



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Ingeniería Estructural, Nº 5, Volumen 2, Año 2017 · ISSN: 2215-4566

Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes

Ing. Yi Cheng Liu Kuan, M. Sc.

*Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
yi.liukuan@ucr.ac.cr*

Ing. Pablo Agüero Barrantes, M. Sc.

*Unidad de Puentes
Programa de Ingeniería Estructural
pablo.aguerobarrantes@ucr.ac.cr*





Figura 1. Toma de datos en el puente sobre el río Virilla en la Ruta Nacional No. 32. Nótese los sensores y las unidades de adquisición de datos de aceleración que se colocan sobre la acera y que no se interrumpe la operación del tránsito.

El proyecto de monitoreo de la Unidad de Puentes

El presente Boletín Técnico introduce los aspectos conceptuales del Monitoreo de Estructuras enfocado a puentes. Para facilitar la comprensión se utiliza un lenguaje sencillo y ejemplos de la vida cotidiana.

La Unidad de Puentes del PIE-LanammeUCR ha desarrollado e implementado un proyecto de monitoreo de estructuras de puentes con el enfoque basado en vibraciones ambientales inducidas por las cargas dinámicas que afectan el puente. Para optimizar la utilización de recursos se propuso un sistema portátil, en lugar de un sistema de monitoreo permanente, con el fin de utilizar los equipos en varios puentes.

Para no impactar el tránsito vehicular sobre el puente los sensores de aceleración se colocan sobre las aceras del puente (ver figura 1).

Dichos sensores deben ser capaces de percibir las aceleraciones inducidas principalmente por la carga vehicular que son registradas por medio de unidades de adquisición de datos en forma sincronizada y vía Wi-Fi.

Los datos son llevados a la oficina para ser procesados y determinar los parámetros dinámicos de la estructura, en este caso las frecuencias modales, las formas modales y el amortiguamiento. Estos resultados permiten monitorear la condición estructural del puente en el tiempo.

El concepto y la necesidad de monitoreo

La realidad donde se desenvuelve la civilización humana es cada vez más dinámica. Las diferentes necesidades básicas que la sociedad posee hoy día tales como el transporte, la vivienda, la seguridad, entre otros, constituyen un reto cada vez mayor para los entes rectores encargados de la gestión y manejo de dichos servicios. Gracias al avance tecnológico y la era computacional en pleno auge, han sido creados e implementados con éxito sistemas de monitoreo cada vez más sofisticados e integrales, que se han convertido en grandes aliados para afrontar las problemáticas y necesidades de la sociedad. Quizás sin darnos cuenta, la manera como cualquier ser humano "gestiona" su vida hoy día, está basada en informaciones provistas directa o indirectamente de algún sistema de monitoreo.

Un ejemplo típico de ello es el pronóstico de tiempo, donde una simple predicción sobre la temperatura, humedad o posibilidad de lluvia, la cual es de gran utilidad para la ejecución de muchas actividades diarias, proviene del análisis de un modelo meteorológico complejo, alimentado por datos recolectados continuamente por una red de estaciones meteorológicas e imágenes satelitales, y por supuesto, mientras más densa es la red para la captación de datos y se tenga más capacidad de procesamiento computacional,

más acertadas estarán las predicciones (ver figura 2). Existen otros ejemplos, como la aplicación móvil de tráfico y navegación, donde el usuario puede visualizar en un mapa y en tiempo real la dinámica del tránsito para la determinación de rutas; hasta el mismo tablero de instrumentos de cualquier vehículo, sea el tacómetro, indicadores de temperatura o de combustible restante, aunque muy sencillas en apariencia, existen en el fondo una gran cantidad de sensores recolectando datos, circuitos o lógicas simples que los procesa, y el tablero que despliega la información o emite alertas

para que el conductor tenga el control de la condición imperante del vehículo y pueda tomar decisiones o realizar intervenciones oportunas (ver figura 2).

De los ejemplos anteriores se puede definir el monitoreo como un proceso sistemático de observación, recolección y análisis de datos con el objetivo de darle seguimiento al progreso o evolución de un sistema u objeto en estudio, cuya información o resultado obtenido puede servir para guiar las decisiones en su gestión.

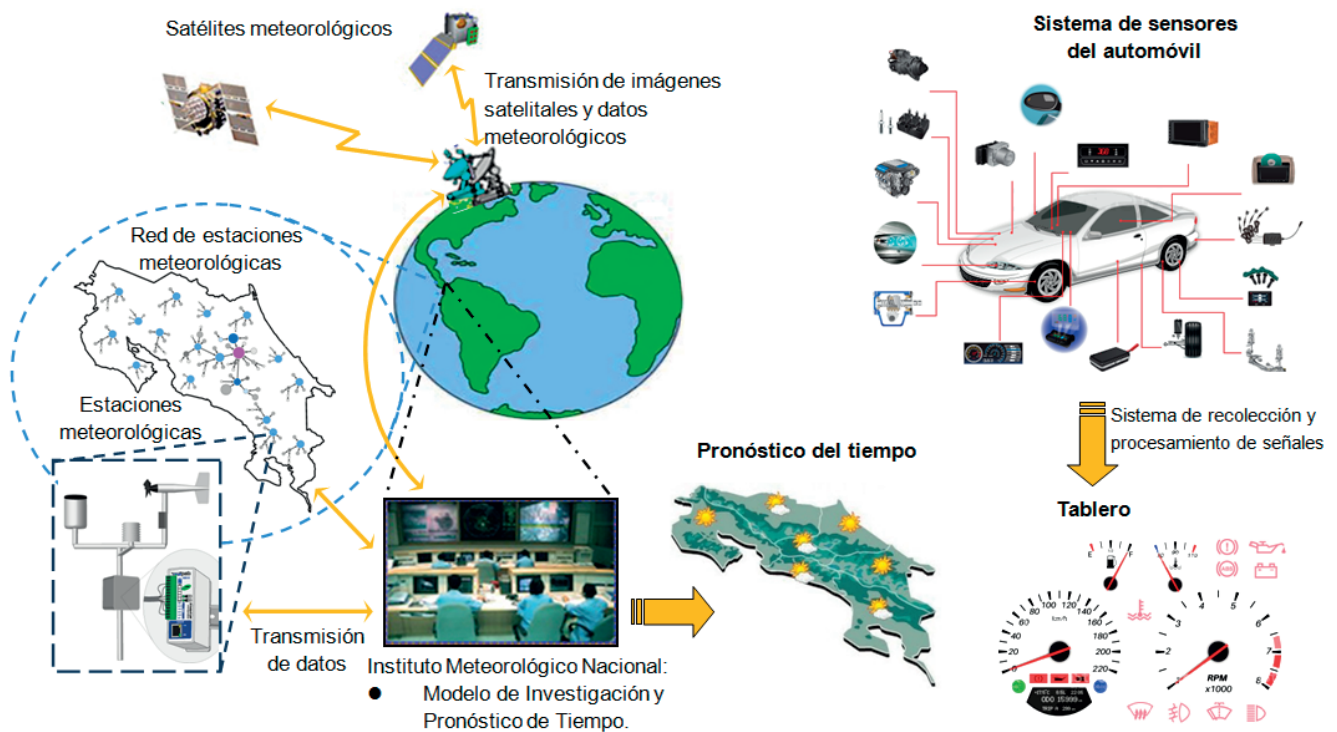


Figura 2. Ejemplos cotidianos de sistemas de monitoreo.

Monitoreo como estrategia de gestión de la infraestructura vial

Una adecuada gestión de la infraestructura vial es esencial para el desarrollo de un país. Los puentes son estructuras civiles que permiten al tránsito vehicular, superar los accidentes geográficos y constituyen además elementos claves en la infraestructura vial; sin embargo, su condición estructural podría sufrir cambios o deterioros con el uso y el paso del tiempo.

Los siguientes son temas claves para alcanzar una óptima gestión de los puentes y toma de decisiones:

- la determinación del estado de conservación de los puentes,
- la existencia y localización de daños o anomalías para una posible y pronta intervención,
- la evaluación y cuantificación de sus efectos en el comportamiento y desempeño de la estructura, y
- el seguimiento de la evolución los mismos.

Dado que se ha conceptualizado el monitoreo como una estrategia de gestión o una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, y su aplicación ha sido tan

exitosa en diversos ámbitos ingenieriles como en la industria automotriz, aeroespacial, naval y hasta en los detalles cotidianos de cualquier ciudadano, ¿podría este convertirse en una herramienta útil para la óptima gestión de puentes y toma de decisiones?, ¿cómo se implementaría?, ¿qué tipo de datos servirían como insumos?, ¿cuál sería el sistema o la plataforma tecnológica idónea que se debe aplicar, adaptar o quizás, crear, de modo que satisfaga todas las exigencias?, ¿cómo se analizan los datos y qué tipo de información o resultado útil se puede generar?. Las anteriores son inquietudes y retos que busca resolver y superar un área emergente de investigación en ingeniería civil denominada "Monitoreo de Condición Estructural" o "Monitoreo de Salud Estructural" (ver figura 3).

Definición y objetivo del Monitoreo de la Condición Estructural

El concepto de *Monitoreo de la Condición Estructural* término que es una adaptación al español de la denominación original inglesa "Structural Health Monitoring", consiste en "dar, en cada momento de la vida útil de una estructura, un diagnóstico del estado de los materiales constituyentes de sus diferentes componentes, así como del sistema global formado por los mismos como un todo" (Balageas, et. al., 2006).

También se puede encontrar una definición más enfocada a la práctica: el *Monitoreo de la Condición Estructural* se refiere a la implementación del "proceso en el cual las estrategias de detección de daños son implementadas en las estructuras aero-espaciales, mecánicas y civiles" (Sohn, et. al., 2004).

En el caso de las estructuras de puente, "el daño se puede definir como los cambios en los materiales o en la geometría del sistema, tales como los cambios en las propiedades mecánicas del material, condiciones de frontera y la conectividad del sistema, los cuales afectan adversamente el desempeño del mismo" (Farrar, Worden, 2007).

Los términos daño o estado son pertenecientes, de hecho, al mismo concepto. No se puede concebir lo que es daño sin una comparación entre dos estados, donde uno de ellos es el estado inicial, considerado como el estado sano, ideal o sin daño; y el daño se identifica una vez que se detecten cambios en el sistema respecto a este estado "sano".

Por lo tanto, a partir de las definiciones anteriores, se puede comprender que el objetivo principal del *Monitoreo de Condición la estructural* es detección de daños estructurales, ya que la existencia de ellos y su progreso en el tiempo es la principal causante de variación o deterioro en el estado estructural, y es de gran interés en la gestión.

Gestión de infraestructura de puentes

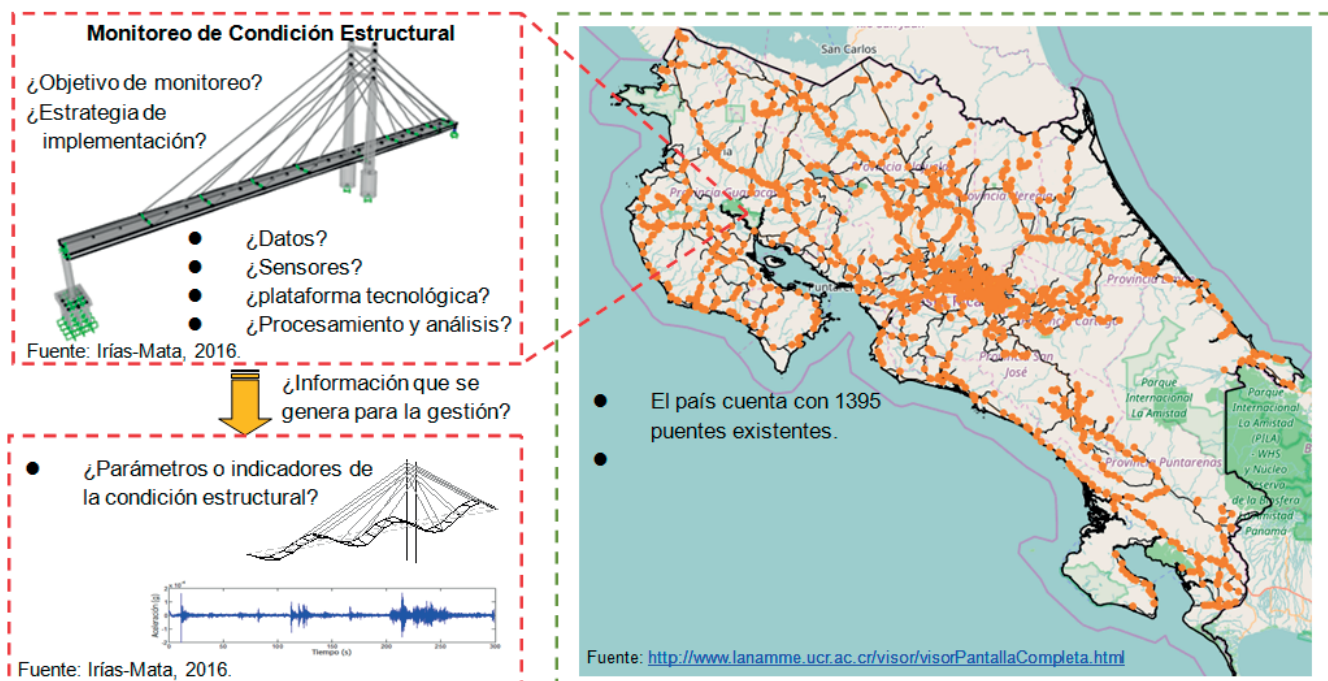


Figura 3. Motivación del Monitoreo de Condición Estructural como estrategia de gestión a la infraestructura de puentes.

Monitoreo versus evaluación

El concepto de monitoreo y evaluación tienden a ser confundidos o mezclados fácilmente, existen diferencias conceptuales entre ellos a pesar de que están íntimamente relacionados. En el sistema de gestión de calidad de la norma ISO 9001, se puede encontrar una definición de lo que es monitoreo y evaluación, orientada a procesos de producción industrial:

- **Monitoreo:** es una inspección u observación continua del desempeño o salidas de un proceso para un propósito especial dentro de un alcance definido (por ejemplo: mediante una muestra de cierto tamaño o durante cierto período de tiempo), y manteniendo los registros de dichas observaciones.
- **Evaluación:** es la acción de comparar un proceso o las mediciones de las salidas del mismo contra un criterio dado, para determinar su desempeño y la conformidad de las salidas del dicho proceso.

En el caso del presente estudio, al sustituir el término proceso por condición estructural, se puede entender que el propósito especial del *monitoreo de la condición estructural* a partir de la observación de su salida, o comportamiento de su respuesta en condiciones operacionales dicho en términos de una estructura, es la detección de daño o cambio del estado tal como se mencionó anteriormente; de modo que al lograr generar una memoria histórica de monitoreo a lo largo de los años, permitiría visualizar el proceso de deterioro o la evolución de los daños que puede experimentar la estructura del puente durante su vida útil.

Por otro lado, evaluación da un paso más, y compara la condición estructural o comportamiento de la respuesta estructural, contra criterios apropiados para determinar su desempeño y si la respuesta estructural es la adecuada en condiciones específicas.

Dado que el propósito de monitoreo es muy sencillo: detectar daños o cambios en la condición, el reporte que comúnmente generan los sistemas de monitoreo en procesos industriales puede ser tan simple como: se detectó falla o no se detectó falla, y dependiendo del nivel de profundidad y el grado de control que se desea tener, podría llegar a un nivel tal como se detectó falla en un lugar específico, o el sistema está

funcionando a tal porcentaje de capacidad, mensajes que resultan familiares ya que a diario se ven en los sistemas operativos de los ordenadores personales, pues tienen integrado un sistema de monitoreo permanente para la gestión del sistema informático. No obstante, es evidente que para determinar que está funcionando a un cierto porcentaje de capacidad, ha trascendido de cierta forma la frontera de la definición de monitoreo y entrado en el ámbito de evaluación.

Implementación de detección de daños y sus niveles de detalle

Después de definir el concepto, los objetivos y el producto final o la información que se desea generar con el *monitoreo de la condición estructural*, se debe definir una estrategia de implementación para el sistema.

El primer paso es establecer los datos que se utilizarán para generar la información y el tipo de sensores que se utilizará. Si se desea monitorear la variación de temperatura, se puede usar un termómetro; para la velocidad del viento, se puede utilizar un anemómetro; para la deformación unitaria en un cierto punto de una estructura, es posible hacer uso de una galga extensométrica. Ahora bien, el objetivo final del monitoreo es la determinación de la condición estructural, sin embargo, tanto la condición estructural como el daño son un estado y no una cantidad física como lo son la temperatura, la velocidad del viento o la deformación unitaria, ¿cómo se mediría, entonces, la condición estructural o el daño y su efecto en una estructura?

Para tener una mayor claridad sobre la naturaleza y el alcance del *monitoreo de condición estructural*, se han definido cuatro niveles en la detección de daños, lo cuales responden a las respectivas preguntas (Rytter, 1993):

Nivel 1- Detección: ¿está dañada la estructura?

Nivel 2- Localización: ¿dónde se ubica el área con daño?

Nivel 3- Cuantificación: ¿cuál es la severidad del daño?

Nivel 4- Predicción: ¿cuál sería la vida útil remanente para la estructura? o ¿cuál sería su desempeño ante la ocurrencia de un posible evento?

Cuando se habla de detectar y localizar daño en una estructura y sobre el cómo hacerlo, lo primero que se viene a la mente es hacer una inspección visual y corroborar los hallazgos con algún tipos de prueba, por ejemplo, con el tacto que es lo más básico; esta es,

quizás, la forma más intuitiva de hacer un monitoreo. No obstante, en la práctica, existen grandes limitaciones para realizar inspección visual en puentes, debido a que una gran parte de estos es de difícil acceso (ver figura 4). Por ejemplo, una gran cantidad de puentes cruzan cañones profundos o ríos caudalosos, a los cuales puede resultar sumamente peligroso e ineficiente, o prácticamente imposible, realizar una inspección visual en sus vigas principales o elementos estructurales que se encuentran por debajo del tablero, a no ser que se utilicen grúas de inspección de las cuales no siempre se tiene disponibilidad y en donde además es necesario interrumpir, como mínimo de manera parcial, el tránsito sobre la vía. Y aún en partes accesibles, no todos los daños son aparentes o evidentes visualmente, como por ejemplo, no es posible determinar visualmente el grado de agrietamiento del tablero de concreto si este estuviera recubierto con asfalto.



Figura 4. Puente sobre el río Grande en la ruta nacional No. 27

Otra limitación de la inspección visual es que en el caso de lograr detectar y localizar el daño, la interpretación de los datos visuales y su conversión en información de deterioro está sujeta a un proceso cognitivo subjetivo de cada inspector, el cual varía de persona en persona y hasta de día en día, por lo que

imposibilita, en lo subsecuente, cuantificar el daño y determinar su efecto en el desempeño del puente de manera objetiva, numérica y precisa.

Es importante recalcar aquí, que las debilidades planteadas anteriormente no buscan desmeritar la labor de la inspección visual y su importancia irremplazable en la determinación del estado de conservación de la infraestructura, mucho menos eliminar esta práctica; por el contrario, se busca que el aporte del *monitoreo de la condición estructural* sea estratégico, es decir, que sea un facilitador del proceso de detección de daños con la ayuda de los avances tecnológicos, permitiendo así complementar las limitaciones e inconvenientes mencionados, y que la inspección visual sea, más bien, el último respaldo o la corroboración final necesaria del resultado. En última instancia, la manera más confiable para diagnosticar si hay un daño o si algo está bien o no, siempre es poder verlo con los propios ojos y tocarlo con las propias manos.

De hecho, los ojos, el oído y los otros sentidos humanos, son sensores biológicos integrados al cuerpo humano que recopilan datos en forma de imagen, sonido, tacto, entre otros; estos son procesados luego por el cerebro, pasan por un proceso de cognición y se convierten al final en nuestra percepción o información de la realidad.

Y ¿qué tal si en vez de usar los sentidos humanos, se le provee a la estructura del puente algún tipo de sentido, o mejor dicho, sensores instalados de manera que puedan sentir y recopilar datos o señales de la estructura, de forma que estas sean procesadas y analizadas por un computador, extrayendo así la información de daño, su localización, y más adelante, lograr su cuantificación, sistematización y predicción con base en algún modelo físico-matemático? Esta es justamente la conceptualización bioinspirada de un sistema de monitoreo de condición estructural y su analogía con el funcionamiento del cuerpo humano, tal como se ilustra en la figura 5.

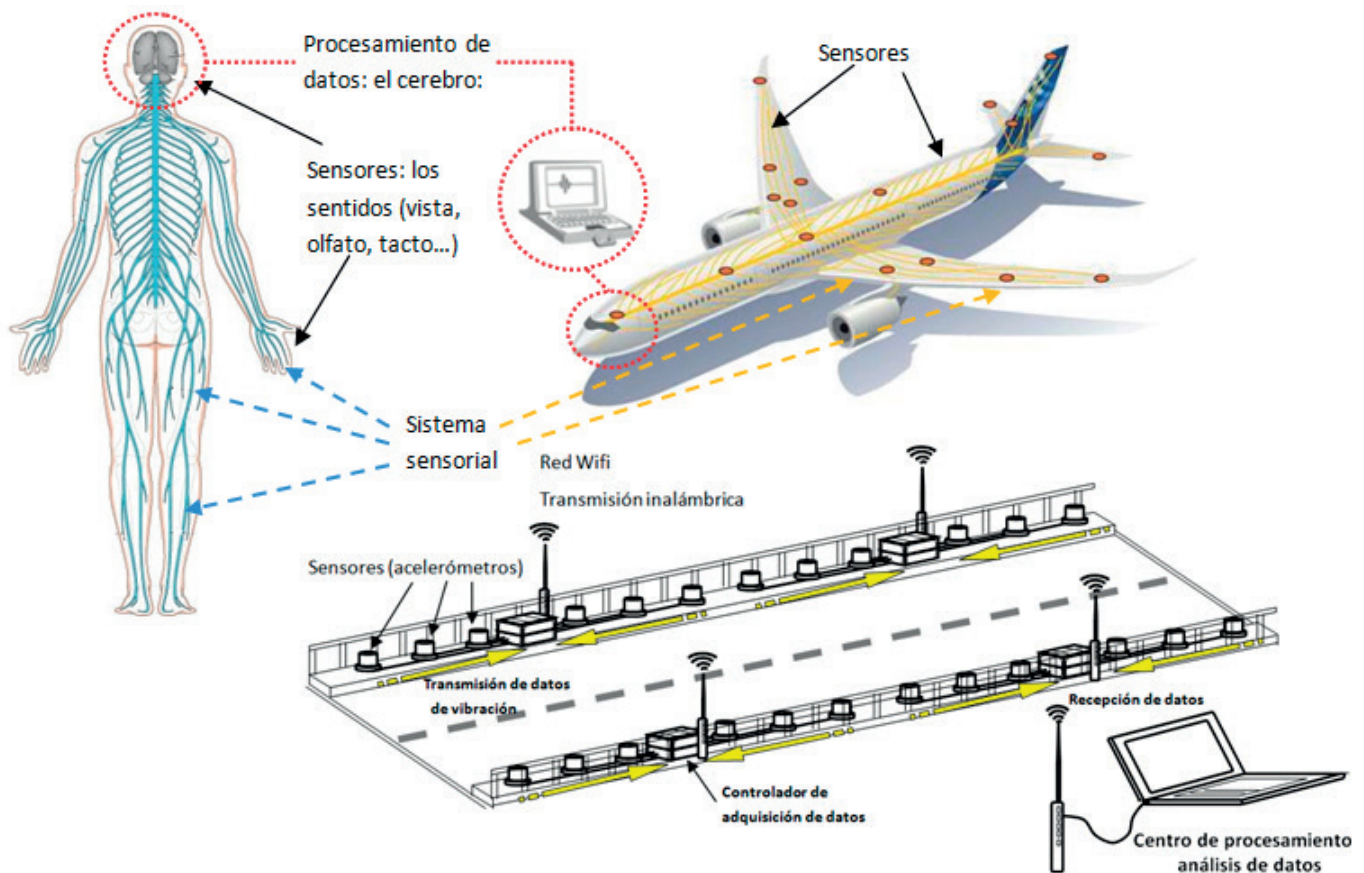


Figura 5. Conceptualización de un sistema de monitoreo de condición estructural y su analogía con el cuerpo humano: caso de un avión, y luego el mismo concepto pero en un puente.

Métodos globales versus métodos locales

A pesar de haber definido el esquema conceptual para un sistema de monitoreo, quedan aún cuestiones por concretar, como por ejemplo: ¿existirá ya en el mercado un sistema o metodología de monitoreo se ajuste a los requerimientos de los niveles susodichos o habría que crearlo?, ¿qué tipo de datos son relevantes recolectar para el propósito de detección de daño? o mejor dicho, ¿cuáles datos son sensibles al daño y a qué tipo de daño?, ¿cuáles son los métodos o algoritmos idóneos para procesar y analizar los datos? y ¿cuáles parámetros o indicadores de daño se puede generar a partir ello?. Esta última pregunta es esencial, dado que la única forma de detectar, en la práctica, un daño o cambio de estado de una estructura, el cual no es una cantidad física y por ende inmensurable, es a partir de parámetros o indicado-

res numéricos extraídos de los datos que permiten inferir el daño.

Un parámetro, un indicador o un juego de ellos que satisfagan todos los niveles de detección de daño, deben tener las siguientes características: 1) ser sensibles al daño ubicado en diferentes sectores de la estructura; 2) poseer información espacial que permita localizar el daño; y 3) servir de insumo para identificar, calibrar, o hasta crear modelos físicos o matemáticos del fenómeno monitoreado. En el caso de este estudio, este modelo puede ser el modelo estructural del puente, modelo de daño en un elemento estructural o hasta un modelo de fatiga de acero, entre otros, de modo que al compararse con un monitoreo anterior, o con base en estándares o criterios ingenieriles de referencia, permita incursionar en **nivel 3** y **nivel 4** de detección de daño: cuantificar el daño y hacer predicciones, a pesar de que estos últimos dos niveles se han extendido más allá de la definición propia de

monitoreo y han alcanzado al nivel de evaluación.

Pero lo más importante ante todo, es que el método que genere dichos parámetros o indicadores debe ser fácil, seguro y eficiente en su implementación en campo, de lo contrario, no se ganaría nada.

A manera de ejemplo, se pueden analizar algunos métodos de instrumentación o ensayos no destructivos en concreto reforzado de acuerdo con los criterios mencionados, para evaluar sus características, pros y contras, como plataforma tecnológica para implementar el *monitoreo de la condición estructural*.

Por ejemplo, un detector de armaduras de acero se basa en lecturas de la inducción electromagnética (i.e., los datos), las cuales son procesadas y traducidas en términos de la ubicación de las barras de refuerzo (i.e., parámetros monitoreados); el método ultrasónico se basa en la medición del tiempo que toman los pulsos en atravesar un medio (i.e., los datos) para inferir en la calidad y resistencia de concreto, o en el grado de fisuramiento en el mismo (i.e., parámetros monitoreados).

No obstante, ¿será la detección y ubicación de barras de refuerzo y su corrosión relevante para determinar la condición de daño? Sí, pero quizás es más útil en la etapa final de evaluación o para la determinación de la causa del daño. Antes de ello es necesario ubicar, primero, la zona de deterioro, para poder aplicar el método. Y ¿serán los métodos de inducción electromagnética o el ultrasonido, considerando cuestiones prácticas, los más adecuados para detectar y localizar daños en estructura de puentes? Quizás por su forma de trabajo no lo son, ya que se necesita garantizar un buen contacto de su emisor y receptor de ondas con la zona a revisar e ir desplazando a lo largo de toda la estructura; y en el campo la mayor parte de la estructura de muchos puentes es de difícil acceso.

Si se tuviera algún método capaz de identificar o aislar de antemano la zona con daño, de modo que no sea necesario rastrear con el equipo por todo el puente, estos dos métodos anteriores, catalogados como locales, serían los idóneos para proveer una caracterización profunda del daño y dar sugerencias de reparación o rehabilitación.

Por lo tanto, se llaman métodos globales a aquellas metodologías basadas en parámetros que permiten detectar si existen o no daños y su localización a nivel general, arrojando un resultado simple y directo de sí o no y dónde. Y son, además, cuantitativos facilitando así el seguimiento de su evolución en el tiempo. En contraparte, los métodos locales son aquellos caracterizados por su capacidad de obtener información más detallada

en una zona específica, pero no apropiados para hacer el rastreo en general.

Los métodos globales son similares al pronóstico de la condición o estado del tiempo. Por ejemplo, un pronóstico sobre la precipitación provee siempre la información sobre: 1) ¿habrá precipitación o no? --**nivel 1**--; 2) ¿dónde se dará la precipitación? --**nivel 2**--; 3) ¿cuántos milímetros de lluvia se prevé caer? --**nivel 3**--; 4) ¿cuánto durará la precipitación? --**nivel 4**--. Y tal y como se mencionó anteriormente, este pronóstico es, de hecho, el resultado de recolectar todos los datos relacionados a la condición atmosférica de la región (temperatura, presión atmosférica, vientos, humedad, precipitaciones, entre otros), por medio de una red de estaciones meteorológicas e imágenes satelitales, los cuales son convertidos en uno de los parámetros del estado de tiempo llamado precipitación, a través de un modelo numérico denominado como el Modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo.

Lo mismo sucede con los métodos globales en *monitoreo de condición la estructural*: recolectan datos de respuesta de una estructura, los cuales pueden ser en forma de aceleración, desplazamiento, deformación unitaria, entre otros, y estos son convertidos en información, parámetros o indicadores de su condición global con base en un modelo físico-matemático o estructural. Por eso, son los candidatos idóneos para monitorear la condición estructural global como un todo.

Existen dos frentes clásicos de métodos globales: el primero es el método basado en vibraciones, donde los datos de vibración captados en forma de aceleración, velocidad, desplazamiento o deformación unitaria, son convertidos, a través del modelo de un sistema dinámico, en parámetros modales, comprendidos como las frecuencias, amortiguamiento y formas modales. El segundo es el método basado en deformaciones, donde los datos de deformación unitaria, rotación o desplazamiento, son traducidos, por medio del modelo estructural de un puente, en estados de esfuerzo-deformación que experimenta la estructura en general.

Ambos métodos se basan en mediciones en múltiples puntos recolectados por una red de sensores, por lo que los parámetros acarrear en sí información espacial que permite localizar el daño. La diferencia entre ellos, consiste en que los acelerómetros son los sensores principales que usa el primer método; su portabilidad es alta debido a que la vibración estructural en frecuencias bajas es un efecto global y los acelerómetros pueden estar simplemente colocados sobre las aceras, es decir, en los costados de un puente para recolectar la información. Mientras tanto, las galgas extensométricas son los sensores principales que usa el segundo método, la fibra

óptica es la plataforma más empleada para el propósito; su instalación es generalmente permanente en el puente, y por lo tanto el monitoreo es continuo y de largo plazo, debido a la dificultad y delicadeza de adherir las galgas y de la instalación del sistema de fibra óptica en la estructura.

En la figura 6 se muestra un mapa conceptual de *monitoreo de la condición estructural* como estrategia de gestión de la infraestructura de puentes, donde se detallan las relaciones entre los métodos globales, locales e inspección visual con los niveles de detección de daño, y la interacción que hay entre ellos.

Paralelismo entre el monitoreo de condición estructural y los chequeos médicos

Se ha observado que la detección de daño en los diferentes niveles de profundidad, guarda cierto paralelismo con los chequeos médicos de salud que los humanos recibimos a lo largo de nuestra vida, de aquí el término

monitoreo de salud estructural. Una analogía con las actividades médicas podría aclarar mejor la estrategia de *monitoreo de la condición estructural*. El Cuadro 1 muestra una comparación entre el monitoreo de salud de un ser humano y el de una estructura de puente.

Hoy día, el Test de Apgar de un recién nacido a minutos del parto es fundamental para tener una valoración inicial y estado general del neonato, lo mismo la prueba del talón que busca detectar, a través de una muestra de sangre tomada del talón, la existencia o el potencial para el desarrollo de enfermedades metabólicas congénitas, con los cuales se abre la historia clínica del neonato. Paralelo a ello y en términos de una obra civil, también es una práctica común que para la recepción de obras, además de una inspección visual, se realicen pruebas de carga estática y dinámica tanto en forma controlada como bajo cargas operacionales, para con ello verificar el cumplimiento de la capacidad de carga, detectar la existencia de defectos constructivos y establecer el estado inicial o “sano” de la estructura para futuras comparaciones.

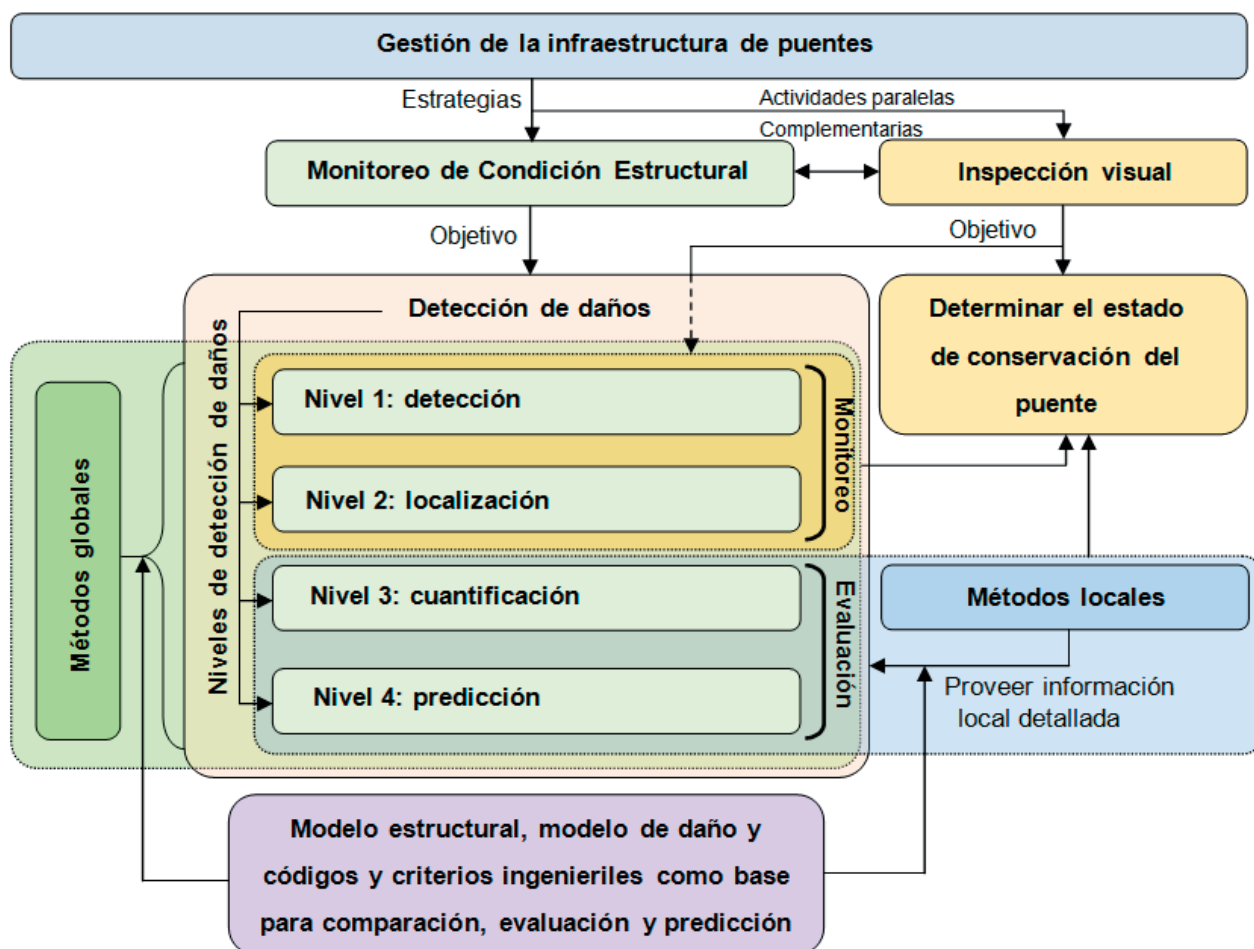


Figura 6. Mapa conceptual de monitoreo de condición estructural.

Cuadro 1. Paralelismo entre las actividades médicas y el monitoreo de condición estructural durante la vida de una persona y la de una estructura.

Fases de la vida	Ser humano	Estructuras de puentes
Gestación y nacimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorización fetal • Test de Apgar y prueba del talón o exploración neonatal • Apertura de la historia clínica 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo durante la construcción • Inspección visual, pruebas estáticas y dinámicas controladas y operacionales para la recepción de obra • Registro del estado inicial "sano" de la estructura
Vida	<ul style="list-style-type: none"> • Chequeos médicos generales rutinarios como: peso, presión arterial, exámenes de sangre y orina, rayos x, entre otros 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspecciones visuales rutinarias del estado de conservación del puente • Monitoreo de rutina de la condición estructural y su estado operacional a nivel global en comparación con el estado inicial "sano" para detectar daños
Al detectar alguna enfermedad o anomalía en forma temprana	<ul style="list-style-type: none"> • Exámenes más específicos en caso de ser necesario • Controles médicos de seguimiento de la enfermedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección detallada de la zona de daño, aplicación de ensayos no destructivos, o cuantificación de la severidad del daño mediante un modelo en caso de ser necesario • Seguimiento o monitoreo del daño mediante métodos de monitoreo globales o locales para conocer su progreso en el tiempo
Enfermedad severa, emergencia (situación crítica) o proximidad a la muerte	<ul style="list-style-type: none"> • Cuidados intensivos: monitorización continua de los signos vitales y otros parámetros significativos 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo continuo y en tiempo real de la condición estructural local y global: vigilancia continua del parámetro, daño o elemento estructural crítico para emitir alerta temprana contra la falla con el fin de salvaguardar vida humana

Adaptado de: Gandhi, et. al, 1992; Balageas, et. al., 2006

Durante la vida de un ser humano, a pesar de sentirse bien de salud, es importante realizar chequeos médicos rutinarios en forma periódica, con el objetivo de detectar anomalías en forma temprana y problemas antes de que ocurran para su pronta intervención y monitoreo, especialmente si la persona está en edad avanzada; en esto consiste la medicina preventiva. Lo mismo sucede con las estructuras de puentes, las cuales requieren también de exámenes rutinarios de salud, a pesar de no observarse daños aparentes.

Tal y como los chequeos médicos inician desde la toma de datos básicos como el peso, la altura y una inspección visual general del paciente, lo mismo sucede con los puentes, se necesita conocer sus datos básicos y se requiere la misma inspección visual para determinar su estado de conservación.

Más adelante, tomas de muestras de sangre y orina nunca faltan en los chequeos médicos de rutina; pues, a pesar de no ser una prueba directa de tacto en el cuerpo o en forma visual como una radiografía, contienen en ellas casi la totalidad de los indicadores o parámetros que permiten diagnosticar el estado en general de salud. Por ejemplo, el número de leucocitos (glóbulos blancos) en la sangre, es un indicador directo de enfermedad, en donde el estar más alto de lo normal indica, por lo general, la existencia de una infección o incluso, células cancerosas; el nivel de glucosa en la sangre es indicador de diabetes, el nivel de triglicéridos y colesterol es indicador del riesgo de enfermedades cardiovasculares y de hígado, entre otros.

El haber detectado existencia de, por ejemplo, una infección (o un problema) a través de los leucocitos es denominado como el **nivel 1**: detección de la existencia daño. Una vez detectado la infección, el paso siguiente sería determinar ¿dónde está la infección? Lo cual es el **nivel 2**: localización del daño.

En el caso de que el problema detectado sea leve, ya que no tiene afectaciones o consecuencias en la salud u otras partes del cuerpo, sólo es necesario acatar las recomendaciones médicas y continuar con los chequeos rutinarios para darle seguimiento al problema. Lo mismo en el caso de una estructura: si el daño detectado es leve o considerado como normal, bajo la premisa de que no existen materiales ni sistemas estructurales perfectos, y que no constituya una amenaza inminente a la integridad y seguridad estructural, sólo es necesario acatar las recomendaciones de conservación estructural y monitorear el progreso del daño mediante métodos globales de monitoreo.

En el otro caso, considerando la naturaleza, complejidad y gravedad de la enfermedad o el problema, se puede necesitar ir más allá con otros exámenes, como por ejemplo, una inspección más minuciosa, sea visual (como endoscopías), de tacto o una biopsia de la zona infectada en el caso de ser accesible; y de no serlo, puede ser radiografía, ultrasonido u otras técnicas avanzadas. Esto equivale a inspecciones detalladas, es decir, a la aplicación de ensayos no destructivos o incluso, destructivos (una biopsia es una prueba destructiva) que son métodos para estudios más focalizados en una estructura. Esto permite conocer más a fondo sobre la naturaleza del daño, su grado de afectación (**nivel 3**), así como la evaluación misma del daño. Por último, se da un pronóstico de la enfermedad, que consiste en la evolución de los procesos patológicos (en caso de carecer de una intervención médica) y la probabilidad de que ocurran determinadas situaciones en el transcurso del tiempo. Esto es justamente el **nivel 4**: predicción de la vida útil remanente y su desempeño ante posibles eventos.

En el caso especial de pacientes con enfermedades severas en estado terminal o situaciones de emergencias, existen protocolos médicos especiales de cuidados intensivos, y se aplica una monitorización continua de los signos vitales y parámetros significativos al paciente. Lo mismo en el caso de los puentes severamente dañados, o aquellos que enfrentan situaciones de emergencia o amenazas como terremotos o huracanes, pero que debido a su importancia, deben permanecer siempre en operación, en donde entonces es recomendable implementar un monitoreo continuo y en tiempo real tanto a nivel local como global para la alerta temprana.

Después de analizar las actividades médicas de un ser humano durante su vida y su analogía con el *monitoreo de condición estructural*, dado que todo diagnóstico médico inicia desde la toma de muestras de sangre como un examen global, ¿cuál sería la metodología equivalente a ello en el *monitoreo de condición estructural*? La respuesta está en las vibraciones de un puente.

Monitoreo de Condición Estructural Basado en Vibraciones

La vibración es un fenómeno físico existente en todos los cuerpos sólidos, el cual no es ajeno a nuestras experiencias cotidianas. Por ejemplo, en la selección

y compra de vasos o utensilios de vidrio, es de costumbre golpear con nuestro dedo el utensilio, y un sonido claro y nítido indica la integridad o la condición perfecta del objeto; mientras que un sonido apagado indica la existencia de desperfectos en el mismo. Igual en la selección de sandía o melón: un sonido hueco al golpearlo indica madurez; mientras que un sonido de objeto compacto y macizo es señal de poca madurez.

El sonido son ondas sonoras generadas por la vibración mecánica de un cuerpo sólido, y transmitidas a través del aire hasta nuestro oído. La vibración del cuerpo puede darse en una amplia gama de frecuencias y el sonido escuchado corresponde a frecuencias de vibración audibles. El hecho de que la tonalidad del sonido cambia en caso de existir alguna fisura o desperfecto en el objeto, evidencia que la frecuencia de vibración del cuerpo sólido es un parámetro que se puede medir y sensible al daño. Y este es el mismo principio en que se basa el *monitoreo de la condición estructural* basado en vibraciones.

La estructura de puente puede vibrar en un amplio rango de frecuencias: la vibración en el rango de frecuencias bajas (en términos prácticos, menos que 100 Hz), es generalmente resultado de oscilaciones o movimientos globales de la estructura como un todo; mientras tanto en el rango de frecuencias altas (en el orden de los kHz), corresponde a la propagación de ondas acústicas u ondas de esfuerzo. En el caso del sonido audible por los seres humanos, el rango de frecuencias es entre 20 Hz y 20 kHz, y más allá de los 20 kHz se denominan frecuencias ultrasónicas.

Tal como se ilustró en el ejemplo anterior del vaso de vidrio, el rango de frecuencias altas es sumamente sensible al daño, por lo que existen ensayos no destructivos como tomografía de ondas de esfuerzo u ondas acústicas, ondas guiadas, ensayos de impacto-eco e incluso ensayos ultrasónicos para la detección de daño. No obstante y tal como se había indicado anteriormente, estos ensayos son llamados métodos locales debido a que en este rango de frecuencias, la amplitud de vibración decae rápidamente conforme se aleja de la fuente de vibración (Balageas, 2006), y no podría dar un diagnóstico global o servir como indicador del estado global de la estructura. Además, la contaminación del ruido en la señal es crítico en frecuencias altas (Worden, 2007), la cual dificultaría aún más el trabajo de lectura y diagnóstico.

La ventaja de trabajar con el rango de frecuencias bajas, consiste en que la vibración de la estructura se da

de manera global (i.e. método global) y la contaminación del ruido es muy baja, es decir, disminuye la medición de respuestas provenientes de otras fuentes. Las frecuencias naturales o resonantes de vibración, junto con sus correspondientes formas de movimiento global de la estructura (llamadas formas modales) son denominadas como modos normales de vibración, o sencillamente modos de vibración. Las frecuencias naturales o modales, la razón de amortiguamiento y las formas modales de vibración, son denominadas como los parámetros modales de la estructura o características dinámicas intrínsecas de una estructura (ver figura 7).

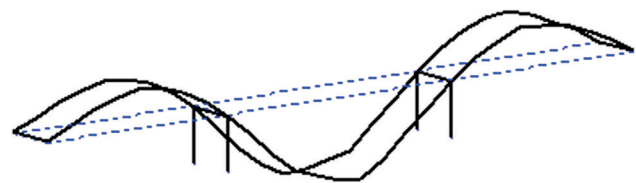


Figura 7. Forma modal del primer modo operacional identificado ($f = 2,36$ Hz) en el puente sobre el río Ciruelas en la ruta nacional No. 27 (Liu-Kuan, et.al., 2016).

La identificación de los parámetros modales de una estructura a partir de los datos crudos de vibración recolectados en campo, y el análisis de la variación de las frecuencias modales, incremento del amortiguamiento o cambios en las formas modales debido al daño, es denominado como análisis modal; y como el trabajo es realizado bajo condiciones operacionales, recibe el nombre de análisis modal operacional.

Este método global se basa en el hecho de que un daño local causaría una reducción de rigidez local, la cual dependiendo de su importancia, influiría en el comportamiento global de la estructura como un todo, tanto en el tiempo como en el espacio. Por ejemplo, la reducción de la rigidez provocaría una disminución de la frecuencia natural, lo cual es un efecto temporal (se alargaría el período natural al perder rigidez en alguna parte y se vuelve más flexible); además, alteraría las formas modales de vibración específicamente en el lugar donde se ha perdido rigidez, lo cual es un efecto espacial. Por consiguiente, el **nivel 1** -- detección de daño -- se puede realizar solo monitoreando la variación en las frecuencias naturales de vibración; mientras que el **nivel 2**, -- localización de daño --, se puede lograr observando anomalías en las formas modales.

Un respaldo importante del monitoreo basado en vibraciones y el análisis modal operacional, es que cuenta con una rigurosa base teórica y el modelo dinámico de una estructura como fundamento, el cual se enuncia como la ecuación de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad:

$$M\ddot{q}(t) + C_2\dot{q}(t) + Kq(t) = Lu(t)$$

donde M , C_2 y K son las matrices de masa, amortiguamiento y de rigidez respectivamente; el vector $q(t)$ y sus derivadas son la respuesta del sistema en forma de desplazamiento, velocidad y aceleración ante las excitaciones de entrada $u(t)$, mapeadas a los diferentes grados de libertad a través de la matriz L . Mediante un análisis de valores y vectores propios a la ecuación de movimiento, los parámetros modales pueden ser extraídos, por lo que una variación que se detecte en la frecuencia o forma modal es evidencia de un cambio en la matriz de masa M o rigidez K , es decir, daño o cambio en el estado. El método es denominado por lo tanto como identificación de sistemas, debido a que se extraen los parámetros modales de las mediciones múltiples simultáneas de la respuesta de un sistema dinámico en el tiempo. Por lo tanto, la detección de daños basado en métodos globales puede ser considerado como una aplicación especial de la metodología de identificación de sistemas (Balageas, 2006).

La desventaja del método global es su sensibilidad, y por lo tanto, su capacidad de detección para daños leves o incipientes puede ser baja (Balageas, 2006). Aunque deseable, empero, no siempre es una prioridad detectar daño en su etapa incipiente, pues, es importante recordar que no existen materiales ni sistemas estructurales perfectos, por lo que una muy buena sensibilidad ante cualquier cambio leve, podría incurrir, más bien, en falsas alarmas. Dado que el método global detecta cambio solo si el daño repercute en el comportamiento dinámico global de la estructura, este sería el nivel de detección que podría alcanzar (**nivel 2**) y se considera adecuado, puesto que se considera daño a aquel que afecta adversamente al desempeño de la estructura y por ende, refleja una variación en el comportamiento de la respuesta estructural.

Referencias bibliográficas

- Balageas, D; Fritzen, C. P., Güemes, A. (2006). *“Structural Health Monitoring”*. Hermes Science Publishing.
- Farrar, C.R., Worden, K. (2007). *“An introduction to structural health monitoring”*. Phil. Trans. R. Soc. A 365, 303–315.
- Gandhi, M.V., Thompson B.S. (1992). *“Smart Materials and Structures”*. Chapman & Hall.
- Irías-Mata, M. (2016). *“Determinación de los parámetros dinámicos de la sección atirantada del puente La Amistad de Taiwán sobre el río Tempisque mediante método de identificación de sistemas multivariados”*. Trabajo Final de Graduación, Universidad de Costa Rica, 2016.
- Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *“Desarrollo y validación de un sistema portátil de monitoreo y evaluación de puentes LM-PI-UP-07-2015”*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2016). *“Monitoreo estructural de la superestructura del puente sobre el río Ciruelas Ruta Nacional No. 27 LM-PI-UP-09-2016”*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Rytter, A. (1993). *“Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures”*. Ph.D.-thesis, Aalborg University, Denmark.
- Sohn, H.S., Farrar, C., Hemez, F.M., Czarnecki, J.J. (2002). *“A Review of Structural Health Monitoring Literature form 1996-2001”*. LA-13976-MS. Los Alamos National Laboratory.
- Technical Committee ISO/TC 173, Subcommittee SC2 *“Quality Management Systems – Requirements. ISO 9001:2015”*. International Organization for Standardization.
- Worden, K., Farrar, C. R., Manson, G., Park, G. (2007) *“The fundamental axioms of structural health monitoring”*. Proceedings of the Royal Society A. 463, 1639–1664.



LanammeUCR

LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PIE Programa de
Ingeniería Estructural

Tel. (506) 2511-2500 / Fax (506)
2511-4440 Código Postal 11501-2060
E-mail: direccion.lanamme@ucr.ac.cr
Sitio web: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad:

Lucía Rojas González / Licda. Daniela Martínez Ortiz / Óscar Rodríguez Quintana

Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes / Octubre, 2017