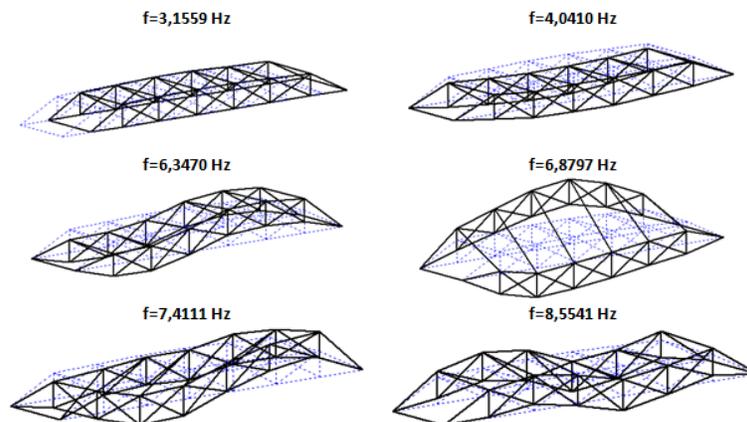


## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe de Investigación  
LM-PI-UP-07-2015

# DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA PORTÁTIL DE MONITOREO Y EVALUACIÓN DE PUENTES

Preparado por:  
Unidad de Puentes



San José, Costa Rica  
Diciembre, 2015

Página intencionalmente dejada en blanco

# DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA PORTÁTIL DE MONITOREO Y EVALUACIÓN DE PUENTES LM-PI-UP-07-2015

Liu-Kuan, Yi-Cheng<sup>1</sup>; Agüero-Barrantes, Pablo<sup>2</sup>; Barrantes-Jiménez, Roy<sup>3</sup>  
y Loria-Salazar, Luis Guillermo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Evaluador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

<sup>2</sup> Ingeniero Evaluador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

<sup>3</sup> Coordinador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

<sup>4</sup> Coordinador general Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) LanammeUCR

**Palabras Clave:** PITRA, Puentes, desplazamiento dinámico, instrumentación, imágenes digitales, monitoreo.

**Resumen:** Un sistema portátil híbrido cableado/inalámbrico para el monitoreo de puentes basado en vibraciones fue desarrollado y validado mediante experimentos en el laboratorio y pruebas de campo.

El diseño del sistema de instrumentación considera la necesidad y la realidad de evaluación y monitoreo de puentes de Costa Rica. Es un sistema modular que contiene un controlador en tiempo real, módulos de posicionamiento global GPS, módulos de vibración, los nodos de acceso para la creación de una red inalámbrica IEEE802.11g/n (red WI-FI) y batería en cada módulo. Los acelerómetros de alta sensibilidad y bajo ruido funcionan como sensores de vibración.

Se realizaron pruebas de validación al sistema y al algoritmo de adquisición de datos, primero en laboratorio y con especial énfasis en la sincronización de los datos, luego se hizo varias pruebas en campo: a) en el puente peatonal corto del edificio de parqueos de la Universidad de Costa Rica, b) en el puente peatonal de Parque de la Paz y finalmente, c) en el puente sobre el río Virilla en la ruta nacional No. 32.

Con el sistema de adquisición validado y mediante la aplicación de la técnica de identificación de subespacios estocásticos, es posible implementar el análisis modal operacional en estructuras de puentes, método con el que se posibilita el monitoreo del estado de estructuras de puentes, así como la detección y cuantificación de daños basado en la calibración del modelo de elementos finitos.

---

## Referencias

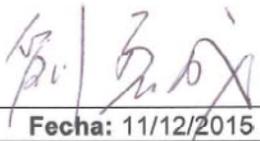
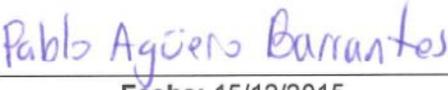
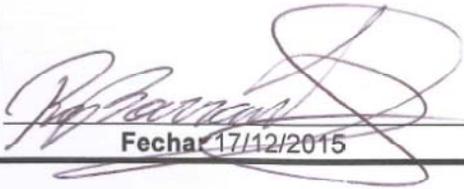
- AASHTO (2011). The Manual of Bridge Evaluation. American Association of State Highway and Transport Officials. Second Edition, USA.
- Liu-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema de medición de desplazamiento en tiempo real mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales LM-PI-UP-06-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Peeters, B. (2000) "System Identification and Damage Detection in Civil Engineering". Ph.D. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven, December 2000.
- Liu, Y.C.; Loh, C.H.; Ni, Y.Q. (2012) "Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower under abnormal loading condition". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 42:477-498. Wiley Online Library. June, 2012.
- Loh, C.H.; Liu, Y.C.; Wu, T.H.; Ni, Y.Q. (2013) *Variation of Modal Parameters of Canton Tower Under Different Earthquake excitations*. Proceedings of the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Hong Kong, 9-11 December 2013.

Página intencionalmente dejada en blanco

Lui-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema portátil de monitoreo y evaluación de puentes LM-PI-UP-07-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Página intencionalmente dejada en blanco

Información técnica del documento

<b>1. Informe:</b> LM-PI-UP-07-2015		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA PORTÁTIL DE MONITOREO Y EVALUACIÓN DE PUENTES		<b>4. Fecha del Informe</b> 18 de diciembre de 2015
<b>5. Organización y dirección</b> 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		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna		
<b>7. Resumen</b> <i>Un sistema portátil híbrido cableado/inalámbrico para el monitoreo de puentes basado en vibraciones fue desarrollado y validado mediante experimentos en el laboratorio y pruebas de campo. El diseño del sistema de instrumentación considera la necesidad y la realidad de evaluación y monitoreo de puentes de Costa Rica. Es un sistema modular que contiene un controlador en tiempo real, módulos de posicionamiento global GPS, módulos de vibración, los nodos de acceso para la creación de una red inalámbrica IEEE802.11g/n (red WI-FI) y batería en cada módulo. Los acelerómetros de alta sensibilidad y bajo ruido funcionan como sensores de vibración. Se realizaron pruebas de validación al sistema y al algoritmo de adquisición de datos, primero en laboratorio y con especial énfasis en la sincronización de los datos, luego se hizo varias pruebas en campo: a) en el puente peatonal corto del edificio de parqueos de la Universidad de Costa Rica, b) en el puente peatonal de Parque de la Paz y finalmente, c) en el puente sobre el río Virilla en la ruta nacional No. 32. Con el sistema de adquisición validado y mediante la aplicación de la técnica de identificación de subespacios estocásticos, es posible implementar el análisis modal operacional en estructuras de puentes, método con el que se posibilita el monitoreo del estado de estructuras de puentes, así como la detección y cuantificación de daños basado en la calibración del modelo de elementos finitos.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> Puentes, monitoreo de salud estructural, identificación de sistemas, sistema híbrido, dinámica de estructuras.	<b>9. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>10. Núm. de páginas</b> 129
<b>11. Informe por:</b> Ing. Yi Cheng Liu Kuan Unidad de Puentes  Fecha: 11/12/2015	<b>12. Revisado por:</b> Ing. Pablo Agüero Barrantes Unidad de Puentes  Fecha: 15/12/2015	
<b>13. Revisado por:</b> Ing. Roy Barrantes Jiménez Coordinador Unidad de Puentes  Fecha: 17/12/2015	<b>14. Revisado por:</b> Ing. Luis Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 18/12/2015	

Página intencionalmente dejada en blanco



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.2 OBJETIVOS .....	14
<b>2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1 EL CONCEPTO DEL MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL BASADO EN VIBRACIONES .....	15
2.2 LAS METAS Y EL PROCESO DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL .....	17
2.3 PLATAFORMAS TECNOLÓGICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MSE.....	23
2.3.1 <i>SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....</i>	<i>24</i>
2.3.2 <i>SENSORES Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS INALÁMBRICOS .....</i>	<i>38</i>
2.3.3 <i>SENSORES Y TECNOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN Y DETECCIÓN REMOTA .....</i>	<i>42</i>
2.3.4 <i>COMPARACIÓN ENTRE LAS DIFERENTES PLATAFORMAS TECNOLÓGICAS PARA EL MONITOREO Y EVALUACIÓN DE PUENTES .....</i>	<i>51</i>
<b>3. CONCEPTUALIZACIÓN Y DESARROLLO DEL SISTEMA PORTÁTIL PARA INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE PUENTES 55</b>	
3.1 CONCEPTUALIZACIÓN Y DESARROLLO DE LA PARTE FÍSICA DEL SISTEMA.....	55
3.2 DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD ÓPTIMA DE CABLES PARA EL SISTEMA .....	61
3.3 DISEÑO DEL PROGRAMA PARA IMPLEMENTAR Y CONTROLAR LA ADQUISICIÓN DE DATOS.....	66
3.3.1 <i>GRÁFICO DE INTERFAZ DE USUARIO .....</i>	<i>66</i>
3.3.2 <i>ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE LOS CRIO'S.....</i>	<i>71</i>
<b>4. VALIDACIÓN EN LABORATORIO DEL SISTEMA PORTÁTIL PARA MSEBV .....</b>	<b>77</b>
4.1 DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE LA CAJA DE PROTECCIÓN A LOS ACELERÓMETROS .....	77
4.1.1 <i>SELECCIÓN DEL PROTOTIPO ADECUADO PARA LA INSTALACIÓN DEL ACELERÓMETRO Y SU FABRICACIÓN.....</i>	<i>78</i>
4.1.2 <i>VERIFICACIÓN DE LAS SEÑALES DE ACELERACIÓN ADQUIRIDAS CON Y SIN CAJA DE PROTECCIÓN.....</i>	<i>81</i>
4.1.2.1 <i>Prueba de la señal vertical mediante una tabla de madera flexible.....</i>	<i>81</i>
4.1.2.2 <i>Prueba de la señal vertical mediante una placa de acero rígido .....</i>	<i>84</i>
4.1.2.3 <i>Prueba de la señal mediante el modelo de edificio de 3 pisos .....</i>	<i>86</i>
4.2 VALIDACIÓN DE LA SINCRONIZACIÓN DEL SISTEMA .....	89



4.3 VALIDACIÓN DEL SISTEMA CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DE SUBESPACIOS ESTOCÁSTICOS EN UN MODELO DE EDIFICIO METÁLICO DE 3 PISOS.....	91
<b>5. VALIDACIÓN EN CAMPO DEL SISTEMA PORTÁTIL PARA MSEBV100</b>	
5.1 VALIDACIÓN EN EL PUENTE PEATONAL DEL NUEVO EDIFICIO DE PARQUEOS DE UCR. ....	100
5.2 VALIDACIÓN EN EL PUENTE PEATONAL DE PARQUE DE LA PAZ. ....	106
5.3 VALIDACIÓN EN EL PUENTE SOBRE EL RÍO VIRILLA, RUTA N° 32.....	111
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>120</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>122</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

Para garantizar la “salud” de una obra de infraestructura civil a lo largo de su vida útil, ésta debe ser administrada adecuadamente realizando inspecciones en forma regular, efectuar mantenimientos rutinarios y preventivos, y hacer las reparaciones necesarias en casos de detectar deterioro o daño en sus elementos. Estas labores adquieren una importancia aún mayor para la estructura de puentes dado que son elementos claves para permitir el funcionamiento apropiado de la infraestructura vial del país, y unido al hecho de que la mayoría de los puentes de Costa Rica fueron concebidos con una carga de diseño menor que las cargas de operación que soportan hoy día, la necesidad de evaluación de su condición estructural, detección y cuantificación de daño, y la estimación de su desempeño se hacen aún más apremiante.

La práctica convencional de inspección de puentes y detección de daños es primordialmente en forma visual y permite conocer en forma directa el estado de los componentes estructurales que constituyen un puente, ubicación de daños o deterioros y las medidas correctivas a implementarse. Sin embargo, el depender únicamente de la inspección visual conlleva limitaciones como: a) únicamente los elementos accesibles a la vista pueden ser inspeccionados; 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 detectar deficiencias o fallas en el comportamiento durante la operación, a menos de que el deterioro esté en un estado avanzado y sean muy evidentes. Además, la inspección visual demanda un gran esfuerzo humano, y en una gran mayoría de puentes se necesitaría de equipos especiales para acceder a los elementos estructurales y el inspector tendría que asumir un gran riesgo en la ejecución del trabajo.

Existe actualmente numerosas herramientas tecnológicas y metodologías para hacer revisiones más profundas de la estructura, 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. Dichos métodos permiten detectar daños y evaluar cuantitativamente el grado de deterioro



de una estructura, pero con la limitación de que estos son métodos locales y necesitan de un conocimiento a priori de la localización de las zonas dañadas o con sospecha de ello y que este lugar sea accesible.

Ante estas limitantes se plantea la necesidad de formular métodos “globales” que puedan ser aplicados a estructuras complejas y que el desarrollo de tales métodos permita examinar su estado global en forma cuantitativa, e inclusive, en forma continua y en tiempo real. Desde esta necesidad surgió la metodología denominada “Monitoreo de Salud Estructural Basado en Vibraciones” (de ahora en adelante se denotará con el acrónimo MSEBV), la cual es una de las metodologías más prometedoras para realizar el monitoreo de la salud de estructuras. Esta ha sido uno de los focos de investigación en los últimos años, con la intención de poder detectar daños a una edad temprana para así efectuar reparaciones a tiempo y evitar que se conviertan en 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 en puentes. Aunque este es un campo nuevo y un poco desconocido para 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.



## 1.1 Justificación

- Costa Rica es un país sujeto a múltiples amenazas naturales. La infraestructura vial constituye la línea de vida para responder ante emergencias que se generan durante eventos extremos, por lo tanto, esta debe ser inspeccionada, mantenida y monitoreada para asegurar de su buen estado de funcionamiento.
- Los puentes como elemento clave de la infraestructura vial, están sujetos a deterioros con el paso del tiempo, por lo que la evaluación de forma acertada de su estado, la predicción de su comportamiento ante diferentes eventos o solicitudes y la implementación a tiempo de acciones correctivas de reparación o reforzamiento de los mismos son de suma importancia.
- Las labores de inspección visual que ha estado realizando LanammeUCR deben ser complementadas con las técnicas de instrumentación y monitoreo de puentes, las cuales hacen posible las pruebas estáticas y dinámicas en puentes que permiten conocer y cuantificar el estado de daño de la estructura y su capacidad de carga, resultados que son insumos importantes para la toma de decisiones en materia de administración de puentes.
- El sistema portátil de monitoreo y evaluación de puentes también puede ser implementado para la verificación de las calidades constructivas de los puentes nuevos o de los trabajos de reforzamiento, asimismo, sería la base que permite realizar investigaciones en ingeniería estructural y de puentes.

## 1.2 Objetivos

### Objetivo general

Desarrollar un sistema portátil de monitoreo y evaluación de puentes que puede ser implementado para la instrumentación, monitoreo estructural, pruebas dinámicas y estáticas de los puentes de Costa Rica, y validarlo mediante pruebas de laboratorio y en campo.

### Objetivos específicos

- Revisar la literatura técnica a nivel nacional e internacional sobre los diferentes conceptos, sensores y sistemas de instrumentación y monitoreo de puentes, así como realizar reuniones con las industrias relacionadas instaladas en el país para conocer los productos comerciales disponibles en el mercado nacional.
- Adquirir los equipos y sensores necesarios para conformar el sistema que se adapta tanto a la realidad y los tipos de puentes existentes en Costa Rica, como a las necesidades y metas de monitoreo y evaluación.
- Conceptualizar y programar los algoritmos del sistema de monitoreo, realizar prueba preliminares para familiarizarse con el funcionamiento del mismo y de los sensores.
- Desarrollar cajas de protección para la instalación de los sensores en campo.
- Realizar pruebas de validación del sistema en laboratorio y en campo.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 El Concepto del Monitoreo de Salud Estructural basado en Vibraciones

Monitoreo de Salud Estructural (se denotará con el acrónimo MSE) puede definirse como “el proceso en el cual las estrategias de detección de daños son implementados en las infraestructuras aero-espaciales, mecánicas y civiles” [ref. 2]. Las primeras técnicas de monitoreo fueron implementados en las estructuras aeroespaciales, como naves espaciales y aeroplanos, por la necesidad de monitorear las condiciones imperantes en el vuelo y emitir alertas tempranas si se detectara alguna falla, pretendiendo así salvaguardar la vida humana a bordo. Actualmente ya existe una gran variedad de técnicas para efectuar la detección de daños en motores, turbinas y sistemas mecánicos en general.

Existe perspectivas muy variadas del problema de monitoreo, también metodologías asociadas con sus plataformas tecnológicas muy distintas entre sí. El Monitoreo de Salud Estructural Basado en Vibraciones (MSEBV), tal como su nombre lo indica, es una metodología basada en la medición de las vibraciones de la estructura. El propósito del monitoreo no es otro que la detección de daños o falla. El concepto que subyace esta metodología es: 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 (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 [ref. 1].

Las vibraciones en las estructuras civiles fueron estudiadas experimentalmente desde los años sesenta del siglo pasado, se aplicaban métodos de pruebas dinámicas de vibración



libre o forzada para estudiar el comportamiento dinámico de las estructuras con especial atención al de los edificios. Estos estudios son más académicos y se buscaba obtener los períodos naturales de oscilación y la razón de amortiguamiento. No obstante, el tema propiamente de monitoreo de la salud de la infraestructura civil no tomó fuerza sino hasta los comienzos de los años noventa, esto debido a varias razones:

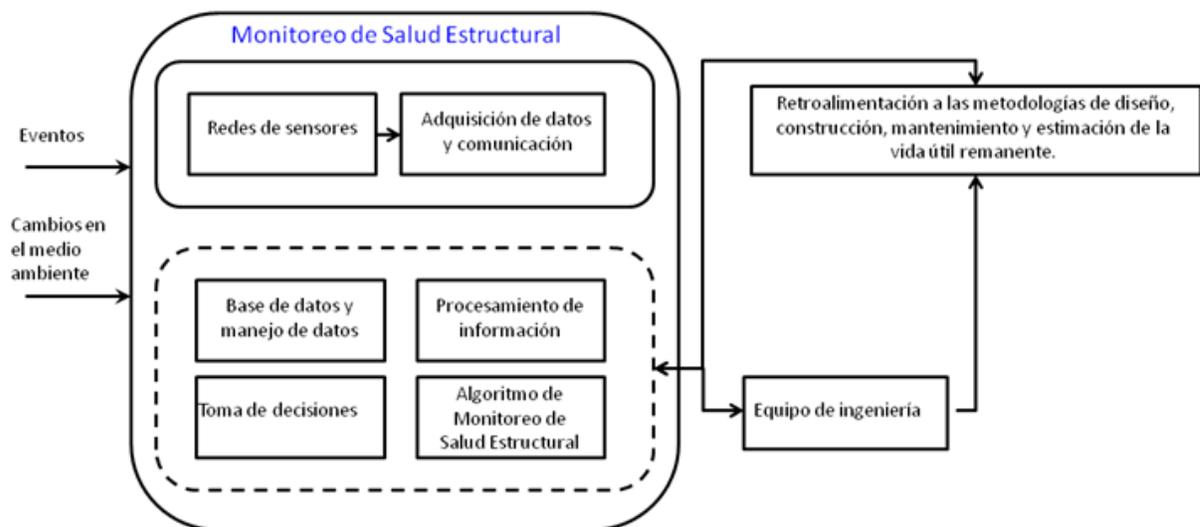
- a) La necesidad urgente de determinar el estado de deterioro de las estructuras civiles de gran escala, ya que una gran cantidad de éstas han llegado o se aproximan a la etapa final de su vida útil a lo largo del orbe entero.
- b) En términos de gestión, manejo y mitigación de las amenazas de los desastres, una base de datos que provee información sobre el estado de las estructuras civiles pre- y post-desastre es crucial para la planificación y la toma de decisiones de las autoridades.
- c) Cada vez hay más estructuras de gran importancia en el mundo como puentes de gran envergadura que constituyen líneas vitales para muchas ciudades. Su operación no puede ser interrumpida y el cómo 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 provoque un desastre.
- 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 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, etc. Sin embargo, dada la complejidad que se presenta en las estructuras civiles, aún hay muchos retos por enfrentar y dificultades por superar.



## 2.2 Las metas y el proceso de Monitoreo de Salud Estructural

Para monitorear la salud de una estructura, es necesario detectar la respuesta de esta ante estímulos externos. Para esto es necesario disponer de una red de sensores sobre ella y que cada sensor esté ubicado en posiciones estratégicamente seleccionadas para captar información que permita conocer su estado en diferentes instantes de tiempo. Las señales captadas por los sensores deben ser recolectadas por un sistema de adquisición de datos. Al final y lo más importante, tener un “cerebro” en el sistema que permita filtrar, procesar, analizar y sintetizar la información recolectada, trabajo que será ejecutado por un ordenador electrónico con sus algoritmos, y en forma totalmente automatizada cuando se trata de un sistema permanentemente instalado en la estructura, o conducido por ingenieros analistas posteriormente en la oficina. La información sintetizada es enviada luego al ingeniero responsable de la obra o de la administración para la toma de decisiones. Este proceso conceptual es ilustrado en la **Figura 1**.



**Figura 1.** Concepto del Sistema de Monitoreo Estructural.  
Fuente: Loh, Ching-Hsiung, 2011 [ref. 57].

Uno de los objetivos principales de Monitoreo de Salud Estructural (MSE) es la instalación de sistemas de monitoreo permanente en los puentes. En el mundo hay estructuras de infraestructura civil equipadas con un sistema integral de Monitoreo, se puede mencionar



ejemplos 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 [ref. 4], Hong Kong, con un total de 1781 sensores instalados (ver **Figura 2**). Todas estas son obras de gran envergadura que constituyen las líneas vitales para estas ciudades. La implementación de tales sistemas de monitoreo permanente permite [ref. 5]:

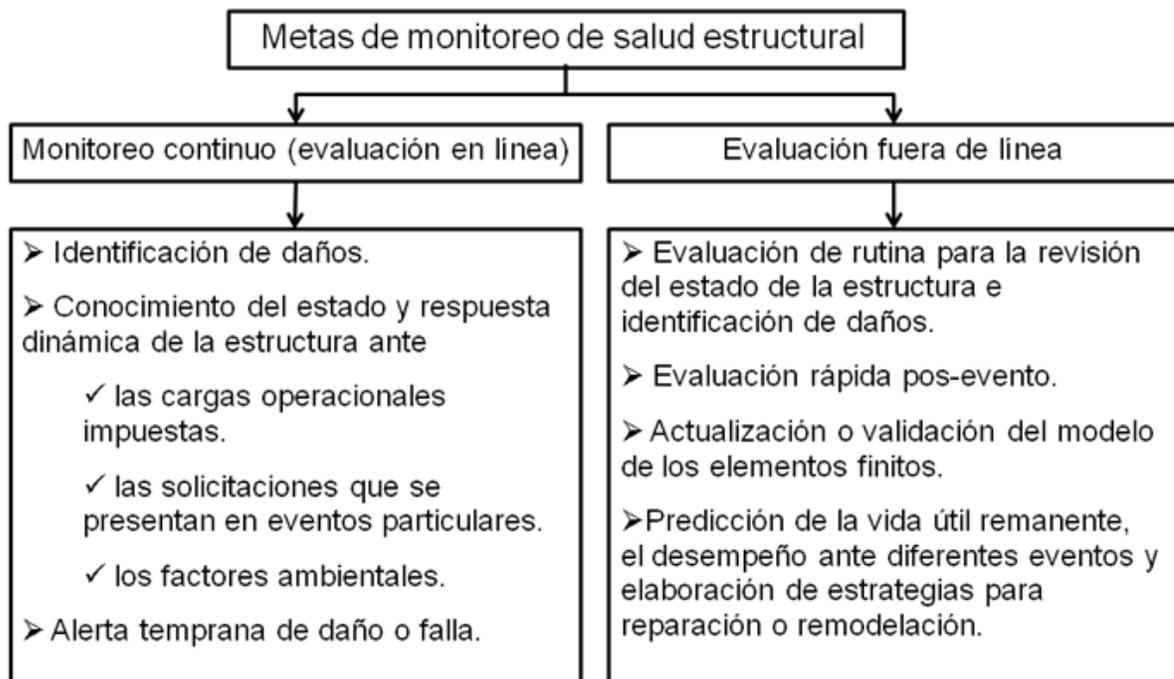
- a) Controlar la calidad en la etapa de construcción.
- b) Verificar los parámetros de diseño contra la construcción in situ.
- c) Evaluar en forma continua las condiciones y los estados operacionales del puente.
- d) Emisión de alertas tempranas cuando están sujetas a cargas excesivas, ya sea causadas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



**Figura 2. a)** El puente Tsing Ma, **b)** Stonecutters y **c)** Bill Emerson.



Para lograr un monitoreo en forma continua, debe haber un “cerebro” o un centro de control instalado en el puente para procesar, sintetizar, presentar la información y que el monitoreo se dé en forma automatizada para cada puente en particular. No obstante, no todos los puentes son tan esenciales o críticos como para implementar un sistema integral de MSE permanente dado su alto 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 evaluaciones fuera de línea [ref. 6]. Los objetivos de cada uno se detallan en la **Figura 3**.



**Figura 3.** Metas de Monitoreo de Salud Estructural

Antes de implementar un sistema de monitoreo continuo en una estructura que lo amerita, 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 y 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. A esto también se le llama la identificación de



los “puntos débiles” de la estructura los cuales serían los lugares a monitorear permanentemente.

El proceso de MSE puede describirse como un paradigma de reconocimiento de modelos estadísticos que consta de cuatro partes [ref. 2]:

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, lo que limita el tipo de datos a registrar a vibraciones del puente inducidas por excitaciones ambientales; la cantidad de sensores, el nivel de las cargas presentes, etc.
- ✓ Definir los objetivos de monitoreo. Por ejemplo: la deformación vertical máxima, los parámetros modales como las frecuencias naturales de vibración, el amortiguamiento, forma de los modos de oscilación, cambio en la rigidez o flexibilidad, índices de no-linealidad, etc.

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

- ✓ Selección del tipo, la cantidad y la ubicación de los sensores. Por ejemplo: acelerómetros, transductores de deformación, inclinómetros, 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 evaluación previa para que la información obtenida en campo 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, por ejemplo, aceleraciones, velocidades o desplazamientos relativos.
  - ✓ Filtros y re-muestreo 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 altas frecuencias; 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 la rigidez o flexibilidad, 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.



En cuanto a la detección e identificación de daños en la infraestructura civil, según Rytter (1993) [ref. 3] se puede hablar de cuatro niveles:

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

Estos cuatro niveles son las metas primordiales que buscan el MSE. Las preguntas de los primeros dos niveles pueden contestarse comúnmente procesando y analizando los datos recolectados en campo, los cuales emitirían una señal de alerta a las autoridades administrativas. El nivel 3 generalmente requeriría de modelos numéricos de la estructura e inclusive del daño, los cuales deben ser calibrados contra los datos experimentales y por ende, sería capaz de cuantificar el daño, por ejemplo, en la forma de porcentaje de reducción de rigidez o pérdida de conectividad. Para el nivel 4, curvas de desempeño y ciclo de vida deben generarse tomando diversos factores tales como las cargas operacionales imperantes, la fatiga, propagación de grietas, etc, de forma que es posible hacer predicción de la vida útil y capacidad remanente, cuya información sería un insumo crucial para la toma de decisiones de parte de la administración en la materia de planificación y conservación de la infraestructura de puentes.



### 2.3 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” del 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 ruidos e interferencias.

Dado el esfuerzo que se ha entregado 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 [ref. 7], donde una recopilación exhaustiva de información referente 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 [ref. 8]. 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



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 presentan alrededor de 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, en el artículo “Smart Sensing, Monitoring, and Damage Detection for Civil Infrastructures” [ref. 9] 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 en tres plataformas que solventan diferentes necesidades de instrumentación, adquisición, recolección y análisis de datos. Éstas se describirán a continuación.

### 2.3.1 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 infraestructura civil consiste básicamente en la medición de temperatura, presión, fuerza, 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 deformación o desplazamiento, el uso de la fibra óptica presenta una serie de ventajas que se lista en los siguientes puntos [ref. 10]:

- ✓ 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 medición de deformación o desplazamiento dinámicos.
- ✓ Son livianos y de poco volumen.
- ✓ La precisión no se deteriora con el paso del tiempo.
- ✓ Alta sensibilidad: puede alcanzar hasta 2  $\mu\text{m}$ .
- ✓ 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 cableado 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 [refs. 11,12]:

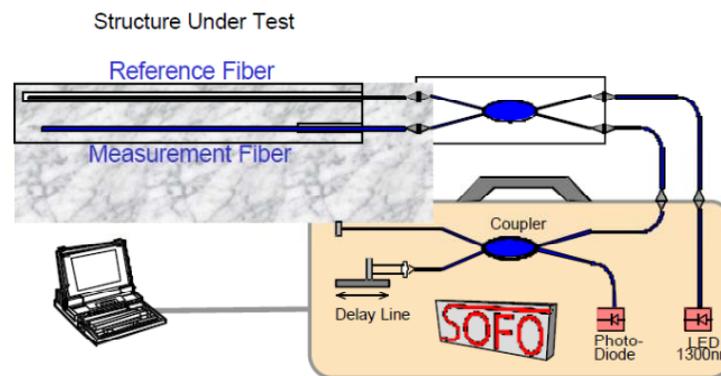
a) Sensores de baja coherencia (Low-coherence sensor)

El sensor de baja coherencia [ref. 13] 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 el acrónimo 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 4**, y la **Tabla 1** presenta un resumen las características del mencionado sistema.



**Figura 4.** Ilustración esquemática del sistema SOFO.  
Fuente: Vurpillot et al., 1997 [ref. 17].



**Tabla 1.** Características del sistema SOFO.

Longitud de la galga de medición	De 20 cm a 10 m para sensores estándar, 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)
Estabilidad	Desviación no es observable por lo menos en 4 años

Fuente: Inaudi et al., 1999 [ref. 14].

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 tramo de medición [ref. 13]. La curvatura de un punto de medición puede hallarse con la siguiente expresión:

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

Donde  $\kappa(x)$  es la curvatura del punto,  $\varepsilon(x)$  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 del tramo, el momento de inercia es constante y que el material es linealmente-elástico a lo largo del tramo 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 [ref. 18], 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 del tramo 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 3 puntos de medición es suficiente hallar la función de curvatura mediante regresión estadística. La cantidad de puntos de medición requerida por cada tramo dependerá del grado de polinomio que se necesita para interpolar la función de la curvatura. Generalmente en los extremos de los tramos de medición, los instrumentos de posicionamiento absoluto tales como GPS, inclinómetros o nivel deben estar presentes para obtener información de las condiciones de frontera, las cuales son necesarias para la doble integración [ref. 11]:

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

de la cual se obtiene la función de deformación vertical de la sección de análisis. Este método de doble integración de la función de curvatura es validado mediante diversas pruebas de laboratorio [refs. 18, 19, 20].

De los puentes instrumentados con la tecnología SOFO se puede citar los siguientes: el puente de concreto Lutrive con 40 sensores, y el puente Versoix con más de 100 sensores instalados durante la etapa constructiva de la re-adequación estructural; ambos puentes son de concreto pre-esforzado ubicados en Suiza. La curva de deflexión se estimó integrando dos veces la función de curvatura [refs. 14,17]. El puente Lutrive es un puente tipo cajón que sufre de una deformación vertical permanente 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 setentas [ref. 15].



Es interesante notar que Vurpillot et al. (1997) [ref. 17] 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” [ref. 16] 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.

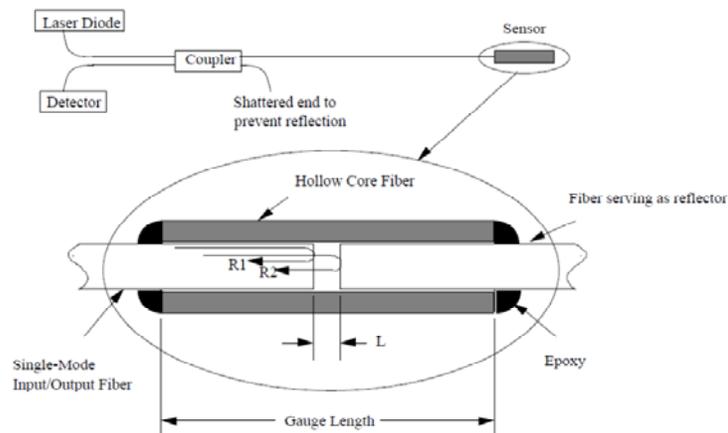
#### b) Sensor Interferométrico Extrínseco Fabry-Perot

El sensor Interferométrico Extrínseco Fabr-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 interfaz fibra/aire (R1); la luz restante continúa su propagación a través del vacío (L) y el segundo reflejo ocurre en la interfaz 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 [ref. 26].

En cuanto a ejemplos de aplicación del sensor EFPI, Zou et al. (2012) [ref. 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) [ref. 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 cuales fue rehabilitado 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).



**Figura 5.** Ilustración del funcionamiento del Sensor Interferométrico Extrínseco Fabry-Perot.  
Fuente: Scott A. Meller, 1996 [ref. 26].

### c) Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo

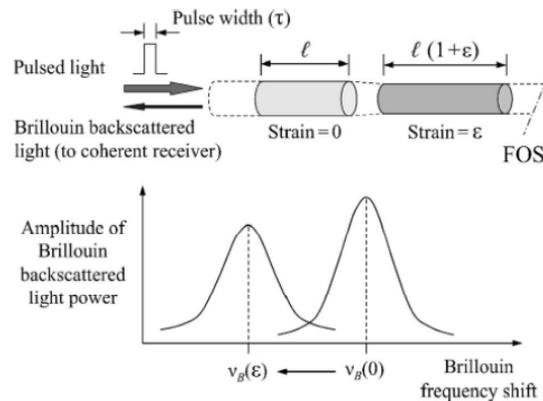
El Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR por sus siglas de inglés) es un instrumento óptico-electrónico usado para medir la atenuación de la luz a lo largo de la fibra además de la longitud de la fibra óptica. Un OTDR



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 [ref. 31]. 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 6.** 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 [ref. 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 [ref. 32], el cual es un puente metálico. Matta et al. (2008) [ref. 31] 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, Glišić et al. (2007) [ref. 32] 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.



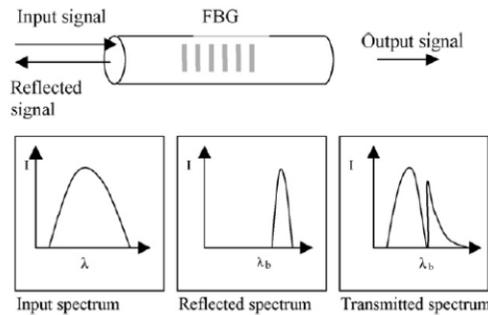
d) Fibras de Rejilla de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG)

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 una Rejilla de Bragg dada (refleja la longitud de onda correspondiente a la reflectividad máxima de la rejilla) [ref. 21]. Esta operación es ilustrada en la Figura 7. 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 [ref. 20]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon \quad (4)$$

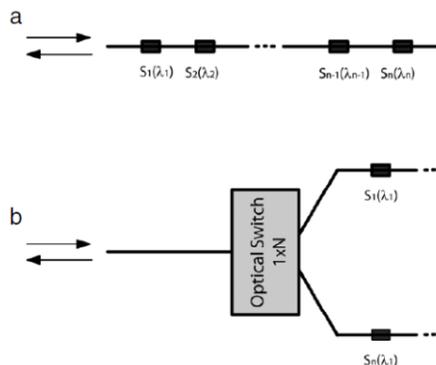
Donde  $\lambda_B$  es la longitud de onda de Bragg,  $\rho_e$  es la constante foto-elástica efectiva, y  $\varepsilon$  es la deformación unitaria experimentada por la rejilla.

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 [ref. 25].



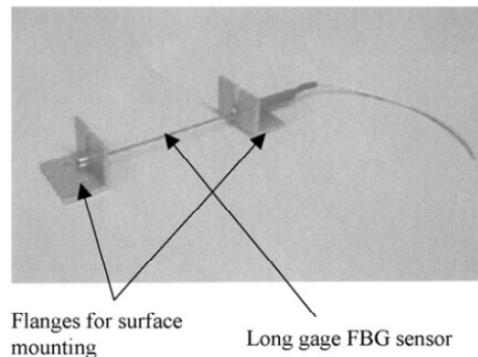
**Figura 7.** Ilustración del funcionamiento de la rejilla Bragg.  
Fuente: Majumder et al., 2008 [ref. 20].

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 8**.



**Figura 8.** La multiplexación por división de longitud de onda.  
Fuente: Rodrigues et al., 2010 [ref. 21].

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 [ref. 22], o también instaladas y embebidas mediante fijadores especiales dentro del concreto [ref. 21]. El otro tendría la forma de galgas largas (ver **Figura 9**) 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) [refs. 20,23].



**Figura 9.** Sensor FBG de galga larga con dispositivos para el montaje superficial.  
Fuente: Majumder et al., 2008 [ref. 20]

Dentro de las numerosas aplicaciones de sensores FBG se puede citar el trabajo realizado por Schulz et al. (2000) [ref. 23] 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) [ref. 24] resumió en “Fiber optic based monitoring system applied to a centenary metallic arch bridge: Design and installation” una lista de aplicaciones de sensores de fibra óptica en puentes de diferentes tipos, y expuso en detalle una 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) [ref. 21] 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 ópticas 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) [ref. 28].

Por otra parte, es interesante notar que en la tesis de maestría de C. T., Shih (2004) [ref. 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, de lo contrario, la medición sería ruidosa. También hay que evitar máquinas o instrumentos que generan radiaciones de campo eléctrico o electromagnético cercano 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.

La misma referencia de C. T., Shih (2004) [ref. 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. ( <a href="http://fiberausa.com/home">http://fiberausa.com/home</a> )
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
<b>Costo total</b>	Aprox. \$ 3000 dólares por metro lineal

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



### 2.3.2 Sensores y sistema de adquisición de datos 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, Lynch y Loh (2006) [ref. 48] 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 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 ofrece 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, pues, como toda transmisión inalámbrica, podría sufrir interferencias debido a estructuras metálicas, campos magnéticos inducidos o también condiciones climáticas como tormentas eléctricas o lluvia. 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", 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 [ref. 48] señala que existe dos plataformas de unidades inalámbricas: una plataforma para fines académicos y otra comercial.

La plataforma académica inicia con el prototipo denominado Sistema Modular Inalámbrico de Monitoreo (Wireless Modular Monitoring System, WiMMS por sus siglas de inglés) para ser usado en infraestructura civil. El sistema fue la base para el desarrollo de las futuras generaciones de sensores inalámbricos, y está constituido básicamente por: 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 [ref. 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, 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. Otras plataformas equivalentes al Mote son ofrecidas por casas comerciales como Microstrain, Sensometrics, BDI, Ember y National Instruments, pero a diferencia de los Mote's, sus plataformas son propiedad 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 (MSEBV). 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 se debe a que también hay métodos y modelos matemáticamente rigurosos de dinámica de estructuras e identificación de sistemas.

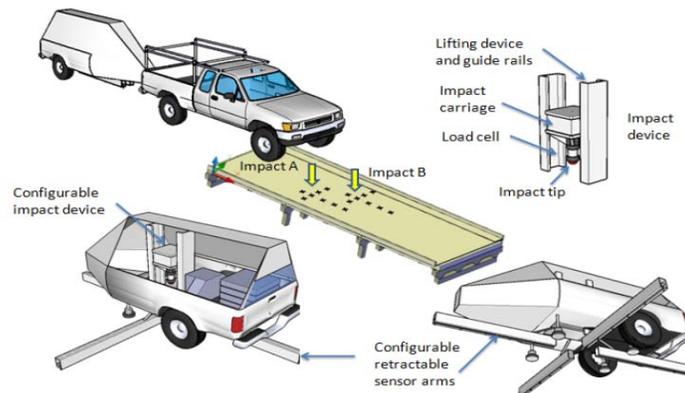
Las técnicas de MSEBV se basan prácticamente en la medición de aceleraciones de la estructura ante excitaciones ambientales; abundan en la literatura la metodología denominada “análisis modal” el cual es el método que más se encuentra en la literatura en cuanto a la evaluación de las propiedades dinámicas del puente y en su monitoreo continuo. Ren y Zong (2004) [ref. 50] reportó en “Output-only modal parameter identification of civil engineering structures” 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 la combinación de las mediciones en 4 configuraciones y en tiempos distintos, manteniendo un acelerómetro como punto de referencia fija. Qin et al. (2001) [ref. 53] 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) [ref. 54] reportó en “Subspace Identificación of Vincent Thomas Suspension Bridge” 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” [ref. 55] se reportó 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 Bart (2000) [ref. 5] demostró mediante un experimento realizado en el puente Z-24 ubicado en Suiza, el cual fue sujeto a una secuencia de escenarios de daños programados, y concluyó 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 aplicadas [ref. 49], 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 calibración del modelo estructural con 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” así como su segunda parte [ref. 51]. Otra aplicación interesante de MSE basado en vibraciones se puede encontrar en “Rapid Impact Testing for Quantitative Assessment of Large Populations of Bridges”, donde Zhou et al. (2011) [ref. 56] 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 (ver **Figura 10**). 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.



**Figura 10.** El sistema “Evaluación Global de la Estructura”.  
Fuente: Zhou et al., 2011 [ref. 56].

### 2.3.3 Sensores y tecnologías para la medición y detección 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 deformación vertical 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, el GPS constituye muchas veces 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 precisos 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 inclinómetro 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 [ref. 33].

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 del que se puede identificar las frecuencias y las formas modales. El instrumento se ilustra en la **Figura 11** y según datos recolectados por Wang (2010) [ref. 39], 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 y en el puente Niou-Tou [ref. 34], 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.



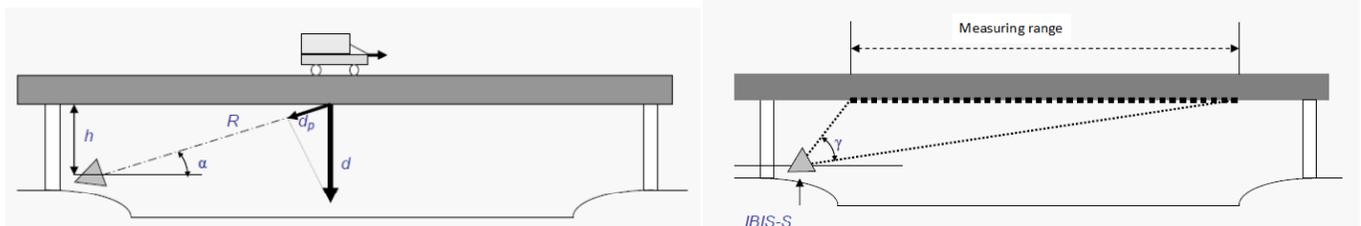
**Figura 11.** Instalación del equipo IBIS-S durante la medición del Puente Ai-Lan, Taiwán.  
Fuente: Hsu et al., 2011 [ref. 34].

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  $\Delta f$ . Las señales de eco provee un perfil con una resolución de  $\Delta R$ , la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (5)$$

donde  $c$  es la velocidad de luz. La distancia mínima  $\Delta R$  entre los reflectores (fijados rígidamente sobre el puente) del sistema IBIS son 50 cm, lo cual implica que 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 el 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 sus cambios de posición, se puede hallar la deflexión vertical de los reflectores con la siguiente relación y la geometría se ilustra en la **Figura 12** [ref. 34].

$$d = \frac{d_p R}{h} \quad (6)$$

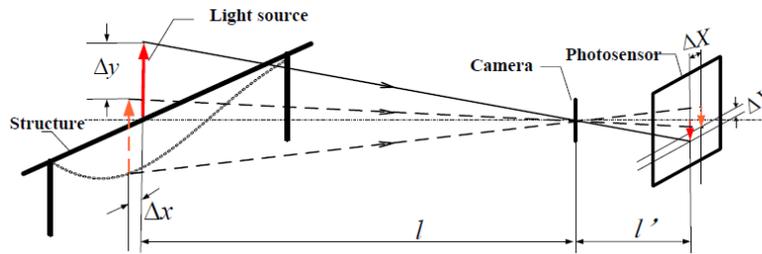


**Figura 12.** Medición de la deflexión y el rango de la medición.  
Fuente: Niu Tou Bridge field test seminar NCREC, 2011 [ref. 35].

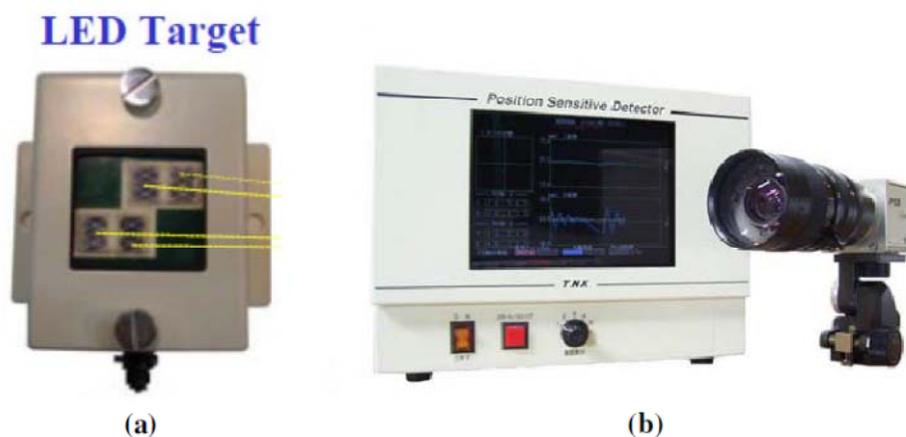
Entre las virtudes de este equipo se puede mencionar su capacidad de medición a larga distancia: su alcance llega hasta 1 km. Su alta resolución espacial y precisión en la medición permite medir el movimiento dinámico de una gran cantidad de puntos en forma simultánea, ofreciendo una perfil de deflexión dinámica con una precisión de 0.01 mm [ref. 39]. Además la medición es bastante ágil y su instalación es relativamente fácil. Por otro lado, entre las desventajas está 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 movimiento del punto en el espacio real 3D a lo largo del tiempo. Esta acción de detección se ilustra en la **Figura 13**. 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 14**.



**Figura 13.** Principio básico del método fotoelectrónico para la captación de imagen.  
Fuente: Zhang et al., 2011 [ref. 38].



**Figura 14.** a) El blanco de detección (luces LED) y b) Cámara PSD.  
Fuente: Wang, 2010 [ref. 39].

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. El precio unitario del sistema es aproximadamente \$ 65,000 USD [ref. 39].

La capacidad de este sistema fue demostrada en las pruebas estáticas y dinámicas en el puente Tai-Ya, en Taiwán [ref. 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 (ver **Figura 15**). 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 [ref. 40].



**Figura 15.** Instalación de los blancos y la cámara del sistema PSD y la prueba de carga.  
Fuente: Wang et al., 2009 [ref. 37].



d) Técnicas de Procesamiento de Imágenes Digitales

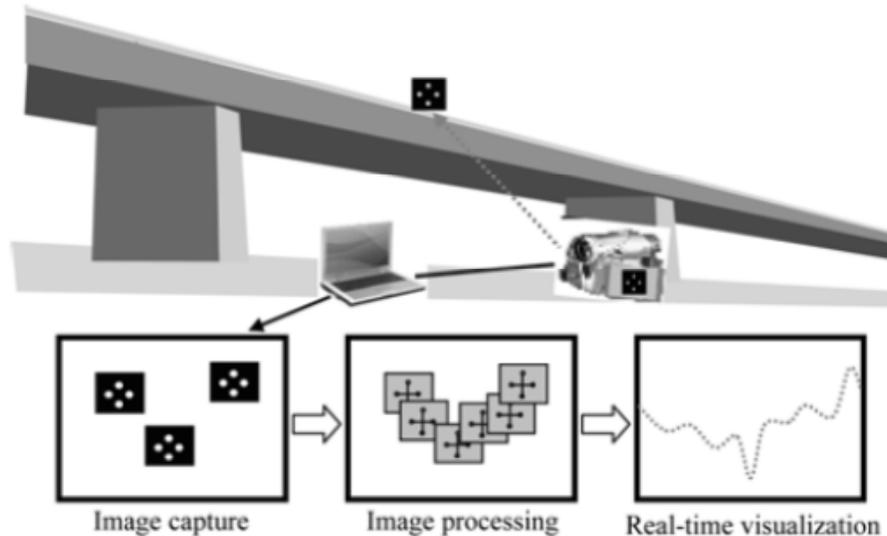
Con el rápido avance tecnológico en el área de la electrónica y óptica, junto con el desarrollo de la capacidad computacional para el procesamiento de información, los dispositivos óptico-electrónicos se han vuelto cada vez más accesibles. La captación de imágenes digitales mediante videocámaras y su procesamiento se han convertido en una práctica eficaz para la medición y detección de la propagación de grietas de fatiga [ref. 41], identificación y clasificación de vehículos [ref. 42], y especialmente en investigaciones del área de mecánica experimental en la determinación de campo de deformaciones [ref. 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, la cual 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) [ref. 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 (ver **Figura 16**).

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. Los mismos autores [ref. 45] 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) [ref. 47] empleó el mismo sistema basado en la visión para estudiar las características vibratorias de los cables de un puente atirantado, donde las frecuencias de vibración y el



amortiguamiento fueron calculadas con precisión en comparación con aquellos resultados obtenidos mediante un sensor de velocidad de alta precisión para vibraciones ambientales.



**Figura 16.** Ilustración esquemática de un sistema de medición basado en la visión.  
Fuente: Lee et al., 2006 [ref. 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 17**, donde el puente Vernon Ave ubicado en Massachusetts, los Estados Unidos fue sometido a una prueba de carga [ref. 46].



**Figura 17.** Instalación de las manchas aleatorias para el método CID.  
Fuente: Santini et al., 2011 [ref. 46].

Entre las ventajas de este sistema se puede mencionar: 1) El costo es sumamente reducido; según Lee et al. (2006) [ref. 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 [ref. 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.



### 2.3.4 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.

**Tabla 4.** Cuadro comparativo entre las diferentes plataformas tecnológicas para evaluación y monitoreo de puentes.

	<b>Sistema de Fibra óptica</b>	<b>Sensores inalámbricos</b>	<b>Sensores de medición remota</b>
<b>Tipo de monitoreo</b>	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.
<b>Grado de dificultad en la de Instalación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Muy alto.</li> <li>✓ El manejo, la integración o la adherencia de la fibra tópica a la estructura necesita sumo cuidado y personal capacitado.</li> <li>✓ 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.</li> <li>✓ Una vez colocado el sensor no puede ser reubicado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bajo.</li> <li>✓ En caso de acelerómetros es simplemente colocarse sobre la superficie y empezar a recolectar datos.</li> <li>✓ Los sensores pueden ser reubicados fácilmente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bajo.</li> <li>✓ Su funcionalidad depende de las condiciones topográficas y accesibilidad al sitio para la instalación del radar o cámara.</li> </ul>
<b>Recolección de datos y transmisión de información</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El sistema es sumamente confiable y perdurable.</li> <li>✓ Inmune ante la interferencia de campos electromagnéticos, líneas de alto voltaje, cambios de temperatura y factores ambientales tales como corrosión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Podría ser interferido por campos electromagnéticos u ondas de radio.</li> <li>✓ La transmisión inalámbrica podría interrumpirse debido a factores ambientales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El funcionamiento puede verse afectado por las condiciones del tiempo, iluminación en el caso de métodos ópticos, y visibilidad hacia el puente.</li> </ul>



	<b>Sistema de Fibra óptica</b>	<b>Sensores inalámbricos</b>	<b>Sensores de medición remota</b>
<b>Suministro de fuente de poder</b>	Necesita fuente de energía continuo y estable.	Puede suministrarse tanto mediante baterías como mediante fuente de energía continua.	Generalmente mediante baterías, sólo en monitoreo permanente se usa fuente continua.
<b>Tipos de datos recolectados (mediciones)</b>	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 desplazamientos (deformación del puente).
<b>Principal metodología de monitoreo y evaluación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prueba estática: obtener la curvatura a partir de la deformación y luego de ésta inferir la curva de deflexión del puente.</li> <li>✓ Prueba dinámica: si el muestreo dinámico es permitido por los sensores es posible realizar también el análisis modal de la estructura.</li> <li>✓ Medición directa de deformaciones unitarias o deformaciones promedio de secciones o elementos estructurales críticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cuando los acelerómetros son usados, sólo se permite realizar pruebas dinámicas: el análisis modal, identificación del modelo numérico del puente y calibración del modelo de los elementos finitos son los principales métodos de monitoreo y evaluación.</li> <li>✓ Conectado con otros sensores como strain gauges, también se puede realizar mediciones directas de deformaciones u otros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prueba estática: medición directa de la curva de deflexión estática.</li> <li>✓ Prueba dinámica: medición directa de la deflexión dinámica de uno o varios puntos. Permite también identificar las frecuencias de vibración.</li> </ul>
<b>Procesamiento de información recolectado</b>	<p>Se necesita de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Técnicas de procesamiento de señales digitales.</li> <li>✓ Técnicas de regresión estadístico sencillo.</li> </ul>	<p>Se requiere de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Técnicas de procesamiento de señales digitales.</li> <li>✓ Técnicas de identificación de sistemas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Métodos visuales requieren de técnicas de procesamiento de imágenes digitales.</li> <li>✓ En caso de sistemas comerciales como IBIS-S o PSD, las funciones ya se encuentran integradas en el producto.</li> </ul>



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

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 energía 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 de puentes ya construidos, puentes viejos o deteriorados, evaluaciones rápidas del estado del puente, detección de daños, 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 (vibración) como los estáticos (deformación vertical de uno o varios puntos) del puente, los cuales se complementan para una completa evaluación y detección de daño en el puente.



### 3. CONCEPTUALIZACIÓN Y DESARROLLO DEL SISTEMA PORTÁTIL PARA INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE PUENTES

Con respecto al sistema a desarrollar para la instrumentación y monitoreo de puentes, la portabilidad es un factor muy importante. De la revisión exhaustiva de literatura expuesta en el capítulo 2, los sistemas que brindan mayor portabilidad son el sistema inalámbrico y el de medición remota. El sistema de medición remota de desplazamientos mediante técnicas de procesamiento de imágenes es otro trabajo de investigación que se ha llevado a cabo en paralelo y fue desarrollado satisfactoriamente, los detalles se puede encontrar en Liu et. al (2015) [ref. 70]. Por lo tanto, el enfoque primordial del presente sistema sería para la adquisición de datos de vibraciones a través de los acelerómetros.

El sistema inalámbrico posee ventajas como su escalabilidad, facilidad de instalación, portabilidad y bajo costo, no obstante, también tiene retos por superar tales como la pérdida de señales y las barreras en la comunicación [ref. 59]. En la **Tabla 5** se muestra una comparación entre el sistema cableado e inalámbrico. Se nota que sin la integración de acelerómetros MEMS, disminuyen las ventajas del sistema inalámbrico en cuanto a bajo costo y reducido tamaño [ref. 60]; sin embargo, el uso de la tecnología MEMS implica también una reducción en la calidad de la señal recolectada en comparación con los acelerómetros tradicionales [ref. 58]. Además, hay otro factor que incide directamente en la escogencia del sistema, se trata de su disponibilidad en el mercado nacional, y si posee la versatilidad para personalizar algoritmos y adaptarse a diferentes necesidades de monitoreo.

#### 3.1 Conceptualización y desarrollo de la parte física del sistema

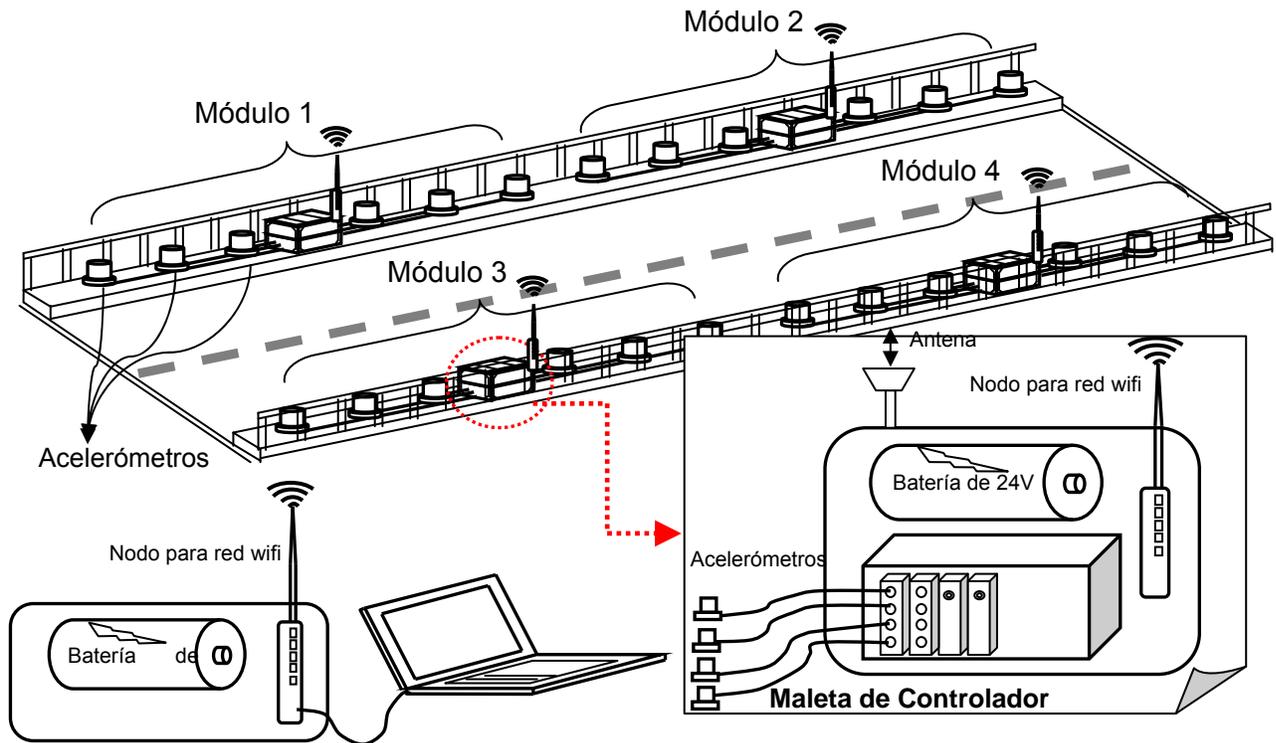
Después de analizar y comparar los productos comerciales disponibles para desarrollar el sistema de adquisición de datos en Costa Rica, y teniendo en cuenta aspectos mencionados como la escalabilidad, portabilidad, costo, así como la versatilidad de adaptar el sistema para diferentes propósitos de monitoreo y que cuente con una plataforma de software de código

abierto con un lenguaje de programación de alto nivel, se decidió adoptar los productos de la compañía National Instruments para el sistema.

Por otro lado, considerando la realidad en nuestro país, donde son muchos los puentes que requieren de evaluaciones y monitoreo, el sistema debe ser robusto como para trasladarse de un puente a otro. Asimismo, por una cuestión de conveniencia, para la instalación de acelerómetros durante las evaluaciones “rápidas” o “fuera de línea” con base en vibraciones ambientales, los acelerómetros se distribuyen longitudinalmente en los costados del puente, sobre las aceras o bordillos para evitar interrupción de tránsito, independientemente si se tratara de sistema inalámbrico o cableado. Teniendo en cuenta esta realidad en la práctica, es posible desarrollar un sistema “híbrido” que cuente con la robustez y estabilidad de un sistema cableado, y que además, posea las características de escalabilidad, portabilidad y facilidad en instalación de un sistema inalámbrico. El esquema conceptual del sistema híbrido se presenta en la **Figura 18**.

**Tabla 5.** Comparación entre el sistema cableado e inalámbrico

<b>Sistema / Aspecto</b>	<b>Cableado</b>	<b>Inalámbrico</b>
Escalabilidad	Difícil por la limitación de canales de hardware y necesidad de cableado	Fácilmente escalable
Instalación	Difícil por el cableado	Sumamente fácil
Portabilidad	Baja	Muy alta
Costo	Alto	Bajo (si se utiliza acelerómetros MEMS), mediano en el caso contrario.
Robustez en la transmisión de datos	No hay pérdida de datos	Hay potencial pérdida de datos en la transmisión
Provisión de energía	Se alimenta de la fuente de energía mediante el cableado	Baterías (máximo aprovechamiento de energía y recarga de baterías constituyen retos en el sistema inalámbrico)
Barreras en la comunicación	No hay	Podría sufrir interferencias o problemas de conexión de los nodos inalámbricos.
Calidad de la señal recolectada	Muy alta	Hay mayor contenido de ruido si se utilizan acelerómetros MEMS

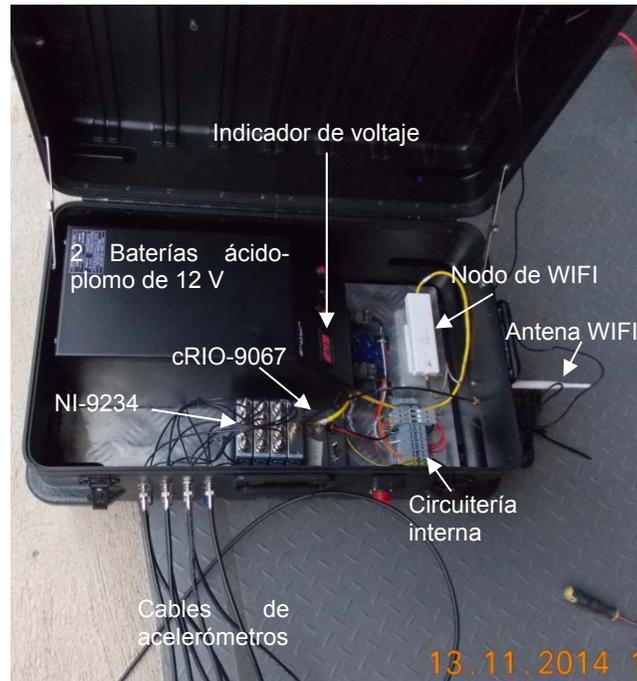


**Figura 18.** El esquema conceptual del sistema híbrido cableado/inalámbrico desarrollado.

El sistema híbrido de instrumentación es un sistema modular, cada módulo comprende de una maleta portátil robusta con ruedas que facilita el transporte del sistema en campo, brinda protección al sistema contra golpes y de las aguas de lluvia, a la cual se le conecta mediante cables una serie de acelerómetros que se extienden a lo largo de un costado del puente. Dentro de las maletas se encuentra un Controlador en Tiempo Real cRIO-9076 (cRIO, acrónimo de Compact-RIO, Real time Input Output) con un procesador de 400 MHz, el cual posee 256 MB de memoria volátil, extensión de espacio de almacenamiento mediante USB, así como puertos de comunicación vía USB, Ethernet o serial RS232. Al Controlador de cRIO-9076 se puede descargar aplicaciones de monitoreo y de adquisición de datos en el lenguaje de programación LabVIEW, y cada Controlador puede ejecutar sus algoritmos de



monitoreo o de adquisición de datos en forma autónoma. La **Figura 19** muestra una imagen de los componentes del sistema contenidos en la maleta.



**Figura 19.** Imagen de los componentes contenidos dentro de la maleta.

Actualmente el sistema cuenta con 4 maletas (o controladores) que funcionan de forma autónoma, es decir, cada uno de los controladores operan en total independencia uno de los otros, y una vez encendido cada uno inicia automáticamente el algoritmo embebido dentro del controlador y empieza a adquirir señales de los sensores.

El terminal de usuario, que sencillamente es una computadora portátil, permite al usuario visualizar, a través de una interfaz y en tiempo real, la información proveniente de los sensores mediante una red WiFi creada con nodos “Ubiquitus” instalados en cada maleta y en el nodo de usuario; a la vez, a través de la red inalámbrica WiFi es posible enviar comandos a los controladores para que estos ejecuten algoritmos de escritura de datos al disco duro, o iniciar o suspender algunas otras funciones de monitoreo.



Es importante observar que la comunicación inalámbrica se da únicamente entre el nodo de usuario y cada uno de los nodos de controlador mediante red WiFi, no hay comunicación entre los nodos controladores. Asimismo, los datos recolectados por cada controlador son almacenados directamente en el disco duro del controlador o bien simplemente en un disco duro portátil (una llave malla) conectado vía USB al controlador. Al final de la prueba, estos datos pueden recolectarse mediante red WiFi mediante el Protocolo de Transferencia de Archivos (FTP) entre los clientes (nodos de controlador) y el servidor (nodo de usuario).

Los acelerómetros piezoeléctricos PCB modelo 393B04 son empleados como los sensores de vibración, cuyas especificaciones se muestran en la **Tabla 6**. En total se adquirió 32 acelerómetros para este sistema. Para la captura de datos de aceleración, se conectan los acelerómetros en forma cableada al módulo NI 9234, el cual es una tarjeta que se inserta en las ranuras del controlador cRIO-9076. En total cada controlador puede recibir un máximo de 12 canales de aceleración. Los módulos de aceleración NI 9234 poseen una velocidad máxima de muestreo de 51200 muestras por segundo, proveen voltaje IEPE (Integrated Electronic PiezoElectric) de 5 voltios a los acelerómetros piezoeléctricos, y tienen una resolución de 24 bits y un rango dinámico de 102 dB en el convertidor de señal analógico a digital. Las especificaciones del controlador cRIO-9076 y del módulo NI 9234 se muestran en la **Tabla 7** y la **Tabla 8**.

**Tabla 6.** Especificaciones del acelerómetro PCB 393B04

Sensibilidad	1000 mV/g
Rango de medición	±5 g
Rango de frecuencias (±10%)	0.05 a 750 Hz
Frecuencia de resonancia	≥2.5 kHz
Resolución	0.000003 g rms
No-linealidad	≤1%
Sensibilidad transversal	≤5%
Voltaje de excitación	18 a 30 VDC
Excitación de Corriente constante	2 a 10 mA
Bias en el voltaje de salida	7 a 12 VDC
Rango de temperatura	-18 a +80 °C
Conector	10-32 UNF-2A conector coaxial eléctrico
Dimensiones	Altura: 32.2 mm incluyendo el conector
	Diámetro: 25.1 mm



Cada maleta cuenta con una fuente de alimentación de 24 V que consta de dos “baterías de automóvil” de 12 V en serie, la cual tiene la capacidad para alimentar a los dispositivos electrónicos y los sensores en forma continua durante 2 días aproximadamente.

**Tabla 7.** Especificaciones del controlador cRIO-9076

Número de ranuras (para diferentes módulos de adquisición)	4
Rango de voltaje de entrada	9 V – 30 V
Consumo de potencia	15 W
Frecuencia del procesador	400 MHz en tiempo real
Memoria	256 MB memoria DRAM 512 MB de almacenamiento
Sistema operativo para el sistema RT (“acrónimo de Real Time”)	VxWorks
Lenguaje de programación	LabVIEW RT
FPGA (acrónimo de “Field Programmable Gate Array”)	Spartan-6 LX45 2 MB
Puertos	RS232 serial
	USB
	10/100BASE-TX Ethernet con servidor FTP/HTTP y servidor para el panel web remota de LabVIEW
Longitud	17.81 cm
Ancho	8.81 cm
Altura	5.89 cm
Peso	643 gramos
Temperatura de Operación	-20 °C a +55 °C

**Tabla 8.** Especificaciones del módulo de sonido y vibración NI-9234

Canales	4
Rango de voltaje	-5 V a +5 V
Corriente de excitación IEPE (acrónimo de Integrated Electronic PiezoElectric)	2 mA
Rango dinámico	105 dB
Ancho de banda máximo	23.04 kHz
Resolución de la conversión analógico-digital	24 bits
Acondicionamiento de señales	Filtro anti-aliasing
Máxima tasa de muestreo	51200 Hz
Base de tiempo maestro interno	13.1072 MHz
Longitud	9 cm
Ancho	2.3 cm
Conector de Entrada / Salida	Conectores BNC
Temperatura de Operación	-40 °C a +70 °C



### 3.2 Determinación de la longitud óptima de cables para el sistema

La portabilidad del sistema depende primordialmente de la longitud del cable escogida para conectar los acelerómetros con el controlador, y se pretende que esta no sea excesivamente larga para evitar dificultad en la instrumentación, pero a la vez, sin ser demasiada corta permitiendo cubrir en una sola configuración a puentes de corta a mediana longitud. Dado que el sistema debe ser portátil para poder evaluar cualquier puente de Costa Rica, después de un análisis de las longitudes de los puentes de Costa Rica y de las posibles configuraciones de la distribución de acelerómetros, tomando en cuenta los puentes de mayor longitud por tramo como el puente de la Amistad sobre el río Tempisque (ruta No. 18), el puente tipo viga cajón de concreto sobre el río Grande (ruta No. 27), así como el puente de doble voladizo sobre el río Virilla (conocido como “el puente de Saprissa”, ruta No. 32), se determinó que una longitud de cables de 25 m es la óptima. Como consecuencia, cada maleta tendría la capacidad de cubrir 50 m de longitud, el sistema completo sería capaz de cubrir, en una sola configuración de sensores, a puentes con longitudes menores que 100 m, que comprende la mayoría de los puentes en Costa Rica. Para los puentes mencionados de mayor envergadura, es posible utilizar la técnica de sensores ambulantes teniendo definidos de antemano sensores de referencia para “empatar” las escalas de las formas modales identificados.

Se puede ver en la **Figura 20** (b, c, y d) que es una vista en planta del diseño de la distribución de acelerómetros a ambos costados del puente sobre río Virilla, ruta N° 32, conocido como el puente del “Saprissa”, para el tramo central que consiste en una viga cajón con doble voladizo de 176.95 m, y que es de mayor longitud entre los tramos que componen este puente. Dada la longitud del puente y aprovechando de la posición de las pilas intermedias, se puede utilizar una distribución de sensores en tres configuraciones utilizando sensores fijos de referencia, los cuales servirán de enlace entre las mediciones de una configuración y otra para escalar y unir las formas modales obtenidas en tres lapsos diferentes. Se puede observar que para este puente no se necesita usar la cantidad total de acelerómetros adquiridos y la longitud de cable máximo necesario es de 20 m.

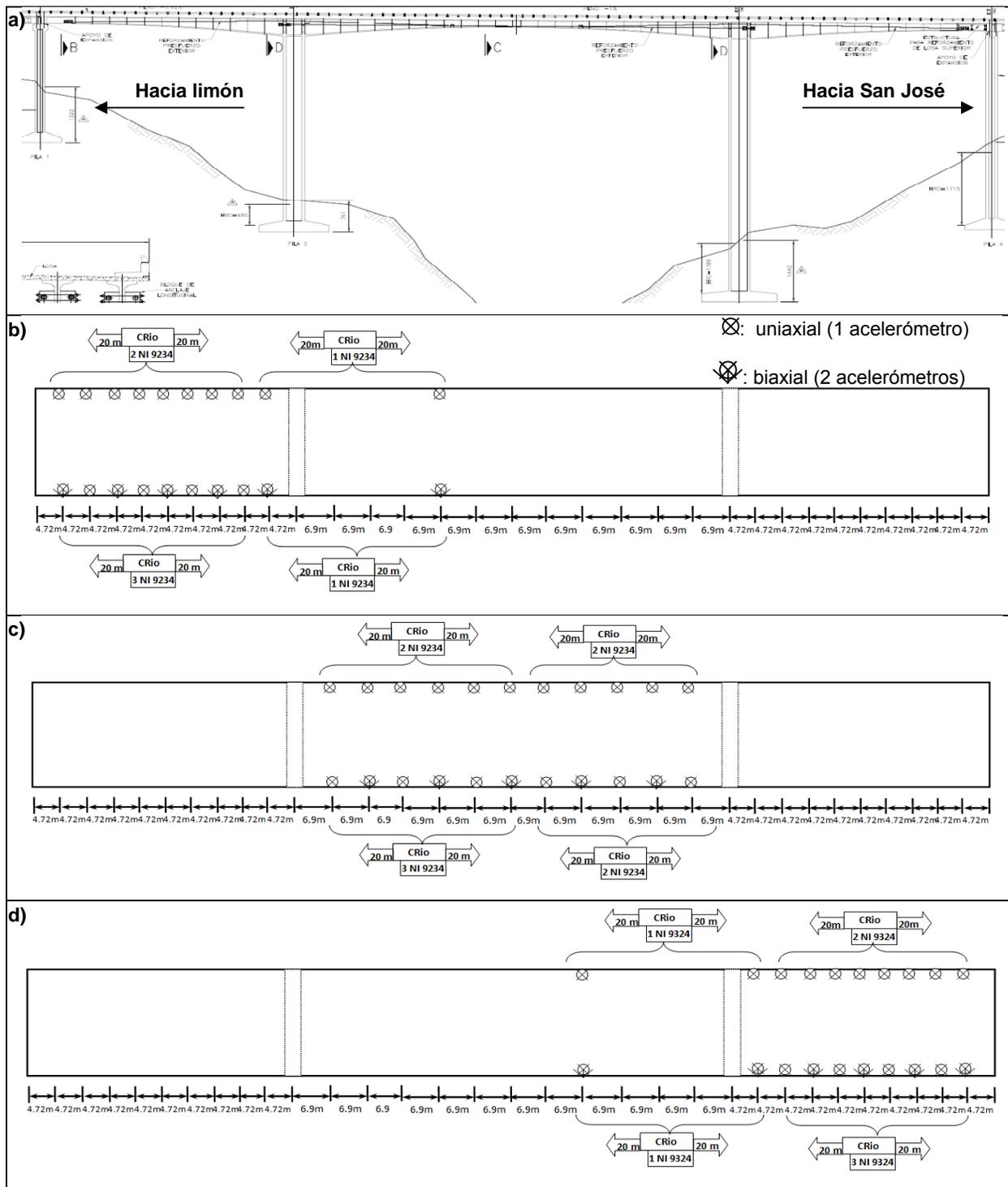


Figura 20. a) Elevación del puente sobre el río Virilla, b) configuración del tramo lateral norte con 26 acelerómetros, c) tramo central con 27 acelerómetros, d) 26 acelerómetros.



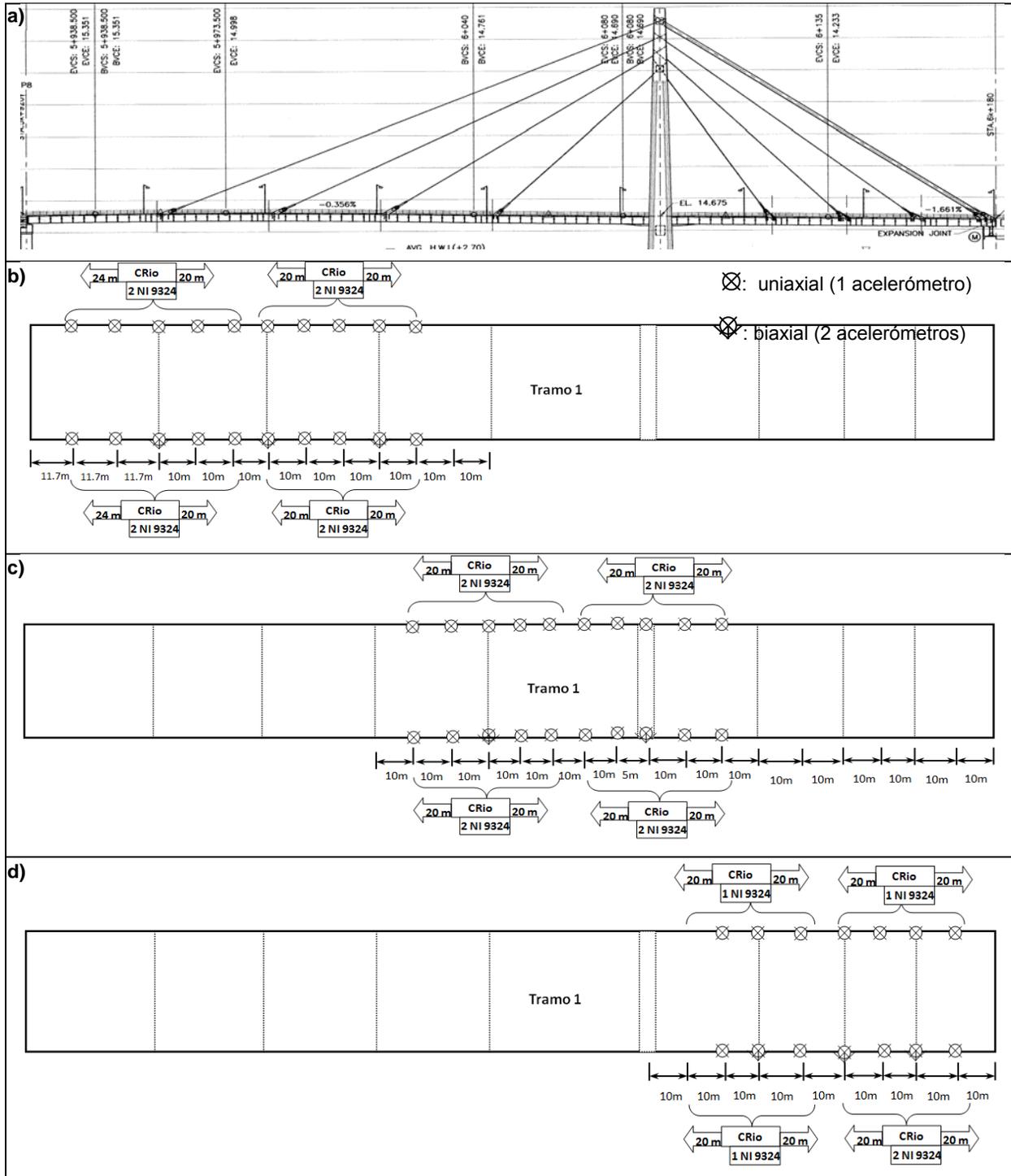


Figura 22. a) Elevación del puente la Amistad, b) configuración del tramo lateral norte con 23 acelerómetros, c) tramo central con 22 acelerómetros, d) 17 acelerómetros.

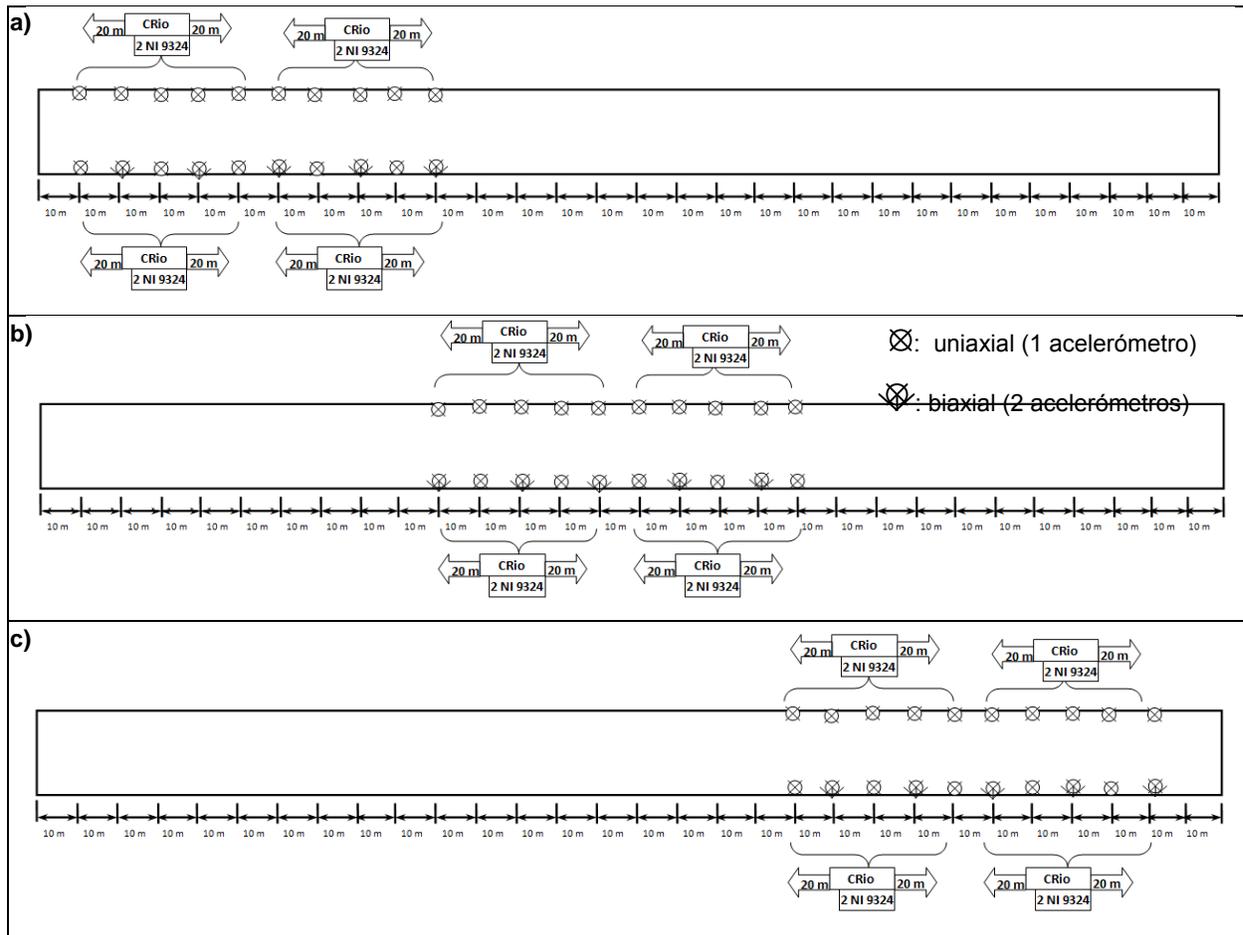


Figura 23. Configuraciones para el río grande: a) primera configuración con 25 acelerómetros, c) tramo central con 20 acelerómetros, d) tercera con 20 acelerómetros.



### 3.3 Diseño del programa para implementar y controlar la adquisición de datos

Un programa básico para implementar y controlar la adquisición de datos fue desarrollado en la plataforma de programación LabVIEW, comprende tres niveles de programación: a nivel de Windows para la interfaz de usuario; a nivel de RT (acrónimo de “Real-Time” en inglés) y a nivel de FPGA (acrónimo de “Field Programmable Gate Array”) que constituyen el controlador en tiempo real. Este contempla tres funciones primordiales: adquisición, almacenamiento de datos y comunicación con el usuario. En esta etapa básica aún no se involucra en algoritmos de procesamiento en línea, tampoco en el diseño de algoritmos para el monitoreo continuo con el sistema, los cuales son los futuros retos a enfrentar para explotar al máximo el potencial que tiene el sistema.

#### 3.3.1 Gráfico de Interfaz de usuario

El propósito de la interfaz en el terminal de usuario es para monitorear y velar por el correcto funcionamiento de la adquisición de datos y el uso de recursos de cada controlador, además, permite al usuario decidir el momento oportuno para empezar a escribir datos que están entrando por los canales de adquisición.

La interfaz se muestra en la **Figura 24**. Hay tres pestañas en la parte superior: la primera que titula “Status” es para monitorear el estado de conexión de cada controlador (de ahora en adelante se llamará cRIO) con el sistema de Posicionamiento Global (GPS), y el uso de los recursos del mismo. Se puede ver 4 cuadros titulados “GPS Data Station #”: la primera celda de cada cuadro indica el número de satélites disponibles para la conexión, la segunda es el estado de GPS, la tercera es la señal del tiempo proveniente de GPS, el cual al ser un GPS comercial, recibe 1 pulso por segundo (PPS) la señal de sincronización según el Tiempo Atómico Internacional (TAI). Estos pulsos de tiempo son los encargados de corregir el tiempo de cada controlador logrando de esta forma la sincronización entre los canales de medición de diferentes controladores independientes. La precisión del TAI es en el orden de nanosegundos. La cuarta celda indica la estampa del tiempo de inicio de cada bloque de formas de onda que adquiere cada cRIO. Dado que el GPS recibe 1 pulso por segundo, la



estampa del tiempo igual se actualiza una vez por segundo, pero como cada controlador inicia en momentos distintos, el de tiempo del inicio de cada bloque de datos también son distintos. La celda titulada “Antenna Status” se refiere a que si el módulo GPS está con su antena conectada y operando en forma normal. Por último, la celda con el encabezado “Uso de CPU (%)” y luego el nombre de cada controlador, muestra, como su nombre lo indica, el porcentaje de la capacidad de computación de CPU que está siendo utilizado en el mismo momento. Este porcentaje es importante ya que el recurso de CPU es limitado en los controladores, y este debe hacerse cargo tanto de los trabajos de la transferencia de los datos adquiridos de los módulos de aceleración al sistema operativo RT, la escritura de datos al disco duro, apertura y cierre de archivos, así como la comunicación mediante red WIFI con el usuario. Por lo que es recomendable mantener lo menor posible el porcentaje de su uso.

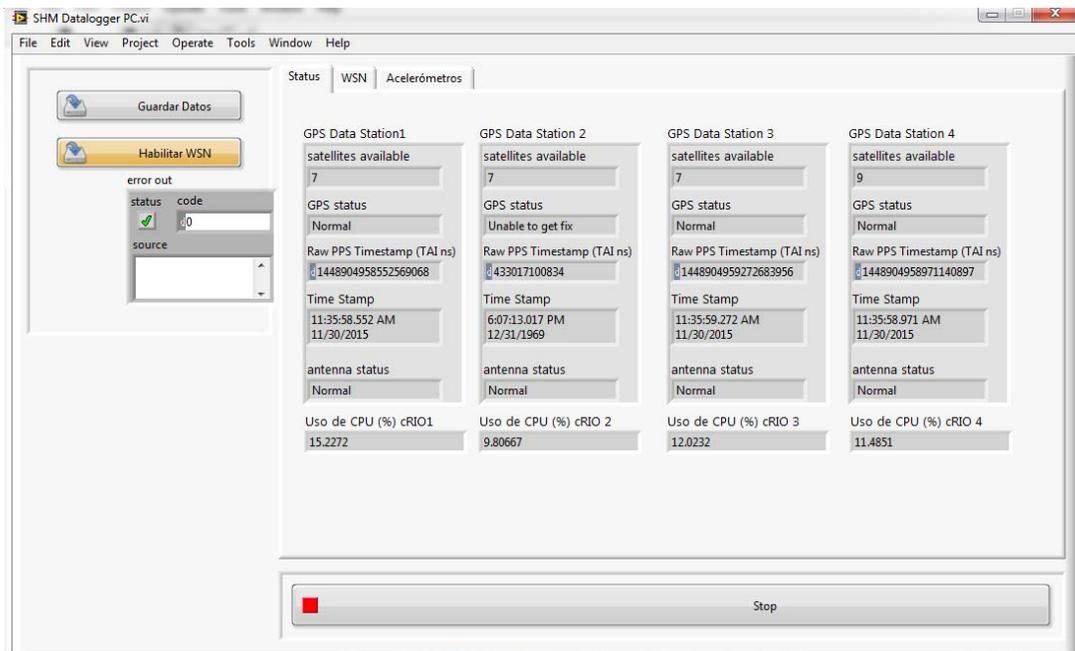


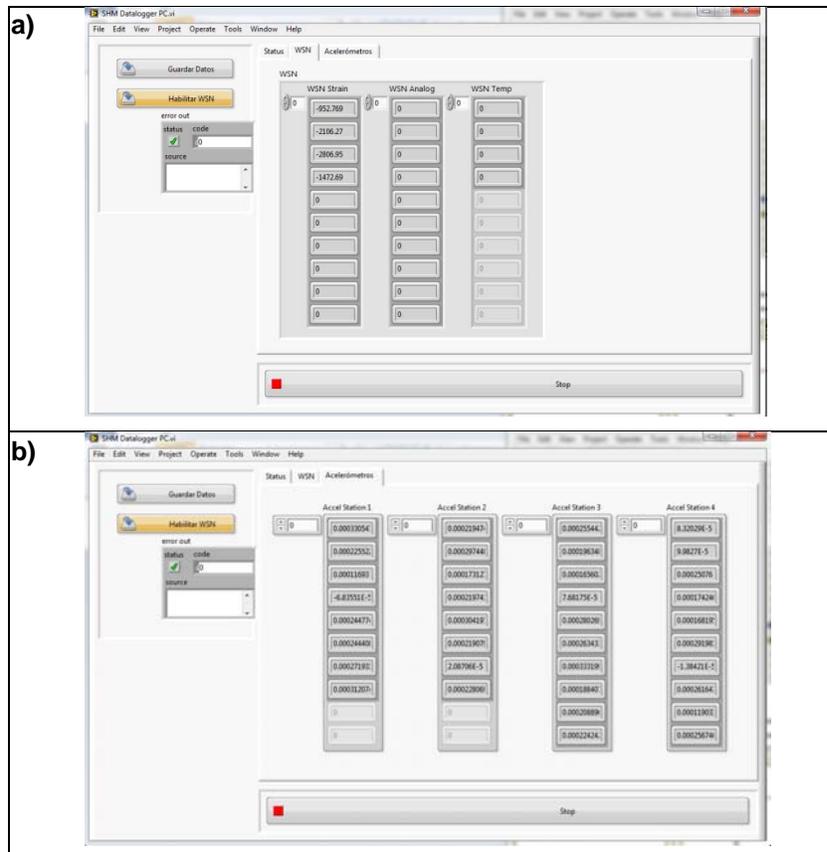
Figura 24. Interfaz de usuario, con 3 GPS conectados.

Se puede observar en la **Figura 24** que a diferencia de los demás GPS, la estación #2 muestra la fecha en el año 1969, la cual es el tiempo cero del GPS e indica que no se ha conectado con el satélite por lo que aún no hay sincronía con el TAI. Esta es razón por la



que la escritura de datos se puede iniciar únicamente si las cuatro estaciones de GPS que constituyen el sistema hayan conectado y sincronizado correctamente las estampas del tiempo con GPS, de lo contrario no se podría sincronizar los datos recolectados por los cuatro controladores cada uno en forma independiente.

Las otras pestañas muestran la visualización en tiempo real de los datos recolectados por el módulo inalámbrico y el módulo de acelerómetros de cada cRIO, tal como se ilustra en la **Figura 25**.



**Figura 25.** Interfaz de usuario, visualización en línea de datos de a) “WSN” (Wireless Sensing Nodes) y de b) acelerómetros.



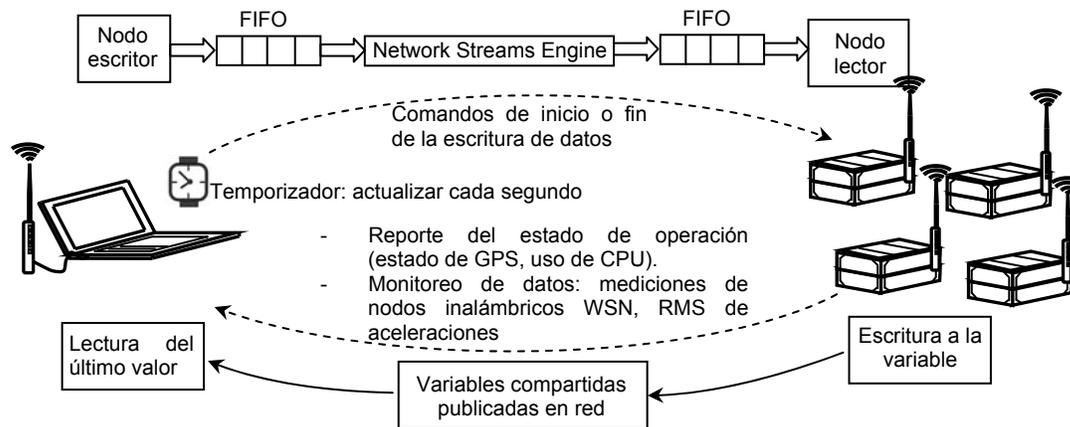
La parte b) de la **Figura 25** muestra los valores de la media cuadrática o RMS de bloques de forma de onda (duración de 1 segundo) que recolectan los canales de aceleración en cada cRIO. Esta visualización sólo sirve para monitorear que el trabajo de adquisición de los canales se encuentra en marcha, es imposible mostrar gráficamente cada dato de la forma de onda porque la tasa de muestreo mínimo del módulo de aceleración es 1652 Hz, al tener 8 canales en cada cRIO, se tendría que transmitir por cada segundo, como mínimo,  $32 \times 1652$  datos de 24 bits mediante la red WIFI, lo cual saturaría por completo el ancho de banda de la red y se interrumpiría la comunicación.

Por otro lado, la parte a) de la **Figura 25** muestra los datos que recibe el módulo inalámbrico del sistema, el cual es un sub-sistema independiente de la adquisición de aceleraciones, aunque de igual forma utiliza uno de los controladores (cRIO1) para conducir la adquisición inalámbrica. Este sub-sistema comprende de 6 nodos para entradas analógicas, 5 nodos para mediciones de deformaciones unitarias y 1 nodo para termocuplas, cada nodo con 4 canales de medición. Los nodos son independientes unos de otros, operan de forma inalámbrica y transmiten 1 dato por segundo las mediciones al cRIO1. Para la cantidad dada de nodos, no se recomendaría utilizar una mayor tasa de muestreo debido a que se saturaría la comunicación inalámbrica entre los nodos y la compuerta (Gateway) instalada en cRIO1, pues, son 4 canales de datos por nodo, y el hardware de estos nodos inalámbricos están optimizados para mediciones estáticas a largo plazo. Los nodos de entradas analógicas pueden recibir cualquier sensor o instrumento que tenga salidas analógicas como LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers), inclinómetros y otros.

Estos nodos inalámbricos son un módulo separado de la parte de adquisición de aceleración, y sus datos se transfieren independientemente de los de aceleración y son mediciones estáticas, las cuales se utilizarían más que todo en las pruebas de carga estática, o en un futuro para monitoreos a largo plazo.

La interfaz en el computador portátil puede ejecutarse una vez que los cRIO's ya se encuentren en funcionamiento. La interfaz recibe información de operación de los cRIO's a través de la red WIFI, y puede enviar comandos de escribir o dejar de escribir datos al disco

duro a los cRIO's. El proceso de comunicación y flujo de datos a través de la red entre la interfaz (nodo de usuario) y los cRIO's se ilustra en la **Figura 26**.



**Figura 26.** El proceso de comunicación y flujo de datos a través de la red entre la interfaz (nodo de usuario) y los cRIO's.

El diseño del programa de la interfaz se realizó con la estructura de eventos basado en el concepto de “máquina de estados”. El inicio o fin de la escritura de datos en los cRIO's, la cual se ejecuta oprimiendo el botón “Guardar datos” de la interfaz principal (ver **Figura 24**), se emite a través de “Network Streams” de LabVIEW, el cual por medio de un búfer FIFO (acrónimo en inglés de “First In, First Out”, o primero en entrar, primero en salir) garantiza que los cRIO's reciban el comando; por otra parte, el nodo de usuario también debe recibir reportes del estado de operación de cada cRIO (estado de GPS, uso de CPU), así como la visualización de las mediciones de nodos inalámbricos WSN y el RMS de las aceleraciones, los cuales se implementan vía “variables compartidas publicadas en red”, a las cuales escriben los cRIO's y el nodo de usuario lee. La lectura a la variable compartida es sólo al último valor publicado, por lo que si eventualmente algún canal o nodo WSN deja de funcionar o pierde la conexión, el último valor de la variable compartida será el que se lee siempre.



### 3.3.2 Algoritmo de adquisición de datos de los cRIO's

Es importante recordar aquí que cada cRIO es un controlador con un CPU y sistema operativo independiente, razón por la que una vez encendida la fuente de energía, el algoritmo descargado en el controlador ya empieza a ejecutarse. La interfaz del nodo de usuario sólo emite comandos para iniciar o finalizar la escritura de datos, pero no para arrancar el algoritmo.

El cRIO es programado en el lenguaje LabVIEW RT (Real Time), y su estructura comprende básicamente en 6 bucles ejecutándose en paralelo:

- 1) El bucle productor de los datos de aceleración: es el bucle encargado de extraer los datos ya adquiridos en el DMA FIFO (son las siglas del búfer FIFO del "Direct Memory Acces", el cual es el recurso pre-establecido para la transmisión de datos entre FPGA y RT) provenientes de FPGA y alimenta al bucle de consumidor de datos, a través de un búfer RT FIFO ("First In, First Out del sistema Real Time de cRIO).
- 2) El bucle productor de los datos de WSN: es el bucle a cargo de ordenar y agrupar los datos provenientes de los nodos inalámbricos WSN en un arreglo numérico, y los introduce en un búfer RT FIFO para luego transferirlos al bucle consumidor de datos. Este bucle productor de datos de WSN se encuentra únicamente en cRIO1 porque en este controlador se encuentra la compuerta que comunica con todos los nodos inalámbricos.
- 3) El bucle consumidor de datos: recibe del búfer RT FIFO los datos de acelerómetros, y de WSN si es el caso de cRIO1, en otros cRIO's sólo datos de aceleración, además de los datos del uso de CPU, estado de GPS y cualquier otra información que se desea visualizar en tiempo real, los guarda en un archivo TDMS (Technical Data Management Streaming) si se recibe el comando "guardar datos" proveniente del usuario. El archivo TDMS es un formato de archivo creado por National Instruments específicamente para la adquisición, transmisión y registro de mediciones en tiempo real.



- 4) El bucle editor de datos globales: colecta datos de interés para el usuario y los publica a través de variables compartidas publicadas en la red (Network Published Shared Variables). En el caso de cRIO1, se publica los datos RMS para bloques de 1 segundo de aceleración, y las mediciones estáticas de los WSN que son un dato por segundo. En otros cRIO's sólo se publica los valores RMS de los canales de aceleración.
- 5) El bucle productor del “manejador de mensajes en cola”: recibe los comandos provenientes del usuario a través de la red “Network Streams”. Estos comandos son insertados en el búfer RT FIFO y transferidos al bucle consumidor del manejador de mensajes en cola.
- 6) El bucle consumidor del “manejador de mensajes en cola”: recibe los comandos provenientes del bucle productor del manejador de mensajes en cola y los procesa. En nuestro caso estos comandos tienen que ver con la escritura de datos. Los comandos provenientes del usuario son básicamente el inicio o el fin de la escritura o registro de datos, mientras que internamente en este bucle también genera un comando 5 minutos después del inicio del registro para cerrar el archivo previo y crear uno nuevo.

El control propiamente de la adquisición de datos de aceleración se realiza a nivel de FPGA, este último está a cargo de las labores como: sincronizar el “FPGA Timekeeper” (el cronometrador de FPGA) con los pulsos de GPS, obtener los datos muestreados de aceleración a nivel de “hardware”, capturar la estampa de tiempo y su asignación a los datos de aceleración muestreados, y por último, alimentar el búfer DMA FIFO con los datos y sus respectivos estampas del tiempo. Esto se realiza a través de dos bucles en paralelo, y se ilustra esquemáticamente en la **Figura 27**.

El recurso de FPGA brinda estabilidad y precisión en la sincronización, debido a su alta resolución en el tiempo (en orden de nano-segundos), y es idóneo para la tarea de adquisición de mediciones dinámicas como las de aceleración, puesto que la tasa de muestreo más alto que puede alcanzar el módulo NI 9234 son unos 51200



muestras/segundo, aunque para el caso de nuestra aplicación utilizamos la tasa más baja disponible que son unos 1652 muestras por segundo.

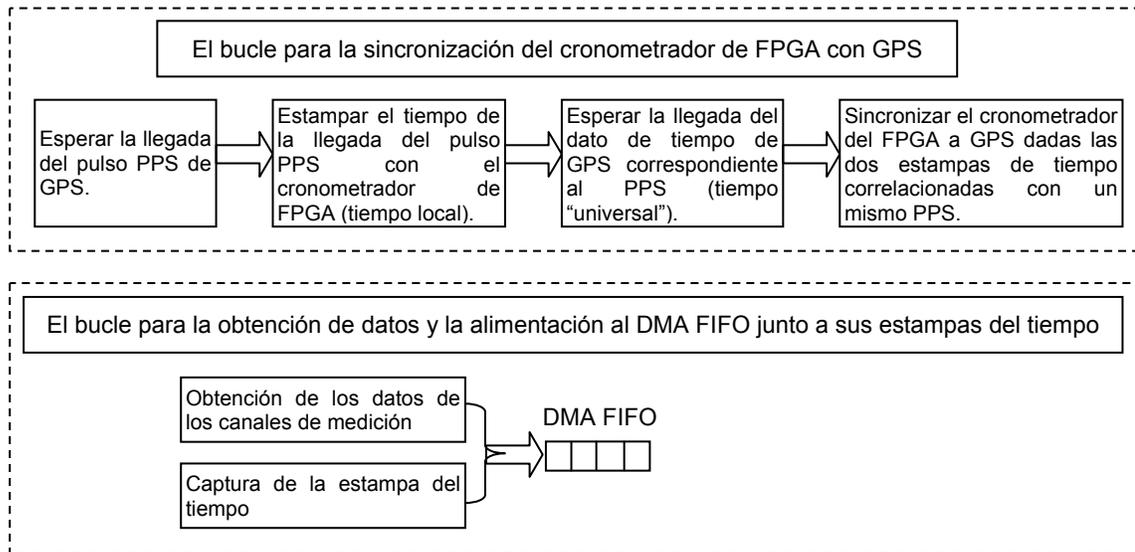


Figura 27. El diagrama conceptual de operación a nivel de FPGA.

Los 6 bucles mencionados anteriormente se ejecutan en paralelo en el ambiente RT de los controladores cRIO's y son necesarios para una aplicación en tiempo real, asumen el rol de un centro de comunicación para la recepción, procesamiento, transmisión y almacenamiento de datos, y dada la naturaleza no determinística de algunos de los procesos, como el caso de comunicación red, u otros que podrían presentar demoras en algunas de sus etapas como el almacenamiento de datos al disco duro que implica la apertura y cierre de archivos, es indispensable la implementación de búferes en la comunicación entre procesos, así como los bucles mencionados de productor-consumidor, los que amortiguan las diferencias en cuanto a los tiempos, garantizando así la estabilidad durante el funcionamiento .

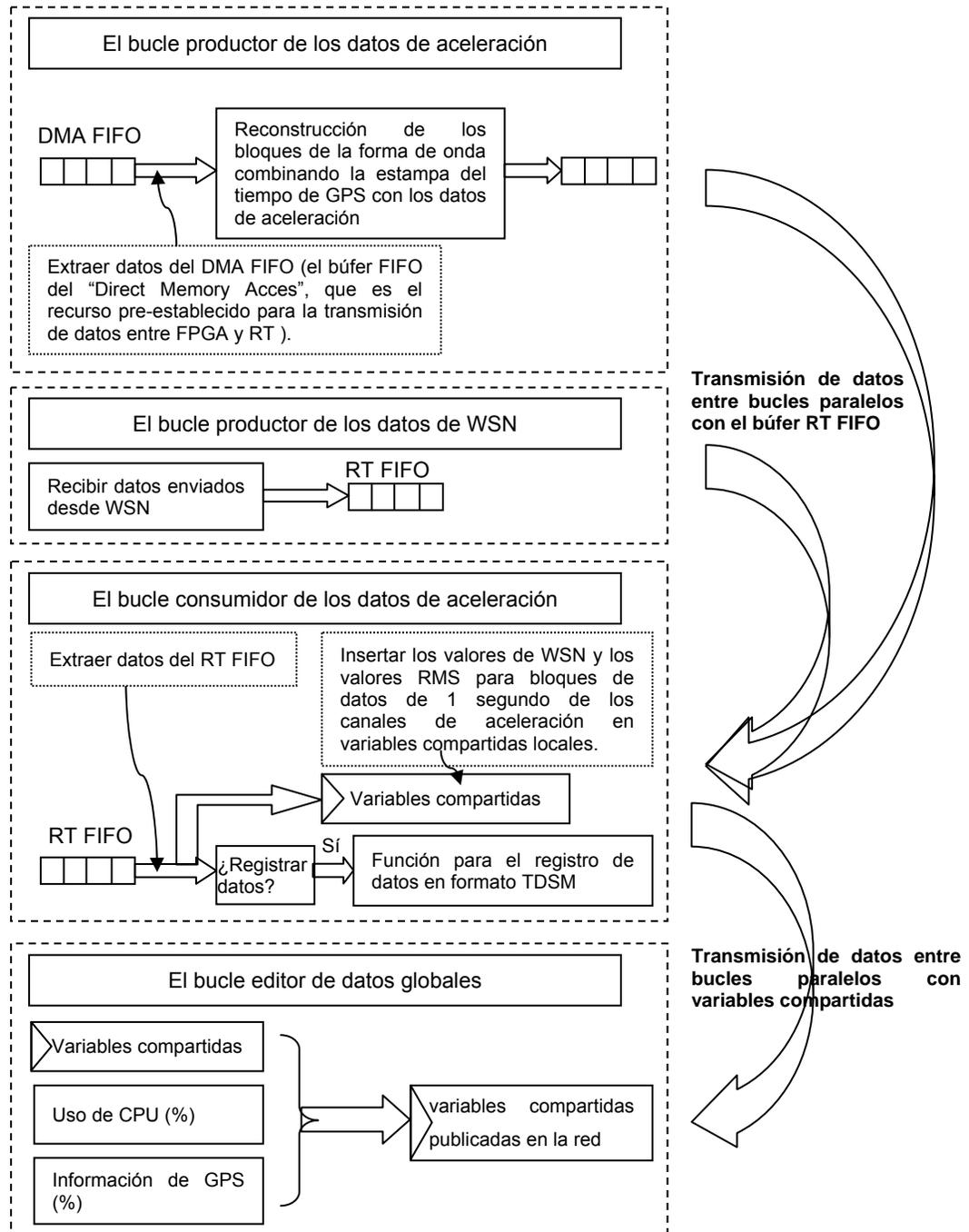


Figura 28. El diagrama conceptual de flujo de datos a través de los bucles de productor-consumidor, y el editor de datos globales (para su publicación en la red).



Dentro de estos 6 procesos paralelos, los bucles productor y consumidor de datos tienen la mayor prioridad en la ejecución por la tasa de ingreso y egreso de datos de aceleración que deben manejar, mientras que otros 3 procesos a cargo de la publicación de datos en la red y procesamiento de comandos (mensajes) provenientes del usuario son de menor prioridad dado que no poseen exigencias rigurosas en cuanto al tiempo.

La **Figura 28** ilustra esquemáticamente la comunicación entre los procesos paralelos de productor-consumidor de datos y su publicación en la red. Por último, la **Figura 29** resume el funcionamiento conceptual de la comunicación entre diferentes partes y procesos que se manejan en el cRIO, y su relación con el nodo anfitrión (“host” en inglés) de usuario. Los demás cRIO’s son idénticos en su arquitectura con la única excepción del módulo de WSN y sus respectivos procesos de comunicación.

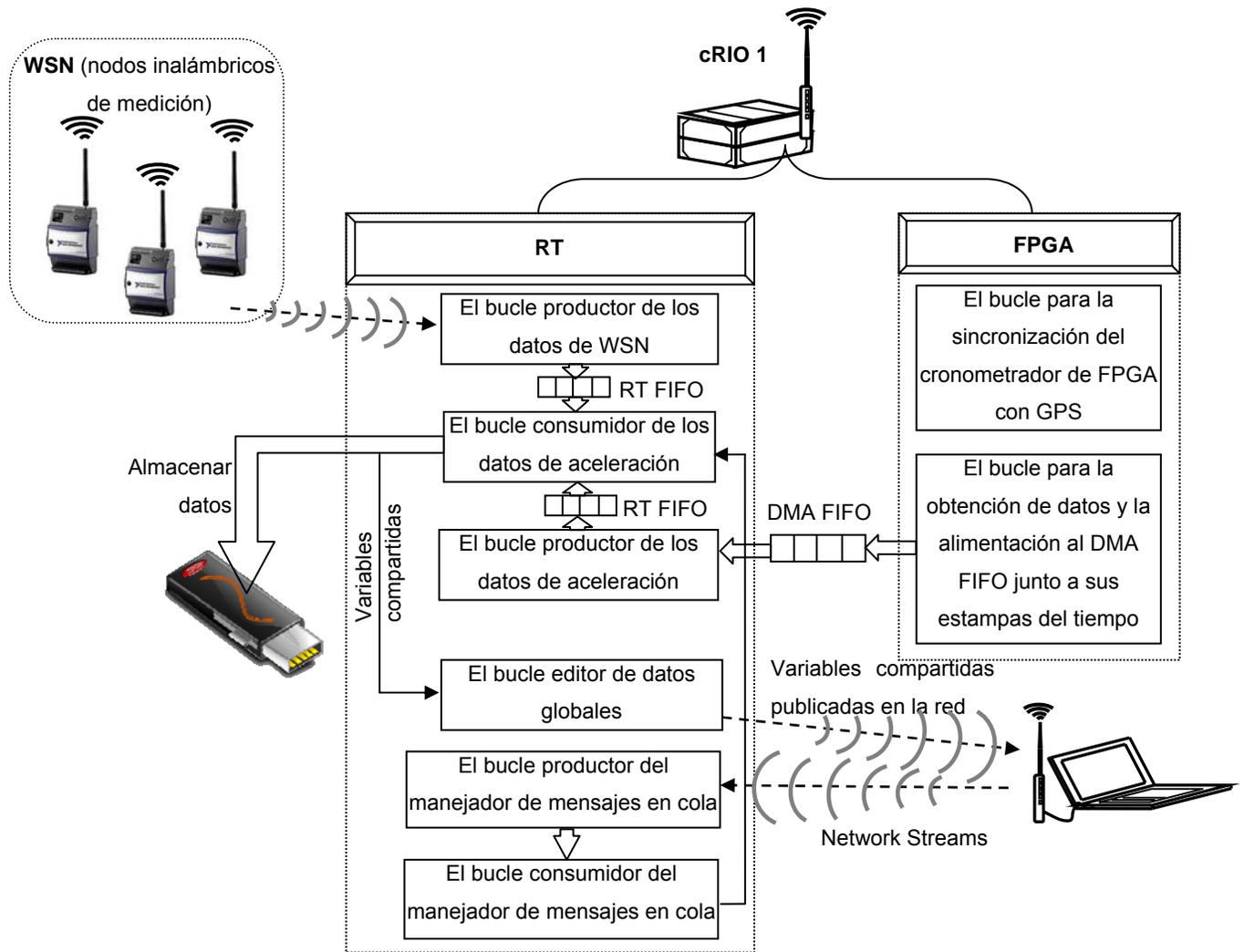


Figura 29. El esquema conceptual de comunicación entre diferentes partes y procesos de cRIO1.



#### 4. VALIDACIÓN EN LABORATORIO DEL SISTEMA PORTÁTIL PARA MSEBV

Una vez concluida la programación del software y verificada la correcta comunicación entre los procesos y las partes, se procede con los trabajos de validación en laboratorio del sistema portátil. La validación en laboratorio da el especial énfasis en la sincronización de los 4 cRIO's, el cual es crítico para tener éxito en el desarrollo del sistema, y luego se realiza la validación del sistema en la identificación de los parámetros dinámicos de un modelo estructural metálico de edificio de 3 pisos. Pero antes de esto, se describirá brevemente el desarrollo de las cajas de protección de acelerómetros, las cuales brindan protección a los sensores contra las inclemencias del tiempo.

##### 4.1 Desarrollo y validación de la caja de protección a los acelerómetros

Los acelerómetros PCB modelo 393B04 son acelerómetros piezoeléctricos en miniatura, los cuales pueden adherirse o atornillarse directamente en las superficies donde se desea coleccionar señales de vibración. Dadas las condiciones desfavorables de campo y el clima lluvioso de nuestro país, habría que brindar protección a estos sensores para evitar daños por impactos, por fuerzas indeseadas (dada su tamaño en miniatura) o un eventual corto circuito causado por la infiltración de agua de lluvia por los conectores. Esto llevó a la idea y creación de cajas de protección dentro de las cuales se instalarán permanentemente los acelerómetros, y que se puedan colocar simple y directamente en los nodos de medición a ambos costados del puente.

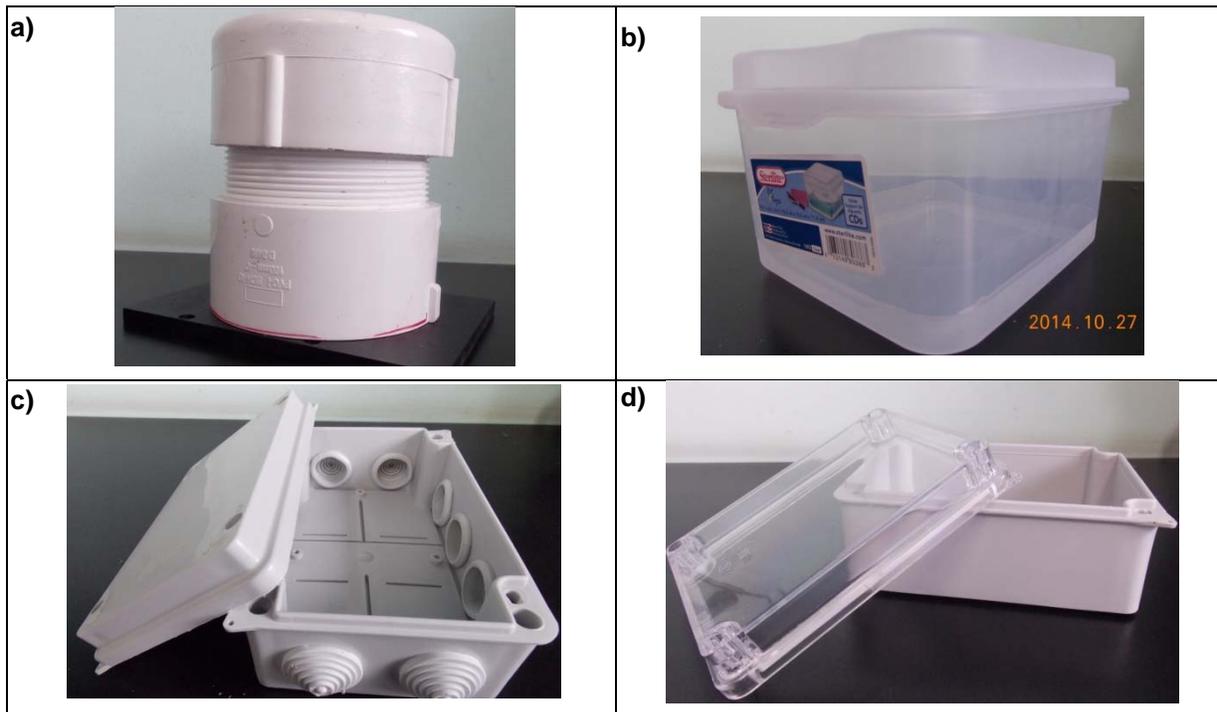
Debido a que los acelerómetros no entran en contacto directo con el puente sino es a través de la caja, es necesario validar si el sensor sufre alguna distorsión indeseada en la señal recolectada debido a esta interfaz.



#### 4.1.1 Selección del prototipo adecuado para la instalación del acelerómetro y su fabricación

La caja de protección debe cumplir las siguientes características: a) ser hermético ante el embate del agua, b) tener suficiente espacio para la instalación y manipulación de los acelerómetros con la mano dentro de la caja, donde habrá dos acelerómetros instalados: uno en el sentido de la gravedad y otro horizontal, así como sus cables de conexión, c) permitir la instalación de prensaestopas en las paredes de la caja, de forma que se puede introducir el conector BNC macho del cable coaxial de de 25 m, por el exterior, y conectarlo manualmente con el conector BNC hembra, del lado del sensor, dentro de la caja. Todas estas consideraciones son para optimizar el proceso de instalación de los equipos en campo.

Hay muchas opciones en el mercado que podrían funcionar como cajas de protección, tales como la tapa roscada de tubería PVC de 100 mm con el adaptador hembra-macho roscado, cajas estancas, cajas plásticas y otros, las cuales se muestran en la **Figura 30**.



**Figura 30.** Opciones disponibles en el mercado consideradas para la caja de protección: a) Tapa roscada de PVC, b) caja plástica, c y d) dos modelos diferentes de caja estanca.



La opción de usar cajas plásticas se descartó considerando la flexibilidad de las paredes y la durabilidad del mismo. La tapa roscada de PVC de 100 mm ofrece mucha resistencia y buen aspecto como caja de protección, además, el acelerómetro puede atornillarse directamente sobre la platina de base, sin embargo, el espacio libre de aproximadamente 100 mm de diámetro no permite manipulaciones cómodas con la mano a la hora de hacer la conexión, y los conectores BNC tienen poco espacio para acomodarse en el interior de la tapa. Se ha considerado diámetros mayores como la de 150 mm, sin embargo, el producto no es común y habría que hacer pedidos especiales para su fabricación y el costo es elevado. La caja estanca mostrada en **Figura 30 c)** tiene prevista agujeros (conos) por donde se puede pasar el cable, la desventaja es que no cuenta con una base plana y no se adhiere por completo a la platina de base. Por lo que se escogió la opción d), la cual es igual una caja estanca y posee las dimensiones apropiadas (12 cm x 16 cm x 9 cm) para adaptarse a nuestra necesidad.

El proceso de manufactura consiste en: a) raspar y lijar la base de la caja para garantizar su completa adherencia con la platina de base, b) perforar dos orificios y colocar dos prensaestopas que permiten la entrada y salida del cable coaxial con conector BNC, c) adherir la platina de 9.5 mm de espesor con epóxico en su base, y d) colocar el angular para la fijación del acelerómetro tanto en sentido de la gravedad (vertical) como en el horizontal, convirtiendo a la caja en una unidad de medición biaxial (capacidad para instalar dos acelerómetros uniaxiales). La caja con los acelerómetros instalados se muestra en la **Figura 31**, donde se puede observar los dos acelerómetros uniaxiales instalados sobre el angular de fijación y con espacios cómodos para acomodar y conectar el cable azul (del lado de acelerómetros) al cable coaxial (de color negro) de 25 m mediante conectores BNC. El propósito de adherir la platina de base es para darle peso a la unidad, debido a que un puente en condiciones operacionales experimentan vibraciones globales de baja frecuencia (modales), pero también de alta frecuencia producidas por ondas cortantes o por impacto, donde estas últimas literalmente hacen “brincar” a estos acelerómetros muy livianos sobre la superficie. El hecho de adherir esta platina de mayor peso (un poco más de 2 kg) a la caja protectora permite mitigar el efecto mencionado gracias a su peso.



**Figura 31.** Caja de protección fabricada como una unidad biaxial de medición de aceleración.

La capacidad de protección contra el agua de la caja estanca fabricada junto con las prensaestopas fue verificada, tal como se ilustra en la **Figura 32**. Como resultado, no se registró ninguna infiltración en el espacio interior, lo cual garantiza que el sensor pueda permanecer recolectando datos aún bajo condiciones de intemperie con esta caja de protección.



**Figura 32.** Prueba de protección contra el agua de la caja de protección.



#### 4.1.2 Verificación de las señales de aceleración adquiridas con y sin caja de protección

Una preocupación que existe con el uso de esta caja de protección es el hecho de que el sensor está atornillado en el angular de fijación, y entra en contacto la estructura a través de la caja protectora y platina de hierro. Al no haber un contacto directo, existe la duda de que si esta interfaz “platina, base de la caja, y angular” causaría algún grado de distorsión en la señal de aceleración captada.

Para aclarar la duda, se realizaron varias pruebas a la unidad caja-acelerómetro con movimientos verticales y horizontales. Estas pruebas se realizaron colocando la unidad acelerómetro-caja de protección sobre tablas de acero o de madera, flexibles y rígidas, disponibles en el laboratorio y generando historias de vibración por medio de la flexión de las tablas para verificar las mediciones de las señales verticales; mientras que para las señales horizontales, se colocó la unidad sobre el modelo de edificio de tres pisos que se encuentra en laboratorio para generar señales vibratorias horizontales. Los resultados obtenidos de estas pruebas se muestran a continuación.

##### 4.1.2.1 Prueba de la señal vertical mediante una tabla de madera flexible

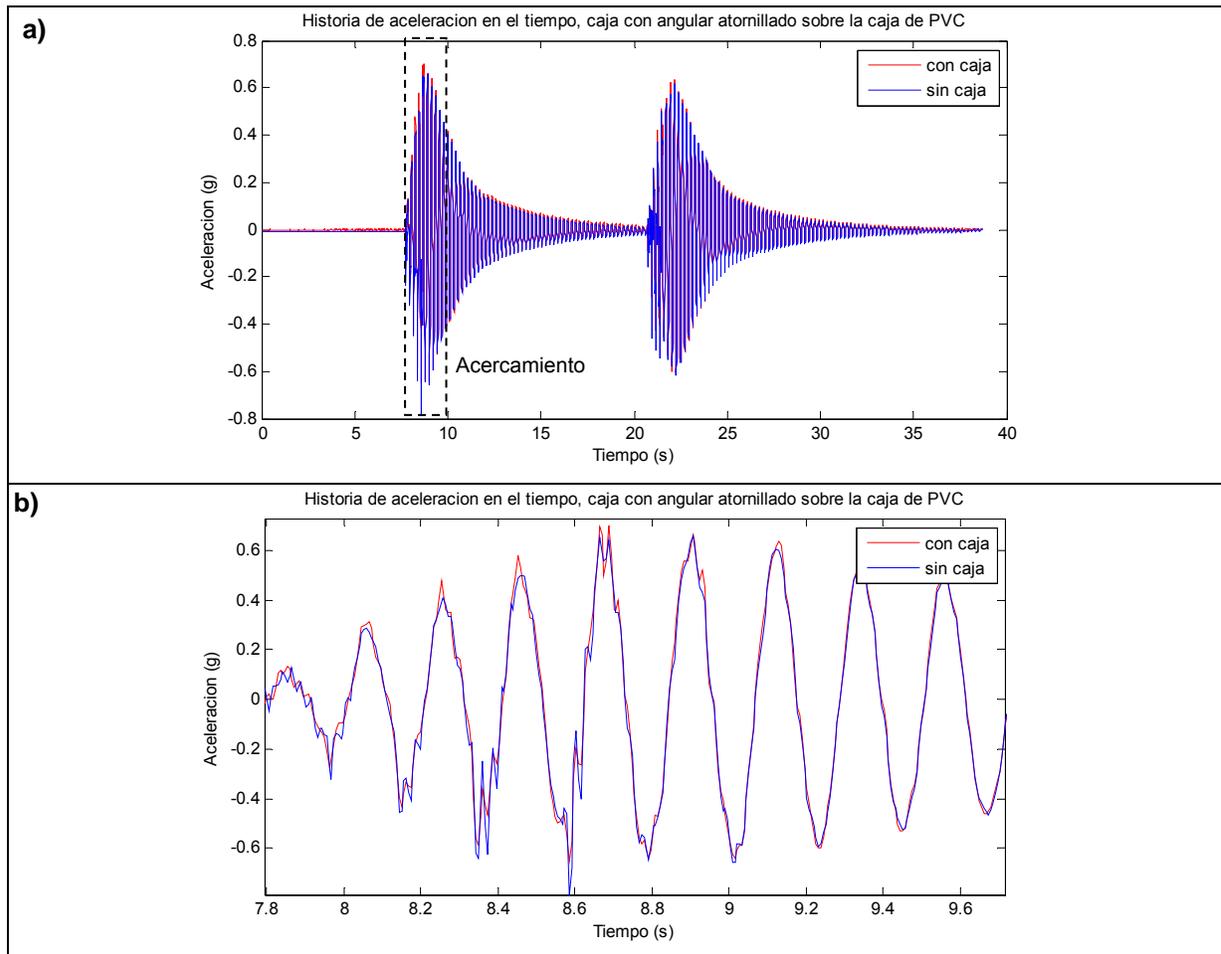
Se colocó la caja de protección con el sensor sobre una tabla de madera flexible simplemente apoyada en los bordes de la mesa, pero debido a que la tabla es liviana y los apoyos no están anclados, la tabla daba “saltos” en los apoyos generando señales de impacto a la tabla durante las vibraciones, las cuales son indeseables para la prueba de verificación. Para corregir este problema se colocaron dos maletas de WSN encima de la tabla para aumentar el peso como se muestra en la **Figura 33**. Se instalaron acelerómetros en contacto directo con la tabla para que fueran la referencia de comparación, y tanto estos como la caja de protección se adhirieron a la tabla con plasticina.



**Figura 33.** a) Prueba de la señal vertical mediante una tabla de madera flexible, b) acercamiento a los acelerómetros instalados dentro de la caja de protección y los que están en contacto directo.

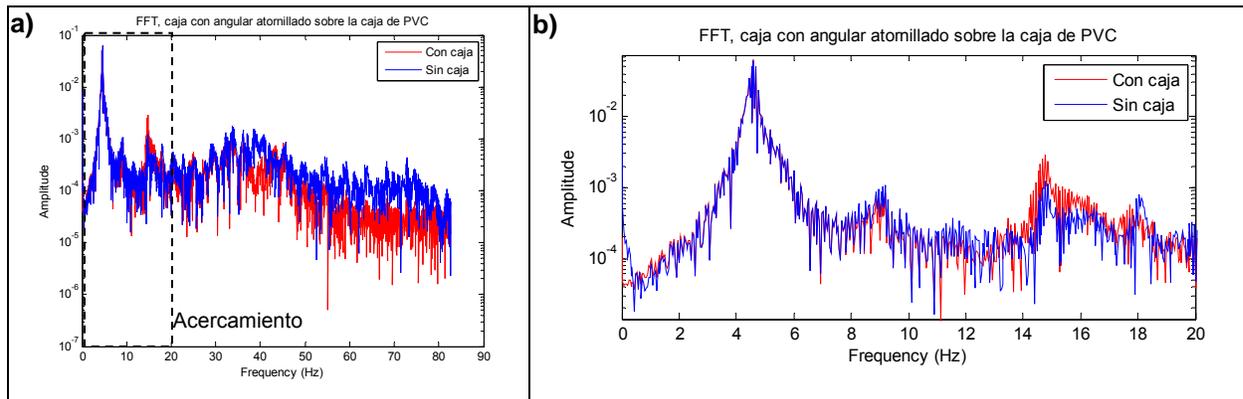
La adquisición de señales se realizó mediante el equipo de adquisición de datos CompactDAQ 9188 y la tarjeta NI 9234 de National Instruments. La tarjeta NI 9234 tiene una resolución de 24 bits y provee fuente de excitación necesaria para el acelerómetro piezoeléctrico. La tasa de muestreo escogida es la mínima permitida por la tarjeta NI 9234: 1652.89 Hz, pero luego es decimado a 165.289 Hz, esto porque las frecuencias de vibración de estructuras civiles son relativamente bajas y la decimación es necesaria para poder aplicar los métodos de identificación de sistemas en el dominio de tiempo.

En la **Figura 34** muestran las comparaciones de las historias de aceleraciones verticales registradas en esta prueba, se observa que la forma de onda es bastante similar exceptuando leves diferencias en las zonas de los picos, esto puede ser debido a la atenuación de señal que experimenta el acelerómetro dentro de la caja por el efecto de “filtro” de la platina junto con la caja de protección, pues, este conjunto también es un sistema dinámico que podría “filtrar” ciertas componentes de frecuencias vibratorias. Por otro lado, esta leve diferencia también puede ser provocada por la diferencia de posición entre el acelerómetro de referencia y el que está dentro de la caja, la cual podría afectar en la amplitud de los picos. De todas formas, esta diferencia es insignificante.



**Figura 34.** a) Comparación de la historia de aceleración vertical en el tiempo, entre el acelerómetro en contacto directo y el de la caja de protección, b) acercamiento.

Lo más importante para el análisis de vibraciones es el estudio del contenido de frecuencias, el cual se refleja en el espectro de Fourier. Se puede observar en la **Figura 35** la comparación de los dos espectros de Fourier. El hecho de colocar el sensor dentro de la caja de protección provoca una atenuación en la amplitud de los componentes de alta frecuencia, además de una alteración ligera en el contenido de ruido en el espectro, sin embargo, en el rango de frecuencias donde contiene la información modal más importante de los puentes que generalmente andan menor que 10 Hz, los espectros concuerdan casi en forma idéntica.



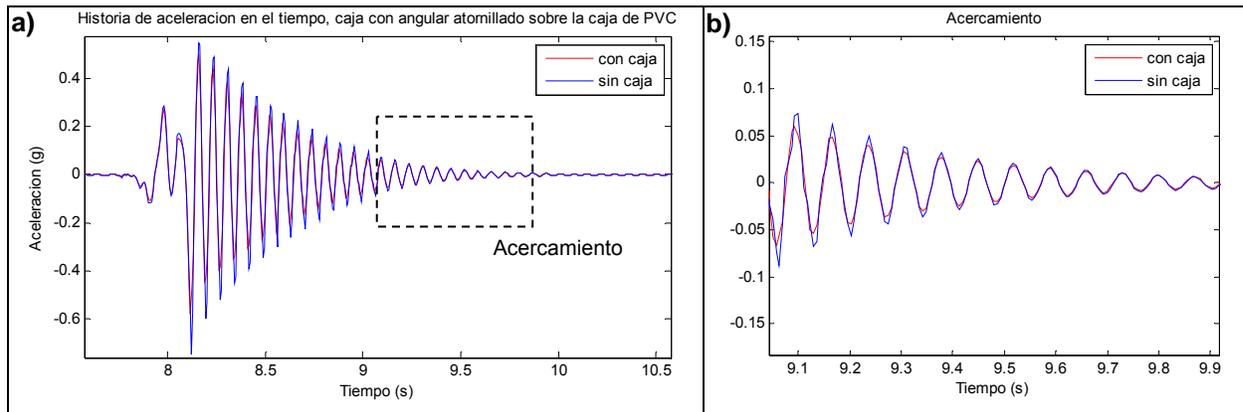
**Figura 35.** a) Comparación del espectro de Fourier de aceleración vertical en el tiempo, entre el acelerómetro en contacto directo y el de la caja de protección, b) acercamiento al rango de 0 a 20 Hz.

#### 4.1.2.2 Prueba de la señal vertical mediante una placa de acero rígido

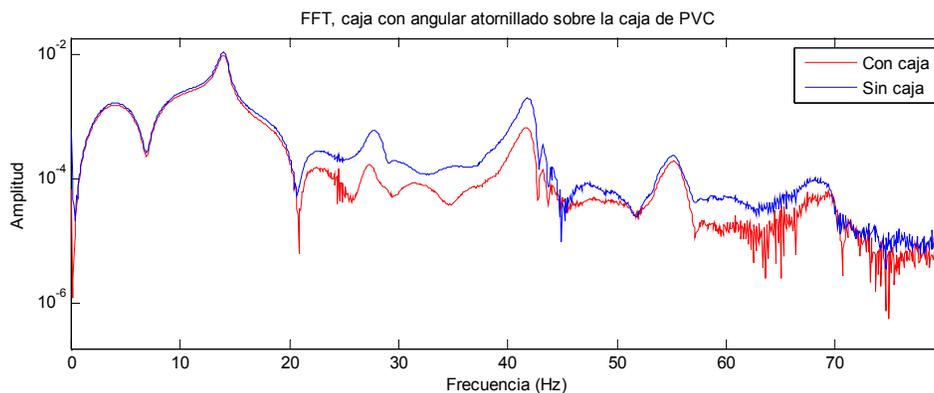
La otra prueba se hizo con una placa de acero que tiene una rigidez mayor que la tabla de madera utilizada anteriormente, tal como se ilustra en la **Figura 36**. Similar a la prueba anterior se colocó acelerómetros directamente sobre la tabla para servir de medición de referencia. La comparación de las historias de aceleración en el tiempo se muestra en la **Figura 37**, y del espectro de Fourier en la **Figura 38**.



**Figura 36.** Prueba de la señal vertical mediante una tabla de acero rígido.



**Figura 37.** a) Comparación de la historia de aceleración vertical en el tiempo, entre el acelerómetro en contacto directo y el de la caja de protección, b) acercamiento.



**Figura 38.** Comparación del espectro de Fourier de aceleración vertical en el tiempo.

El mismo fenómeno se observa en este caso: hay atenuación de amplitud de aceleración en los picos de la sinusoidal de vibración libre amortiguada, especialmente en los picos de aceleración; mientras que la forma de onda son idénticas para las amplitudes bajas de movimiento. Del espectro de Fourier se puede observar la total concordancia para frecuencias menores de 20 Hz, y para frecuencias más altas se presentan la atenuación en amplitud similar al caso anterior.

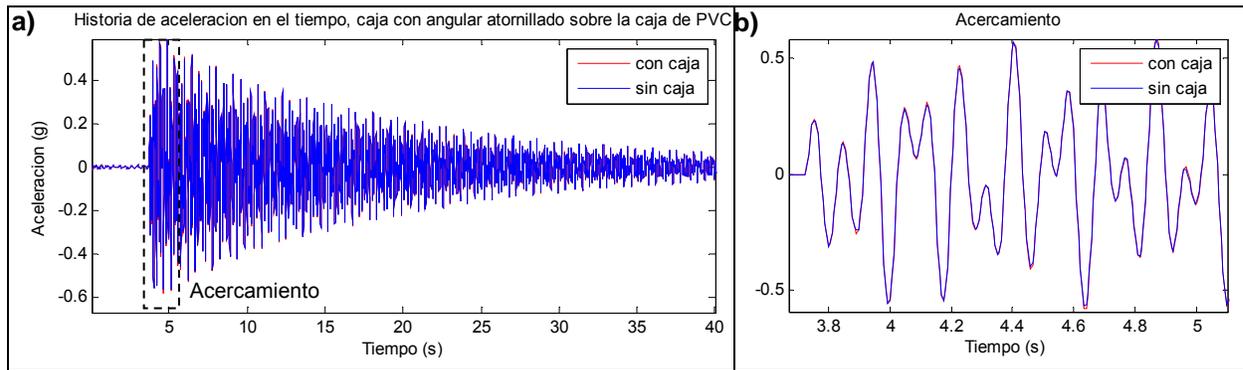
#### 4.1.2.3 Prueba de la señal mediante el modelo de edificio de 3 pisos

Además de la señal vertical es necesario verificar y comparar la señal que capta el acelerómetro dentro de la caja de protección, colocado en forma horizontal a través del angular, con la medición de un acelerómetro de referencia que esté en contacto directo con la estructura en vibración. Para esta prueba se aprovechó el modelo de edificio de 3 pisos que hay en el laboratorio de estructuras a escala reducida.

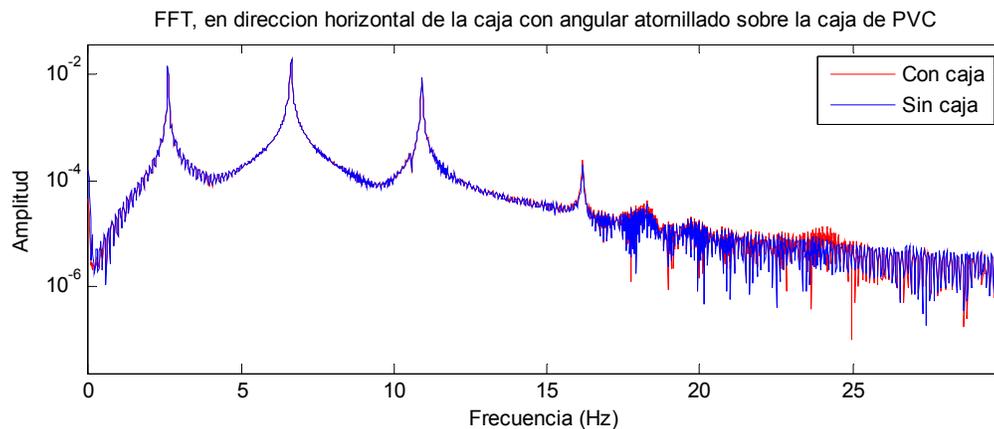
Se adhirió los acelerómetros con y sin caja de protección al primer entrespacio del modelo metálico de tres pisos tal como se muestran en la **Figura 39**. La caja de protección mostrada corresponde al prototipo construido con tapa y adaptador roscado de tubería sanitaria PVC, pero se realizó pruebas tanto para este como para la caja de protección propiamente escogida para el sistema. Los resultados de comparación se muestran en la **Figuras 40 y 41**.



**Figura 39.** Prueba de la señal horizontal utilizando el modelo de edificio de 3 pisos.



**Figura 40.** a) Comparación de la historia de aceleración horizontal en el tiempo, entre el acelerómetro en contacto directo y el de la caja de protección, b) acercamiento.



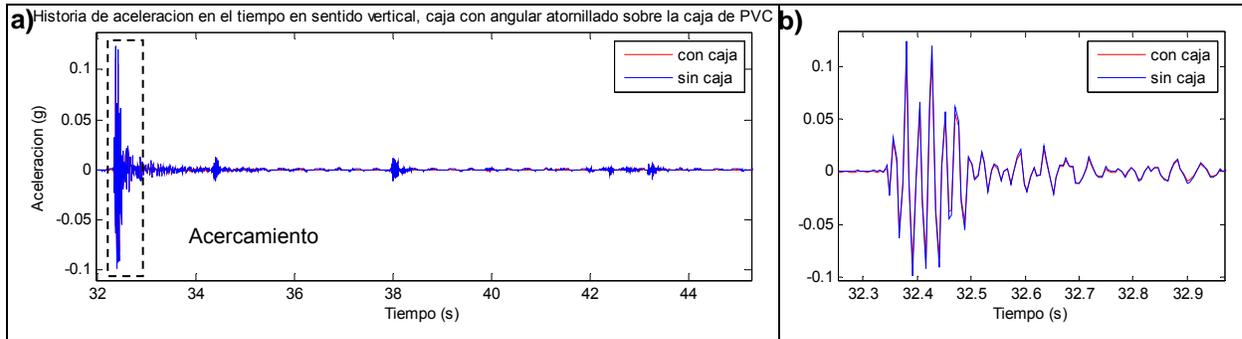
**Figura 41.** Comparación del espectro de Fourier de aceleración horizontal en el tiempo.

De la comparación de la historia de aceleración horizontal en el tiempo mostrada en la **Figura 40**, se puede observar la total concordancia entre las dos mediciones, así como del espectro de Fourier de la **Figura 41**, la misma concordancia se observa para frecuencias menor que 17 Hz, que es el rango por donde se registran los modos principales de vibración del edificio, por encima de esta frecuencia corresponde al espectro de ruido y se observa sólo diferencias leves.

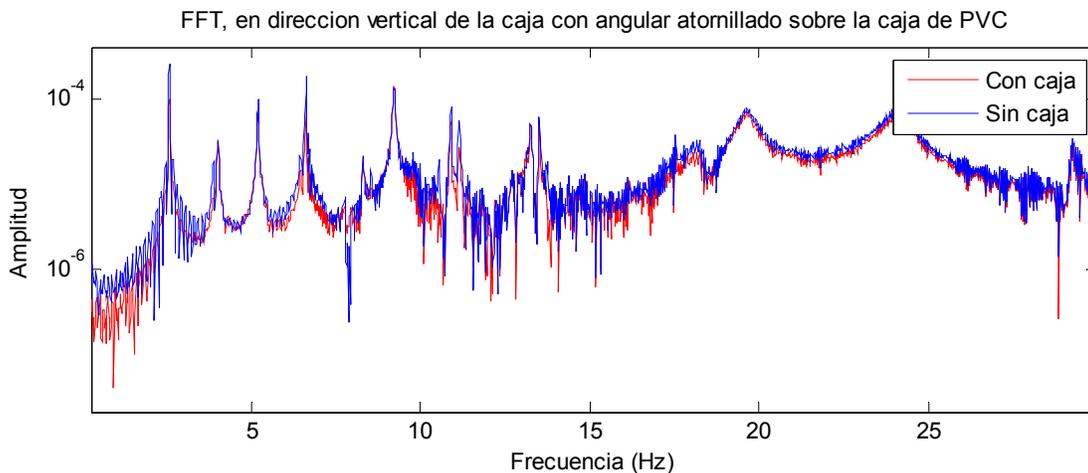
Por otra parte, también se compararon las señales de aceleración registradas en el sentido vertical que se muestran en las **Figuras 42 y 43**, y aunque se trataban de señales de baja



amplitud (menor que 0.1 g), se observa casi total concordancia en la historia de aceleración en el tiempo registrada por los dos acelerómetros, y lo mismo con el espectro de Fourier.



**Figura 42.** a) Comparación de la historia de aceleración vertical en el tiempo, entre el acelerómetro en contacto directo y el de la caja de protección, b) acercamiento.



**Figura 43.** Comparación del espectro de Fourier de aceleración vertical en el tiempo.

De estas pruebas realizadas, se concluye que la caja de protección diseñada es apta para utilizar en las pruebas en campo: no distorsiona la señal de aceleración, atenúa la amplitud de ruido o aceleraciones de alta frecuencia, lo cual es ventajoso para la aplicación en el análisis modal operacional de puentes en vibraciones ambientales, y conserva totalmente la banda del contenido de las frecuencias de interés para el análisis modal operacional.



## 4.2 Validación de la sincronización del sistema

El MSEBV también recibe otro nombre como el “análisis modal de las estructuras”, y los métodos de identificación de sistemas multivariables son la herramienta central para su implementación, dentro de los cuales, el método de Identificación de Subespacios Estocásticos (SSI, por su acrónimo en inglés de Stochastic Subspace Identification) es el método que más se ha difundido en el área de ingeniería civil por su capacidad y robustez. Pero para la correcta aplicación de estos métodos, los datos de aceleración entre todos los canales deben estar sincronizados de forma aceptable; además, la fase de los polos en el diagrama Argand de la forma modal compleja identificada es uno de los insumos esenciales para la discriminación de los modos reales de los modos espurios, lo cual sería correcta únicamente si existe una buena sincronización entre todos los canales.

Los 4 controladores del sistema de monitoreo cuentan con relojes internos independientes uno del otro, y cada uno escriben datos en sus correspondientes espacio de almacenamiento de datos para enviarlos al final de la prueba al usuario. No hay problema de sincronización entre los sensores conectados al mismo controlador, ya que existe un único reloj. Entre los controladores, el módulo de GPS (sistema de posicionamiento global) de cada uno es el encargado de sincronizar los datos recolectados, pues, aunque no inician la recolección de datos al mismo tiempo y tampoco hay comunicación entre ellos, cada bloque de datos llevan una estampa del tiempo que le asigna GPS, de modo que con un pos-procesamiento se puede sincronizar los datos recolectados en cada maleta y combinarlos en una serie multivariable en el tiempo.

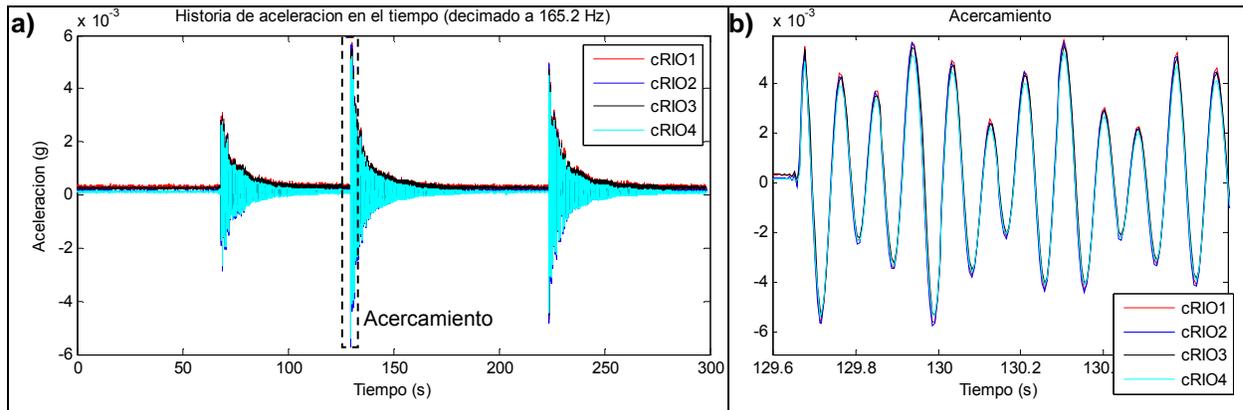
La labor de asignación de estampa de tiempo GPS a cada bloque de datos se realiza a nivel de FPGA (Field-Programmable Gate Array) del controlador, el cual tiene una precisión de nanosegundos, por lo tanto el grado de sincronización final que el sistema puede alcanzar dependerá de la tasa de muestreo empleado, esto porque cada dato lleva una estampa de tiempo que asigna GPS, el máximo error en la sincronía sería el intervalo de tiempo que separa un dato del otro. Considerando el hecho de que los modos de vibración de las estructuras civiles generalmente son de frecuencias bajas, la tasa de muestreo mínima de

1652 muestras por segundo del sistema es aceptable para este propósito, permitiendo alcanzar de esta forma una precisión teórica de sincronización en el orden de 0.6 milisegundos, pero de igual forma, requiere ser validada en el laboratorio.

La validación de sincronización de datos entre los 4 controladores se realiza mediante la colocación 4 acelerómetros sobre el segundo piso del modelo de edificio empleado anteriormente, con cada acelerómetro conectado a un controlador diferente como se muestra en la **Figura 44**. Se somete el edificio a vibración libre y se verifica que las señales estén sincronizadas de forma aceptable. **Figura 45** muestra las señales sincronizadas por GPS, y se puede observar que las historias de tiempo de los 4 acelerómetros concuerdan perfectamente.



**Figura 44.** Validación de la sincronización colocando 4 acelerómetros en el mismo piso del modelo de edificio de 3 pisos.



**Figura 45.** a) Comparación de la historia de aceleración en el tiempo, entre los canales de aceleración adquiridos por los 4 cRIO's, b) acercamiento.

Al ser validada la sincronización entre los cRIO's mediante GPS, se puede proceder con la validación del sistema, específicamente con respecto al procesamiento de los datos de vibración que adquiere, con el método de identificación de subespacios estocásticos, el cual es el método que se desea implementar en el MSEBV de los puentes.

### 4.3 Validación del sistema con la implementación del método de identificación de subespacios estocásticos en un modelo de edificio metálico de 3 pisos.

Para la correcta identificación de los parámetros dinámicos de la estructura de un puente, es necesaria la utilización de una técnica de identificación. Como los parámetros dinámicos son obtenidos a partir de múltiples registros de señales de vibración, recolectados por un sistema de adquisición de datos que sincroniza los registros simultáneos de aceleración, la técnica de identificación debe ser robusta y capaz de discriminar las señales de ruido e interferencias presentes en los múltiples registros.

El método de Identificación Estocástica de Subespacios (Stochastic Subspace Identification, SSI por sus siglas en inglés) es un método de identificación de sistemas lineales en el dominio del tiempo que ha ganado territorio en el ámbito de ingeniería civil por su robustez y eficacia. El método cuenta con una base matemática rigurosa y experiencias exitosas de su



aplicación a diferentes tipos de obras de infraestructura civil que se puede encontrar en numerosas publicaciones técnicas internacionales [refs. 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67].

El método SSI conducido por covarianzas (SSI-COV) es el método que se implementará en el sistema, y un resumen de este método se ilustra a través del diagrama de flujo mostrado en la **Figura 46**; su objetivo primordial es identificar la llamada matriz del sistema **A** y la matriz de observación **C** de las múltiples mediciones de vibración de campo. Contiene en la matriz del sistema **A** informaciones de masa, rigidez y amortiguamiento del sistema, y mediante el análisis de valores propios (eigenvalores) se puede extraer las frecuencias naturales de vibración así como los amortiguamientos de los modos excitados durante las mediciones; mientras que de la matriz de observación **C** multiplicada por los vectores propios (eigenvectores) de la matriz **A** se obtendrá la forma modal operacional observada en los puntos de medición. Por esta razón, mientras mayores puntos de medición haya, más resolución espacial se dispone para la forma modal operacional obtenida en campo.

Puesto que SSI-COV es un método de identificación paramétrico basado en descomposición matricial, en el proceso se podría generar polos numéricos espurios o también hallar los llamados modos de ruido, debido al ruido presente en las señales de vibración, así como, aquellos correspondientes a modos no bien excitados o modos transitorios. La herramienta usada comúnmente para discriminar los polos físicos de los polos espurios se denomina el diagrama de estabilización. Se puede encontrar un estudio a fondo del uso de esta herramienta en la referencia 62.

El método SSI-COV junto con la implementación de diagrama de estabilización es programado en MATLAB y ha sido utilizado en diversos trabajos de investigación, tal como en el análisis modal operacional de la torre de televisión de cantón de 600 m de altura [refs. 61, 62], y en un puente de arco [ref. 65].

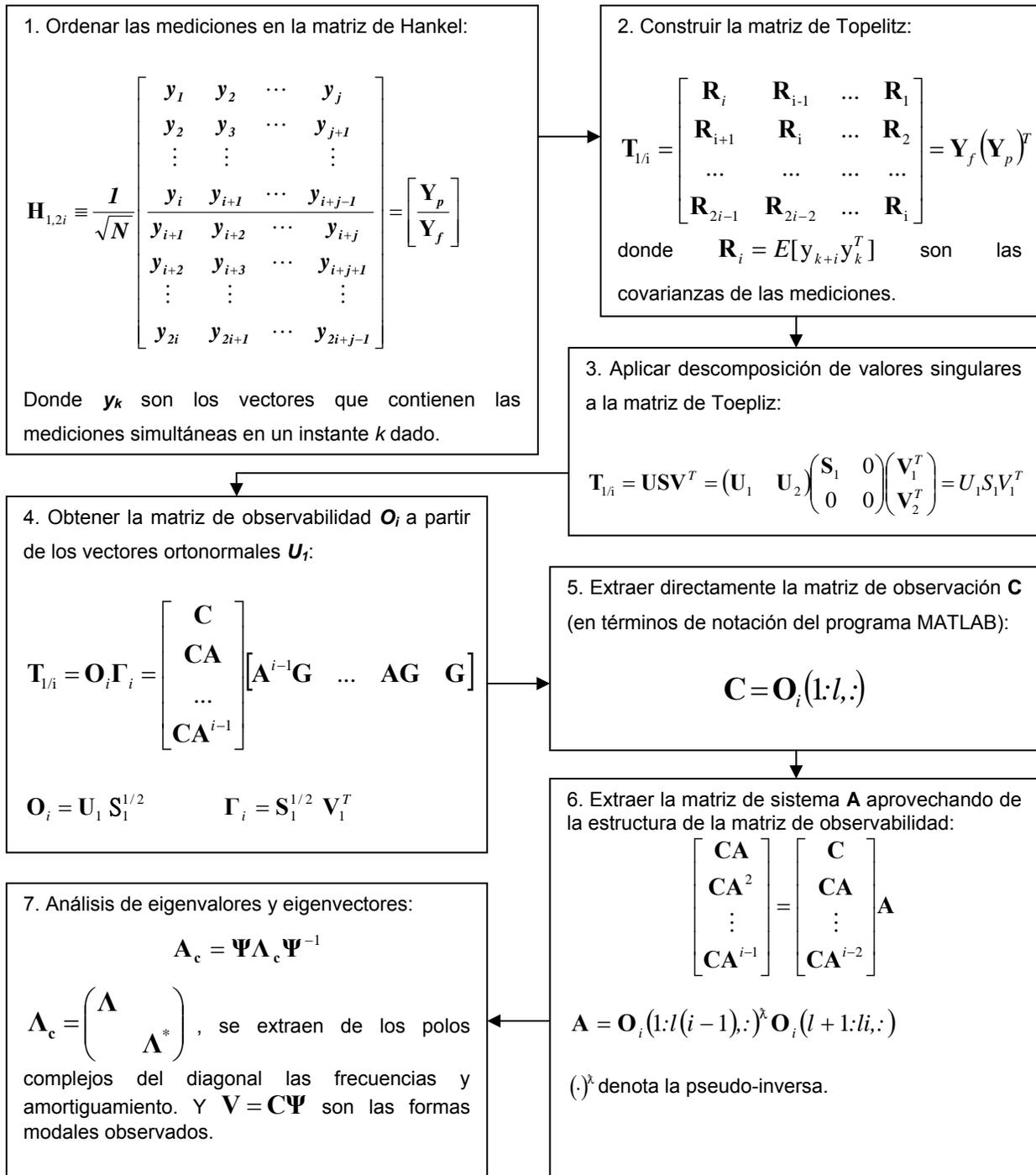
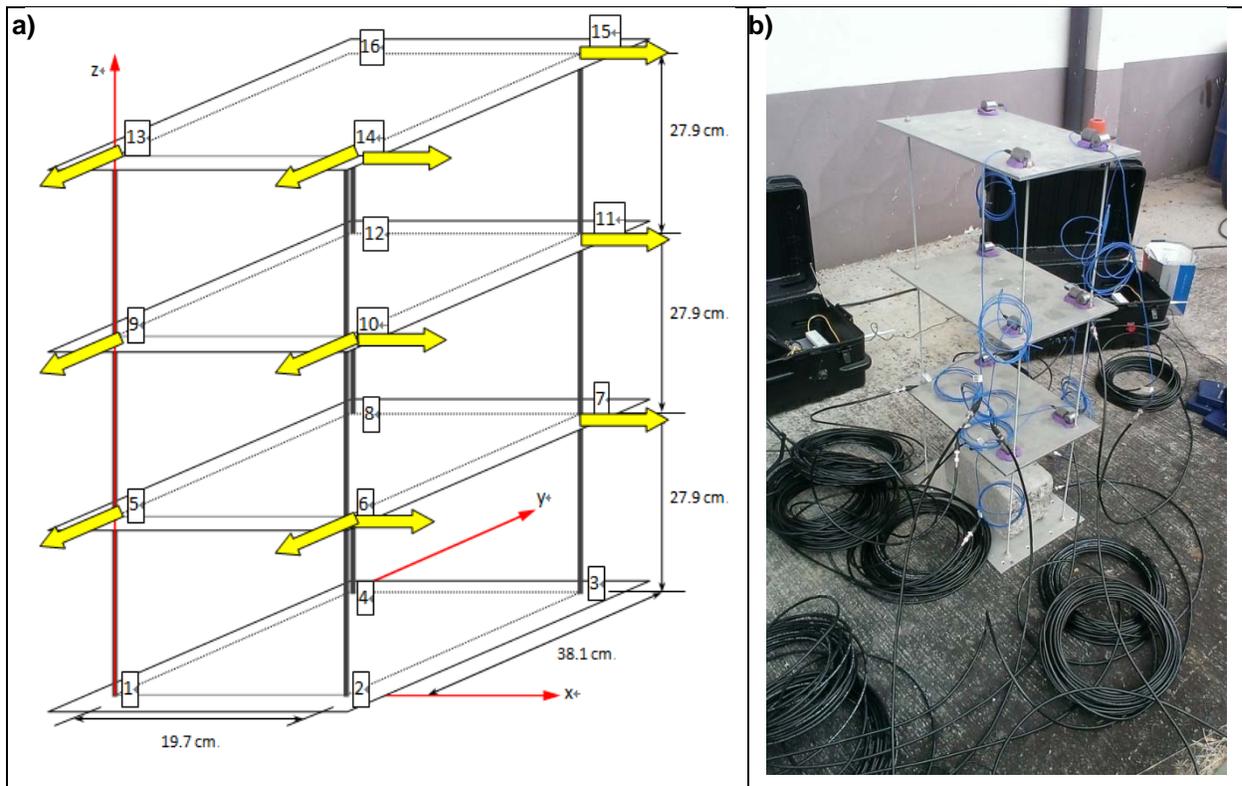


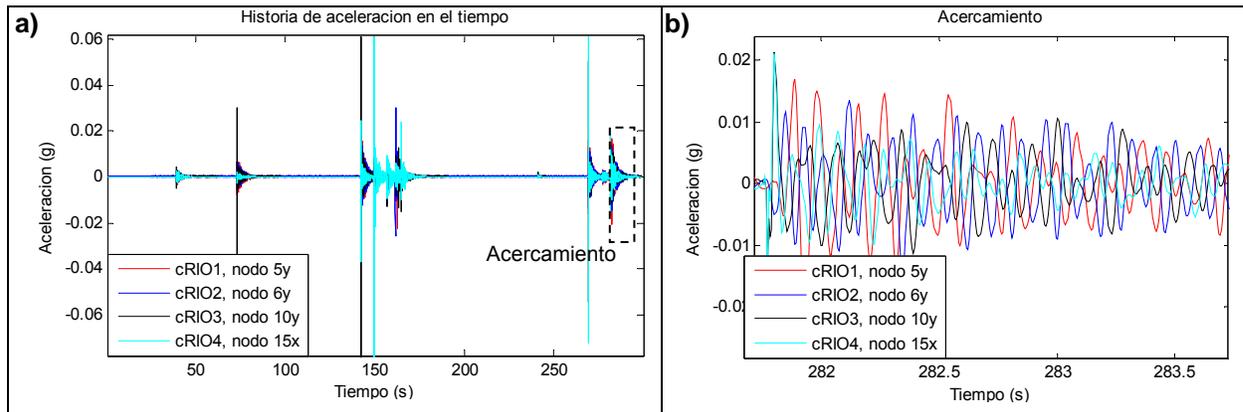
Figura 46. Diagrama de flujo del método SSI-COV



La validación de implementación del sistema junto al método de identificación de sistemas se realizó mediante pruebas de vibración libre en el modelo de edificio metálico de 3 pisos. Se instaló un total de 12 acelerómetros uniaxiales en el edificio tal como se muestra en la **Figura 47**. Dado que cada nodo donde intersecan las columnas (barras roscadas) con el entrepiso (platina) hay dos grados de libertad, y debido a que el entrepiso se puede asumir que es infinitamente rígido en su plano, se colocaron 4 acelerómetros en los tres nodos con las orientaciones indicadas en la figura, de tal forma que el movimiento (en x o en y) del nodo opuesto, a la hora de graficar las formas modales, se iguala simplemente a la amplitud modal del nodo previamente dicho, en la orientación correspondiente. Esto permite tomar en cuenta tanto los modos traslacionales como los torsionales en planta.

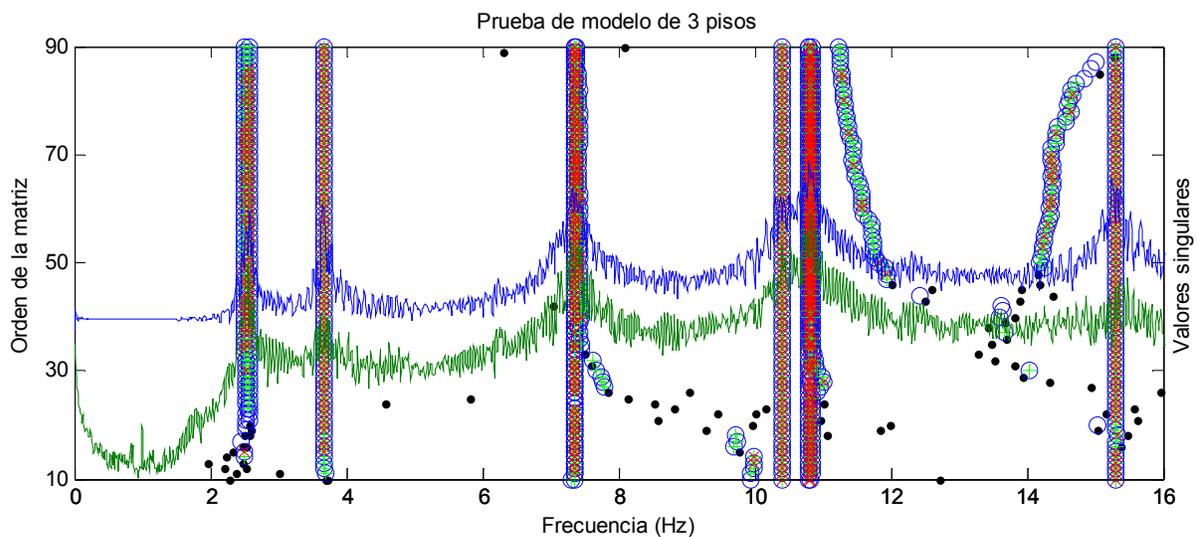


**Figura 47.** a) Esquema de instrumentación con acelerómetros al modelo de edificio metálico de 3 pisos, b) fotografía de la instrumentación realizada.



**Figura 48.** a) Comparación de la historia de aceleración en el tiempo, entre los canales de aceleración adquiridos por los 4 cRIO's, b) acercamiento.

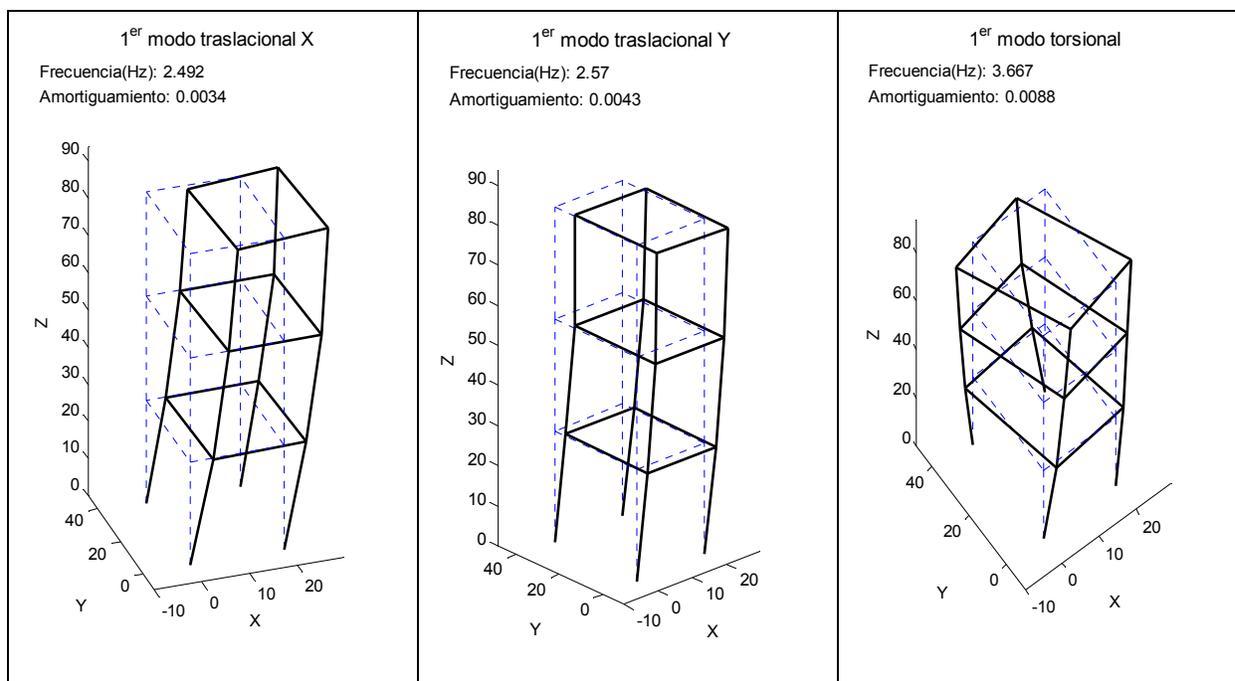
A partir de las señales de vibración libre recolectados del edificio, decimados a 165.2 Hz y mostradas en la **Figura 48** para algunos canales, se realizó la identificación de los parámetros dinámicos del sistema con el método SSI-COV, y se obtuvo un diagrama de estabilización muy estable como se visualiza en la **Figura 49**, lo cual es esperado para una estructura metálica y para datos bien sincronizados y sin contaminación de ruido.



**Figura 49.** Diagrama de estabilización construida a partir de los 12 canales de registro de aceleración.

Además, en el fondo y superpuesto al diagrama de estabilización de la **Figura 49** se encuentra el resultado del método de “Descomposición en el Dominio de Frecuencias” (Frequency Domain Decomposition, FDD por sus siglas en inglés), el cual similarmente es un método de subespacios en dominio de frecuencias que consiste en aplicar la Descomposición de Valores Singulares a la matriz de densidad espectral cruzada, y los primeros dos valores singulares son graficados en conjunto con el diagrama de estabilización para visualizar mejor los modos predominantes en la señal adquirida.

Los resultados de la identificación experimental de las frecuencias, amortiguamientos y las formas modales se muestran en la **Figuras 50 y 51**. Se puede observar que las frecuencias del primer, segundo y tercer modo traslacional en X y Y tienen frecuencias muy cercanas entre sí, y el segundo y tercer modo están acoplados. Esto se debe a que las columnas están hechas con barras roscadas del mismo material y del mismo diámetro, y por lo tanto tienen la misma rigidez en ambas direcciones; la diferencia en las frecuencias se debe a que el entrepiso no tiene las mismas dimensiones en una y otra dirección, razón por la que hay una leve diferencia en la rigidez lateral y fue identificado claramente por el método SSI-COV.



**Figura 50.** Los modos fundamentales de traslación y torsión identificados.

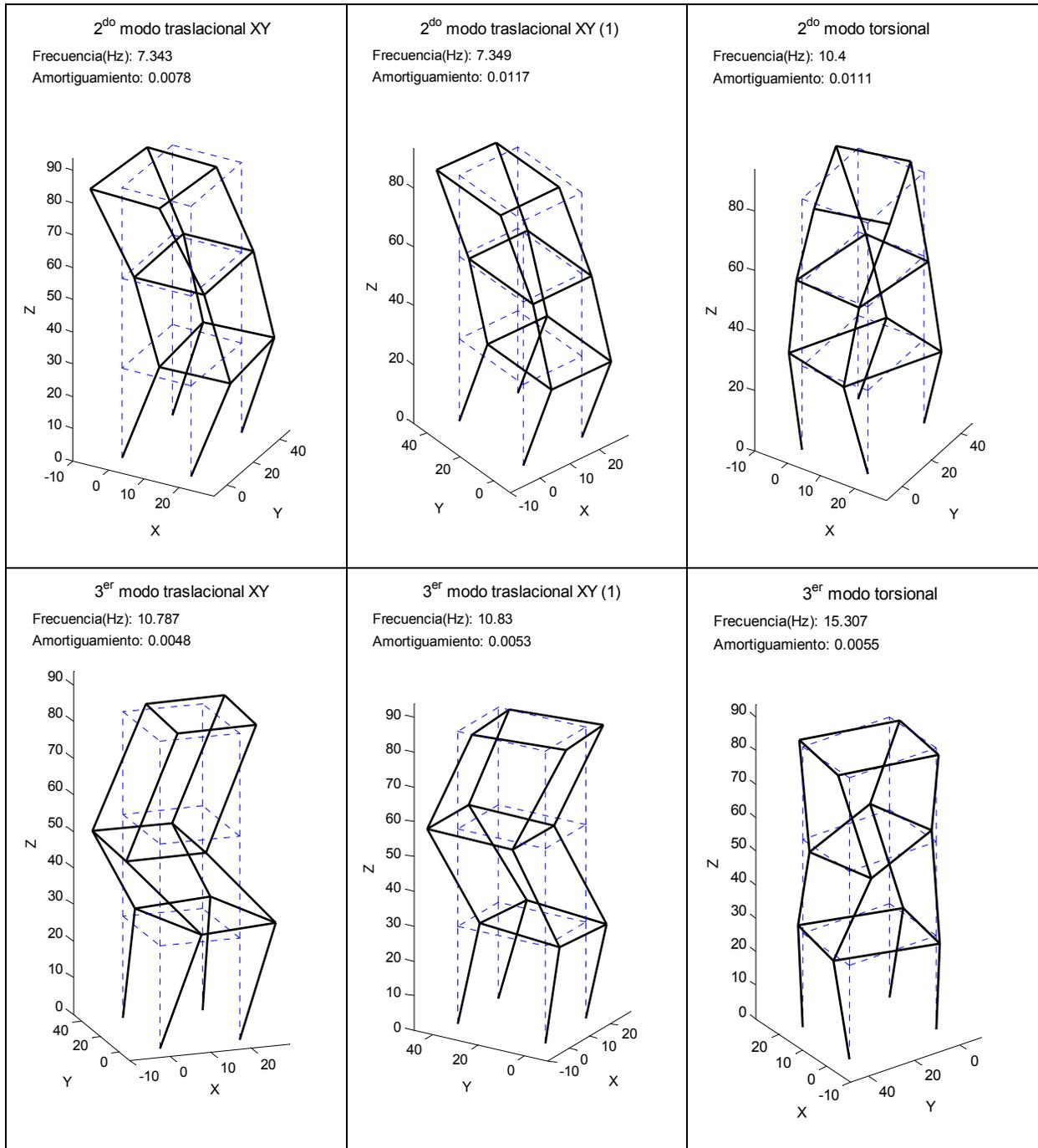
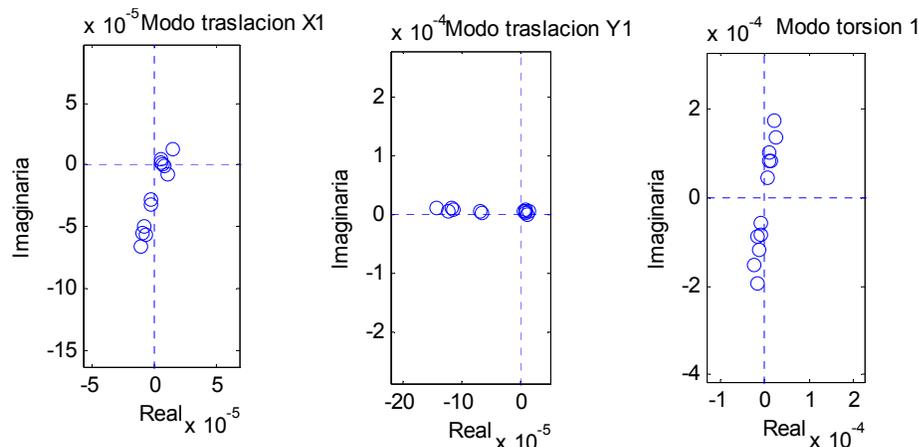


Figura 51. El segundo y tercer modo de traslación y torsión identificados.



Se revisaron además los diagramas de Argand que indican la información de fase de las formas modales. Para una estructura común como la que está en estudio, el efecto del denominado “amortiguamiento no proporcional” es leve, por lo que las formas modales de vibración corresponderían a los llamados “modos normales” de estructuras con amortiguamiento proporcional [ref. 68], y esto implicaría que las amplitudes modales únicamente pueden estar en fase ( $0^\circ$ ) o completamente fuera de fase ( $180^\circ$ ). Los diagramas de Argand de los modos identificados comprueban lo dicho, pues, los puntos en el plano complejo que indican la amplitud modal de cada uno de los nodos, forman casi una línea recta, el cual indica que los fasores de cada nodo están en fase ( $0^\circ$ ), si están todos los puntos en el mismo cuadrante; si fuera el caso donde están en línea pero en cuadrantes diagonales opuestos, sería completamente fuera de fase ( $180^\circ$ ). Ejemplos de esto se muestra en la **Figura 52**, donde a manera de ejemplo, se puede visualizar la información de fase para el primer modo de traslación en X y Y, y el primer modo de torsión en planta.



**Figura 52.** Diagrama de Argand para el primer modo de traslación en X y Y, y torsión.

Se ha validado en forma satisfactoria, con los resultados obtenidos, el sistema desarrollado para el MSEBV mediante pruebas en laboratorio. Se obtuvo sincronización entre los datos adquiridos por cada cRIO a través de GPS, y se implementó exitosamente el sistema para la



**UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA**



**LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**

identificación de los parámetros dinámicos del modelo de edificio de 3 pisos. Se prosigue ahora entonces, con la validación en campo del sistema.



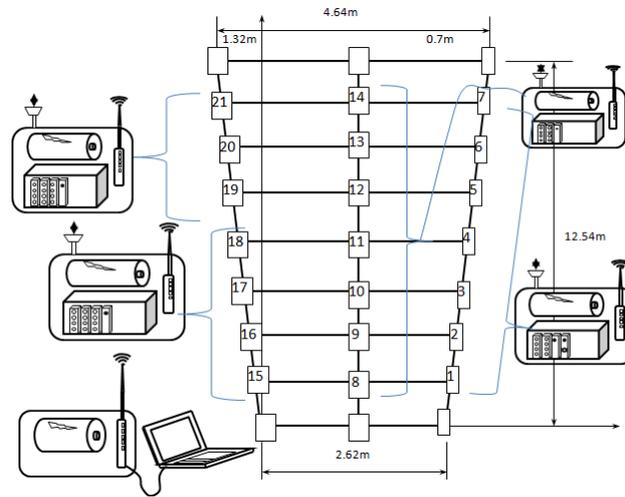
## 5. VALIDACIÓN EN CAMPO DEL SISTEMA PORTÁTIL PARA MSEBV

La validación en campo del sistema se pretende comprobar varios aspectos: a) la estabilidad de conexión de GPS en campo, b) la estabilidad de conexión de red WiFi al aire libre y en presencia de tránsitos vehiculares, c) estabilidad en la escritura de datos con mayor duración en la medición, d) estabilidad del sistema en general ante la exposición solar, e) la calidad de datos de vibración causados por tránsitos vehiculares y su identificación mediante métodos de subespacios estocásticos, y f) el procedimiento, el grado de dificultad y la duración para su instalación en campo.

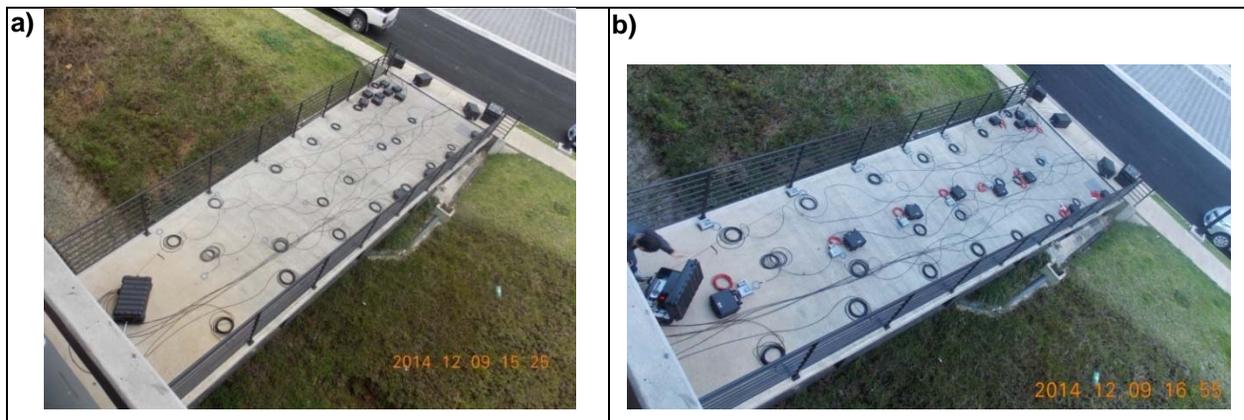
La validación en campo se inicia en ambientes más controlados dentro del campus universitario, aprovechando de un puente peatonal corto que une el nuevo edificio de parqueos de la Universidad de Costa Rica con la calle colindante. Posteriormente se lleva el equipo al puente peatonal del parque de la Paz, el cual es un puente peatonal colgante, y al final al puente sobre el río Virilla en ruta N° 32, el cual ya es un puente de mayor envergadura sujeto a un alto volumen de tránsito.

### 5.1 Validación en el puente peatonal del nuevo edificio de parqueos de UCR.

Este trabajo de validación se realizó el día 9 de diciembre del año 2014. El puente peatonal del nuevo edificio de parqueos se ubica en la finca 2 (ciudad de investigación) de la Universidad de Costa Rica. Se escogió este puente porque en aquel entonces era poco frecuentado por usuarios del parqueo, facilitando así las labores de instrumentación y prueba, además, es un puente corto y rígido que podría servir de prueba del sistema ante puentes de este tipo. En la **Figura 53** se muestra el esquema de instrumentación del puente, y en la **Figura 54** se presentan algunas fotografías de la misma. Se instaló un total de 21 acelerómetros uniaxiales sobre el puente midiendo en el sentido de la gravedad. La instalación de los acelerómetros en el puente y el cableado a los cRIO's se inició alrededor de las 2:00 p.m. con una duración de aproximadamente una hora teniendo a 3 personas trabajando en el sitio.



**Figura 53.** Esquema de instrumentación en el puente peatonal de edificio de parqueos UCR

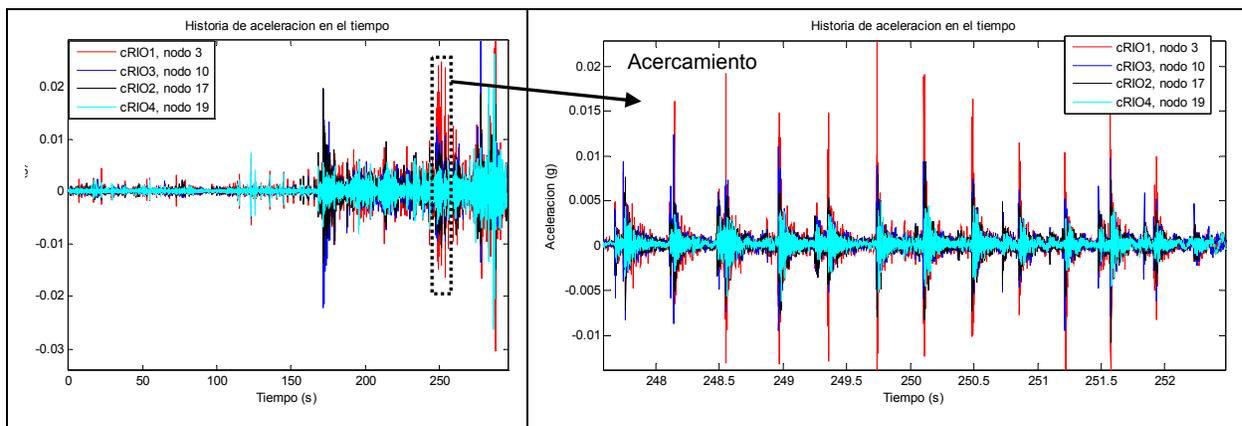


**Figura 54.** Fotografías de la instrumentación del puente peatonal corto: a) sin caja de protección, b) con caja de protección.

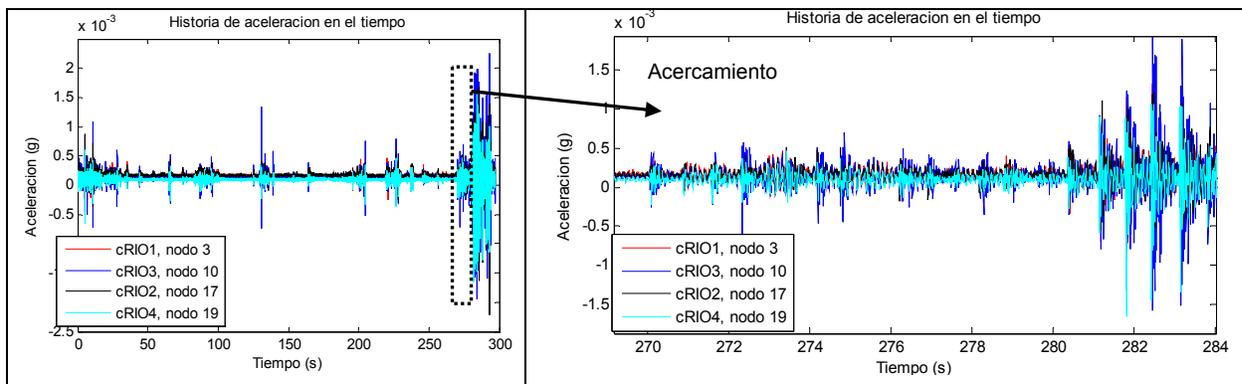
Se tomaron los datos de vibración durante un hora, almacenando en la llave U盘 de cada CRIO 12 bloques de 5 minutos de datos. Debido a la rigidez del puente, se hizo necesario la carga dinámica de peatones para excitar la vibración del puente. Uno de los bloques de las señales captadas es mostrado de manera de ejemplo en la **Figura 55**. Las señales de baja amplitud corresponden a las aceleraciones inducidas por el tránsito peatonal normal, mientras que las de mayor amplitud son inducidas por los impactos causados por los saltos que se dieron sobre el puente, a simple vista se puede ver que los impactos fueron



registrados de manera sincronizada entre los cRIO's. Estos dos tipos de cargas se repitieron tanto para el caso de acelerómetros adheridos directamente sobre el puente con plasticina, como se muestra en la **Figura 54 a)**, así como para los acelerómetros instalados dentro de las cajas de protección, para evaluar si existe alguna diferencia entre los parámetros modales identificados en ambos casos. La **Figura 56** muestra las señales captadas por acelerómetros dentro de la caja de protección, para amplitudes pequeñas de aceleración y grandes debido a los impactos causados por los saltos.



**Figura 55.** Comparación de la señal captada entre diferentes controladores cRIO, con acelerómetros directamente adheridos a la superficie.



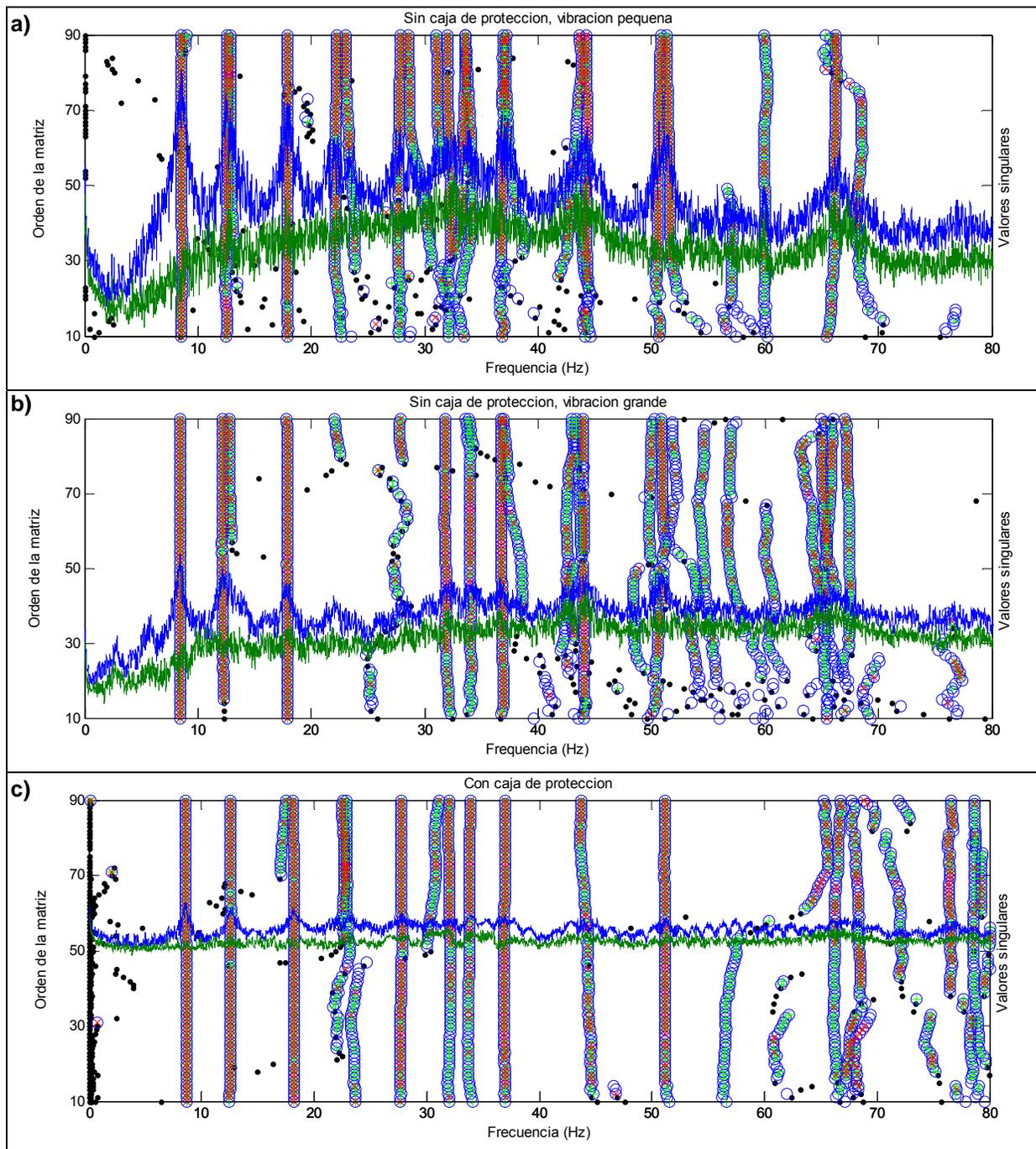
**Figura 56.** Comparación de la señal captada entre diferentes controladores cRIO, con acelerómetros dentro de la caja de protección.



Las señales de vibración fueron decimadas a 165.2 Hz, con las que se identificaron las propiedades dinámicas del puente corto con SS-COV y se presentan en la **Tabla 8**. Los diagramas de estabilización con los que se obtuvieron los modos identificados se muestran en la **Figura 57**. Se puede observar que no todos los modos se pueden identificar simultáneamente en el mismo bloque de datos, pues, esto depende del tipo de excitación que está recibiendo el puente. Generalmente la mayoría de los modos aparecen cuando el puente está sujeto a vibraciones pequeñas y excitaciones distribuidas aleatoriamente en el tiempo y en el espacio, y este es el caso cuando el puente está sujeto a cargas por paso peatonal; pero por el contrario, para el caso de vibraciones grandes inducidas por cargas impulsivas, el puente tiende a responder con los modos fundamentales debido a que los saltos se dan en frecuencias bajas comparado con las frecuencias naturales del puente, de forma que algunos modos superiores dejan de actuar como el segundo y el tercer modo de flexión. Las frecuencias modales identificadas son levemente menores para vibraciones grandes, comparando con las obtenidas en vibraciones pequeñas debido a los efectos de no-linealidad de la estructura (no-linealidad material, apertura de los micro-fisuramientos, movimientos en los interfases y apoyos, etc). Por otro lado, se logró comprobar otra vez la validez de medir las vibraciones a través de las cajas de protección, dado que no hay diferencia significativa en los parámetros dinámicos obtenidos con o sin caja de protección.

**Tabla 8.** Resultados de identificación de las propiedades dinámicas del puente corto

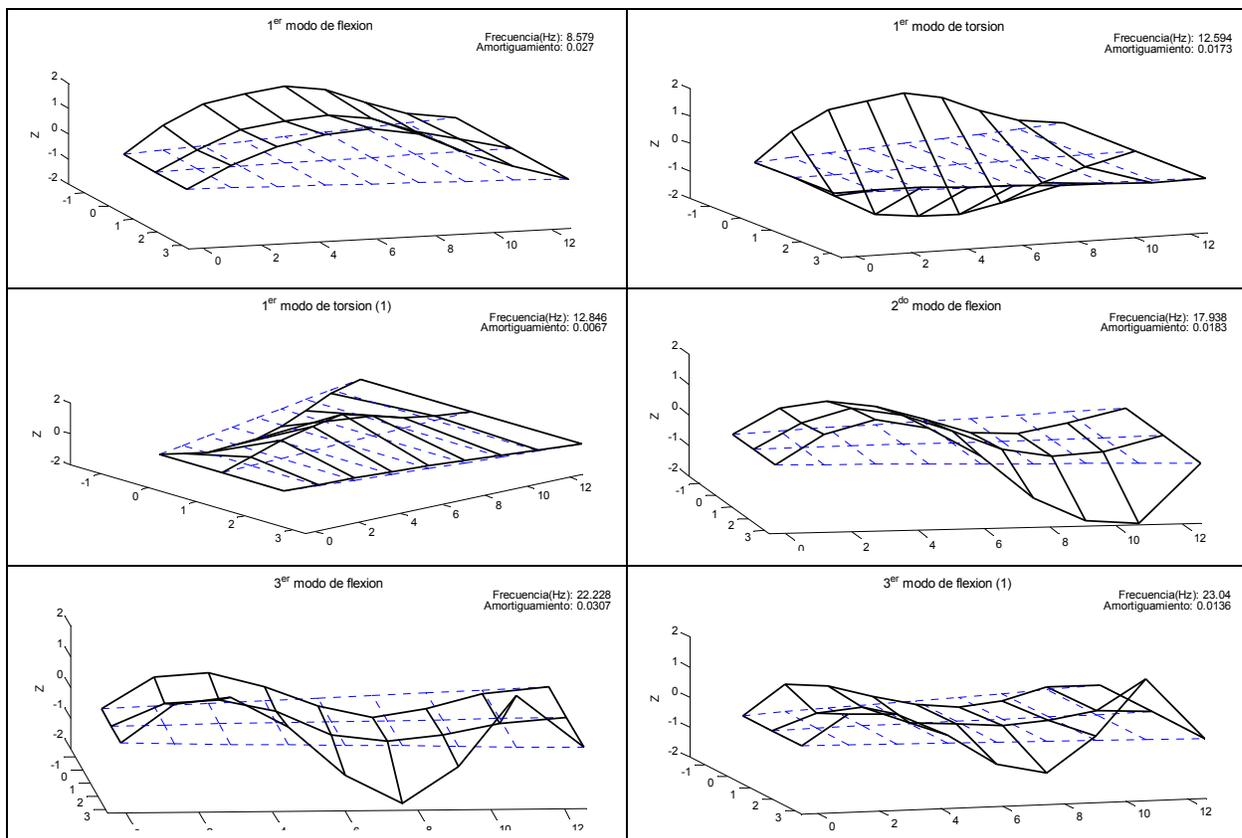
Frecuencias								
Modo	1er flexión	1er torsión	1er torsión (1)	2do flexión	2do flexión (1)	3er flexión	3er flexión (1)	3er flexión (2)
Vib. pequeña	8.5792	12.5937	12.8459	17.9380	--	22.2283	23.0397	27.9113
Vib. grande	8.3850	12.1835	12.7602	17.8526	--	--	--	--
Caja protección	8.6286	12.5835	--	17.5232	18.0924	22.5361	22.8308	27.7672
Amortiguamiento								
Vib. pequeña	0.027071	0.017344	0.006699	0.01829	--	0.03074	0.013586	0.012638
Vib. grande	0.021536	0.020897	0.025579	0.018337	--	--	--	--
Caja protección	0.026006	0.00645	--	0.020981	0.041341	0.013154	0.030843	0.015643



**Figura 57.** Comparación de los diagramas de estabilización para: a) vibraciones pequeñas en el puente inducidas por el paso peatonal normal, sin caja de protección, b) vibraciones grandes inducidos por saltos, sin caja de protección, c) vibraciones registradas con caja de protección.



Algunos ejemplos de las formas modales identificadas con los 21 nodos de medición, para vibraciones pequeñas, se muestran en la **Figura 58**. Los modos que se registraron varias veces, como el primer modo de torsión que se repitió 2 veces, o lo mismo que pasó con el segundo y el tercer modo de flexión, es un fenómeno común cuando hay presencia de cierta no-linealidad en el comportamiento, y especialmente si hay algún acoplamiento entre los modos debido a la condición particular de la estructura. En este caso, tal como se puede observar en la **Figura 54**, el apoyo derecho del puente en vez de ser un apoyo puntual, como se acostumbraba ver teóricamente para vigas simplemente apoyadas, la viga está en contacto con una larga franja de concreto, esto se refleja en las formas modales identificadas y provoca acoplamiento entre los modos y de cierta forma, “distorsión” en las formas modales.



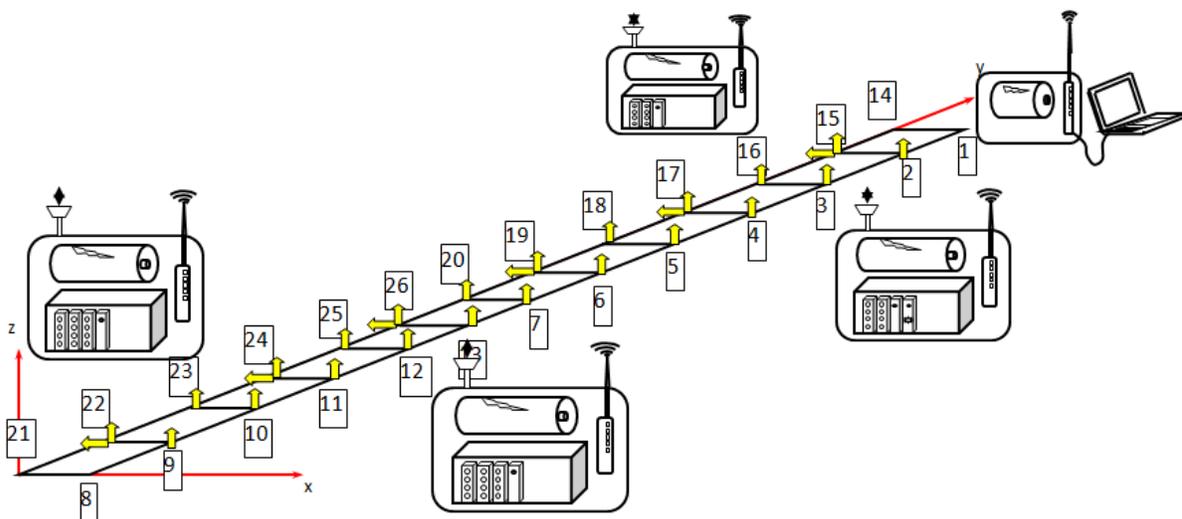
**Figura 58.** Las formas modales identificadas para el puente peatonal corto.



## 5.2 Validación en el puente peatonal de parque de la Paz.

La segunda validación en campo se realizó en el puente peatonal del parque de la Paz, ubicado en el cantón central de la provincia de San José, sobre el anillo de la circunvalación o ruta No. 39, el cual es un puente colgante relativamente flexible y excitado por tránsito humano. Los dos primeros puentes escogidos para la validación de campo fueron puentes peatonales considerando la seguridad durante la ejecución de la prueba dado que es necesario algunas “pruebas de práctica” para familiarizarse con el manejo e instalación del equipo en campo.

La prueba se realizó el día 11 de diciembre del año 2014. La instalación de los sensores inició aproximadamente en el mediodía a las 12:30 p.m., y se demoró aproximadamente una hora y media con el trabajo de dos personas. Se instalaron 22 acelerómetros uniaxiales en la dirección de la gravedad y 6 en dirección transversal sobre la losa del puente, los cuales junto con la ubicación de los cRIOS y la numeración de nodos se visualizan esquemáticamente en la **Figura 59**. Algunas fotografías de la instrumentación se pueden apreciar en la **Figura 60**.



**Figura 59.** Esquema de instrumentación del puente peatonal de parque de la Paz.



**Figura 60.** Fotografías de la instrumentación del puente peatonal de parque de la Paz: a) cableado y conexión de acelerómetros, b) finalizado el cableado y conexión de acelerómetros con cRIO's, c) ubicación de los cRIO's en los accesos al puente peatonal, d) un acercamiento a la caja de protección de acelerómetros.

Se tomaron 6 bloques de datos de 5 minutos, para un total de 30 minutos de vibraciones ambientales del puente. Un ejemplo de comparación entre las señales recolectadas por diferentes sensores se muestra en la Figura 61. Las señales de vibración fueron decimadas



a 165.2 Hz, igual que las pruebas anteriores para que el método SSI-COV en el dominio del tiempo pudiera tener mayor facilidad para identificar a las frecuencias bajas de la señal. El diagrama de estabilización que se obtuvo de un bloque de datos se muestra en la Figura 62.

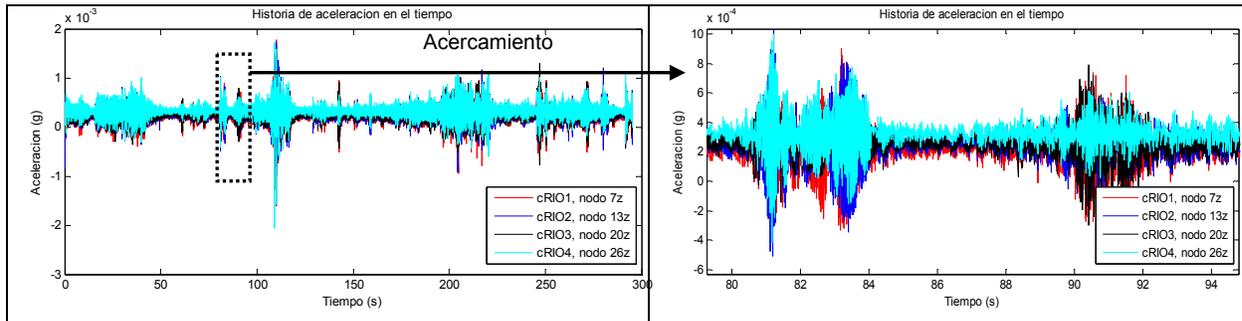


Figura 61. Señales de vibración captadas del puente peatonal.

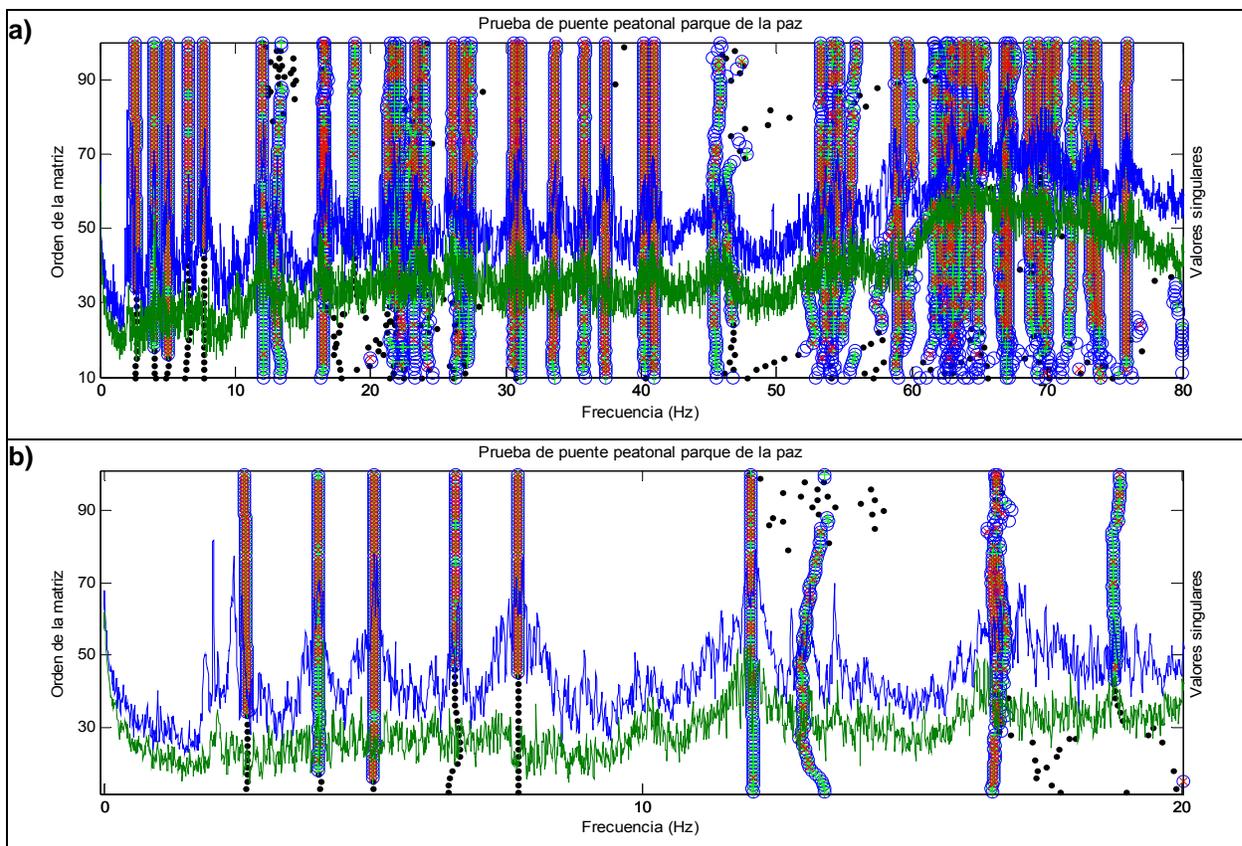
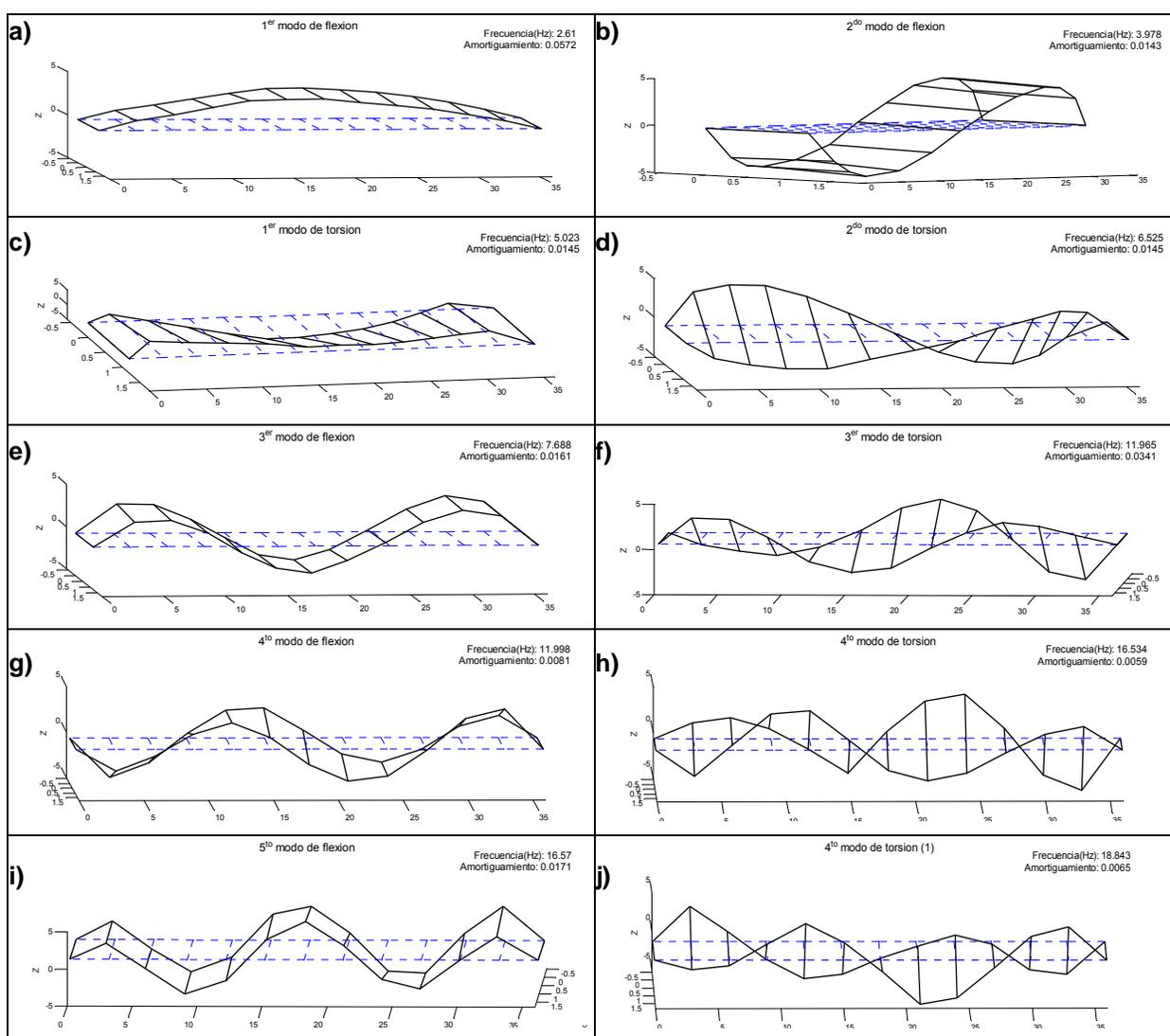


Figura 62. Diagrama de estabilización, a) 0 a 80 Hz, b) acercamiento a 0 a 20 Hz.

Se obtuvieron diagramas muy estables para los modos identificados por SSI-COV, indicando que hay buena calidad en los parámetros identificados. Estos últimos se resumen en la **Tabla 9**, y en la **Figura 63** se muestran las formas modales correspondientes,

**Tabla 9.** Resultados de identificación modal del puente peatonal de parque de la paz

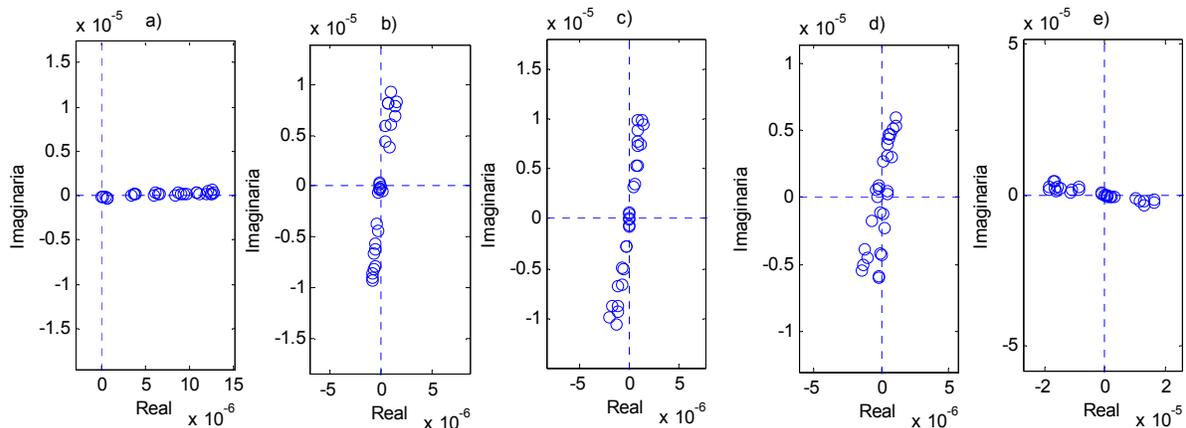
Modo	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Frecuencia	2.6101	3.9777	5.0233	6.5248	7.6878	11.9648	11.9983	16.5340	16.5696	18.8428
Amortiguamiento	0.0572	0.0143	0.0145	0.0145	0.0161	0.0341	0.0081	0.0059	0.0172	0.0065



**Figura 63.** Formas modales de los modos identificados en el rango de frecuencias bajas.



Se ilustran en la **Figura 64** los diagramas de Argand para los primeros cinco modos, de manera de ejemplo, donde se puede observar que los polos de la forma modal compleja están bien alineados, sea en fase o completamente fuera de fase a  $180^\circ$ , tal como lo predice la teoría de dinámica de estructuras para sistemas de múltiples grados de libertad con amortiguamiento proporcional.



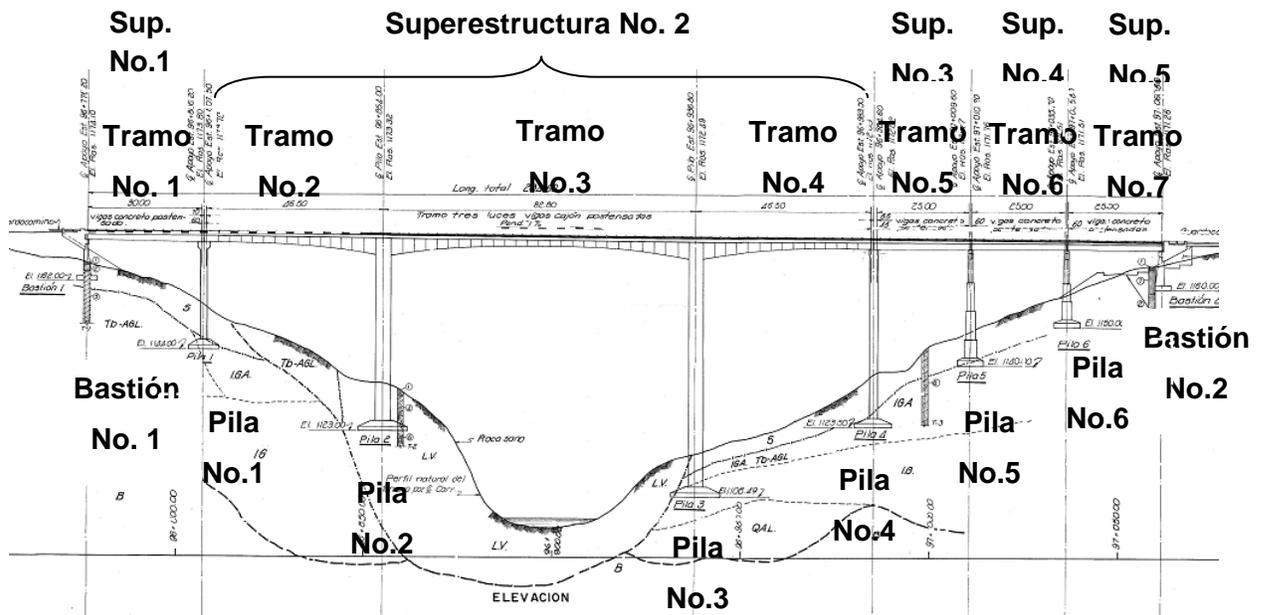
**Figura 64.** Diagrama de Argand para los primeros cinco modos identificados.

Con estas dos pruebas realizadas en puentes peatonales, se valida el presente sistema portátil para el MSEBV de puentes, junto a la implementación del método SSI-COV para el análisis modal operacional de las estructuras, resultados satisfactorios fueron obtenidos. A continuación el sistema será aplicado y validado en el puente sobre el río Virilla, en ruta N° 32, el cual se trata de un puente de mayor envergadura y sujeto a un alto volumen de tránsito.



### 5.3 Validación en el puente sobre el río Virilla, Ruta N° 32.

El puente se ubica en la Ruta Nacional No.32 y cruza el Río Virilla. Desde el punto de vista administrativo, se ubica en el distrito de San Juan, del cantón de Tibás, en la provincia de San José. La **Figura 65** muestra la vista en elevación del puente con la respectiva identificación para referirse a sus elementos. La superestructura 2 es la estructura instrumentada con el presente sistema de monitoreo, la cual es conocida como “viga cajón en doble voladizo” y constituye la estructura principal del puente.



**Figura 65.** Vista en elevación y la identificación de los elementos del puente.

La instrumentación se realizó en dos fechas, el día 7 de enero y 12 de febrero del año 2015. Debido a la longitud del puente y a la longitud limitada de los cables, se realizó tres configuraciones para la toma de datos tal como se discutió en la sección 3.2, las cuales se mostraron en la **Figura 20**. Se obtuvieron registros de aceleración inducida por las cargas operacionales del puente en direcciones vertical y transversal del puente. En la **Figura 66** se presenta la colocación de sensores en las aceras del puente.



Figura 66. La instalación de los acelerómetros y equipos en las aceras. Nótese que el monitoreo no interrumpe el tránsito de vehículos.

En las Figuras 68, 69 y 70 se muestra un bloque de registros de aceleración recolectados en el tramo 3 por un periodo de 5 minutos, por sensores ubicados en costado Oeste, Este, y los que registran en sentido horizontal respectivamente. Los datos han sido decimados a una tasa de muestreo de 41.3223 Hz porque interesa únicamente aquellos componentes de frecuencias bajas de donde se pueden extraer la información modal del puente. Los datos del Nodo 43 fueron descartados por presencia de ruido indeseado en la señal. La definición de nodos se presenta en la Figura 67.

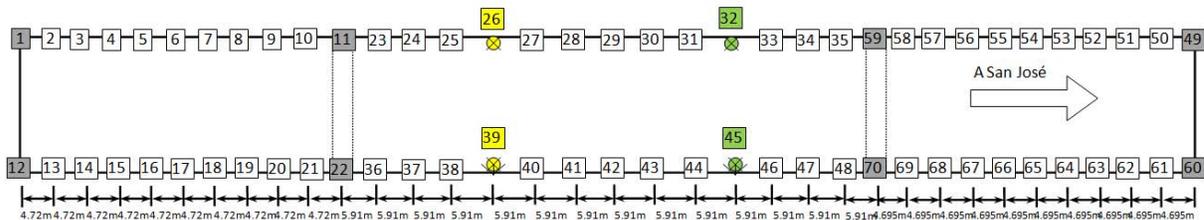


Figura 67. Definición de nodos.

Los diagramas de estabilización obtenidos así como las formas modales identificadas al unir las tres configuraciones mediante sensores de referencia en los nodos 26, 32, 29 y 45, se muestran en las Figuras 71, 72, 73 y 74. La Tabla 10 resume las frecuencias modales identificadas después de procesar todos los datos recolectados.



Historia de aceleración en el tiempo (Mediciones verticales costado Oeste)

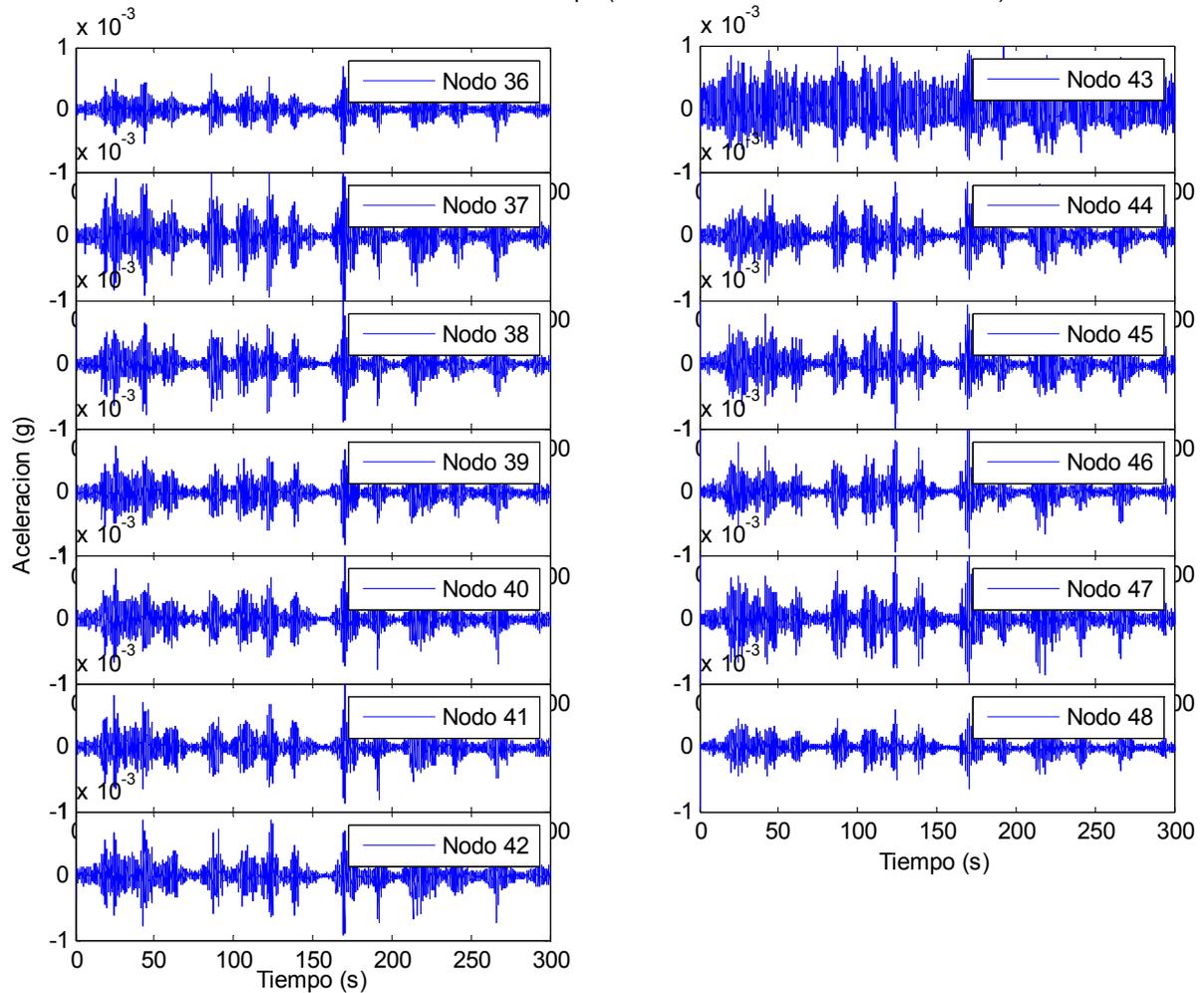


Figura 68. Aceleraciones verticales registradas del costado Oeste, tramo No. 3.



Historia de aceleracion en el tiempo (Mediciones verticales costado Este)

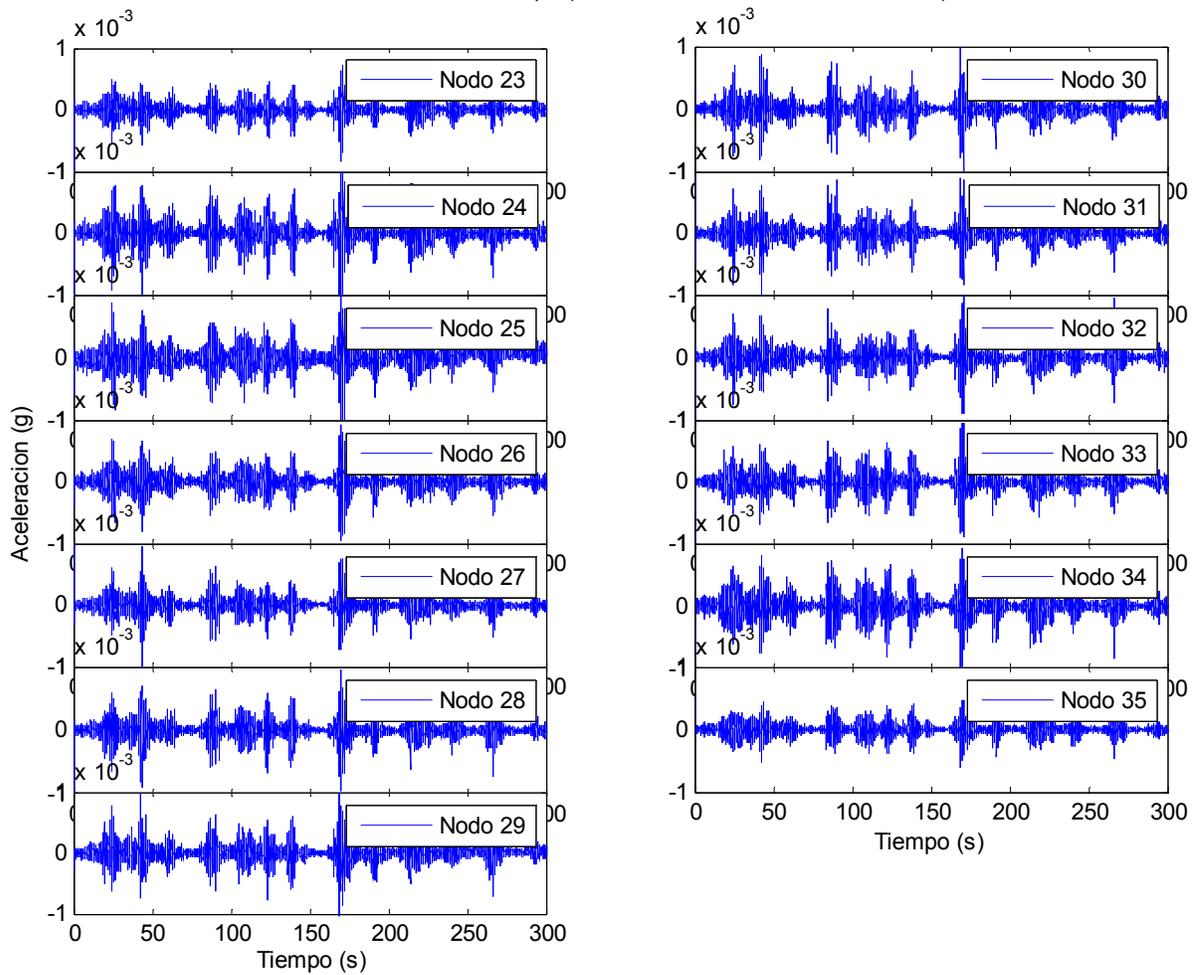
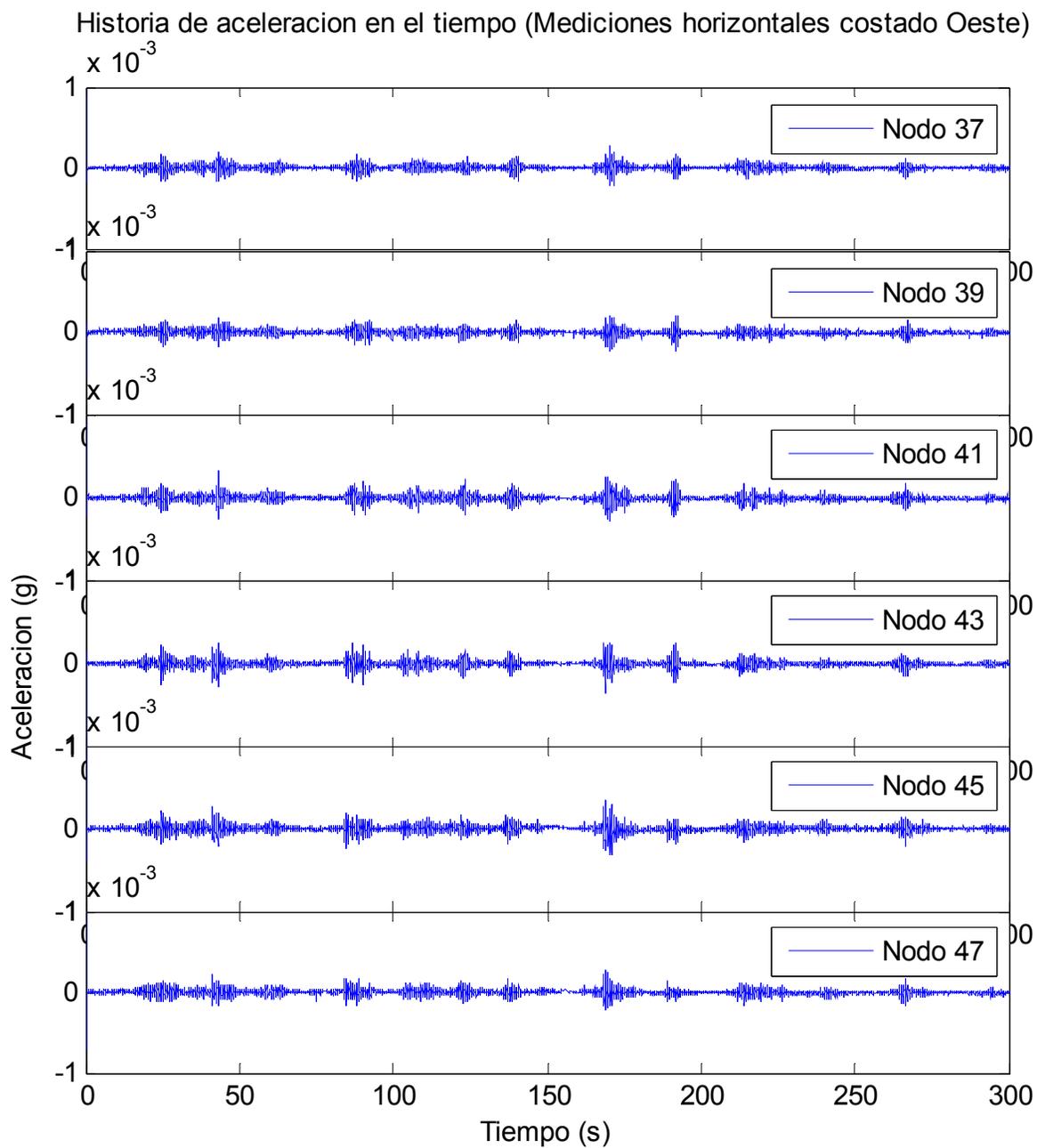


Figura 69. Aceleraciones verticales registradas del costado Este, tramo No. 3.



**Figura 70.** Aceleraciones horizontales registradas del costado Oeste, tramo No. 3.

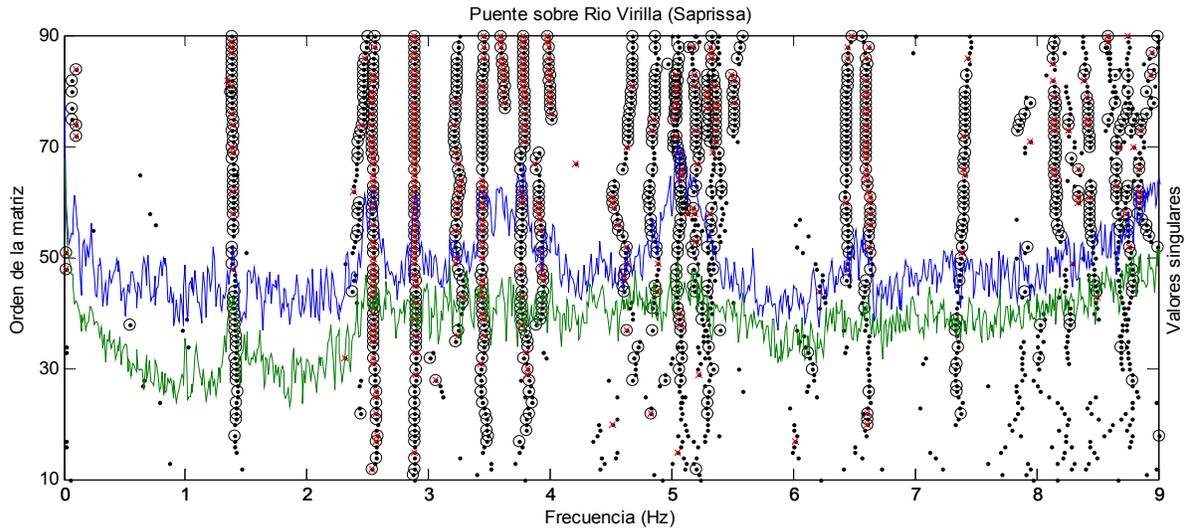


Figura 71. Diagrama de estabilización para mediciones de tramo No. 3.

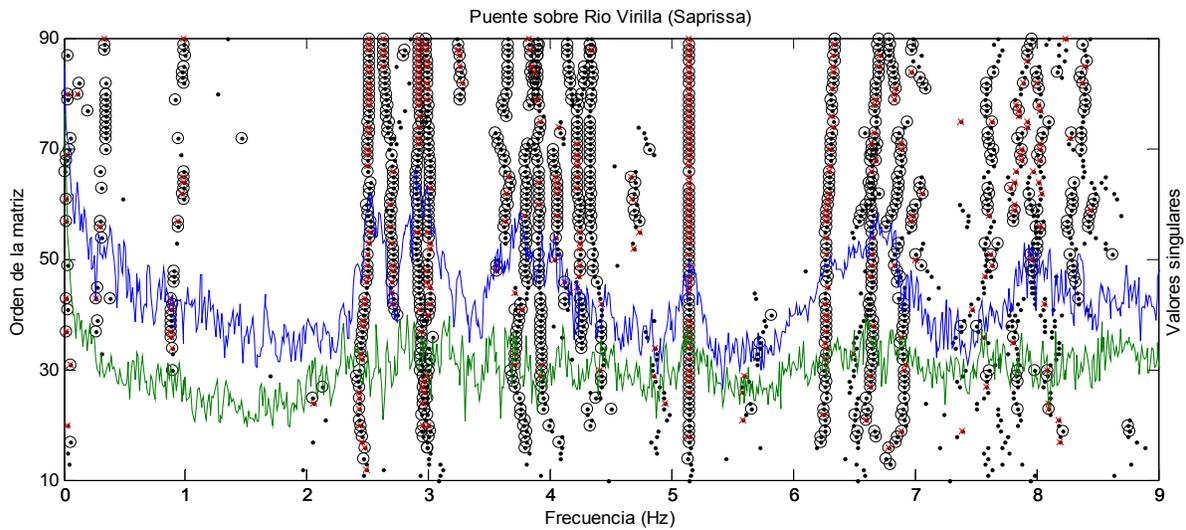


Figura 72. Diagrama de estabilización para mediciones de tramo No. 2.

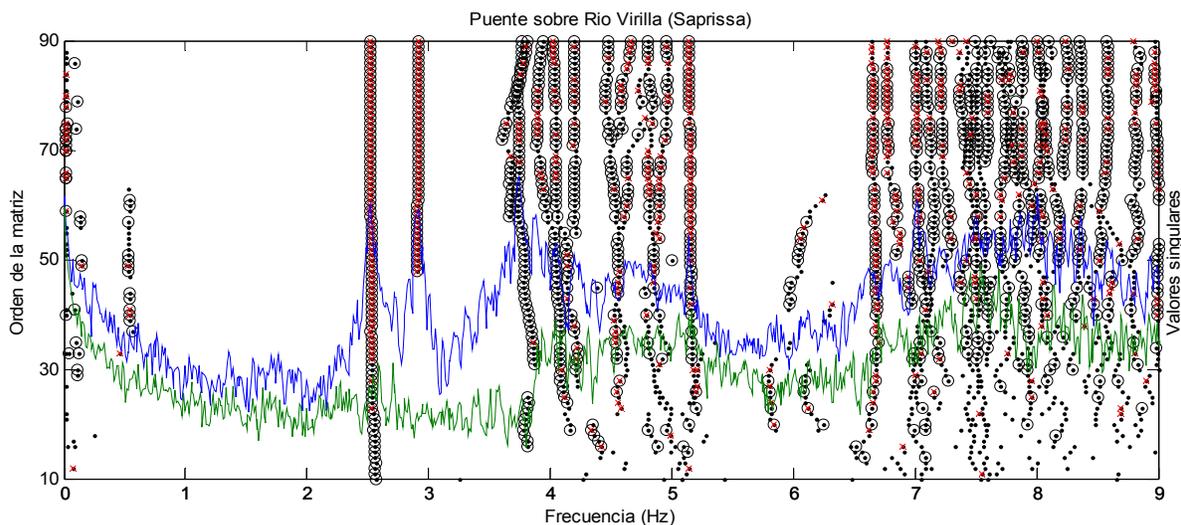


Figura 73. Diagrama de estabilización para mediciones de tramo No. 4.

Tabla 10. Resumen de las formas modales operacionales identificadas.

MODO	Frecuencia (Hz)			Cantidad de datos
	Mínimo (Hz)	Promedio (Hz)	Máximo (Hz)	
1er flexión vertical	1.370	<b>1.372</b>	1.375	2
2do flexión vertical	2.375	<b>2.509</b>	2.620	17
3er flexión vertical	2.877	<b>2.936</b>	3.075	18
4to flexión vertical	3.409	<b>3.446</b>	3.486	5
5to flexión vertical	3.582	<b>3.744</b>	3.903	24
6to flexión vertical	3.942	<b>4.072</b>	4.280	17
1er torsión tramo No. 3	4.863	<b>5.084</b>	5.178	19
1er torsión tramo No. 2	5.611	<b>5.719</b>	5.917	6
3er flexión vertical tramo No. 3 y 1er torsión tramo No. 2	6.238	<b>6.531</b>	6.794	18
1er torsión tramos No. 2 y 4	7.004	<b>7.027</b>	7.072	3
2do flexión vertical tramo No. 2	8.598	<b>8.663</b>	8.699	3
2do flexión vertical tramo No. 2 y 4	8.771	<b>8.786</b>	8.794	3

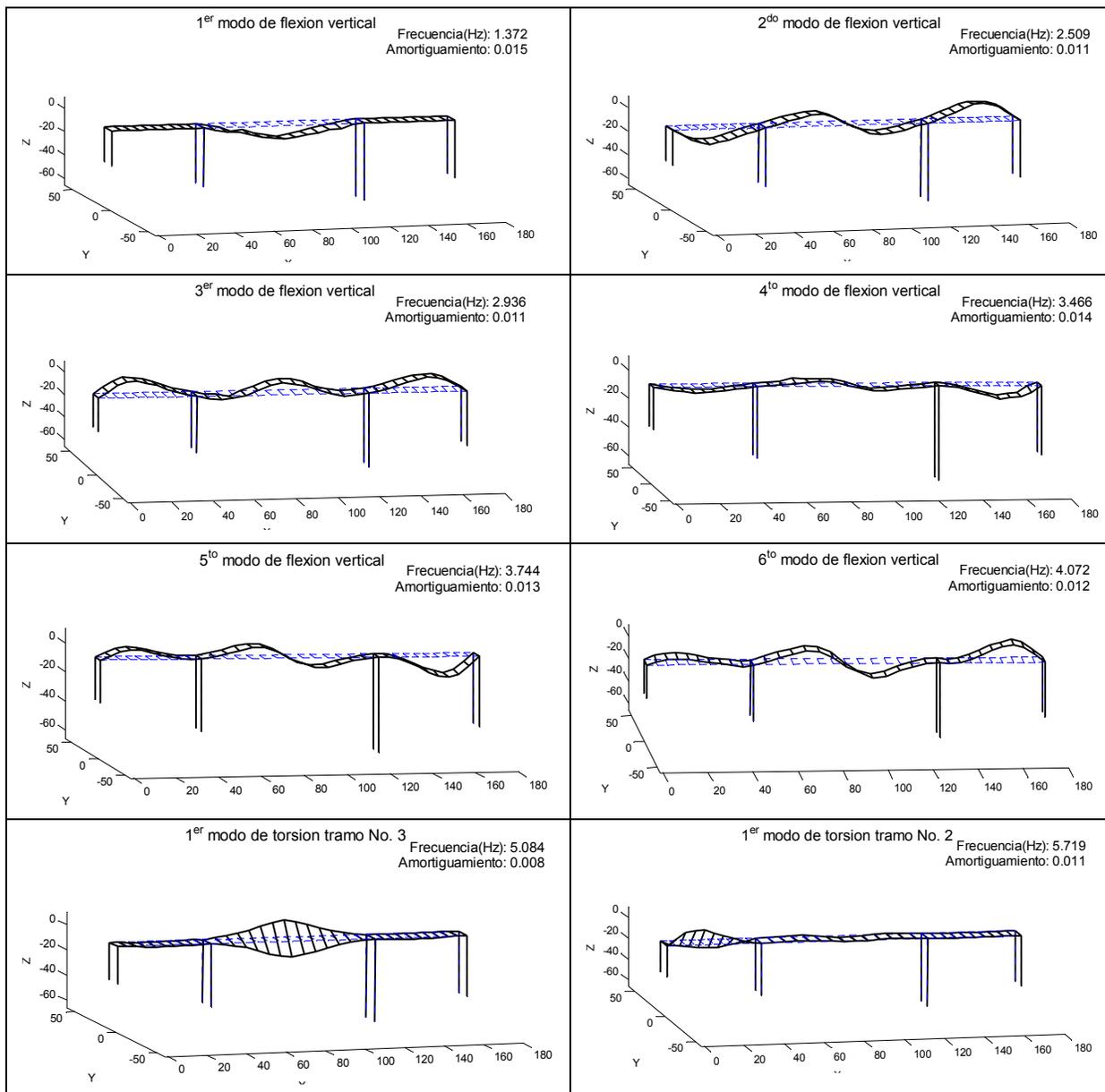
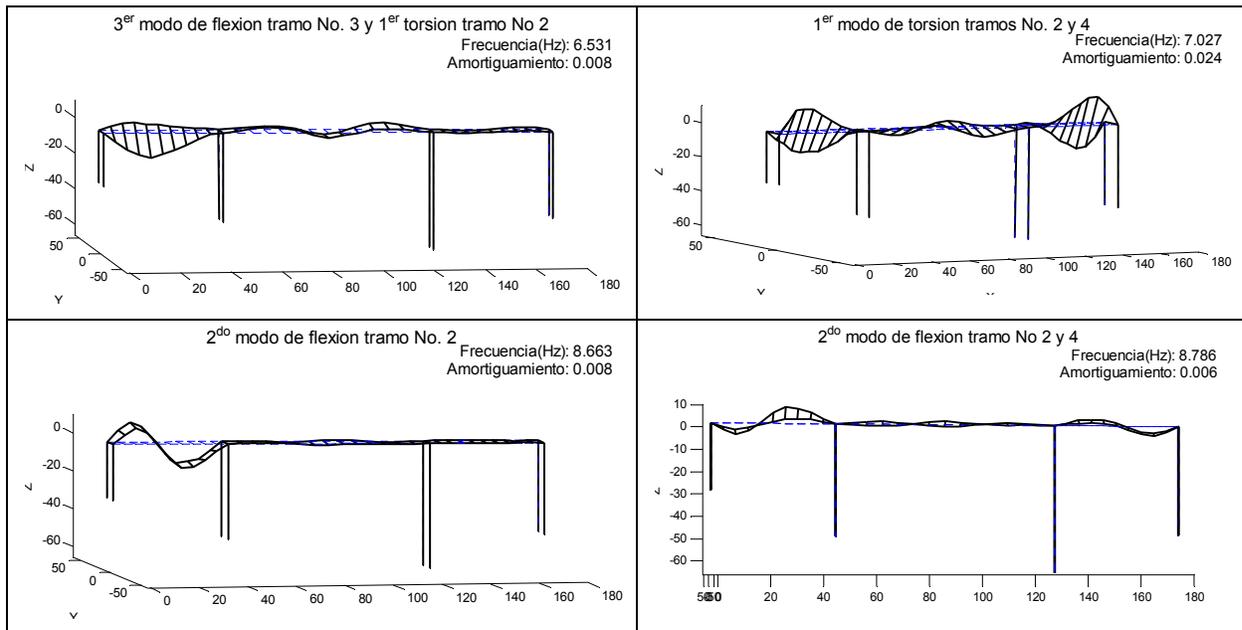


Figura 74. Formas modales experimentales identificados.



**Figura 74 (continuación).** Formas modales experimentales identificados.

En este apartado sólo se presenta en forma resumida los resultados obtenidos de esta prueba de validación, o mejor dicho, aplicación del sistema portátil de monitoreo a este puente de mayor envergadura, los cuales sirvieron de base para hacer una evaluación del estado de “salud” de la estructura en estudio, donde los cuatro niveles teóricos para el monitoreo de salud estructural y detección de daño expuestos por Rytter (1993) [ref. 3]:

- 1) determinación de la existencia de daño,
- 2) ubicación del daño,
- 3) cuantificación del daño, y
- 4) estimación de la capacidad/vida útil remanente de la estructura,

fueron implementados partiendo de los datos obtenidos por el sistema portátil propuesto. El alcance y el contenido total de este trabajo se encuentran detallados en el informe LM-PI-UP-PN12-2015 titulado “Monitoreo Estructural del Puente sobre Río Virilla, Ruta Nacional No. 32” [ref. 69].



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó en este informe un estudio exhaustivo de los tipos y métodos para realizar el monitoreo de puentes. Después de comparar las características, alcances y limitaciones, ventajas y desventajas, así como los costos de cada sistema, se concluye que el sistema cableado, especialmente el de fibra óptica, es el más apto para el monitoreo permanente de puentes dada su estabilidad a largo plazo, pero tiene que ser en puentes nuevos o puentes en proceso de rehabilitación porque su instalación requiere de la existencia de obras temporales. Mientras que el sistema inalámbrico es recomendado, dada su buen portabilidad, para las evaluaciones rápidas de puentes, las que en nuestro país es una necesidad urgente. Este último combinado con el método de detección remota basado en procesamiento de imágenes digitales, el cual ya fue desarrollado apropiadamente y presentado en el informe LP-PI-UP-06-2015 [ref. 70], jugarán papeles primordiales para la ejecución de pruebas de carga estáticas o dinámicas, o para la obtención de cualquier otra información experimental relacionada con la materia de puentes en Costa Rica.

Se desarrolló con éxito un sistema portátil híbrido (cableado/inalámbrico) de instrumentación y monitoreo para puentes de Costa Rica, contando con las ventajas de ambos tipos sistemas. El sistema consta de 4 controladores que se conectan con el sensor de forma cableada pero que operan cada uno de forma autónoma en la recolección de datos, pero la interacción con el usuario se da en forma inalámbrica.

Se logró la sincronización de datos entre los controladores autónomos mediante GPS, y se validó realizando pruebas de laboratorio mediante la vibración libre de una estructura metálica de tres pisos.

Se desarrollaron y se validaron las cajas de protección para los acelerómetros contra la intemperie e infiltración de agua, con el espacio para la instalación de dos acelerómetros uniaxiales, convirtiéndose en una unidad de medición biaxial. Las cajas de protección con el acelerómetro pueden colocarse simple y directamente sobre las aceras de los puentes sin ningún otro adhesivo y sin perder la autenticidad de la señal recolectada.



La robustez, estabilidad y calidad de los datos recolectados fueron verificadas con pruebas en dos puentes peatonales así como mediante la implementación del método de identificación de sistemas, de forma que la aplicabilidad del presente sistema híbrido en el monitoreo basado en vibraciones en puentes fue validado exitosamente.

El sistema fue implementado exitosamente en la evaluación del puente sobre río Virilla, en la ruta nacional N° 32, donde se pudo unir y empatar los parámetros modales obtenidos en tres configuraciones y mediciones de tres tiempos distintos. Además, a partir del análisis modal realizado se logró determinar el daño del puente señalando sus ubicaciones, su cuantificación y dar una estimación de la capacidad remanente debido al daño.

Se recomienda cambiar el color negro de las maletas a color blanco, y aún mejor si se pudiera utilizar una pintura reflectiva para evitar la absorción del calor, esto considerando que en nuestro clima tropical la temperatura sobre la calzada del puente puede alcanzar, inclusive, a más de 50° Celsius, el cual es bastante dañino para equipos electrónicos. La misma recomendación se aplica para las cajas de protección de acelerómetros para evitar el sobrecalentamiento y posibilidad al daño debido a altas temperaturas por la exposición directa bajo del sol.

## REFERENCIAS

- [1] Doebling et al. "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), 1996.
- [2] Sohn, H., C. R. Farrar, et al. "A Review of Structural Health Monitoring Literature form 1996-2001". LA-13976-MS. Los Alamos National Laboratory, 2004.
- [3] Rytter, A. "Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures". P h. D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993.
- [4] K.Y. Wong. "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.
- [5] Peeters, Bart. "System Identification and Damage Detection in Civil Engineering". Ph.D. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven, December 2000.
- [6] 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.
- [7] 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.



- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Daniele Inaudi. "Fiber Optic Sensor Network for the Monitoring of Civil Engineering Structures". Tesis doctoral. Lausanne, EPFL, 1997.
- [11] C. Y., Wu. "Sensing Techniques for Bridge Monitoring". Master Thesis. National Central University, Taiwan, 2002.
- [12] Wang et al.. "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.
- [13] Inaudi D., S. Vurpillot, N. Casanova, P. Kronenberg."Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors". Smart Materials and Structures, Vol 7, 1998, p.199-208.
- [14] Daniele Inaudi, Nicoletta Casanova, Samuel Vurpillot. "Bridge Deformation Monitoring with Fiber Optic Sensors". IABSE Symposium - Rio de Janeiro - August 25-27, 1999.
- [15] Olivier Burdet, Marc Badoux. "Deflection Monitoring of Prestressed Concrete Bridges Retrofitted by External Post-Tensioning". IABSE Symposium - Rio de Janeiro - August 25-27, 1999.
- [16] Daniele Inaudi. "Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects". SMARTEC SA, Switzerland, Roctest Ltd, Canada, IBC 09-45, 2010.
- [17] Samuel Vurpillot, Nicoletta Casanova, Daniele Inaudi, Pascal Kronenberg. "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.

[18] Wonseok Chung, Sungil Kim, Nam-Sik Kim, 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.

[19] Samuel Vurpillot, Daniele Inaudi, Antonio Scano. "Mathematical model for the determination of the vertical displacement from internal horizontal measurements of a bridge". SPIE Smart Structures and Materials, 1996, San Diego, USA.

[20] Majumder et al. "Fiber Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications". Sensors and Actuators A 147 (2008) 150–164.

[21] 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.

[22] 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.

[23] Schulz et al. "Static and dynamic testing of bridges and highways using long-gauge fiber Bragg grating based strain sensors". Proc. SPIE 4202, Industrial Sensing Systems, 79 (December 29, 2000).

[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.

[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.
- [28] Zhou et al. "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.
- [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.
- [31] Matta et al. "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, (2008) 264–273.
- [32] Glišić et al. "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] Jiang Jianjing, Lu Xinzheng, 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] Hsu et al. "Evaluation of the Dynamic Characteristics of an Extradosed Bridge Using Microwave Interferometer". *Advanced Materials Research*, (2011), 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-Shieng Wang. "A Remote Laser Displacement Measurement System by the Time Interval Transform Technique". *Master thesis, National Central University, Taiwan*, 2010.



- [37] Wang et al. "Application of Position Sensitive Director (PSD) Technology on Structural Health Diagnosis of Highway Bridges". The 22th KKCNN Symposium on Civil Engineering, 31 October - 2 November, 2009, Thailand.
- [38] Zhang et al. "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.
- [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.
- [46] Santini et al. "Digital Imaging for Bridge Deflection Measurement of a Steel Girder 1 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.
- [49] 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.
- [50] Wei-Xin Ren and Zhou-Hong Zong. "Output-only modal parameter identification of civil engineering structures". Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, No. 3-4 (2004).
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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
- [54] Brad A. Pridham & John C. Wilson. "Subspace Identificación of Vincent Thomas Suspension Bridge". IMAC-XX: A Conference on Structural Dynamics, 2002
- [55] 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.
- [56] Zhou et al. "Rapid Impact Testing for Quantitative Assessment of Large Populations of Bridges", Proc. of SPIE Vol. 7983 798322-1, 2011, San Diego. (7983-69)



[57] Loh, Chin-Hsiung. "Smart Structural Systems and Materials". Course Lecture, Civil Engineering Department, National Taiwan University, 2011.

[58] Dhakal et al. "Different Techniques of Structural Health Monitoring". International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD). ISSN 2249-6866. Vol. 3, Issue 2, Jun, (2013) 55-66.

[59] Kiremidjian, A. S. "Structural Health Monitoring for Civil Infrastructure - From Instrumentation to Decision Support". Structural Health Monitoring 2011: Condition-Based Maintenance and Intelligent Structures, Vol. 1 and Vol. 2, (2011): 27-38.

[60] Sukun Kim. "Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring". Master of Science in Computer Science Research Project Report. University of California at Berkeley (2005).

[61] Liu, Y.C.; Loh, C.H.; Ni, Y.Q. "Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower under abnormal loading condition". Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 42:477-498. Wiley Online Library. June, 2012.

[62] Loh, C.H.; Liu, Y.C.; Ni, Y.Q. "SSA-based stochastic subspace identification of structures from output-only vibration measurements". Smart Structures and Systems, Vol. 10, No. 4-5 (2012) 331-351.

[63] Loh, C.H.; Liu, Y.C.; Wu, T.H.; Ni, Y.Q. "Variation of Modal Parameters of Canton Tower Under Different Earthquake excitations". Proceedings of the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Hong Kong, 9-11 December 2013

[64] Weng et al. "Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems". Engineering Structures 30 (2008) 1820-1830.

[65] 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).



- [66] Peeters, Bart. "System Identification and Damage Detection in Civil Engineering". Ph.D. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven, December 2000.
- [67] Brad A. Pridham & John C. Wilson. "Subspace Identificación of Vincent Thomas Suspension Bridge". IMAC-XX: A Conference on Structural Dynamics, 2002
- [68] Chopra, Anil K. "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering". Pearson Prentice Hall (2007), 3 Ed. pp. 422 - 428
- [69] Liu-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Monitoreo estructural de la superestructura No.2 del puente sobre le río Virilla Ruta Nacional No. 32 LM-PI-UP-PN12-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- [70] Liu-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema de medición de desplazamiento en tiempo real mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales LM-PI-UP-06-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.