireless sensor networks on structural elements. *Ad Hoc Networks*, 82, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.06.011>
- Balankin, V González, E Hernández, J Silva, and J Martínez, Probabilistic Fracture Mechanics Analysis of Nuclear Reactor Pressure Vessel Integrity, Científica, Vol 7 (2003)
- Beard, A. S., & Young, J. S. (1993). EL PUENTE DE TSING MA, UN ENLACE VITAL CON EL AEROPUERTO NUEVO DE HONG KONG. *XII CONGRESO MUNDIAL IRF, MADRID 1993. TOMO 4*. <https://trid.trb.org/view/1005063>

- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (1980). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980wi...book.....B/abstract>
- Bernal, G. R. (s. f.). *Sistema de control de un modulador Mach-Zehnder basado en Arduino*. 42.
- Bernard, A., & Touboul, M. P. (1991). The GRADIO accelerometer: Design and development status. *The Solid-Earth Mission Aristoteles*, 61.
- Betti, R. (2014). *Corrosion monitoring research of New York City bridges / authors, Raimondo Betti [and four others]*.
- Calandra, M. V., Marañón Di Leo, J., & Delnero, J. S. (2013). *Determinación de estructuras turbulentas mediante algoritmos numéricos*. II Jornadas de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/37794>
- Carbone, P., Nunzi, E., & Petri, D. (1999). Frequency-domain based least-squares estimation of multifrequency signal parameters. *IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.99CH36309), Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE*, 2, 917. <https://doi.org/10.1109/IMTC.1999.776997>
- Carino Nicholas J. (s. f.). The Impact-Echo Method: An Overview. *Structures 2001*, 1-18. [https://doi.org/10.1061/40558\(2001\)15](https://doi.org/10.1061/40558(2001)15)
- Carrion Viramontes, F. J., Lozano Guzman, A., Vazques Vega, D., & Romero Navarrete, J. A. (1999). EVALUACION DE PUENTES MEDIANTE EL ANALISIS DE VIBRACIONES. *PUBLICACION TECNICA*, 132. <https://trid.trb.org/view/947632>
- Carrión Viramontes, F. J., Quintana Rodriguez, J. A., López López, J. A., Balankin, A., & Samayoa Ochoa, D. (2006). Metodologías de Inspección no Destructiva Aplicables a Sistemas de Gestión de Puentes. *Publicación Técnica*, (302).

- Causado-Bulevas, J. D., Gómez-Cardona, N. D., González-Valencia, E., Jessie, D., & Torres, P. (s. f.). *Aplicaciones De Sensores Basados En Redes De Bragg En Fibra Óptica En Estructuras Civiles*. 43(3), 4.
- Cennamo, N., Chiavaioli, F., Trono, C., Tombelli, S., Giannetti, A., Baldini, F., & Zeni, L. (2016). A Complete Optical Sensor System Based on a POF-SPR Platform and a Thermo-Stabilized Flow Cell for Biochemical Applications. *Sensors (14248220)*, 16(2), 196. <https://doi.org/10.3390/s16020196>
- Chang, P. C., & Liu, S. C. (2003). Recent Research in Nondestructive Evaluation of Civil Infrastructures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(3), 298. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:3\(298\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:3(298))
- Chen, S.-Y., Hsieh, Y.-J., Yang, C.-C., Wu, C.-M., & Huang, C.-M. (2016). A real-time bridge scour sensor system with accelerometers. *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2016.7520388>
- Chen, Zengshun, Zhou, X., Wang, X., Dong, L., & Qian, Y. (2017). Deployment of a Smart Structural Health Monitoring System for Long-Span Arch Bridges: A Review and a Case Study. *SENSORS*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/s17092151>
- Chen, Zhiwei. (2010). *Fatigue and reliability analyses of multiload suspension bridges with WASHMS* [Thesis, The Hong Kong Polytechnic University]. <http://ira.lib.polyu.edu.hk/handle/10397/4093>
- Chen, Z.-W., & Wang, X.-M. (2013). Probabilistic Fatigue Assessment Based on Bayesian Learning for Wind-Excited Long-Span Bridges Installed with WASHMS. *International*

- Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(9), 871368.
<https://doi.org/10.1155/2013/871368>
- Cilento, A. (2013). PUENTES Y PUENTES COLGANTES. *Tecnología y Construcción*, 16(2).
http://190.169.30.98/ojs/index.php/rev_tc/article/view/3775
- Clark, M. R., McCann, D. M., & Forde, M. C. (2003). Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT & E International*, 36(4), 265-275. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00060-9)
- COLE, H. A. (1973). On-line Failure Detection and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures. *NASA CR-2205*.
<https://ci.nii.ac.jp/naid/10007555409/>
- Colombo, M., & Felicetti, R. (2007). New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures. *Fire Safety Journal*, 42(6-7), 461-472.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.09.002>
- Cunha, Á., & Caetano, E. (2005). From input-output to output-only modal identification of civil engineering structures. In *1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*.
- Dandridge, A., Tveten, A. B., Sigel, G. H., West, E. J., & Giallorenzi, T. G. (1980). Optical fibre magnetic field sensors. *Electronics Letters*, 16(11), 408-409.
<https://doi.org/10.1049/el:19800285>
- Deger, Y., Cantieni, R., & Pietrzko, S. (1994). Modal analysis of an arch bridge: experiment, finite element analysis and link. In *PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY*

- FOR OPTICAL ENGINEERING* (pp. 425-425). SPIE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL.
- De Roeck, G., Peeters, B., & Ren, W.-X. (2000). Benchmark study on system identification through ambient vibration measurements. *IMAC 18, the International Modal Analysis Conference, 4062*, 1106-1112. <https://lirias.kuleuven.be/603213>
- Diez Zaldívar, E. R. (2014). Uso de señales aleatorias como parte de una metodología para la calibración de sismómetros y acelerómetros. *Ingeniería Electronica, Automatica y Comunicaciones, 35*(2), 90-99.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R., & Prime, M. B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest, 30*(2), 91-105
- Douglas, B. M., & Reid, W. H. (1982). Dynamic tests and system identification of bridges. *Journal of the Structural Division, 108*(ST10).
- Douglas, B. M., Maragakis, E. A., & Nath, B. (1990). Static deformations of bridges from quick-release dynamic experiments. *Journal of Structural Engineering, 116*(8), 2201-2213.
- Doyle, J. F. (2009). *Guided Explorations of the Mechanics of Solids and Structures*. Cambridge University Press.
- Du, C., Owusu Twumasi, J., Tang, Q., Guo, X., Zhou, J., Yu, T., & Wang, X. (2018). All-Optical Photoacoustic Sensors for Steel Rebar Corrosion Monitoring. *Sensors, 18*(5), 1353. <https://doi.org/10.3390/s18051353>
- Elsener, B., Andrade, C., Gulikers, J., Polder, R., & Raupach, M. (2003). Half-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures, 36*(7), 461-471. <https://doi.org/10.1007/BF02481526>

- Farrar, C. R., & Doebling, S. W. (1997). *An overview of modal-based damage identification methods*.
- Fox, C. H. J. (1992). The location of defects in structures—A comparison of the use of natural frequency and mode shape data. *10th International Modal Analysis Conference, 1*, 522.
- French, M., & Gordon, B. (1995). Short time period excitation of structures. In *International Modal Analysis Conference, 13 th, Nashville, TN* (pp. 1-7).
- Frövel, M. (2006). *Sensores de fibra óptica tipo redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas* [Phd, E.T.S.I. Aeronáuticos (UPM)]. <http://oa.upm.es/459/>
- Galindo, R. C. (2007). *Flip-flops ópticos basados en interferómetros Mach-Zehnder activos con realimentación* [<Http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universitat Politècnica de València]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=18060>
- García Alonso, J. (2016). *Monitorización de estructuras aeronáuticas mediante técnicas de inteligencia artificial* [Phd, E.T.S.I. Aeronáuticos (UPM)]. <http://oa.upm.es/39487/>
- Gastineau, A., Johnson, T., & Schultz, A. (2009). *Bridge Health Monitoring and Inspections – A Survey of Methods* [Report]. Minnesota Department of Transportation. <http://conservancy.umn.edu/handle/11299/150962>
- Glisic, B. (1), & Inaudi, D. (2). (2012). Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors. *Structural Health Monitoring, 11*(2), 161-171. <https://doi.org/10.1177/1475921711414233>
- González, J. a., Miranda, J. m., & Feliu, S. (2004). Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete. *Corrosion Science, 46*(10), 2467-2485. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.02.003>

- Gucunski, N., Consolazio, G. r., & Maher, A. (2006). Concrete bridge deck delamination detection by integrated ultrasonic methods. *International Journal of Materials and Product Technology*, 26(1-2), 19-34. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2006.008978>
- Guía Práctica de Sensores*. (2010). Creaciones Copyright SL.
- Ha, T., Ko, J., Lee, S., Kim, S., Jung, J., & Kim, D.-J. (2016). A Case Study on the Rehabilitation of a Fire-Damaged Structure. *Applied Sciences*, 6(5), 126. <https://doi.org/10.3390/app6050126>
- Haight Roger, Chang Sherry, & Kushmock Robert. (s. f.). Orthotropic Deck Rehabilitation at the Throgs Neck Bridge. *Structures Congress 2005*, 1-10. [https://doi.org/10.1061/40753\(171\)41](https://doi.org/10.1061/40753(171)41)
- Halabe, U. B., Vasudevan, A., GangaRao, H. V. S., Klinkhachorn, P., & Shives, G. L. (2003). Nondestructive evaluation of fiber reinforced polymer bridge decks using digital infrared imaging. *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory, 2003.*, 372-375. <https://doi.org/10.1109/SSST.2003.1194594>
- Harms, T., Bastianini, F., & Sedigh, S. (2009). Recent enhancements to the SmartBrick structural health monitoring platform. *2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC '09. 12th International IEEE Conference on*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2009.5309517>
- Harms, Tyler, Sedigh, S., & Bastianini, F. (2010). Structural Health Monitoring of Bridges Using Wireless Sensor Networks. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 13(6), 14-18. <https://doi.org/10.1109/MIM.2010.5669608>

- Henry, J.-L. (2003). *Optimización del control de la resistencia del hormigón de la obra de la depuradora del Besós mediante ultrasonidos*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6154>
- Hernández Pérez, J. A. (2018). *Tecnología e implementación de fibra óptica en la instrumentación de control industrial* [Other, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- Hesse, J. S. (1984). *Fiber optic sensors*. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19840016278>
- Hiasa, S., Birgul, R., & Necati Catbas, F. (2017). A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges. *Computers & Structures*, 190(190), 205-218. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.05.011>
- Hui Li, & Jinping Ou. (2016). The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1), 43-67. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0115-x>
- Hurrell, A. M., & Rajagopal, S. (2017). The Practicalities of Obtaining and Using Hydrophone Calibration Data to Derive Pressure Waveforms. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 64(1), 126-140. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2016.2594770>
- Iooss, B., & Lemaître, P. (2015). *A review on global sensitivity analysis methods*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00975701>
- Jae-Min Kim, Hyun-Woo Kim, Young-Ha Park, In-Hwan Yang, & Young-Sang Kim. (2012). FBG sensors encapsulated into 7-wire steel strand for tension monitoring of a prestressing tendon. *Advances in Structural Engineering*, 15(6), 907-917. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.6.907>

- Jian Xie, & Xiaoru Wang. (2016). Yaa. *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 509-514. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7779556>
- Jiles, D. (2015). *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. CRC Press.
- Kachanov, V. k., Sokolov, I. v., Kontsov, R. v., Lebedev, S. v., & Fedorenko, S. a. (2019). Ultrasonic wave velocity measurement in concrete using the impact-echo method. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 61(1), 15-19. <https://doi.org/10.1784/insi.2019.61.1.15>
- Kim, J., Kim, J., Shin, K.-J., Lee, H., & Park, S. (2017). ANN-based tensile force estimation for pre-stressed tendons of PSC girders using FBG/EM hybrid sensing. *INSIGHT*, 59(10), 544-552. <https://doi.org/10.1784/insi.2017.59.10.544>
- Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fenves, G., Glaser, S., & Turon, M. (2006). Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 427–428. <https://doi.org/10.1145/1182807.1182889>
- Klerk, D. de, Rixen, D. J., & Jong, J. de. (2005). *The Frequency Based Substructuring (FBS) Method reformulated according to the Dual Domain Decomposition Method*.
- Kölling, M., Resnik, B., & Sargsyan, A. (s. f.). *APPLICATION OF THE RANDOM DECREMENT TECHNIQUE FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DAMPING PARAMETERS OF BEARING STRUCTURES*. 9.
- Kuang, C. L., Kwok, K. C. S., Hitchcock, P. A., & Ding, X. (2011). Wind-induced response characteristics of a tall building from GPS and accelerometer measurements. *Positioning*, 1-13. <https://doi.org/10.4236/pos.2011.21001>

- Lan, C., Zhou, Z., & Ou, J. (2014). Monitoring of structural prestress loss in RC beams by inner distributed Brillouin and fiber Bragg grating sensors on a single optical fiber. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(3), 317-330. <https://doi.org/10.1002/stc.1563>
- Lazcano, A. R. A., Estrada, R. S., & Castro, S. A. Z. (2011). *EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DAÑO EN ESTRUCTURAS MEDIANTE EL USO DE VIBRACIONES*. 21.
- Lee, J. W., Kim, J. D., Yun, C. B., Yi, J. H., & Shim, J. M. (2002). HEALTH-MONITORING METHOD FOR BRIDGES UNDER ORDINARY TRAFFIC LOADINGS. *Journal of Sound and Vibration*, 257(2), 247-264. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2002.5056>
- Lemaitre, J. (2012). *A Course on Damage Mechanics*. Springer Science & Business Media.
- Li, H., Li, S., Ou, J., & Li, H. (2010). Modal identification of bridges under varying environmental conditions: Temperature and wind effects. *Structural Control and Health Monitoring*, 17(5), 495-512. <https://doi.org/10.1002/stc.319>
- Li, X., & Dong, L. (2014). An efficient closed-form solution for acoustic emission source location in three-dimensional structures. *AIP Advances*, 4(2), 027110. <https://doi.org/10.1063/1.4866170>
- Lin, C.-H., Chen, S.-Y., Yang, C.-C., Wu, C.-M., Huang, C.-M., Kuo, C.-T., & Huang, Y.-D. (2014). Structural health monitoring of bridges using cost-effective 1-axis accelerometers. *2014 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 24-27. <https://doi.org/10.1109/SAS.2014.6798910>
- Liu, Y.-L., Shi, J.-J., Huang, J.-Q., Wei, G.-S., & Wu, Z.-X. (2019). Grouting Defect Detection of Lapped Bar Connections Based on Impact-Echo Method. *SHOCK AND VIBRATION*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1934240>

- Iyer, S. r., Sinha, S. k., & Schokker, A. j. (2005). Ultrasonic C-scan imaging of post-tensioned concrete bridge structures for detection of corrosion and voids. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(2), 79-94. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2005.00378.x>
- Lynch, J. P., Kim, J. H., Zhang, Y., Wang, M., Sohn, H., & Yun, C. B. (s. f.). *Advance Sensor Technologies on Korean Bridges: Field Benchmark Opportunities*. 8.
- Lynch, J. P., & Loh, K. J. (2006). A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest*, 38(2), 91-130
- Manterola, J. (1984). Evolución de los puentes en la historia reciente. *Informes de la Construcción*, 35(359-360), 5-35. <https://doi.org/10.3989/ic.1984.v35.i359-360.1949>
- Marple, S. L., & Carey, W. M. (1989). Digital Spectral Analysis with Applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(5), 2043-2043. <https://doi.org/10.1121/1.398548>
- Martin, E., Zhang, E. z., Guggenheim, J. a., Beard, P. c., & Treeby, B. e. (2017). Rapid Spatial Mapping of Focused Ultrasound Fields Using a Planar Fabry-Pérot Sensor. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 64(11), 1711-1722. <https://doi.org/10.1109/TUFFFC.2017.2748886>
- Maser Kenneth R., & Roddis W. M. Kim. (1990). Principles of Thermography and Radar for Bridge Deck Assessment. *Journal of Transportation Engineering*, 116(5), 583-601. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1990\)116:5\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1990)116:5(583))
- Marulanda, J., Thomson, P., & Marulanda, J. (2000). Monitoreo de salud estructural. *Ingeniería y Competitividad*, 2(2), 40-46.
- Mechelke, K., Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (s. f.). *Maser*. 10.

- Meola, C., Carlomagno, G. M., Squillace, A., & Giorleo, G. (2002). Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography. *Measurement Science and Technology*, 13(10), 1583–1590. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/10/311>
- Miceli, M., Moshier, M. a., Nelson, L., & Brinkerhoff, R. (2016). Innovative technology for continuous fatigue crack condition monitoring of bridges: Long-term electrochemical fatigue sensor (LTEFS). *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 58(7), 351-359. <https://doi.org/10.1784/insi.2016.58.7.351>
- Minardo, A., Catalano, E., Coscetta, A., Zeni, G., Zhang Lei, Di Maio, C., Vassallo, R., Coviello, R., Macchia, G., Picarelli, L., & Zeni, L. (2018). Distributed fiber optic sensors for the monitoring of a tunnel crossing a landslide. *Remote Sensing*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/rs10081291>
- Montalvão, D. (1), Maia, N. m. m. (2), & Ribeiro, A. m. r. (2). (2006). A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials. *Shock and Vibration Digest*, 38(4), 295-324. <https://doi.org/10.1177/0583102406065898>
- Monteagudo Viera, S. M. (2010). *Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos* [Masters, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM)]. <http://oa.upm.es/4793/>
- Mufti A.,A., Oshima, T., Bakht, B., Mohamed A. Mohamedien, M., A., 2006 SHM Glossary of Terms: Definitions, *.Homepage of International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*. URL: <http://www.ishmii.org/Literature/SHMGlossaryDefinitions.html> (read 2007-01-21)

- Nishikata, A., Qingjun Zhu, & Tada, E. (2014). Long-term monitoring of atmospheric corrosion at weathering steel bridges by an electrochemical impedance method. *Corrosion Science*, 87(87), 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.007>
- Ortega, N. F., & Ripani, M. (s. f.). *Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas*. 12.
- Park, H. s. (1), Lee, H. m. (1), Adeli, H. (2), & Lee, I. (3). (2007). A new approach for health monitoring of structures: Terrestrial laser scanning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1), 19-30. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2006.00466.x>
- Parks, J. E., Papulak, T., & Pantelides, C. P. (2016). Acoustic emission monitoring of grouted splice sleeve connectors and reinforced precast concrete bridge assemblies. *Construction and Building Materials*, 122, 537-547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.076>
- Peeters, B., Roeck, G. D., Hermans, L., Wauters, T., Krämer, C., & Smet, C. A. M. D. (1998). *Comparison of system identification methods using operational data of a bridge test*.
- Perez Cardozo, M. A., Quintana Rodriguez, J. A., Carrion Viramontes, F. J., Hernandez Guzman, A., Crespo Sanchez, S. E., & Lopez Lopez, J. A. (2012). ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA UBICACION DE SENSORES EN ESTRUCTURAS. *PUBLICACION TECNICA*, 349. <https://trid.trb.org/view/1285994>
- Pérez, H., & Mauricio, A. (2017). *Emisiones acústicas como precursor de daño para caracterizar la dregradación en una bomba centrífuga*. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150691>
- Pfeifer, N., Dorninger, P., Haring, A., & Fan, H. (s. f.). *INVESTIGATING TERRESTRIAL LASER SCANNING INTENSITY DATA: QUALITY AND FUNCTIONAL RELATIONS*. 11.

- Pongsaksawad, W., Viyanit, E., Sorachot, S., & Shinohara, T. (2017). Corrosion assessment of carbon steel in Thailand by atmospheric corrosion monitoring (ACM) sensors. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 20(2). <http://www.ojs.materialsconnex.com/index.php/jmmm/article/view/206>
- Puccinelli, D., & Haenggi, M. (2005). Wireless sensor networks: Applications and challenges of ubiquitous sensing. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 5(3), 19-31. <https://doi.org/10.1109/MCAS.2005.1507522>
- Qin, Q., Li, H., Qian, L. Z., & Lau, C. K. (2001). Modal identification of Tsing Ma bridge by using improved eigensystem realization algorithm. *Journal of Sound and vibration*, 247(2), 325-341.
- Quintana Rodriguez, J. A., Carrion Viramontes, F. J., Crespo Sanchez, S. E., Rodriguez Naranjo, D., Martinez Trujano, L. A., Gasca Zamora, H. M., Arceo Marinelarena, D., Hernandez Guzman, A., & Hernandez Figueroa, J. A. (2015). ESTRATEGIAS DE EVALUACION Y ANALISIS DEL MONITOREO DEL PUENTE RIO PAPALOAPAN. *PUBLICACION TECNICA*, 441. <https://trid.trb.org/view/1423381>
- Quintela, A., Jaúregui, C., Echevarría, J., & López-Higuera, J. M. (s. f.). *Medida del incremento de índice en fibras fotosensibles usando un interferómetro Mach-Zehnder*. 2.
- Rajan, G. (1), Ramakrishnan, M. (2), Semenova, Y. (2), Farrell, G. (2), Lesiak, P. (3), Wolinski, T. (3), & Boczkowska, A. (4). (2012). Composite materials with embedded photonic crystal fiber interferometric sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 182, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.05.026>
- Rajan, Ginu, & Prusty, B. G. (2016). *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods*. CRC Press.

- Ramasawmy, D. R., Martin, E., Guggenheim, J. A., Zhang, E. Z., Beard, P. C., Treeby, B. E., & Cox, B. T. (2019). Analysis of the Directivity of Glass-Etalon Fabry-Pérot Ultrasound Sensors. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 66(9), 1504-1513. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2921735>
- Ramos, L., Marchamalo, M., Rejas, J. G., & Martínez, R. (2015). Aplicación del Láser Escáner Terrestre (TLS) a la modelización de estructuras: Precisión, exactitud y diseño de la adquisición de datos en casos reales. *Informes de la Construcción*, 67(538), 074. <https://doi.org/10.3989/ic.13.103>
- Ren, W.-X., & Zong, Z.-H. (2004). *Output-only modal parameter identification of civil engineering structures*. https://doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.429
- Reyer, M., Hurlebaus, S., Mander, J., & Ozbulut, O. e. (2011, enero 1). *Design of a wireless sensor network for structural health monitoring of bridges*. 2011 Fifth International Conference on Sensing Technology (ICST 2011). <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2011.6137033>
- Robinson Barrera, Iván Gómez, & Jabid Quiroga. (2014). Detección de daños en estructuras: Estudio comparativo entre los algoritmos de optimización AGs y PSO. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 1, 61. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732014000100004>
- Roddam, A. W. (2005). Statistics for the Quality Control Chemistry Laboratory. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 168(2), 464-464. https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2005.358_13.x
- Romano, D. (s. f.). 0984-496909 a.porco@sismlab.it, giuliafvalerm@gmail.com. 11.
- Sansalone, M. J., & Streett, W. B. (1997). *IMPACT-ECHO. NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF CONCRETE AND MASONRY*. <https://trid.trb.org/view/573779>

- Schulz, T. (2008). *Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy* [Doctoral Thesis, ETH Zurich]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005368245>
- Sikdar, S., Ostachowicz, W., & Pal, J. (2018). Damage-induced acoustic emission source identification in an advanced sandwich composite structure. *Composite Structures*, 202(202), 860-866. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.051>
- Sinha, S. K., Schokker, A. J., & Iyer, S. R. (2003). Non-contact ultrasonic imaging of post-tensioned bridges to investigate corrosion and void status. *Proceedings of IEEE Sensors 2003 (IEEE Cat. No.03CH37498)*, 1, 487-492. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2003.1278986>
- Sumitro, S., Jarosevic, A., & Wang, M. L. (2002). Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement. *The First fib Congress, Concrete Structures in the 21th Century, Osaka*, 13–19.
- Sun, Y., Huang, P., Su, J., & Wang, T. (2018a). Depth estimation of surface-opening crack in concrete beams using impact-echo and non-contact video-based methods. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018(1), 144. <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0382-7>
- Sun, Y., Huang, P., Su, J., & Wang, T. (2018b). Depth estimation of surface-opening crack in concrete beams using impact-echo and non-contact video-based methods. *EURASIP JOURNAL ON IMAGE AND VIDEO PROCESSING*. <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0382-7>
- Testing, J. B.-H. C. on N.-D. (1996). *NON DESTRUCTIVE TESTING*. CRC Press.

- Thévenaz, L. (1999). Monitoring of large structure using distributed Brillouin fibre sensing. *13th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 3746, 3746-42. <https://doi.org/10.1117/12.2302136>
- Triana-Infante, C. A., Durán, G. M. V., & Pastor-Abellán, D. (2014). Validación de sensores basados en redes de difracción de bragg (fbgs) para deformación y temperatura. *ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería*, 11(2), 172-182.
- Tsuru, T., Nishikata, A., & Wang Jia. (1995). Electrochemical studies on corrosion under a water film. *Materials Science & Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)*, A198, 161-168.
- Wang, Q., Nan, G., Zhao, Y., & Ju, Y. (2017). FPGA IP Cores of Concurrent Filter for OTDR-distributed Fiber Optic Sensors. *2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, 121-125. <https://doi.org/10.1109/CRC.2017.44>
- Wild, G., & Hinckley, S. (2008). Acousto-Ultrasonic Optical Fiber Sensors: Overview and State-of-the-Art. *IEEE Sensors Journal*, 8(7), 1184-1193. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2008.926894>
- Wong, K. Y., & Ni, Y. Q. (2009). Structural health monitoring of cable-supported bridges in Hong Kong. En *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems* (pp. 371-411). <https://doi.org/10.1533/9781845696825.2.371>
- Wong, K.-Y. (2004). Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 11(2), 91-124. <https://doi.org/10.1002/stc.33>
- Xiang, J., & Zhong, Y. (2017). A fault detection strategy using the enhancement ensemble empirical mode decomposition and random decrement technique. *Microelectronics Reliability*, 75, 317-326. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.03.032>

- Xiong, C., Lu, H., & Zhu, J. (2017). Operational Modal Analysis of Bridge Structures with Data from GNSS/Accelerometer Measurements. *Sensors*, *17*(3), 436. <https://doi.org/10.3390/s17030436>
- Yamamoto, K., Miyamoto, R., Takahashi, Y., & Okada, Y. (2018). Experimental Study about the Applicability of Traffic-induced Vibration for Bridge Monitoring. *Engineering Letters*, *26*(2), 276-280.
- Yandy, M., & María, A. (2018). *Diseño, desarrollo, caracterización y análisis de sensores de fibras ópticas: Aplicación al estudio de materiales y estructuras* [Tesis, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/66531>
- Yang Zhang, Yaoyu Cao, Yushuang Zhu, Lin Gui, & Jiancun Zuo. (2018, enero 1). *Distributed Brillouin scattering optical fiber strain sensor technology*. 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). <https://doi.org/10.1109/IAEAC.2018.8577553>
- Yodsudjai, W., & Pattarakittam, T. (2017). Factors influencing half-cell potential measurement and its relationship with corrosion level. *Measurement*, *104*, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.027>
- Yoo, J.-H., Park, Z.-T., Kim, J.-G., & Chung, L. (2003). Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structures: Part 1. Laboratory tests to correlate galvanic current with actual damage. *Cement and Concrete Research*, *33*(12), 2057-2062. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00226-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00226-6)
- Zhang, J. (1, 2,3), Prader, J. (3), Moon, F. (3), Aktan, A. e. (3), Grimmelsman, K. a. (4), & Shama, A. (2013). Experimental vibration analysis for structural identification of a long-

span suspension bridge. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(6), 748-759.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000416](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000416)

Zhang, J., Prader, J., Grimmelsman, K. a., Moon, F., Aktan, A. e., & Shama, A. (2013).
Experimental Vibration Analysis for Structural Identification of a Long-Span Suspension
Bridge. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(6), 748-759. [https://doi.org/10.1061/
\(ASCE\)EM.1943-7889.0000416](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000416)