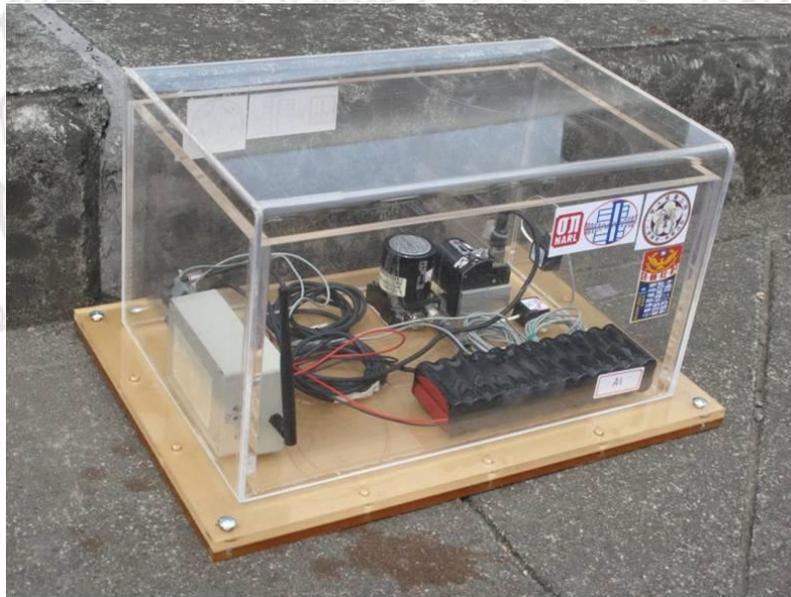


Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-02-2013

MONITOREO Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES UTILIZANDO UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICO

Preparado por:
Unidad de Puentes



San José, Costa Rica
14 de febrero, 2013



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

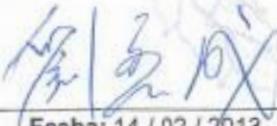


PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE



Página intencionalmente dejada en blanco



1. Informe: LM-PI-UP-02-2013		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: EVALUACIÓN Y MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES UTILIZANDO UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICO		4. Fecha del informe 14 febrero 2013
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias Ninguna.		
7. Resumen <i>En este informe se presentan una revisión de literaturas técnica relacionadas con el tema de Monitoreo de Salud Estructural (MSE) e instrumentación en puentes, con mayor énfasis en las plataformas tecnológicas disponibles para la implementación del MSE en puentes. Se hace una comparación entre los diferentes acercamientos en cuanto a sus características, ventajas y desventajas, alcances y limitaciones, para al final dar recomendaciones estratégicas sobre cómo se puede llevar a cabo la labor de diagnóstico y evaluación de puentes en Costa Rica mediante tecnologías de MSE, y la propuesta de un plan de investigación para su implementación.</i>		
8. Palabras clave Puentes, instrumentación, monitoreo de salud estructural, inalámbrico	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 100
11. Informe por: Ing. Yi Cheng Liu Kuan, MSc. Escuela de Ingeniería Civil  Fecha: 14 / 02 / 2013		
12. Revisado por: Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal LanammeUCR  Fecha: 14 / 02 / 2013	13. Revisado por: Ing. Rolando Castillo Barahona, PhD. Coordinador Unidad de Puentes  Fecha: 14 / 02 / 2013	14. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, PhD. Coordinador General PITRA  Fecha: 14 / 02 / 2013



Página intencionalmente dejada en blanco

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Importancia y justificación.....	8
1.2 Planteamiento del problema.....	11
2. OBJETIVO GENERAL.....	14
3. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
4. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	15
4.1 El marco conceptual del Monitoreo de Salud Estructural.....	15
4.2 Implementación del Monitoreo de Salud Estructural.....	21
4.2.1 Plataformas tecnológicas para la Implementación de MSE.....	22
4.2.1.1 Sensores de Fibra Óptica.....	23
4.2.1.2 Sensores Inalámbricos.....	38
4.2.1.3 Sensores de medición remota.....	44
4.2.1.4 Comparación entre las diferentes plataformas tecnologías para el monitoreo y evaluación de puentes.....	53
4.2.2 Metodologías para la evaluación y el monitoreo de puentes.....	56
4.2.2.1 Monitoreo continuo.....	56
4.2.2.2 Evaluación fuera de línea (pruebas de carga no-destructivas)	59
4.3 Trabajos de monitoreo y evaluación de puentes realizados en Costa Rica.....	61
5. CONVENIO CON EL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA SÍSMICA DE TAIWÁN (NATIONAL CENTER FOR RESEARCH ON EARTHQUAKE ENGINEERING, NCREE)	66
6. SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO PROVISTO POR NCREE.....	68
7. PLAN DE INVESTIGACIÓN.....	74



7.1 Proyecto de Investigación.....	74
7.1.1 Sub-proyecto I: investigación, adquisición y capacitación del uso del sistema inalámbrico para la instrumentación y MSE de puentes.....	74
7.1.2 Sub-proyecto II: investigación e implementación de los métodos de medición remota basada en imágenes digitales.....	76
7.1.3 Sub-proyecto III: Evaluación de la capacidad de carga de los puentes mediante el análisis estructural.....	77
7.1.4 Sub-proyecto IV: Monitoreo continuo de puentes.....	78
7.1.5 Sub-proyecto V: Realización de pruebas de carga en puentes específicos.....	80
7.1.6 Sub-proyecto VI: investigación y capacitación de técnicas para el procesamiento de señales digitales, identificación de sistemas y validación del modelo de los elementos finitos.....	81
7.2 Cronograma.....	82
8. RECURSO HUMANO.....	83
9. COSTO DE INSTRUMENTACION.....	85
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
11. REFERENCIAS.....	91

1. INTRODUCCIÓN

Después de que una obra de infraestructura civil esté construida, ésta debe ser operada adecuadamente al realizar inspecciones en forma regular, efectuar mantenimientos rutinarios y preventivos, y hacer las reparaciones necesarias en casos de detectar deterioro o daños en sus elementos. Estas actividades garantizan el buen funcionamiento, seguridad e integridad a lo largo de la vida útil de la obra civil. Sin embargo, ¿cómo lograr conocer el estado global y real de una estructura después de ser construida? ¿Cuáles son las diferencias que existen entre ésta y su diseño original? ¿Cómo se cuantifica su variación con el paso del tiempo? ¿Cuáles son sus propiedades mecánicas y dinámicas reales? ¿Cómo predecir su desempeño real ante la ocurrencia de un evento? E inclusive, inmediatamente después de un evento dado: ¿Está dañada la estructura? ¿Dónde está el daño? ¿Cuál es la magnitud del daño? Y ¿Cuál sería la vida útil que le queda a la estructura? Todas estas son preguntas importantes pero quizás, sus respuestas podrían variar de una persona a otra, porque tradicionalmente éstas dependen únicamente de las experiencias y criterios, a veces subjetivos, del profesional evaluador. Ante la necesidad de que los trabajos de diagnóstico, evaluación y predicción puedan realizarse de manera cuantitativa, e incluso, en forma automática, y que la toma de decisiones sea hecha lo más apegada posible a las condiciones reales de la estructura, se dio origen a un campo muy activo de investigación denominado **“Monitoreo de Salud Estructural”** (Structural Health Monitoring, SHM por sus siglas en inglés), que de ahora en adelante se llamará como **MSE** en este texto.

Monitoreo de Salud Estructural puede definirse como “el proceso en el cual las estrategias de detección de daños son implementados en las infraestructuras aero-espaciales, mecánicas y civiles”¹. Las primeras técnicas de monitoreo fueron implementados en las estructuras aero-espaciales, como naves espaciales y aviones, por la necesidad de monitorear las condiciones imperantes en el vuelo, emitir alertas tempranas si se detectara alguna falla; pretendiendo así salvaguardar la vida humana a bordo. Actualmente ya existe

¹ Sohn, H., C. R. Farrar, et al. (2004). “A Review of Structural Health Monitoring Literature form 1996-2001”. LA-13976-MS. Los Alamos National Laboratory

una gran variedad de técnicas para efectuar la detección de daños en motores, turbinas y sistemas mecánicos en general.

Desde los años sesentas del siglo pasado ya se aplicaban métodos de pruebas dinámicas como de vibración libre o forzada para estudiar el comportamiento dinámico de las estructuras con especial énfasis en los edificios. Estos estudios son más académicos y se buscaba obtener los períodos naturales de oscilación y la razón de amortiguamiento. Sin embargo, el tema propiamente de monitoreo de la salud de la infraestructura civil no tomó fuerza sino hasta los comienzos de los años noventas, esto debido a varias razones:

- a) La necesidad urgente de determinar el estado de deterioro de las estructuras civiles de gran escala, ya que una gran cantidad de éstas han llegado o se aproximan a la etapa final de su vida útil.
- b) En términos de gestión, manejo y mitigación de las amenazas de los desastres, una base de datos que provee información sobre el estado de las estructuras civiles pre- y pos-desastre es crucial para la planificación y la toma de decisiones de las autoridades.
- c) Cada vez hay más estructuras en el mundo tales como los puentes de gran envergadura que constituyen líneas vitales para muchas ciudades. Su operación no puede ser interrumpida y garantizar su buen funcionamiento es un asunto crítico. Es necesario, entonces, un sistema de monitoreo continuo para detectar daños en tiempo real e implementar medidas correctivas a tiempo antes de que el daño se agrave o se extienda.
- d) El concepto de alerta temprana toma cada vez mayor importancia en el mundo lo cual sólo se logra implementando sistemas de monitoreo continuo.

Todos estos hechos impulsaron un gran esfuerzo a nivel internacional en la investigación sobre el mencionado tema; muchos son los logros tales como el desarrollo de sistemas inteligentes de detección, el sistema de fibra óptica, los sensores inalámbricos, nueva generación de sensores innovadores, nuevos métodos de procesamiento de señales e identificación de parámetros dinámicos de las estructuras junto con sus algoritmos de

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 8 de 100
------------------------------	---	-----------------

implementación, etc. Sin embargo, dada la complejidad que se presenta en las estructuras civiles, aún hay muchos retos por enfrentar y problemas por superar.

1.1. Importancia y justificación

Un sistema de carreteras, del cual los puentes son un elemento clave, juega un rol esencial para el desarrollo de un país. Todo sistema de carreteras debe ser conceptualizado y diseñado según las mejores prácticas internacionales y nacionales, pero además debe recibir un mantenimiento rutinario ya que, dependiendo de su condición operacional y estructural, este tendría un impacto positivo o negativo en todos los sectores y actividades de la sociedad costarricense.

Costa Rica es un país sujeto a múltiples amenazas naturales tales como terremotos, deslizamientos de tierras, avalanchas, inundaciones y otros. Es por ello que una infraestructura vial en buen estado ciertamente constituye la línea de vida para responder ante emergencias que se generan durante estos eventos extremos, como son el transporte de equipo y maquinaria, trabajos de rescate y efectuar futuras labores de recuperación entre otros. Sin embargo, toda infraestructura civil está sujeta a deterioros con el paso del tiempo, por lo que la evaluación de forma acertada del estado de la infraestructura vial, predicción de su comportamiento ante diferentes eventos o solicitudes y la implementación a tiempo de acciones correctivas de reparación o reforzamiento de la misma es crucial para el país.

Los puentes son un elemento clave para el funcionamiento apropiado de un sistema de carreteras. El cierre total o parcial de puentes en Costa Rica debido al deterioro acumulado a lo largo de muchos años por no recibir mantenimiento rutinario preventivo es una realidad latente que hemos experimentado, que ha resultado en el cierre de carreteras nacionales y en la saturación de rutas alternas. La falta de un sistema de administración de puentes y alcantarillas que involucre un programa de inspección rutinaria de todas estas estructuras, una priorización de intervención según sea su deterioro y la importancia del puente, una planificación de la intervención de puentes considerando la priorización establecida y los

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 9 de 100
------------------------------	---	-----------------

fondos económicos existentes, resulta ser cada vez más una necesidad que no se puede ignorar.

La inspección y evaluación de puentes existentes en Costa Rica ha comenzado de forma lenta. Al día de hoy, el Lanamme ha realizado la evaluación estructural de puentes con base en evaluaciones visuales, siguiendo los lineamientos incluidos en manual de inspección de puentes del MOPT. Sin embargo, existen otras técnicas de evaluación que podrían ser aplicadas en nuestro país para estimar de manera cuantitativa la condición de los puentes. Para este propósito, la instrumentación y monitoreo estructural de puentes se vislumbra como una alternativa, la cual se viene implementando a nivel internacional para complementar las evaluaciones visuales que se realizan en puentes y que se puede aplicar en nuestro país.

El deterioro de los puentes no es un problema que existe sólo en Costa Rica. En los países desarrollados como por ejemplo los Estados Unidos, la preocupación por el estado de la infraestructura, especialmente el de los puentes, emergió a la superficie desde los años noventas. Según el informe presentado en 1997 por la Administración Federal de Carreteras del dicho país (The Federal Highway Administration, FHWA), dentro de su inventario existen unos 470,000 puentes pero 110,000 de ellos fueron clasificados como estructuralmente deficientes [5]. Así que desde ese mismo tiempo se ha creado múltiples programas para el desarrollo de métodos de Evaluaciones No-Destructivas (NonDestructive Testing, NDT), ya que hay urgencia por:

- 1) Establecer metodologías rápidas para diagnosticar el estado real de los puentes.
- 2) Ubicar zonas dañadas y cuantificar el daño, por ejemplo, el de las grietas de fatiga sea en acero o en concreto.
- 3) Evaluar el estado de las losas de concreto aún siendo éstas cubiertas por el asfalto.
- 4) Evaluar el estado de las pilas de fundación de una gran cantidad de puentes que no se tenía ninguna información respecto al diseño o construcción.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 10 de 100
------------------------------	---	------------------

Basado en los resultados de la evaluación y la información numérica recolectada mediante mediciones en varios puentes, se buscó establecer metodologías para estimar la capacidad real de carga del puente, su vida útil y diseñar acciones correctivas como reparación o reforzamiento tomando en cuenta el estado real de la estructura. Este trabajo integral de evaluación no se puede realizar mediante una simple inspección visual, razón por la que en los últimos años se ha realizado a nivel internacional un gran esfuerzo en la investigación y el desarrollo de sistemas de detección y nuevas metodologías y técnicas para el monitoreo y evaluación de puentes.

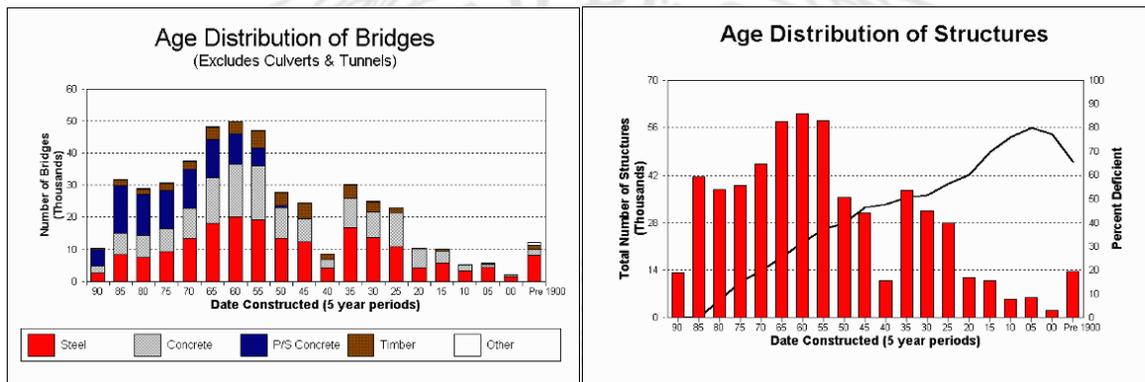


Figura 1. Población de los puentes de los Estados Unidos, su edad y la cantidad de puentes estructuralmente deficientes.

Fuente: Steven B. Chase and Glenn Washer, 1997 [5].

1.2. Planteamiento del problema

El proceso de implementación de estrategias para la identificación de daños en infraestructuras de ingeniería aero-espacial, civil y sistemas mecánicos en general es referido como el Monitoreo de Salud Estructural. El daño aquí es definido como cambios materiales o de propiedades geométricas de estos sistemas incluyendo los cambios en las condiciones de frontera y la conectividad del sistema, los cuales afectan adversamente el desempeño de éste [2]. En cuanto a la detección e identificación de daños en la infraestructural civil, según Rytter (1993) [3] se puede hablar de cuatro niveles:

- a) Nivel 1- Detección: ¿está dañada la estructura?
- b) Nivel 2- Localización: ¿dónde se ubica el área con daño?
- c) Nivel 3- Cuantificación: ¿cuál es la severidad del daño?
- d) Nivel 4- Predicción: ¿cuál sería la vida útil remanente para la estructura? O ¿cuál sería su desempeño ante la ocurrencia de un posible evento?

Las prácticas convencionales de inspección de puentes y detección de daños son primordialmente en forma visual. Estas prácticas son muy importantes ya que en forma directa permite conocer el estado de los componentes estructurales que constituyen un puente, en qué partes se presentan daños o deterioros y qué medidas correctivas se debe implementar. Sin embargo, si solamente la inspección visual es empleada, ésta tendría ciertas deficiencias tales como: a) únicamente las partes accesibles a la vista pueden ser inspeccionadas; b) los resultados de la evaluación son cualitativos, y de alguna forma, podrían ser subjetivos; c) no se puede conocer el estado global del puente como un todo ante la acción de cargas, ni predecir y detectar fallas en el comportamiento durante la operación. La inspección visual demanda un gran esfuerzo humano si la estructura es compleja y extensa; si la estructura posee partes de difícil acceso, se necesitaría de equipos especiales y también el inspector tendría que asumir un gran riesgo para realizar tal trabajo.

Aunque para hacer revisiones más profundas de la estructura se cuenta con métodos tales como el uso de ondas acústicas, métodos basados en el ultrasonido, campos magnéticos, rayos infrarrojos, radiografías, etc., e inclusive métodos directos como la extracción de núcleos para ensayos de resistencia, todos éstos necesitan de un conocimiento a priori de la localización de la zona dañada y que este lugar sea accesible.

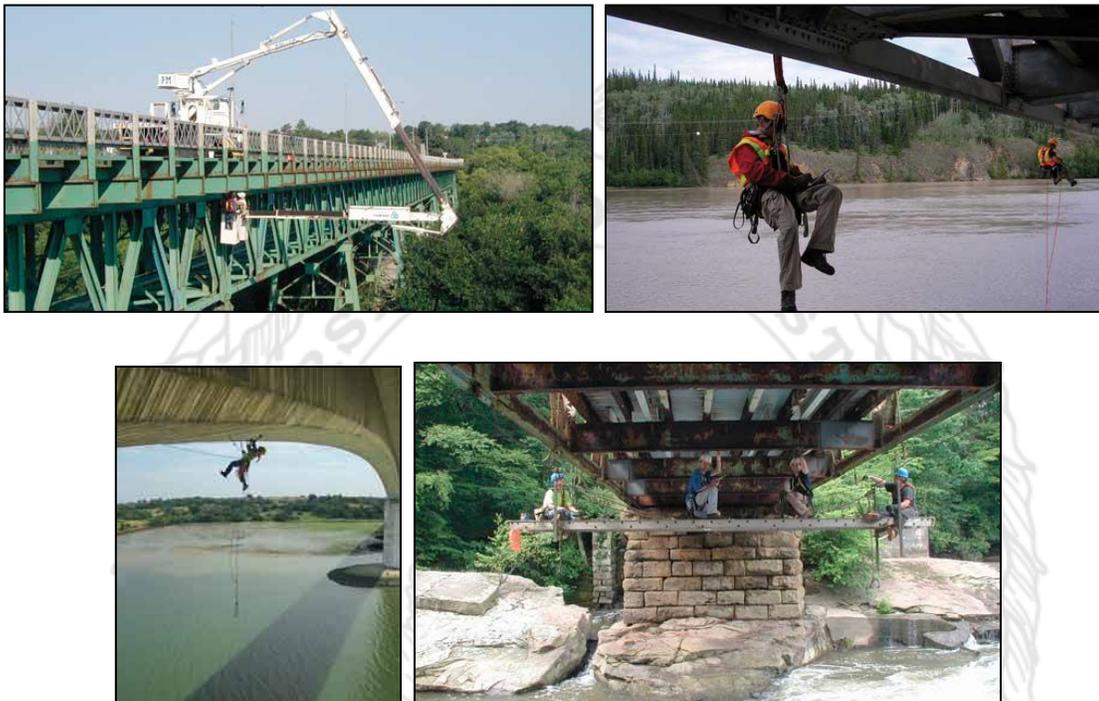
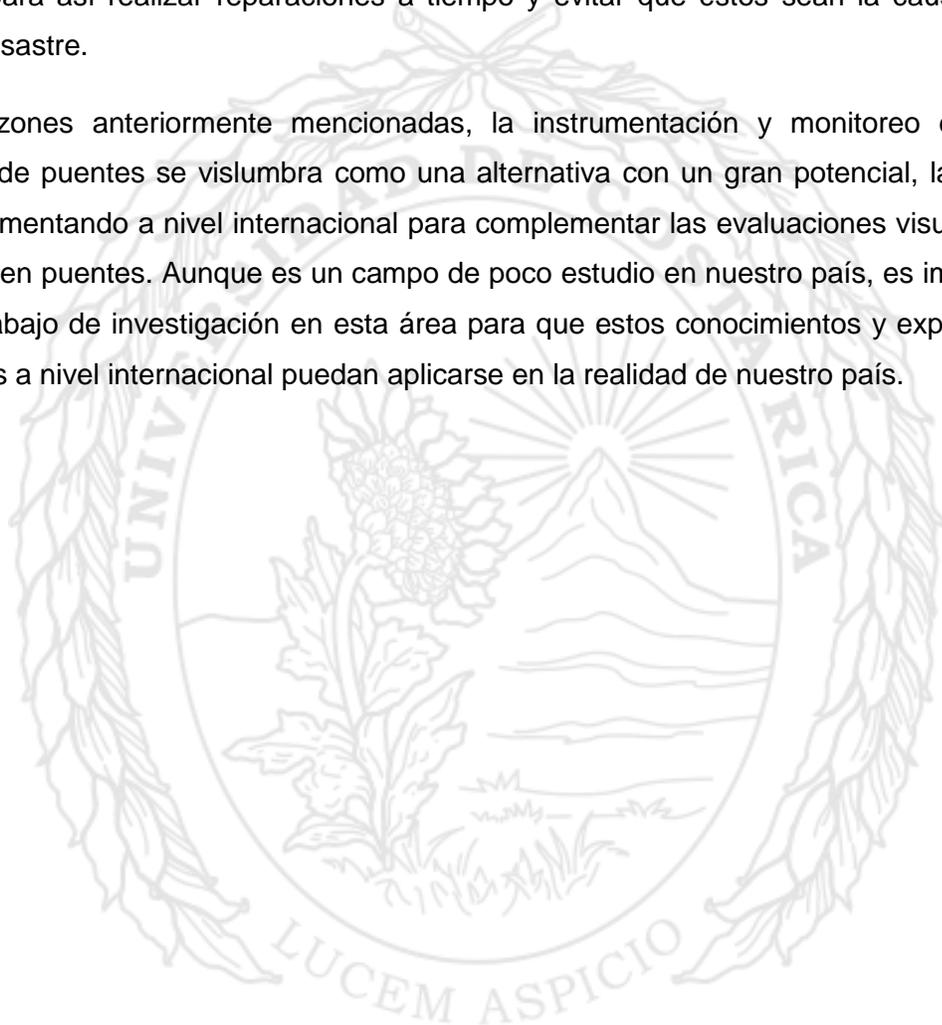


Figura 2. La difícil labor de inspección visual en puentes.

Ante estas limitantes se plantea la necesidad de formular métodos que puedan ser aplicados a estructuras complejas y que el desarrollo de tales métodos permita examinar su estado global en forma cuantitativa, e incluso en forma continua y en tiempo real. De aquí nace la metodología denominada “Monitoreo de Salud Estructural Basado en Vibraciones”. El concepto que subyace esta metodología es que, si se presentan daños en la estructura, conceptualmente éstas modificarían las propiedades mecánicas tales como la masa, la rigidez, el amortiguamiento, las frecuencias de vibración (*i.e.*, parámetros modales) y en consecuencia, afectarían a las características vibratorias de las estructuras. Si existe una

buena resolución espacial en cuanto a la distribución de sensores, y si el método de procesamiento de señales e identificación de parámetros dinámicos es lo suficientemente robusto como para extraer todos estos cambios a partir de las señales de vibración captadas, el monitoreo de la salud estructural y la identificación de daños sería factible midiendo únicamente las vibraciones de la estructura [4]. Éste ha sido el foco de esfuerzo en la investigación de los últimos años; la idea principal es lograr detectar daños a una edad temprana para así realizar reparaciones a tiempo y evitar que éstos sean la causa de un eventual desastre.

Por las razones anteriormente mencionadas, la instrumentación y monitoreo de salud estructural de puentes se vislumbra como una alternativa con un gran potencial, la cual se viene implementando a nivel internacional para complementar las evaluaciones visuales que se realizan en puentes. Aunque es un campo de poco estudio en nuestro país, es importante iniciar el trabajo de investigación en esta área para que estos conocimientos y experiencias acumuladas a nivel internacional puedan aplicarse en la realidad de nuestro país.



2. OBJETIVO GENERAL

Realizar el diagnóstico, la evaluación, y el monitoreo de puentes en Costa Rica mediante un sistema de instrumentación inalámbrico, de forma que se permita complementar la inspección visual para conocer a fondo la condición actual de la estructura, detectar daños y cuantificar el estado del deterioro; proceso que se llevará a cabo mediante el análisis estructural, identificación de sistemas y calibración del modelo de los elementos finitos, pruebas de carga en campo y otras metodologías avanzadas que se investigarán, teniendo como base las mediciones adquiridas en campo.

3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a) Investigar, comparar y aplicar las diferentes tecnologías de sensores y técnicas de MSE para conducir diagnósticos y monitoreo de puentes en Costa Rica; y adquirir, por medio del convenio equipos tecnológicos, técnicas, conocimientos y experiencias referentes al monitoreo de la salud estructural de puentes.
- b) Desarrollar estrategias, planes y metodologías de diagnóstico y evaluación para las diferentes tipologías de puentes en Costa Rica.
- c) Investigar sobre las diferentes técnicas para la detección, localización, cuantificación de los daños y metodologías para la estimación de la vida útil en puentes.
- d) Establecer una base de datos para la administración de puentes de acuerdo a los resultados obtenidos en los diagnósticos.
- e) Transferir los conocimientos y experiencias adquiridas mediante programas de capacitación a los investigadores de Lanamme y al estudiantado de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 15 de 100
------------------------------	---	------------------

4. REVISION BIBLIOGRAFICA

4.1. El marco conceptual del Monitoreo de Salud Estructural

El concepto de MSE se ha desenvuelto dentro de un marco conceptual bastante novedoso denominado “Sistemas Estructurales Inteligentes” [82], los cuales son sistemas dotados de habilidades semejantes a los que posee el mundo biológico, dentro de las cuales se puede hablar básicamente de tres componentes: (1) detección (“sensing” en inglés), (2) procesamiento de información y (3) reacción o adaptación ante el evento. Aún más, si es posible, se busca integrar la función de auto-sanación. Estas funciones son ilustradas en la **Figura 3**. El objetivo a largo plazo de las investigaciones en MSE es pretender que la infraestructura civil esté dotada de, por lo menos, las primeras dos funciones en forma integral, y que provea informaciones claves para la toma de decisiones de parte de los ingenieros.

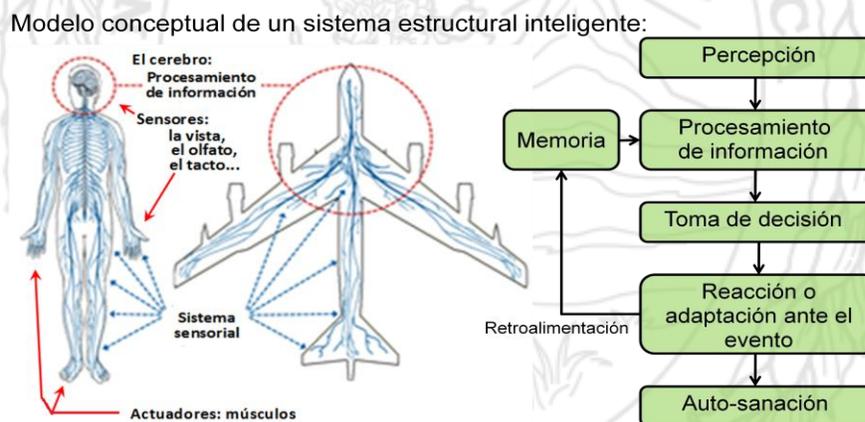


Figura 3. Concepto de un Sistema Estructural Inteligente.
 Fuente: Loh, Ching-Hsiung, 2011. [82]

Para conferirle a la estructura la capacidad de detección automática, es necesario disponer de una red de sensores sobre ella y que cada sensor esté ubicado en posiciones

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 16 de 100
------------------------------	---	------------------

estratégicamente seleccionadas para captar toda y solamente la información necesaria que permita conocer su estado en diferentes instantes de tiempo. Las señales captadas por los sensores son luego recolectadas por un sistema de adquisición de datos. Al final, lo más importante es proveer un “cerebro” a la estructura que permita filtrar, procesar, sintetizar y analizar la información recolectada, trabajo que será ejecutado por un ordenador electrónico. La información sintetizada luego es enviada al ingeniero responsable de la obra para la toma de decisiones. Este proceso conceptual es ilustrado en la **Figura 4**.

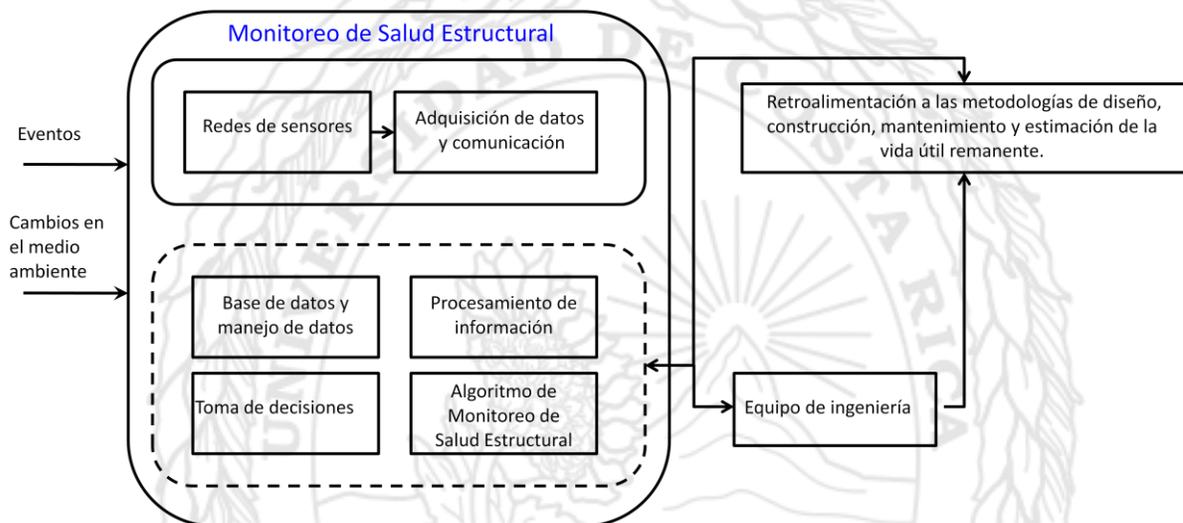


Figura 4. Concepto del Sistema de Monitoreo Estructural.
 Fuente: Loh, Ching-Hsiung, 2011. [82]

Hay alrededor del mundo modelos de infraestructuras civiles equipados con sistema integral de Monitoreo, se puede mencionar ejemplares tales como: a) el puente Tsing Ma, Hong Kong, con unos 350 canales de sensores; b) el puente Bill Emerson sobre el río Misisipí, Illinois, los Estados Unidos, con unos 84 acelerómetros instalados; c) el recién construido puente Stonecutters [6], Hong Kong, con un total de 1781 sensores instalados (ver **Figura 5**). Todas estas son obras de gran envergadura que constituyen las líneas vitales para estas ciudades. La implementación de tales sistemas de monitoreo permanente permite [57]:

- a) Controlar la calidad en la etapa de construcción.
- b) Verificar los parámetros de diseño contra la construcción in situ.
- c) Evaluar en forma continua las condiciones y los estados operacionales del puente.
- d) Emisión de alertas tempranas cuando éstas están sujetas a cargas excesivas sea causado por el tráfico, por el viento o por sismos, y se detecta daños.



Figura 5. a) El puente Tsing Ma, **b)** Stonecutters y **c)** Bill Emerson.

Para el cumplimiento de los objetivos anteriores, el monitoreo sobre los mencionados puentes deben ser en forma continua, debe haber un “cerebro” o un centro de control diseñado para procesar, sintetizar, presentar la información y que el monitoreo se dé en forma automatizada para cada puente en particular.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 18 de 100
------------------------------	---	------------------

A pesar de la gran potencial que tiene MSE, no todos los puentes son tan esenciales o críticos como para implementar un sistema integral de MSE permanente dado su costo y complejidad. De aquí se puede hablar de dos distintas metas de MSE: monitoreo continuo o evaluación en línea, y pruebas de evaluación o evaluación fuera de línea [8]. Los objetivos de cada uno se detallan en la **Figura 6**.

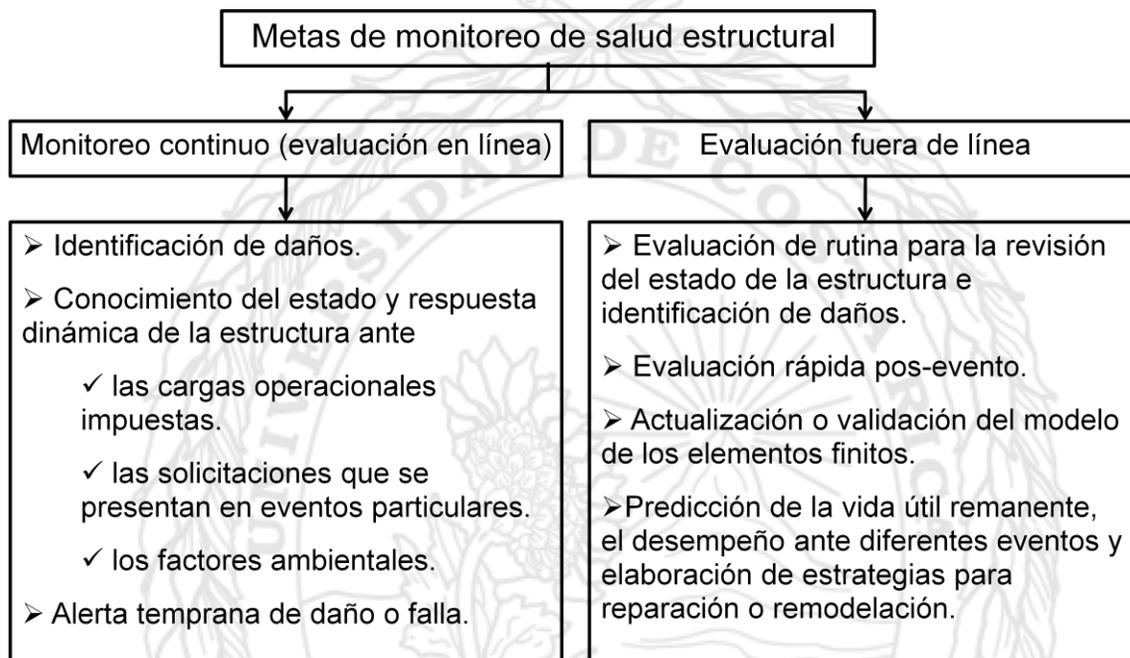


Figura 6. Metas de Monitoreo de Salud Estructural

Comúnmente, antes de implementar un sistema de monitoreo continuo en una estructura que lo merece, se debe realizar previamente una evaluación fuera de línea en forma exhaustiva para determinar las propiedades dinámicas reales de la estructura (por ejemplo: la obtención de los parámetros modales o validación del modelo de los elementos finitos de la estructura), para luego, integrar esta información básica con el software de MSE para la interpretación de resultados. Esta evaluación a priori permite disponer a la estructura con la

menor cantidad de sensores posibles pero ubicados óptimamente, para así, extraer la información esencial que permita inferir sobre el estado de la estructura.

Según Sohn (2004) [1], el proceso de MSE puede describirse como un paradigma de reconocimiento de modelos estadísticos que consta de cuatro partes:

a) Evaluación operacional:

- ✓ Identificar el tipo de daño que se desea monitorear. Por ejemplo: el estado general de la estructura o una parte específica de ella como la rigidez de las losas o la fundación.
- ✓ Identificar factores ambientales y del sistema estructural que influirán en los resultados. Por ejemplo: la variación de la temperatura, los tipos de cargas presentes, tipo de sistema estructural y su material.
- ✓ Limitaciones en la adquisición de datos durante la operación. Por ejemplo: hay puentes cuyo tráfico nunca puede ser interrumpido, sólo vibraciones del puente ante excitaciones ambientales puede ser medido; la cantidad de sensores, el nivel de las cargas presentes, etc.
- ✓ Definir los objetivos de monitoreo. Por ejemplo: la deflexión máxima, los parámetros modales como las frecuencias naturales de vibración, el amortiguamiento, forma de los modos de oscilación, cambio en las rigideces o flexibilidades, índices de no-linealidad, etc.

b) Adquisición, fusión y limpieza y discriminación de datos.

- ✓ Selección del tipo, la cantidad y la ubicación de los sensores. Por ejemplo: acelerómetros, transductores de deformación, clinómetros, extensómetros, etc.
- ✓ Selección del sistema de adquisición de datos. Por ejemplo: el sistema alámbrico es recomendado para hacer evaluaciones rápidas y cuando no hay suministro continuo de la fuente de poder. La ubicación de los sensores debe basarse en una

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 20 de 100
------------------------------	---	------------------

evaluación exhaustiva previa para que la información permita inferir sobre el estado global de la estructura.

- ✓ Integración y selección de la información de múltiples sensores. Por ejemplo: sincronización de los datos, integración de información de múltiples canales de, por ejemplo, aceleraciones, velocidades o desplazamientos relativos.
 - ✓ Filtros y remuestreo de datos digitales. Por ejemplo: para mediciones de aceleraciones, generalmente se requiere de un filtro de paso bajo, pues, los acelerómetros en sí amplifican las señales de frecuencias altas; careciendo de un filtro de paso bajo la señal será contaminada por el exceso de ruido de alta frecuencia.
- c) Extracción de características y condensación de información.
- ✓ Identificación de patrones característicos del daño a partir de señales digitales.
 - ✓ Técnicas de procesamiento de señales.
 - ✓ Identificación de parámetros del modelo dinámico (identificación de sistemas).
- d) Desarrollo del modelo estadístico para la discriminación de patrones.
- ✓ Selección del parámetro más sensible al tipo de daño que se desea monitorear. Por ejemplo: deflexión máxima, parámetros modales como las frecuencias naturales de vibración, el amortiguamiento, forma de los modos de oscilación, cambio en las rigideces o flexibilidades, índices de no-linealidad, etc.
 - ✓ Selección del modelo estadístico adecuado para el parámetro escogido.
 - ✓ Establecimiento de índices de daño con criterios estadístico-probabilísticos.
 - ✓ Modelos de inferencia sobre la vida útil residual de una estructura dañada.
 - ✓ Construcción de la curva de deterioro de la estructura en el tiempo.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 21 de 100
------------------------------	---	------------------

4.2. Implementación del Monitoreo de Salud Estructural

Las estrategias de detección de daños para alcanzar las metas de MSE se ilustran en el siguiente diagrama:

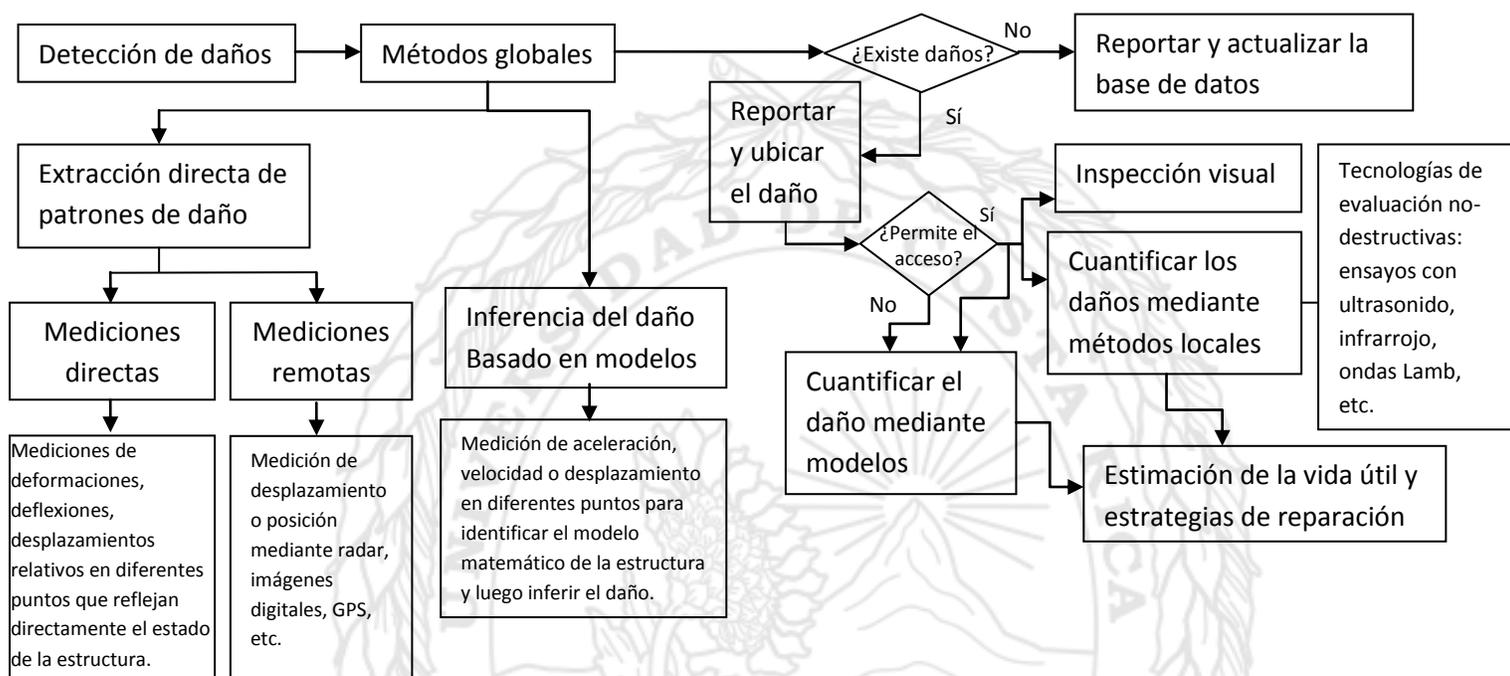


Figura 7. Esquema ilustrativo de las estrategias para la implementación de MSE.

Dependiendo del tipo de la estructura, el tipo de daño que se desea detectar, las necesidades y los parámetros de monitoreo, las estrategias a implementar pueden ser distintas de un caso a otro. Como consecuencia, los sensores, el sistema de adquisición de datos y las técnicas de extracción de información también serán distintas.

A continuación se hará una revisión bibliográfica sobre las principales tendencias que existen a nivel internacional en cuanto a la materia de MSE de puentes, tipos de sistemas de monitoreo empleados, y se comentará de sus respectivos ventajas y desventajas.

4.2.1. Plataformas tecnológicas para la Implementación de MSE

Las plataformas tecnológicas se refieren a la infraestructura física de medición, adquisición, comunicación y transmisión de datos sobre la que se cimienta y se logra plasmar todas las teorías y técnicas de MSE en la realidad, éstas constituyen el hardware de MSE. Se busca que los sensores logren captar la información con suficiente exactitud y que la plataforma de comunicación sea compatible, confiable, amigable y robusta ante interferencias.

Dado el esfuerzo que se ha proporcionado a nivel internacional en la investigación, desarrollo e industrialización de sensores novedosos e infraestructuras inteligentes de adquisición de datos en las últimas décadas, se puede encontrar productos variados y soluciones diversas tanto en la literatura como en el mercado. El Centro de Ingeniería de Puentes de la Universidad del Estado de Iowa ha presentado un informe final para el programa de Investigación en Carreteras del Estado de Wisconsin [64], donde una recopilación exhaustiva de información referente a las tecnologías desarrolladas en el marco de MSE fue realizada, y se dio especial énfasis a aquellos que tengan atributos de sistemas inteligentes. La síntesis de esta amplia revisión fue presentada en forma de base de datos donde se indica la especificación general de la tecnología, aplicabilidad, costo, limitaciones, requerimientos para ser implementado, disponibilidad y referencias de su aplicación en proyectos de puentes.

Dentro de otras informaciones revisadas también se puede mencionar el informe presentado por El Instituto de Seguridad en el Transporte e Infraestructura Inteligente de la Universidad de Drexel (Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute), EEUU, a la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration) de los Estados Unidos en el año 2003 [65]. El documento se trata de una guía modelo para el monitoreo de salud estructural de puentes de gran envergadura; se discute con bastante detalle desde el inicio hasta el fin del proceso de implementación el monitoreo de un puente, donde los objetivos, alcances, limitaciones, y consideraciones especiales son abordados en los aspectos de: **(a)** las pruebas estáticas y dinámicas; **(b)** modelado numérico de la estructura; **(c)** tipos de sensores necesarios, sus componentes, especificaciones y los criterios para la

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 23 de 100
------------------------------	---	------------------

escogencia; **(d)** tipos, componentes, especificaciones, y criterios para la selección de un sistema de adquisición de datos; **(e)** la creación de redes de comunicación; **(f)** calibración del sistema y error en la medición y **(g)** la administración de los datos y la interpretación. Al final de este informe se presenta unos 11 ejemplos de puentes instrumentados y monitoreados alrededor del mundo describiendo los tipos de sensores instalados, las diferentes mediciones realizadas y algunos resultados obtenidos. Por otro lado, Yun y Min (2010) en el artículo “Smart Sensing, Monitoring, and Damage Detection for Civil Infrastructures” [66] expuso la aplicación e integración de varios sistemas y sensores inteligentes desarrollados en los últimos años para el monitoreo tanto a nivel global como local de varios puentes de Corea.

De las innovaciones tecnológicas de mayor uso para MSE, se puede clasificar, de resumidas formas, en tres plataformas que solventan diferentes necesidades de instrumentación, adquisición, recolección y análisis de datos. Éstas se describirán a continuación.

4.2.1.1. Sensores de Fibra Óptica

La fibra óptica fue utilizada originalmente como un medio por el que se transmite información de un lugar a otro mediante haces de luz. El desarrollo de los sistemas de comunicación mediante fibra óptica ha revolucionado la industria de las tecnologías de comunicación ya que posee amplias ventajas sobre las formas tradicionales de transmisión por medio del cable del cobre.

La fibra óptica no sólo constituye un medio de transmisión de información, sino en sí también es un sensor. La aplicación de la fibra óptica en el monitoreo de infraestructuras civiles consiste básicamente en la medición de temperatura, presión, deformaciones (galgas cortas) y desplazamientos relativos entre dos puntos de una estructura (galgas largas), aunque también existen acelerómetros de fibra óptica. En comparación con los métodos tradicionales, como el uso de galgas mecánicas, eléctricas o electromecánicas para la medición de deformaciones o desplazamientos, el uso de la fibra óptica presenta una serie de ventajas que se lista en los siguientes puntos [9]:

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 24 de 100
------------------------------	---	------------------

- ✓ Inmunidad ante la interferencia de campos electromagnéticos, líneas de alto voltaje, cambios de temperatura y factores ambientales tales como corrosión.
- ✓ Baja atenuación de la señal que permite transmisiones a larga distancia.
- ✓ Permite mediciones de deformaciones o desplazamientos dinámicos.
- ✓ Son livianos y de poco volumen.
- ✓ La precisión no se deteriora con el paso del tiempo.
- ✓ Alta sensibilidad: puede alcanzar hasta 2 μm .
- ✓ Multiplexación: permite formar redes de sensores.
- ✓ Los sensores pueden embeberse en materiales compuestos tales como en concreto creando “estructuras inteligentes”.

Dadas estas virtudes, la aplicación de la fibra óptica como un sistema integral alámbrico en el monitoreo de infraestructuras civiles se ha expandido enormemente en los últimos años.

Existen varios tipos de sensores de fibra óptica de aplicación común en el monitoreo de puentes [10, 11]:

a) Sensores de baja coherencia (Low-coherence sensor)

El sensor de baja coherencia [12] fue desarrollado por el Instituto Tecnológico Federal Suizo en Lausanne (Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, EPFF), es industrializado y comercializado por la compañía Suiza “SMARTEC” bajo el nombre “sistema SOFO” (por las siglas en Francés de Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques, traducido al español como Monitoreo de Estructuras por Fibra Óptica).

El sistema SOFO consiste básicamente en extensómetros de galga larga la cual utiliza dos fibras ópticas unimodales (permiten una mayor distancia de transmisión) como una unidad: una es llamada fibra de referencia y se encuentra totalmente libre de esfuerzos; mientras la otra es llamada fibra de medición y se encuentra adherido a la estructura. La zona en que la fibra de medición está adherida a la estructura es llamada la zona activa, las zonas en que la fibra no está adherida se llama zona pasiva. El desplazamiento relativo entre dos puntos de una estructura hará cambiar la longitud de la fibra de medición, en comparación con la fibra de referencia y basado en el concepto óptico de interferometría de baja coherencia, se puede interpretar la deformación mediante el Doble Interferómetro de Michelson (Double-Michelson Interferometer). El sistema SOFO es ilustrado en la **Figura 8** y la **Tabla 1** presenta un resumen las características del mencionado sistema.

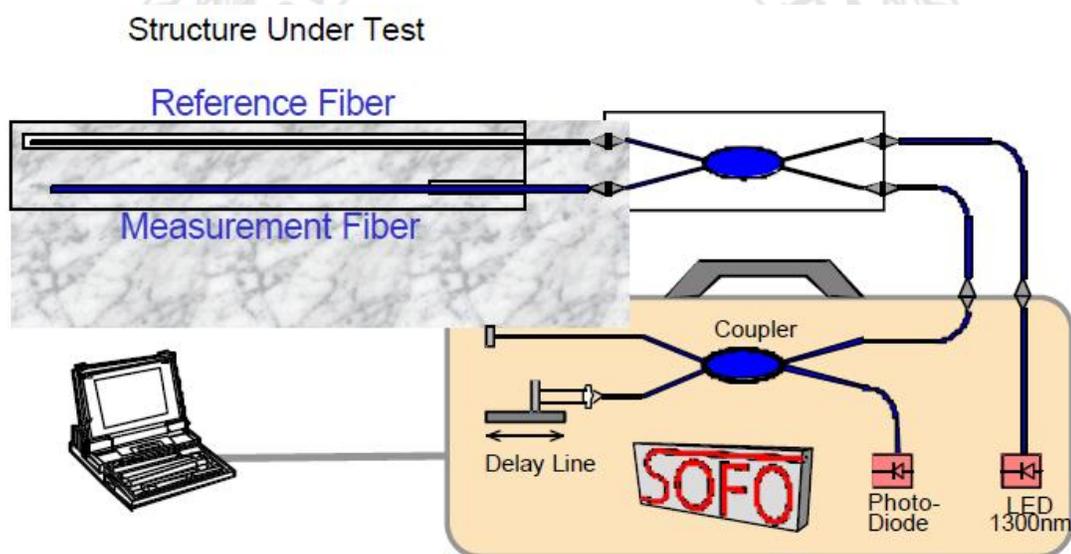


Figura 8. Ilustración esquemática del sistema SOFO.
 Fuente: Vurpillot et al., 1997. [16]

Tabla 1. Características del sistema SOFO.

Longitud de la galga de medición	De 20 cm a 10 m para sensores estándares, y hasta 50 m para sensores especiales.
Longitud del cable (para la transmisión)	Hasta 5 km
Resolución	2µm independientemente de la longitud de la galga
El rango dinámico de los sensores	Permiten 1% de elongación y 0.5% de compresión para sensores estándares pero puede modificarse para sensores especiales
Precisión	Menor que el 2% de la deformación medida
Rapidez de medición	Menos de 10 segundos por cada medición (Sólo permite obtener mediciones estáticas, para la captura de deformaciones dinámicas; se encuentra aún bajo investigación desarrollo)
Estabilidad	Desviación no es observable por lo menos en 4 años

Fuente: Inaudi et al., 1999 [13]

La aplicación del sistema SOFO en el monitoreo de puentes mide principalmente la curva de deflexión del puente, esta última se infiere mediante la doble integración de la función de curvatura para cada celda de medición [12]. La curvatura de un punto de medición puede hallarse con la siguiente expresión:

$$\kappa(x) = \frac{\epsilon(x)}{y} = \frac{d^2w(x)}{dx^2} \quad (1)$$

Donde $\kappa(x)$ es la curvatura del punto, $\epsilon(x)$ es la deformación unitaria ubicada a una distancia y respecto al eje neutro. Esta expresión conlleva la hipótesis de que la deflexión es despreciable comparada con la longitud de la celda, el momento de inercia es constante y que el material es linealmente-elástico a lo largo de la celda de análisis. Para poder obtener la curvatura en un punto dado, es necesario colocar como mínimo, dos sensores en una sección transversal, uno sobre el eje neutro trabajando en compresión y el otro por debajo

trabajando en tensión, y asumiendo que la ley de conservación de Bernoulli (secciones planas se mantienen planas después de aplicar carga) se cumple [17], esto permite interpolar la ubicación del eje neutro y así, determinar la curvatura de un punto. Luego, la curvatura en función de la distancia x a lo largo del eje de la celda puede expresarse como una función polinomial de grado n :

$$\kappa(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n \quad (2)$$

El grado de polinomio requerido depende generalmente del tipo de carga presente. Por ejemplo, para una carga simétrica uniformemente distribuida la curvatura sería un polinomio de grado 2 y con tres puntos de medición es suficiente hallar la función de curvatura mediante regresión estadística. La cantidad de puntos de medición requerida por cada celda dependerá del grado de polinomio que se necesita para interpolar la función de la curvatura. Generalmente en los extremos de las celdas de medición los instrumentos de posicionamiento absoluto tales como GPS, clinómetros, o nivel deben estar presentes para obtener información de las condiciones de frontera que son necesarias para la doble integración [10]:

$$w(x) = \iint \kappa(x) dx dx \quad (3)$$

de la cual se obtiene la función de deflexión de la sección de análisis. Este método de doble integración de la función de curvatura es validado mediante diversas pruebas de laboratorio [17, 18, 19, 23].

De los puentes instrumentados con la tecnología SOFO se puede destacar los siguientes aspectos: Inaudi et al. (1999) y Vurpillot et al. (1997) expusieron en "Bridge Deformation Monitoring with Fiber Optic Sensors" y "Bridge spatial displacement monitoring with 100 fiber optic sensors deformations: sensors network and preliminary results" [13,16] la implementación del sistema de monitoreo SOFO en el puente de concreto Lutrive con 40

sensores, y el puente Versoix con más de 100 sensores instalados durante la etapa constructiva de la readecuación estructural; ambos puentes son de concreto preesforzado ubicados en Suiza. La curva de deflexión se estimó integrando dos veces la función de curvatura. El puente Lutrive es un puente tipo cajón que sufre de deflexiones permanentes sustanciales de hasta 16 cm; se reforzó el puente mediante cables de postensionamiento y ha sido monitoreado con un sistema de nivel hidrostático desde los años 1970's [14].

Es interesante notar que Vurpillot et al. (1997) [16] resaltaron la importancia de la redundancia en cuanto a los puntos de medición, pues, en total de unos 100 sensores instalados, aquellos embebidos dentro del concreto hubo 9 dañados: algunos se dañaron durante la construcción y otros fueron dañados en la zona pasiva de transmisión.

En el artículo "Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects" [15] Inaudi (2010) resumió los resultados de monitoreo de 40 puentes alrededor del mundo en los últimos 12 años, dentro de los cuales 18 son puentes nuevos, 13 son puentes existentes y 9 son puentes en los que el sistema se instalaron durante el trabajo de reforzamiento. Para algunos el sistema se mantuvo in situ durante unos cuantos meses para controlar la calidad de la etapa constructiva, tales como medir la temperatura en el interior del concreto y monitorear el proceso de retracción, etc.; mientras que en otros se quedaron permanentes. Se reveló que el costo de instalación del sistema por puente anda alrededor de los \$50,000 dólares cuando el número de sensores no superan los 20; mientras que para proyectos mayores el costo excede los \$500,000 dólares con más de 100 sensores. El costo sólo incluye el equipo y la instalación sin tomar en cuenta el costo de análisis de datos y de mantenimiento.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 29 de 100
------------------------------	---	------------------

b) Sensor Interferométrico Extrínseco Fabry-Perot

El sensor Interferométrico Extrínseco Fabry-Perot (Extrinsic Fabry-Perot Interferometric sensor, EFPI por sus siglas en inglés) es un sensor de fibra óptica cuyo funcionamiento se basa en la interferencia de dos ondas de luz. EFPI consiste en una fibra de entrada/salida y otra fibra reflectora alineada con la fibra anterior, pero dejando un espacio vacío conformado por un tubo de sílice. El sistema puede entenderse como un interferómetro de dos haces de luz: parte de la luz láser que llega al terminal de la fibra de entrada/salida es reflejada en la interface fibra/aire (R1); la luz restante continúa su propagación a través del vacío (L) y el segundo reflejo ocurre en la interface aire/fibra (R2). R1 es la reflexión de referencia mientras que R2 es la reflexión propiamente del sensor. Estas dos ondas de luz podrían interferir constructiva o destructivamente basado en el desfase de los dos haces reflejados. Así que, si el tubo de sílice es adherido a una superficie o si es embebido rígidamente dentro de una matriz, la deformación del medio hará cambiar de longitud a la parte vacía. Dado que la longitud del sensor es conocida, la deformación del medio puede entonces calcularse con exactitud basado en el cambio de interferencia obtenido [26].

Las aplicaciones del sensor EFPI son amplias. Zou et al. (2012) [29] estudiaron experimentalmente el proceso de hidratación de concreto usando EFPI como sensor de temperatura. En aplicaciones prácticas en el monitoreo de puentes, Tennyson et al. (2001) [27] implementaron el sistema en el monitoreo del puente Joffre ubicado en Quebec, Canadá, el cual fue construido en 1950 y con el paso del tiempo presentó evidencias de deterioro severo por las cual fue reconstruido y reabierto al tránsito en 1997. El puente fue monitoreado con más de 180 sensores de diferentes tipos y embebidos dentro de la tela de reforzamiento del tipo Polímero Reforzado de Fibra (Fiber Reinforced Polymer).

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 30 de 100
------------------------------	---	------------------

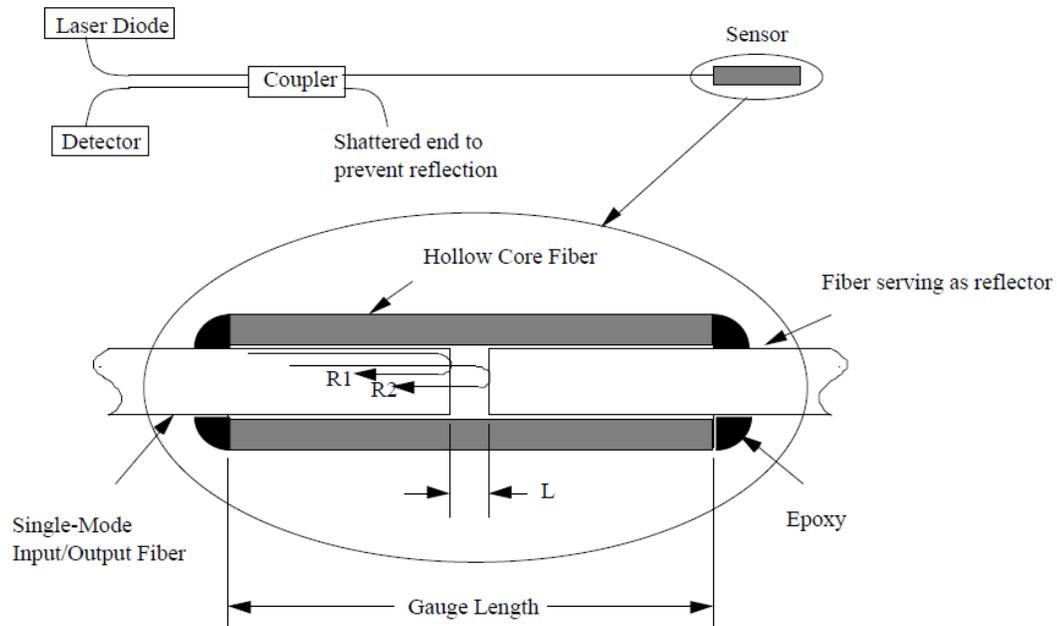


Figura 9. Ilustración del funcionamiento del Sensor Interferométrico Extrínseco Fabry-Perot.
 Fuente: Scott A. Meller, 1996 [26].

c) Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo

El Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR por sus siglas de inglés) es un instrumento óptico-electrónico usado para medir la atenuación de la luz a lo largo de la fibra además de la longitud de la fibra óptica. Un OTDR dispara en la fibra óptica una serie de pulsos ópticos y estudia la relación entre la luz dispersada y la reflejada desde diferentes puntos de la fibra debido a cambios en el medio o en el índice de refracción. El funcionamiento de este dispositivo es el equivalente en óptica al reflectómetro en el Dominio de Tempo (Time Domain Reflectometer, TDR), que mide los cambios producidos en la impedancia de un cable coaxial debido a las deformaciones que éste sufre.

Un ejemplo de aplicación de este instrumento es en la detección y localización de grietas [30]. La idea consiste en adherir la fibra óptica con cierto ángulo de inclinación respecto a la dirección en que se espera la formación de grietas. Al abrirse las grietas, éstas forzarán a la fibra a flexionarse; esta flexión inducirá pérdidas en la potencia de la luz y el uso del OTDR permite localizar la posición de las grietas basado en el tiempo en que ocurre la pérdida de potencia al disparar haces de luz.

Otro acercamiento alternativo usando OTDR es mediante la dispersión de Brillouin, denominado OTDR de Brillouin (BOTDR). La dispersión de Brillouin surge de la interacción entre las ondas ópticas y acústicas que se propagan dentro del mismo medio físico. La intensidad y la frecuencia de la luz reflejada por la dispersión de Brillouin son afectadas tanto por la densidad del medio de propagación como por el cambio de presión, temperatura y deformación del mismo. Al analizar la diferencia de llegada del pulso en el tiempo, hasta la fuente de emisión, de parte de la luz de dispersión y de la luz reflejada, se logra extraer información sobre la ubicación espacial de la deformación.

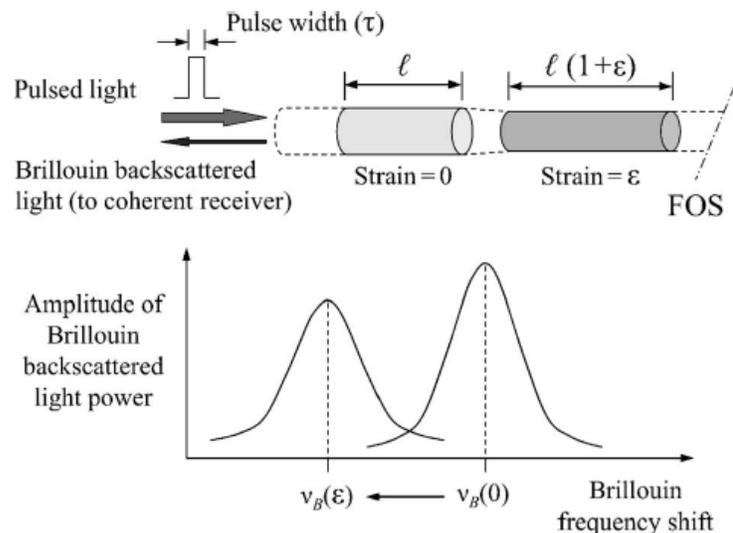


Figura 10. Desplazamiento en la frecuencia de Brillouin en un sensor de fibra óptica sujeto a deformaciones inducidas por la temperatura o acciones mecánicas.

Fuente: Matta et al., 2008 [31].

De los ejemplos de aplicación del sistema BOTDR se puede mencionar el puente No. A6358 de la ruta 54 sobre el río Osage River de los Estados Unidos [31], el cual es un puente metálico. Matta et al. (2008) realizaron pruebas de carga estática y dinámica midiendo las deformaciones tomadas con el sistema en mención. Los sensores fueron adheridos superficialmente a las vigas metálicas principales, se obtuvo el perfil de las deformaciones unitarias a lo largo de la viga para luego, convertirlas en el perfil de deflexión estática del puente y validarlas contra la deflexión medida por el sistema de estación total. La evaluación fue realizada comparando la deflexión y las deformaciones unitarias obtenidas en campo contra las que se calcula con el modelo de los elementos finitos del puente. Otra aplicación se puede encontrar en el puente Götaälvbron que cruza sobre el río Gota, ubicado en la ciudad Gothenburg, Suecia [32]. Glišić et al. (2007) instalaron un sistema de monitoreo continuo basado en la dispersión de Brillouin (denominado SMARTape) en el puente para la detección de grietas y monitoreo de deformaciones con un total de 20 circuitos cerrados de fibra óptica.

d) Fibras de Rejilla de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG)

Las fibras ópticas que se basan en la modulación de la longitud de onda de luz son denominadas “fibras de Rejilla de Bragg” (Fiber Bragg Grating, FBG en sus siglas de inglés). El sensor FBG actúa como un filtro selectivo de longitud de onda de luz que refleja únicamente aquella parte del espectro de luz que satisface las condiciones de la Rejilla de Bragg dada (refleja la longitud de onda correspondiente a la reflectividad máxima de la rejilla) [20]. Esta operación es ilustrada en la **Figura 11**. Cuando la rejilla se deforma axialmente, esto hace que la longitud de onda de la reflectividad máxima cambia y consecuentemente, habrá un desplazamiento en el espectro de luz reflejado en cuanto a su longitud de onda. El cambio de la longitud de onda se relaciona con la deformación unitaria en forma lineal con la siguiente ecuación [19]:

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 33 de 100
------------------------------	---	------------------

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\rho_e \varepsilon$$

(4)

Donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, ρ_e es la constante foto-elástica efectiva, y ε es la deformación unitaria experimentada por la rejilla.

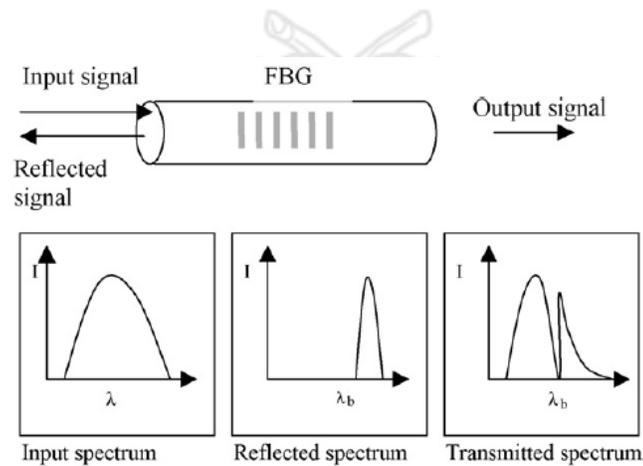


Figura 11. Ilustración del funcionamiento de la rejilla Bragg.
 Fuente: Majumder et al., 2008 [19].

La longitud de onda de Bragg también cambia linealmente con la variación de la temperatura, de manera que la deformación unitaria medida debe corregirse por temperatura. Ésta puede realizarse basada en la curva de calibración del fabricante (si existe), o mediante la combinación con diferentes sensores, como por ejemplo, corregirse con otro FBG de referencia. Inclusive, ya existen también sensores FBG con compensación automática por temperatura [25].

La propiedad selectiva de las rejillas permite la conexión en serie de múltiples rejillas con reflectividades diferentes (diferente espectro de reflejo) en una sola ruta, permitiendo la multiplexación por división de longitud de onda. Esto se ilustra en la **Figura 12**.

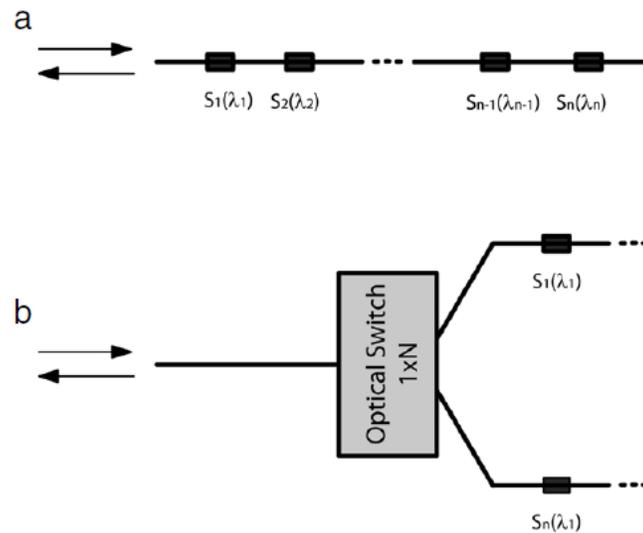


Figura 12. La multiplexación por división de longitud de onda.
 Fuente: Rodrigues et al., 2010 [20].

La aplicación de FBG en el monitoreo puede darse mediante dos enfoques. Uno es el monitoreo propiamente de micro-deformaciones usando galgas cortas adheridas en las superficies de las conexiones o zonas susceptibles a deterioro por fatiga [21], o también instaladas y embebidas mediante fijadores especiales dentro del concreto [20]. El otro tendría la forma de galgas largas (Figura 13) de una forma similar al sistema SOFO, y se instalarían mediante un sistema de montaje superficial para medir las macro-deformaciones (deformaciones promedio o desplazamientos relativos entre dos puntos) [19, 22].

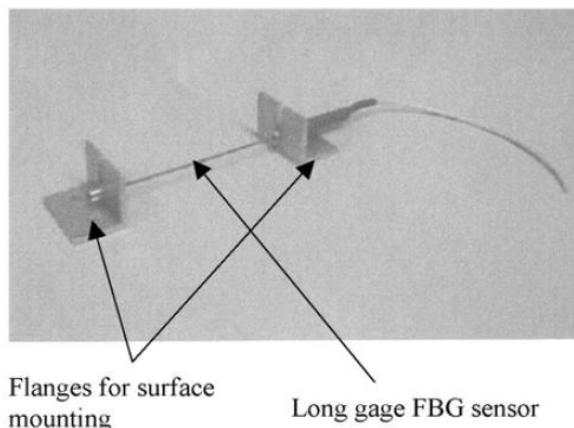


Figura 13. Sensor FBG de galga larga con dispositivos para el montaje superficial.
 Fuente: Majumder et al., 2008 [19].

Dentro de las numerosas aplicaciones de sensores FBG se puede citar el trabajo realizado por Schulz et al. (2000) [22], donde se refiere a la aplicación de sensores de galga larga mediante fijadores superficiales. La longitud de las galgas se extiende desde los 2.5 cm hasta 100 cm, mide deformaciones dinámicas con una tasa de muestreo de hasta 1 kHz. Un total de 26 sensores de galga larga fueron instalados en el puente Horsetail Falls ubicado Oregon para un período de 2 años iniciando en 1998. Los sensores son recubiertos por la tela de reforzamiento a la estructura. También en el año 2000, 14 de los mismos tipos de sensores fueron instalados en puente Sylvan igual ubicado en Oregon. Afonso Costa y Figueiras (2012) resumió en “Fiber optic based monitoring system applied to a centenary metallic arch bridge: Design and installation” [24] una lista de aplicaciones de sensores de fibra óptica en puentes de diferentes tipos, y expuso en detalle la instrumentación permanente mediante el sistema de fibra óptica y sensores FBG para el monitoreo de la deformación axial de las barras y los ciclos de fatiga de las juntas y conexiones del puente Luiz I, ubicado en Portugal, el cual es una cercha espacial metálica en forma parabólica. Rodrigues et al. (2010) [20] se refirieron a su aplicación en el monitoreo permanente del puente Lezíria del autopista A10-Bucelas/Carregado/IC3 de Portugal, mediante la instalación de 30 rejillas de Bragg tanto por encima como por debajo de la viga cajón para el monitoreo de deformaciones y 11 rejillas de Bragg integradas con el sistema de nivel hidrostático para

el monitoreo de deflexión vertical en 11 puntos, junto con 10 sensores de temperatura en 4 secciones representativas de la estructura.

Vale la pena mencionar que la compañía de tecnologías de fibra óptica Micron Optics (<http://www.micronoptics.com>) la cual cuenta con su representante en Costa Rica, inició su carrera con el desarrollo de las fibras tipo Fabry-Perot para los sistemas de comunicación, sin embargo, para el monitoreo de estructuras ofrecen en su catálogo sensores para la medición de deformación basados propiamente en la tecnología FBG, y cuenta con sensores de galga corta y de galga larga, tanto para el montaje superficial o para estar embebidos en el material compuesto. Las aplicaciones reales de estos sensores pueden encontrarse en el reporte de Zhou et al. (2003) [28].

Por otra parte, es interesante notar que en la tesis de maestría de C. T., Shih (2004) [25], se realizó una investigación sobre el monitoreo de la deformación de un riel mediante sensores FBG. Basado en sus experiencias adquiridas se dieron las siguientes observaciones en cuanto a la instalación y operación de sistemas de fibra óptica:

- ✓ Se ha presentado varias situaciones de rotura en la fibra óptica durante el monitoreo (debido a una mala instalación), lo cual requirió de técnicos especiales en fibra óptica para efectuar las labores de reconexión.
- ✓ El sistema de fibra óptica ha colapsado por completo una vez debido al ataque de roedores, por lo que una protección superficial o recubrimiento adecuado a las fibras es recomendada para su durabilidad.
- ✓ La manipulación de la fibra debe ser con sumo cuidado, hay que evitar someter la fibra a un exceso de flexión o torsión lo que podría provocar la rotura de la fibra.
- ✓ Antes de proceder a la captación de datos de deformación, se recomienda aplicar en las fibras un pre-esfuerzo para que el sensor provea mediciones estables tanto en tensión como en compresión.
- ✓ Para el buen funcionamiento del sistema de fibra óptica se necesita una fuente de poder con corriente estable, si no, la medición sería ruidosa. También hay que evitar máquinas o instrumentos que generan radiaciones de campo eléctrico o electromagnético cercano

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 37 de 100
------------------------------	---	------------------

a la unidad central de procesamiento (analizador de espectros ópticos y dispositivos de adquisición de datos). Debe proveerse de un ambiente aireado para la unidad central de procesamiento para evitar el sobrecalentamiento, lo cual induciría error en el análisis. En la misma referencia [25] dio una estimación de costos de instalación de los sensores FBG en el riel, los cuales se resumen en la **Tabla 2**, junto a una comparación de precios de distintas tecnologías de fibra óptica, la cual se presenta en la **Tabla 3**.

Tabla 2. Costo de Instalación de un sistema de fibra óptica.

Nombre de la compañía	Fiber, Inc. (http://fiberausa.com/home)
Equipo de adquisición de datos (incluye analizador de espectros ópticos, generación de la luz láser y otros accesorios)	Aprox. \$ 33,000 dólares por juego.
Sensores FBG insensibles a la temperatura	Aprox. \$ 350 dólares por juego
Costo de mano de obra para la instalación	Aprox. \$ 600 dólares por día
Costo de mano de obra para la conexión de sensores	Aprox. \$ 600 dólares por noche
Costo de mano de obra para la reparación	Aprox. \$ 300 dólares por noche
Duración de la instalación	7 días
Longitud de riel instalado	20 metros
Costo total	Aprox. \$ 3000 dólares por metro lineal

Fuente: C. T., Shih, 2004 [25].

Tabla 3. Comparación de precios y especificaciones de varias tecnologías de fibra óptica.

Tipo de sensor	Precio unitario aproximado de los sensores	Precio aproximado del sistema de adquisición de datos	Resolución de la medición	Compañía
Sensores interferométricos de baja coherencia (sistema SOFO)	\$ 1,600 USD	\$ 100,000 USD	2µm. Medición dinámica en proceso de desarrollo.	SMARTEC, Suiza.
Sensores fibra óptica de rejilla de Bragg (FBG)	\$ 100 USD	\$ 30,000 USD	1µm para monitoreo a corto plazo y 5µm a largo plazo. Medición dinámica: 20 Hz.	Broptics y Inventive Fiber Pte Ltd, Singapur.
Sensores reflectómetro del dominio del tiempo	> \$1000 USD	\$ 250,000 USD	----	Endo, Japón

Fuente: C. T., Shih, 2004 [25].

4.2.1.2. Sensores Inalámbricos

Los sensores inalámbricos nacieron para simplificar la ardua tarea que era la instrumentación de estructuras civiles; el cableado del sistema para estructuras de gran envergadura implica elevados costos y su instalación es sumamente engorrosa. En el artículo de revisión de la tecnología inalámbrica [48] Lynch y Loh (2006) señalan que el costo de instrumentación de un edificio alto excede los \$5,000 USD por canal, y para el famoso puente Tsing Ma ubicado en Hong Kong, el costo total de instalación de los 350 canales de sensores excede los 8 millones de dólares estadounidenses.

La idea original del desarrollo de sensores inalámbricos era para reducir costos y facilitar el trabajo de instrumentación. Un sensor inalámbrico como se refería la gente no es, de hecho, un sensor en específico sino es una unidad de procesamiento y transmisión inalámbrica que permite conectarse con sensores tradicionales electrostáticos, por ejemplo, con deformímetros (strain gages), acelerómetros, LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers), inclinómetros, etc. Por tanto, un sensor inalámbrico provee una plataforma de computación y comunicación inalámbrica entre los nodos de los sensores, el nodo host o anfitrión y el usuario final. Asimismo, la integración de un núcleo de procesamiento y computación en el mismo sensor inalámbrico lo convierte en una unidad inteligente que permite ejecutar algoritmos paralelos para el monitoreo y detección de daños, y el control en tiempo real en una estructura.

La ventaja del sistema inalámbrico en comparación con el sistema tradicional es su gran facilidad y versatilidad en cuanto a la instalación; la desventaja es quizás la estabilidad de transmisión durante el monitoreo continuo, pues, la transmisión inalámbrica podría caerse cuando se presenta tormentas eléctricas o lluvias de intensidad excesiva. Otro aspecto a tomar en cuenta es el suministro de energía, pues, aunque existen baterías recargables que podrían suministrar energía durante unos 3 días de medición continua, las cuales podrían servir para diagnósticos tipo "fuera-de-línea" (offline evaluation), si se requiriera de una instalación permanente y que su monitoreo sea en tiempo real, se necesitaría de una fuente de energía continua y estable. Este último tipo de fuente se puede lograr mediante una línea

de alimentación o también existe otras soluciones como el uso de paneles solares o recolectores de energía vibratoria proveniente de la estructura misma.

En el mismo artículo de revisión de las tecnologías inalámbricas para el MSE [48] señala que existe dos plataformas de unidades inalámbricas: una plataforma para fines académicos y otra comercial.

La plataforma académica inicia con el prototipo diseñado en la universidad de Stanford denominado Sistema Modular Inalámbrico de Monitoreo (Wireless Modular Monitoring System, WiMMS por sus siglas de inglés) para ser usado en infraestructuras civiles. El sistema fue la base para el desarrollo de las futuras generaciones de sensores inalámbricos, y como lo indica Lu y Loh (2010) está constituido básicamente por [49]: **1)** un microcontrolador que coordina todas las funciones integradas en el sistema y que permite recibir y ejecutar comandos de forma remota; **2)** una memoria RAM; **3)** un módulo de radio inalámbrico; **4)** un Convertidor Análogo-Digital con ganancia programable y **5)** la unidad de suministro de energía. Las investigaciones posteriores se han enfocado en la optimización del uso de energía, desarrollo e implementación de algoritmos paralelos de computación explotando al máximo la capacidad del microcontrolador, mejoras en la estructura y protocolo de transmisión, y en el control activo o semi-activo de la estructura mediante sistema inalámbrico.

De la plataforma comercial, básicamente se puede separar en dos plataformas [48]: una plataforma de código abierto y otra de código no abierto. La plataforma de código abierto, inicialmente desarrollada por la universidad de California-Berkeley y luego comercializada por Crossbow (<http://bullseye.xbow.com:81/>), denominada como los sensores inalámbricos Mote, han adquirido una gran popularidad debido a que tanto el diseño de su hardware como de su software son abiertos al público; asimismo, Intel también produjo su propia versión de Mote denominado iMote. Las otras plataformas como el sistema que ofrece Microstrain (<http://www.microstrain.com/>), Sensametrics (<http://www.sensametrics.com/>), BDI (<http://bridgetest.com/>), Ember (<http://www.ember.com/>) y National Instruments

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha de emisión: 14 de febrero del 2013	Página 40 de 100
------------------------------	--	------------------

(<http://www.ni.com/wsn/>), en contraste con los Mote's, sus plataformas son propiedades de las compañías; el diseño y los códigos no son abiertos.

La aplicación de los sensores inalámbricos en el diagnóstico y monitoreo de puentes es sumamente popular, y en la mayoría de los casos su uso está acompañado de acelerómetros. Su popularidad no sólo es debido a su bajo costo, rapidez y facilidad de su instalación sobre puentes, pues, es simplemente colocar y empezar a recolectar información; sino también a que hay en el fondo métodos y modelos matemáticamente rigurosos de dinámica de estructuras e identificación de sistemas. Esto gracias a que los acelerómetros (o acelerógrafos) son los instrumentos utilizados en las pruebas dinámicas de estructuras civiles (para obtener sus parámetros modales como frecuencia, amortiguamiento y formas modales) y en las investigaciones sísmicas de los edificios.

Las técnicas de MSE basado en vibraciones se basan prácticamente en la medición de aceleraciones de la estructura ante excitaciones ambientales; abundan en la literatura el acercamiento denominado “análisis modal” el cual es el método más común en la evaluación de las propiedades dinámicas del puente y en su monitoreo continuo. Ren y Zong (2004) reportó en “Output-only modal parameter identification of civil engineering structures” [56] la identificación de las frecuencias modales, el amortiguamiento y las formas modales (análisis modal) de un puente de arco tubular metálico relleno con concreto usando 9 acelerómetros pero haciendo fusión de las mediciones en 4 configuraciones y en tiempos distintos, manteniendo un acelerómetro como punto de referencia fija. Qin et al. (2001) [61] reportó la identificación del puente Tsing Ma ubicado en Hong Kong mediante la medición de vibraciones del puente bajo efectos ambientales con 13 acelerómetros pero empleando 15 configuraciones, con 3 sensores de referencia para cubrir todo el puente y para un total de 170 grados de libertad medido. Pridham y Wilson (2002) reportó en “Subspace Identificación of Vincent Thomas Suspension Bridge” [62] la identificación de los parámetros modales del puente colgante Vincent Thomas ubicado en Los Angeles, EEUU, igual basado en vibraciones ambientales del puente; en total 10 grados de libertad fueron medidos usando 2 configuraciones y con 2 sensores fijos como referencia. En “Highway Bridge Assessment Using an Adaptive Real-time Wireless Sensor Network” [63] Whelan et al. (2009) reportaron

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 41 de 100
------------------------------	---	------------------

el estudio de un puente de autopista RT345 del estado de Nueva York al llegar al final de su servicio. El puente fue instrumentado y las vibraciones de la estructura excitadas por el ambiente fueron medidos simultáneamente con 60 acelerómetros. Además, 30 transductores de deformación reutilizables de la compañía The Bridge Diagnostics, Inc (BDI) fueron también instalados para conducir una evaluación convencional de la capacidad de carga del puente. Los datos de la deformación fueron transmitidos de igual forma mediante una plataforma inalámbrica.

Peeters [57] demostró mediante un experimento realizado en el puente Z-24 ubicado en Suiza, el cual fue sujeto a una secuencia de escenarios de fallas programadas, que las frecuencias y formas modales son sumamente sensibles a daños y deterioros en los apoyos y en las conectividades del puente. No obstante, para los daños leves propiamente en la superestructura como en la losa o en las vigas, el cambio reflejado en las frecuencias modales no es tan perceptible. Además de la apreciación directa en el cambio de los parámetros modales como la frecuencia y formas modales, diferentes técnicas de identificación y localización de daño puede ser aplicado [58], tales como la observación del cambio de la curvatura, cambio en la matriz de flexibilidad, cambio en la matriz de rigidez y otros, donde estas últimas matrices deben ser identificadas a partir de los parámetros modales o mediante técnicas de actualización del modelo de los elementos finitos. Aplicación y comparación entre los mencionados métodos de identificación y localización del daño se puede encontrar en “Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I. Experiment” y “Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study” [59, 60]. Otra aplicación interesante de MSE basado en vibraciones se puede encontrar en “Rapid Impact Testing for Quantitative Assessment of Large Populations of Bridges” [67] donde Zhou et al. (2011) describieron la creación de un sistema denominado Evaluación Global de la Estructura (Global Structure Assessment, GSA), el cual es un remolque equipado con un martillo de impacto y brazos extensibles integrados con acelerómetros (**Figura 14**). El impacto que genera el martillo provoca oscilación libre en la superestructura, información que será recolectada por los acelerómetros y de esta forma se puede evaluar rápidamente el estado de la superestructura mediante el análisis modal.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 42 de 100
------------------------------	---	------------------

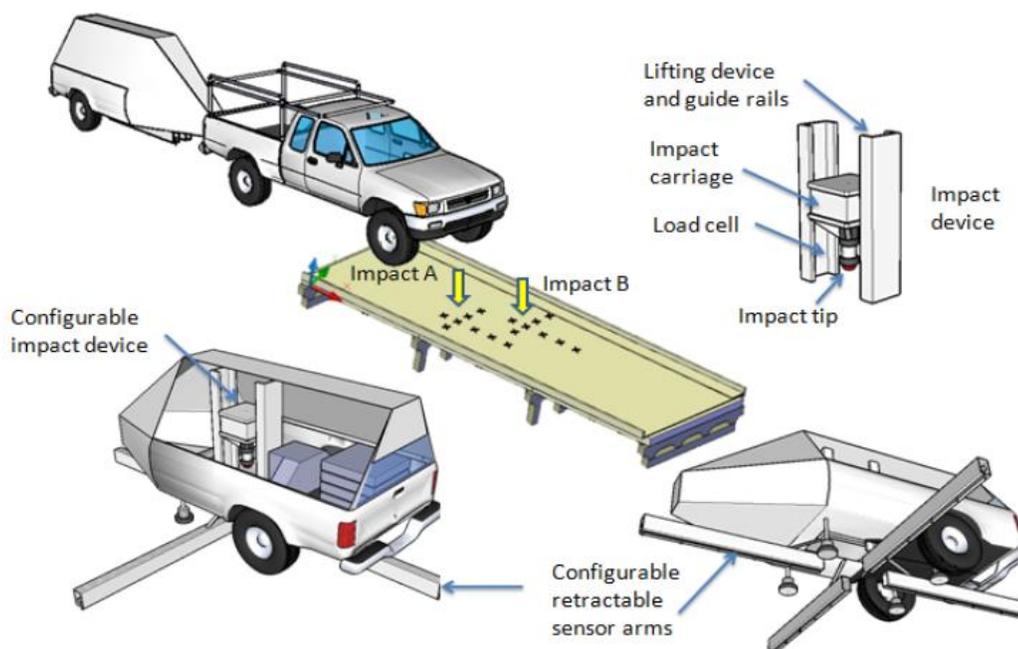


Figura 14. El sistema “Evaluación Global de la Estructura” (Global Structure Assessment, GSA).
 Fuente: Zhou et al., 2011 [67].

Sistema inalámbrico NTU-WSU

El sistema inalámbrico NTU-WSU (siglas que significan: National Taiwan University-Wireless Sensing Unit) es una plataforma inalámbrica académica desarrollada partiendo del mismo prototipo WiMMS de la universidad de Stanford, y diseñado por el equipo de investigación del profesor Chin-Hsiung Loh de la Universidad Nacional de Taiwán; una descripción detallada de su arquitectura se puede encontrar en “Development of Wireless Sensing System for Structural Health Monitoring” [49]. El sistema fue validado experimentalmente en el Centro Nacional para la Investigación en Ingeniería Sísmica de Taiwán (National Center for Research on Earthquake Engineering, NCREE por sus siglas en inglés) como un sensor inalámbrico inteligente que logró detectar, en tiempo real, el daño de un marco de concreto reforzado de una sola planta, mediante la integración del modelo predictivo Auto-Regresivo y Auto-Regresivo con entradas exógenas AR-ARX (AR: Auto-Regressive, ARX: Auto-

Regressive with exogenous inputs) en la unidad inalámbrica [50]. También el sistema fue aplicado en el control semi-activo en tiempo real de un edificio de tres plantas a escala reducida usando amortiguadores magnetoreológicos, donde la unidad inalámbrica funge como el controlador (con algoritmos de control embebidos en el microcontrolador) [51, 55].

En cuanto a las validaciones en puentes de escala real se puede mencionar la identificación de los parámetros modales del puente atirantado Gi-Lu, ubicado en el Cantón de Nantou, Taiwán, usando 12 sensores de velocidad [52]; identificación del puente de arco Quan-Du, ubicado en Taipei, Taiwán, usando 10 acelerómetros y empleando las técnicas de traslapo para obtener las formas modales del puente entero [53]; monitoreo del comportamiento dinámico del puente Niou-Tou, ubicado en I-Lan, Taiwán, durante el tifón Fanapi (año 2010) para estudiar los efectos de la socavación en las señales vibratorias y cómo identificar su severidad a partir de las características dinámicas del puente.

Referente al costo del equipo usado en la instrumentación de los mencionados puentes: el costo de fabricación de cada unidad NTU-WSU en el año 2010 es de \$ 267 USD cada uno; mientras que un acelerómetro uniaxial de balance de fuerzas marca Tokyo Sokushin AS-2000 (utilizado en las pruebas de campo anteriormente mencionadas) cuesta actualmente \$1500 USD y corresponde al modelo denominado AS-301, lo que significa una inversión aproximado de \$ 1715 USD por nodo de medición. Si las técnicas de traslapo son empleadas para realizar identificación y evaluación fuera de línea (offline evaluation), 20 sensores uniaxiales sería la cantidad mínima requerida lo que significa una inversión total de \$ 34, 300 USD para un sistema portátil de evaluación de puentes basado en vibraciones. Sin embargo, ya existen actualmente acelerómetros del Sistema Micro-Electro-Mecánicos denominado MEMS (Micro Electro-mechanical Systems, MEMS por sus siglas en inglés) de muy buena calidad los cuales se comercializan a precios mucho más bajos que los acelerómetros de balance de fuerzas.

4.2.1.3. Sensores de medición remota

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

a) Sistema de posicionamiento global GPS

El sistema GPS ha sido empleado para el monitoreo continuo de desplazamientos y deflexión estáticas en puentes de gran envergadura. Cuando los claros son muy extensos, los sistemas de medición mediante ondas láser, radares o estaciones totales dejarían de funcionar si no se cuenta con condiciones favorables del tiempo. Por otro lado, muchas veces el GPS constituye un elemento indispensable para los sistemas de monitoreo de fibra óptica, pues, el método de doble integración para obtener la curva de deflexión del puente requiere de condiciones de frontera para la sección de análisis, las cuales no se puede obtener con exactitud sin tener datos preciso de desplazamiento y rotación de las fronteras de la sección que, por lo general, son las pilas o las torres de los puentes. Por esta razón, un sistema de posicionamiento y un clinómetro se instala en estos lugares para proveer esta información.

Entre las diversas aplicaciones de GPS en la instrumentación de puentes se puede citar el famoso puente Tsing-Ma de Hong Kong y el puente Humen ubicado en Guangdong, China [33].

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 45 de 100
------------------------------	---	------------------

b) Sistema de Radar Interferométrico

El sistema de captación de imágenes digitales por el sistema de estudio interferométrico (Image by Interferometric Survey System, IBIS-S por sus siglas en inglés) es un sensor tipo radar que opera en el rango de microondas. Fue desarrollado por la compañía IDS Georadar de Pisa, Italia en colaboración con el departamento de electrónica y telecomunicaciones de la universidad de Florencia, y es capaz de medir el desplazamiento de múltiples puntos de una estructura en forma simultánea con una precisión de centésimas de milímetros (1/100 mm). Para las mediciones de desplazamientos dinámicos, el sistema puede captar frecuencias de vibración de la estructura desde 0 Hz hasta 100 Hz. También permite medir tanto deflexiones estáticas como desplazamientos dinámicos (vibraciones) partiendo de que se puede identificar las frecuencias y las formas modales. El instrumento se ilustra en la **Figura 15** y según datos recolectados por Wang (2010) [36], cada equipo de IBIS cuesta aproximadamente \$140,000 dólares. Ejemplos de aplicación se pueden citar las pruebas dinámicas y estáticas realizadas en el puente Ai-Lan [34] y en el puente Niou-Tou [35], ambos ubicados en Taiwán, donde se obtuvieron mediciones precisas tanto de la curva de deflexión estática como de la historia de deflexión dinámica en el tiempo; además, bajo la acción de una carga móvil se obtuvieron las frecuencias y formas modales de los puentes.



Figura 15. Instalación del equipo IBIS-S durante la medición del Puente Ai-Lan, Taiwán.
Fuente: Hsu et al., 2011 [34].

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 46 de 100
------------------------------	---	------------------

El funcionamiento del sistema IBIS está basado en un sensor-radar que emite ondas continuas con incrementos discretos de frecuencia que compone un espectro sintético de ancho de banda B con intervalos constantes de frecuencias Δf . Las señales de eco provee un perfil con una resolución de ΔR , la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta R = \frac{c}{2B}$$

(5)

donde c es la velocidad de luz. La distancia mínima ΔR entre los reflectores (fijados rígidamente sobre el puente) del sistema IBIS son 50 cm, *i.e.*, el sistema puede proveer una perfil de deflexión con una resolución de 50 cm entre punto y punto. A la hora de realizar la medición, el radar debe colocarse justamente por debajo del puente, esto para evitar la ambigüedad en información debido a las ondas eco reflejadas por vehículos en movimiento sobre la superficie de rodadura del puente. Conociendo la distancia vertical entre el radar y el puente, y dado que el radar puede obtener tanto la distancia en línea recta entre éste y los reflectores como el cambio de ésta, se puede hallar la deflexión vertical de los reflectores con la siguiente relación y la geometría se ilustra en la **Figura 16** [34].

$$d = \frac{d_p R}{h}$$

(6)

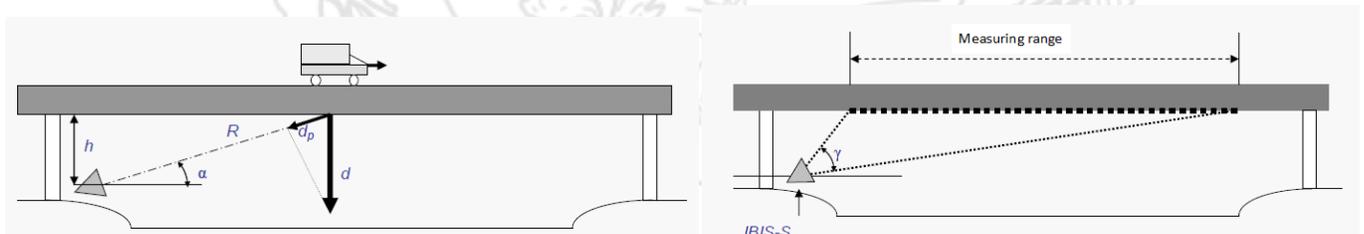


Figura 16. Medición de la deflexión y el rango de la medición.
 Fuente: Niou Tou Bridge field test seminar NCREC, 2011 [35].

Entre las virtudes de este equipo se puede mencionar su capacidad de medición a larga distancia: su alcance llega hasta 1 km. Su alta resolución espacial y precisión en la medición permite medir el movimiento dinámico de una gran cantidad de puntos en forma simultánea, ofreciendo una perfil de deflexión dinámica con una precisión de 0.01 mm [36]. Además la medición es bastante ágil y su instalación es relativamente fácil. Por otro lado, entre las desventajas están en que éste debe colocarse justo por debajo del puente, lo cual para algunos casos podría no ser factible; y el otro sería el costo sumamente elevado que tiene este equipo.

c) Detector de Posición Sensitiva

El Detector de Posición Sensitiva (Position Sensitive Detector, PSD por sus siglas en inglés) es un sensor óptico usado para detectar la posición de una fuente puntual de luz, y permite convertir el cambio de posición de la fuente puntual de luz captado en una línea (caso 1D) o en el plano (caso 2D) del detector óptico en información de movimiento del punto en el espacio real 3D a lo largo del tiempo. Esta acción de detección se ilustra en la **Figura 17**. El sistema está compuesto por un blanco, el cual consiste en un conjunto de diodos emisores de luz (Light-Emitting Diode, LED por sus siglas en inglés) o emisores de luz láser, y una cámara PSD con el fotosensor integrado, tal como se muestra en la **Figura 18**.

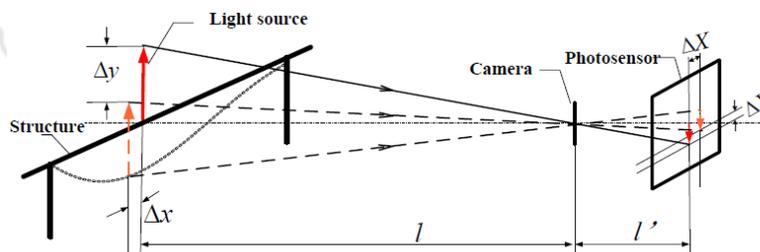


Figura 17. Principio básico del método fotoelectrónico para la captación de imagen.

Fuente: Zhang et al., 2011 [38].

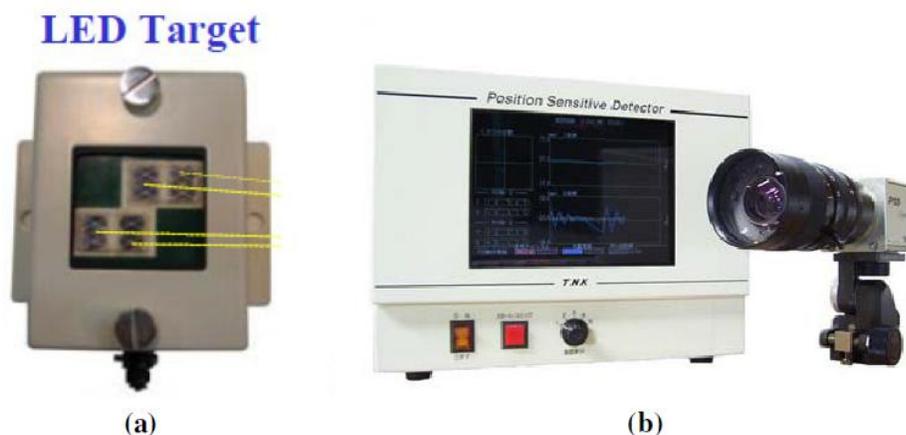


Figura 18. a) El blanco de detección (luces LED) y **b)** Cámara PSD.

Fuente: Cheng-Shieng Wang, 2010 [36].

Las especificaciones de este instrumento son: 1) distancia máxima de medición: 600 m, 2) el área de detección a una distancia de 100 m es de un cuadrado de 1m x 1m de área, 3) la resolución de la medición: 0.25 mm, 4) provee mediciones de desplazamientos tanto estáticas como dinámicas, 5) puede monitorear máximo 8 blancos al mismo tiempo, 6) la tasa máxima de muestreo: 10 kHz, y dada su alcance permite acomodarse a diversas condiciones topográficas y ambientales. Su implementación consiste en colocar los blancos en los puntos de medición de la estructura y fijar la cámara PSD en un punto inmóvil, luego la medición puede ser realizada y los desplazamientos dinámicos del puente pueden ser monitoreados.

Entre las virtudes que cuentan este sistema están: la larga distancia que alcanza la medición, la alta resolución y sensibilidad, y permite realizar mediciones tanto de desplazamientos estáticos como dinámicos. Sin embargo entre los defectos se puede mencionar: la interferencia de la luz del ambiente, la cual puede causar error en la medición, y que las vibraciones del punto de apoyo de la cámara PSD podría impactar negativamente en los resultados obtenidos [39]. El precio unitario del sistema es son aproximadamente \$ 65,000 USD [36].

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 49 de 100
------------------------------	---	------------------

La capacidad de este sistema fue demostrado en las pruebas estáticas y dinámicas en el puente Tai-Ya, en Taiwán [37], donde la superestructura tiene una luz libre de 32 m entre pilas; se colocó 2 blancos a la mitad de la luz libre y 1 blanco sobre el tope del bastión con la cámara alineada a los blancos para la captación de la luz emitida (**Figura 19**). También ha servido de sistema de monitoreo permanente de desplazamientos en el puente atirantado Dafosi que cruza sobre el río Yangtze, China, utilizando una fuente de luz láser [40].



Figura 19. Instalación de los blancos y la cámara del sistema PSD y la prueba de carga.

Fuente: Wang et al., 2009 [37].

d) Técnicas de Procesamiento de Imágenes Digitales

Con el rápido avance tecnológico en el área de la electrónica y óptica, junto con el desarrollo de la capacidad computacional para el procesamiento de información, los dispositivos óptico-electrónicos se han vuelto cada vez más accesibles. La captación de imágenes digitales mediante videocámaras y su procesamiento se han convertido en una práctica eficaz para la medición y detección de la propagación de grietas de fatiga [41], identificación y clasificación de vehículos [42], y especialmente en investigaciones del área de mecánica experimental en la determinación de campo de deformaciones [43].

La idea y la aplicación de procesamiento de imágenes digitales vinieron a sustituir la práctica convencional de medición de la deflexión del puente usando extensómetros electrostáticos, los cuales necesitan de una referencia fija. Sin embargo, esta referencia comúnmente es el fondo del cauce del río o una estructura fija anclada en la base del cauce; por lo que son prácticas que, dependiendo de las condiciones del río y la elevación del puente, podría ser imposible o sumamente difícil de realizar. Lee et al. (2006) [44] introdujeron la aplicación de una cámara de video, un lente telescópico y un panel negro con LEDs blancos para este propósito. Mediante técnicas de procesamiento de imagen digital se puede obtener la historia de deflexión en el tiempo de un puente durante las pruebas de carga estática y dinámica (**Figura 20**).

Se validó la precisión de esta técnica de medición basada en la visión al compararla contra las mediciones directas de un extensómetro tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer) y las de un vibrómetro de láser. Posteriormente, con los datos de la deflexión dinámica y estática es posible evaluar la capacidad de carga del puente en análisis. En [45] los mismos autores narran la aplicación del mismo sistema a la medición de la deflexión estática y dinámica de un puente de vigas de acero y a la de un puente colgante, para este último la medición fue hecha a unos 70 m del blanco de medición. Luego, Hsieh (2009) [47] empleó el mismo sistema basada en la visión para estudiar las características vibratorias de los cables de un puente atirantado, donde las frecuencias de vibración y el amortiguamiento pudo calcularse con precisión en comparación con aquellos resultados obtenidos mediante un sensor de velocidad de alta precisión para vibraciones ambientales.

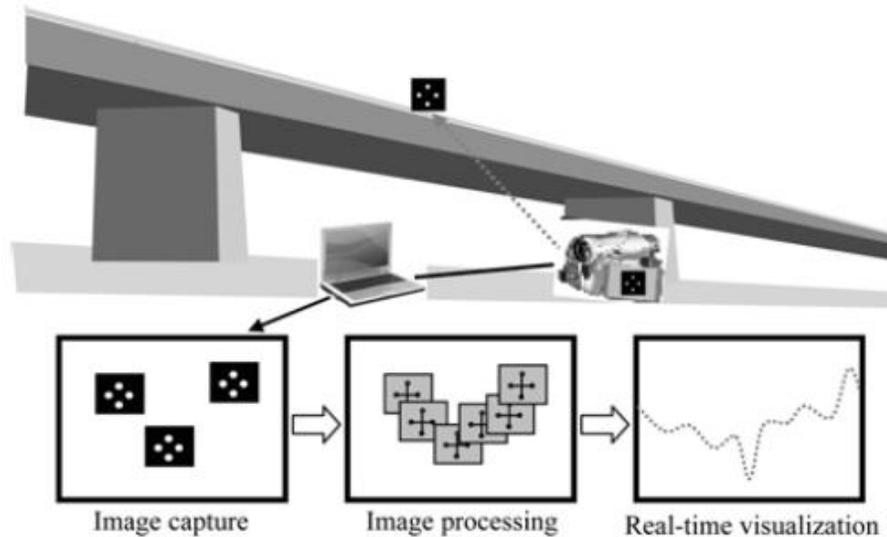


Figura 20. Ilustración esquemática de un sistema de medición basado en la visión.

Fuente: Lee et al., 2006 [44].

Existe también otra alternativa de procesamiento de imágenes digitales basada en la Correlación de Imágenes Digitales (CID). Esto es, en vez de tener un único blanco de medición, se adhiere sobre la estructura una serie de manchas aleatorias esparcidas que tengan un fuerte contraste con los colores del fondo para facilitar su reconocimiento posterior. Se almacena las imágenes digitales de alta resolución captadas durante las pruebas de carga y se procede al análisis usando el método de CID: se subdivide las imágenes en sectores y se obtiene la correlación entre las manchas en cada sector. Partiendo del coeficiente de correlación de cada sector se puede obtener el cambio de posición respectivo durante la prueba de carga. Esta práctica se ilustra en la **Figura 21**, donde el puente Vernon Ave ubicado en Massachuetts, los Estados Unidos fue sometido a una prueba de carga [46].



Figura 21. Instalación de las manchas aleatorias para el método CID.

Fuente: Santini et al., 2011 [46].

Entre las ventajas de este sistema se puede mencionar: 1) El costo es sumamente reducido; según Lee et al. (2006) [44] el costo total de los equipos (incluyendo una computadora portátil) suman apenas unos \$ 2,000 USD. 2) La implementación puede ser totalmente automática mediante programas de procesamiento de imágenes digitales y puede obtener mediciones de la deflexión en tiempo real, satisfaciendo de esta forma las necesidades de un diagnóstico rápido.

Por otro lado, entre las limitaciones de este método se puede mencionar [46]: 1) La precisión de los resultados está directamente relacionado con la resolución de la cámara, el material y la textura del blanco o de las manchas, la iluminación y la proximidad al área de medición. 2) Las vibraciones del suelo inducidas por el paso de los vehículos, el viento o los mismos movimientos humanos podría impactar negativamente en los resultados obtenidos. 3) Permite medir la deflexión sólo de un punto o una zona a la vez. 4) Igual que otros métodos ópticos su aplicabilidad está sujeta a las condiciones topográficas.

4.2.1.4. Comparación entre las diferentes plataformas tecnologías para el monitoreo y evaluación de puentes

En esta sección se presenta una comparación entre los alcances, ventajas y desventajas de cada plataforma tecnología empleada para el monitoreo y evaluación de los puentes, gran parte de la información presentada se resume en el siguiente cuadro comparativo.

	Sistema de Fibra óptica	Sensores inalámbricos	Sensores de medición remota
Tipo de monitoreo	Permanente, y dado su laborioso trabajo de instalación es recomendable que se hiciera durante el proceso de construcción o reforzamiento de la estructura como una parte integral de ella.	Permiten instalaciones tanto temporales (evaluaciones rápidas fuera de línea) como permanentes (monitoreo en línea).	Los métodos visuales y de interferometría permiten sólo mediciones temporales (evaluaciones rápidas), mientras que el método de medición usando luz láser, GPS y PSD permiten instalarse en forma permanente como parte de la estructura.
Grado de dificultad en la de Instalación	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Muy alto. ✓ El manejo, la integración o la adherencia de la fibra tópica a la estructura necesita sumo cuidado y personal capacitado. ✓ Para obtener la curvatura y luego la deflexión se necesita adherir fibra óptica tanto en el lado de tracción como de compresión de la viga o losa del puente, lo cual requiere de andamios o equipos especiales para realizar el trabajo debajo del puente. ✓ Una vez colocado el sensor no puede ser reubicado. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo. ✓ En caso de acelerómetros es simplemente colocarse sobre la superficie y empezar a recolectar datos. ✓ Los sensores pueden ser reubicados fácilmente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo. ✓ Su funcionalidad depende de las condiciones topográficas y accesibilidad al sitio para la instalación del radar o cámara.
Recolección de datos y transmisión de información	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El sistema es sumamente confiable y perdurable. ✓ Inmune ante la interferencia de campos electromagnéticos, líneas de alto voltaje, cambios de temperatura y factores ambientales tales como corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Podría ser interferido por campos electromagnéticos u ondas de radio. ✓ La transmisión inalámbrica podría interrumpirse durante un aguacero de fuerte intensidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El funcionamiento puede verse afectado por las condiciones del tiempo, iluminación en el caso de métodos ópticos, y visibilidad hacia el puente.

	Sistema de Fibra óptica	Sensores inalámbricos	Sensores de medición remota
Suministro de fuente de poder	Necesita fuente de poder continuo y estable.	Puede suministrarse tanto mediante baterías como mediante fuente de poder continua.	Generalmente mediante baterías, sólo en monitoreo permanente se usa fuente continua.
Tipos de datos recolectados (mediciones)	Principalmente deformaciones unitarias (galgas cortas) o deformaciones promedio (galgas largas) de una sección. También hay disponibilidad acelerómetros e clinómetros de fibra óptica para la medición de aceleración y el ángulo de rotación respectivamente.	Principalmente aceleración por la fácil y rápida instalación de acelerómetros sobre el puente. También permite conectarse con diversos sensores como LVDT (mide desplazamiento relativo entre dos puntos), clinómetros, strain gages, etc.	Sólo Desplazamiento (deflexión del puente).
Principal metodología de monitoreo y evaluación	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Prueba estática: obtener la curvatura a partir de la deformación y luego de ésta inferir la curva de deflexión del puente. ✓ Prueba dinámica: si el muestreo dinámico es permitido por los sensores es posible realizar también el análisis modal de la estructura. ✓ Medición directa de deformaciones unitarias o deformaciones promedio de secciones o elementos estructurales críticos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cuando los acelerómetros son usados, sólo se permite realizar pruebas dinámicas: el análisis modal, identificación del modelo numérico del puente y actualización del modelo de los elementos finitos son los principales métodos de monitoreo y evaluación. ✓ Conectado con otros sensores como strain gauges, también se puede realizar mediciones directas de deformaciones u otros. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Prueba estática: medición directa de la curva de deflexión estática. ✓ Prueba dinámica: medición directa de la deflexión dinámica de uno o varios puntos. Permite también identificar las frecuencias de vibración.
Procesamiento de información recolectado	<p>Se necesita de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Técnicas de procesamiento de señales digitales. ✓ Técnicas de regresión estadístico sencillo. 	<p>Se requiere de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Técnicas de procesamiento de señales digitales. ✓ Técnicas de identificación de sistemas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Métodos visuales requieren de técnicas de procesamiento de imágenes digitales. ✓ En caso de sistemas comerciales como IBIS-S o PSD, las funciones ya se encuentran integradas en el producto.

	Sistema de Fibra óptica	Sensores inalámbricos	Sensores de medición remota
Costo aproximado de los equipos e instalación.	<p>Sistema FBG:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Analizador de Espectro Óptico (FBG): aprox. \$ 30,000 USD. ✓ Cada unidad de sensor FBG: aprox. \$ 350 USD. ✓ Costo de instalación: aprox. \$ 3000 USD por metro lineal. <p>Sistema SOFO (SMARTEC):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Aprox. \$50,000 dólares por puente cuando el número de sensores no superan 20. 	<p>Unidades inalámbricas (Wireless Sensing Unit, WSU):</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ NTU-WSU: \$ 267 USD. ✓ National Instruments WSU: \$ 770 USD. ✓ Microstrain WSU: \$545 USD. <p>Acelerómetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Tokyo Sokushin AS-301 uniaxial: aprox. \$ 1500 USD cada unidad. ✓ Crossbow MTS 420 biaxial: \$ 375 USD cada unidad ✓ Analog devices MEMS (Micro Electro-Mechanical systems) ADXL213: aprox. \$ 11 USD cada unidad. <p>Transductores de deformación:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ BDI strain transducer: \$495 (aluminio), \$535 (acero), \$1,260 (impermeabilizado) por unidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Radar Interferométrico: sistema IBIS-S: aprox. \$ 140,000 USD. ✓ Detector de Posición Sensitiva (PSD): aprox. \$ 65,000 USD. ✓ Sistema con cámara de video digital: aprox. \$ 2,000 USD. Con todos los accesorios y una laptop.

Dadas las características de cada plataforma, se recomienda considerar la instrumentación y monitoreo permanente de puentes nuevos o en proceso de rehabilitación y reforzamiento mediante el sistema de fibra óptica, siempre evaluando de antemano el grado de importancia y el estado del puente, las variables ambientales y los componentes estructurales a monitorear, y si está disponible una fuente de poder continua y estable. Es recomendable que la instalación sea realizada durante el proceso de construcción si es un puente nuevo, o durante la ejecución de los trabajos de reforzamiento, para que el sistema sea una parte integral del puente y que esté protegido contra la intemperie y de los roedores; además, se busca aprovechar las obras temporales durante la construcción para la instalación de los mismos, sin las obras temporales la instalación de sistemas de fibra óptica sería sumamente

arduo a menos que el puente tenga espacios o conductos previstos para transitarse dentro del puente y para realizar inspecciones.

Para casos de instrumentación permanente de puentes ya construidos, puentes viejos o deteriorados, evaluaciones rápidas del estado del puente, o pruebas de la capacidad de carga del puente, el sistema inalámbrico es recomendado por su bajo costo, facilidad y rapidez en instalación. Además, es recomendable combinarlo con algún sistema de medición remota en caso de pruebas de carga, para obtener tanto los parámetros dinámicos como los estáticos del puente, los cuales se complementan para una completa evaluación y detección de daño en el puente.

4.2.2. Metodologías para la evaluación y el monitoreo de puentes

Existe dos tipos de monitoreo: (a) Monitoreo continuo o en línea (los instrumentos pueden ser instalados durante un cierto período de tiempo e inclusive a lo largo de la vida útil de la estructura) y (b) Monitoreo fuera de línea o mejor dicho, diagnóstico del estado del puente y detección de daños mediante pruebas de carga dinámica o estática, la cual puede realizarse como parte de las inspecciones de rutina o programadas en forma periódica.

4.2.2.1. Monitoreo continuo

Para realizar el monitoreo continuo de un puente implica dejar puestos los instrumentos en él en forma permanente, lo cual significa una inversión que queda con el puente. Aunque se usara el sistema inalámbrico para la transmisión de datos y que los sensores sean protegidos, dado el poco tiempo que fueron desarrolladas estas emergentes tecnologías, la durabilidad y la resistencia de las mismas ante la intemperie y diferentes agentes ambientales no es conocido. En caso de los sensores de fibra óptica, éstos quedarán adheridos rígidamente o embebidos dentro de la estructura y difícilmente pueden ser reutilizados en otros puentes.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 57 de 100
------------------------------	---	------------------

La discusión en detalle sobre el procedimiento, las necesidades y la selección de equipos para el monitoreo continuo se puede encontrar en las referencias [64, 65, 66]. Dado que son tecnologías de última generación las que están siendo experimentadas y aplicadas en el monitoreo de puentes, las experiencias acumuladas son relativamente reducidas además de la gran complejidad que implican las infraestructuras civiles, y sigue habiendo gran cantidad de incertidumbres por resolver y muchos retos por superar.

En forma general se puede hablar de tres etapas para el monitoreo continuo:

- a) Evaluación preliminar, construcción y calibración del modelo de los elementos finitos del puente: Esta etapa consiste en identificar la tipología del puente, las necesidades de monitoreo (por ejemplo: asentamiento o inclinación de la pila, deflexión de la viga, deterioro de la losa, fatiga, pérdida de tensión en los cables, esfuerzo o deformación de algún miembro o parte crítica del puente, etc.) y la escogencia de los sensores y el sistema de transmisión de datos que logren satisfacer las necesidades identificadas, sin dejar de lado la factibilidad de su instalación. La construcción del modelo de los elementos finitos es indispensable para identificar los miembros estructurales o zonas críticas. No obstante, el modelo debe ser antes validado por medio de técnicas de identificación de sistemas (utilizando una buena resolución espacial de acelerómetros y mediante pruebas dinámicas) para asegurar que el modelo analítico sea lo suficientemente exacto como para representar y predecir el comportamiento del puente real ante diferentes cargas, esto para garantizar que los sensores sean instalados en los miembros estructurales o zonas críticas ante diferentes escenarios de solicitaciones.
- b) Instalación de los instrumentos de medición y el sistema de adquisición de datos: Al tener ubicado en la etapa anterior los puntos estratégicos de monitoreo y las variables a medir, lo que procede en esta etapa es el proceso de instalación en sí, considerando siempre la factibilidad y las futuras necesidades de mantenimiento o sustitución de sensores y unidades inalámbricas en caso de averías. Además, los protectores contra la intemperie son importantes para garantizar el buen funcionamiento del sistema. La fuente de poder para el sistema y los sensores es un asunto crítico. Si el sistema inalámbrico es utilizado, se puede considerar el uso de baterías recargables con energía solar o vibración

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 58 de 100
------------------------------	---	------------------

procedente de la misma estructura; en cambio, para el nodo host o anfitrión debe proveerse energía continua, al igual que el sistema de fibra óptica.

- c) Procesamiento, interpretación y administración de los datos: En un proyecto de monitoreo continuo será generada una gran cantidad de datos, es importante el buen manejo y almacenamiento de los mismos. Por otro lado, para efectuar el procesamiento e interpretación de datos es necesario la implementación de softwares de análisis en el nodo host o en la computadora del usuario final.

El monitoreo continuo requiere generalmente de una combinación de métodos globales y locales de monitoreo y detección de daños. Dado que es un monitoreo continuo, el tráfico no puede ser interrumpido, únicamente las respuestas vibratorias debido a las excitaciones ambientales pueden ser medidas, por ende, las técnicas de MSE basadas en vibraciones será el método global empleado junto con los acelerómetros. El método global permite conocer el estado global de la estructura mediante el análisis modal y corroboración con el modelo de los elementos finitos. Por otro lado, la aplicación de métodos locales como la medición directa de deformaciones unitarias en ciertos elementos estructurales o conexiones, o la inclinación y asentamiento de las pilas, etc., requiere de una identificación previa, en la primera etapa, de los elementos estructurales y parámetros críticos cuyo buen funcionamiento es indispensable para la integridad o seguridad de toda la estructura. Los sensores de temperatura pueden ser instalados en diferentes puntos estratégicos del puente para conocer los gradientes de temperatura a los que se somete el puente.

En general, el procesamiento de señales multicanal requiere de técnicas más elaboradas; esto en términos de métodos globales. En cambio, las señales de la deformación unitaria, grados de rotación y desplazamiento de las pilas para el monitoreo de la socavación y asentamiento, y la temperatura son mediciones que pueden ser interpretadas y comparadas directamente contra el valor permisible según el modelo analítico del puente y las propiedades mecánicas del material.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 59 de 100
------------------------------	---	------------------

4.2.2.2. Evaluación fuera de línea (pruebas de carga no-destructivas)

Se puede hablar básicamente de tres propósitos para las evaluaciones fuera de línea o pruebas de carga no-destructivas:

- a) Estimar la capacidad de carga real del puente.
- b) Estudiar el comportamiento real del puente en forma global o el de ciertos componentes estructurales; además, validar el modelo estructural analítico del puente.
- c) Detectar, localizar, cuantificar el grado de daños y estimar la vida útil del puente o de cierto componente estructural.

Las pruebas de carga son importantes cuando se encuentran con miembros estructurales deteriorados o dañados, para los cuales es difícil cuantificar los efectos del deterioro o daño en la capacidad de carga de un puente y en la distribución resultante de cargas. Por otro lado, en el caso de estructuras reforzadas o readecuadas, también se desconoce por completo la eficacia de la reparación y la interacción entre los elementos reforzados o readecuados con los elementos existentes, para los cuales las pruebas de carga son indispensables para identificar el comportamiento real del puente. Las pruebas de carga también son importantes en la evaluación de la vida útil por fatiga en los puentes metálicos, ya que el rango y el número de ciclos de esfuerzos a que un miembro metálico se someta necesitan ser evaluados, datos que no se pueden obtener sin pruebas de carga en campo. Por otro lado, la estimación del factor de impacto para las cargas dinámicas generalmente son sumamente conservadoras en los manuales de diseño. Las pruebas de carga dinámicas en el campo pueden ofrecer una estimación más realista del factor de impacto de acuerdo con las condiciones reales de rugosidad de la superficie de rodadura y las características del tráfico, por las que se puede obtener una estimación más precisa de la capacidad real de carga.

Según la norma AASHTO [70], hay dos tipos de evaluaciones fuera de línea o las llamadas pruebas de carga no-destructivas: uno es la prueba de diagnóstico y el otro, prueba de comprobación.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 60 de 100
------------------------------	---	------------------

Las pruebas de diagnóstico se realizan para determinar ciertas características en cuanto a las respuestas del puente ante las cargas y principalmente para calibrar, validar y ajustar las predicciones de los modelos estructurales analíticos, los cuales serán usados para calcular los factores de la capacidad de carga. Las pruebas de comprobación, tal como su nombre lo indica, “comprueba” la capacidad del puente en campo para soportar las cargas dinámicas “mayoradas” además de todas las cargas muertas permitiendo establecer niveles de carga seguros para puentes viejos, deteriorados o dañados.

Las pruebas de carga se pueden clasificar también como estáticas y dinámicas. Una prueba estática se realiza usando una carga estacionaria para evitar vibración en el puente. La intensidad y la posición de la carga pueden cambiarse durante la prueba. Una prueba dinámica se realiza mediante cargas variantes en el tiempo o cargas móviles que excita vibraciones en el puente. Las pruebas dinámicas son usadas para medir los modos de vibración, frecuencias, amortiguamiento, amplificación dinámica y para realizar evaluaciones de fatiga. Las pruebas de diagnóstico pueden ser estáticas o dinámicas, sin embargo, las pruebas de comprobación son generalmente pruebas estáticas.

En la literatura se puede encontrar gran cantidad de reportes de pruebas de carga y evaluaciones de las metodologías de pruebas de carga. En “Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite-Element Model Updating” [79] Brownjohn et al. realizó una evaluación del reforzamiento de un puente en Singapore mediante pruebas dinámicas y validación del modelo de los elementos finitos. La misma metodología fue empleado por Zanardo et al. [76] quienes realizaron una evaluación de reforzamiento del puente de concreto no. 3014 en Australia. En “Dynamic Assessment of Bridge Load-Carrying Capacities. I & II” [80] Law et al. realizó pruebas dinámicas en un puente de concreto a escala reducida, el cual es evaluado en diferentes escenarios de agrietamiento y pérdida de recubrimiento hasta la falla total. Se discutió los diferentes factores que afectan las frecuencias de vibración medidas, fuentes de error, y se concluyó en la factibilidad de utilizar la frecuencia del modo fundamental de vibración para evaluar el estado de salud del puente y su capacidad de carga. Baidar y Leslie expuso en “Bridge Testing—A Surprise Every Time” [81] sus experiencias, lecciones aprendidas y sorpresas encontradas en las pruebas de carga realizadas en los puentes de Ontario, Canadá, en especial sobre el comportamiento

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 61 de 100
------------------------------	---	------------------

de los puentes de viga de acero, puentes con losas de hormigón, y puentes con cerchas metálicas, y sobre cómo la apariencia de los puentes podría inducir a una mala idea de su capacidad real de carga. En “Bridge Rating Using System Reliability Assessment I: Assessment and Verification by Load Testing” y “Bridge Rating Using System Reliability Assessment II Improvements to Bridge Rating Practices” [77,78] Wang et al. realizó una evaluación y comparación entre los procedimientos de estimación de capacidad de carga presentados en el Manual de AASHTO para la Evaluación de Puentes [70], y propuso una mejora basada en métodos de confiabilidad estructural.

4.3. Trabajos de monitoreo y evaluación de puentes realizados en Costa Rica

Haciendo una revisión de los estudios e investigaciones en materia de puentes ejecutados en Costa Rica se pudo encontrar bastantes proyectos realizados pero con objetivos y contenidos sumamente variados, y dentro de los cuales se halló cuatro estudios en que la instrumentación en campo fue empleado para el diagnóstico o evaluación de la estructura del puente.

El primero es un estudio presentado por La Agencia de Cooperación Internacional de Japón (Japan International Cooperation Agency, JICA) quien evaluó la capacidad para la planificación de rehabilitación, mantenimiento y gestión de los puentes en Costa Rica, lo cual fue realizado ante la solicitud del gobierno de la República de Costa Rica y se ejecutó del año 2005 a 2007 [69]. MOPT y CONAVI fueron las entidades gubernamentales involucradas, sin embargo, no hubo participación de investigadores y académicos de la UCR. Además de realizarse una evaluación detallada sobre las capacidades y formaciones técnicas tanto a nivel individual, organizacional e institucional de los entes gubernamentales a cargo de la administración, operación y mantenimiento de puentes, se señaló las deficiencias, sugirieron mejoras y se propusieron políticas para el desarrollo de capacidades faltantes en los recursos humanos. También, como parte de la evaluación, se hizo una revisión general sobre las condiciones en que se encuentran los puentes de Costa Rica; específicamente se

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 62 de 100
------------------------------	---	------------------

hizo un estudio detallado sobre los 29 puentes ubicados en las rutas No. 1, 2, 4, y 218 de nuestro país.

La metodología que se empleó en la evaluación de estos 29 puentes fue la inspección visual exhaustiva de todos los componentes estructurales visibles. Mediante una lista estándar de inspección se levantó información sobre las condiciones de cada uno de los componentes estructurales y los tipos de daños que han sufrido, además de una evaluación hidráulica de las condiciones de flujo del río y su estabilidad. Algunos aspectos del diseño fueron discutidos y se realizó también un estudio del volumen de tráfico diario.

Basado en los resultados de la inspección se priorizó la rehabilitación y reforzamiento de 10 puentes tomando como referencia en la evaluación de la deficiencia del puente. Esta evaluación se hizo con base en la metodología presentada en el informe y consiste en una suma ponderada del grado de daño de los diferentes componentes del puente multiplicado por un factor de peso o de importancia. A los 10 puentes seleccionados se hizo un estudio más profundo y focalizado sobre: el tipo, la extensión y las causas del daño mediante la ejecución de pruebas locales no-destructivas o destructivas dirigidas hacia componentes estructurales con daños identificados.

Con el fin de examinar la capacidad de carga de los puentes, tanto ante las cargas vivas presentes (HS20+25%) como ante las cargas sísmicas, un análisis estructural fue realizado para calcular los esfuerzos o cargas de trabajo de los miembros estructurales ante diferentes solicitaciones. Se levantó el modelo estructural numérico de los puentes basándose en los planos de los mismos, y a aquellos que no se cuentan con la información requerida se tuvo que realizar mediciones en campo de las dimensiones.

Tomando como base a toda la información anterior se hizo un plan de rehabilitación y reforzamiento a los 10 puentes seleccionados, se realizó el diseño detallado de los mismos; la estimación de los costos junto con los planos fueron entregados a MOPT y CONAVI como uno de los productos finales, además de un formato recomendado para el sistema de reporte de inspección de puentes.

Dentro de los 10 puentes seleccionados se escogió unos dos puentes para realizar pruebas de capacidad de carga, las cuales se hicieron con el propósito demostrativo para transferir el

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 63 de 100
------------------------------	---	------------------

conocimiento técnico a profesionales tanto de la universidad, de las empresas privadas como a los de los entes gubernamentales.

Las pruebas de carga se realizaron con el objetivo de medir la capacidad de carga real, calibrar modelos de análisis estructural y estimar la durabilidad de fatiga de miembros metálicos basado en el nivel de esfuerzo o deformación que se someten los mismos bajo la acción de cargas operacionales. Los métodos y equipos empleados para las pruebas de carga fueron tradicionales y básicamente toman dos medidas. El primero consiste en la medición de la deflexión estática y dinámica del puente mediante un extensómetro que mide el desplazamiento relativo entre la calzada del puente y una referencia fija (ésta se obtiene anclando una barra en el fondo del cauce y que se extienda hasta la calzada del puente, o por lo contrario, anclar la barra en el puente y medir el desplazamiento relativo entre ésta y el fondo del cauce). El otro es la medición de la deformación en miembros metálicos mediante galgas de deformación (strain gauges). La desventaja de estos métodos tradicionales de medición es que son alámbricos; además, dependiendo de las condiciones topográficas del sitio o del cauce, podrían no ser funcionales, e inclusive, para la instalación de las galgas de deformación se requirieron de andamios.

El análisis de fatiga para estructuras metálicas y la estimación de su vida útil por fatiga se realizaron mediante el método denominado “Rainflow counting” [72, 73, 74, 75]. El método consiste en encontrar la distribución de frecuencias de esfuerzos por día. Luego, junto con los datos del conteo de volumen de tráfico diario, del que se estima el número de cargas que influyen en la fatiga por día, más la estimación de las cargas futuras del tráfico, es posible calcular, para diferentes rangos de esfuerzos, el número de ciclos acumulados en el tiempo, del que se estima la vida útil por fatiga.

Otro proyecto de monitoreo de puentes en Costa Rica es el proyecto “eBridge” que el Instituto Tecnológico de Costa Rica inició recientemente. El proyecto busca predecir el comportamiento de los puentes y evaluar la salud de los mismos [68]. El octubre del 2012 se realizó una prueba técnica en el puente sobre el río Purires, ubicado en San Isidro de El Guarco, Cartago, donde se evaluó la respuesta del puente ante diferentes cargas.

También se encontró dos Trabajos Finales de Graduación a nivel de Licenciatura de la Escuela de Ingeniería Civil, UCR, del año 2004, ambos bajo la dirección del Ing. Alfredo González Fonseca. El primero se trata del análisis modal de una sección atirantada del Puente sobre el Río Tempisque [83], donde el modelo de los elementos finitos de la sección en mención fue construido en el programa SAP2000, y la superestructura es modelada como una “viga espinal” en forma tridimensional con 6 grados de libertad. Luego, el modelo es calibrado con mediciones tomadas en 7 puntos distintos sobre la cubierta del puente mediante acelerógrafos facilitados por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la UCR. En total se obtuvo 39 registros de aceleraciones con 40 segundos de duración cada uno. Cada registro se realizó en forma independiente, es decir, no se dispone de registro en forma simultánea de múltiples canales. El espectro de Fourier fue la herramienta empleada para obtener los períodos de los modos de vibración y estos últimos son empleados para calibrar el modelo analítico de los elementos finitos haciendo corresponder los períodos de éste con el período medido en campo. Además, se hizo una estimación del amortiguamiento mediante el método de decremento logarítmico. Dado que las mediciones no fueron simultáneas, no se pudo obtener la forma modal del puente a partir de la medición de campo. Al final del trabajo y basado en el análisis del modelo analítico del puente, se dio una serie de recomendaciones y una propuesta sobre la instrumentación del puente.

El otro Trabajo Final de Graduación se titula “Análisis Dinámico y Propuesta de Instrumentación del Puente sobre el Río Grande en el Proyecto Ciudad Colón-Orotina” [84], el cual es un puente con viga tipo cajón de concreto pre-esforzado. Similar al trabajo anterior, el modelo de los elementos finitos fue construido mediante elementos tipo dovela que consiste en discretizar y aproximar la sección variable del puente en 12 segmentos. Se obtuvieron analíticamente los períodos y las formas modales mediante el programa SAP2000 sin tomar en cuenta los modos torsionales. Luego con un total de 42 registros de 80 segundos de duración, tomados en forma independiente y en distintos puntos del puente, se obtuvieron los períodos de oscilación experimentales de la estructura mediante el análisis de Fourier tomando los picos del espectro, para luego calibrar el modelo estructural analítico. El decremento logarítmico fue empleado para estimar el amortiguamiento y se dio también una propuesta de instrumentación para el monitoreo de este puente.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 65 de 100
------------------------------	---	------------------

Cabe mencionar también otros Trabajos Finales de Graduación realizados tales como “Análisis Dinámico del Puente sobre el Río Virilla: Proyecto Ciudad Colón-Orotina” [85] y “Evaluación Estructural y Diagnóstico del Puente-Paso Elevado sobre la Entrada a Escazú, Carretera San José-Ciudad Colón” [86], los cuales son evaluaciones de la capacidad del puente mediante modelos estructurales analíticos sin recurrir a una instrumentación en campo.



5. CONVENIO CON EL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA SÍSMICA DE TAIWÁN (NATIONAL CENTER FOR RESEARCH ON EARTHQUAKE ENGINEERING, NCREE)

La posible creación de este convenio de colaboración surgió a raíz de la invitación realizada al profesor Chin-Hsiung Loh, procedente de la Universidad Nacional de Taiwán y experto en el área de Monitoreo de Salud Estructural (MSE) y mitigación de desastres, para que brindara tres charlas sobre el tema en el auditorio de Lanamme durante el mes de febrero del año 2012. La visita fue posible gracias a la invitación realizada por el profesor de la Escuela de Ingeniería Civil, Ing. Yi Cheng Liu Kuan, mediante el apoyo económico brindado por el programa de académicos visitantes que ofrece la Oficina de Asuntos Internacionales y de Cooperación Externa de la Universidad de Costa Rica.

Durante la visita del profesor Loh se conversó sobre la posibilidad de implementar un programa de investigación para el monitoreo estructural para puentes de Costa Rica utilizando la misma tecnología inalámbrica que utiliza la Universidad de Taiwán. El profesor Loh recomendó la creación de un convenio de cooperación técnica el cual permitiría brindar soporte técnico para adquirir el equipo necesario y capacitación a investigadores y académicos de Lanamme y de la Escuela de Ingeniería Civil.

La firma del Memorándum de Entendimiento con NCREE durante 5 años es importante, ya que contempla los siguientes beneficios:

1. Adquisición de un equipo inalámbrico fabricado especialmente para la instrumentación de infraestructuras civiles, cuya capacidad fue validada en diversas pruebas de campo con resultados publicados en la literatura técnica internacional [49-55].
2. Capacitación del personal del Lanamme y de la Escuela de Ingeniería Civil en el uso del equipo, transferencia de conocimientos técnicos y programas para la recolección, procesamiento, análisis e interpretación de los datos de medición, así como asesorías y consultas en cuanto a los problemas encontrados.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 67 de 100
------------------------------	---	------------------

3. Asesoría e intercambio de experiencias en cuando a la escogencia de diversos equipos y sensores para diferentes tipologías de puentes, lo cual permite disminuir al mínimo el riesgo de pérdida de inversión debido a una mala escogencia por desconocimiento en el tema.
4. La colaboración que se establece es de intercambio académico, por lo que no entran en juego intereses comerciales.
5. Las asesorías y la transferencia del conocimiento se darán bajo el concepto de colaboración.



6. SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO PROVISTO POR NCREE

Las técnicas de instrumentación y monitoreo de salud estructural de puentes es un tema que se conoce poco en nuestro país, por ende se cree que es preferible que la modalidad de colaboración con NCREE sea del tipo “llave en mano”. Es decir, que sea NCREE la parte que se encargue de preparar los equipos, adquirir los sensores y otros equipos necesarios para armar el sistema inalámbrico de acuerdo al presupuesto disponible y las necesidades de instrumentación, para luego, hacer la demostración del uso de estos equipos en nuestro país y a la vez transferir los conocimientos del tema.

Sensores de vibraciones

La línea de investigación de NCREE se concentra principalmente en MSE basada en vibraciones. En el comienzo de la colaboración únicamente los sensores de vibración como acelerómetros o sensores de velocidad serán adquiridos. Los sensores que NCREE ha utilizado en sus proyectos de instrumentación son del fabricante Tokyo Sokushin, del modelo VSE-15D para sensores de velocidad y modelo AS-2000 (actualmente AS-301) para sensores de aceleración. Los sensores de velocidad VSE-15D son altamente recomendados para medir micro-vibraciones de estructuras inducidas por excitaciones ambientales dada su buena respuesta en el rango de frecuencias bajas; sin embargo, su costo es sumamente elevado, cada unidad podría costar más de \$11,000 dólares estadounidenses. Los acelerómetros pueden ser utilizados de igual forma para captar vibraciones del puente ante excitaciones ambientales aunque tiene mejor respuesta en el rango de frecuencia alta, por lo que un filtro de paso bajo debe ser utilizado para garantizar la calidad de las mediciones. Cada unidad de acelerómetro AS-301 cuesta aproximadamente \$ 1,600 dólares estadounidenses. NCREE también se encuentra en este momento realizando pruebas con acelerómetros de diferentes fabricantes para hallar una solución suficientemente buena para las necesidades de MSE pero también que sea económica, por lo que hay diferentes opciones dependiendo del presupuesto disponible y la cantidad de sensores por adquirir.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 69 de 100
------------------------------	---	------------------

Según las experiencias en el tema de monitoreo de puentes, es preferible tener como mínimo, unos 20 a 30 acelerómetros uniaxiales para proyectos de puentes.

Unidad de transmisión inalámbrica NTU-WSU

Tal como se ha introducido anteriormente, la unidad de transmisión inalámbrica NTU-WSU es en sí un sistema de adquisición de datos con todas las funciones integradas. Aunque cada unidad tiene 4 canales, generalmente se conecta una unidad inalámbrica por sensor debido a las distancias que hay entre un acelerómetro y otro, *i.e.*, la cantidad de NTU-WSU requerida debe ser como mínimo igual que la cantidad de acelerómetros adquiridos. Las unidades NTU-WSU se alimentan mediante baterías recargables, por lo que las baterías tipo Litio 7.4 V 3200 mA recargables también deben ser adquiridas.

Aunque la principal línea de investigación de NCREE en el monitoreo de puentes no incluye los transductores de deformación (strain transducers) u otros tipos de sensores como clinómetros o extensómetros, esto debido a que las mediciones de deformación, inclinación o desplazamiento relativo son mediciones directas que no requieren de mayor trabajo de procesamiento e investigación, simplemente se comparan contra algún rango de seguridad predefinido, las unidades NTU-WSU sí son compatibles con la mayoría de estos sensores. En caso de que las mediciones de deformación, inclinación o desplazamiento relativo sean necesarias, éstos sensores pueden adquirirse posteriormente en el país y validarlo mediante pruebas de laboratorio.

El nodo host o anfitrión

Un host o anfitrión es un ordenador que funciona como el punto de inicio y final de las transferencias de datos. El nodo host es el encargado de coordinar los nodos inalámbricos y comunicarse con el usuario final. Para el caso de monitoreos fuera de línea, este host puede ser tan simple como una computadora portátil; para monitoreos continuos, el host utilizado y

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 70 de 100
------------------------------	---	------------------

validado por NCREE es el controlador de tiempo real CompactRio del fabricante National Instruments, modelo cRIO-9022. El controlador permite comunicaciones con el usuario final mediante puertos USB o ethernet, este último permite comunicarse con el usuario final vía web HTTP o servidor de archivos FTP.

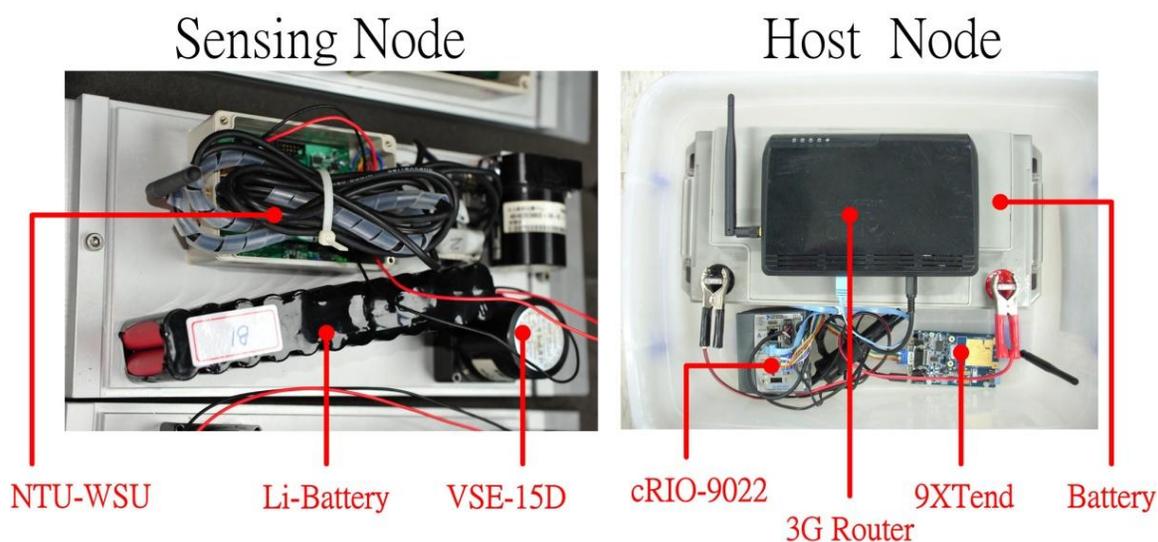


Figura 22. El nodo de sensores y el nodo host del sistema NTU-WSU.

Programas e interface del usuario

La interface del usuario es un ambiente de desarrollo integrado en el programa LabVIEW y en módulo mathscript RT que permite embeber la secuencia de comandos de Matlab (archivos *.m) en el procesador. Esta es una interface muy amigable para los investigadores para crear e implementar nuevas herramientas y algoritmos de análisis para MSE.

Instalación del sistema

El sistema que ofrece NCREE básicamente es una plataforma portátil que permite desplazarse de un puente a otro con gran versatilidad, pero también puede ser instalado en forma permanente sobre el puente. Para realizar mediciones mediante acelerómetros, simplemente se conecta los sensores a las unidades inalámbricas; estas luego se colocan sobre superficies libres del puente, que puede ser las aceras o la superficie de rodadura del puente; una vez que todos los sensores están listos se puede empezar la recolección de datos. En **Figura 23** muestra un ejemplo de instalación del sistema NTU-WSU en el monitoreo del puente Niou Tou, Taiwán, durante los días que el tifón Fanapi pasaba por ese país en el año 2010.



Figura 23. Monitoreo continuo del puente Niou Tou, Taiwán, durante un tifón Fanapi en el año 2010 con el sistema NTU-WSU.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 72 de 100
------------------------------	---	------------------

La instalación de los acelerómetros pretende formar una malla de sensores donde cada nodo uniaxial es un grado de libertad. La densidad de la malla o la resolución espacial dependerá de la cantidad de sensores disponibles. En caso de validación del modelo de los elementos finitos, la ubicación de los nodos (donde se colocará los acelerómetros) puede determinarse basado en el modelo de los elementos finitos del puente previamente construido. Esto se ilustra mediante la **Figura 24** y **25** [76]. La labor de validación puede simplificarse si los nodos de medición concuerda con los nodos del modelo estructural. Cuando la cantidad de sensores no es suficiente como para formar una malla que cubre toda la superficie de la calzada, o en caso de no desear interrumpir el tráfico a la hora de realizar las pruebas o durante el monitoreo continuo, comúnmente se coloca los acelerómetros a ambos lados del puente para captar tanto los modos de flexión como los de torsión. Una ilustración de esta disposición se muestra en la **Figura 26** y **27** [61] donde los modos de vibración del puente Tsing Ma, Hong Kong, fueron identificados. Se utilizaron 15 configuraciones de acelerómetros para lograr cubrir todo el puente, *i.e.*, se midieron vibraciones del puente bajo excitaciones ambientales en 15 lapsos de tiempos distintos, dejándose unos 3 sensores como referencia y los otros desplazándose a lo largo del puente en 15 diferentes configuraciones.

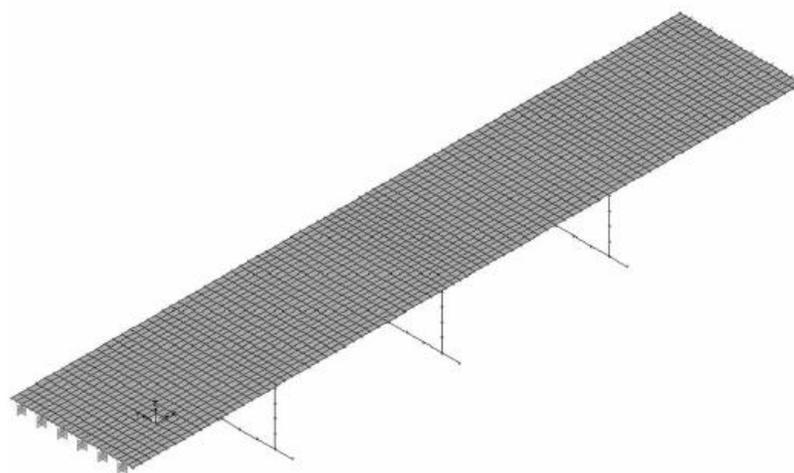


Figura 24. Modelo preliminar de la estructura en el programa de análisis estructural SAP 2000, con el sistema de losas modelado mediante elementos cascarón (shell elements).

Fuente: Zanardo et al., 2006 [76].

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 73 de 100
------------------------------	---	------------------

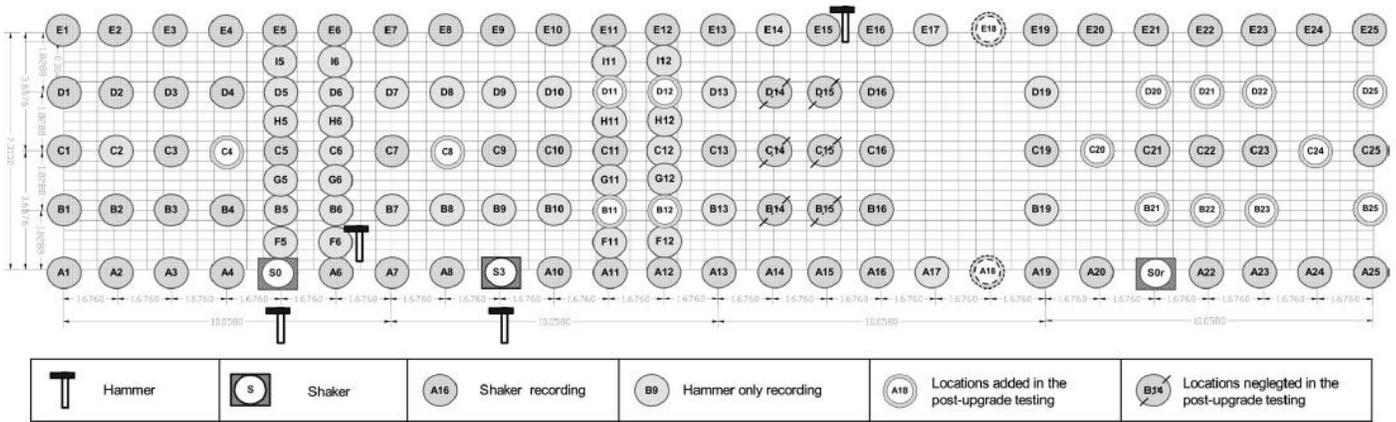


Figura 25. Malla de sensores y puntos de aplicación de fuerzas de excitación.

Fuente: Zanardo et al., 2006 [76].

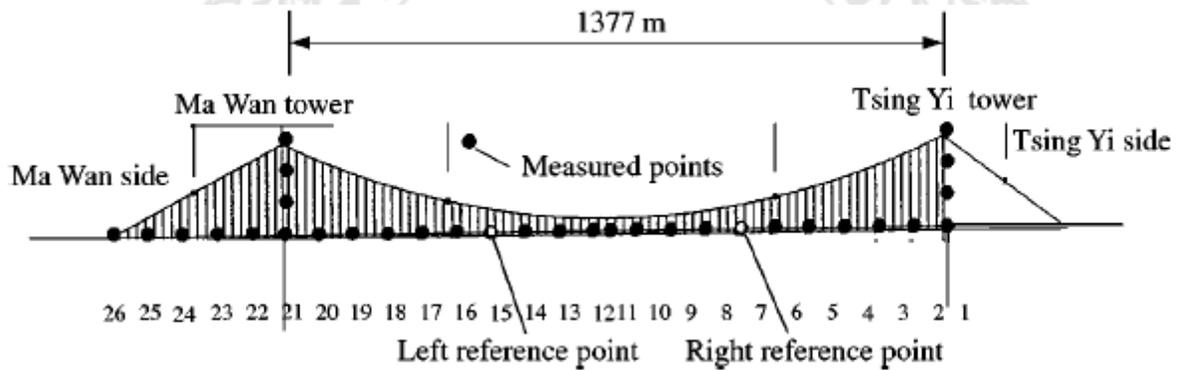


Figura 26. Secciones de medición del puente Tsing Ma.

Fuente: Qin et al., 2001 [61]

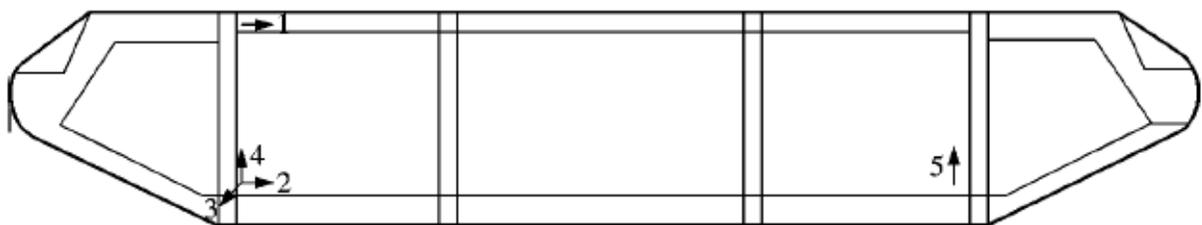


Figura 27. Distribución de sensores en cada sección del puente Tsing Ma.

Fuente: Qin et al., 2001 [61]

7. PLAN DE INVESTIGACIÓN

7.1. PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Proyecto General: Diagnóstico, Evaluación y Monitoreo de Salud Estructural de Puentes Utilizando un Sistema de Instrumentación Inalámbrico

7.1.1. Sub-proyecto I: Investigación, adquisición y capacitación del uso del sistema inalámbrico para la instrumentación y MSE de puentes.

- a) **Objetivo 1:** Revisar la literatura y bibliografías disponibles sobre los diferentes conceptos, equipos y sistemas de instrumentación y MSE de puentes.

Tiempo de ejecución: del setiembre del año 2012 al enero del año 2013

Alcance: Se incluye en este mismo informe una clasificación general de los diferentes sistemas disponibles para la instrumentación y MSE de puentes, y se compara en cuanto a sus características, usos, virtudes y defectos, costos y las metodologías empleadas para el monitoreo de puentes. Se dará recomendaciones en cuanto a la selección de equipos.

- b) **Objetivo 2:** establecer el convenio de investigación en MSE con NCREE, Taiwán

Tiempo de ejecución: en la primera mitad del año 2013

Alcance: Firmar el Memorándum de Entendimiento con NCREE, Taiwán, y que por medio de esta colaboración internacional se logre proveerse de unidades de transmisión inalámbricas para la instrumentación y MSE de puentes, junto con la capacitación que brindarán los investigadores de NCREE sobre el uso de este equipo. Se realizarán

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 75 de 100
------------------------------	---	------------------

charlas técnicas y demostraciones del uso del equipo inalámbrico tanto en la parte de hardware como software, tomando mediciones de aceleraciones de unos 3 a 5 puentes durante la estadía de los investigadores en Costa Rica a finales del mes de Junio y a inicios de Julio (máximo 2 semanas).

- c) **Objetivo 3:** Investigar sobre los equipos comerciales disponibles en Costa Rica para la instrumentación y MSE de puentes.

Tiempo de ejecución: durante el años 2013 y primera mitad del año 2014.

Alcance: Se realizará reuniones con diferentes proveedores de las tecnologías inteligentes para la instrumentación y MSE de puentes en Costa Rica para conocer las características, los precios de sus equipos junto con los costos de la instalación. En caso de sensores se asesorará con los investigadores de NCREE sobre su compatibilidad con las unidades de transmisión inalámbrica NTU-WSU; en caso de ser compatible se realizará pruebas y se comparará los resultados con los sensores provistos por NCREE tomando a este último como referencia. Para las unidades de transmisión inalámbrica comerciales disponibles en Costa Rica, se evaluará su desempeño contra NTU-WSU teniendo a este último como referencia. En caso de sistemas de fibra óptica se hará reuniones con la compañía para evaluar la factibilidad de un plan piloto de instrumentación de fibra óptica en un puente de significativa importancia.

- d) **Objetivo 4:** realizar sesiones de entrenamiento sobre el uso de los equipos inalámbricos NTU-WSU.

Tiempo de ejecución: durante el año 2013 después de la visita de los investigadores de NCREE

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 76 de 100
------------------------------	---	------------------

Alcances: Se hará mediciones de aceleraciones al realizar el análisis modal en unos 3 puentes selectos para adiestrar con la recolección de datos usando el equipo inalámbrico NTU-WSU y procesamiento de la información adquirida.

7.1.2. Sub-proyecto II: Investigación e implementación de los métodos de medición remota basada en imágenes digitales.

- a) **Objetivo 1:** Revisar literatura y bibliografía disponible para el procesamiento de imágenes digitales.
- b) **Objetivo 2:** Investigar, programar e implementar algoritmos para el procesamiento de imágenes digitales.
- c) **Objetivo 3:** Adquirir equipos para la implementación de medición remota basada en imágenes digitales.
- d) **Objetivo 4:** Validar el método de medición basado en imágenes digitales mediante pruebas de laboratorio. Esto contempla las siguientes actividades:
 - ✓ Diseño del experimento
 - ✓ Instalación del experimento.
 - ✓ Análisis de resultados del experimento.
- e) **Objetivo 5:** Validar el método de medición basado en imágenes digitales mediante pruebas de campo. Esto contempla las siguientes actividades:
 - ✓ Diseño del experimento
 - ✓ Instalación del experimento.
 - ✓ Análisis de resultados del experimento.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 77 de 100
------------------------------	---	------------------

Tiempo de ejecución: del enero del año 2013 a julio del año 2014

Alcances: Se desarrollará, validará e implementará la metodología basada en imágenes digitales para medir desplazamientos y deflexiones en puentes.

7.1.3. Sub-proyecto III: Evaluación de la capacidad de carga de los puentes mediante el análisis estructural.

- a) **Objetivo 1:** Estudiar y priorizar puentes en forma preliminar de acuerdo con su importancia, edad y estado de deterioro, para evaluar su capacidad de carga mediante análisis estructural.
- b) **Objetivo 2:** Realizar inspecciones visuales para determinar el estado de deterioro de los puentes prioritarios.
- c) **Objetivo 3:** Construir el modelo de los elementos finitos del puente usando programas de análisis estructural.
- d) **Objetivo 4:** Identificar el sistema dinámico del puente mediante el análisis modal y utilizando mediciones de aceleraciones.
- e) **Objetivo 5:** Validar y calibrar el modelo estructural analítico para que concuerde con los resultados de análisis modal (identificación de sistemas).
- f) **Objetivo 6:** Evaluar la capacidad de carga en forma analítica siguiendo la norma AASHTO.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 78 de 100
------------------------------	---	------------------

- g) **Objetivo 7:** Calificar el puente indicando su capacidad máxima de carga y si se requiere de estudios de mayor profundidad y ejecución de pruebas de carga.

Tiempo de ejecución: a lo largo de todo el proyecto iniciando desde la segunda mitad del año 2013.

Alcances: Se evaluará la capacidad de carga de puentes prioritarios mediante modelos de elementos finitos validados con los resultados del análisis modal (pruebas dinámicas). El trabajo se realizará mediante tesis de licenciatura, se calificará el puente indicando su capacidad máxima de carga y si el puente requiere de estudios de mayor profundidad y ejecución de pruebas de carga.

7.1.4. Sub-proyecto IV: Monitoreo continuo de puentes

- a) **Objetivo 1:** Priorizar y escoger el puente para el monitoreo continuo, y realizar estudios de factibilidad junto con los investigadores de NCREE; se tendrá como base el análisis de los puentes candidatos para el monitoreo continuo en el sub-proyecto III.
- b) **Objetivo 2:** Realizar una inspección visual exhaustiva del puente para determinar su condición real antes de implementar el sistema del monitoreo.
- c) **Objetivo 3:** Construir el modelo analítico de los elementos finitos del puente escogido y validarlo con técnicas de identificación de sistemas.
- d) **Objetivo 4:** Identificar necesidades, elementos y secciones críticas de monitoreo basado en el modelo estructural calibrado y los resultados de la inspección visual.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 79 de 100
------------------------------	---	------------------

- e) **Objetivo 5:** Preparar los sitios o puntos donde se instalarán los sensores y el nodo host o anfitrión, diseñar y brindar protectores contra la intemperie si se necesitan. Hallar el punto estratégico adecuado en cuanto a la recepción de señales, donde se guardarán el controlador de tiempo real, y se proveerá de alimentación eléctrica continua.
- f) **Objetivo 6:** Diseñar la solución para proveerse de una fuente de poder eléctrico a los sensores instalados sobre el puente.
- g) **Objetivo 7:** Coordinar trabajos y obtener apoyos de entidades gubernamentales relacionados con el proyecto.
- h) **Objetivo 8:** Planificar actividades para la segunda visita de investigadores de NCREE a Costa Rica.
- i) **Objetivo 9:** Instalar, configurar y realizar pruebas del sistema de monitoreo permanente instalado en el puente selecto, para luego, realizar el trabajo de monitoreo continuo.

Tiempo de ejecución: Preliminarmente se espera que la segunda visita se realice durante el año 2014 (a coordinar con NCREE), pero una vez que el sistema esté instalado y entre en operación, el trabajo de monitoreo es continuo hasta el día que se retira el sistema del puente.

Alcances: Para este sub-proyecto se escogerá y se definirá, junto a los investigadores de NCREE, un puente para realizar el monitoreo permanente; los investigadores de NCREE harán la segunda visita a Costa Rica y colaborará con la instalación y configuración del sistema de monitoreo permanente en el puente escogido. De parte de Costa Rica se necesita tener los sitios listos para la instalación de sensores incluyendo la fuente eléctrica, y proveerse de equipos y personal necesarios para el trabajo de instalación antes de la segunda visita de NCREE, ya que de parte de los expertos de NCREE colaborarán

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 80 de 100
------------------------------	---	------------------

principalmente con la programación, configuración y ejecución de pruebas del sistema de monitoreo. El puente será monitoreado en forma continua.

7.1.5. Sub-proyecto V: Realización de pruebas de carga en puentes específicos

- a) **Objetivo 1:** Priorizar puentes que requieren de un estudio de mayor profundidad y pruebas de carga basado en los resultados obtenidos en el sub-proyecto III.
- b) **Objetivo 2:** Planificar, diseñar y realizar pruebas de carga siguiendo a las recomendaciones de la norma AASHTO.
- c) **Objetivo 3:** Realizar análisis de fatiga y estimación de la vida útil por fatiga en puentes metálicos que requieren de este estudio de mayor profundidad.

Tiempo de ejecución: A lo largo de la ejecución del proyecto, iniciando desde el año 2014

Alcances: Se realizará pruebas de carga en puentes que requieren de este estudio. Basado en los resultados de la prueba de carga se determinará la capacidad real máxima de carga del puente, y se definirá si el puente necesita reforzamiento, adecuación o una intervención inmediata. El trabajo se realizará mediante tesis de licenciatura diferentes a aquellos del sub-proyecto III.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 81 de 100
------------------------------	---	------------------

7.1.6. Sub-proyecto VI: Investigación y capacitación de técnicas para el procesamiento de señales digitales, identificación de sistemas y validación del modelo de los elementos finitos.

- a) **Objetivo 1:** Investigar y aplicar las diferentes técnicas de procesamiento de señales e identificación de sistemas para realizar el MSE basado en vibraciones en puentes.
- b) **Objetivo 2:** Investigar y aplicar las diferentes técnicas de identificación de las matrices de rigidez o de flexibilidad, junto con la validación y calibración de modelo de elementos finitos, en el MSE de puentes.
- c) **Objetivo 3:** Investigar y aplicar las diferentes técnicas de detección y cuantificación de daño basado en vibraciones.

Tiempo de ejecución: A lo largo de la ejecución del proyecto, iniciando desde el año 2014

Alcances: Se realizarán investigaciones mediante tesis de licenciatura o de maestría sobre las diferentes técnicas de procesamiento de señales, identificación de sistemas y detección de daños basado en las vibraciones del puente.

7.2. CRONOGRAMA

Año	2013		2014		2015		2016		2017	
Semestre	I	II								
Sub-proyecto I	■	■	■							
Sub-proyecto II	■	■	■							
Sub-proyecto III		■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sub-proyecto IV			■	■	■	■	■	■	■	■
Sub-proyecto V			■	■	■	■	■	■	■	■
Sub-proyecto VI			■	■	■	■	■	■	■	■

El proyecto contempla unos cinco años de convenio con NCREE, sin embargo, una vez adquiridos los equipos y desarrolladas las técnicas y metodologías de evaluación y monitoreo de puentes, los sub-proyectos III, V y VI pueden continuar como un proyecto de investigación de rutina, además de realizar el monitoreo permanente en otros puentes (sub-proyecto IV).

8. RECURSO HUMANO

La ejecución del proyecto se basa en una colaboración trilateral entre los investigadores de LanammeUCR, profesores y estudiantes de la Escuela de Ingeniería, UCR, e investigadores de NCREE y Universidad Nacional de Taiwán, de parte de Taiwán.

El homologado por parte de NCREE y Universidad Nacional de Taiwán es el profesor Chin-Hsiung Loh, de la Universidad Nacional de Taiwán. Habrá tres investigadores de NCREE bajo la dirección del profesor Loh quienes visitarán a nuestro país, en primera instancia para realizar la transferencia de tecnología inalámbrica y demostración del uso del equipo; luego, en una segunda visita se realizará la instalación del sistema de monitoreo permanente en un puente como un plan piloto.

Dado que la unidad de puentes es el ente principal de investigación en materia de puentes, el coordinador de la unidad, Ing. Rolando Castillo Ph.D. fungirá como el director del proyecto. El personal de la unidad de puentes colaborará, además de su trabajo de rutina, a las labores de investigación e instrumentación de puentes.

El Ing. Yi Cheng Liu Kuan M.Sc., profesor de la Escuela de Ingeniería Civil de UCR, ha sido elegido por la Unidad de Puentes para liderar este proyecto de investigación aplicada. Él será el responsable de mantener la comunicación con los investigadores del NCREE y la Universidad de Taiwán y brindará apoyo en la preparación de informes de avance e informes finales durante la vigencia del convenio. Muchos de los proyectos de investigación que aquí propuestos serán llevados a cabo con la ayuda de estudiantes por medio de tesis de licenciatura o de maestría dirigidos por este investigador, asesorados por los integrantes de la Unidad de puentes, y apoyados por los asistentes de ingeniería de la Unidad, pero siempre teniendo en cuenta la posible participación y apoyo que podrían brindar otros profesores de la Escuela y profesionales especialistas en la materia. Además, se invitará a personeros del MOPT y CONAVI participar como observadores de este proyecto. Del plan de investigación presentado anteriormente es evidente que la evaluación y el monitoreo de puentes contempla una amplia gama de actividades, y es necesario involucrar personal que

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha de emisión: 14 de febrero del 2013	Página 84 de 100
------------------------------	--	------------------

se dedican el cien por ciento a esta investigación. Por ende, se considera que es conveniente llevar adelante las partes más específicas del proyecto de investigación, tales como los sub-proyectos de evaluación de capacidad de carga, las pruebas de carga in situ y estudios más profundos, mediante trabajos finales de graduación o tesis de licenciatura o de maestría, esto considerando el carácter del trabajo (se puede evaluar varios puentes en forma simultánea aplicando la misma metodología, asignando un puente por estudiante). Por esta razón dentro de los recursos humanos disponibles también están los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil.



9. COSTO DE INSTRUMENTACION

De forma preliminar se toma como base el plan de colocar instrumentos al puente sobre el río Virilla, ruta 32, para la estimación de cantidad de sensores necesarios y los costos asociados. Sin embargo, de nuevo se reitera que mientras mayor es la cantidad de sensores, mejor es la resolución espacial en la identificación de los modos de vibración. La cantidad de sensores a adquirir depende del presupuesto disponible. Luego, dada la modalidad de colaboración con NCREE, se le otorga a NCREE la dirección en cuanto a la adquisición de equipos y el plan de instrumentación de los puentes sobre los cuales se hará la demostración.

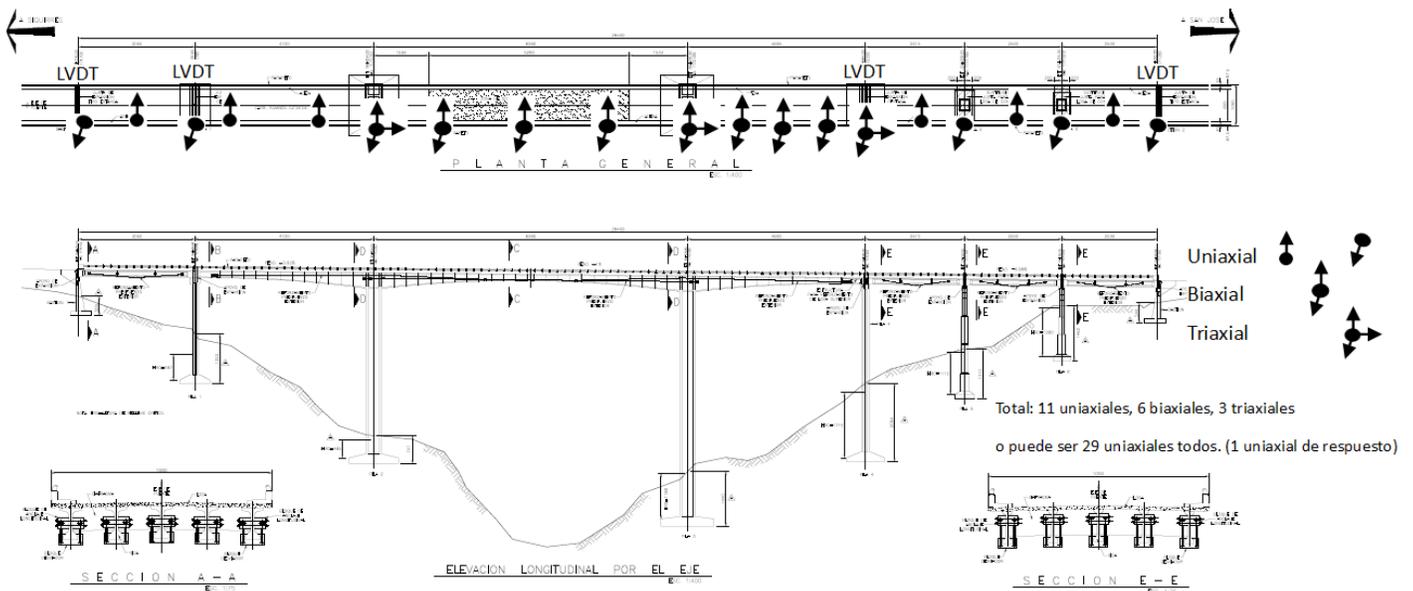


Figura 28. Diseño preliminar de la instrumentación en el puente sobre río Virilla, ruta 32 y estimación de la cantidad de sensores necesarios.

Sensores

<i>Ítem</i>	<i>Precio unitario (dólares)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Nota</i>
Tokyo Sokushin AS-301C1W5 acelerómetro uniaxial	1600	12	19200	Usado por Prof. Loh
Tokyo Sokushin AS-302D2W2 acelerómetro biaxial	2700	6	16200	
Tokyo Sokushin AS-303D2W2 acelerómetro triaxial	3800	3	11400	
Fletes	1500	1	1500	Tiempo de envío: 3-4 meses
HONEYWELL S&C Honeywell S&C TRANSDUCER, LINEAR POSITION (LVDT)	600	4	2400	
Subtotal			50700	

El nodo host

<i>Ítem</i>	<i>Precio unitario (dólares)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Nota</i>
Controlador NI cRIO-9024 + repuestos	4880	1	4880	
Licencia de Labview	2640	1	2640	
Computadora PC o laptop última generación	2700	1	2700	
Subtotal			10 220	

Unidades de transmisión inalámbrica

<i>Ítem</i>	<i>Precio unitario (dólares)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Nota</i>
NTU-WSU v0.2 (precio varió por alza en materia prima)	800	24	19200	
Batería Litio 7.4 V 3200 mA recargable (3 días funcionamiento continuo)	250	40	10000	
Low pass filter	80	20	1600	Filtro de paso bajo
Subtotal			30 800	

Costo estimado en equipos inalámbricos: \$ 91,720.00 dólares estadounidenses

Equipo de medición remota mediante imágenes digitales

<i>Ítem</i>	<i>Precio unitario (dólares)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Nota</i>
Samsung 1080 HD Digital Camcorder with 30X Optical Zoom	400	2	800	
Accesorios (trípode, lentes telescópicas)	200	2	400	
Computadora portátil	1500	1	1500	
		Subtotal	2 700	

Costo total estimado en equipos: \$ 94,420.00 dólares estadounidenses

Gastos en personales

<i>Ítem</i>	<i>Precio unitario (dólares)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Nota</i>
Pasajes Taipéi-San José (precio máximo de temporada alta)	2500	3	7500	3 investigadores de NCREE (precio temporada baja anda en 1500)
Hospedaje	240	14	3360	80 dólares por persona, asumir 14 días.
Alimentación y gastos	210	14	2940	70 dólares por persona por día, asumir 14 días
		Subtotal	13 800	

Gran total: \$ 108,220.00 dólares estadounidenses

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 88 de 100
------------------------------	---	------------------

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a) El MSE es uno de los focos de atención en el ámbito de ingeniería civil a nivel internacional en los últimos veinte años, gran esfuerzo ha sido entregado y diversas soluciones y sistemas para la implementación de este propósito se encuentran disponibles tanto a nivel académico como a nivel industrial.
- b) El MSE se basa en informaciones medidas y recolectadas en el campo, sea en línea o fuera de línea. Estas informaciones son generalmente señales de voltaje u corrientes eléctricas que requieren ser procesadas e interpretadas. Además, hoy en día los sistemas son en la gran mayoría digitales, por lo que es importante la capacitación en cuanto a la interpretación y procesamiento de señales digitales.
- c) Los diversos sistemas y técnicas para implementar el MSE en puentes son relativamente recientes, es importante tener en cuenta los alcances y limitaciones de cada sistema y sensor para poder aplicarlos de una forma más eficaz. Asimismo, dada la gran complejidad que poseen las estructuras civiles, aún existe grandes retos por superar en esta área de MSE.
- d) Dado lo reciente que son las tecnologías y metodologías para el MSE y que éstas son de poco conocimiento en Costa Rica, se recomienda establecer convenios de colaboración con instituciones de investigación más avanzadas en esta materia para recibir por parte de ellos asesorías, transferencias de conocimientos y experiencias adquiridas, obtención de equipos tecnológicos adecuados y recomendaciones en cuando a la selección de sensores.
- e) El diagnóstico, la evaluación y el monitoreo del estado estructural de puentes es un tema crítico en Costa Rica. Es necesario complementar la ejecución de inspecciones de rutina con técnicas más avanzadas de monitoreo y detección mediante la instrumentación de sensores novedosos, para que además de las descripciones visuales cualitativas hayan también mediciones reales e informaciones cuantitativas que serían cruciales para la toma de decisiones.

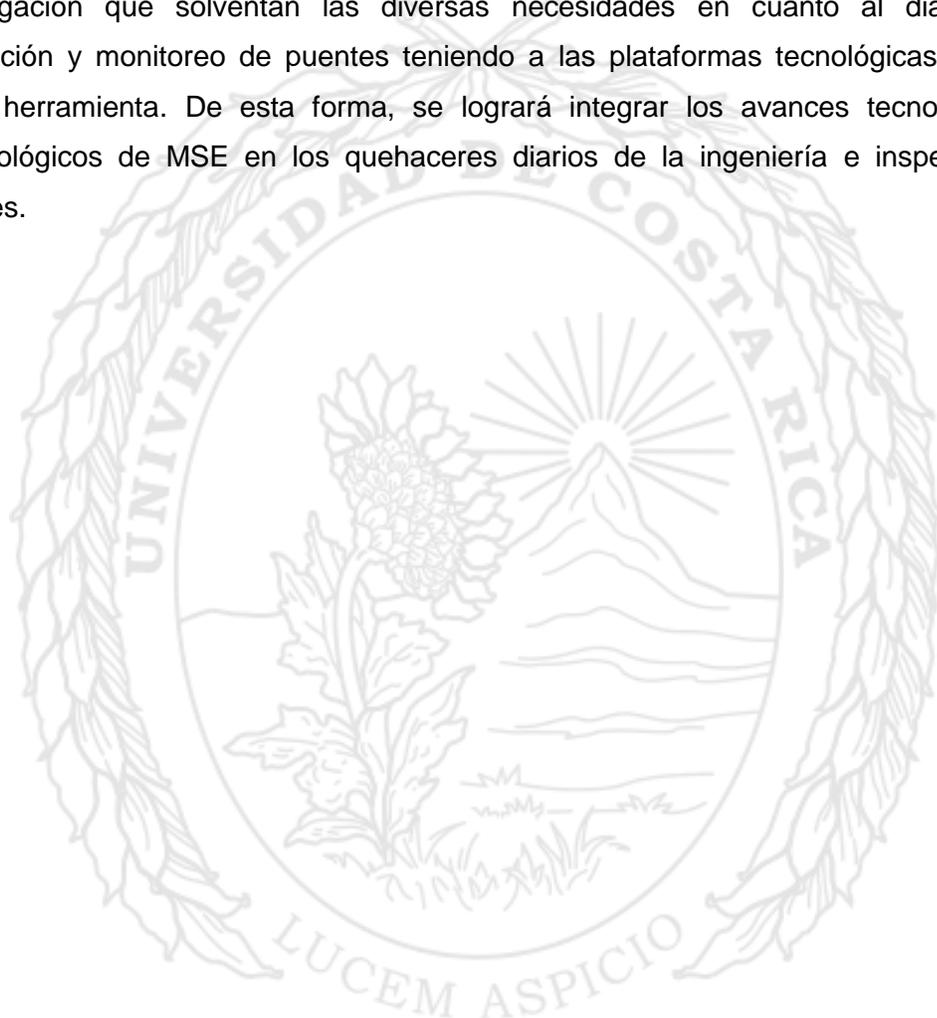
Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 89 de 100
------------------------------	---	------------------

- f) En forma general se puede clasificar las plataformas tecnológicas para implementación de MSE en tres tipos: sistema alámbrico, inalámbrico y sensores de medición remota.
- g) El representante máximo del sistema alámbrico son las tecnologías de fibra óptica. Éstas son inmunes ante las interferencias electromagnéticas y permiten la transmisión de datos hasta kilómetros de distancia gracias a la baja atenuación de señal que ofrecen. Los sensores de fibra óptica de mayor uso son los deformímetros o strain gauges. Este sistema se recomienda instalarse ya sea durante la etapa constructiva de un puente nuevo o del reforzamiento de un puente existente aprovechando las obras temporales. De esta manera el sistema formaría una parte integral de la estructura, esto por la delicada labor de su instalación. El sistema es preferible para el monitoreo continuo, no tanto para realizar pruebas fuera de línea o de diagnóstico.
- h) Los llamados “sensores inalámbricos” son unidades inalámbricas de adquisición de datos conectadas con sensores de medición. Éstas son versátiles en cuanto a la instalación ya que además de ser sistemas portátiles, como los sensores de medición remota, también pueden instalarse en forma permanente en un puente existente.
- i) Existe una variedad de sensores de medición remota, como el Sistema de Posicionamiento Global GPS que es comúnmente utilizado para monitorear desplazamientos estáticos del puente. Para el monitoreo de desplazamientos dinámicos se puede encontrar los métodos visuales (sistema IBIS y sistema PSD) como la solución más económica.
- j) Se recomienda realizar investigaciones en las técnicas de medición de desplazamiento o deformación basada en la visión o en el procesamiento de imágenes digitales, ya que es una solución sumamente económica y accesible, y ofrece facilidades no sólo a nivel de investigación sino también a nivel de docencia.
- k) Se recomienda adquirir la plataforma inalámbrica para el MSE de puentes, ya que son equipos portátiles, fáciles de instalarse y permiten desplazarse de un puente a otro.
- l) En cuanto a la ejecución de proyectos de monitoreo permanente de puentes y en el caso de que el sistema de fibra óptica sea escogido, se recomienda contratar empresas especializadas en la materia, esto debido a la delicada labor de instalación de las fibras

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 90 de 100
------------------------------	---	------------------

ópticas. Sin embargo, el sistema inalámbrico podría funcionar a la perfección para el monitoreo permanente de puentes.

- m) Para todo sistema de monitoreo permanente se debe tomar en cuenta cómo se le proveerá de una fuente de energía continua.
- n) Se recomienda atacar los problemas asociados con la gestión de la infraestructura de puentes desde una perspectiva integral, al crear programas y sub-programas de investigación que solventan las diversas necesidades en cuanto al diagnóstico, evaluación y monitoreo de puentes teniendo a las plataformas tecnológicas de MSE como herramienta. De esta forma, se logrará integrar los avances tecnológicos y metodológicos de MSE en los quehaceres diarios de la ingeniería e inspección de puentes.



11. REFERENCIAS

1. Sohn, H., C. R. Farrar, et al. (2004). "A Review of Structural Health Monitoring Literature form 1996-2001". LA-13976-MS. Los Alamos National Laboratory.
2. Traducción de Farrar&Worden (2007) "An introduction to structural health monitoring" . Phil. Trans. R. Soc. A 365, 303–315.
3. Rytter, A. (1993). "Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures". P h. D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
4. Scott W. Doebling Charles R. Farrar Michael B. Prime Daniel W. Shevitz. "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review". LA-13070-MS Los Alamos National Laboratory (LANL).
5. Steven B. Chase and Glenn Washer (1997). "Nondestructive Evaluation for Bridge Management in the Next Century". The Federal Highway Administration (FHWA), Public Roads, July/August 1997 Vol. 61· No. 1.
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/97july/ndejuly.cfm>
6. K.Y. Wong (2011). "Design of wind and structural health monitoring system for Stonecutters Bridge". The 5th Cross-strait Conference on Structural and Geotechnical Engineering (SGE-5) Hong Kong, China, 13-15 July 2011.
7. C.S. Wang, C.Y. Wang, Y.C. Sung, C.C. Cheng, P.Y. Hung (2011). "Applications of Non-contact Measurement Techniques to Bridge Health Inspection". The 5th Cross-strait Conference on Structural and Geotechnical Engineering (SGE-5) Hong Kong, China, 13-15 July 2011 .
8. Glaser, Li, Wang, Ou and Lynch (2007). "Sensor technology innovation for the advancement of structural health monitoring: a strategic program of US-China research for the next decade". Smart Structures and Systems, Vol. 3, No. 2 (2007) 221-244.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 92 de 100
------------------------------	---	------------------

9. Daniele Inaudi (1997). "Fiber Optic Sensor Network for the Monitoring of Civil Engineering Structures". Tesis doctoral. Lausanne, EPFL.
10. C. Y., Wu (2002). "Sensing Techniques for Bridge Monitoring". Master Thesis. National Central University, Taiwan.
11. Wang, Chung-Yue, H. –L. Wang, C. –Y. Wu and Chern-Hwa Chen (2003). "Development of Bridge Health Monitoring Systems in Taiwan", Proceedings of the First International conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan, 2003/11/13-15, PP. 1067-1072.
12. Inaudi D., S. Vurpillot, N. Casanova, P. Kronenberg (1998). "Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors". Smart Materials and Structures, Vol 7, p.199-208.
13. Daniele Inaudi, Nicoletta Casanova, Samuel Vurpillot (1999). "Bridge Deformation Monitoring with Fiber Optic Sensors". IABSE Symposium - Rio de Janeiro - August 25-27, 1999.
14. Olivier Burdet, Marc Badoux (1999). "Deflection Monitoring of Prestressed Concrete Bridges Retrofitted by External Post-Tensioning". IABSE Symposium - Rio de Janeiro - August 25-27, 1999.
15. Daniele Inaudi (2010). "Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects". SMARTEC SA, Switzerland, Roctest Ltd, Canada, IBC 09-45, 2010.
16. Samuel Vurpillot, Nicoletta Casanova, Daniele Inaudi, Pascal Kronenberg (1997). "Bridge spatial displacement monitoring with 100 fiber optic sensors deformations: sensors network and preliminary results". SPIE Conference on Smart Structures and Materials, 5-6.03.1997, San Diego, USA.
17. Wonseok Chung a, Sungil Kim a, Nam-Sik Kim b, Hee-up Lee (2008). "Deflection estimation of a full scale prestressed concrete girder using long-gauge fiber optic sensors". Construction and Building Materials 22, 394–401.
18. Samuel Vurpillot, Daniele Inaudi, Antonio Scano. "Mathematical model for the

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha de emisión: 14 de febrero del 2013	Página 93 de 100
------------------------------	--	------------------

determination of the vertical displacement from Internal horizontal measurements of a bridge”. SPIE Smart Structures and Materials, 1996, San Diego, USA.

19. Mousumi Majumder, Tarun Kumar Gangopadhyay, Ashim Kumar Chakraborty, Kamal Dasgupta, D.K. Bhattacharya. “Fiber Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications”. Sensors and Actuators A 147 (2008) 150–164.
20. Carlos Rodrigues, Carlos Félix, Armindo Lage, Joaquim Figueiras. “Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges”. Engineering Structures 32 (2010) 1993_2002. doi:10.1016/j.engstruct.2010.02.033.
21. Rodrigo A. Silva-Muñoz, Roberto A. Lopez-Anido. “Structural health monitoring of marine composite structural joints using embedded fiber Bragg grating strain sensors”. Composite Structures 89 (2009) 224–234. doi:10.1016/j.compstruct.2008.07.027.
22. Whitten L. Schulz, Joel P. Conte, Eric Udd, John M. Seim. “Static and dynamic testing of bridges and highways using long-gage fiber Bragg grating based strain sensors”. Proc. SPIE 4202, Industrial Sensing Systems, 79 (December 29, 2000); doi:10.1117/12.411730.
23. Wonseok Chung a,*, Sungil Kim a, Nam-Sik Kim b, Hee-up Lee. “Deflection estimation of a full scale prestressed concrete girder using long-gauge fiber optic sensors”. Construction and Building Materials 22 (2008) 394–401. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.08.007.
24. Bruno J. Afonso Costa , Joaquim A. Figueiras. “Fiber optic based monitoring system applied to a centenary metallic arch bridge: Design and installation”. Engineering Structures 44 (2012) 271–280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.005>
25. C. T., Shih. “Real time monitoring of Track Deformation by Fiber Bragg Grating Sensors”. Master Thesis, National Central University, Taiwan, 2004.
26. Scott A. Meller. “Extrinsic Fabry-Perot Interferometer System Using Wavelength Modulated Source”. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
27. R. C. Tennyson et al. “Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors”. Smart Mater. Struct. 10 (2001) 560–573 doi:10.1088/0964-1726/10/3/320.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 94 de 100
------------------------------	---	------------------

28. Zhi Zhou, Thomas W. Graver, Luke Hsu, Jin-ping Ou. "Techniques of Advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges-2. Pacific Science Review, vol. 5, 2003, pp.116~121.
29. Zou et al. "An experimental study on the concrete hydration process using Fabry-Perot fiber optic temperature sensors". Measurement 45 (2012) 1077–1082.
doi:10.1016/j.measurement.2012.01.034.
30. Kai Tai Wan, Christopher K.Y. Leung. "Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures". Sensors and Actuators A 135 (2007) 458–464.
doi:10.1016/j.sna.2006.09.004.
31. Matta, F., Bastianini, F., Galati, N., Casadei, P., and Nanni, A. (2008). "Distributed Strain Measurement in Steel Bridge with Fiber Optic Sensors: Validation through Diagnostic Load Test." J. Perform. Constr. Facil. 22, SPECIAL ISSUE: Assessment and Evaluation of Existing Structures by Means of In-Situ Load Testing and Structural Monitoring, 264–273. doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:4(264).
32. Glišić, Branko; Posenato, Daniele; Inaudi, Daniele. "Integrity monitoring of old steel bridge using fiber optic distributed sensors based on Brillouin scattering". Proceedings of the SPIE, Volume 6531, pp. 65310P (2007).
33. Jjiang Jianjing, Lu Xinzhen, Guo Jingjun. "Study for Real-time Monitoring of Large-Span Bridge Using GPS". Proc. ISSST 2002, "Progress in Safety Science and Technology", Beijing/New York: Science Press, HUANG P., WANG YJ, LI SC, QIAN XM, eds. Tai'an, Sep. 2002. 308~312.
34. Keng Tsang Hsu et al. "Evaluation of the Dynamic Characteristics of an Extradosed Bridge Using Microwave Interferometer". 2011, Advanced Materials Research, 374-377, 2426. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.2426.
35. 鄭家齊, 余志鵬, 許耿蒼. "牛鬥橋車載實驗與微波檢測". Niou Tou Bridge field test seminar, April, 2011, NCREE.
36. Cheng-Shiang Wang. "A Remote Laser Displacement Measurement System by the Time Interval Transform Technique". Master thesis, National Central University, Taiwan,

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 95 de 100
------------------------------	---	------------------

2010.

37. C.Y. Wang, T. Miyasaka, C.C. Hsu and Y.C. Sung. "Application of Position Sensitive Director (PSD) Technology on Structural Health Diagnosis of Highway Bridges". The 22th KKCNN Symposium on Civil Enggneering 31 October - 2 November, 2009, Thailand.
38. Yi Zhang, Weiming Chen, Peng Zhang, Shunren Hu and Xianming Liu. "High-Accuracy Displacement Measurement of Structure Based on Position Sensitive Detector". The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology ANCRiSST2011 July 25-26, 2011, Dalian, China.
39. Wan Cheng-Li. "Applications of PSD & CCD on the Structure Displacement Measurement". Master thesis, National Central University, Taiwan, 2010.
40. Zhu et al. "Health monitoring system for Dafosi cable-stayed bridge". Proceedings of SPIE Vol. 5057 (2003).
41. Florent Mathieu, François Hild, Stéphane Roux. "Identification of a crack propagation law by digital image correlation". International Journal of Fatigue 36 (2012) 146-154. DOI : 10.1016/j.ijfatigue.2011.08.004
42. Fraser et al. "Sensor Network for Structural Health Monitoring of a Highway Bridge". Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 24, No. 1, January 1, 2010.
43. T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton. "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics". Experimental Mechanics. September 1985, Volume 25, Issue 3, pp 232-244.
44. Lee et al. "Evaluation of Bridge Load Carrying Capacity Based on Dynamic Displacement Measurement Using Real-time Image Processing Techniques". Steel Structures 6 (2006) 377-385.
45. J. J. Lee & M. Shinozuka. "Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques". Experimental Mechanics (2006) 46: 105–114. DOI 10.1007/s11340-006-6124-2
46. Santini et al. "Digital Imaging for Bridge Deflection Measurement of a Steel Girder 1

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 96 de 100
------------------------------	---	------------------

Composite Bridge”. Transportation Research Board 2011 Annual Meeting, paper 11-1633.

47. Hsieh Yu-De. “The techniques of digital photometry applied to measure stay-cable vibration”. Master Thesis. Department of Construction Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, 2009.
48. Jerome P. Lynch and Kenneth J. Loh. “A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring”. The Shock and Vibration Digest 2006; 38; 91. DOI: 10.1177/0583102406061499
49. Kung-Chun Lu and Chin-Hsiung Loh. “Development of Wireless Sensing System for Structural Health Monitoring”. Proceedings of the SPIE, Volume 7647, pp. 76470G-76470G-12 (2010).
50. Lu et al. “Real-time structural damage detection using wireless sensing and monitoring system”. Smart Structures and Systems, Vol. 4, No. 6 (2008) 759-778.
51. Loh et al. “Discussion on the Application of Wireless Active Sensing Unit for Structural Control”. 4th World Conference on Structural Control and Monitoring 4WCSCM-261.
52. Weng et al. “Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems”. Engineering Structures 30 (2008) 1820–1830.
53. Chin-Hsiung Loh ; Ming-Che Chen and Shu-Hsien Chao “Stochastic subspace identification for operational modal analysis of an arch bridge”. Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, 834504 (April 26, 2012); doi:10.1117/12.912514.
54. Loh et al. “Develop Structural Health Monitoring and Early Warning Damage Detection System for Bridge Structures Using Smart Sensing Network (IV)”. Taiwan Central Weather Bureau report. (<http://scman.cwb.gov.tw/eqv5/research/58vol/MOTC-CWB-99-E-12.pdf>)
55. Loh et al. “Experimental verification of a wireless sensing and control system for structural control using MR dampers”. Earthquake Engng Struct. Dyn. 2007; 36:1303–1328. DOI: 10.1002/eqe.682
56. Wei-Xin Ren and Zhou-Hong Zong. “Output-only modal parameter identification of civil

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 97 de 100
------------------------------	---	------------------

engineering structures”. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, No. 3-4 (2004).

57. Peeters, Bart. “System Identification and Damage Detection in Civil Engineering”. Ph.D. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven, December 2000.

58. Doebling Scott, Farrar Charles and Prime Michael. “A summary review of vibration-based damage identification methods”. Shock and Vibration Digest, 30(2), 91–105, 1998.

59. Charles R Farrar and David A Jauregui. “Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I. Experiment”. Smart Mater. Struct. 7 (1998) 704–719.

60. Charles R Farrar and David A Jauregui. “Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study”. Smart Mater. Struct. 7 (1998) 720–731.

61. Q. Qin, H. B. Li AND L. Z. Qian. “Modal Identificación of Tsing Ma Bridge by Using Improved Eigensystem Realization Algorithm”. Journal of Sound and vibration (2001) 247(2), 325-341. doi:10.1006/jsvi.2001.3751

62. Brad A. Pridham & John C. Wilson. “Subspace Identificación of Vincent Thomas Suspension Bridge”. IMAC-XX: A Conference on Structural Dynamics, 2002

63. Matthew J. Whelan, Michael V. Gangone, and Kerop D. Janoyan. “Highway Bridge Assessment Using an Adaptive Real-time Wireless Sensor Network”. Sensors Journal, IEEE. Volume: 9 , Issue: 11 Nov. 2009.

64. Brent M. Phares, Terry J. Wipf, Lowell F. Greimann, and Yoon-Si Lee. “Health Monitoring of Bridge Structures and Components Using Smart-Structure Technology”. Volume I and II. Report No. 0092-04-14. Bridge Engineering Center. Center for Transportation Research and Education. Iowa State University. 2005.

65. Aktan et al. “Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges”. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute. 2003. Contract No. DTFH61-01-P-00347.

66. Chung-Bang Yun and Jiyoung Min. “Smart Sensing, Monitoring, and Damage Detection for Civil Infrastructures”. KSCE Journal of Civil Engineering (2011) 15(1):1-14. DOI 10.1007/s12205-011-0001-y.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 98 de 100
------------------------------	---	------------------

67. Yun Zhou, John Prader, John DeVitis, Adrienne Deal, Jian Zhang, Franklin Moon, A. Emin Aktan, "Rapid Impact Testing for Quantitative Assessment of Large Populations of Bridges", Proc. of SPIE Vol. 7983 798322-1, 2011, San Diego. (7983-69)
68. Giannina Ortiz Quesada. "Proyecto eBridge: Predicción remota de fallas en puentes". Revista Ingeniería en Construcción ITCR, Vol. 1, No. 1, 2012.
69. Japan International Cooperation Agency. "The study on capacity development in bridge rehabilitation planning, maintenance and management based on 29 bridges of national highway network in Costa Rica". Final Report. February 2007.
70. American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) (2011). "The Manual For Bridge Evaluation" 2nd Ed. Washington D.C., USA.
71. American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) (2010). "LRFD Bridge Design Specifications" 5th Ed. Washington D.C., USA.
72. Matsuishi M, Endo T. "Fatigue of metals subject to varying stress". Paper presented to Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan; 1968.
73. Rychlik I. "A new definition of the rainflow cycle counting method". Int J Fatigue 1987 ; 1987 (9) : 119–21.
74. K. L. singh and V. R. Ranganath. "Cycle counting using rainflow algorithm for fatigue analysis". National Seminar on Aerospace Structures. Structural Integrity Division, NAL, Bangalore, India, 2010.
75. SeÇil Ariduru. "Fatigue Life Calculation by Rainflow Cycle Counting Method". Master thesis in mechanical engineering, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University. December, 2004.
76. Zanardo et al. "Stiffness Assessment through Modal Analysis of an RC Slab Bridge before and after Strengthening". Journal of Bridge Engineering, Vol. 11, No. 5, September, 2006. ASCE. DOI: 10.1061/ASCE1084-0702200611:5590
77. Wang et a. "Bridge Rating Using System Reliability Assessment. I: Assessment and Verification by Load Testing". Journal of Bridge Engineering, Vol. 16, No. 6, November 1,

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 99 de 100
------------------------------	---	------------------

2011. ASCE.DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000172

78. Wang et al. "Bridge Rating Using System Reliability Assessment. II Improvements to Bridge Rating Practices". Journal of Bridge Engineering, Vol. 16, No. 6, November 1, 2011. ASCE.DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000172.
79. Brownjohn et al. "Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite-Element Model Updating". Journal of Bridge Engineering, Vol. 8, No. 3, May 1, 2003. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:3(162).
80. Law et al. "Dynamic Assessment of Bridge Load-Carrying Capacities. I & II". Journal of Structural Engineering. Vol. 121, No.3. March. 1995. ASCE.
81. Baidar Bakht and Leslie G. Jaeger. "Bridge Testing—A Surprise Every Time". Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 5, May, 1990. ASCE.
82. Loh, Chin-Hsiung. "Smart Structural Systems and Materials". Course Lecture, Civil Engineering Department, National Taiwan University, 2011.
83. Vargas Morales, Gabriel. "Análisis Modal de Sección Atirantada del Puente Sobre el Río Tempisque". Trabajo Final de Graduación del grado de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Civil, UCR, 2004.
84. Morera Rojas, Isabel Cristina. "Análisis Dinámico y Propuesta de Instrumentación del Puente sobre el Río Grande en el Proyecto Ciudad Colón-Orotina". Trabajo Final de Graduación del grado de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Civil, UCR, 2004.
85. Calderón Phillips, Carlos Javier. "Análisis Dinámico del Puente sobre el Río Virilla: Proyecto Ciudad Colón-Orotina". Trabajo Final de Graduación del grado de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Civil, UCR, 1999.
86. Gamboa Núñez, Daniel. "Evaluación Estructural y Diagnóstico del Puente-Paso Elevado sobre la Entrada a Escazó, Carretera San José-Ciudad Colón". Trabajo Final de Graduación del grado de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Civil, UCR, 2000.

Informe No. LM-PI-UP-02-2013	Fecha del emisión: 14 de febrero del 2013	Página 100 de 100
------------------------------	---	-------------------