



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Ingeniería Estructural

LM-PIE-UP-M01-2017

MONITOREO DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL BASADO EN VIBRACIONES AMBIENTALES

SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO CONCEPCIÓN RUTA NACIONAL No. 27

Preparado por:
Unidad de Puentes



San José, Costa Rica
Octubre de 2017



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Página intencionalmente dejada en blanco



| | | |
|---|---|---|
| 1. Informe: LM-PIE-UP-M01-2017 | | 2. Copia No. 1 |
| 3. Título y subtítulo: MONITOREO DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL BASADO EN VIBRACIONES AMBIENTALES SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO CONCEPCIÓN RUTA NACIONAL No. 27 | | 4. Fecha del Informe 30 de octubre de 2017 |
| 5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440 | | |
| 6. Notas complementarias Ninguna | | |
| 7. Resumen Este informe de monitoreo de la condición estructural de la superestructura del puente sobre el río Concepción, en la Ruta Nacional No. 27, es un producto del programa de monitoreo en sitio de estructuras de puentes de la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del LanammeUCR para detectar daños, y así determinar la condición estructural de los puentes bajo condiciones operacionales ubicados a lo largo de la Red Vial Nacional, en el marco de las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la ley 8114. Los parámetros modales son extraídos de las múltiples mediciones de aceleración simultáneas, mediante el método de identificación de sistemas bajo el marco de análisis modal operacional. Los resultados permiten dar seguimiento al deterioro de la superestructura en el transcurso del tiempo al compararse con un próximo monitoreo, y con un modelo estructural analítico en el caso de desear cuantificar el daño, cuyos resultados además de complementar las labores de inspección visual, constituyen un insumo valioso en la gestión de puentes y toma de decisiones. | | |
| 8. Palabras clave Puentes, Ruta Nacional No. 27, río Concepción, Monitoreo, Salud Estructural, Análisis Modal Operacional. | 9. Nivel de seguridad: Ninguno | 10. Núm. de páginas 61 |
| 11. Monitoreo e informe por: Ing. Hellen Garita Durán Unidad de Puentes | 12. Monitoreo e informe por: Ing. Pablo Agüero Barrantes Unidad de Puentes | 13. Monitoreo y revisión por: Ing. Yi Cheng Liu Kuan Unidad de Puentes |
| 14. Revisado por: Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal LanammeUCR | 15. Revisado y aprobado por: Ing. Esteban Villalobos Vega Coordinador a.i. Unidad de Puentes | 16. Aprobado por: Ing. Rolando Castillo Barahona, Ph.D. Coordinador General Programa de Ingeniería Estructural |



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Página intencionalmente dejada en blanco



TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|----|---|----|
| 1. | OBJETIVOS | 9 |
| 2. | ALCANCE DEL INFORME..... | 9 |
| 3. | DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA..... | 13 |
| 4. | ANTECEDENTES E INFORMACIÓN DISPONIBLE..... | 17 |
| 5. | DISTRIBUCIÓN DE SENSORES | 18 |
| 6. | RESULTADOS EXPERIMENTALES | 22 |
| 7. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 30 |
| 8. | REFERENCIAS | 32 |
| | APÉNDICE A. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 37 |
| | APÉNDICE B. MÉTODO EXPERIMENTAL..... | 54 |



INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación del puente sobre el río Concepción | 13 |
| Figura 2. Vista a lo largo de la línea de centro del puente sobre el río Concepción..... | 15 |
| Figura 3. Vista lateral del puente sobre el río Concepción | 15 |
| Figura 4. Identificación de los elementos del puente..... | 16 |
| Figura 5. Colocación de sensores sobre las aceras del puente. Nótese que el monitoreo no interrumpe el tránsito de vehículos..... | 19 |
| Figura 6. Distribución de sensores sobre el puente en la configuración 1 | 20 |
| Figura 7. Distribución de sensores sobre el puente en la configuración 2 | 20 |
| Figura 8. Distribución de sensores sobre el puente en la configuración 3 | 21 |
| Figura 9. Registros crudos de aceleración vertical del tercer bloque de datos de la segunda configuración de sensores. La tasa de muestreo es de 1652 Hz..... | 23 |
| Figura 10. Arriba, diagramas de estabilización y primer valor singular del método FDD de tres diferentes bloques de datos. Abajo, diagramas de Argand correspondientes al modo de flexión vertical 2. Las flechas verdes corresponden al primer modo de flexión ($f= 0,935$ Hz) y las flechas rojas al segundo modo de flexión ($f=1.543$ Hz) | 24 |
| Figura 11. Formas modales experimentales identificadas (el acceso 1 se ubica a la izquierda en los gráficos) | 27 |
| Figura 12. Cambios de curvatura en tres modos identificados (el acceso 1 se ubica a la izquierda en los gráficos, las pilas y bastiones se ubican en los puntos de amplitud nula) ... | 29 |
| | |
| Figura A.1. Esquema conceptual de un sistema dinámico..... | 42 |
| Figura A.2. Diagrama de flujo del método SSI-COV | 50 |
| | |
| Figura B.1. Diagrama de flujo del monitoreo de condición estructural basado en vibraciones | 55 |
| Figura B.2. Ejemplo de toma de datos sobre las aceras de un puente, nótese que no es necesaria la interrupción del tránsito vehicular..... | 56 |
| Figura B.3. Ejemplo de distribución de sensores y unidades de adquisición de datos en la primera configuración de un puente | 57 |

| | | |
|---------------------------------|---|----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 6 de 61 |
|---------------------------------|---|----------------|



Figura B.4. Ejemplo de distribución de sensores y unidades de adquisición de datos en la segunda configuración de un puente..... 58

Figura B.5. Ejemplo de cuatro registros de aceleración sincronizados provenientes de cuatro sensores instalados sobre una estructura sencilla en movimiento libre. Abajo a la derecha se presenta un acercamiento de un tramo de un segundo 59

Figura B.6. Ejemplo de diagrama de estabilización de frecuencias correspondiente a la estructura sencilla mostrada en la Figura B.5 60

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características básicas del puente sobre el río Concepción 14

Cuadro 2. Resumen de las formas modales operacionales identificadas 26



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Página intencionalmente dejada en blanco



1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Monitorear la condición estructural de la superestructura del puente sobre el río Concepción con base en vibraciones inducidas por cargas ambientales en su condición operacional, para determinar la existencia de posibles anomalías y su localización.

1.2. Objetivos Específicos

- a) Instrumentar la superestructura del puente con una malla de acelerómetros y registrar las vibraciones ambientales de la estructura inducidas principalmente por el tránsito vehicular.
- b) Procesar y analizar los datos obtenidos en el campo y caracterizar el comportamiento dinámico de la superestructura, con base en los parámetros modales operacionales extraídos, utilizando el método de identificación de sistemas.
- c) Determinar la existencia o no de posibles anomalías y su localización en la superestructura, con base en el análisis de los parámetros modales.

2. ALCANCE DEL INFORME

Se recomienda la lectura del Boletín Técnico-PIE, LanammeUCR: Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes (Liu-Kuan, et. al., 2017) [\[Descargar aquí\]](#)

Este informe de monitoreo de la condición estructural de la superestructura del puente sobre el río Concepción, en la Ruta Nacional No.27, es un producto del programa de monitoreo de

| | | |
|---|--|--|
| Ver: Liu-Kuan, et. al. (2017). "Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes". Boletín Técnico PIE, LanammeUCR. | | |
|---|--|--|

| | | |
|---------------------------------|---|----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 9 de 61 |
|---------------------------------|---|----------------|



puentes en sitio de la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del LanammeUCR, para evaluar la condición estructural de puentes ubicados a lo largo de la Red Vial Nacional con base en sus vibraciones ambientales y características dinámicas, en el marco de las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la ley 8114. La toma de datos del monitoreo estructural se realizó los días 13 y 15 de febrero del 2017.

En este informe se presentan resultados de los parámetros modales experimentales, — frecuencias, amortiguamiento y formas modales—, obtenidos del análisis modal operacional de la superestructura del puente, y son indicadores a los cuales se les darán seguimiento para monitorear la evolución del estado estructural en el tiempo.

El objetivo principal del monitoreo de la condición estructural es detección de daño. Los niveles de detección de daño que incluye este informe son los niveles de detección (**nivel 1**) y localización (**nivel 2**). Por lo tanto, similar a los reportes que generan los sistemas de monitoreo, la conclusión final a la que se llega después del análisis de los parámetros modales es simple y es la respuesta a las siguientes dos preguntas:

- a. Detección: ¿existe o no daño?

- b. Localización: en caso de existir daño, ¿cuál es su ubicación?

En el caso de las pruebas de vibraciones ambientales, los registros de aceleración corresponden a vibraciones inducidas por cargas ambientales, es decir, respuestas del puente ante cargas vehiculares operacionales aleatorias y a otros efectos como el empuje del viento, impacto del flujo de agua contra las pilas o bastiones de los puentes, microvibraciones del suelo (producidas por autobuses, camiones, trenes, o actividades de construcción), entre otros.

| | | |
|---|--|--|
| Ver: Liu-Kuan, et. al. (2017). "Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes". Boletín Técnico PIE, LanammeUCR. | | |
|---|--|--|

| | | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 10 de 61 |
|---------------------------------|---|-----------------|



Se registraron aceleraciones únicamente en la dirección vertical, ya que es el sentido donde el puente oscila debido a la carga inducida por el tránsito vehicular. Se debe indicar que dicha carga no está controlada por los encargados de la prueba, como es el caso de otros tipos de prueba de carga, como por ejemplo, en una prueba de carga estática. Por ende, las excitaciones de entrada al sistema estructural son desconocidas y se asumen que son de naturaleza aleatoria en el tiempo y en el espacio.

La cantidad de parámetros modales operacionales identificados está sujeta a la aleatoriedad de las cargas ambientales y la interacción vehículo-puente. Debido a que la carga no es controlada, no siempre es posible identificar todos los modos de vibración de la estructura.

La extracción de parámetros modales se realizó con el método de identificación de sistemas denominado: Identificación Estocástica de Subespacios basado en Covarianzas (conocido como SSI-COV por sus siglas en inglés). Tales parámetros son extraídos directamente de las mediciones experimentales, y no se recurrió a otros métodos numéricos o modelos estructurales para su estimación, por lo que son representativos del comportamiento dinámico de la estructura en el momento de la medición.

No es posible, por el otro lado, monitorear la condición de la subestructura en el sentido transversal debido a que la amplitud de sus vibraciones es sumamente baja al no ser excitado directamente por el flujo vehicular, y con la sensibilidad que cuentan los acelerómetros disponibles no es posible extraer, de manera confiable, los parámetros modales de la subestructura. Sensores de velocidad para micro-vibraciones son necesarios para este propósito.

Está fuera del alcance de este informe la modelación analítica de la estructura del puente y su calibración con base en los resultados experimentales para cuantificar el daño, lo cual es el **nivel 3** de detección de daño; tampoco el **nivel 4** (predicción), debido a que ambos niveles han llegado al nivel de evaluación. Como se indicó anteriormente, el alcance de este informe

| | | |
|---|--|--|
| Ver: Liu-Kuan, et. al. (2017). "Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes". Boletín Técnico PIE, LanammeUCR. | | |
|---|--|--|

| |
|---------------------------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 |
|---------------------------------|

| |
|---|
| Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 |
|---|

| |
|-----------------|
| Página 11 de 61 |
|-----------------|



son el **nivel 1** y **nivel 2** en la identificación de daños en infraestructura civil: detección y localización del daño.

Se debe recordar que para efectos de la modelación analítica y calibración de los modelos estructurales de los puentes, cada estructura de puente es única, por lo que debe construirse un modelo analítico para cada puente en específico, que sirva de referencia de comparación, calibración, y cuantificación del daño en caso de haberlo detectado, y por lo tanto, es un requisito indispensable contar con los planos constructivos detallados de la estructura.

En el Anexo A se presenta el marco teórico del método utilizado, incluyendo los conceptos de monitoreo basado en vibraciones, identificación de sistemas, análisis modal operacional y el método de identificación de sistemas estocásticos.

En el Anexo B se describe el método experimental utilizado, por ejemplo: la distribución de equipos, definición de nodos para tomar datos de aceleración, sincronización de las unidades de adquisición de datos y el procesamiento de los datos de aceleración obtenidos en campo.

| | | |
|---|--|--|
| Ver: Liu-Kuan, et. al. (2017). "Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes". Boletín Técnico PIE, LanammeUCR. | | |
|---|--|--|

| | | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 12 de 61 |
|---------------------------------|---|-----------------|



3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El puente se ubica en la Ruta Nacional No.27, en la sección de control 21890 y cruza el río Concepción. Desde el punto de vista administrativo, se ubica en el distrito de Atenas, cantón de Atenas y provincia de Alajuela. Sus coordenadas, en el sistema geográfico de ubicación, corresponden con: 9°55'30.67"N de latitud y 84°27'42.78"O de longitud. La Figura 1 muestra la ubicación geográfica del puente.

La ruta clasifica como primaria y tiene un tránsito promedio diario de 16 457 vehículos por día (medidos en el año 2012) en la sección de control donde se ubica el puente, según el Anuario de tránsito 2015, publicado por la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT. Se debe indicar que el porcentaje de vehículos pesados es de 9% (1481 vehículos), de los cuales el 4% (695 vehículos) corresponde a camiones de 5 ejes.

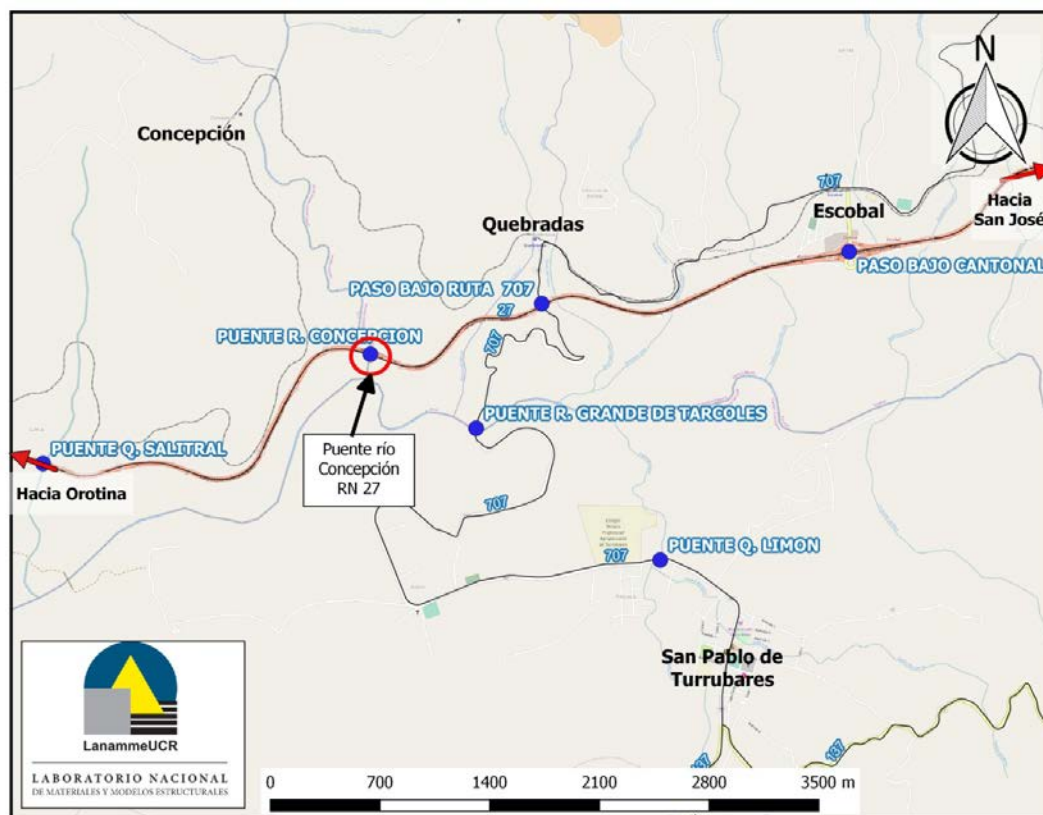


Figura 1. Ubicación del puente sobre el río Concepción



En el Cuadro 1 se resume las características básicas del puente. En la Figura 2 y la Figura 3 se presentan dos de las vistas principales del puente, la vista a lo largo de la línea de centro y una vista lateral respectivamente. La Figura 4 muestra la identificación utilizada en este informe cuando se hace referencia a ciertos elementos del puente.

Cuadro 1. Características básicas del puente sobre el río Concepción

| | | |
|------------------------------|--|--|
| Geometría | Tipo de estructura | Puente |
| | Longitud total (m) | 297 |
| | Ancho total (m) | 12,3 |
| | Ancho de calzada (m) | 9,80 |
| | Número de tramos | 3 |
| | Alineación del puente | Recta |
| | Número de carriles | 2 |
| Superestructura | Número de superestructuras | 1 |
| | Tipo de superestructura (elementos principales) | Superestructura tipo marco con elemento principal tipo cajón de de sección variable concreto preesforzado |
| | Tipo de tablero | Losa de concreto preesforzado (losa superior del cajón) |
| Apoyos | Tipo de apoyo en bastiones | Bastión 1 : apoyo expansivo Bastión 2 : apoyo expansivo |
| | Tipo de apoyo en pilas | Pila 1: apoyo rígido Pila 2: apoyo rígido |
| Subestructura | Número de elementos | Bastiones: 2 Pilas: 2 |
| | Tipo de bastiones | Bastión 1: tipo cabezal de concreto reforzado Bastión 2: tipo cabezal de concreto reforzado |
| | Tipo de pilas | Pila 1: tipo columna sencilla de concreto reforzado Pila 2: tipo columna sencilla de concreto reforzado |
| | Tipo de cimentación | Bastiones: Placa (cabezal) Pilas: placa |
| Diseño y construcción | Año de diseño | 2000 |
| | Año de construcción | 2001 |
| | Especificación de diseño original | AASHTO Standard 1996 |
| | Carga viva de diseño original | HS20-44+25% |
| | Año de reforzamiento/rehabilitación | No aplica |
| | Especificación utilizada para el reforzamiento/ rehabilitación | No aplica |
| | Carga viva de diseño utilizada para el reforzamiento/ rehabilitación | No aplica |

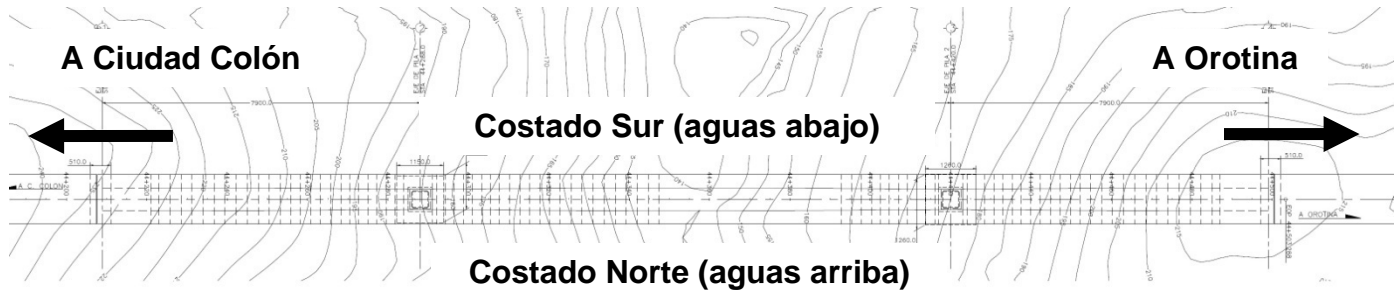
Fuente: Vargas-Alas & Villalobos Vega, 2017



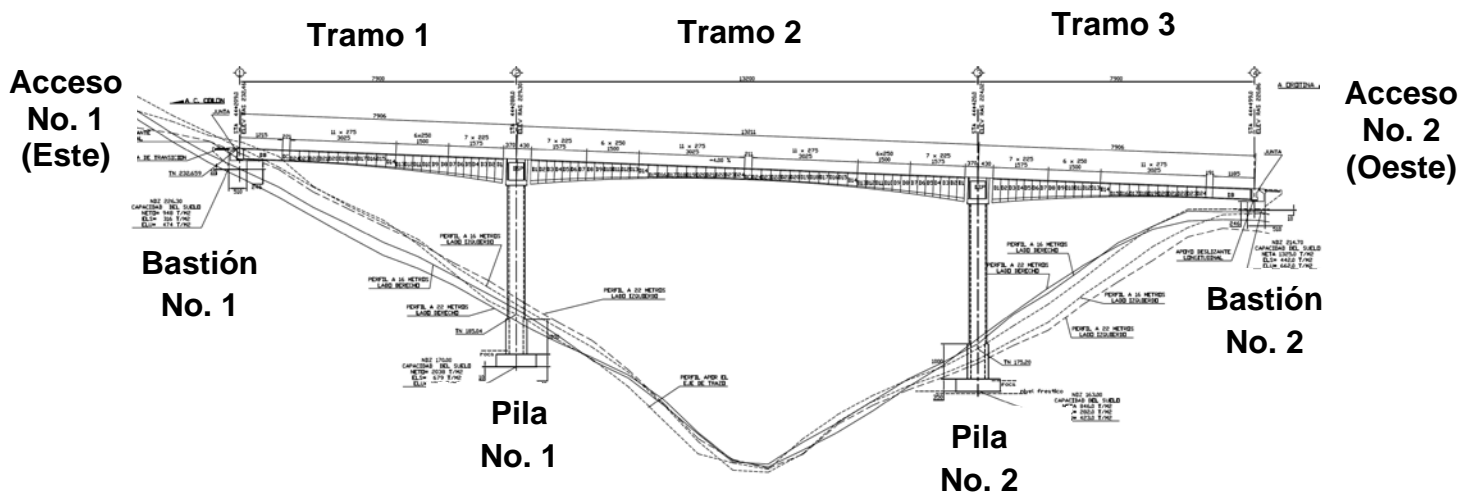
Figura 2. Vista a lo largo de la línea de centro del puente sobre el río Concepción



Figura 3. Vista lateral del puente sobre el río Concepción



(a) Vista en planta



(b) Vista de la elevación Norte

Figura 4. Identificación de los elementos del puente



4. ANTECEDENTES E INFORMACIÓN DISPONIBLE

En el informe de inspección presentado por la Unidad de Puentes del LanammeUCR, con fecha del 17 de enero de 2012, se reportan deficiencias en el sistema de drenaje de las juntas de expansión dentadas, presencia de oxidación en los apoyos y el desprendimiento y pérdida de secciones de los angulares de protección de la losa de aproximación del bastión este (Quirós, et. al. 2012). Debido a lo anterior, se clasificó el puente en estado regular (segundo nivel en una escala de clasificación del estado de la condición de tres niveles) y se realizaron recomendaciones al Consejo Nacional de Concesiones para solicitar a la concesionaria una serie de acciones con el fin de solucionar las deficiencias que se presentan en la estructura.

La Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del PITRA-LanammeUCR, ha venido presentado informes sobre el estado del proyecto San José-Caldera en la Ruta Nacional No. 27. A partir del cuarto informe de evaluación de la ruta No. 27, con número de consecutivo INF-PI-UGERVN-04-2014 (Valverde et al. 2015), se incluye el estado de conservación de los puentes mayores (río Virilla, río Ciruelas, río Grande, quebrada Salitral y río Concepción). En el caso particular del puente sobre el río Concepción, la información mostrada se basa en el informe presentados por la Unidad de Puentes mencionado en el párrafo anterior (Quirós et al. 2012).

En el informe INF-PI-UGERVN-05-2016 de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del PITRA-LanammeUCR, publicado en mayo del 2016, se presenta el seguimiento al estado de conservación de los Puentes Mayores de la Ruta Nacional No. 27 (Valverde et al. 2016). Dicho informe se realizó con el apoyo de la Unidad de Puentes y se basó en inspecciones visuales a los principales componentes de los puentes. En el caso del puente sobre el río Concepción, se indica que no se ha solucionado las deficiencias reportadas en el año 2012 (Quirós et al. 2012) con respecto al estado del sistema de drenaje de las juntas de expansión y a los apoyos, además se reportaron nuevas deficiencias como la ausencia de guardavías en el acceso norte.



Dando seguimiento al estado de conservación del puente sobre el río Concepción, la Unidad de Puentes del LanammeUCR presentó un nuevo informe sobre la evaluación de la condición del puente sobre el río Concepción en setiembre del 2017 (Vargas-Alas, et. al., 2017). Las principales deficiencias observadas son: agrietamiento en dos direcciones en la cara superior del tablero, desprendimientos de concreto en la cara superior del tablero, grietas con eflorescencia y juntas de construcción abiertas en la cara inferior del tablero, oxidación y desprendimientos de la capa de protección de pintura de los apoyos, erosión de la protección del concreto frente al bastión. Debido a las deficiencias mencionadas anteriormente, se concluye que el estado del puente es deficiente (tercer nivel en una escala de clasificación del estado de la condición de seis niveles). En el informe se emiten las recomendaciones relacionadas con las deficiencias mencionadas y el resto de observaciones sobre la condición de otros elementos y accesorios de la estructura y se emiten recomendaciones para contribuir en la atención del puente.

Se cuenta con los planos para la construcción con fecha de enero del 2001. En las mismas se señala que el constructor fue la Asociación de Empresas Terraplus y la consultoría y revisión estuvo a cargo de IMNSA Ingenieros Consultores S. A. y GREINER INC. La estructura formó parte del proyecto Puentes Mayores Ciudad Colón-Orotina.

5. DISTRIBUCIÓN DE SENSORES

Para aplicar el método de identificación de parámetros modales se obtienen registros de aceleración inducida por las cargas operacionales sobre el puente en la dirección vertical, utilizando sensores de aceleración colocados a lo largo de los costados del puente, preferiblemente las aceras, en puntos definidos previamente. En la Figura 5 se presenta una fotografía de la toma de datos de aceleración en el puente sobre el río Concepción, sin necesidad de interrumpir del tránsito vehicular.

Debido a la longitud del puente se debió realizar el registro de datos de aceleración en tres configuraciones (Peeters, 2000). Se debe mencionar que la capacidad máxima del sistema para abarcar longitud es de aproximadamente 100 metros debido a la longitud de los cables para conectar los acelerómetros a las unidades de adquisición de datos. En la Figura 6,

| | | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 18 de 61 |
|---------------------------------|---|-----------------|



Figura 7 y Figura 8 se presenta la distribución y numeración de sensores colocados sobre la estructura del puente, correspondientes a las 3 configuraciones utilizadas para monitorear toda a longitud del puente. Se dividió el primer, segundo y tercer tramo de la estructura definiendo 22, 38 y 22 puntos respectivamente. En los tramos laterales, la separación entre sensores era de 6,68 m, mientras que en el tramo central, la separación era de 6,75 m. En cada configuración se registraron datos de 30 sensores consecutivamente. Nótese que en los puntos 16, 17, 61 y 62 se colocan sensores en las configuraciones 1 y 2, siendo estos los nodos de empate para poder graficar la totalidad de la formas modales a lo largo del puente (señalados con verde en las figuras). En el caso de las configuraciones 2 y 3 los nodos de empate son los puntos 29, 30, 74 y 75.



Figura 5. Colocación de sensores sobre las aceras del puente. Nótese que el monitoreo no interrumpe el tránsito de vehículos

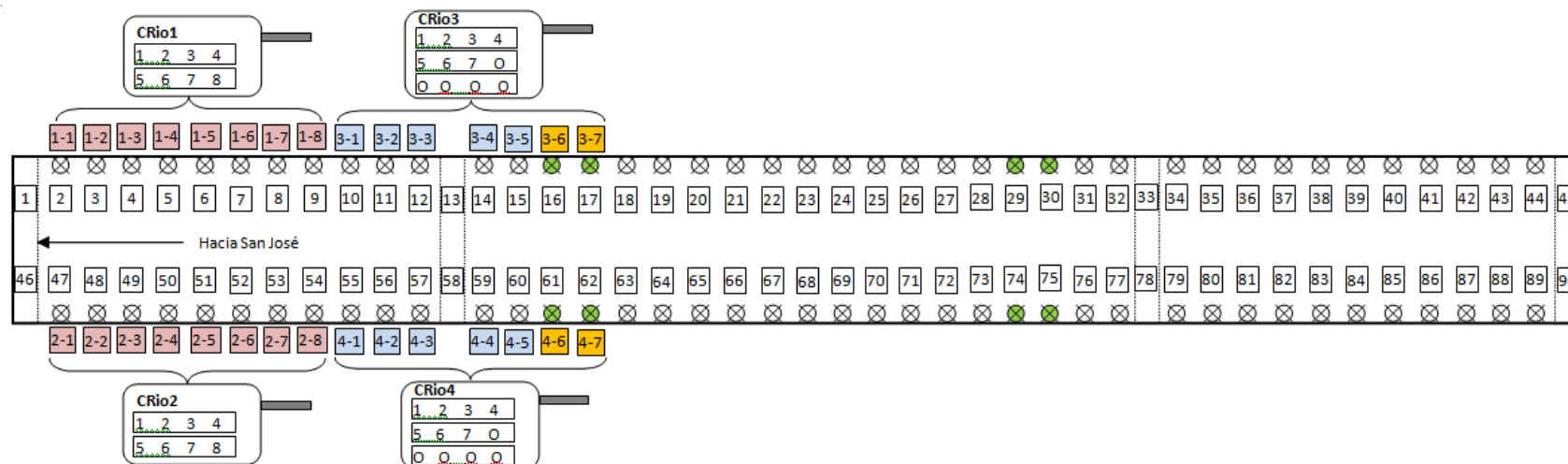


Figura 6. Distribución de sensores sobre el puente en la configuración 1

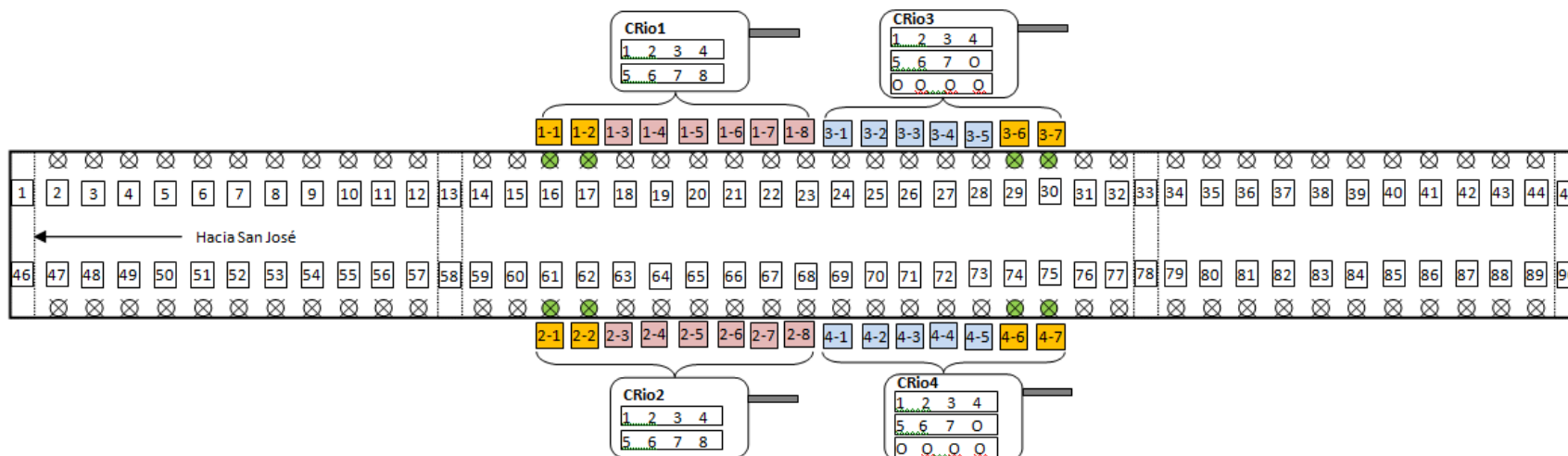


Figura 7. Distribución de sensores sobre el puente en la configuración 2

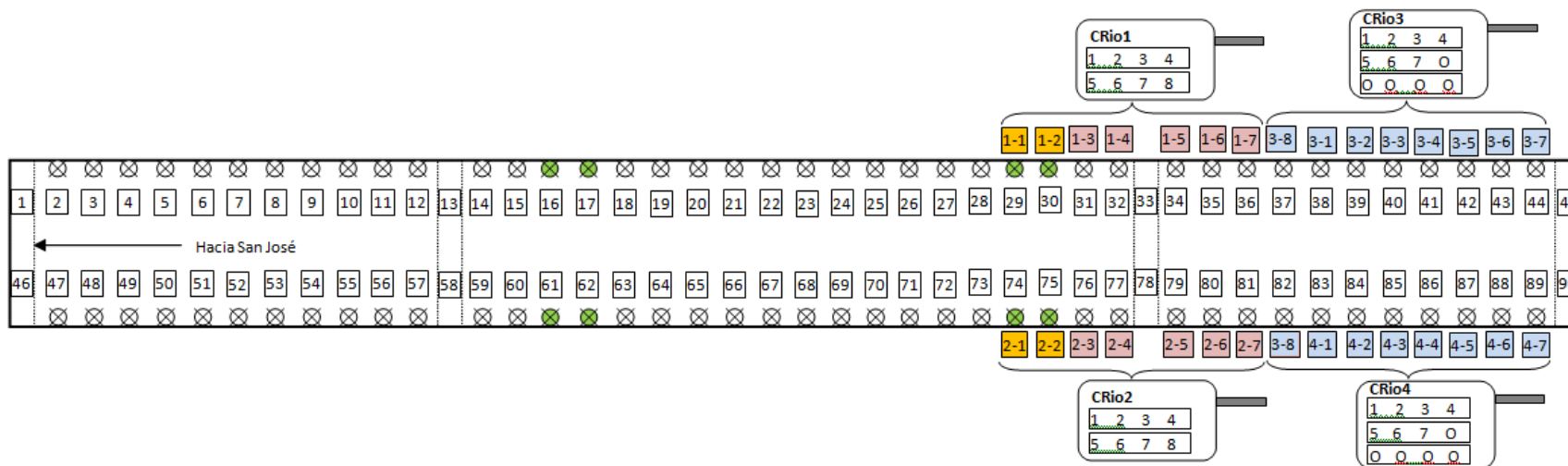


Figura 8. Distribución de sensores sobre el puente en la configuración 3



6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 9 se presentan, a modo de ejemplo, los registros de aceleración vertical de ocho sensores del tercer bloque de datos de la segunda configuración, en un periodo de 5 minutos, con una tasa de muestreo de 1652 Hz, lo que se denomina "datos crudos" o sin procesar, esto es sin aplicar filtros a las señales. Todos los gráficos presentan la misma escala de aceleración en el eje vertical en unidades de fracciones de la aceleración gravitacional "g" y el eje horizontal muestra el tiempo.

Cada bloque de registros de aceleración de 5 minutos de medición es utilizado como datos de entrada para el método SSI-COV. Los datos son decimados para facilitar la identificación de modos asociados a frecuencias bajas.

La Unidad de Puentes ha realizado monitoreo de la condición estructural de la superestructura a otros puentes de la Ruta Nacional No. 27, como al puente sobre el río Grande, sobre la quebrada Salitral y sobre el río Ciruelas (LM-PI-UP-07-2016, LM-PI-UP-08-2016 y LM-PI-UP-09-2016 respectivamente). Estos son puentes con longitudes superiores a los 130 m y con frecuencias de los principales modos de vibración de la estructura, menores a 7 Hz. Debido a que el puente sobre el río Concepción presenta algunas características similares a los antes mencionados, se eligió decimar las señales a tasas de muestreo de 13,77 Hz y 8,26 Hz para facilitar la detección de modos de vibración de la estructura.

Una vez que las señales fueron filtradas y decimadas, se realiza el análisis utilizando el método SSI-COV (ver Figura A.2). En la Figura 10 se presentan algunos ejemplos de los diagramas de estabilización que resultan del análisis de tres diferentes bloques de registros con una decimación de la frecuencia de muestreo de hasta 13,77 Hz y asignando un orden del sistema de 50. Superpuesto al diagrama de estabilización se presenta con una línea azul el primer valor singular obtenido con el método FDD.

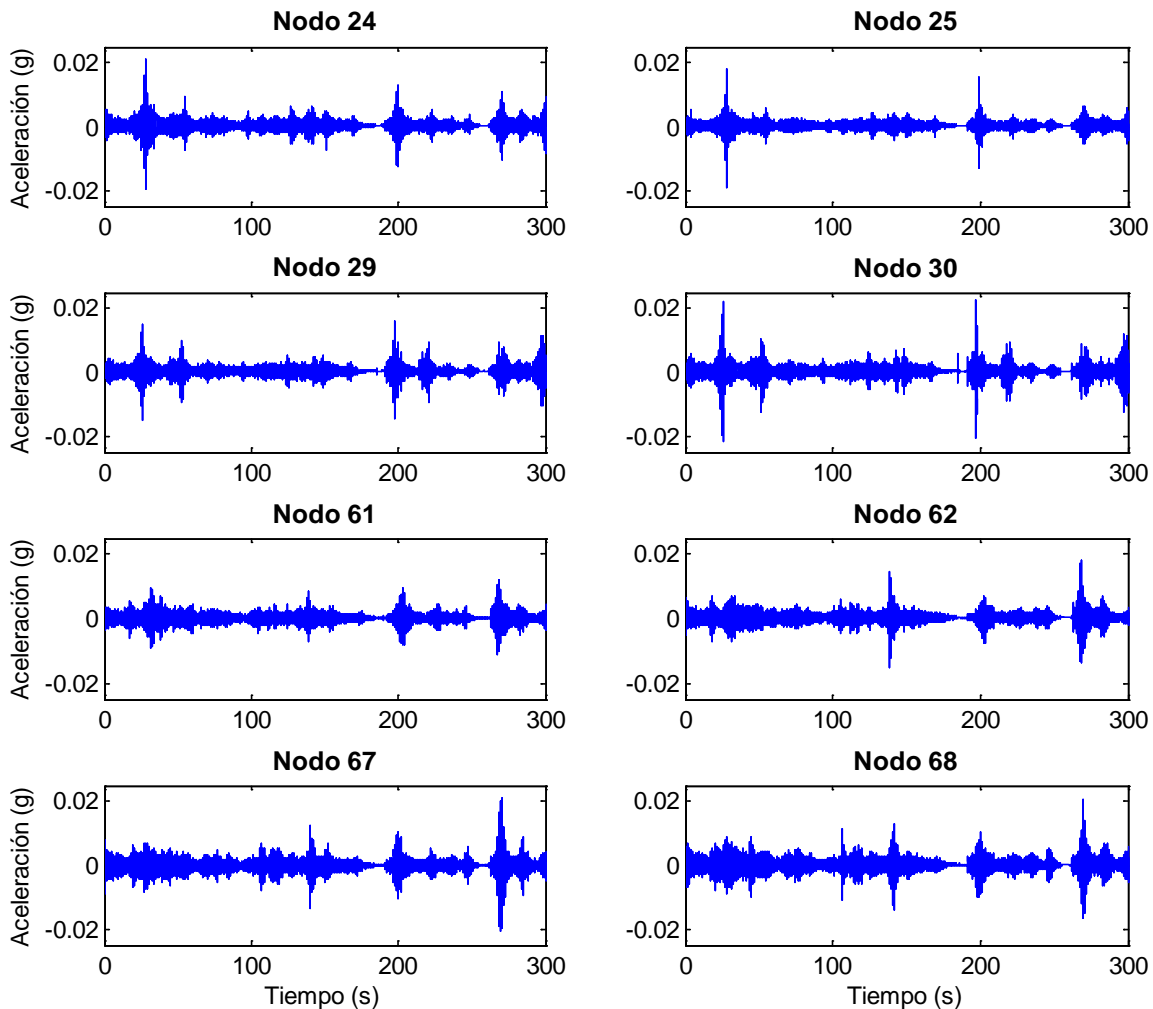


Figura 9. Registros crudos de aceleración vertical del tercer bloque de datos de la segunda configuración de sensores. La tasa de muestreo es de 1652 Hz

Adicionalmente, la Figura 10 presenta bajo los diagramas de estabilización, los diagramas de Argand correspondientes al segundo modo identificado experimentalmente (ver flechas rojas en el gráfico superior), donde se puede observar una tendencia lineal en el gráfico. Dicho comportamiento lineal es indicativo de que cada punto de observación de la forma modal operacional comparte casi la misma fase en el tiempo, característico de un modo normal de la estructura. En otros casos, los modos locales, modos espurios y modos de transición, no presentan dicho comportamiento en sus correspondientes diagramas de Argand y no tienen una tendencia lineal.

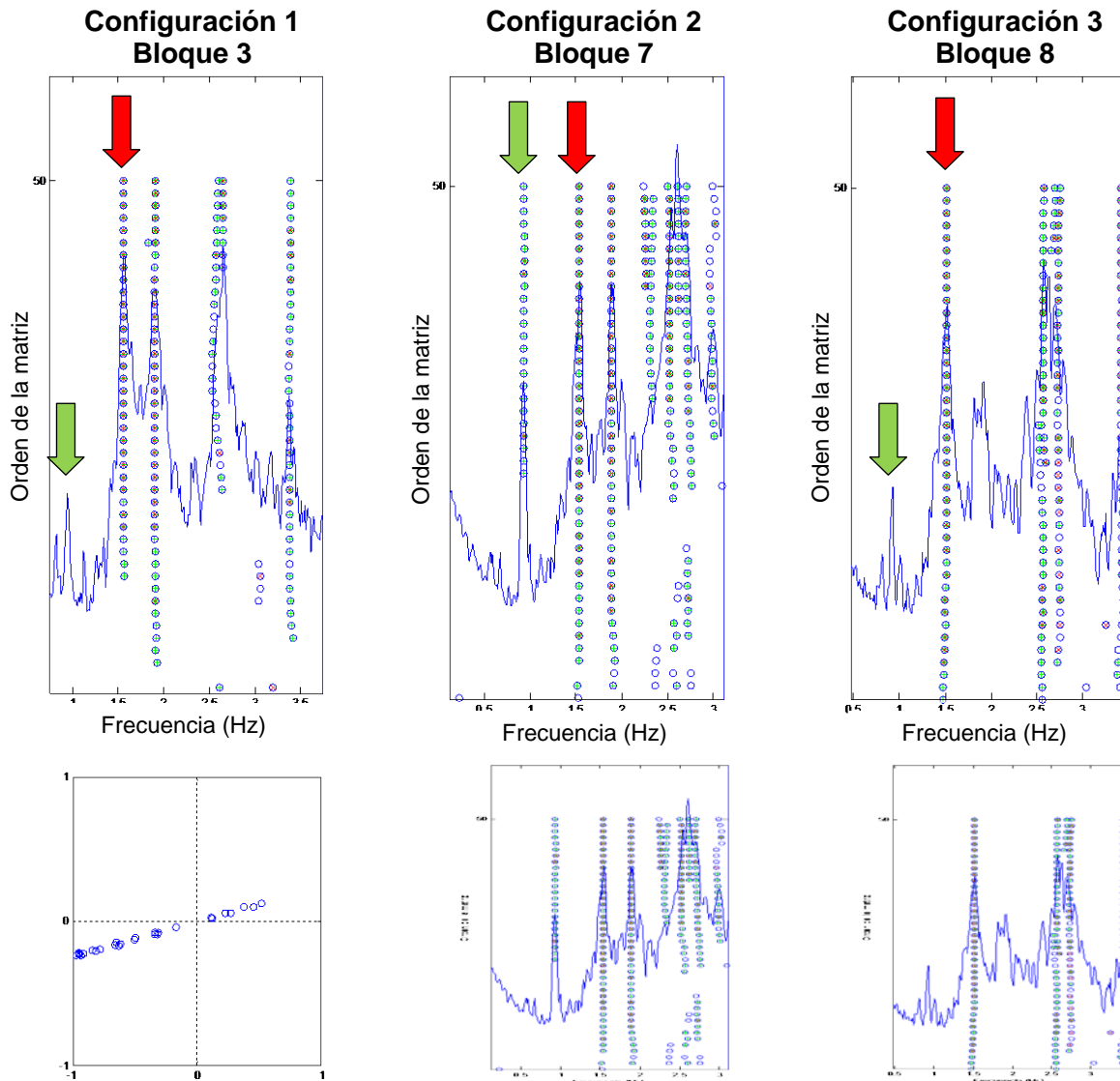


Figura 10. Arriba, diagramas de estabilización y primer valor singular del método FDD de tres diferentes bloques de datos. Abajo, diagramas de Argand correspondientes al modo de flexión vertical 2. Las flechas verdes corresponden al primer modo de flexión ($f= 0,935$ Hz) y las flechas rojas al segundo modo de flexión ($f=1.543$ Hz)

El criterio de estabilización utilizado para el análisis del puente sobre el río Concepción es considerar que las frecuencias son estables si existe menos de 1% de diferencia entre las calculadas por el orden de matriz $n-1$ y por el orden n , en cuanto a formas modales 3%, y con respecto a amortiguamiento 5%. Un círculo azul en el diagrama de estabilización indica modos con frecuencia estable; el círculo azul con una equis (x) roja indica que tanto la



frecuencia como forma modal son estables; y si se tuviera, además de las anteriores, una cruz verde (+), indica que el amortiguamiento también es estable.

Debido a que no todos los modos son excitados en un lapso de tiempo dado, se deben revisar todos los bloques de datos obtenidos en campo y discriminar los modos de acuerdo con su frecuencia y forma modal, de forma que se puede obtener un rango de valores de frecuencias naturales a partir de cada bloque de datos. En el Cuadro 2 se presenta el valor mínimo, máximo y el promedio de las frecuencias correspondientes a los modos identificados. Además, se indica la cantidad de veces que se identificó el modo en los bloques de datos analizados, y en cuantos bloques de datos se identificó.

Adicionalmente, se observa que el método SSI-Cov puede identificar el mismo modo varias veces en un mismo bloque de datos, lo cual es evidente por tener la misma forma modal. Esto se debe a que la herramienta de análisis se basa en un modelo lineal y en las estructuras civiles y en especial puentes de concreto, siempre están acompañados de no linealidades en su comportamiento.

Se logró identificar claramente seis modos de flexión vertical y tres modos de torsión, con frecuencias entre 0,925 Hz y 5,718 Hz. En general, los modos hallados se identificaron múltiples veces, sin embargo, la cantidad de veces que los modos son identificados no es constante. En la Cuadro 2 se reporta que el modo de flexión vertical 4 fue identificado 27 veces mientras que el modo de flexión vertical 1 fue identificado 10 veces. Esto se debe a que bajo las condiciones de la carga operacional hay modos dominantes que son excitados una mayor cantidad de veces y por consecuencia son identificados con mayor facilidad. Por ejemplo, en los gráficos de la Figura 10 se observa que el primer modo fue identificado por el método FDD en los tres bloques presentados (ver flechas verdes), aunque con una amplitud de un orden aproximadamente 100 veces menor que los demás modos, mientras que el método SSI-Cov lo identificó solo en el caso del bloque 7 de la configuración 2. Este hecho indica que el primer modo de flexión vertical pocas veces es excitado por el tránsito vehicular en este tipo de puentes, de igual forma que ocurrió en el puente sobre el río Virilla en la ruta No. 32 (Liu-Kuan, et.al, 2015b).



Cuadro 2. Resumen de las formas modales operacionales identificadas

| Modo | Frecuencia (Hz) | | | Cantidad de veces identificado | Cantidad de bloques en que se identificó |
|--------------------|-----------------|----------|--------|--------------------------------|--|
| | Mínimo | Promedio | Máximo | | |
| Flexión vertical 1 | 0,925 | 0,935 | 0,949 | 10 | 8 |
| Flexión vertical 2 | 1,515 | 1,543 | 1,566 | 22 | 22 |
| Flexión vertical 3 | 1,888 | 1,905 | 1,928 | 22 | 21 |
| Flexión vertical 4 | 2,560 | 2,629 | 2,842 | 27 | 22 |
| Torsión 1 | 3,336 | 3,402 | 3,448 | 23 | 20 |
| Torsión 2 | 4,233 | 4,257 | 4,294 | 12 | 11 |
| Flexión vertical 5 | 4,370 | 4,432 | 4,467 | 22 | 20 |
| Flexión vertical 6 | 5,181 | 5,212 | 5,262 | 20 | 19 |
| Torsión 3 | 5,581 | 5,684 | 5,718 | 15 | 15 |

En la Figura 11 se presentan nueve de las formas modales experimentales correspondientes a los diferentes modos de vibración identificados en las tres configuraciones en las que se muestreó datos de aceleración. Cabe mencionar que las coordenadas de las formas modales experimentales de los nodos son extraídas directamente de los registros de aceleración por el método SSI-COV, y no se basa en un análisis con modelos analíticos, por lo tanto son uno de los resultados más importantes para la detección de daño.

En la forma modal del primer modo de flexión vertical se observa una curva menos suave comparada con la de los otros modos; esto ocurre porque como ya se mencionó, el primer modo está asociado a una frecuencia que fue identificada una menor cantidad de veces (ver Cuadro 2).

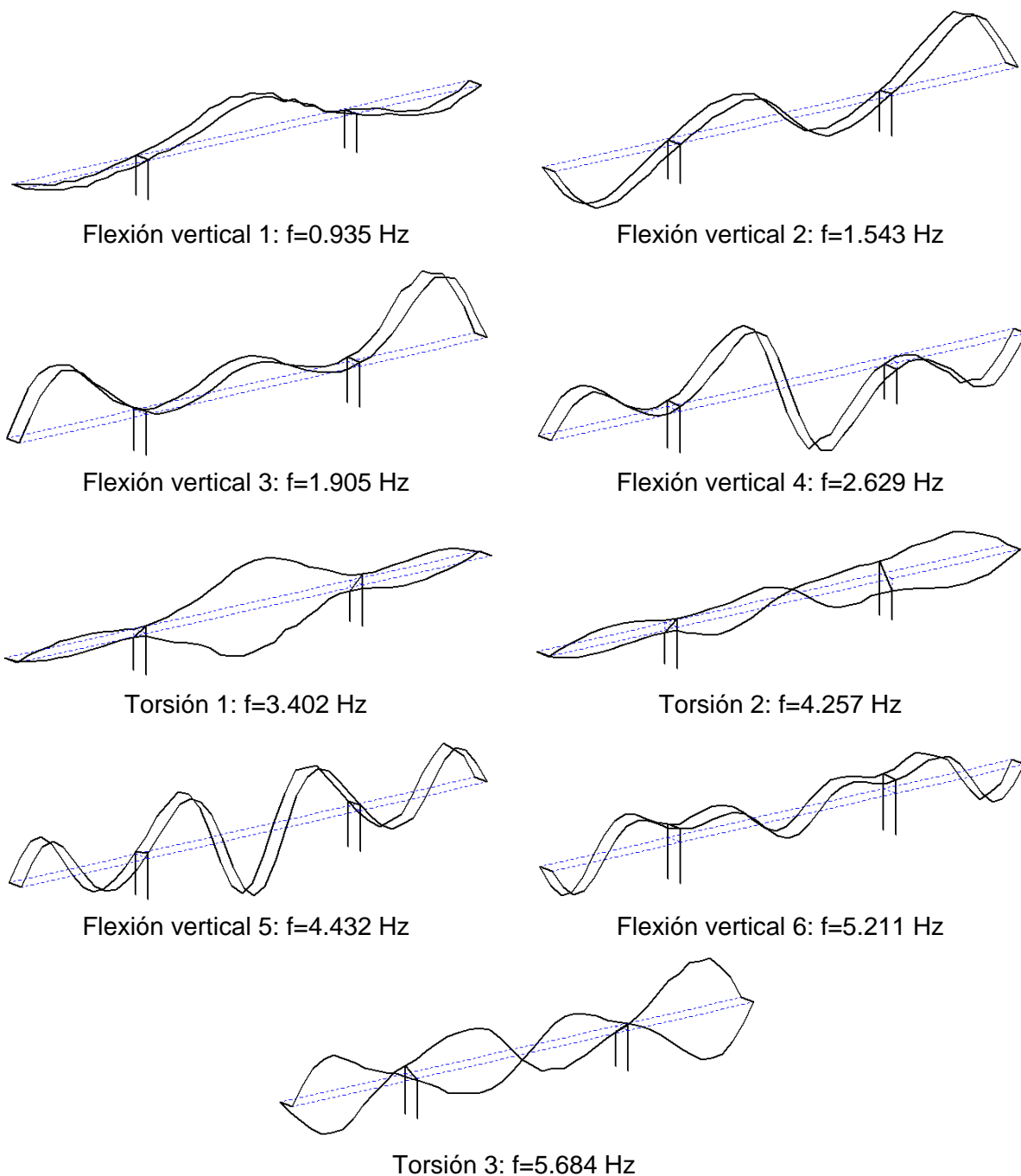


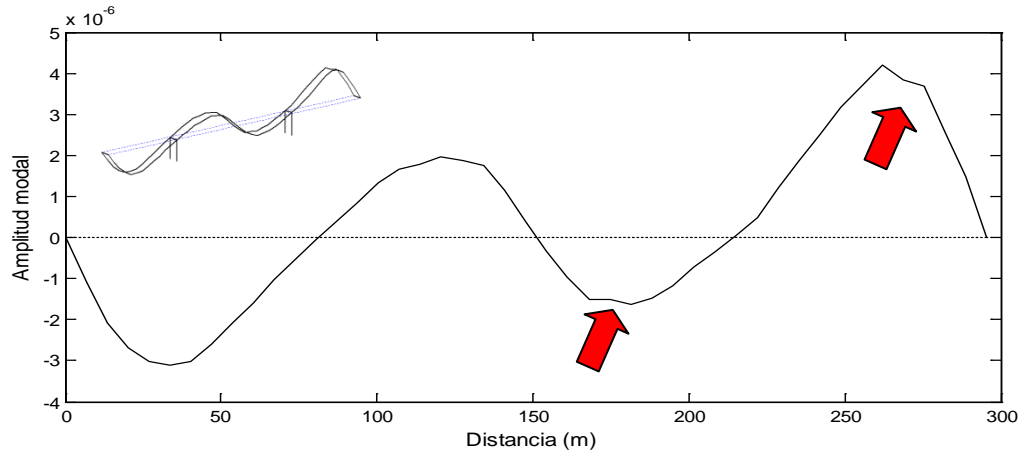
Figura 11. Formas modales experimentales identificadas (el acceso 1 se ubica a la izquierda en los gráficos)



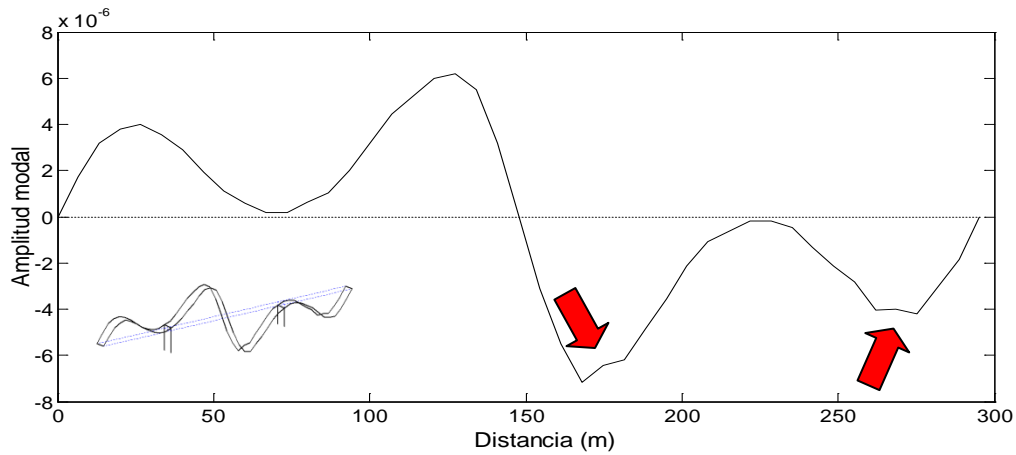
En la Figura 12 se aprecia que las formas modales del costado aguas abajo (sur) de los modos de flexión vertical 2 y 4 y del modo de torsión 3, presentan cambios bruscos de curvatura en los tramos 3 y segunda mitad del tramo 2. El comportamiento esperado se aprecia en los tramos 1 y primera mitad del tramo 2 en las formas modales de la Figura 12, considerando que la forma modal idealmente debe ser simétrica con respecto al centro del tramo 2.

Dichas anomalías modales pueden estar relacionadas con defectos constructivos, agrietamiento o daño en la estructura, sin embargo el método utilizado no permite diferenciar la causa de las anomalías. Los resultados obtenidos sirven como base para comparar con los resultados de futuros monitoreos del puente y dar seguimiento al estado de conservación de la estructura.

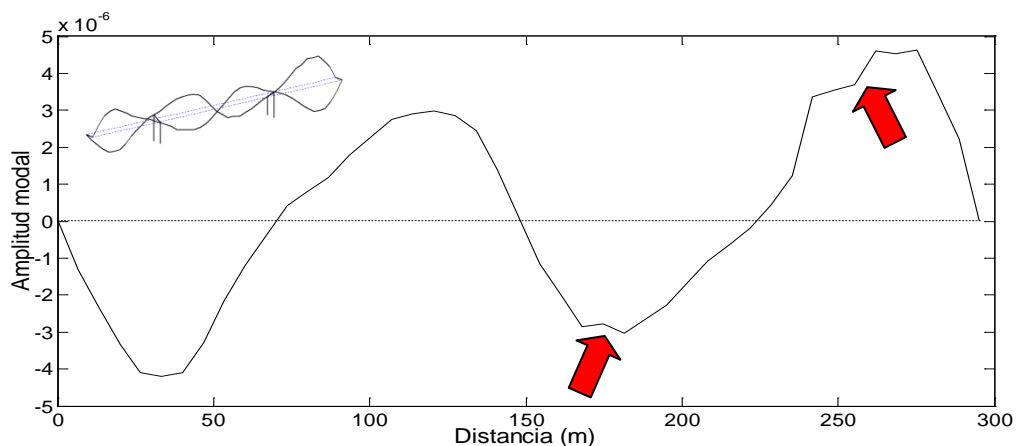
En el próximo monitoreo dinámico del puente se debe dar seguimiento a las anomalías detectadas para determinar si hay cambios en el comportamiento dinámico global de la estructura que brinden información sobre la evolución de éstas. Si los futuros resultados evidencian evolución de las anomalías se puede recomendar estudios específicos en las zonas donde fueron identificadas, por ejemplo ensayos no destructivos. Si los resultados no evidencian cambios a lo largo del tiempo se puede atribuir las anomalías al proceso constructivo de la estructura.



Flexión vertical 2: $f=1.543$ Hz



Flexión vertical 4: $f=2.629$ Hz



Torsión 3: $f=5.684$ Hz

Figura 12. Cambios de curvatura en tres modos identificados (el acceso 1 se ubica a la izquierda en los gráficos, las pilas y bastiones se ubican en los puntos de amplitud nula)



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este informe se presentan los resultados del monitoreo de la condición estructural de la superestructura del puente sobre el río Concepción, ubicado en la Ruta Nacional No. 27. El monitoreo se realizó el día 15 de febrero de 2017, 16 años después de construida la obra; los resultados obtenidos del análisis representan el comportamiento dinámico del puente en el momento que se realizó el registro de aceleraciones. Los resultados experimentales corresponden a una prueba de carga dinámica, con carga operacional.

Con base en el análisis realizado y la información disponible, se concluye lo siguiente:

- a. Se observaron cambios bruscos de curvatura en las formas modales en el costado aguas abajo en los tramos 2 y 3. Dichas anomalías modales pueden estar relacionadas con defectos constructivos o posible daño en la estructura.
- b. Los resultados sirven como base para estudiar el comportamiento dinámico del puente a través del tiempo partiendo de este monitoreo de la condición estructural, y dar seguimiento a las zonas donde se detectaron las anomalías mencionadas anteriormente.

Por lo tanto, con el propósito de mejorar el estado de conservación de la estructura, se recomienda a la Administración realizar las siguientes acciones:

1. Realizar evaluaciones visuales periódicas a la estructura para detectar eventuales deterioros o la progresión de los mismos.
2. Valorar la posibilidad de realizar, según se requiera, Ensayos No Destructivos en las zonas que mostraron anomalías en las formas modales en el costado aguas abajo en los tramos 2 y 3.
3. Realizar el mismo estudio del puente con pruebas de carga dinámica operacional dos años después del presente monitoreo, para comparar los resultados presentados en el presente informe y poder determinar si hay un aumento en el periodo de los modos operacionales identificados. Además, dar seguimiento a las anomalías modales detectadas en el costado aguas abajo en los tramos 2 y 3.

| | | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 30 de 61 |
|---------------------------------|---|-----------------|



4. Atender las recomendaciones de los informes LM-PI-UP-PC03-2012, INF-PI-UGERVN-14-2014, INF-PI-UGERVN-05-16 y LM-PIE-UP-P16-2017, referentes al estado de conservación del puente sobre el río Concepción de la Ruta Nacional No. 27.



8. REFERENCIAS

1. AASHTO. *"The Manual of Bridge Evaluation"*. Second Edition. Washington, DC. 2011.
2. Agüero-Barrantes, P., Liu-Kuan, Y. C., Barrantes-Jiménez, R., Loría-Salazar, L. G. (2016a). *Monitoreo Estructural de la superestructura del puente sobre el río Grande Ruta Nacional No. 27 LM-PI-UP-07-2016*. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
3. Agüero-Barrantes, P., Liu-Kuan, Y. C., Barrantes-Jiménez, R., Loría-Salazar, L. G. (2016b). *Monitoreo Estructural de la superestructura del puente sobre la quebrada Salitral Ruta Nacional No. 27 LM-PI-UP-08-2016*. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
4. Agüero-Barrantes, P., Liu-Kuan, Y. C., Barrantes-Jiménez, R., Loría-Salazar, L. G. (2016c). *Monitoreo Estructural de la superestructura del puente sobre el río Ciruelas Ruta Nacional No. 27 LM-PI-UP-09-2016*. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
5. Balageas, D; Fritzen, C. P., Güemes, A. (2006). *"Structural Health Monitoring"*. Hermes Science Publishing.
6. Basseville M., Benveniste A., Goursat M. (2001) *"Output-Only Subspace-Based Structural Identification: From Theory to Industrial Testing Practice"*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 123, December.
7. Cheng, G., Wang, W., Zheng, M. (2007). *"Assessment of the Bill Emerson Memorial Cable-stayed Bridge Based on Seismic Instrumentation Data"*. Final Report RI05-023, Missouri Department of Transportation Organizational Results, University of Missouri-Rolla.
8. Collins, M.P., Mitchell, D. *"Prestressed Concrete Structures"*. Response Publications, Ontario, Canada, 1997.
9. Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W. *"Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review"*. LA-13070-MS (1996). Los Alamos National Laboratory (LANL).



10. Farrar, C.R., Worden, K. (2007). "An introduction to structural health monitoring". Phil. Trans. R. Soc. A 365, 303–315.
11. Gandhi, M.V., Thompson B.S. (1992). "Smart Materials and Structures". Chapman & Hall.
12. Giraldo, D.F.; Song, W., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. (2009). "Modal Identification through Ambient Vibration: Comparative Study". J. Engrg. Mech. 135, 759 (2009).
13. He, X., Moaveni, B., Conte, J.P., Elgamal, A., Masri, S.F. (2008). "Modal Identification Study of Vincent Thomas Bridge Using Simulated Wind-Induced Ambient Vibration Data". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 23 (2008) 373–388.
14. Jang, S., Jo, H., Cho, S., Agha, G. (2010). "Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation". Smart Structures and Systems, Vol. 6, No. 5-6 (2010) 439-459.
15. Kolev, V.I. (2015). "Bridge Weigh-in-Motion Long-Term Traffic Monitoring in the State of Connecticut". Master of Science Thesis. University of Connecticut, 2015.
16. 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.
17. Liu, Y.C., Wu, T.H., Loh, C.H., Ni, Y.Q. (2013). "Variation of Modal Parameters of Canton Tower under Different Earthquake Excitations". The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Hong Kong.
18. Liu-Kuan, Y.C., Castillo-Barahona, R., Loria-Salazar, L.G. (2013). "Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de Instrumentación Inalámbrico". LM-PI-UP-02-2013. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR).
19. Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015a). "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.
20. Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015b).



“Monitoreo estructural de la superestructura No.2 del puente sobre el río Virilla Ruta Nacional No. 32 LM-PI-UP-PN12-2015”. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

21. Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2016). *“Desarrollo y validación de un sistema de medición de desplazamientos en tiempo real mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales LM-PI-UP-10-2016”*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
22. Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., (2017). *“Introducción al Monitoreo de la condición Estructural en Puentes”*. San José, Costa Rica: Boletín Técnico, Programa de Ingeniería Estructural (PIE), LanammeUCR. N°5, Volumen 2, Año 2017, ISSN: 2215-4566. [\[Descargar\]](#)
23. Loh, C.H., Liu, Y.C., Ni, Y.Q. (2012). *“SSA-based stochastic subspace identification of structures from output-only vibration measurements”*. Smart Structures and Systems, Vol. 10, No. 4-5 (2012) 331-351.
24. Loh, C.H., Chen, M.C., Chao, S.H. (2012). *“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; doi:10.1117/12.912514.
25. 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.
26. Muñoz-Barrantes, J., Vargas-Alas, L. G., Vargas-Barrantes, S., Agüero-Barrantes, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *“Actualización de los criterios para la evaluación visual de puentes LM-PI-UP-05-2015”*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
27. Ni, Y.Q. (2014). *“Structural health monitoring of cable-supported bridges based on vibration measurements”*. Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN.
28. Ni, Y.Q., Wong, K.Y. (2012). *“Integrating Bridge Structural Health Monitoring and Condition-Based Maintenance Management”*. Civil Structural Health Monitoring Workshop CSHM-4,



ISHMII.

29. Peeters, B. (2000). *“System Identification and Damage Detection in Civil Engineering”*. Ph.D. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven.
30. Pridham, B. A., Wilson, J. C. (2002). *“Subspace Identificación of Vincent Thomas Suspension Bridge”*. IMAC-XX: A Conference on Structural Dynamics.
31. Quirós-Serrano, C., Castillo-Barahona, R., Loría-Salazar, L.G. (2012). *“Inspección del puente sobre el río Concepción Ruta Nacional No. 27 LM-PI-UP-PC03-2012”*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
32. Ren, W.R., Zong, Z.H. (2004). *“Output-only modal parameter identification of civil engineering structures”*. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, No. 3-4.
33. Sauvageot, G. (2000). *“Segmental Concrete Bridges”*. Bridge Engineering Handbook. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. CRC Press, Boca Raton.
34. Sohn, H.S., Farrar, C., Hemez, F.M., Czarnecki, J.J. (2002). *“A Review of Structural Health Monitoring Literature form 1996-2001”*. LA-13976-MS. Los Alamos National Laboratory.
35. Takács, P.F. *“Deformations in Concrete Cantilever Bridges: Observations and Theoretical Modelling”*. Doctoral Thesis, Department of Structural Engineering, The Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway, March, 2002.
36. Technical Committee ISO/TC 173, Subcommittee SC2 *“Quality Management Systems – Requirements. ISO 9001:2015”*. International Organization for Standardization.
37. Valverde-Cordero, C., Garro-Mora, J. F., Naranjo-Ureña, R., Ruiz-Cubillo, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., Loría-Salazar, L. G. (2015). *“Informe de evaluación del Proyecto San José Caldera Ruta Nacional 27 Año 2014 - 2015 INF-PI-UGERVN-14-2014”*. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
38. Valverde-Cordero, C., Naranjo-Ureña, R., Ruiz-Cubillo, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., Loría-Salazar, L. G. (2016). *“Informe de evaluación del Proyecto San José Caldera Ruta Nacional 27 Año 2015 - 2016 INF-PI-UGERVN-05-16”*. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
39. Van Overschee, P., De Moor, B.L. (1996). *“Subspace Identification for Linear Systems:*



Theory - Implementation - Applications”. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

40. Vargas-Alas, L. G., Villalobos-Vega, E., Castillo-Barahona, R., Navas-Carro, A. (2017). “Evaluación de la condición del puente sobre el río Concepción Ruta Nacional No. 27 LM-PIE-UP-P16-2017”. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería Estructural (PIE), LanammeUCR.
41. Wall, C.J., Christenson, R.E., McDonnell, A.H., Jamalipour, A. (2009). “A Non-Intrusive Bridge Weigh-in-Motion System for a Single Span Steel Girder Bridge Using Only Strain Measurements”. Report No. CT-2251-3-09-5. Connecticut Department of Transportation.
42. Weng, J.H., Loh, C.H., Lynch, J.P., Lu, K.C., Lin, P.Y., Wang, Y., (2008). “Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems”. Engineering Structures 30 (2008) 1820–1830.
43. Worden, K., Farrar, C. R., Manson, G., Park, G. (2007) “The fundamental axioms of structural health monitoring”. Proceedings of the Royal Society A. 463, 1639–1664.
44. Zhang, Y.X., Caicedo, J.M., Sim, S.H., Chang, C.M., Spencer, B.F., Guo, X. (2008). “Modal Identification of Bill Emerson Bridge”. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.



ANEXO A. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este apartado se presentan brevemente los conceptos técnicos que fundamentan el análisis realizado. Para un mayor detalle el lector puede revisar la lista de referencias bibliográficas.

A.1 Enfoques y clasificaciones del Monitoreo de la Condición Estructural

A.1.1 Monitoreo continuo versus mediciones fuera de línea

Existen diferentes estrategias o metodologías para lograr el monitoreo estructural. En términos de la instalación y propósito, se clasifica en dos tipos: monitoreo continuo (también llamado monitoreo permanente o monitoreo en línea) y mediciones fuera de línea (también llamadas como pruebas de diagnóstico o de evaluación).

El monitoreo continuo implica la instalación permanente de sensores, sistema de cableado y de adquisición de datos en sitio, lo cual implica elevados costos en la instalación, seguridad, operación y mantenimiento del sistema, por lo que generalmente sólo se encuentra en puentes de gran envergadura y de vital importancia. Ejemplo de ello son todos los puentes mayores atirantados de Hong Kong como el puente Tsing Ma, Kap Shui Mun, Ting Kau, Western Corridor y Stonecutters (Ni, 2014; Ni y Wong, 2012); el puente Bill Emerson (Zang, et. al., 2008) sobre el río Misisipí, Illinois, y el puente Vincent Thomas (He, et. al., 2008) que cruza el puerto de Los Ángeles, California; el nuevo puente Jindo en Corea del Sur (Jang, et. al., 2010) y muchos otros puentes importantes alrededor del mundo.

Los objetivos de un sistema de monitoreo continuo son: a) emisión de alertas tempranas cuando la estructura está sujeta a cargas excesivas, ya sea causadas por el tráfico, por el viento o por sismos, y cuando se requieren detectar daños o anomalías en tiempo real para una toma de decisión inmediata; b) evaluar en forma continua las condiciones y los estados operacionales del puente; c) verificar los parámetros de diseño contra el desempeño de la construcción in situ; y d) monitorear, estudiar, caracterizar y controlar, en una fase más avanzada, las solicitaciones que son impuestas por las excitaciones ambientales como el



viento o el sismo, o por el tráfico vehicular, donde para este último se buscan implementar estrategias especiales para el pesaje en movimiento o pesaje dinámico en el puente ("Bridge Weigh-In-Motion", como se le conoce en inglés) (Wall, et. al., 2009; Kolev, 2015).

Por otro lado, para las mediciones fuera de línea se utilizan generalmente sistemas portátiles que pueden colocarse temporalmente en un puente, tomar los datos durante unas horas, varios días o hasta algunos meses, y ser retirados del sitio para instalarse en otros puentes. Los datos recolectados pueden ser procesados y analizados luego en la oficina o incluso en el sitio mismo.

Los objetivos de las mediciones fuera de línea son: a) evaluaciones y revisiones rutinarias de la condición estructural, detección de daños y cuantificación de su deterioro en el tiempo; b) evaluación rápida post-evento; c) actualización o validación del modelo estructural mediante elemento finito; y d) pruebas de carga diversas. El sistema de monitoreo híbrido y portátil desarrollado y validado por LanammeUCR, a través de la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural (Liu-Kuan, et. al, 2015a), fue creado justamente para los propósitos mencionados de mediciones fuera de línea.

A.1.2 Monitoreo basado en mediciones directas o monitoreo basado en vibraciones

En términos de la medición, se puede hablar de dos perspectivas: monitoreo basado en mediciones directas o monitoreo basado en vibraciones. Se puede citar ejemplos del primero como el monitoreo de la deformación unitaria de un elemento o en una sección crítica o agrietada de un puente mediante una galga extensométrica, monitoreo de la presión del suelo o tensión de un cable con una celda de carga, monitoreo del ángulo de rotación de una pila con un inclinómetro o el asentamiento de la misma con un LVDT (siglas en inglés de "Linear Variable Displacement Transducer"), entre otros, donde el valor obtenido de la medición puede compararse directamente con un umbral establecido teóricamente y determinar así el desempeño y la seguridad de la sección o del elemento monitoreado.

Por otro lado, monitoreo basado en vibraciones es un método indirecto y global. Es indirecto porque las mediciones de vibraciones no pueden compararse directamente con algún valor de referencia, sino que a través de métodos de procesamiento de señales o métodos



denominados como “métodos de identificación de sistemas”, se extraen los parámetros de interés de la estructura como un todo, y por ende, es llamado un método global.

Estas dos perspectivas son, de hecho, complementarias, y en la práctica es común verlas aplicadas conjuntamente en el monitoreo continuo de puentes de gran envergadura. El monitoreo basado en mediciones directas es más común en monitoreo permanente y de largo plazo, debido a su instalación in situ; además, los trabajos de calibración y verificación, son laboriosos, y se busca vigilar continuamente el objetivo: un valor de deformación unitaria, fuerza, rotación o desplazamiento en el tiempo, y así emitir una alerta cuando este alcance un valor o rango de valores preestablecidos.

En obras de infraestructura civil, rara vez el interés es estudiar el valor medido tal cual de la historia de vibraciones registrada en campo o compararlo contra alguna referencia (sea en términos de deformación, velocidad o aceleración); el análisis modal operacional es el método comúnmente empleado para analizar estas señales vibratorias y extraer frecuencias y formas modales, así como valores de amortiguamiento, siendo estas últimas propiedades dinámicas de la estructura como un todo.

En resumen, el monitoreo basado en mediciones directas puede indicar solo el estado del elemento, sección o punto monitoreado de la estructura. Se deben hallar los componentes más críticos de una obra antes de su implementación; de esta manera el monitoreo será significativo. En cambio, el monitoreo basado en vibraciones muestra el estado global de la estructura como un todo y permite identificar y ubicar anomalías o daños en la estructura.

El monitoreo basado en vibraciones puede ser continuo o fuera de línea; y es posible extraer los parámetros modales de una estructura con solo un par de minutos de registro de datos. Estos resultados equivalen a una fotografía de su estado en el momento de la medición. Mediante una comparación con los parámetros obtenidos cuando la estructura se encuentra “sana” o en su estado inicial, es posible determinar y cuantificar el deterioro o cambio de la estructura en el tiempo. En caso de no disponer de la información del estado inicial o “sano”, podría compararse con los parámetros modales de la estructura modelada analíticamente con el método del elementos finitos, y suponerlo como el estado “ideal” contra el que se hace



la comparación, proceso que es denominado como la calibración, ajuste o actualización del modelo de los elementos finitos.

El sistema de monitoreo híbrido y portátil desarrollado por LanammeUCR está diseñado para realizar mediciones fuera de línea y está basada en las vibraciones (aceleraciones registradas) de la estructura. Así, dada las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la ley 8114 a LanammeUCR para la evaluación de la Red Vial Nacional, el sistema puede trasladarse libremente a puentes en cualquier parte del país que requieren de una evaluación. Además, puede determinar la existencia y ubicación de anomalías, posibles daños en el puente, y cuantificar el estado global o el deterioro del puente en el transcurso del tiempo. Los resultados de este monitoreo complementan las labores de inspección visual y constituyen un insumo muy valioso en la toma de decisiones con respecto a la estructura evaluada.

Además, antes de implementar un sistema de monitoreo continuo en una estructura que lo amerita, se debe realizar previamente una medición fuera de línea en forma exhaustiva para determinar las propiedades dinámicas y condiciones reales de la estructura. Esta evaluación a priori permite determinar los elementos o las secciones críticas que requieren de monitoreo, y así disponer a la estructura con la menor cantidad posible de sensores pero ubicados óptimamente, de forma que se pueda inferir el estado de la estructura. Para ello, se debe contar con un modelo analítico previamente calibrado, con base en los resultados experimentales producto de la medición fuera de línea, que permita integrar las mediciones continuas y hacer predicciones en tiempo real.

A.1.3 Monitoreo basado en modelos físicos o monitoreo basado en indicadores extraídos directamente de las señales.

En cuanto al método de procesamiento y análisis de las señales captadas por el sistema de monitoreo, se puede clasificar, en general, en dos enfoques: el primero es el basado en un modelo físico y el segundo, en indicadores extraídos directamente de las señales.

El primero cuenta con un modelo físico que sirve como referencia para hacer el procesamiento de señales y se aplica la metodología denominada como identificación de sistemas, para hallar los parámetros del modelo a partir de las mediciones.

| | | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 40 de 61 |
|---------------------------------|---|-----------------|



Un ejemplo típico de ello es el modelo dinámico (ecuación de movimiento) de un sistema lineal de múltiples grados de libertad, expresado en la forma de espacio de estados, el que también constituye, en nuestro caso, el modelo base para realizar el análisis modal operacional. Al contar con un modelo físico base, los parámetros identificados también cuentan con sus respectivos significados físicos; cualquier cambio en ellos permite inferir entonces, cambios reales en la estructura.

Por otro lado, el segundo enfoque se basa más en métodos de procesamiento y descomposición de señales, y extraer de ellas patrones, características o indicadores de interés o que representan daño. Ejemplo de estas técnicas se puede mencionar como: el Análisis Multi-resolución con Ondículas ("Multi-Resolution Analysis with Wavelets" en inglés), Transformada de Hilbert, Descomposición Empírica de Modos ("Empirical Model Decomposition" en inglés), Análisis de Componentes Principales ("Principal Component Analysis" en inglés); métodos basados en la inteligencia artificial como las Redes Neuronales, Algoritmos de Aprendizaje Automático ("Machine Learning" en inglés) y muchas otras. No obstante, actualmente no existe una clara división entre los dos enfoques, y por lo tanto es frecuente encontrar combinaciones de ambos para alcanzar mejores resultados.

A.2 Monitoreo de la Condición Estructural basado en vibraciones ambientales

El concepto y la hipótesis en que se basa el Monitoreo de la Condición Estructural basado en vibraciones ambientales, estrategia que es adoptada por la Unidad de Puentes del LanammeUCR, consiste en que al presentarse daños en la estructura, conceptualmente éstas modificarían las propiedades mecánicas tales como la masa, la rigidez, el amortiguamiento, las frecuencias de vibración (*i.e.*, parámetros modales) y en consecuencia, afectarían a las características vibratorias de las estructuras. Si existe una buena resolución espacial en cuanto a la distribución de sensores, y si el método de procesamiento de señales e identificación de parámetros dinámicos es lo suficientemente robusto como para extraer todos estos cambios a partir de las señales de vibración captadas, el monitoreo de la salud estructural y la identificación de daños sería factible midiendo únicamente las vibraciones de la estructura (Doebeling, et. al., 1996).



La investigación sobre el tema de vibraciones en las estructuras civiles no es algo reciente; desde los años sesenta del siglo pasado y con la creación de los sismógrafos electromagnéticos modernos, se han efectuado pruebas dinámicas de vibración libre o forzada para estudiar el comportamiento dinámico de las estructuras con especial atención a los edificios. En dichas pruebas se coloca instrumentación permanente en la base y el nivel superior de los edificios, y en el caso de los edificios de gran altura en los niveles intermedios, para el estudio y monitoreo del comportamiento de la estructura ante los desplazamientos inducidos por el sismo. En este caso, las aceleraciones registradas en la base serían la entrada al edificio, el que es considerado como el sistema, y la respuesta del mismo sería la salida, tal como se ilustra esquemáticamente en la Figura A.1.

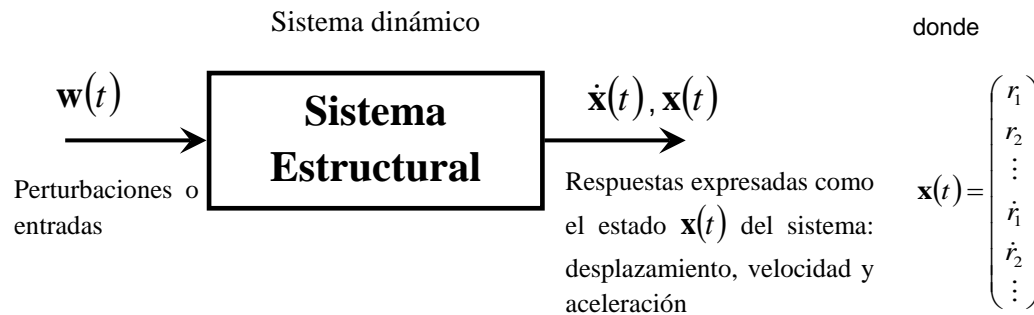


Figura A.1. Esquema conceptual de un sistema dinámico

A pesar de la temprana implementación de pruebas dinámicas en las estructuras civiles, su objetivo difiere del enfoque del monitoreo de condición estructural, donde la finalidad de este último es la implementación de un sistema para la detección de daños, alerta temprana, y como una estrategia para la gestión de la infraestructura civil.

Los monitoreos de condición estructural son posibles gracias al gran avance de la electrónica y de la tecnología de sensores en los últimos años, así como del desarrollo y mejoramiento de poderosas herramientas matemáticas y computacionales para el procesamiento de una gran cantidad de datos producto de señales digitales e identificación de sistemas.

Para lograr una mejor comprensión sobre la metodología del Monitoreo de la Condición Estructural basado en vibraciones ambientales, es posible referirse a tres enfoques o



problemas asociados a un sistema dinámico: a) análisis estructural, b) identificación de sistema y c) el problema inverso o identificación de fuerzas.

a) **Análisis estructural:** en general, el proceso de análisis estructural consiste en adoptar modelos de cargas, espectros de estas o historias en el tiempo establecidas en diversos códigos de análisis y diseño, documentación técnica o bases de datos, como perturbaciones o entradas al sistema; luego, determinar las incógnitas, que son las respuestas de un modelo estructural conocido previamente, las cuales pueden traducirse luego en términos de fuerzas internas y que son llamadas en el proceso de diseño como la demanda estructural, la que al final es comparada con la capacidad de los miembros estructurales que conforman el sistema.

b) **Identificación de sistemas:** cuando se desean conocer las características dinámicas (o también estáticas) de una estructura a escala real, el sistema o el modelo dinámico pasaría a ser la incógnita. En el caso de pruebas de vibración libre, por ejemplo, la perturbación (entrada) es cero, se conoce la salida y se desea despejar o resolver los parámetros dinámicos del sistema (frecuencias naturales, amortiguamiento, formas modales). En una prueba de vibración forzada, es conocida tanto la entrada al sistema (en su ubicación y forma: son excitaciones sinusoidales en el tiempo y en un punto de la estructura) como su salida. En un evento sísmico, la entrada es tomada como la aceleración registrada en la base, y la salida son las respuestas tomadas por los acelerógrafos instalados en pisos intermedios y superior. La determinación de las propiedades dinámicas de un sistema dinámico a partir de las entradas y salidas del mismo es conocida como Identificación de Sistemas (Van Overschee y De Moor, 1996).

En casos de pruebas estáticas es similar, es decir, se aplican sobre la estructura cargas conocidas y controladas, mientras que las respuestas, como el desplazamiento o deformación, son registradas, de forma que se puede recuperar la curva carga-deformación de la estructura como su modelo estático.

c) **Problema inverso o identificación de fuerzas:** es cuando el sistema estructural ha sido identificado previamente, ya sea en términos dinámicos o estáticos, y junto con las mediciones de las respuestas del sistema se buscan determinar las fuerzas que actúan



en el sistema. Ejemplos de ello es la identificación de la fuerza del viento que actúa en edificios altos (Liu, et. al., 2013), o la identificación de las cargas vehiculares que transitan sobre un puente conocido como pesaje en movimiento o pesaje dinámico en el puente (Wall, et. al., 2009; Kolev, 2015), como se mencionó anteriormente.

En el caso específico de puentes, es posible realizar pruebas de carga estática o dinámica tradicionales de manera controlada permitiendo así tener mediciones tanto de entrada como de salida para identificar el sistema. Sin embargo, esto implica el cierre total al paso vehicular durante la prueba, lo cual podría causar una gran congestión vehicular en las rutas alternas si las hay, y es algo que difícilmente se pueda lograr en las rutas nacionales con un alto volumen de tránsito vehicular.

Si se midiera únicamente las respuestas del puente sin interrupción del tránsito, se estaría enfrentando a un escenario donde se desconocen las entradas al sistema y únicamente las salidas son conocidas. Este escenario es bastante común en las estructuras civiles y el método empleado para ello es denominado **identificación de sistemas estocásticos** o **identificación de sistemas de solo salida** ("output-only system identification" en inglés); y las salidas que se registran del sistema serían las denominadas **vibraciones ambientales**. Por ende, este tipo de pruebas reciben también el nombre de **pruebas de vibraciones ambientales**, y en ello se resume el monitoreo de la condición estructural de los puentes basado en vibraciones ambientales.

El sistema portátil de monitoreo desarrollado por LanammeUCR puede instalarse en ambos costados del puente, sobre las aceras o los espaldones, de modo que ni su instalación ni la toma de datos implica alguna interrupción del tránsito. De esta forma, es posible extraer e identificar los parámetros dinámicos del puente que comprenden: las frecuencias naturales de vibración, el amortiguamiento y las formas modales operacionales del puente, a partir de los registros de aceleración obtenidos simultáneamente por un arreglo predefinido de sensores de vibración; y todo lo anterior bajo condiciones operacionales del puente. A este proceso de análisis se le conoce también como el **análisis modal operacional**.

Se definen las formas modales operacionales de una estructura como las obtenidas a partir de las vibraciones inducidas por las cargas ambientales en su condición normal de



operación. En el caso de puentes vehiculares, las vibraciones ambientales más frecuentes son las inducidas por la carga vehicular en movimiento y la carga inducida por el empuje del viento.

Cualquier variación en las propiedades mecánicas de la estructura inducirá cambios en sus vibraciones, los cuales serán reflejados en los parámetros dinámicos mencionados anteriormente. Algunos ejemplos prácticos de estos cambios son: el aumento de la masa sobre el puente por sobrecapas de asfalto o, variaciones en la rigidez de los elementos estructurales debido a deformaciones en el rango inelástico, daños en elementos o agrietamientos, y cambios en la condición de los apoyos.

A.3 Método de Identificación de Sistemas Estocásticos

El objetivo de las denominadas pruebas de vibraciones ambientales, análisis modal operacional o identificación de sistemas de solo salida, es la correcta identificación de los parámetros modales del puente a partir de múltiples mediciones de vibración. Los datos son recolectados por un sistema de adquisición que registra las aceleraciones experimentadas en una malla de puntos sobre el puente. Para su éxito, las herramientas matemáticas o técnicas de identificación deben ser robustas ante señales de ruido e interferencias presentes en los registros y capaces de discriminar los modos de vibración reales de los espurios.

De los métodos de identificación de sistemas existentes, se pueden clasificar en métodos en el dominio de frecuencias o en el dominio del tiempo, y también métodos no paramétricos o paramétricos. En el dominio de frecuencias son los métodos espectrales basados en la Transformada de Fourier, como el Espectro de Potencia o Densidad Espectral de Potencia ("Power Spectrum" o "Power Spectral Density" en inglés). Cuando son múltiples mediciones se utiliza comúnmente Descomposición en el Dominio de Frecuencias (FDD por sus siglas en inglés de "Frequency Domain Decomposition") que permite integrar las múltiples mediciones a través de la técnica de Descomposición de Valores Singulares. Los anteriores métodos también son denominados no-paramétricos ya que se basan en la Transformada de Fourier y no requiere de la definición de parámetros para su implementación; la forma para hallar las frecuencias modales consiste en selección de picos.



Por otro lado, de los métodos en el dominio del tiempo, se puede hablar del método de Identificación Estocástica del Subespacio (conocido como SSI por sus siglas en inglés, "Stochastic Subspace Identification"), el método clásico de Variable Instrumental aplicado al modelo Autorregresivo de Media Móvil (en inglés "AutoRegressive Moving Average", abreviados en ARMA), la técnica de Excitación Natural con Algoritmo de Realización de Sistemas Propios ("Natural Excitation Technique with Eigensystem Realization Algorithm" en inglés, abreviados en NExT-ERA), entre otros. Estos métodos son paramétricos ya que requieren de la definición, por ejemplo, del orden del sistema dinámico a identificar.

En el monitoreo de la condición estructural en el ámbito de ingeniería civil, el método Identificación Estocástica del Subespacio de sistemas lineales ha ganado territorio 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 (Liu-Kuan, et. al., 2012; Weng, et.al., 2008; Loh, et. al., 2012; Wei-Xin, et. al., 2004; Peeters, 2000; Pridman & Wilson, 2002; Basseville, et. al., 2001; Giraldo, et. al., 2009; van Overschee & de Moor, 1996).

El Método Estocástico Subespacial parte desde la ecuación de movimiento de un sistema dinámico invariante en el tiempo:

$$M\ddot{q}(t) + C_2\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t) = Lu(t) \quad (1)$$

donde M , C_2 y $K \in \mathfrak{R}^{n \times n} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son las matrices de masa, amortiguamiento y de rigidez respectivamente. Además

$q(t) \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de desplazamiento en tiempo continuo.

$\dot{q}(t)$ es el vector de velocidad.

$\ddot{q}(t)$ es el vector de aceleración con la misma dimensión que el vector de desplazamiento.

$F(t) \in \mathfrak{R}^n \in \mathbb{R}^n$ es el vector de la excitación externa.

$L \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ es la matriz de ubicación de entradas de excitación externa al sistema.

$u(t) \in \mathfrak{R}^m$ es el vector que describe m entradas como función del tiempo t .

n es el número de grados de libertad del sistema y m es el número de entradas.



La ecuación (2.1) puede ser discretizada en el tiempo, y después de una serie de manipulaciones matemáticas con la hipótesis de que se desconocen las excitaciones de entrada al sistema pero que estas pueden ser asumidas como un ruido blanco, se puede llegar al modelo conocido como el Modelo Estocástico de Espacio de Estados en Tiempos Discretos:

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (2)$$

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (3)$$

Donde $x_k = x(k\Delta t) = [q_k^T \dot{q}_k^T]^T$ es el vector del estado discreto que contiene los desplazamientos y velocidades muestreados (discretos) en el punto k ; Δt es el intervalo de tiempo en el muestreo; $y_k \in \mathfrak{R}^l$ representa las l mediciones discretas (es decir, l sensores) de salida del sistema; A es la matriz del sistema; C es la matriz de observación en tiempos discretos; $w_k \in \mathfrak{R}^{2n \times 1}$ y $v_k \in \mathfrak{R}^{l \times 1}$ son asumidos como un ruido espacialmente blanco de media cero. La relación que hay entre la matriz A en tiempos discretos y las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la ecuación del movimiento en tiempo continuo es la siguiente:

$$A = e^{A_c \Delta t} \quad (4)$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_2 \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2n \times 2n} \quad (5)$$

donde I es la matriz de identidad.

La matriz de observación C en el caso de que sólo hay mediciones de aceleración y después de la conversión a tiempos discretos, se define de la siguiente manera:

$$C = (-C_a M^{-1}K \quad -C_a M^{-1}C_2) \in \mathfrak{R}^{l \times 2n} \quad (6)$$

donde $C_a \in \mathfrak{R}^{l \times n}$ es la matriz de ubicación de los sensores de aceleración sobre los grados de libertad de la estructura en vibración.

Del análisis de valores propios (eigenvalores) de la matriz A se puede extraer la información de 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 mayor sea la cantidad de puntos de medición, más resolución espacial se dispone de la forma modal operacional experimental.

El método de Identificación Estocástica de Subespacios, que se llamará SSI de ahora en adelante, consiste en un algoritmo numérico de múltiples pasos que permite extraer de las múltiples mediciones simultáneas las matrices A y C , y luego de ellos, los parámetros modales de interés. El método SSI conducido por covarianzas (SSI-COV) es el método aplicado para el análisis de este puente y se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura A.2.

Como SSI-COV es un método numérico basado en descomposición matricial, en el proceso se podrían generar polos numéricos complejos y se podrían encontrar también modos debido a señales de ruido en los registros, 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 Loh et. al. (2012).

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 en laboratorio y en campo; para este último se puede mencionar el análisis modal operacional de la torre de televisión de Cantón (China) de 600 m de altura (Liu-Kuan, et.al., 2012; Loh, et. al. 2013), y el de un puente de arco (Loh, et. al. 2012).

Tanto las frecuencias naturales y las formas modales experimentales obtenidas con SSI-COV, podrían servir de indicadores para cuantificar el daño; el primero indica la severidad del daño y el segundo su ubicación, cuando pueden ser comparados con una referencia. Además, cualquier anomalía en las formas modales experimentales podría indicar directamente zonas de daño sin necesidad de una referencia.

Para la comparación de diferentes formas modales, se utiliza el criterio de aseguramiento modal ("Modal Assurance Criterion", MAC por sus siglas en inglés), que mide el grado de correlación que hay entre dos vectores de formas modales:

| | | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 48 de 61 |
|---------------------------------|---|-----------------|



$$MAC(u, v) = \frac{|u^T \cdot v|^2}{(u^T \cdot u)(v^T \cdot v)} \quad (7)$$

Donde u es el vector de forma modal experimental y v es el analítico, obtenido por ejemplo del modelo de elementos finitos.

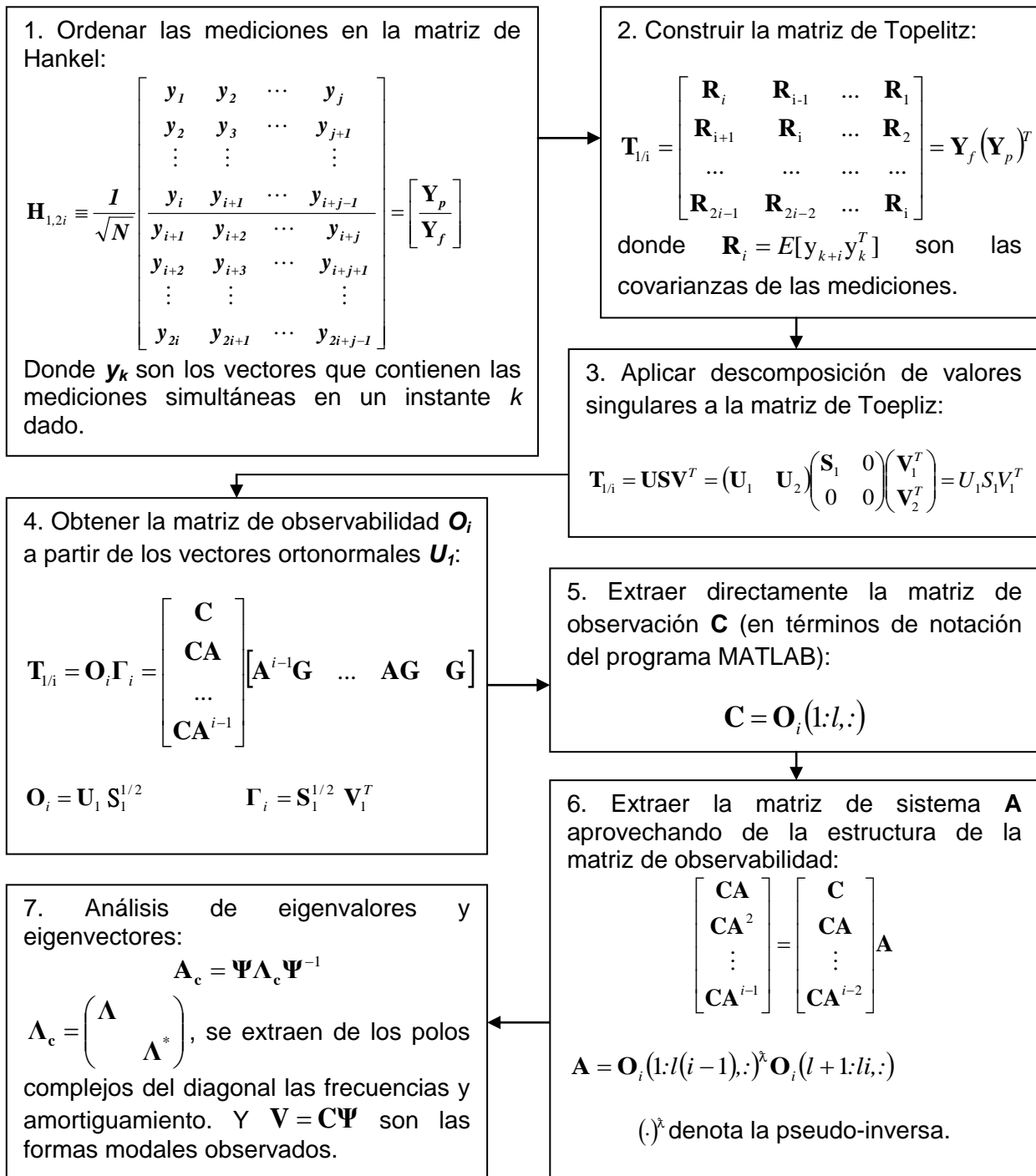


Figura A.2. Diagrama de flujo del método SSI-COV



A.4 Enfoques de monitoreo y frecuencia de toma de datos

En el caso de puentes nuevos, lo ideal es realizar un monitoreo y análisis modal una vez concluida la construcción de la obra, para obtener un marco de referencia. Posteriormente, realizar monitoreo periódico dependiendo de la importancia de la obra (por ejemplo, cada 2 años). Cambios importantes entre los parámetros modales obtenidos en el monitoreo del estado inicial y cualquier otro monitoreo posterior, son indicativo de daño probable.

Lo anterior también es recomendable para puentes que han sido reparados, reforzados o rehabilitados, para generar un registro histórico de la estructura después de la intervención. También, se podría realizar un monitoreo antes del inicio de las obras de intervención para evaluar el efecto de los trabajos de reforzamiento en el comportamiento de la estructura.

En el caso de puentes existentes que no se cuenta con el monitoreo inicial después de finalizar la construcción, la única forma para poder evaluar el estado de puente y estimar su grado de deterioro, es comparar con un modelo estructural analítico.

La modelación con elementos finitos se realiza con base en la información disponible del puente como planos y especificaciones, y el modelo resultante es considerado como la condición ideal y “sana” del puente.

Sin embargo, el método de los elementos finitos es un método numérico y acarrea por sí mismo errores de modelación. Por esta razón, deben ser examinados diferentes niveles de refinamiento del modelo analítico, y realizarse un estudio de sensibilidad y convergencia en cuanto a los parámetros modales analíticos para tomar en cuenta el nivel de incertidumbre incurrido en este método.

En todos los casos anteriores (puente nuevo, intervenido o existente) se recomienda realizar un monitoreo cada vez que la estructura se vea sometida a un evento extremo significativo como un sismo o una crecida del río.



A.5 Pruebas de carga

Una prueba de carga es la observación y medición de la respuesta de un puente sujeto a carga controlada y predefinida sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura. Las pruebas de carga pueden ser utilizadas para verificar el desempeño tanto de componentes como del sistema bajo la acción de una carga viva conocida, proveyendo una alternativa de metodología para evaluación analítica de la capacidad de carga del puente (AASHTO, 2011).

Las pruebas de carga se clasifican en dos tipos: pruebas de diagnóstico y pruebas de capacidad. Las pruebas de diagnóstico son realizadas para determinar la respuesta del puente ante cargas o para validar procedimientos analíticos o modelos matemáticos. Son utilizadas para mejorar el conocimiento acerca del comportamiento del puente y reducir incertidumbres relacionadas con las propiedades del material, condiciones de frontera, contribuciones de la sección transversal, efectividad de reparaciones, influencia de daño y deterioro, y otras variables similares. Estas pruebas incluyen la medición de los efectos de la carga en uno o varios miembros críticos del puente y la comparación de éstos efectos con los calculados utilizando un modelo analítico.

Las pruebas de capacidad se utilizan para establecer la máxima carga segura sobre el puente, donde el comportamiento se encuentra en el rango lineal elástico. En este caso, el puente es sujeto a cargas específicas y se realizan observaciones para determinar si el puente es capaz de soportar dichas cargas sin daño. Las cargas deben ser aplicadas en incrementos y el puente debe ser monitoreado para identificar de forma temprana cualquier indicio de agrietamiento o comportamiento en el rango no lineal.

Las pruebas estáticas se realizan con cargas estacionarias para evitar inducir vibraciones en la estructura, a diferencia de las pruebas dinámicas donde se utilizan cargas que inducen vibraciones en el puente. Por lo tanto, las pruebas de diagnóstico pueden ser estáticas o dinámicas, y en cambio, las pruebas de capacidad son realizadas en su mayoría de forma estática.

Algunas ventajas de las pruebas de carga son:

| | | |
|---------------------------------|---|-----------------|
| Informe No. LM-PIE-UP- M01-2017 | Fecha de emisión: 30 de octubre de 2017 | Página 52 de 61 |
|---------------------------------|---|-----------------|



- Proveen suficiente información para establecer un nivel de carga viva seguro para puentes existentes. En los casos de puentes donde no se dispone de información del proceso constructivo (planos “as-built”).
- En algunos casos, los cálculos teóricos de capacidad de carga resultan en bajas cargas vivas permisibles y las pruebas de carga pueden proveer una carga viva máxima permisible más realista.
- Puentes que han sido rehabilitados o reforzados a través de los años no pueden ser evaluados teóricamente de forma precisa debido a la interacción de varios elementos.
- Las pruebas de carga permiten confirmar la naturaleza de la distribución de carga. Los factores de distribución utilizados en diseño o en evaluación teórica de la capacidad de carga generalmente son aproximaciones conservadoras de la distribución real.
- El análisis de miembros estructurales con deterioro es complicado, en especial en miembros con deterioro avanzado. En este caso las pruebas de carga son una valiosa herramienta para identificar el comportamiento existente.
- Las pruebas de carga pueden ofrecer información del rango de esfuerzos y de los ciclos de carga actuando en el miembro.

Por lo tanto, el enfoque de las pruebas de cargas estáticas es la evaluación de la capacidad, seguridad y comportamiento del sistema o elementos estructurales, y requiere de un ambiente controlado y cargas controladas; mientras tanto, el monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales puede considerarse como una versión avanzada de pruebas de diagnóstico dinámicas, donde se trabaja en condiciones operacionales normales, y se emplea una malla densa de sensores de vibración y técnicas avanzadas de identificación de sistemas para detectar daños o anomalías, para al final, dar un diagnóstico del estado de “salud” del puente.



ANEXO B. MÉTODO EXPERIMENTAL

En la Figura B.1 se presenta un esquema conceptual general del monitoreo de condición estructural basado en vibraciones. Como se indicó anteriormente, el presente informe tiene como alcance los niveles 1 y 2 de la detección de daño: identificación y localización del daño. El diagrama también incluye los niveles 3 y 4 que no se encuentran dentro del alcance del presente informe.

La presente sección describirá de manera general el método experimental utilizado para realizar la prueba de vibración ambiental. Para las otras etapas que involucra el monitoreo basado en vibraciones el lector puede consultar las referencias bibliográficas.

El sistema de adquisición de datos utilizado es un sistema portátil diseñado para monitoreo y evaluación de puentes sometidos a vibraciones, que consiste en cinco maletas. La primera maleta se denomina “nodo usuario” y contiene un enrutador inalámbrico (router wi-fi) y una batería. Las cuatro maletas restantes contienen una unidad de adquisición de datos con procesador en tiempo real con módulos de GPS y de vibración, fuente de poder, y un nodo de señal inalámbrica (wi-fi) para la comunicación entre el nodo de usuario y cada maleta (Liu-Kuan, et. al, 2015a).

Las unidades de adquisición de datos se comunican de forma inalámbrica con el nodo de usuario mientras que los sensores de aceleración se conectan mediante cables a las unidades de adquisición de datos, convirtiéndolo en un sistema híbrido, o sea, que se comunica con cables e inalámbricamente de forma simultánea. La longitud de los cables es de 23 metros.

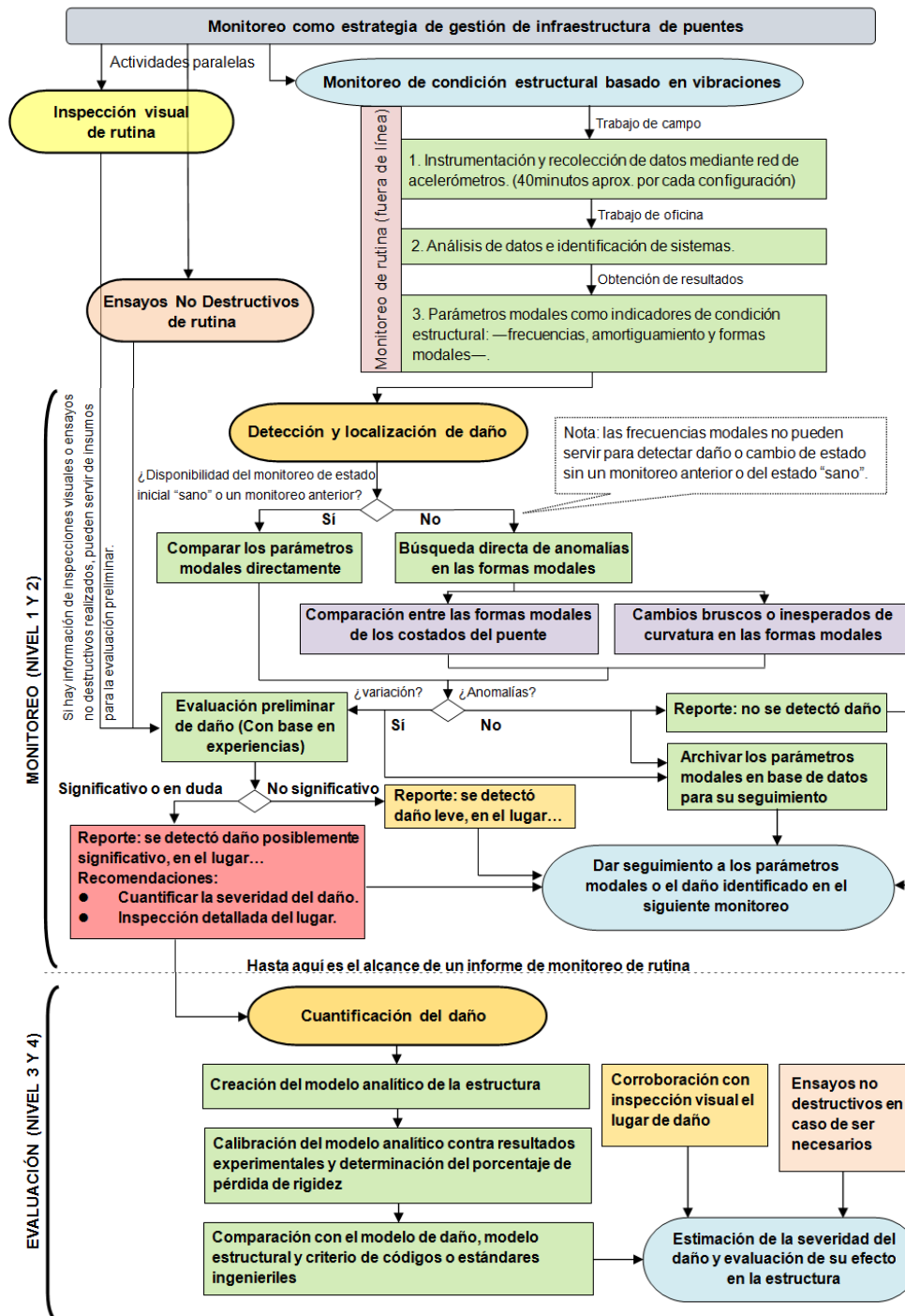


Figura B.1. Diagrama de flujo del monitoreo de condición estructural basado en vibraciones



Se obtienen registros de aceleración inducida por las cargas operacionales sobre el puente en la dirección vertical, utilizando sensores de aceleración colocados a lo largo de los costados del puente, preferiblemente las aceras, en puntos definidos previamente. En la Figura B.2 se presenta una fotografía de la toma de datos de aceleración de un puente, sin necesidad de interrumpir del tránsito vehicular.

Para definir los puntos de medición donde se colocarán los sensores se debe tener en cuenta la longitud del puente a monitorear. Por ejemplo, un puente con una longitud entre 15 y 50 metros generalmente requiere dos unidades de adquisición de datos para ser monitoreado, a menos que se requiera aumentar la densidad de sensores. Un puente entre 55 y 100 metros requiere de cuatro unidades de adquisición de datos registrando datos simultáneamente.



Figura B.2. Ejemplo de toma de datos sobre las aceras de un puente, nótese que no es necesaria la interrupción del tránsito vehicular



Debido a que la capacidad máxima del sistema para trabajar con las cuatro unidades de adquisición de datos simultáneamente es de aproximadamente 100 metros de longitud, en puentes que superan dicha longitud se debe realizar el registro de datos de aceleración en varias configuraciones.

El uso de varias configuraciones obedece a que se excede la capacidad del sistema o se requiere un mayor nivel de detalle de las formas modales y se utiliza una malla de sensores más densa (Peeters, 2000).

En la Figura B.3 y Figura B.4 se presenta a modo de ejemplo la distribución y numeración de sensores colocados sobre la estructura de un puente que requiere ser abarcado con 2 configuraciones. Se dividió el primer y segundo tramo de la estructura definiendo 30 y 28 puntos respectivamente.

Nótese que tanto en la configuración 1 como en la configuración 2 se colocan sensores en los puntos 14, 15, 41 y 42, siendo estos los nodos de empate para poder graficar la totalidad de la formas modales a lo largo del puente.

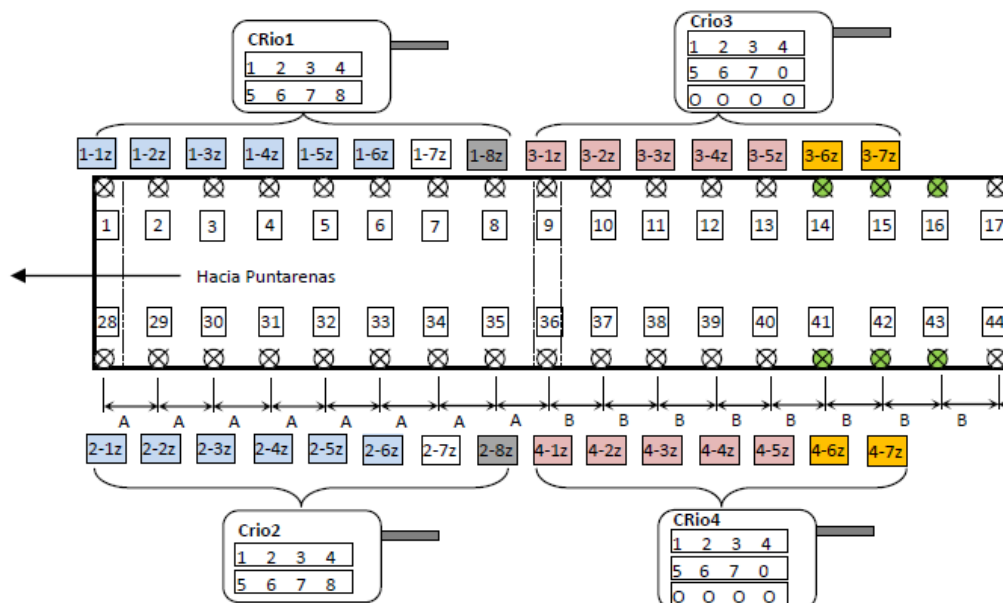


Figura B.3. Ejemplo de distribución de sensores y unidades de adquisición de datos en la primera configuración de un puente

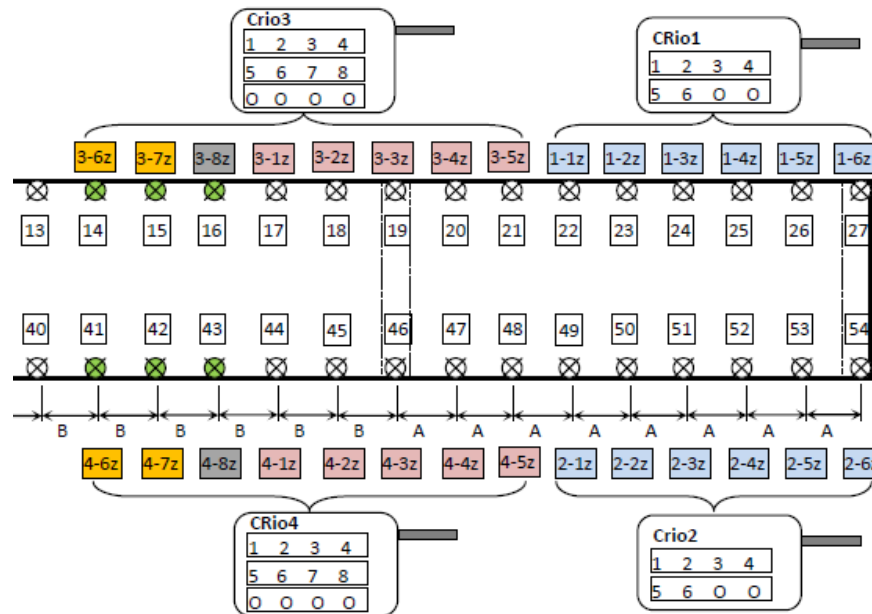


Figura B.4. Ejemplo de distribución de sensores y unidades de adquisición de datos en la segunda configuración de un puente

Debido a que se utiliza comunicación inalámbrica entre las unidades de adquisición de datos, la sincronización de los datos registrados es esencial para poder implementar correctamente el método SSI. Los datos registrados son sincronizados por GPS, y el algoritmo de adquisición de datos y sincronización fue implementado y verificado previamente por el equipo investigador. Para propósitos de validación del sistema, se realizaron pruebas de sincronización en laboratorio y posteriormente en campo. Para un mayor conocimiento de la conceptualización, desarrollo y validación de todo el sistema portátil de monitoreo, se puede referir al informe de investigación LM-PI-UP-07-2015 (Liu-Kuan, et. al., 2015a).

En la Figura B.5 se presenta, a modo de ejemplo, los datos de cuatro registros de aceleración obtenidos en laboratorio de un modelo experimental de una estructura metálica sencilla de tres niveles utilizada en la validación de la sincronización de la adquisición de datos. Los registros corresponden a cuatro sensores instalados en una estructura sencilla en oscilación libre. Cada uno de los cuatro sensores fue conectado a una unidad de adquisición de datos independiente y en el acercamiento se observa el nivel de sincronización de las cuatro unidades de adquisición de datos (Liu-Kuan, et. al, 2015a).

La captura de datos en el campo se realiza por periodos definidos y divididos en bloques de registros de 5 minutos para las todas las configuraciones definidas y con el tránsito en operación. La tasa de muestreo en campo es de 1652 Hz (datos por segundo), y los datos obtenidos en campo son llevados a la oficina para su análisis, donde se obtienen las frecuencias, formas modales y amortiguamiento correspondientes a cada modo de oscilación operacional identificado de la estructura. Los datos adquiridos deben ser revisados en forma exhaustiva canal por canal. Además, los registros se pasan por un filtro paso bajo de Butterworth para que estén en el rango de frecuencias que favorecen la identificación de los modos de vibración del puente.

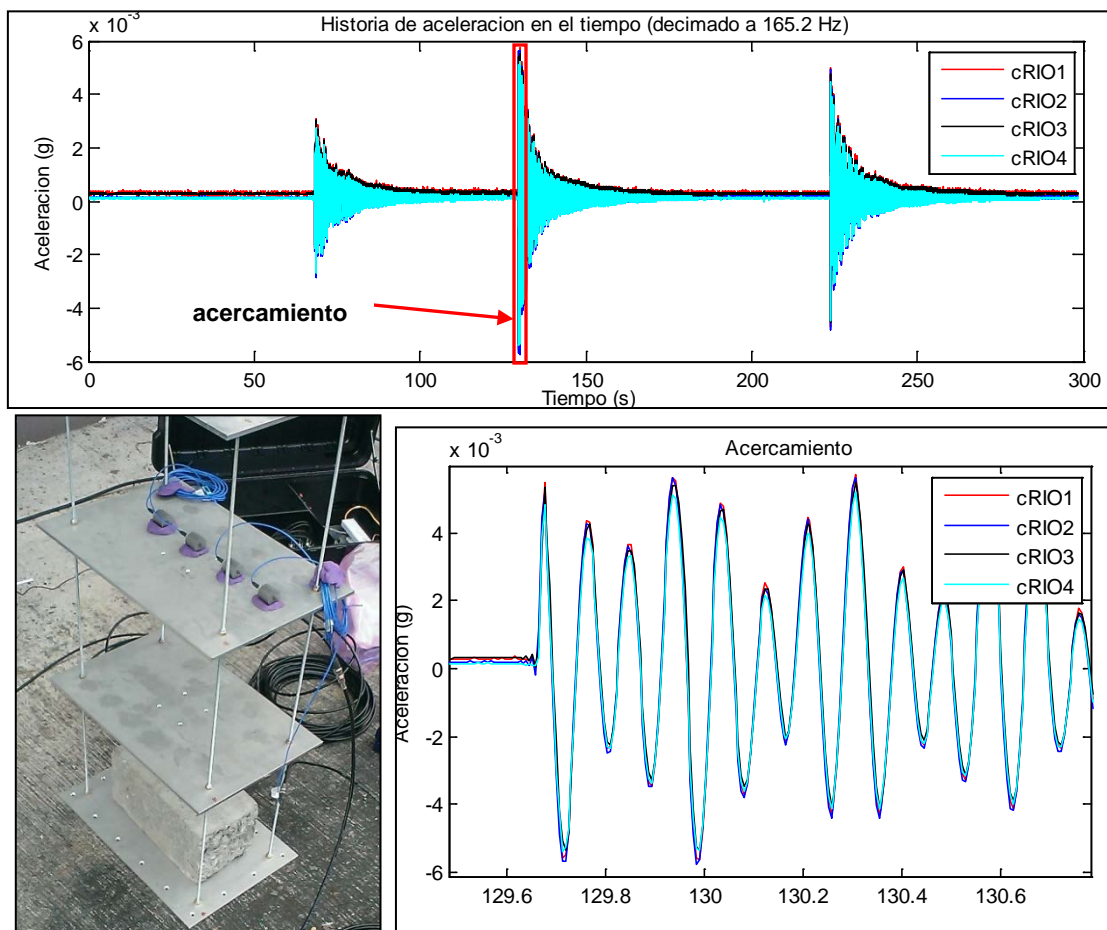


Figura B.5. Ejemplo de cuatro registros de aceleración sincronizados provenientes de cuatro sensores instalados sobre una estructura sencilla en movimiento libre. Abajo a la derecha se presenta un acercamiento de un tramo de un segundo

Fuente: Liu-Kuan, et. al, 2015a

Las frecuencias naturales de la estructura son determinadas gráficamente a partir del diagrama de estabilización. Únicamente aquellos modos (parámetros modales) que se estabilizan conforme aumenta el orden de la matriz de Toeplitz se tomarán en cuenta, caso contrario podría tratarse de modos transitorios o modos no bien excitados de los que no se obtendrá buena calidad y certeza en su identificación. En la Figura B.6 se presenta, a manera de ejemplo, el diagrama de estabilización correspondiente a la estructura utilizada en laboratorio (el modelo sencillo de 3 niveles presentado en la Figura B.5) para la validación de sistema de adquisición de datos.

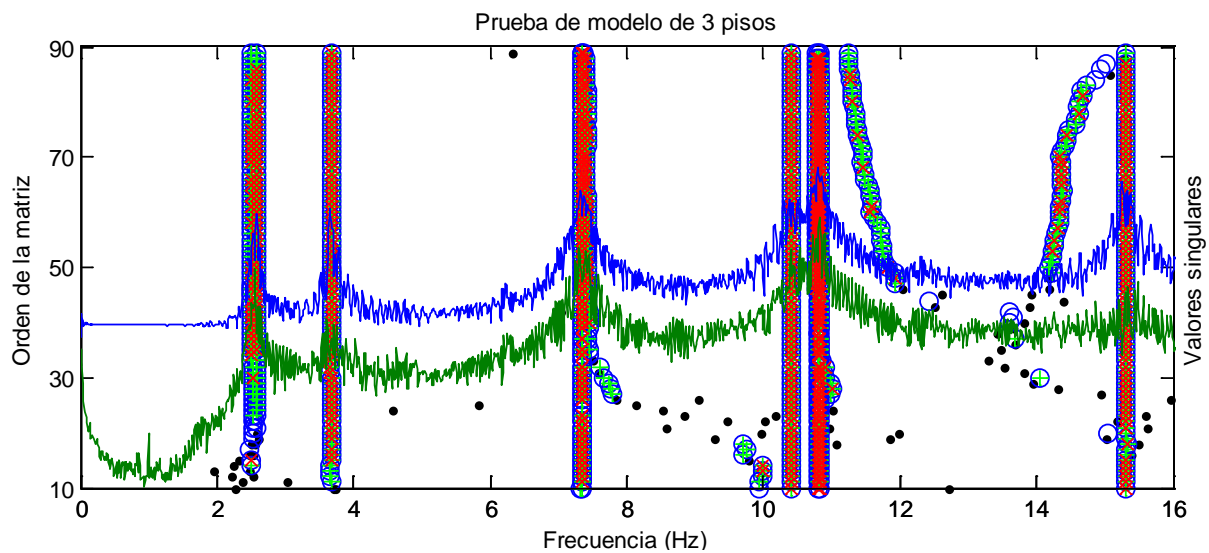


Figura B.6. Ejemplo de diagrama de estabilización de frecuencias correspondiente a la estructura sencilla mostrada en la Figura B.5

Fuente: Liu-Kuan, et. al, 2015a

Además, superpuesto al diagrama de estabilización de la Figura B.6 se encuentra el resultado del método de Descomposición en el Dominio de Frecuencias ("Frequency Domain Decomposition", FDD por sus siglas en inglés), el cual también es un método de subespacios en el dominio de la frecuencia que consiste en aplicar Descomposición de Valores Singulares de la matriz de densidad espectral cruzada. Los dos primeros valores singulares de la matriz descompuesta (representados con líneas azul y verde) son graficados en conjunto con el diagrama de estabilización permitiendo visualizar las señales adquiridas y sus componentes armónicos.



La combinación gráfica del diagrama de estabilización con FDD, tal como se presenta en la Figura B.6 permite la identificación de los modos operacionales estables de forma más clara. Finalmente, después de identificar los modos estables, se procede a graficar las formas modales operacionales de la estructura para identificar anomalías en el comportamiento dinámico de la estructura.