

Sistemas de instrumentación para monitoreo permanente de la salud estructural de puentes en
concreto

Gina Paola Viloria Ramírez

Trabajo de Grado para Optar por el título de Especialista en Estructuras

Director

Álvaro Viviescas Jaime.

Ingeniero Civil- Ph. D

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2017

Dedicatoria.

Este trabajo de grado se lo dedico a mi mamá, que sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible; a mi esposo que empezó conmigo este proyecto y nunca me dejó rendirme, a mi hijo que fue mi mayor motivación y se comportó a la altura en todo el proceso. Demás familiares y amigos, que colocaron su granito de arena para que esta especialización dejara de ser un sueño y se convirtiera en una realidad.

Agradecerle a Dios porque todo lo hizo perfecto.

Contenido

Introducción	12
1. Monitoreo de la salud estructural en puentes	14
2. Sistemas de monitoreo de la salud estructural	17
2.1. Sensores	19
2.2. Puente Voigt	20
2.2.1. Puente Gröndals.	22
2.2.2. Puente Tsing Ma.	24
2.2.3. Puente Infante de Enrique D.	26
2.2.4. Puente Connecticut.	27
2.2.5. Puente Qingzhou.	29
2.2.6. Puente Ávila-Salamanca.	30
2.2.7. Puente Sylmar.	32
2.2.8. Puente Jiubao.	33
2.2.9. Puente Tampico.	36
2.2.10. Puente Saramadu.	37
2.2.11. Sensores LVDT.	38
2.2.12. Sensores de emisión acústica.	40
2.2.13. Sensores PVDT.	41
2.3. Sistemas de instrumentación para monitorear las cargas móviles	42
2.4. Sistema de instrumentación para monitorear la corrosión	44
2.5. Técnicas de impacto	45
3. Método de aplicación de la línea base	49
4. Variables de control para monitorear el daño	50
5. Experiencias nacionales en monitoreo de puentes	54
5.1. Viaducto Cesar Gaviria Trujillo	54
5.2. Puente el Hormiguero	58
6. Caracterización de puentes en Bucaramanga para obtener una línea base	59
6.1. Viaducto la Unión	59
6.2. Puente Gómez Ortiz	60
7. Ensayos utilizados para determinar las variables de control	61

8. Consideraciones para el correcto monitoreo de puentes	62
9. Conclusiones	65
Referencias bibliográficas.	68

Lista de tablas

Tabla 1 Sensores utilizados en el puente Jiubao.....	35
Tabla 2. Equivalencia entre diseño estructural y diseño del sistema de monitoreo.....	64

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de los sensores en el Puente Voigt.	20
Figura 2. Programa de adquisición de datos para digitalizar la respuesta de los acelerómetros en el puente Voigt.	21
Figura 3. Sistema de instrumentación para el monitoreo de puentes.	23
Figura 4. Ubicación de los sensores en el puente Grondals.	24
Figura 5: Ubicación de los 29 sensores de deformación en el puente Tsing Ma.	25
Figura 6. Ubicación de los 10 sensores de acelerómetros en el puente Tsing Ma.	25
Figura 7. Ubicación de los 2 sensores de desplazamiento en el puente Tsing Ma.	26
Figura 8. Posición de los acelerómetros y los sensores de temperatura en el puente Infante de Enrique D.	27
Figura 9. Vista en planta del puente Conneticut con los sistemas de instrumentación para el monitoreo.	28
Figura 10. Localización de los sensores de temperatura y acelerómetros en la sección transversal de las vigas en el puente Conneticut.	29
Figura 11. Datos obtenidos de los sensores que se utilizaron en el puente Conneticut.	29
Figura 12. Esquema de la instrumentación del puente Ávila-Salamanca.	31

Figura 13. Medidor de abertura de junta, al final de las losas de transición., utilizado en el puente Ávila-Salamanca.	31
Figura 14. Identificación de la subestructura y ubicación de los sensores en el puente SIB.	32
Figura 15. Arquitectura del sistema de instrumentación de la salud estructural utilizado en el puente Jiubao.	34
Figura 16. Sistema de instrumentación para el monitoreo de fisuras.	39
Figura 17. Ubicación de los sensores y bobinas para detectar el paso del vehículo, en un puente.	42
Figura 18. Esquema del sistema de instrumentación para el monitoreo del puente.	43
Figura 19. Sistema de instrumentación para monitorear la corrosión en el refuerzo del concreto de la estructura.	44
Figura 20. Sistema de adquisición de datos por medio de SIMCARD.	45
Figura 21. Impulso de respuesta obtenida de la losa de un puente con vacíos.	46
Figura 22. Impulso de respuesta obtenida de una losa de un puente sin vacíos.	46
Figura 23. Resultado de la prueba Impact- Echo.	47
Figura 24. Resultado de la prueba eco-impacto cuando se presentan vacíos.	48
Figura 25. Niveles de inspección en los puentes.	49
Figura 26. Variables con mayor probabilidad de ocasionar la falla en un puente.	51
Figura 27. Potencial de corrosión según norma ASTM C876.	52
Figura 28. Simulación de las posiciones de las volquetas para prueba de carga viva, en el puente Cesar Gaviria Trujillo.	56
Figura 29. Localización de los elementos que fueron monitoreados, en el puente Cesar Gaviria Trujillo.	57

Figura 30. Ubicación de los acelerómetros en el puente Cesar Gaviria Trujillo.

58

Figura 31. Ubicación de los sensores, en el puente Gómez Ortiz.

61

RESUMEN

TITULO: SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN PARA MONITOREO PERMANENTE DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES EN CONCRETO*

AUTOR: GINA PAOLA VILORIA RAMIREZ**

PALABRAS CLAVE: MONITOREO DE PUENTES, VARIABLES DE CONTROL, LINEA BASE.

DESCRIPCION:

Los sistemas de instrumentación para el monitoreo de puentes es un tema de interés actual para los investigadores, ya que con estos aparatos se puede determinar el estado actual de la estructura y así estar atentos al deterioro o anomalía de este, que puede afectar la seguridad de los usuarios. Esta investigación presenta una revisión del estado del arte sobre las diferentes tecnologías de sistemas de instrumentación para el monitoreo permanente de la salud estructural de puentes de concreto utilizados en diferentes estructuras a nivel internacional y nacional, incluyendo trabajos realizados a nivel departamental para desarrollar líneas bases que sirvan para una supervisión futura en los puentes; adicionalmente se describen las variables de control para las mediciones periódicas en función de los factores que se pretendan encontrar. Conocer los tipos de sensores, la ubicación de estos en la estructura, la configuración del sistema receptor de los datos y el procesamiento que consiste en analizar e interpretar oportunamente la información que estos arrojan, es lo primordial para poder identificar los cambios que pudiesen estar asociados a fallas, y con esos datos establecer esquemas efectivos para un mantenimiento oportuno, partiendo que se conoce su capacidad de carga, lo que permite pronosticar el desempeño futuro de la estructura.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaime. Ingeniero Civil- Ph. D.

ABSTRACT

TITLE: INSTRUMENTATION SYSTEM FOR PERMANENT
MONITORING OF STRUCTURAL HEALTH OF BRIDGES IN
CONCRETE*

AUTHOR: GINA PAOLA VILORIA RAMIREZ**

KEYWORDS: MONITORING OF BRIDGES, CONTROL VARIABLES, BASE
LINE.

DESCRIPTION:

The instrumentation systems for bridge monitoring is a very important issue of current interest to researchers, since with these devices the current state of the structure can be determined and thus be attentive to the deterioration or anomaly of the structure, which can affect the safety of the users. This research presents a state-of-the-art review of the different instrumentation systems technologies for the permanent monitoring of the structural health of concrete bridges used in different structures at international and national levels, including work at the departmental level to develop baselines that Serve for future supervision on bridges; additionally, the control variables for the periodic measurements are described according to the factors that are to be found. Knowing the types of sensors, the location of these in the structure, the configuration of the system receiving the data and the processing that consists of analyzing and interpreting in a timely manner the information they provide, is the key to be able to identify the changes that could be associated to failure, and with these data establish effective schemes for timely maintenance, based on the known load capacity, which allows forecasting the future performance of the structure.

* Bachelor thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaime. Ingeniero Civil- Ph. D.

Introducción

Uno de los índices más fiables para medir el desarrollo de los países es evaluar su parámetro económico y las estructuras civiles es uno de los mayores influyentes, ya que con el uso de estructuras como puentes se obtiene mayor accesibilidad al transporte y un menor tiempo de viaje mejorando la competitividad, pero para ello es necesario que las estructuras trabajen bajo una operación normal y saludable, pues su deterioro incontrolado o su mal funcionamiento puede conducir a millonarias pérdidas económicas y crear un peligro potencial para los usuarios.

Todas las estructuras como puentes están expuestas a factores que provocan un deterioro en ellas (sismos, vientos, socavación, agentes ambientales, etc.) y esto conlleva a que se pierda su utilidad y beneficio para la comunidad, por eso se ha desarrollado un área de investigación que se enfoca en la monitorización para la vigilancia de la salud estructural de las obras, buscando la detección temprana a daños, recibiendo la atención de los investigadores debido al impacto económico y las implicaciones para la seguridad de la vida de estas estructuras (Zhou, Chen, & Yi, 2016). El monitoreo permanente en las estructuras como puentes, es una técnica beneficiosa y fiable para evaluar las respuestas de este ante cualquier evento, corroborar las hipótesis de diseño y descubrir posibles discrepancias en su comportamiento estructural, que pudiesen manifestar daño en la estructura, durante su vida de servicio e incluso durante la construcción. Conociendo los parámetros estructurales, que sirven como posición de referencia o línea base, con posterioridad el sistema de monitoreo, puede identificar los efectos debido a eventos inesperados, lo cual nos permite tomar medidas para mejorar su seguridad y definir los ajustes para futuros trabajos de la

misma línea. La técnica consiste en establecer una línea base a partir de características dinámicas y estáticas del puente para de manera periódica estar monitoreando posibles desviaciones en su comportamiento. (Frangopol & Kim, s.f)

Para el monitoreo de la salud estructural de puentes se tienen diferentes herramientas y técnicas, por ejemplo, para la identificación de cualquier efecto ante un evento sísmico, se requiere una medición precisa y sincronizada de la respuesta dinámica de diferentes puntos de la estructura, mientras que para monitorear la evolución de una fractura en el concreto se requiere un muestreo de muy baja frecuencia durante largos periodos (Federini, y otros, 2014). Existen diferentes tipos de ensayo, vibración ambiental y vibración forzada para evaluar los parámetros que influyen directamente con el diseño del sistema de medición, pero todos deben ser operados remotamente con un procesamiento de datos in situ, y una forma sencilla de mantenimiento.

1. Monitoreo de la salud estructural en puentes

El monitoreo de la salud estructural de puentes en concreto se puede definir como la medición del entorno de carga y las respuestas críticas de la estructura en seguimiento, evaluando los indicadores de daño para la fiabilidad de su buen funcionamiento y/o mantenimiento. Vale la pena mencionar que el término "monitoreo" apareció y comenzó a ser utilizado activamente en la literatura a finales de los años sesenta. Inicialmente, este término se entendió como la observación del medio ambiente, sus cambios y los impactos de los factores de riesgo en la naturaleza (Krakhmal'ny, Evtushenko, & Krakhmal'naya, 2016).

Las estructuras como puentes están generalmente sujetas a dos tipos de daño, el daño repentino y el daño acumulativo. Las lesiones repentinas son causadas por accidentes, de modo que su evaluación es de corto plazo para alcanzar mejorar la situación; el daño acumulativo tiene una lenta acumulación y se da generalmente producto de la naturaleza, en cierta medida, estos afectan a la seguridad y el uso de la estructura (Xiaodan, 2017). Monitorearlas de manera oportuna hace posible tomar medidas adecuadas, para prevenir más daños que conduzcan a otros tipos de accidentes. El daño acumulativo puede ocasionar fallas a largo plazo, según estas circunstancias se tiene más espacio para tomar las medidas correspondientes. Por lo tanto, es muy necesario y urgente hacer un seguimiento a la salud de la estructura del puente.

El monitoreo del puente se puede realizar con el análisis de datos históricos y el análisis de datos en tiempo real. El análisis de datos históricos se almacena en una curva, ya que de esta

manera puede ser utilizado para la observación y al mismo tiempo calcular el valor de referencia para determinar si el puente es saludable (Xiaodan, 2017). La adquisición y análisis de datos en tiempo real visualiza de manera instantánea la adquisición de datos del sensor, y el usuario puede entender el estado de funcionamiento del mismo.

De las primeras técnicas para el monitoreo de la salud estructural en puentes está la inspección visual o local, como (Jerez, 2007):

- Métodos de ultrasonidos o acústicos.
- Métodos de campo magnético, radiografías
- Métodos de corriente de Foucault
- Métodos de campo térmico.

Estos métodos experimentales locales presentan inconvenientes como; se debe conocer la ubicación del daño a priori y dependen de la percepción o dictamen práctico de los ingenieros que realizan las inspecciones estructurales, por esto, este tipo de inspección, es utilizada cuando el presupuesto es muy poco. En países desarrollados como los Estados Unidos o Japón, debido al rápido deterioro de las estructuras, se asignan los presupuestos para los trabajos de mantenimiento, se es consciente que una estructura poco saludable no es fiable y por ello se exige esa verificación frecuentemente para que en caso de un sismo la estructura no colapse.

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollado de sistemas para la verificación cuantitativa de factores que deterioran o dañan la estructura. Entre las variables que se pueden medir está: las acciones ambientales como la humedad y temperatura, que se miden en sitio con

una estación meteorológica, que permiten obtener la temperatura ambiente y humedad; las propiedades de los materiales, el comportamiento reológico de los concretos, la fluencia y la retracción; estos valores se obtienen en el laboratorio de probetas extraídas de los elementos estructurales, y a partir de esas pruebas se pueden obtener líneas bases y un modelo de elementos finito para elaborar los modelos de comparación. Para la evaluación de las propiedades dinámicas, la idea es que los cambios considerables en las propiedades modales tales como frecuencias naturales y amortiguación proporcionen información cuantitativa sobre el estado actual de la salud estructural.

Cuando se habla de monitoreo permanente, hay diferentes estrategias sobre cómo monitorear la estructura, por ejemplo, de forma continua, periódica, activada automáticamente y activada manualmente. Esto puede ser diferente de un puente a otro y también se puede cambiar durante el tiempo. Cuando se inicia el monitoreo, es preferible obtener datos continuamente, para luego tomar las mediciones una vez por semana, por ejemplo, monitorear sólo cuando el tráfico pasa por el puente, con un dispositivo de disparo automático. También se discute el monitoreo global y local. El monitoreo local se define como el realizado en cierta parte de la estructura, esto es útil para pruebas de laboratorio o para estructuras con daños conocidos (Jerez, 2007).

Teniendo en cuenta que el lugar donde se realiza este estudio es Bucaramanga y se encuentra ubicado en una zona de amenaza sísmica alta, se requiere realizar las pruebas que permitan conocer los parámetros modales de la estructura, esto mediante los ensayos instrumentados de vibración libre y forzada durante algunos periodos, ya que por cuestiones de seguridad no se puede contar con un sistema de monitoreo permanente.

2. Sistemas de monitoreo de la salud estructural

La instrumentación para el monitoreo de la salud estructural requiere de la instalación de aparatos que permitan medir en tiempo real las variables de control que se decidan establecer tales como; desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas, tiempos, temperaturas, entre otras. Una buena instrumentación conforma un sistema robusto de la supervisión de la salud estructural, el cual está enfocado a controlar los cuatro niveles o escalas de daño:

Nivel 1: Identificación del daño que se ha producido en una etapa muy temprana.

Nivel 2: Localización del daño.

Nivel 3: Cuantificación del daño.

Nivel 4: Predicción de la vida útil restante de la estructura.

Con el primer paso se tiene la ubicación óptima de los sensores utilizando el concepto de matriz de información de Fisher, en el segundo y tercer paso se utilizan fuentes de excitación ambiental para la identificación del sistema y el último paso emplea el enfoque probabilístico bayesiano para detectar sitios de daño estructural. Se han hecho muchos intentos para implementar el sistema, pero todavía es difícil lograr los cuatro niveles propuestos por Rytter (Jerez, 2007).

Uno de los principales inconvenientes para la implementación de los sistemas es el costo de instalación y el mantenimiento de estos, por ejemplo, los cables para el puente colgante Tsing Ma, en Hong Kong tuvo un costo de US\$27.000 (\$81'000.000.00 aproximadamente), según Lynch

(Jerez, 2007). Para la optimización de los sistemas se está considerado el uso de la tecnología inalámbrica, con lo cual se espera reducir el costo de los sistemas de monitoreo y hacerlos más asequibles para su aplicación. La identificación de las propiedades modales fue desarrollada por los ingenieros aeroespaciales y luego fue incorporada en el campo de la ingeniería civil. Hay grandes contribuciones a este algoritmo que tiene como objetivo identificar frecuencias naturales, formas modales y relaciones de amortiguación a partir de vibraciones de respuesta libre. De los aportes más utilizados para la identificación modal es el Algoritmo de realización Eigensystem (ERA) propuesto por Juang y Pappa (Jerez, 2007). Otro programa de prueba muy conocido es el que se adopta en el puente losa-viga I sobre el Río Grande en Albuquerque en los EE.UU (Jerez, 2007), donde se identifican los cambios modales por medio de algoritmos obtenidos de los datos experimentales, este programa es el intento más actualizado, completo y valioso para implementar los sistemas de monitoreo en estructuras civiles.

Los cuatro objetivos principales de los sistemas de instrumentación para el monitoreo de la salud estructural que se desarrollan e implementan actualmente son los siguientes:

- Monitoreo de salud estructural (SHM): Utilizando como entrada microvibraciones y eventos sísmicos es posible detectar cambios en los parámetros dinámicos de una estructura y asociarlos a posibles modificaciones, deterioro o daños ocurridos en sus elementos.
- Alertas de movimiento fuerte (SMA): Mediante acelerómetros de amplio rango dinámico se genera una red de detección de eventos de movimiento fuerte, ya sea a nivel de suelo o en la estructura. Se envían informes automáticos de los eventos registrados y se despliega la información en una página Web. Sistemas como este han sido ampliamente implementados en el sector minero.

- Evaluación del desempeño de sistemas de aislación y disipación: Mediante la instrumentación en elementos ubicados bajo y sobre una interfaz de aislación es posible comparar las diferencias en la respuesta, ante eventos de distintas características.
- Estado de salud de sistemas (SOH): Mediante la detección de cambios en los parámetros de funcionamiento de un sistema de monitoreo se generan alarmas. Se controlan variables como temperatura, voltaje, back up, humedad, etc. Las variaciones fuera de control son reportadas automáticamente, pudiendo significar una alerta sobre el funcionamiento del sistema de monitoreo (Boroschek, Poblete, & Aguilar, 2015).

2.1. Sensores

Los sensores son los elementos más utilizados para el monitoreo de la salud estructural, pero la ubicación de estos en la estructura es el principal interrogante. Udwardia (Jerez, 2007), plantea un estudio denominado “Optimum Sensor Location Algorithm” basado en el matiz de información de Fisher (Jerez, 2007). Kammer (Jerez, 2007), presenta el método de la independencia efectiva, que selecciona las localizaciones de sensor que más contribuyen a la independencia lineal de las formas de modo matemático. Otra alternativa fue presentada por Hemez y Farhat (Jerez, 2007) utilizando el mismo concepto de la matriz de información de Fisher mediante la colocación de sensores pero sobre la base de las contribuciones de energía de deformación de una estructura. Este fue el primer método que consideró la mejora en los resultados de detección de daños mediante la colocación óptima de sensores. Shi y otros (Jerez, 2007). Presentó un método en el que la configuración del sensor se selecciona sobre la base de su capacidad para localizar los sitios estructuralmente dañados y se basa en el método propuesto por Hemez y Farhat. Xia (Jerez, 2007)

quienes extendieron el método propuesto por Shi y otros (Jerez, 2007). Al considerar la contribución del ruido de medición para encontrar la configuración óptima de los sensores (Jerez, 2007).

Para la supervisión de las estructuras existen muchos sensores que se pueden seleccionar, se encuentran los que miden las variaciones mecánicas como; sensores de esfuerzo, deformación, desplazamiento, vibraciones mecánicas, carga, entre otros, y también puede haber sensores para otro tipo de variables físicas o químicas, tales como la humedad, temperatura, pH, potencial de corrosión, permeabilidad del concreto, presencia de cloruros (Pérez Cardozo, y otros, 2012). Del alcance del monitoreo depende el sistema de instrumentación. Por ejemplo, acelerómetros y transductores de desplazamiento son sensores globales que miden las respuestas estructurales globales, mientras que algunos sensores como extensómetros, son sensores locales que supervisan las respuestas estructurales locales (Xiaodan, 2017). A continuación, se desarrollan diferentes casos como ejemplo de los diferentes sistemas de instrumentación:

2.2. Puente Voigt

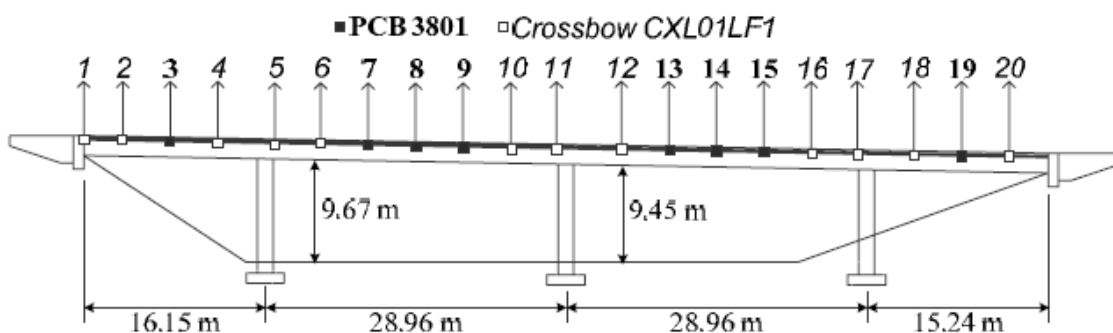


Figura 1. Ubicación de los sensores en el Puente Voigt. Adaptado de ascelibrary.org. (Sensor Network for Structural Health Monitoring of a Highway Bridge. p. 3)

Para el puente Voigt en California/EE. UU, se instalaron sensores que involucran un total de 20 acelerómetros, espaciados aproximadamente a 4.5 m de distancia, orientados de esta forma para medir la vibración en la dirección vertical que se producen gracias a las cargas de tráfico. Con los registros obtenidos por estos aparatos, se identificaron los cambios en la respuesta dinámica del puente, presentando variaciones entre el rango del 7 y 13% en las frecuencias naturales.

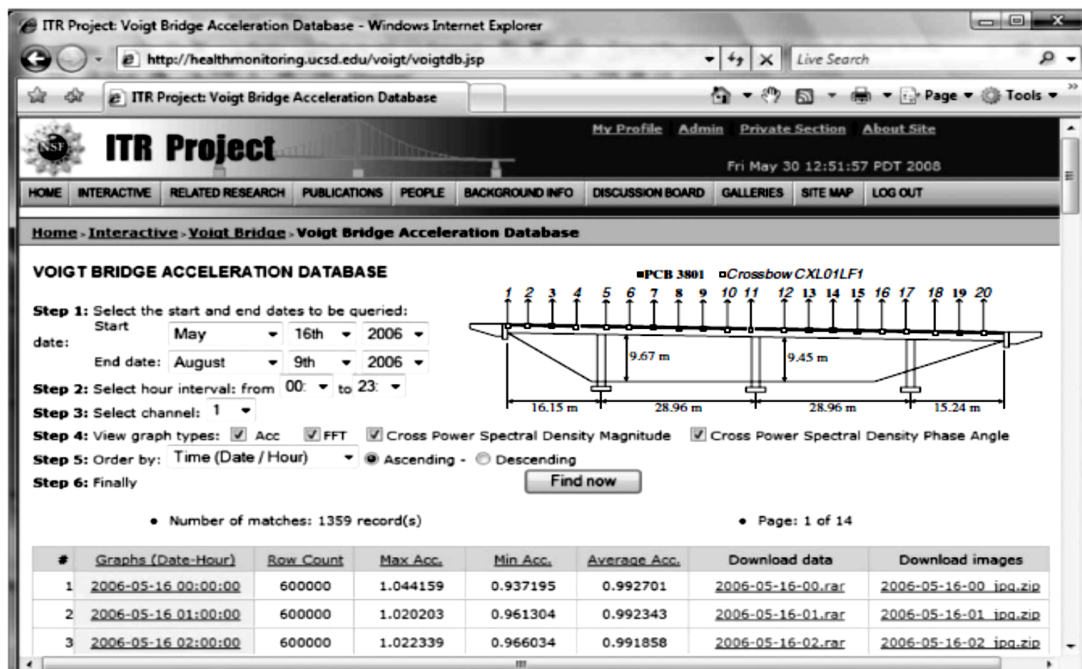


Figura 2. Programa de adquisición de datos para digitalizar la respuesta de los acelerómetros en el puente Voigt. Adaptado de ascelibrary.org. (Sensor Network for Structural Health Monitoring of a Highway Bridge. p. 6)

La ubicación de los sensores se tomó por su fácil acceso a través de pozos de registro ubicados en la acera en el lado norte del puente (Fig. 2). Adicionalmente se instaló una cámara digital Sony XCD-X710CR de 30 fotogramas por segundo (tasa de muestreo máximo) se ubicó en un poste de luz en el extremo sur-occidental del puente. Esta cámara es para vigilar el paso del tráfico sobre el

puente, con el fin de correlacionar cada vehículo con la correspondiente respuesta dinámica. Los datos de los sensores se recogieron en el puente utilizando un ordenador local, alojado dentro de la esquina noroeste del puente. Para controlar el sistema de adquisición de datos, se creó una nube inalámbrica la cual recibía los datos por medio de la red de Internet, que se tomaba por cable de un edificio ubicado aproximadamente a 60 m del puente. Se desarrolló un programa de adquisición de datos para digitalizar la respuesta de cada acelerómetro a una velocidad de 1.000 muestras por segundo, este transmite los datos desde el ordenador de adquisición a la web y si la conexión falla temporalmente la información se guarda en el disco duro local, mientras sigue tomando datos. (Fraser, Elgamal, He, & Conte, 2010)

2.2.1. Puente Gröndals.

Para monitorear el comportamiento global de una estructura se puede utilizar sensores de fibra óptica FOS, como se tiene en el puente de Gröndals, en Estocolmo, Suecia, que presentó un agrietamiento excesivo en las superestructuras específicamente en las vigas cajón, antes de hacer el monitoreo se hizo un reforzamiento de la losa con fibras de carbono.

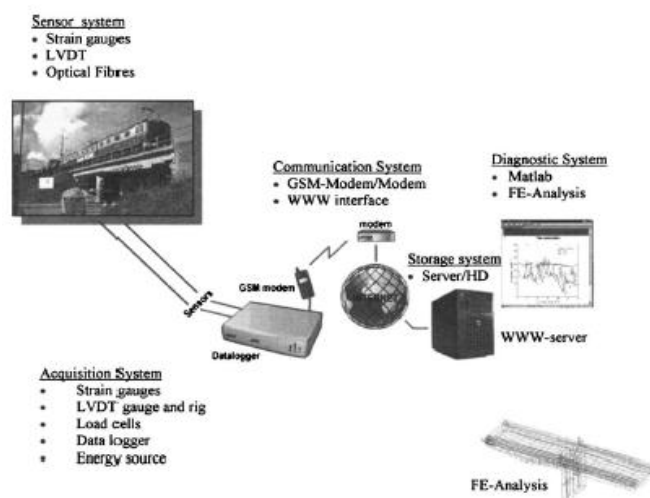


Figura 3. Sistema de instrumentación para el monitoreo de puentes. Adaptado de ascelibrary.org (Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthening and Monitoring of the Gröndals Bridge in Sweden, p. 4)

En este caso se optó por mediciones en localizaciones específicas, para tener el desarrollo de grietas y en las placas reforzadas con CFRP. Fueron instalados en total 32 FOS, en las secciones A y B, ver Fig. 4. En Sección A, se han instalado 12 sensores en el lado oeste tres de estos se utilizaron para controlar la temperatura. En la pared de la viga cajón se instalaron siete sensores, cinco en el hormigón incluyendo compensación de temperatura y dos en una placa CFRP, incluyendo aquí también la compensación de temperatura. En la sección B, lado oeste, se han colocado cuatro sensores sobre el hormigón. En el lado este, en la misma sección, se han colocado seis sensores en el hormigón, uno para compensación de temperatura y dos en una placa CFRP, uno de los cuales es para compensación de temperatura. (Täljsten, Hejll, & James, 2007)

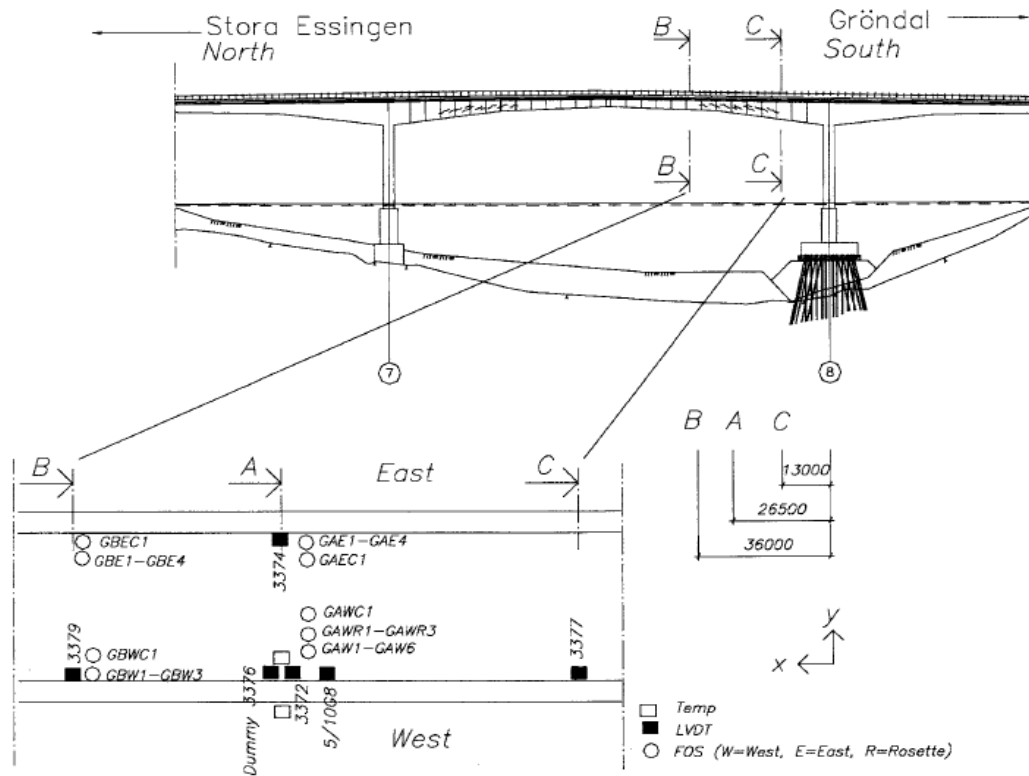


Figura 4. Ubicación de los sensores en el puente Gröndals. Adaptado de ascelibrary.org (Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthening and Monitoring of the Gröndals Bridge in Sweden. p.5)

2.2.2. Puente Tsing Ma.

El puente colgante Tsing Ma en Hong Kong es el puente colgante más largo del mundo que transporta tanto los autos de la autopista como el ferrocarril. El puente de Tsing Ma ha sido equipado con un sistema de instrumentación para el monitoreo de la salud estructural desde 1997. Este puente fue seleccionado como referencia para el diseño de un modelo de un puente físico para banco de pruebas. Todos Los componentes estructurales principales del puente fueron incluidos en el modelo para tener una representación real del puente. Se ha propuesto un método práctico para seleccionar los modos de vibración de la estructura y así obtener la ubicación óptima de los sensores. Para el banco de pruebas, se tuvieron en cuenta 22 modos de vibración y se ubicaron un

total de 41 sensores que comprendían, 29 sensores de deformación, 2 sensores de desplazamiento y 10 acelerómetros. Las mediciones de los sensores multi-tipos en las ubicaciones seleccionadas se combinaron para reconstruir las respuestas multi-tipo en todas las ubicaciones clave, incluyendo los desplazamientos rotacionales nodales. (Lin Xu, Zhang, & Zhu, 2016)

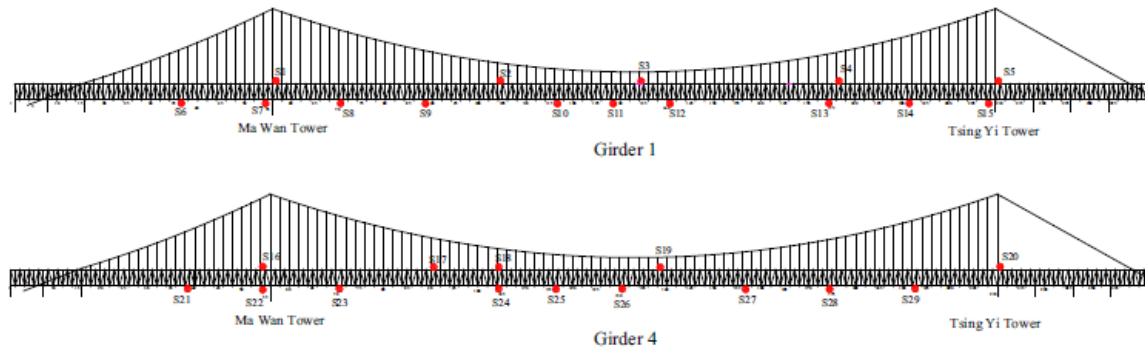


Figura 5: Ubicación de los 29 sensores de deformación en el puente Tsing Ma. Adaptado de Springer.com/scp (Multi-type sensor placement and response reconstruction for structural health monitoring of long-span suspension bridges. p. 10)

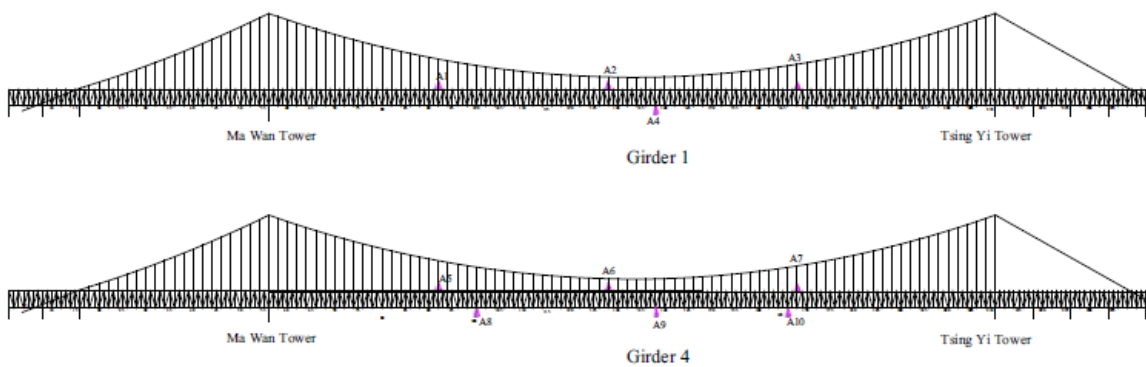


Figura 6. Ubicación de los 10 sensores de acelerómetros en el puente Tsing Ma. Adaptado de Springer.com/scp (Multi-type sensor placement and response reconstruction for structural health monitoring of long-span suspension bridges. p. 10)

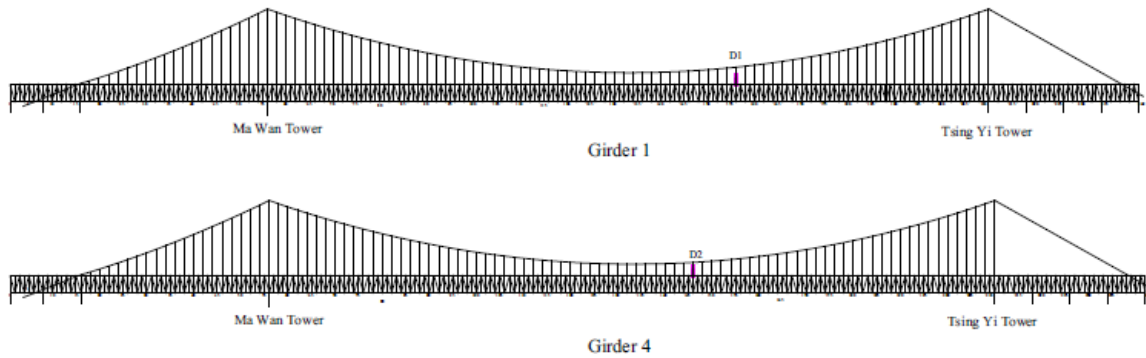


Figura 7. Ubicación de los 2 sensores de desplazamiento en el puente Tsing Ma. Adaptado de Springer.com/scp (Multi-type sensor placement and response reconstruction for structural health monitoring of long-span suspension bridges. p. 10)

2.2.3. Puente Infante de Enrique D.

El puente el Infante de Enrique D. que comunica las ciudades de Porto y Gaia, en el norte de Portugal, está equipado con un sistema de monitoreo dinámico que está compuesto esencialmente por dos digitalizadores que reciben las señales recogidas por 12 acelerómetros de equilibrio de fuerzas, que se instalaron en la parte lateral de la viga cajón y se distribuyen a lo largo del puente según el esquema presentado en la Fig. 8. Tres sensores en cada sección: uno para medir la aceleración lateral y dos para la Aceleración vertical en los lados de la corriente descendente y de la corriente ascendente. (Magalhaes, Cunha, & Caetano, 2012)

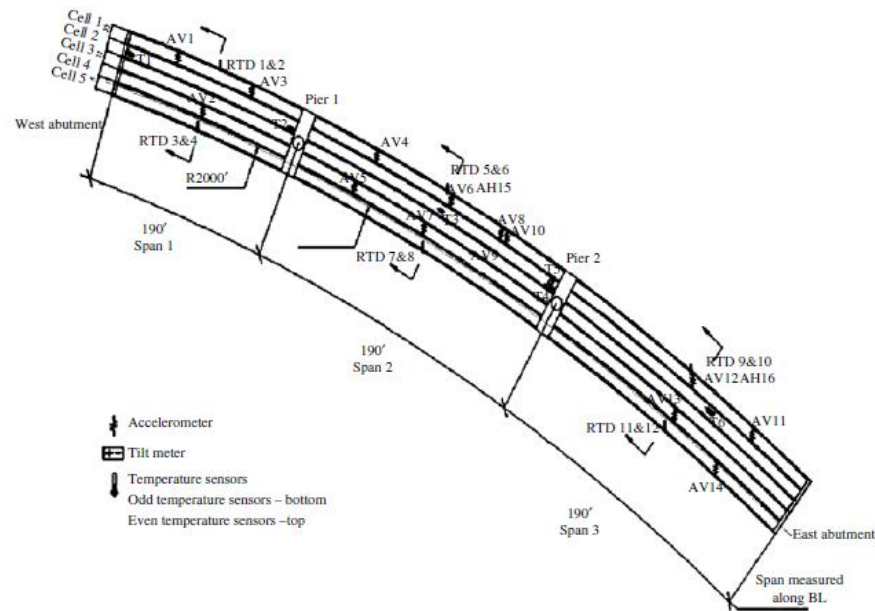


Figura 9. Vista en planta del puente Connecticut con los sistemas de instrumentación para el monitoreo. Adaptado de elsevier.com (Development of a baseline for structural health monitoring for a curved post-tensioned concrete box girder bridge. p. 3)

En 1999 se instaló un sistema de monitoreo continuo controlado a largo plazo, que fue diseñado para supervisar tanto las condiciones ambientales como el comportamiento dinámico del puente bajo condiciones normales, carga del tráfico. El sistema de monitoreo consta de 12 sensores de temperatura, 16 acelerómetros y 6 medidores de inclinación. Catorce acelerómetros fueron utilizados para medir las aceleraciones verticales, y dos fueron utilizados para las aceleraciones laterales. Los datos de aceleración se recogen utilizando un enfoque basado en disparadores. El acelerómetro ubicado en el centro de la distancia se toma siempre como el sensor de referencia. Cuando la aceleración del acelerómetro de referencia está por encima de la media de los datos que ha tomado el software, se recogen datos por 40 segundos ante el evento desencadenado. Los sensores de temperatura miden la temperatura en diferentes lugares en las vigas cajón a intervalos de 15 minutos. (Liu, DeWolf, & Ho Kim, 2009)

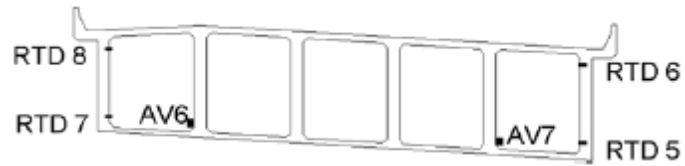


Figura 10. Localización de los sensores de temperatura y acelerómetros en la sección transversal de las vigas en el puente Conneticut. Adaptado de elsevier.com (Development of a baseline for structural health monitoring for a curved post-tensioned concrete box girder bridge.

p. 3)

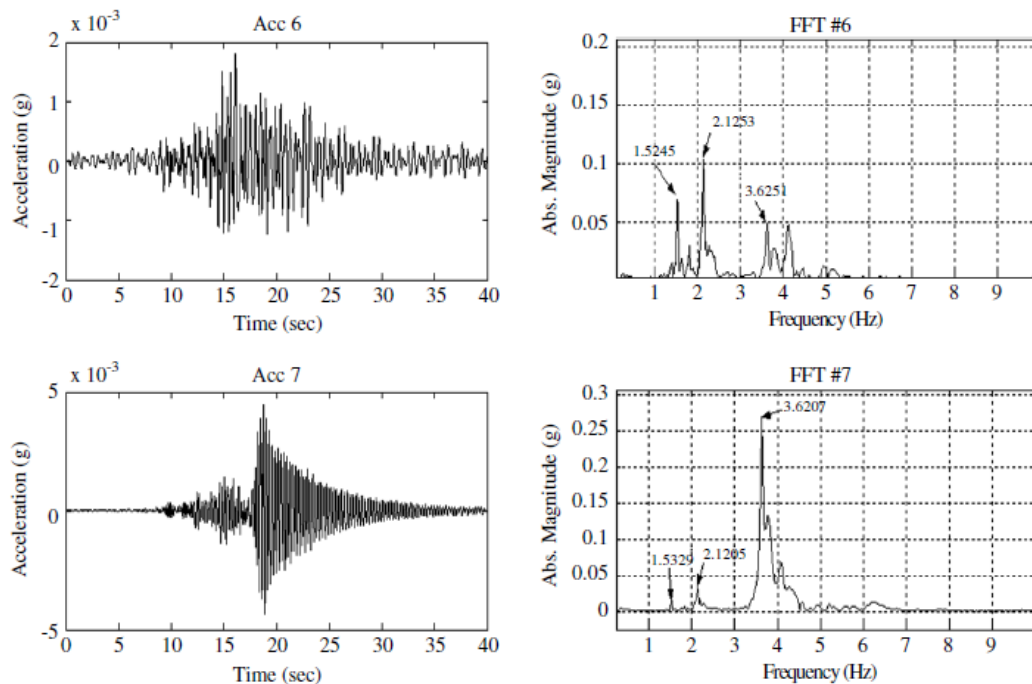


Figura 11. Datos obtenidos de los sensores que se utilizaron en el puente Conneticut. Adaptado de elsevier.com (Development of a baseline for structural health monitoring for a curved post-tensioned concrete box girder bridge. p. 4)

2.2.5. Puente Qingzhou.

En el puente atirantado Qingzhou sobre el río Ming, Fuzhou, China. También se desarrolla un sistema de línea base que incluye varias tareas: modelado de elementos finitos, pruebas de

vibración ambiental de campo, estudios paramétricos y validación de modelos. El modelado elementos finitos y el análisis modal experimental proporcionan una información sobre las propiedades dinámicas del puente. El análisis modal mediante el modelo tridimensional de elementos finitos proporciona una descripción detallada de las características físicas y modales del puente, mientras que el análisis modal experimental a través de las pruebas dinámicas de campo proporciona una valiosa información para validar el modelo idealizado y lo construido. Una prueba de vibración ambiental inducida por el tráfico normal y el viento natural es conveniente, rápida y barata. El equipo utilizado para las pruebas incluía acelerómetros, cables de señal y un sistema de adquisición de datos de 32 canales con amplificador de señal. (Xin Ren & Lin Peng, 2005)

2.2.6. Puente Ávila-Salamanca.

El Grupo Hormigón Estructural de la ETS de Caminos de Madrid ha realizado campañas experimentales para la medición de los efectos de deformaciones impuestas en estructuras reales de edificación, (NAT Barajas y aparcamiento subterráneo en Vigo) y ahora realiza la monitorización del comportamiento de un paso superior sobre la autovía Ávila-Salamanca. (Corres Peiretti, Ezeberry, Petschke, & Pérez Caldentey, s.f)

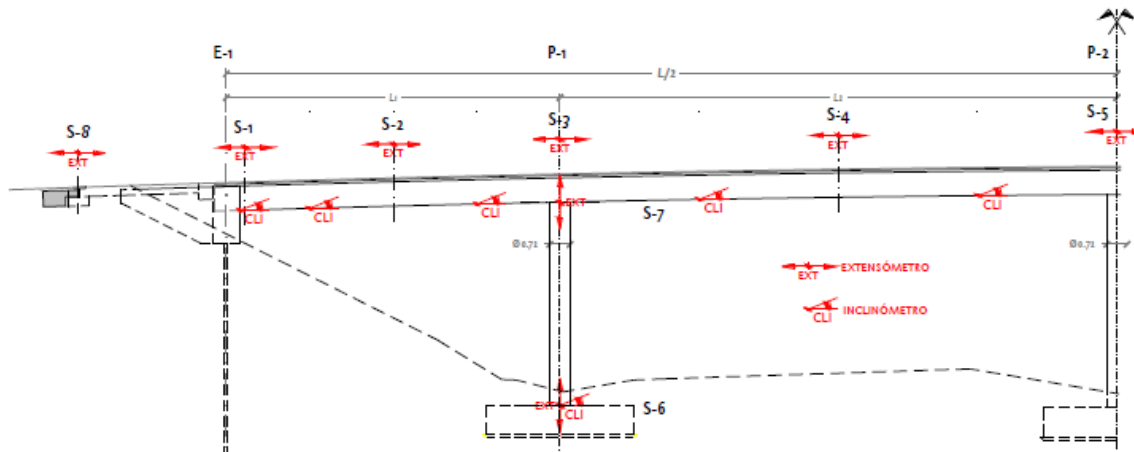


Figura 12. Esquema de la instrumentación del puente Ávila-Salamanca. Adoptado de elsevier.com (Instrumentación y auscultación de un puente integral. p. 4)

Dentro de los sistemas de instrumentación utilizados, se cuenta con los extensómetros, que miden los movimientos del puente con un medidor de abertura de junta de cuerda vibrante (jointmeter) que permite medir movimientos de hasta 50 mm con una precisión de 0,0125 mm

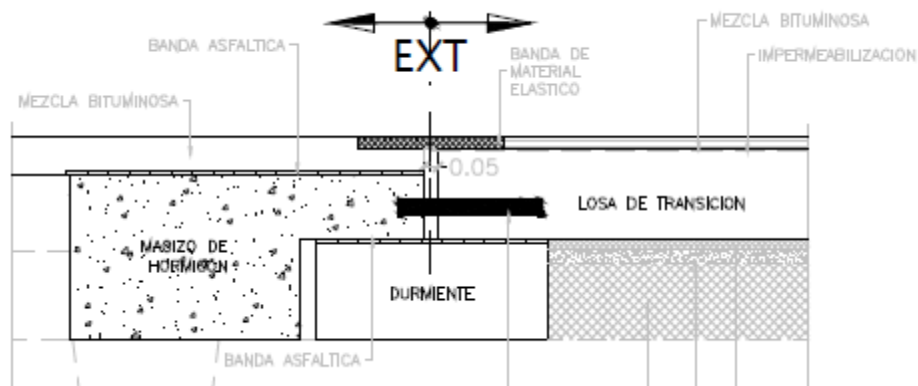


Figura 13. Medidor de abertura de junta, al final de las losas de transición., utilizado en el puente Ávila-Salamanca. Adaptado de elsevier.com (Instrumentación y auscultación de un puente integral. p. 5)

2.2.7. Puente Sylmar.

En el puente de Sylmar I5/14 (SIB) en California, se implementó los métodos de identificación de espacio-estado que se utilizan para la identificación modal a partir de registros de terremotos con una investigación adicional sobre la efectividad de los sistemas de instrumentación. Esta metodología se desarrolló después del colapso parcial que tuvo el puente durante el terremoto de Northridge en 1994, este se reconstruyó, y se instrumentó, con 34 acelerómetros unidireccionales como se muestra en la Fig. 14.

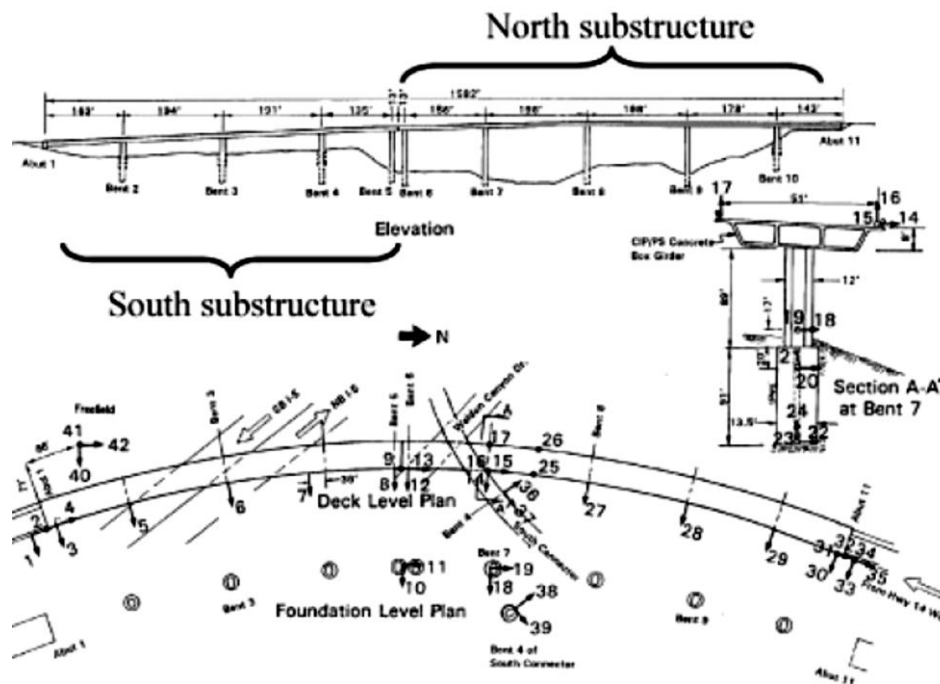


Figura 14. Identificación de la subestructura y ubicación de los sensores en el puente SIB.

Adaptado de interscience.wiley.com (Modal identification of bridge systems using state-space methods. p. 8)

La respuesta modal transversal del sistema en el puente es el foco principal del estudio. Por lo tanto, los datos registrados por 15 sensores ubicados en las curvas del puente se consideran como los canales de entrada y salida.

Los datos grabados que se producen por la instrumentación en el SIB, arrojaron los resultados durante un pequeño terremoto que tuvo lugar el 14 de abril de 1999 y estos se utilizan en las siguientes subsecciones como datos de entrada-salida para demostrar el uso de los métodos de sistema de identificación de daños. (Arici & Mosalam, 2005).

2.2.8. Puente Jiubao.

Con el fin de garantizar la seguridad del Puente Jiubao en China, se diseñó un sistema de instrumentación para el monitoreo de la salud estructural, para lograr los siguientes objetivos: (1) un sistema robusto con tiempo de retroalimentación corto; (2) arquitectura extensible de hardware y software para actualizaciones y ampliaciones; (3) detección de información completa que indique el desempeño estructural (es decir, cargas ambientales, cargas de servicio, configuración estructural, respuestas estáticas y respuestas dinámicas); (4) almacenamiento de los datos originales y datos procesados para una mayor evaluación de la salud e investigación teórica (5) identificación de las variaciones de los índices que involucran el ambiente de trabajo y la seguridad estructural global y local; (6) advertencia de un posible deterioro del rendimiento y daños estructurales antes de que ocurra un colapso catastrófico; y (7) proporcionar sugerencias de actualización y mantenimiento. (Zhou, Chen, & Yi, 2016)

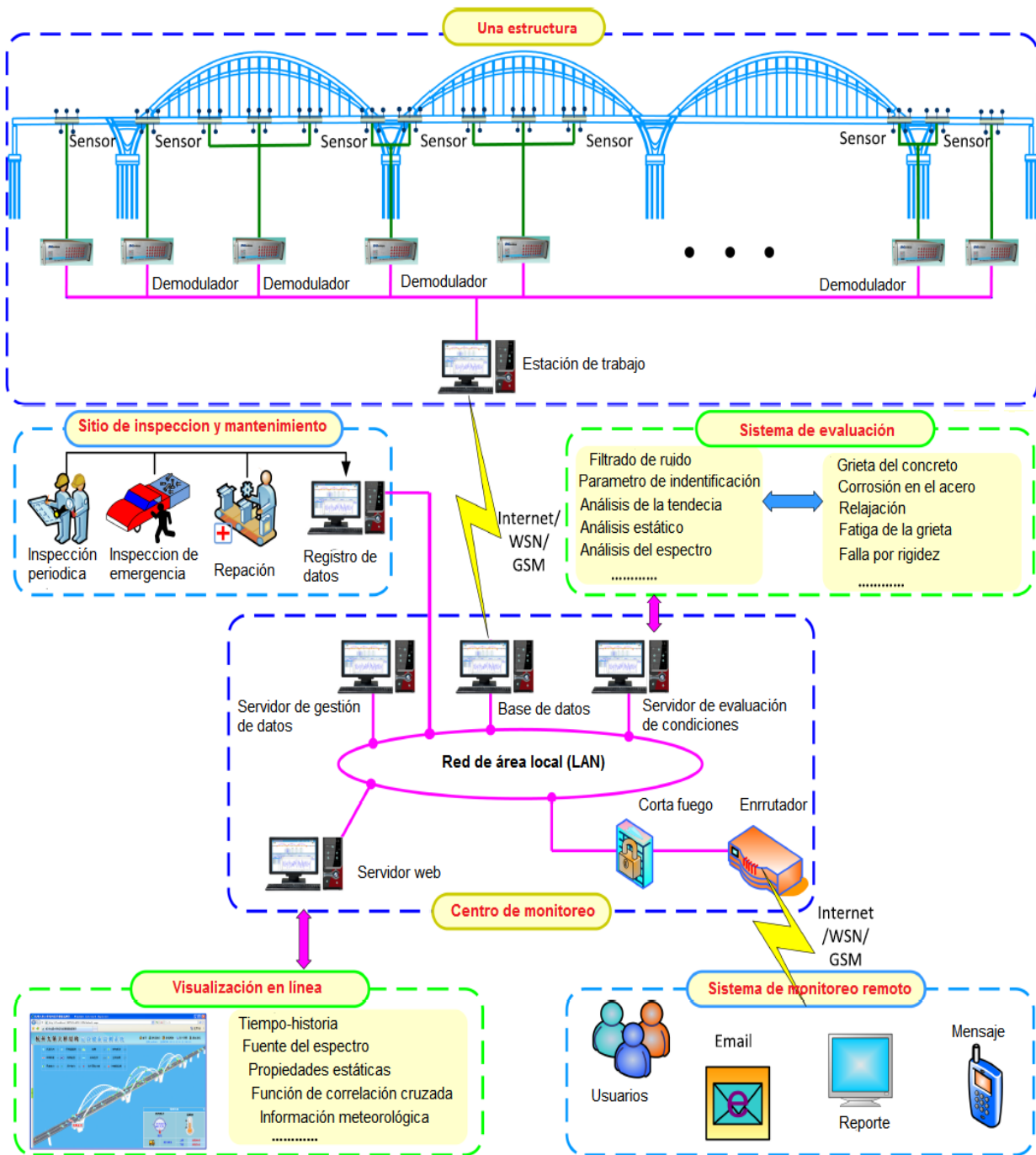


Figura 15. Arquitectura del sistema de instrumentación de la salud estructural utilizado en el puente Jiubao. Adaptado de ascelibrary.org (Innovative Design of a Health Monitoring System and Its Implementation in a Complicated Long-Span Arch Bridge. p. 6)

Tabla 1

Sensores utilizados en el puente Jiubao

Elemento de supervisión	Parámetro	Tipo de sensor	Numero	Modelo
Carga ambiental	Velocidad y dirección del viento	Anemómetro mecánico	2	PH100SX
		Anemómetros ultrasónicos	1	Windsonic
	Humedad y temperatura	Sensor de humedad y temperatura	3	LTM9901M
	Sismo	Servoacelerómetro de tipo triaxial	2	GT41
Carga de trafico	Vehículos	Peso del puente con el movimiento	4	HI-TRAC100
		Cámara	8	DS-2CD892PF
Respuesta estructural	Vibración vertical	Servoacelerómetro de tipo axial	8	GT02
		Servoacelerómetro de tipo axial	2	GT02
	Tensión	Sensor de tensión de superficie FGB	141	BGK-FBG-4000
		Sensor de tensión empotrado FGB	21	BGK-FBG-4100

Desplazamiento	Sensor transmisor de presión	22	EJA
	Transductor de desplazamiento magnetostrictivo	2	KYDM-LP1A
Fuerza de tensión	Servoacelerómetro de tipo axial	8	LC0166M
	Anillo de carga FGB	16	BSF
Temperatura	Sensor de temperatura digital	76	LTM8877
	Sensor de temperatura FGB	8	BGK-FBG-4700
Total		324	

Nota: Total de sensores utilizados en el puente Jiubao. Adaptado de ascelibrary.org (Innovative Design of a Health Monitoring System and Its Implementation in a Complicated Long-Span Arch Bridge. p. 7)

2.2.9. Puente Tampico.

En el puente Tampico en México se decidió llevar a cabo una evaluación experimental del puente con el objetivo de determinar las características dinámicas de la superestructura, con base a los resultados de las pruebas de vibración ambiental y de tracción se identificaron las frecuencias naturales y las formas modales más significativas y se calculó la fracción del amortiguamiento crítico. Después de sus 10 años de vida útil se pudieron haber modificado, se utilizaron cinco tipos de sensores: deformímetros (LVDT), acelerómetros, medidores de velocidad de vehículos (celdas fotoeléctricas), anemómetros y termómetros. Para las pruebas estáticas se colocaron camiones respectivamente medidos y pesados en los carriles de tránsito y para las pruebas de vibración

ambiental se registraron las vibraciones producidas por el tránsito regular y el viento (Gomez, Muriá Vila, Escobar Sanchez, & Sanchez Ramirez, 2001).

2.2.10. Puente Saramadu.

En el puente Saramadu en Indonesia se desarrollaron las técnicas de monitoreo de deformación que pueden dividirse en mediciones geotécnicas y encuestas basadas en geomática. Las mediciones geotécnicas generalmente muestran la cantidad de deformación relativa a la marca de referencia en el objeto real que se está monitoreando. Las herramientas utilizadas son extensómetros, inclinómetros, micrómetros, etc. Así, estas mediciones sólo pueden detectar deformación unidimensional (1D), por ejemplo, a lo largo de una línea. Por otra parte, la geomática basada en encuestas, incluye la investigación terrestre tradicional, con niveles de alta precisión, los teodolitos y los dispositivos electrónicos de medición de distancia (EDM), el sistema mundial de navegación por satélite (GNSS) y la tele-observación; Técnicas que incluyen fotogrametría aérea y exploración láser terrestre; y en la fotogrametría a corto alcance. Estos se pueden utilizar para la determinación de la deformación en una escala absoluta, los puntos medidos en el objeto de interés asociado con otras cosas que pertenecen a la trama de coordenadas de referencia. Las ventajas de la encuesta de geomática basada en el monitoreo de deformación es que los instrumentos utilizados permiten detectar deformaciones en tres Dimensional (3D).

Dado que el uso de la cámara es barato y fácil, y que el aumento de la precisión se puede obtener de la aplicación de soluciones analíticas de forma geométrica, se plantea a continuación, el uso de la cámara como una de las alternativas para el cálculo de la deformación. El uso de un método

alternativo relativamente barato para supervisar la deformación del puente con fotogrametría digital emplea la técnica de CRP (fotogrametría de alcance cercano) utilizando una cámara réflex digital (DSLR). En La técnica CRP, la calidad del proceso para la determinación de coordenadas puede ser mejorada por la exposición convergente para obtener datos redundantes o mediciones repetitivas. También existen sistemas GPS que en tiempo real son capaces de obtener una precisión de nivel de hasta 10 Hz, y actualmente se están evaluando, este sistema también puede utilizarse, por supuesto, para examinar la respuesta de una estructura a otras fuerzas tales como el agua, carga, efectos térmicos y viento, los cambios graduales en propiedades materiales o estructurales a través del tiempo. (Hapsari Handayani & Taufik M, 2015)

2.2.11. Sensores LVDT.

Entre los diferentes tipos de sensores se encuentran los de movimientos que pueden monitorear fisuras, se tienen, por ejemplo, los Linear Differential Transformer LVDT, que están conectados a través de una interfaz a un computador o microprocesador que permite el monitoreo continuo del proceso de apertura de fisuras en tiempo real. Este sistema de medición consta de los siguientes dispositivos:

- Sensor de movimiento de efecto Hall. El rango de medida es ± 3 mm con una precisión de 0,01 mm.
- Unidad de señales de amplificación y convertirlas en forma digital
- Red de cable.
- Programa de computador «Geotek-SHM»

Este sistema de monitoreo no cuenta con la posibilidad de transferir los datos obtenidos de la medición de los sensores de forma inalámbrica a un computador, lo que reduce significativamente el área de su aplicación. Por ende, este sistema sólo puede aplicarse a puentes de grandes dimensiones bajo vigilancia constante.

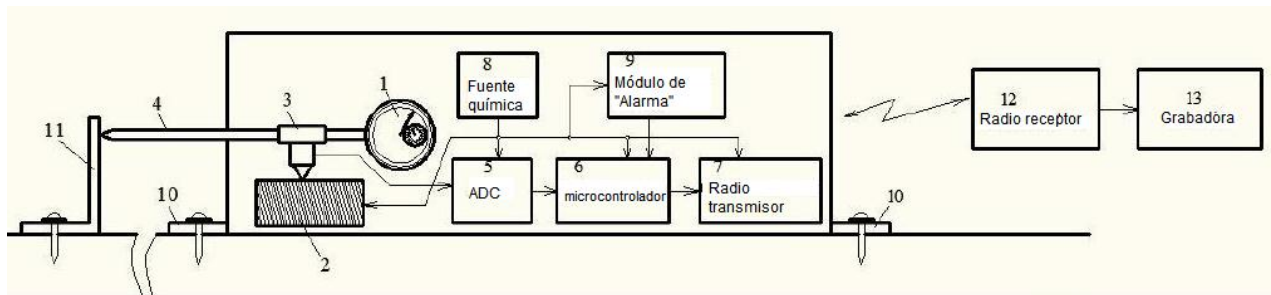


Figura 16. Sistema de instrumentación para el monitoreo de fisuras. Adaptado de sciencedirect.com (New System of Monitoring of a Condition of Cracks of Small Reinforced Concrete Bridge Constructions. p. 3)

Los sensores de movimiento consisten en, ver Fig. 17: (2) cable deslizante, (5) colector de corriente, (3) convertidor de señal analógica - digital, (6) el micro- controlador, (7) transmisor de radio, (8) el protocolo Zigbee soportó la fuente química de la tensión de alimentación, (9) Módulo "despertador".

El sensor funciona de la siguiente manera. Cuando la grieta controlada se abre, la distancia entre el sensor y el tope del vástago retráctil (11) aumenta. Como resultado, la varilla retráctil (4) del indicador de cuadrante sigue al tope, y el indicador de cuadrante (1) muestra el desplazamiento. Desde el colector de corriente, la señal llega al convertidor analógico-digital (5) que convierte la señal analógica de entrada en un código digital. El código digital al salir, va a la entrada del micro-controlador (6). El micro-controlador transmite entonces el módulo de radio (7) y este pasa el valor

de desplazamiento al módulo de radio receptor (12) y al dispositivo de grabación (13). Los sensores están ubicados en los puntos de inspección, que pueden estar en diferentes partes del puente, y el módulo receptor de radio conectado al dispositivo de grabación se comunica por radio con cada uno sensores. (Krakhmal'ny, Evtushenko, & Krakhmal'naya, 2016)

2.2.12. Sensores de emisión acústica.

Los receptores piezoeléctricos especiales llamados sensores de emisión acústica (AE) (Yapar, Basu, Volgyesi, & Ledeczi, 2015), ubicados estratégicamente, detectan las imperfecciones o las grietas en los puentes, ya que estos perciben la liberación de pequeñas ráfagas de energía que acompañan los daños en las estructuras, tal liberación de energía hace que las ondas de esfuerzo viajen en el cuerpo de la estructura y pueden ser detectadas. A través del procesamiento apropiado de las señales capturadas de uno o más sensores en base a su tiempo de llegada, intensidad y velocidad, debería ser posible especificar completamente el lugar del daño y, posiblemente, su naturaleza y el alcance de los daños causados por las tensiones que lo conducen. Para limpiar las señales como el ruido de fondo se utilizan herramientas como la transformación de wavelet, espectros de potencia, transformación rápida de Fourier y redes.

La monitorización por emisión acústica (AE) es una técnica que utiliza sensores para detectar ondas elásticas transitorias producidas por una rápida redistribución del estrés en un material. La emisión acústica se produce en el elemento debido a la liberación de energía por la formación de daños como un pulso corto de energía elástica y cinética que viaja a través del material. La metodología por emisión acústica se basa en la detección de daños, como lo son los cambios en

las propiedades del material debido a la deformación y agrietamiento. Los sensores AE son transductores que convierten las ondas mecánicas emitidas por un elemento en señales eléctricas; Así, se obtiene información sobre la existencia y localización de posibles fuentes de daños. La monitorización de la emisión acústica (AE) es un método reconocido de ensayos no destructivos comúnmente utilizado para detectar y localizar fallas en sistemas estructurales. (Parks, Papulak, & Pantelides, 2016).

2.2.13. Sensores PVDT.

Estos sensores de fluoruro de polivinilideno (PVDF) pueden realizar un monitoreo de la superficie con alta sensibilidad y respuesta rápida. Debido a su buena compatibilidad con el material de sustrato, poca influencia en las propiedades estructurales y la capacidad anti-interferencia, los sensores PVDF presentan excelentes propiedades en la deformación, aceleración, fuerza. Por lo tanto, los sensores de tráfico PVDF son muy adecuados para el sistema de pesaje. El sistema produce una señal de impulsos mientras las ruedas delanteras de un vehículo pasan a través del sensor, y otra señal de impulso aparece cuando las ruedas traseras están a través del sensor, por lo que la presión de los vehículos sobre el pavimento se puede calcular de acuerdo con estas señales de detección.

Dado que el número de ruedas de cada vehículo puede ser diferente y cada grupo de ruedas generará un impulso a través del sensor, es difícil confirmar si los datos recogidos pertenecen a un vehículo o no. Con el fin de confirmar con precisión el tipo de vehículo, se usan unas bobinas, cuando el vehículo cruza la primera bobina, el sistema comienza a recoger los datos del sensor de

tráfico y la adquisición finaliza cuando el vehículo sale de la segunda bobina. De esta manera, el peso del vehículo se puede dibujar con precisión procesando los datos de detección. Además, la velocidad y el número de ruedas se pueden calcular en el diseño (Yu, Zhao, Shi, & Ou, 2013).

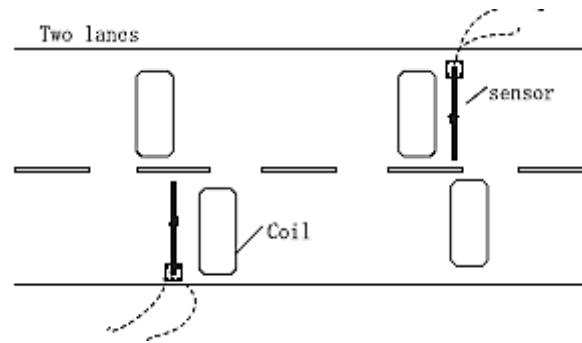


Figura 17. Ubicación de los sensores y bobinas para detectar el paso del vehículo, en un puente.

Adaptado de elsevier.com (Design of a real-time overload monitoring system for bridges and roads based on structural response. p. 3)

2.3. Sistemas de instrumentación para monitorear las cargas móviles

Desde 1974 se han implementado sistemas de instrumentación para monitorear las cargas móviles, iniciando con el sistema dinámico de pesaje que se utilizó por primera vez para la medición de las cargas del vehículo en EE.UU. En el mismo año, los investigadores franceses inventaron un sistema de pesaje dinámico piezoeléctrico, nombrado, Vibracoax. En 1988, un nuevo tipo de sensor piezoeléctrico " Vibetek2.0 " fue diseñado para detectar la carga y su rendimiento demostró ser mucho mejor que Vibracoax. En 2000, el sistema de sensores piezoeléctricos, desarrollado por MSI, fue expuesto en la reunión anual ITS. El sistema puede medir la velocidad de movimiento, el número de ejes, la distancia entre ejes, la clasificación del vehículo y el pesaje dinámico, pero este sistema tiene la desventaja del alto costo.

Yan Yu , Yan Shi Xuefeng Zhao, Jinping Ou, desarrollaron una alternativa para el monitoreo de la sobrecarga en tiempo real para puentes y vías, basado en la respuesta estructural. El sistema está compuesto por sensores frontales, un circuito amplificador, un circuito de conversión A / D, una unidad central de procesamiento (CPU), un circuito de comunicación y un sistema de alarma.

Cuando el vehículo entra en el área de la red del sensor, se envían señales analógicas de detección, después de la amplificación y la reducción del ruido, las señales serán convertidas por la unidad A / D en señales digitales. Estos datos digitales se distinguen por la CPU, y luego se obtiene la carga dinámica del vehículo. La alarma será dada si el pavimento está sobrecargado, y la información del vehículo será enviada y almacenada en un centro de datos para utilizar un algoritmo de discriminación del sistema estructural de vigilancia de la salud para hacer más análisis. (Yu, Zhao, Shi, & Ou, 2013)

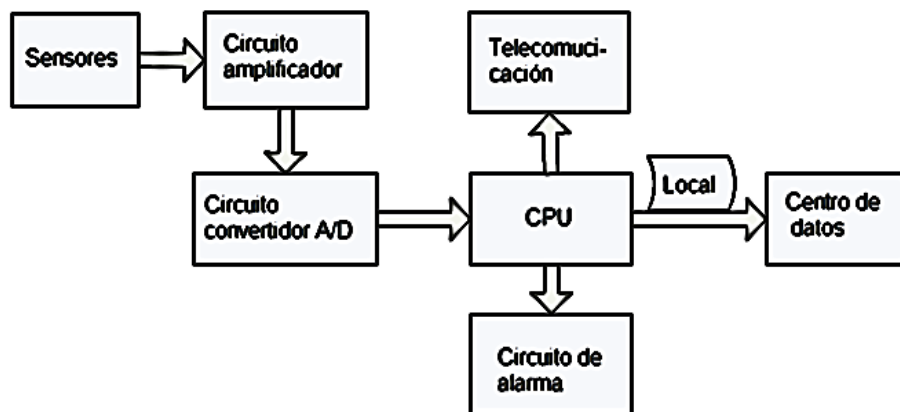


Figura 18. Esquema del sistema de instrumentación para el monitoreo del puente. Adaptado de elsevier.com (Design of a real-time overload monitoring system for bridges and roads based on structural response. p. 2)

2.4. Sistema de instrumentación para monitorear la corrosión

Existe un equipo remoto de monitoreo de la corrosión basado en el estándar de la ASTM C876-09; el diseño permite adaptar la técnica de medida de potenciales de media celda en una variación in situ, con la cual es posible evitar el desplazamiento de personal y equipo de medida cada vez que se requiera conocer el estado corrosivo de la estructura en algún lugar, con esto se reduce el costo para el proyecto y la protección de los refuerzos embebidos.

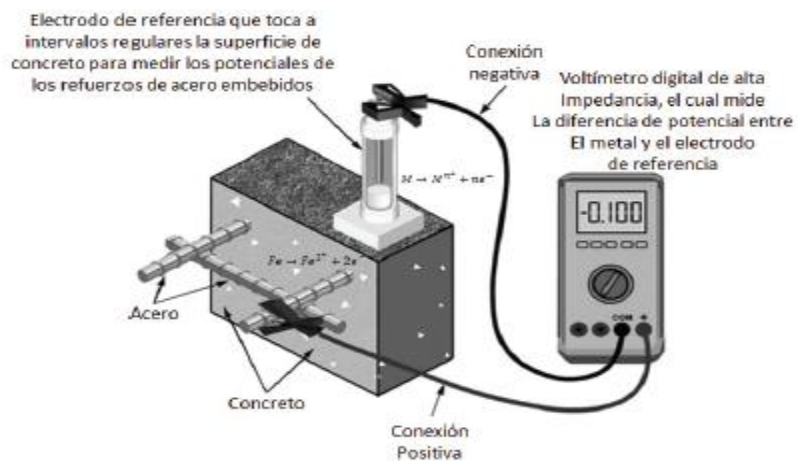


Figura 19. Sistema de instrumentación para monitorear la corrosión en el refuerzo del concreto de la estructura. Adaptado de Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 4), octubre-diciembre 2015: 565-572 (Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. p. 4)

Se adicionó posteriormente un módulo GSM/GPRS M95 (Global System for Mobile communications/General Packet Radio Service) que permite usar la red celular insertando una SIM CARD, para que le asigne al equipo un único número de celular capaz de recibir y enviar mensajes de texto, herramienta con la que se realiza el comando del equipo de forma remota. El sistema desarrollado posee una gran versatilidad en cuanto a su lugar de ubicación, ya que el uso de la red

celular que dispone (GSM), le habilita para comandar de forma remota independiente de la distancia desde donde se encuentre el centro de control. (Roa Rodriguez, Delgado Tobón, & Aperador Chaparro, 2015)

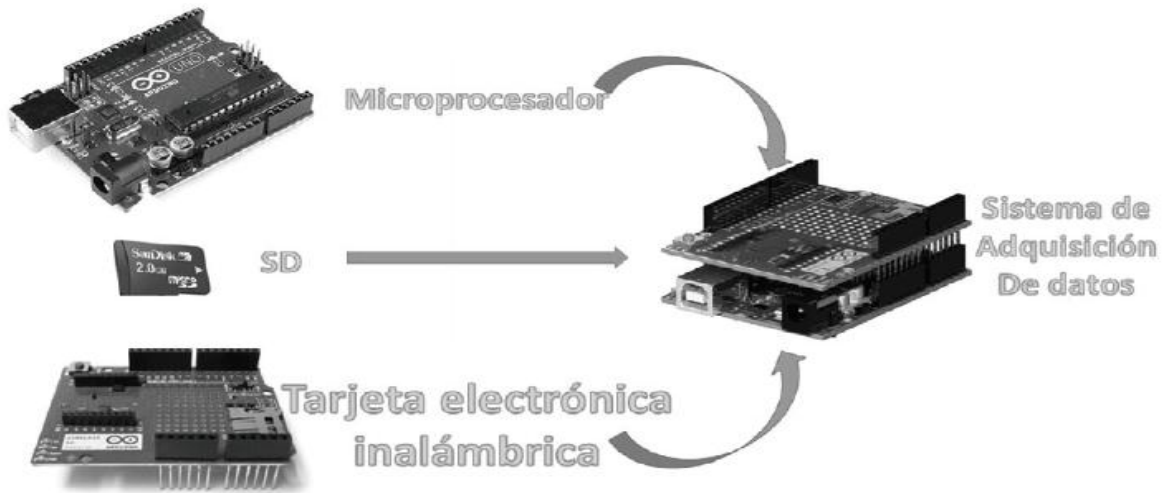


Figura 20. Sistema de adquisición de datos por medio de SIMCARD. Adaptado de Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 4), octubre-diciembre 2015: 565-572 (Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. p. 5).

2.5. Técnicas de impacto

Existen metodologías para el monitoreo de la salud estructural con sistemas no destructivos, una de estas es la técnica “Impulse-Response” Impulso- Respuesta que ha sido desarrollada por Allen Davis a finales del siglo XX. Se utiliza un impacto de baja deformación, producido por un martillo con punta de goma instrumentada, para enviar ondas de tensión a través del elemento ensayado.

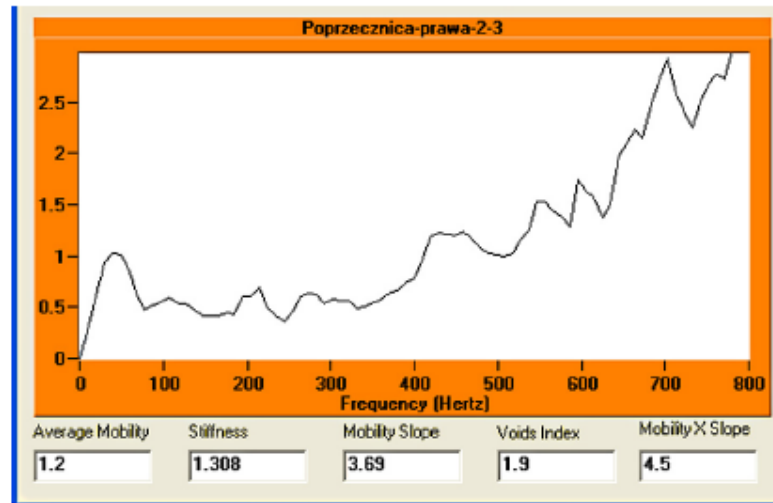


Figura 21. Impulso de respuesta obtenida de la losa de un puente con vacíos. Adaptado de sciencedirect.com (Modern NDT Systems for Structural Integrity Examination of Concrete Bridge Structures. p. 3)

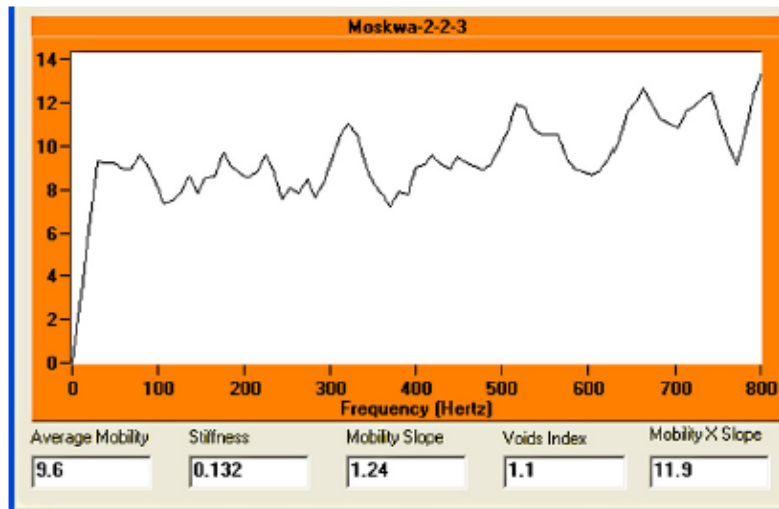


Figura 22. Impulso de respuesta obtenida de una losa de un puente sin vacíos. Adaptado de sciencedirect.com (Modern NDT Systems for Structural Integrity Examination of Concrete Bridge Structures. p. 3).

El impacto hace que el elemento vibre en un modo de flexión y un transductor de velocidad (geófono), colocado adyacente al punto de impacto, y mide la amplitud de la respuesta. La célula de carga del martillo y el transductor de velocidad están conectados a un ordenador de campo portátil con software de respuesta de impulso para la adquisición de datos, procesamiento y almacenamiento de señales.

Otra técnica es el método “Impact-Echo” Impacto- Eco, se basa en el control de la llegada de las ondas de tensión reflejadas y, por lo tanto, es capaz de obtener información sobre la profundidad de la interfaz reflectora interna. La principal aplicación que estimuló el desarrollo de esta técnica fue la necesidad de identificar la presencia y profundidad de las anomalías en estructuras de hormigón que son accesibles sólo desde un lado. Con esto se puede estudiar la posibilidad de medir el espesor de las placas sólidas, como pavimentos, revestimientos de asfalto, placas sobre suelo y paredes.

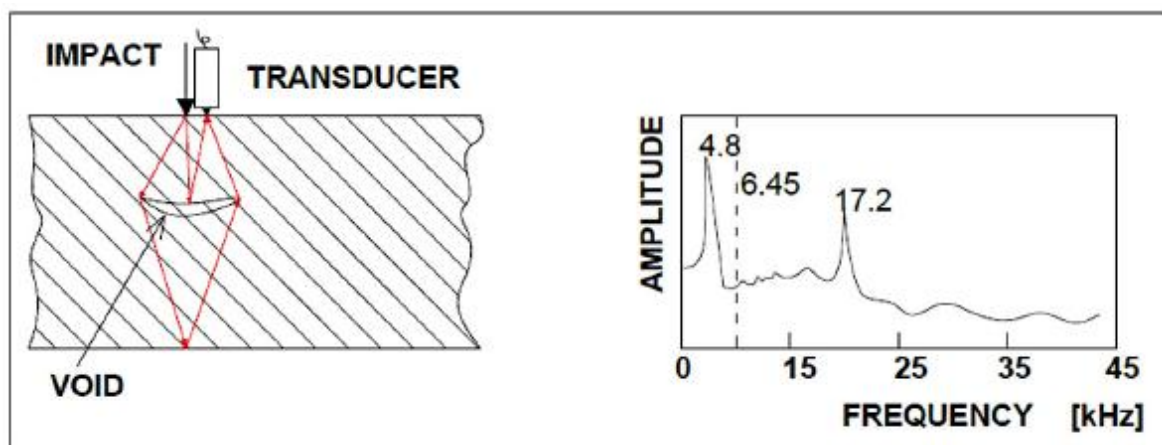


Figura 23. Resultado de la prueba Impact- Echo. Adaptado de sciencedirect.com (Modern NDT Systems for Structural Integrity Examination of Concrete Bridge Structures. p. 4)

La combinación de los sistemas de prueba "Impact-Echo" y "Impulse Response" parece ser el concepto más prometedor para las pruebas de integridad estructural de estructuras de hormigón. El método de "impacto- respuesta" es principalmente útil para un determinar rápida y tentativamente las áreas locales de una estructura con posibles defectos, mientras que la técnica de "impacto-eco" tiene que ser más utilizada para la investigación detallada donde se hayan encontrado defectos internos en la estructura del puente. Se ha confirmado que este método podría utilizarse también para la evaluación de la calidad de la inyección de lechada en los conductos de cables de tensión posterior. Naturalmente, se recomienda la inspección final invasiva con núcleos perforados.

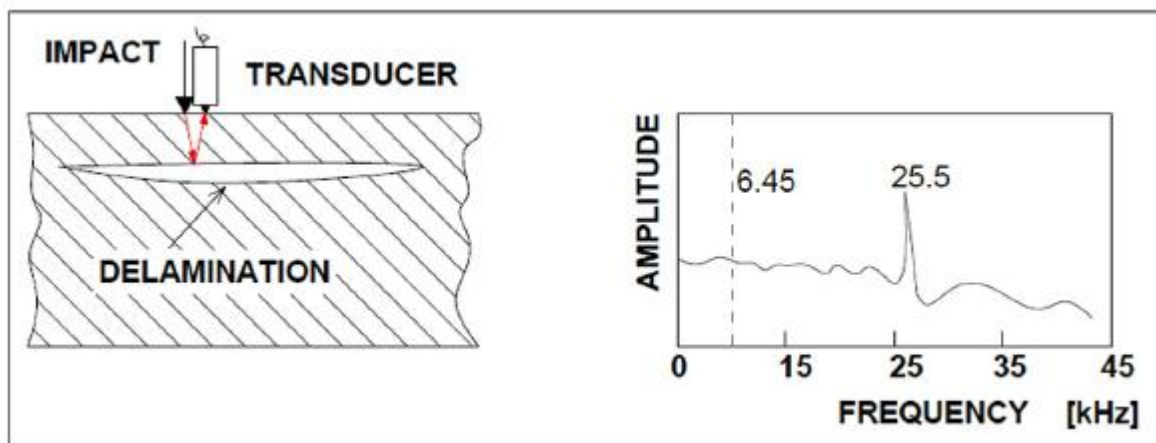


Figura 24. Resultado de la prueba eco-impacto cuando se presentan vacíos. Adaptado de sciencedirect.com scp (Modern NDT Systems for Structural Integrity Examination of Concrete Bridge Structures. p. 4)

En el puente localizado cerca de la aldea de Wizna sobre el río Narew, se probó la capacidad del método de "impacto-eco" para localizar correctamente huecos en los conductos de los cables del postensado. (Andrzej & Martaa, 2014)

3. Método de aplicación de la línea base

A mediados de la década de los 90's, el Instituto Mexicano del Transporte, desarrolló un sistema de administración de puentes (SIAP) que incluía la evaluación estructural a partir de pruebas dinámicas, y una base de datos más completa que comprendía los datos de diseño, especificaciones, planos, historiales de inspección y mantenimiento, y archivos fotográficos. El concepto básico, parte del principio de que el inicio para éste es la alimentación de la información de campo proveniente de las inspecciones de los puentes. Posteriormente, el proceso se ejecuta de tal forma que la salida sea programas de inspección; programas de obra; y proyectos de diseño y especificación para mantenimiento. Se proponen tres tipos de inspección, como se muestra en la fig.25.

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 la corrosión	Capacidad estructural, y vida residual o vida útil
Especial	Según se requiera	Evaluación estructural, capacidad de carga, y vida útil

Figura 25. Niveles de inspección en los puentes. Adaptado de Publicación Técnica No 302, Qro 2006. Secretaria de comunicaciones y transportes Instituto Mexicano del Transporte.

(Metodologías de inspección no destructiva aplicables a sistemas de gestión de puentes. p.34)

Este sistema propone que se correlacionen los índices de la condición estructural obtenida de las inspecciones generales con información ambiental, de mantenimiento, y el historial de inspecciones. Si un puente se clasifica como no aceptable, la inspección detallada será necesaria; pero en casos particulares se podrá requerir algún tipo de inspección especial para abordar algún problema en especial. Las inspecciones detalladas incluyen pruebas dinámicas, estáticas y semi-estáticas con pruebas de carga. Para estas pruebas se está desarrollando un laboratorio móvil con el propósito de acomodar la instrumentación necesaria para las inspecciones; y utilizar un dispositivo de impacto para controlar las pruebas dinámicas. Las respuestas dinámicas podrán obtenerse de acelerómetros o transductores de deformación de fibra óptica con rasurado de Braga (FBG); y al menos, los dos primeros modos de vibrar están siendo considerados para la evaluación estructural. Respecto a las pruebas de carga estática y semi-estática se utilizará un camión de peso conocido; y los extensómetros, para medir las deformaciones del tablero del puente. El potencial eléctrico, y la resistividad del concreto se medirán para evaluar el daño por corrosión en el acero de refuerzo. (Carrión Viramontes, Quintana Rodriguez, López López, Balankin, & Samayoa Ochoa, 2006)

4. Variables de control para monitorear el daño

Los puentes pueden fallar por la operación durante su vida útil, es decir, por las cargas aplicadas durante un largo periodo de tiempo, o sobrecargas a la cual fue expuesto, y por las condiciones de diseño. Estas variables deben ser monitoreadas para asegurar la salud estructural.

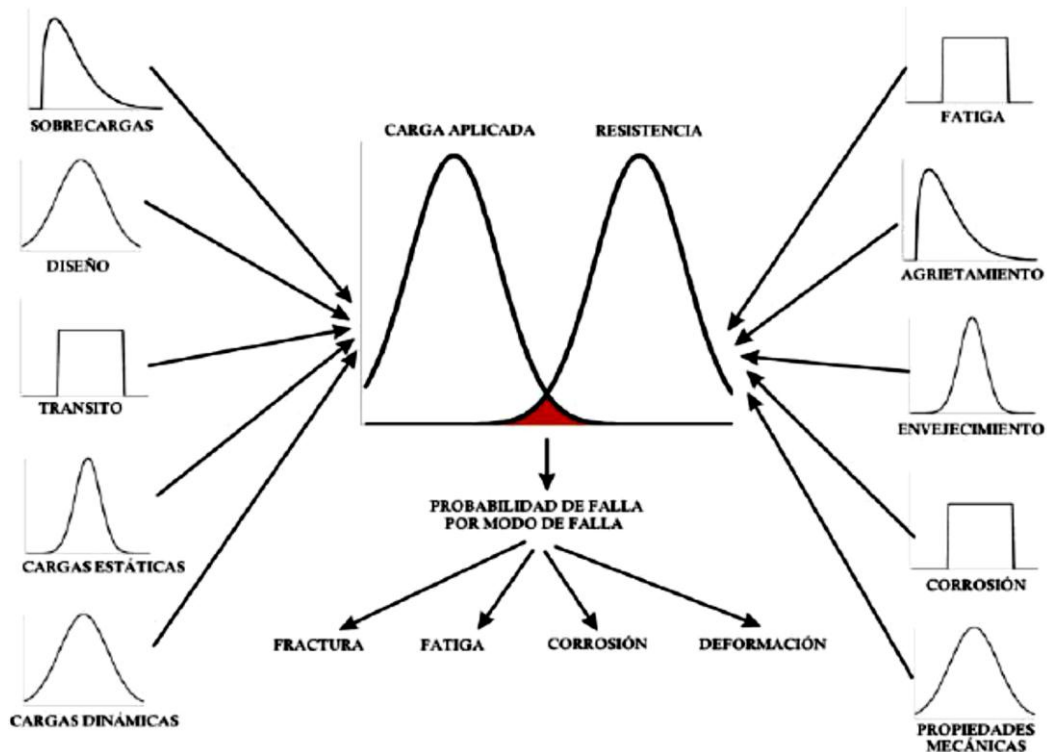


Figura 26. Variables con mayor probabilidad de ocasionar la falla en un puente. Adaptado de Publicación Técnica No 302, Qro 2006. Secretaria de comunicaciones y transportes Instituto Mexicano del Transporte. (Metodologías de inspección no destructiva aplicables a sistemas de gestión de puentes. p. 28)

Muchas estructuras están equipadas con matrices de sensores para la monitorización de las vibraciones ambientales, la deformación y desplazamiento, aperturas de fisuras y adicionalmente se incluye las cargas de tráfico como fuente de excitación dinámica con la ayuda de imágenes de video. Al detectar defectos como grietas en elementos estructurales de puentes, es aconsejable instalar los sensores de movimiento para supervisar su actividad de crecimiento.

La instalación de varios sensores permitirá el monitoreo de varios puentes en la región. Así, es posible monitorear las fallas desde la oficina de la y en el caso de una actividad de crecimiento

intensivo, bloquear el tráfico en el puente y tomar medidas intensivas para prevenir accidentes. Otra forma de aplicar el sistema de control de estado de grietas, es su uso en pruebas de campo. Después de instalar el sensor en la fisura de una viga de un puente de concreto o en una pila, se toman lecturas cero. Entonces el puente se carga con un peso conocido, por ejemplo, un vehículo de liviano, y se vuelven a tomar las lecturas del sensor; Entonces, se coloca un camión de masa conocida y se vuelven a tomar las lecturas. En una tercera prueba, se pueden colocar ambos vehículos en el puente y determinar la abertura de grieta bajo esta carga.

La corrosión de los refuerzos del concreto, es muy común y esto causa un deterioro prematuro de las estructuras como puentes. En la mayoría de las estructuras el refuerzo provee la seguridad estática de la construcción y por ende se debe tener la información acerca de su estado. Con este fin se han desarrollado métodos de evaluación no destructivos para verificar el nivel de corrosión en la estructura, pero dichos sistemas deben operarse en el sitio donde se lleva a cabo el estudio por un usuario, lo que aumenta costos por el desplazamiento de equipo y personal (Roa Rodriguez, Delgado Tobón, & Aperador Chaparro, 2015).

Tabla 1. Potencial de corrosión según norma ASTM C876 (1991)

<u>Voltaje medido vs Electrodo de Cobre/ Sulfato de Cobre (V)</u>	<u>Probabilidad de corrosión</u>
> - 0.2V	10% o menos
- 0.2V a - 0.35	región de incertidumbre
< - 0.35	90% o más

Figura 27. Potencial de corrosión según norma ASTM C876. Adaptado de Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 4), octubre-diciembre 2015: 565-572 (Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. p. 4)

Monitorear las cargas a la que se ve expuesto un puente y su respuesta en tiempo real, es otra de las variables que se puede controlar, para poder evaluar el desempeño operacional bajo diversas cargas de servicio, y así verificar o actualizar reglas de diseño y suposiciones, detectar daños o deterioro y guiar su trabajo de mantenimiento o reparación. El tráfico pesado es uno de los factores que más afectan la salud de los puentes, desde 1950, se han estudiado sistemas dinámicos de pesaje de vehículos en Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea y Japón.

Las mediciones de impacto-eco son exámenes no destructivos a las estructuras como puentes, para determinar si existen huecos en los conductos de tendón en vigas de concreto postensadas. Los resultados de las pruebas no destructivas se confirmaron mediante sondaje invasivo, los conductos se abren físicamente y se inspeccionan visualmente (Andrzejka & Martaa, 2014)

Feng Xiaodan (Xiaodan, 2017), explica que se tienen dos valores de análisis, los datos históricos de monitoreo y datos de la adquisición que es la visualización de datos en tiempo real. El análisis de datos históricos muestra que los datos históricos de monitoreo se almacenarán en un análisis de curva de la manera de ser utilizado Para la observación, y al mismo tiempo calcular el valor del valor como referencia para determinar si el puente está sano. La adquisición y el análisis de datos en tiempo real demuestran que es una visualización instantánea de la adquisición de datos del sensor, y el usuario puede entender el estado de funcionamiento del sensor. Puente función de evaluación de seguridad es la parte central del sistema de monitoreo puente a través del análisis integral de datos históricos y otra información de monitoreo para determinar la presencia de riesgos de seguridad de puente, el usuario de acuerdo a los resultados de la evaluación del análisis para tomar medidas para tratar adecuadamente Con, para resolver los peligros ocultos en antes. Este

módulo es el resultado del análisis de seguridad a través del modelo tridimensional de deformación y el análisis gráfico bidimensional muestra que. En el sistema de monitoreo de puente, cada módulo es relativamente independiente, pero también tiene un intercambio de datos e información cercano.

Las respuestas térmicas ambientales producidas por la radiación solar y el intercambio de calor entre el entorno y la estructura causan cambios de temperatura en cada parte del puente. La diferencia de temperatura entre varias partes provoca respuestas térmicas ambientales del puente, que incluyen deformación inducida térmicamente, tensión y variación de las reacciones en los soportes. Un puente puede estar equipado con muchos sensores para monitorear continuamente y simultáneamente temperaturas, tensiones y deflexiones en varios lugares. Las deformaciones de hormigón se miden mediante medidores de tensión de resistencia eléctrica (ERSG) y las deflexiones se miden, mediante sensores de desplazamiento. (Kulprapha & Warnitchai, 2012)

5. Experiencias nacionales en monitoreo de puentes

5.1. Viaducto Cesar Gaviria Trujillo

Para el Viaducto Cesar Gaviria Trujillo en Pereira, se desarrolló un estudio de vulnerabilidad sísmica y de capacidad de carga, empleando sistemas de instrumentación, esto se llevó a cabo a través de un convenio entre el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), la Pontificia Universidad

Javeriana, y la empresa de ingeniería ICAGEL quien tuvo la responsabilidad de su diagnóstico, mantenimiento y rehabilitación, según los datos obtenidos. Para dicho trabajo se realizaron los siguientes ensayos: ensayos geofísicos, ensayos de las propiedades mecánicas de materiales, vibraciones ambientales, medición de los efectos de las cargas vehiculares, instrumentación inalámbrica, pruebas de carga, medición de tensiones de tirantes, etc. (Muñoz, Nuñez, Rodríguez, Ramos, & Otálora, 2010) Para la realización de los ensayos de las propiedades mecánicas de los materiales se extrajeron núcleos y se hicieron los ensayos para evaluar la resistencia del acero y del concreto. El estudio de amenaza sísmica, necesario para conocer los efectos locales en la ubicación del viaducto, se llevó a cabo con valores probabilísticos de la amenaza sísmica, que permitieran evaluar los espectros de amenaza uniforme de aceleraciones velocidad o desplazamientos, y para la realización de estudios de respuesta local es necesario contar con acelerogramas representativos de la amenaza sísmica. Se desarrollaron dos modelos estructurales empleado el programa SAP-2008, el modelo estructural No 1 fue utilizado para la construcción de la línea de tiempo de la construcción del viaducto, y el modelo estructural No 2 permitió una respuesta estructural más ajustada a efectos locales en los pilotes. La medición de las cargas vehiculares se realizó con la ayuda de ocho volquetas debidamente pesadas y cuatro hipótesis de carga, antes de la colocación de las ocho volquetas, se registró una medición topográfica de las condiciones vacías del puente para comparar las cotas cero de referencia cuando se abrió el puente a su operación normal en el año 1998, con el punto cero actual (2008). Una vez determinada la cota cero de referencia para la prueba de carga, se registraron deformaciones para los cuatro casos de carga, las cuales se compararon con las obtenidas en el modelo estructural No 1.

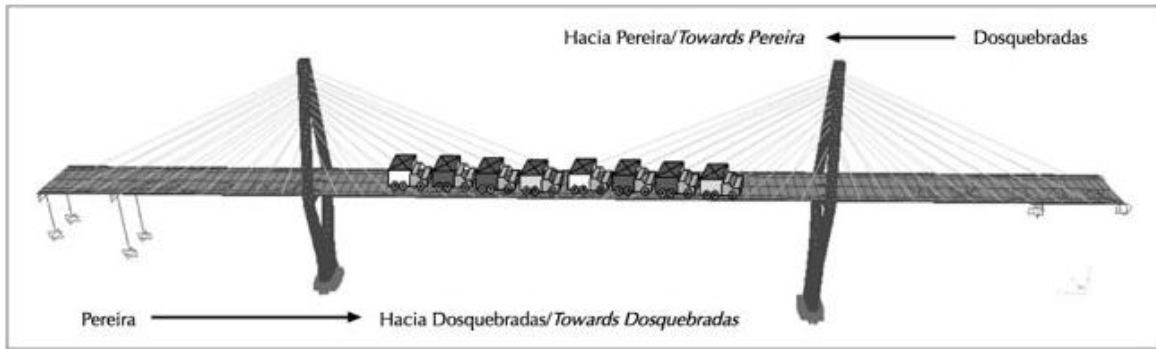


Figura 28. Simulación de las posiciones de las volquetas para prueba de carga viva, en el puente Cesar Gaviria Trujillo. Adaptado de Revista Ingeniería de Construcción Vol. 25 N°2, Agosto de 2010 (Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural. p. 14)

El estudio de vibraciones ambientales, que se realiza con el objetivo de conocer los periodos y frecuencias predominantes de la estructura del puente, requirió la instrumentación de la estructura del puente, mediante tres acelerómetros con sus respectivos amplificadores y una tarjeta de adquisición de datos, que transmite las señales de los acelerómetros a un computador, tomando datos a tiempo real y almacenándolos en registros de archivos de texto. Los sensores utilizados fueron los Wilcoxon que tienen la capacidad de tomar 200 datos por segundos y un rango de frecuencia de interés entre 0 a 20 Hz. La instrumentación inalámbrica para hacer seguimiento de los efectos de la carga viva de los cinco elementos principales del puente, se hizo por medio dos transductores (Strain Gauge), la medición obtenida de los dos transductores, es procesada en el nodo sensor para obtener deformaciones unitarias que después de convierten en esfuerzos.

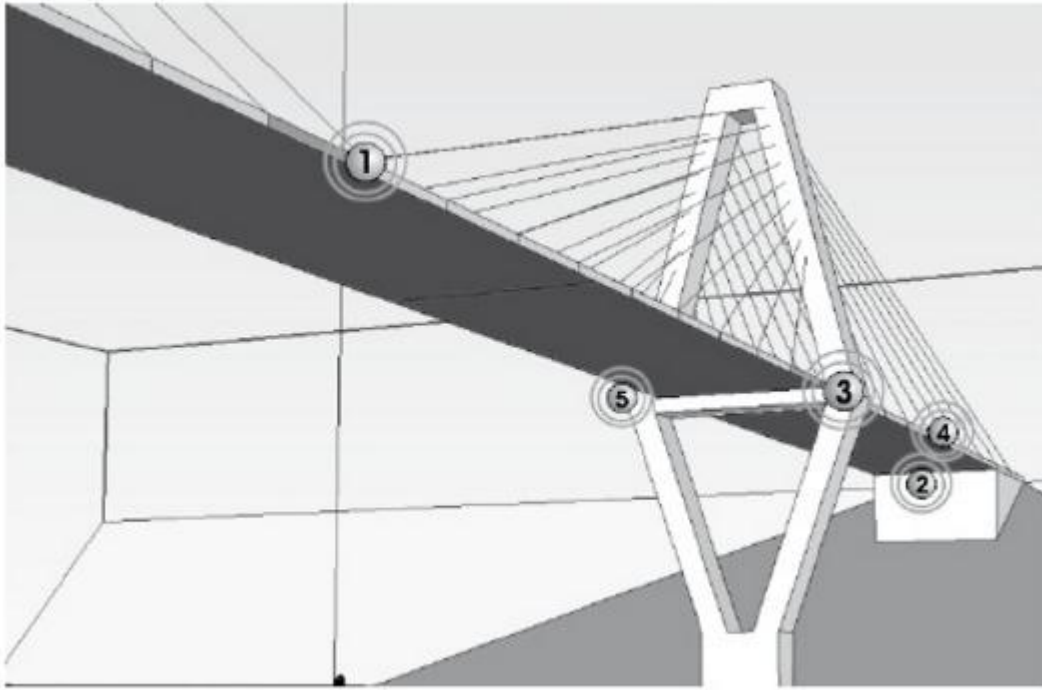
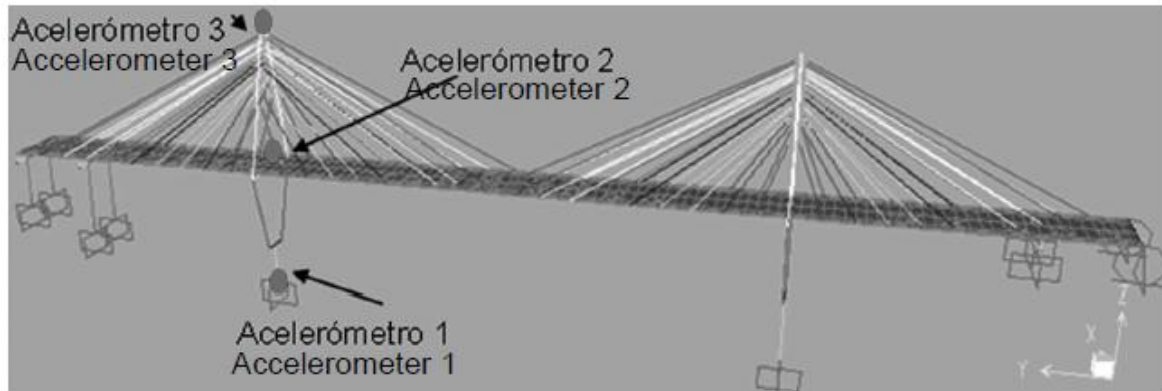
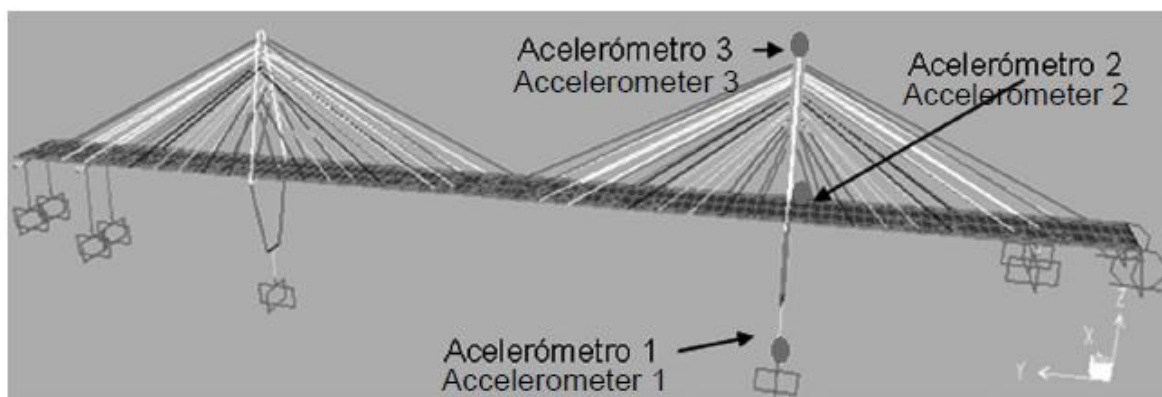


Figura 29. Localización de los elementos que fueron monitoreados, en el puente Cesar Gaviria Trujillo. Adaptado de Revista Ingeniería de Construcción Vol. 25 N°2, Agosto de 2010 (Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural. p. 24)

Con este de evaluación de la vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga mediante confiabilidad estructural apoyados en monitoreo e instrumentación de este puente se concluye, se pudo corroborar que la viga de arranque del pilote de Dosquebradas, tiene una probabilidad de falla mayor a la estipulada por las normas Europeas (Muñoz, Nuñez, Rodríguez, Ramos, & Otálora, 2010)



Configuración 1/Configuration 1



Configuración 2/Configuration 2

Figura 30. Ubicación de los acelerómetros en el puente Cesar Gaviria Trujillo. Adaptado de Revista Ingeniería de Construcción Vol. 25 N°2, Agosto de 2010 (Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural. p.18)

5.2. Puente el Hormiguero

La Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle desarrolló un proyecto de monitoreo de la salud estructural a distancia y en tiempo real en el puente "El Hormiguero" localizado en la vía Cali-Puerto Tejada, sobre el río Cauca. En el puente se instalaron un acelerómetro sísmico uniaxial WR-731A, un amplificador/filtro WR-P31 y un transmisor de radio

FM Monitron TT-2. La identificación de daños y monitoreo de salud estructural se realizó basado en cambios en las frecuencias naturales y modos de vibración del puente, y mediante comparaciones con un modelo analítico. El modelo analítico fue desarrollado con el programa de análisis estructural por elementos finitos SAP2000® y se calibró con respecto a las formas modales y los períodos de vibración obtenidos de mediciones in situ. Las mediciones obtenidas indican que el pico vertical de aceleraciones del tablero asciende hasta $0.2 \times g$ bajo cargas de tráfico y registran desplazamientos de más de 0.5 centímetros, lo que quiere decir que el puente tiene problemas de vibración que deben ser investigados con más detalle. (Marulanda & Thomson, 2000).

6. Caracterización de puentes en Bucaramanga para obtener una línea base

En el departamento de Santander se han realizado ensayos por medio de sistemas de instrumentación para la caracterización dinámica de puentes.

6.1. Viaducto la Unión

En el Viaducto la Unión ubicado en la ciudad de Bucaramanga, el Grupo de investigación en Nuevos Materiales y Estructuras (INME) adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander (UIS) decidió estudiar el comportamiento dinámico durante etapa de construcción del Viaducto, con el objetivo de crear una línea base con el modelo numérico calibrado, que sirva como referencia para el monitoreo de la salud estructural. Los equipos

utilizados para la obtención de las señales de vibración fueron tres acelerógrafos de alta sensibilidad Obsidian de Kinematics®, cada uno con un sensor triaxial interno de fuerza balanceada, los receptores de las señales se sincronizan vía GPS (Kinematics Inc®, 2016), y para la verificación de la correcta toma de datos se utilizó el software proporcionado por Kinematics® a través de una Laptop. La ubicación de los tres sensores triaxiales fue sobre la superficie del tablero tanto en sentido longitudinal como transversal, para el primer caso se colocaron en borde libre del voladizo a partir del carro de avance, centro del voladizo libre y centro de pila, y para el segundo caso, en los tabiques externos evitando formas locales de vibración (Viviescas, Hernández, & Luna, 2017).

6.2. Puente Gómez Ortiz

El puente Gómez Ortiz está ubicado en la vía que comunica Girón y Zapatoca, es una estructura que por su poco tiempo de construcción cuenta con la información requerida para establecer una línea base, como son los planos, resultados de las pruebas de carga, características de los materiales, etc. En el puente se realizaron ensayos de vibración ambiental para caracterizar las propiedades dinámicas de este, ya que, al estar localizado en zona de alta sismicidad, esta es una de las variables más importantes a controlar. La caracterización se desarrolló con un modelo numérico tridimensional y pruebas de vibración ambiental, con una configuración de sensores que se determinó a partir del modelo numérico y sus análisis de las formas modales.

Se utilizaron tres equipos de adquisición de datos Obsidian cada uno con un sensor triaxial interno de fuerza balanceada del fabricante Kinematics, receptores GPS + cable de antena. Los

tres sensores triaxiales se colocaron sobre la superficie superior de la estructura y se tomaron registros de aceleración de un total de 104 puntos (Viviescas & Vargas, 2017), como se observa en la fig. 32

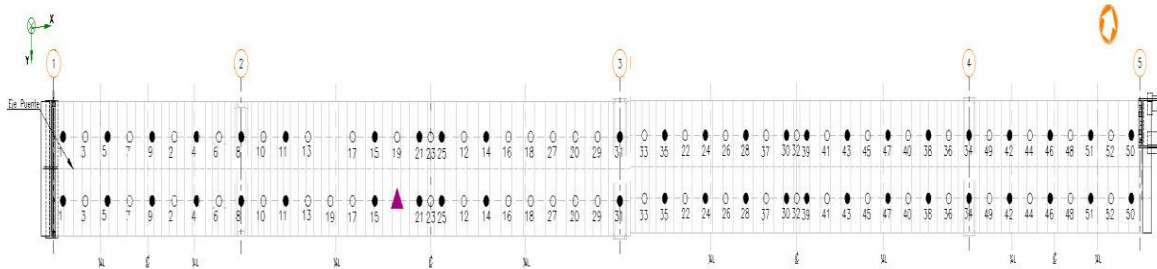


Figura 31. Ubicación de los sensores, en el puente Gómez Ortiz. Adaptado de memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, (Caracterización dinámica de puentes viga cajón en concreto de grandes luces a partir de pruebas de vibración ambiental. p. 3)

7. Ensayos utilizados para determinar las variables de control

Los ensayos de vibración ambiental y vibración forzada que se hacen por medio de sistemas de instrumentación operados remotamente con un procesamiento de datos in situ son los que permiten obtener las variables de control para comprobar la salud de las estructuras. En México se han realizado dichas pruebas en los cables de los puentes atirantados de Tampico y Coatzacoalcos II, las pruebas de vibración ambiental se lograron con ocho servoacelerómetros que se fijaron en sendos cables, cuidando que el tránsito vehicular fuera reducido, con vehículos ligeros menores de 15 ton y con velocidades de viento inferiores a 5 m/s. Para las pruebas de vibración forzada en el puente Tampico se amarró una cuerda al cable y se tiró rítmicamente de ella hasta lograr que el

cable vibrara en su frecuencia fundamental; para soltar la cuerda y que este vibrara libremente. En el puente Coatzacoalcos II se implementó un dispositivo mecánico para realizar pruebas de tracción a fin de producir vibraciones de mayor amplitud que las logradas en el puente (Muriá Vila, Huerta Carpizo, Gómez Martínez, & Sánchez Ramírez, 2004). La medición de las microvibraciones ambientales que se realizan por medio de los ensayos de vibración de vibración ambiental permiten determinar las características de dinámica de la estructura, como es el caso del puente Marga-Marga en Chile, donde se determinaron las frecuencias y las formas de los primeros modos, mediante un sistema portátil de adquisición de datos, el cual consiste en sensores de movimiento, un equipo de grabación de datos y un computador, estos resultados de periodos experimentales se comparan con el modelo teórico (Segovia, Boroschek, Moroni, & Sarrazin, 1997), que es lo que se realiza en todos los casos para determinar las características del puente y así poder concluir en qué estado se encuentra.

8. Consideraciones para el correcto monitoreo de puentes

El objetivo del monitoreo estructural en puentes es conocer el estado de la estructura usando datos instrumentales, suponiendo si no se tiene, el estado anterior de este, para así comparar los datos arrojados con un modelo y obtener resultados con un nivel de confianza adecuado de la salud estructural, a través de sensores (Zonta, Cappello, Pozzi, & Glisic, 2014). El proceso de diseño para el monitoreo de la salud estructural incluye:

- Definir las condiciones del proyecto.

- Predecir los mecanismos que controlan el comportamiento.
- Definir las preguntas geotécnicas que deben ser contestadas
Definir los objetivos de la instrumentación
- Seleccionar los parámetros a monitorear
- Predecir las magnitudes de los cambios
- Definir las acciones correctivas
- Asignar las tareas en el diseño, construcción y fases de operación.
- Seleccionar la instrumentación
- Seleccionar la localización de los sistemas de instrumentación
- Planificar el registro de los factores que pueden influir en las medidas con los instrumentos
- Establecer procedimientos para asegurar lecturas correctas.
- Enumerar los objetivos de cada instrumento
- Preparar el presupuesto
- Escribir especificaciones de los instrumentos
- Plan de instalación
- Plan de calibración y mantenimiento
- Plan de recolección, procesamiento, presentación, interpretación, reporte e implementación de los datos
- Escribir el documento contractual

Tabla 2.

Equivalencia entre diseño estructural y diseño del sistema de monitoreo.

	Diseño estructural	Diseño del sistema de monitoreo
Objetivo	Estabilidad estructural con seguridad apropiada	Conocimiento del estado de la estructura.
Objetivo de diseño	Cargas	Conocimiento con exactitud el estado de carga
Demanda	Reacciones	Medición exacta de la demanda
Modelo	Relación entre las reacciones y las cargas	Relación entre el estado de los parámetros y las mediciones
Capacidad	Resistencia	Sensor de medición
Estado limite	Reacción VS Resistencia.	Medición de la demanda VS el sensor
Interpretación métrica	Probabilidad de falla	Probabilidad de medición errónea.

Adaptado de EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Jul 2014, Nantes, France. 2014, p. 3

En la figura anterior se muestra la diferencia de las metodologías para el diseño estructural y el monitoreo estructural, el proceso del diseño incluye: definición de cargas, cálculo de esfuerzos utilizando un modelo estructural y elección de una solución que tenga la capacidad requerida para soportar las fuerzas. Mientras que el monitoreo se evalúa mediante los datos obtenidos con probabilidad de colapso (Zonta, Cappello, Pozzi, & Glisic, 2014).

Para muchos ingenieros civiles este tema (sistemas de instrumentación para el monitoreo de la salud estructural en puentes) es poco conocido, y más aún porque en Colombia no contamos con ningún puente instrumentado permanente como consecuencia de la alta inseguridad en nuestro país y el elevado costo de la instrumentación; por consiguiente, ningún constructor toma la decisión de supervisar, conocer y analizar los cambios y las respuestas dinámicas presentadas en la estructura. La condición ideal sería poder detectar las inconsistencias entre la etapa del diseño y la etapa de la construcción y/o determinar el estado de la estructura después de cualquier evento natural extremo, para así poder hacer un análisis costo-beneficio, donde se obtendrán resultados favorables tanto para la población como para el presupuesto de la nación.

9. Conclusiones

- El monitoreo de la salud estructural se puede definir como la detección in situ de características estructurales por medio del uso de equipos no destructivos que permiten obtener la respuesta de la estructura ante cualquier efecto. El sistema de monitoreo de la salud estructural no solo puede detectar oportunamente los daños en las estructuras y evaluar su seguridad, sino también predecir los cambios en lo que resta de su vida de servicio para tomar decisiones en su mantenimiento. En los últimos años este campo de investigación ha sido fuente de estudio, sin embargo, los sistemas de monitoreo de la salud estructural son costosos y solo pueden aplicarse en proyectos de gran escala

- En el monitoreo de la salud estructural se tiene una amplia gama de herramientas y técnicas para la evaluación de las estructuras. Las diferentes técnicas de análisis tienen requisitos específicos: por ejemplo, la identificación estructural requiere una medición precisa y sincronizada de la respuesta dinámica de diferentes puntos de la estructura, mientras que el análisis de los fenómenos de variación lenta, por ejemplo, el análisis de la evolución de las fracturas de concreto, requiere un muestreo de muy baja frecuencia durante largos períodos. El requisito específico de aplicación puede influir significativamente en el diseño de los aparatos de medición.
- Entre las principales variables para el monitoreo de la salud estructural, se tiene: medir las acciones que influyen en el comportamiento en servicio, como acciones ambientales, temperatura y humedad; y las acciones reológicas intrínsecas del hormigón, la fluencia y la retracción que caracteriza el hormigón utilizado en el puente; las propiedades mecánicas de los materiales: resistencia a tracción, compresión y módulo de elasticidad. También medir el comportamiento del puente, deformaciones en distintos elementos estructurales, pilas y tablero, desplazamientos del puente, en estribos, y temperatura dentro del hormigón, de forma periódica a lo largo del tiempo.
- Para tener la fiabilidad de buen monitoreo se requiere de una línea base, que se puede decir que es un patrón de referencia, donde se tienen desde planos, fotografías hasta el modelo de elementos finitos, que debe ser un modelo tridimensional completo que refleje exactamente el comportamiento dinámico según el diseño, para así poder comparar el modelo, con los

resultados de las pruebas de campo. Ya que se pueden presentar cambios por nuevas magnitudes de carga viva, condiciones de viento, cambios de temperatura, efectos de corrosión, pérdidas de preesfuerzo, que se verían claramente reflejadas en el modelo de línea base. Esos cambios respecto a la línea base podría ser un indicador de aparición de daño en la estructura.

Referencias bibliográficas.

- Andrzejka, M., & Martaa, M. (2014). Modern NDT Systems for Structural Integrity Examination. (Procedia Engineering 91 (2014) 418 – 423). Poland: XXIII R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (23RSP)(TFoCE 2014).
- Arici, Y., & Mosalam, K. (2005). Modal identification of bridge systems using state-space methods. (12:381–404). Berkeley: STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING. doi:10.1002/stc.76
- Boroschek, R., Poblete, C., & Aguilar, A. (18-20 de Marzo de 2015). SISTEMA AUTOMATICO DE MONITOREO DE EVENTOS Y MOVIMIENTO FUERTE. (Paper N° 176). Chile: XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA.
- 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. Mexico: Publicación Técnica No 302 Sanfandila, Qro.
- Corres Peiretti, H., Ezeberry, J. I., Petschke, T. P., & Pérez Caldentey, A. (s.f). INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN DE UN PUENTE INTEGRAL. Madrid.
- Federini, F., Alesii, R., Colarieti, A., Faccio, M., Graziosi, F., Gattulli, V., & Potenza, F. (2014). Design of Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring applications. Italia: EURO SENSORS , the XXVIII edition of the conference series. Obtenido de www.sciencedirect.com

- Frangopol, D., & Kim, S. (s.f). Bridge Health Monitoring. Estados Unidos. Recuperado el Mayo de 2017
- Fraser, M., Elgamal, A., He, X., & Conte, a. J. (2010). Sensor Network for Structural Health Monitoring of a Highway Bridge. 1-14. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.00000005
- Gomez, R., Muriá Vila, D., Escobar Sanchez, J., & Sanchez Ramirez, R. (2001). Detección experimental y analítica de cambios estructurales de un puente atirantado. Mexico: CIT Informacion Tecnologia Revista Internacional Vol 12 No. 1.
- Hapsari Handayani, H., & Taufik M, Y. (2015). Preliminary study of bridge deformation monitoring using GPS and CRP (case study: Suramadu Bridge). (Procedia Environmental Sciences 24 266 – 276). Indonesia: The 1st International Symposium on LAPAN-IPB Satellite for Food Security and Environmental The 1st International Symposium on LAPAN-IPB Satellite for Food Security and Environmental Monitoring .
- Jerez, C. A. (Marzo de 2007). Metodología de monitoreo de daño estructural para puentes simplemente apoyados: implementación numérica. (No. 39.), 44. Medellín: Revista Facultad de Ingeniería.
- Krakhmal'ny, T., Evtushenko, S., & Krakhmal'naya, M. (2016). New System of Monitoring of a Condition of Cracks of Small Reinforced Concrete Bridge Constructions. (International Conference on Industrial Engineering, ICIE). Platov South-Russian: Procedia Engineering 150 (2016) 2369 – 2374. Obtenido de www.sciencedirect.com
- Kulprapha, N., & Warnitchai, P. (2012). Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses. (40 (2012) 20–38). Thailand: Engineering Structures . Obtenido de www.elsevier.com/locate/engstruct

- Lin Xu, Y., Zhang, H., & Zhu, S. (2016). Multi-type sensor placement and response reconstruction for structural health monitoring of long-span suspension bridges. Berlin: Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/s11434-016-1000-7
- Liu, C., DeWolf, J., & Ho Kim, J. (2009). Development of a baseline for structural health monitoring for a curved post-tensioned concrete box-girder bridge. (31 (2009) 3107-3115). Connecticut: Engineering Structures . doi:10.1016/j.engstruct.2009.08.022
- Magalhaes, F., Cunha, A., & Caetano, E. (2012). Vibration based structural health monitoring of arch bridge: From automated OMA to damage detection. (28 (2012)212–228). Porto: Mechanical Systems and Signal Processing. doi:10.1016/j.ymsp.2011.06.011
- Marulanda, J., & Thomson, P. (Diciembre de 2000). MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL. (VOLUMEN 2 - No. 2). Cali: Ciencia y Tecnologia .
- Muñoz, E., Nuñez, F., Rodríguez, J., Ramos, A., & Otálora, C. (Agosto de 2010). Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural. (Vol. 25 N°2). Colombia: Revista Ingeniería de Construcción . Obtenido de www.ing.puc.cl/ric
- Muriá Vila, D., Huerta Carpizo, C. H., Gómez Martínez, R., & Sánchez Ramírez, R. (2004). DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LOS CABLES EN DOS PUENTES ATIRANTADOS. *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Acapulco*, Acapulco. Obtenido de www.researchgate.net/publication/298097750
- Parks, J., Papulak, T., & Pantelides, C. (2016). Acoustic emission monitoring of grouted splice sleeve connectors and reinforced precast concrete bridge assemblies. (122 (2016) 537–

- 547). Estados Unidos: Construction and Building Materials . Obtenido de www.elsevier.com/locate/conbuildmat
- Pérez Cardozo, M. A., Quintana Rodriguez, J. A., Carrión Viramontes, J. F., Hernandez Guzmán, A., Crespo Sanchez, S. E., & López López, J. A. (2012). Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras. (Publicación Técnica No. 349 Sanfandila, Qro. 2012). Mexico: SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE .
- Roa Rodriguez, G., Delgado Tobón, E., & Aperador Chaparro, W. (Octubre-Diciembre de 2015). Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. (volumen XVI (número 4)). Bogota: Ingeniería Investigación y Tecnología. doi:10.1016/j.riit.2015.09.008
- Segovia, M. E., Boroschek , R., Moroni, M. O., & Sarrazin, M. (1997). Determinación de las propiedades dinamicas del puente Marga-Marga a traves de microvibraciones. Chile: Aplicaciones BIT.
- Täljsten, B., Hejll, A., & James, G. (2007). Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthening and Monitoring of the Gröndals Bridge in Sweden. JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION © ASCE. doi:10.1061/1090-0268
- Viviescas, A., & Vargas, L. (2017). Caracterización dinámica de puentes viga cajón en concreto de grandes luces a partir de pruebas de vibración ambiental. *Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica organizado por la Universidad del Norte y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Área Metropolitana de Barranquilla.*
- Viviescas, A., Hernández, W., & Luna, F. (2017). CARACTERIZACIÓN DINÁMICA EN FASE DE CONSTRUCCIÓN DE PUENTES DE GRANDES LUCES. CASO DE ESTUDIO:

- VIADUCTO LA UNIÓN. *Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica organizado por la Universidad del Norte y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica*. Aerean Metropolitana de Barranquilla.
- Xiaodan, F. (2017). Design and implementation of remote health monitoring system for 3D visual Bridge. (Procedia Engineering 174). China: 13th Global Congress on Manufacturing and Management, GCMM 2016 . Obtenido de www.sciencedirect.com
- Xin Ren , W., & Lin Peng, X. (2005). Baseline finite element modeling of a large span cable-stayed bridge through field ambient vibration tests. (83 (2005) 536–550). China: Computers and Structures. doi:10.1016/j.compstruc.2004.11.013
- Yapar, O., Basu, P., Volgyesi, P., & Ledeczki, A. (2015). Structural health monitoring of bridges with piezoelectric AE sensors. (56 (2015) 150–169). United States: Engineering Failure Analysis .
- Yu, Y., Zhao, X., Shi, Y., & Ou, J. (2013). Design of a real-time overload monitoring system for bridges and roads based on structural response. (46 (2013) 345–352). China: Measurement . Obtenido de www.elsevier.com/locate/measurement
- Zhou, G. D., Chen, B., & Yi, T. H. (2016). Innovative Design of a Health Monitoring System and Its Implementation in a Complicated Long-Span Arch Bridge. China: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000603
- Zonta, D., Cappello, C., Pozzi, M., & Glisic, B. (8-11 de Julio de 2014). On Evaluating Monitoring Design Effectiveness. Francia: 7th European Workshop on Structural Health Monitoring. Obtenido de hal.inria.fr/hal-01021246