

Monitoreo de salud estructural del puente sobre río Virilla, Ruta Nacional 27

Structural Health Monitoring of the Bridge over Virilla River, National Route 27

**Hellen Garita Durán, Profesora instructora Escuela de Ingeniería Civil UCR; e-mail: hellen.garita@ucr.ac.cr*

***Yi Cheng Liu Kuan, Profesor adjunto Escuela de Ingeniería Civil UCR; e-mail: yi.liukuan@ucr.ac.cr*

****Pablo Agüero Barrantes, Estudiante de doctorado en UConn; e-mail: pagero80@gmail.com*

Resumen:

El Monitoreo de la Salud Estructural (MSE) basado en las vibraciones constituye una estrategia novedosa para la gestión de la infraestructura de puentes complementaria con las tradicionales inspecciones visuales. El MSE permite detectar y ubicar daños a temprana edad y cuantificar el deterioro de la estructura. Esto es posible ya que los cambios en las propiedades de masa y rigidez de la estructura se traducen en cambios en las propiedades dinámicas de la estructura como son las frecuencias, el amortiguamiento y las formas modales.

Para este propósito, se ha desarrollado en nuestro país un sistema portátil de monitoreo constituido por una red de acelerómetros que recolectan señales de vibración en los puentes a través de 4 unidades de adquisición sincronizados por medio de GPS, el cual fue validado en laboratorio y en campo. Los datos son procesados luego en la oficina, donde mediante el método de identificación de sistemas en el dominio del tiempo denominado Método de Subespacios Estocásticos, y en combinación con el método espectral denominado Descomposición en Dominio de Frecuencias, las propiedades dinámicas pueden ser identificados.

La metodología anterior ha sido implementada en diversos puentes en Costa Rica, dentro de ellos se encuentra el puente sobre río Virilla, Ruta Nacional 27, caso donde se detectaron y se localizaron daños en el puente directamente a partir de la observación y comparación cualitativa de las formas modales identificadas, resultados que se detallarán en este artículo.

Palabras clave: puente, análisis de datos, proceso aleatorio, vibración, análisis numérico

33

34

Abstract:

35

Vibration-based structural health monitoring constitutes a novel strategy for the management of bridge infrastructure, which in addition to being complementary to traditional visual inspections, allows detecting and locating damage at an early age and quantifying the deterioration of the structure. This is possible because the changes in mass and stiffness of a structure means changes in the dynamic properties of the structure such as frequencies, damping and mode shapes.

39

40

41

A portable monitoring system consisting of a network of accelerometers that collect vibration signals on the bridges through 4 synchronized acquisition units via GPS was developed for this purpose, which was validated in laboratory and in the field. The collected data can be processed after in the office, through the time domain system identification method called Stochastic Subspace Identification (SSI), and in combination with the spectral method called Frequency Domain Decomposition, dynamic properties can be identified.

44

45

The mentioned methodology has been implemented in various bridges in Costa Rica, one of them is the bridge over the Virilla River, National Route 27, in which damage was detected and located directly from the observation and qualitative comparison of the identified mode shapes, results of what will be detailed in this article.

48

49

50

Keywords: bridges, data analysis, stochastic processes, vibrations, numerical analysis.

51

52

53

1. INTRODUCCIÓN

54

Las vibraciones son un fenómeno físico presente en todas las estructuras o sistemas mecánicos. En una estructura vibratoria pueden caracterizarse a través de los denominados parámetros dinámicos o modales, que, en el contexto de la descomposición modal, son: las frecuencias, el amortiguamiento y las formas modales, los cuales son en función de las propiedades mecánicas tales como la masa y la rigidez. Si la masa de la estructura no varía en el tiempo, el cambio de las frecuencias sería indicativo de una reducción en la rigidez; asimismo, un cambio de rigidez focalizado en algún punto de la estructura provocará cambios en la curvatura de las formas modales (Farrar

55

56

57

58

59

60

61

62

63 and Jauregui, 1998). Entonces, si se es posible extraer experimental y directamente los parámetros modales de las
64 vibraciones del puente, una comparación de las frecuencias identificadas en 2 tiempos distintos permite detectar
65 si hubo cambios en la rigidez durante el lapso, y en caso de no contar con la medición en el estado inicial o “sano”
66 de la estructura, se podría comparar con las de un modelo analítico asumido como la condición ideal. Por otro
67 lado, las formas modales al poseer información espacial permiten localizar daños ya sea haciendo la comparación
68 entre 2 tiempos o identificando curvaturas o cambios de pendiente inesperados en la forma modal.

69 La identificación de los parámetros dinámicos de un sistema a partir de los datos crudos recolectados en
70 campo es una disciplina denominada identificación de sistemas, y en el caso específico del análisis de la variación
71 de las frecuencias modales, incremento del amortiguamiento o cambios en las formas modales de una estructura
72 debido al daño, bajo condiciones operacionales, recibe el nombre de análisis modal operacional.

73 Para la implementación del monitoreo de salud estructural basado en vibraciones en Costa Rica, se requiere
74 primero, del desarrollo de una plataforma tecnológica para la adquisición de datos. Como producto del programa
75 de monitoreo de puentes en sitio de la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural (PIE) del
76 LanammeUCR y bajo el marco de las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la Ley 8114, se desarrolló
77 un sistema de monitoreo portátil, basado en una red de acelerómetros y 4 unidades de adquisición de datos, junto
78 con programas de cómputo que automatiza y agiliza el procesamiento y análisis de datos (Liu-Kuan et al., 2015a),
79 los cuales fueron validados en diferentes puentes del país, siendo uno de ellos el puente sobre el río Virilla de la
80 Ruta Nacional 32 (Liu-Kuan et al., 2015b). Por otro lado, es necesario la generación de criterios e indicadores para
81 la detección y localización de daño, así como experiencias para la interpretación de resultados para diferentes
82 tipologías de puentes y es por ellos que se han realizado análisis de diferentes tipos de puentes siendo el puente
83 sobre el río Virilla de la Ruta Nacional No. 27 uno de los analizados.

84 **1.1 Objetivos**

- 85 ○ Introducir al concepto de Monitoreo de Salud Estructural basado en vibraciones.

- 86 ○ Mostrar los métodos de identificación utilizados para el análisis dinámico de puentes por el programa
- 87 de monitoreo de la condición estructural de puentes de la Unidad de Puentes del LanammeUCR.
- 88 ○ Ejemplificar la aplicación del sistema de monitoreo portátil en el puente sobre el río Virilla en la Ruta
- 89 Nacional No. 27.
- 90 ○ Mostrar los hallazgos de la inspección visual del puente, realizada con base en los resultados
- 91 obtenidos de los métodos experimentales.

92 **2 METODOLOGÍA**

93 El Monitoreo de la Salud Estructural se refiere a la implementación del “proceso en el cual las estrategias de

94 detección de daños son implementadas en las estructuras aero-espaciales, mecánicas y civiles” (Sohn, et. al., 2002).

95 En el caso de las estructuras de puente, “el daño se puede definir como los cambios en los materiales o en la

96 geometría del sistema, tales como los cambios en las propiedades mecánicas del material, condiciones de frontera

97 y la conectividad del sistema, los cuales afectan adversamente el desempeño del mismo” (Farrar, Worden, 2007).

98 **2.1 Monitoreo de Salud Estructural basado en vibraciones**

99 El Monitoreo de Salud Estructural basado en vibraciones se enfoca en estudiar el comportamiento dinámico

100 de la estructura y relacionarlo con daños que puedan existir en la misma. La premisa es que los cambios en la

101 rigidez de la estructura (masa, inercia, condiciones de apoyo) son proporcionales a sus parámetros dinámicos.

102 El monitoreo basado en vibraciones es un método indirecto y global porque las mediciones de vibraciones no

103 pueden compararse directamente con algún valor de referencia, sino que a través de métodos de procesamiento de

104 señales o métodos denominados como “métodos de identificación de sistemas”, se extraen los parámetros de

105 interés de la estructura como un todo, y, por ende, es llamado un método global.

106 En obras de infraestructura civil, rara vez el interés es estudiar el valor medido tal cual de la historia de

107 vibraciones registrada en campo o compararlo contra alguna referencia (sea en términos de deformación, velocidad

108 o aceleración); el análisis modal operacional es el método de identificación de sistemas comúnmente empleado

109 para analizar estas señales vibratorias y extraer frecuencias y formas modales, así como valores de
110 amortiguamiento, siendo estas últimas propiedades dinámicas de la estructura como un todo.

111 **2.2 Método de identificación de subespacios estocásticos**

112 El método de identificación de subespacios estocásticos (Stochastic Subspace Identification, SSI por su
113 acrónimo en inglés) es un método de identificación de sistemas lineales en el dominio del tiempo que ha ganado
114 territorio en el ámbito de ingeniería civil por su robustez y eficacia. El método cuenta con una base matemática
115 rigurosa y experiencias exitosas de su aplicación a diferentes tipos de obras de infraestructura civil que se puede
116 encontrar en numerosas publicaciones técnicas internacionales (Liu et al., 2012; Pridham and Wilson, 2002;
117 Peeters, 2000).

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

$$120 \quad M\ddot{q}(t) + C_2\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t) = Lu(t) \quad (1)$$

121 donde M, C_2 y $K \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ son las matrices de masa, amortiguamiento y de rigidez respectivamente. Además:
122 $q(t) \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de desplazamiento en tiempo continuo, $\dot{q}(t)$ es el vector de velocidad, $\ddot{q}(t)$ es el vector de
123 aceleración con la misma dimensión que el vector de desplazamiento, $F(t) \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de la excitación
124 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
125 que describe m entradas como función del tiempo t , n es el número de los grados de libertad y m es el número de
126 entradas.

127 La ecuación (1) puede ser discretizada en el tiempo y luego de una serie de manipulaciones matemáticas con
128 la hipótesis de que al sistema no se le puede conocer las excitaciones de entrada pero que estas pueden ser asumidas
129 como ruido blanco, se puede llegar al modelo conocido como “el Modelo Estocástico de Espacio de Estados en
130 Tiempos Discretos”:

$$131 \quad x_{k-1} = Ax_k + w_k \quad (2)$$

132
$$y_k = Cx_k + v_k \quad (3)$$

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

139
$$A = e^{A_c \Delta t} \quad (3), \quad A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_2 \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2n \times 2n} \quad (4)$$

140 donde I es la matriz de identidad.

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

143
$$C = (-C_a M^{-1}K \quad -C_a M^{-1}C_2) \in \mathfrak{R}^{l \times 2n} \quad (5)$$

144 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
 145 estructura en vibración.

146 Del análisis de valores propios (*eigenvalores*) de la matriz A se puede extraer la información de las frecuencias
 147 naturales de vibración, así como los amortiguamientos de los modos excitados durante las mediciones; mientras
 148 que de la matriz de observación C multiplicada por los vectores propios (*eigenvectores*) de la matriz A se obtendrá
 149 la forma modal operacional observada en los puntos de medición. Por esta razón, mientras mayores puntos de
 150 medición haya, más resolución espacial se dispone de la forma modal operacional experimental.

151 El método de Identificación de subespacios estocásticos que se llamará SSI de ahora en adelante, consiste en
 152 un algoritmo numérico de varios pasos que permite extraer de las múltiples mediciones simultáneas las matrices
 153 A y C , y luego de ellos, los parámetros modales de interés. El método SSI basado en covarianzas (SSI-COV) es el
 154 método aplicado para el análisis de este puente y se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 1.

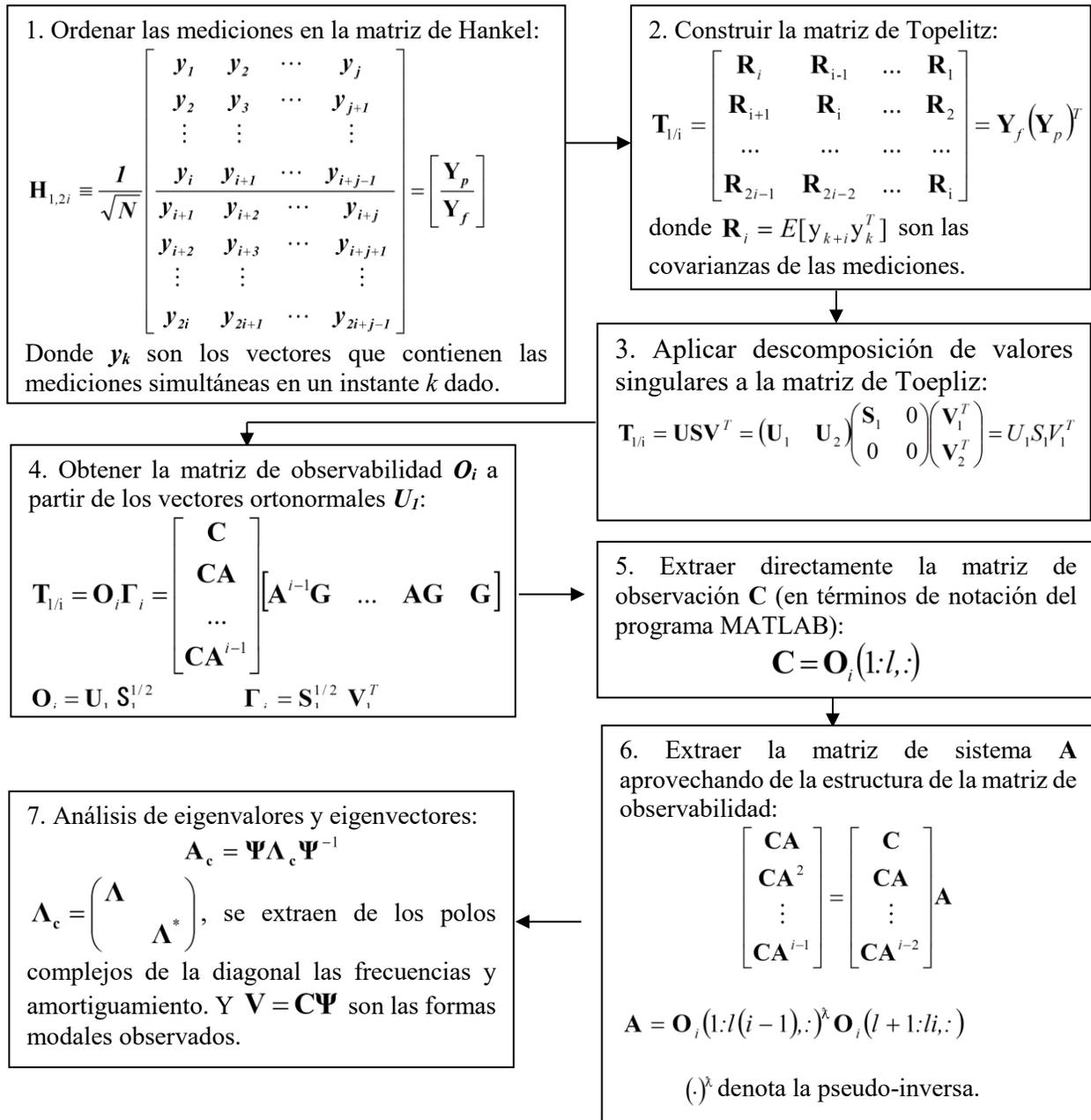


Figura 1. Diagrama de flujo del método SSI-COV

155

156

157

158

159

160

161

Como SSI-COV es un método numérico basado en descomposición matricial, en el proceso se podría generar polos numéricos complejos y se podría 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).

162 El método SSI-COV junto con la implementación de diagrama de estabilización es programado en MATLAB
163 y ha sido utilizado en diversos trabajos de investigación en laboratorio y en campo; para este último se puede
164 mencionar el análisis modal operacional de la torre de televisión de Cantón (China) de 600 m de altura (Liu-Kuan,
165 et.al., 2012; Loh, et. al. 2013), y el de un puente de arco (Loh, et. al. 2012).

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

$$169 \quad MAC(u, v) = \frac{|u^T \cdot v|^2}{(u^T \cdot u)(v^T \cdot v)} \quad (6)$$

170 donde u es el vector de forma modal experimental y v es el analítico.

171 **2.3 Descomposición en el dominio de frecuencias**

172 Cuando existen múltiples mediciones simultáneos de vibraciones, el método Descomposición en el Dominio
173 de Frecuencias (FDD por su acrónimo en inglés de “Frequency Domain Decomposition”) es empleado
174 comúnmente para extraer un único espectro que resuma el contenido de frecuencias de las múltiples mediciones.
175 El método consiste en calcular tanto los autoespectros (el Espectro de Potencia para cada canal en sí) así como los
176 espectros de potencia cruzados entre diferentes canales de medición con base en promedios de las transformadas
177 rápidas de Fourier, los cuales son ordenados en la forma de una matriz cuadrada del tamaño de l sensores
178 denominada también la matriz de densidad espectral cruzada, a la cual se le aplica la Descomposición de Valores
179 Singulares. Un gráfico que muestra la variación de los valores singulares en función de la frecuencia resultaría en
180 un espectro de frecuencias de síntesis de todas las mediciones. Al contrario que el SSI-COV, este es un método
181 no-paramétrico, ya que se basa en la Transformada de Fourier y no requiere de la definición de parámetros para
182 su implementación; la forma para hallar las frecuencias modales consiste en selección de picos.

183 **2.4 Descripción del puente en estudio e instrumentación**

184 El puente se ubica en la Ruta Nacional No.27 y cruza el río Virilla. La ruta clasifica como primaria y tiene un
185 tránsito promedio diario de 64601 vehículos por día (medidos en el año 2012) en la sección de control donde se
186 ubica el puente, según el Anuario de tránsito 2015, publicado por la Dirección de Planificación Sectorial del
187 MOPT. La figura 2 muestra una fotografía del puente estudiado.



188

Figura. 2. Puente sobre río Virilla, Ruta Nacional 27.

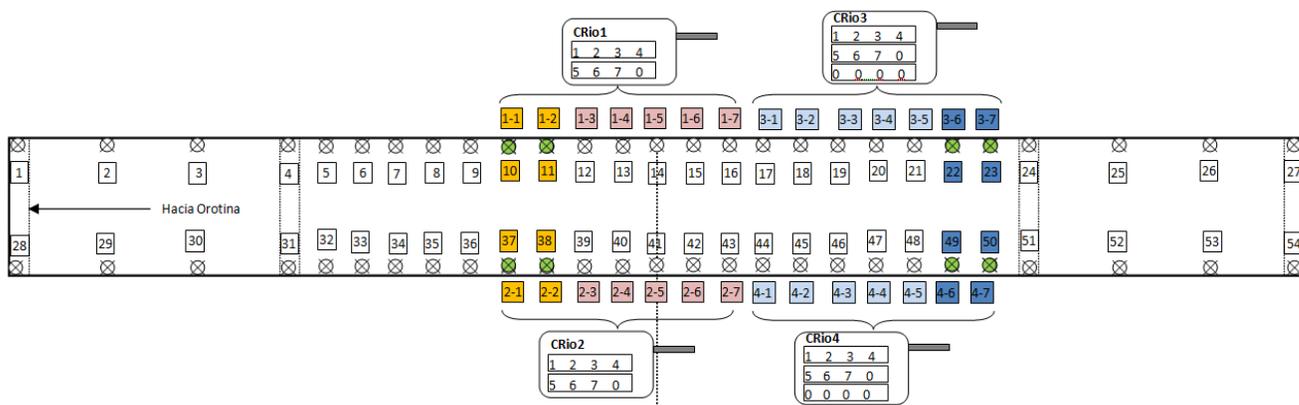
189

190 El puente mide 252,9 m medido entre las juntas de los extremos y un ancho total de 12,3 m, es de un solo
191 tramo y de alineación recta. Posee 2 carriles, 1 cada sentido, la superestructura es viga tipo cajón de concreto
192 preesforzado con la pared superior de la misma fungiendo como el tablero. Los bastiones 1 y 2 son del tipo voladizo
193 de concreto reforzado conectado a la viga cajón rellena (contrapeso), mientras tanto, los apoyos sobre los bastiones
194 1 y 2 son de tipo disco confinado.

195 El puente cuenta con un historial de inspecciones visuales empezando con el informe de Quirós et al. 2011,
196 donde se consideró el puente en estado regular por los agujeros observados en la losa de concreto y por los
197 problemas que presentaba la junta de expansión sobre el bastión del acceso noroeste. El último informe fue en
198 mayo del 2017 (Agüero-Barrantes et al. 2017), donde se concluyó que el estado de conservación del puente es
199 deficiente, lo anterior principalmente debido al estado de conservación del tablero y los apoyos.

200 Se instrumentó el puente con sensores de aceleración colocados a lo largo de los costados del puente, y se
201 registraron las vibraciones inducidas por el tránsito vehicular en la condición operacional, sin necesidad de

202 interrumpir del tránsito vehicular. Debido a la longitud del puente se debió realizar el registro de datos de
 203 aceleración en tres configuraciones y dejando sensores de referencia para el empare de las formas modales
 204 obtenidas de cada configuración, técnica que se denomina “sensores ambulantes” (Peeters, 2000), ya que la
 205 longitud máxima que puede abarcar el sistema es de aproximadamente 100 m. En la figura 3 se muestra ejemplo
 206 de la configuración 2 empleada para abarcar la parte central del puente, en total son 54 nodos de medición. El
 207 registro de los datos crudos de aceleración vertical de puente se realizó en bloques de 300 s, a una tasa de muestreo
 208 de 1652 Hz. Los datos son decimados luego, a tasas de muestreo de 13,77 Hz y 8,26 Hz para facilitar la detección
 209 de modos de vibración de la estructura asociados a frecuencias bajas para el método SSI-COV debido a que es un
 210 método del dominio del tiempo.



211

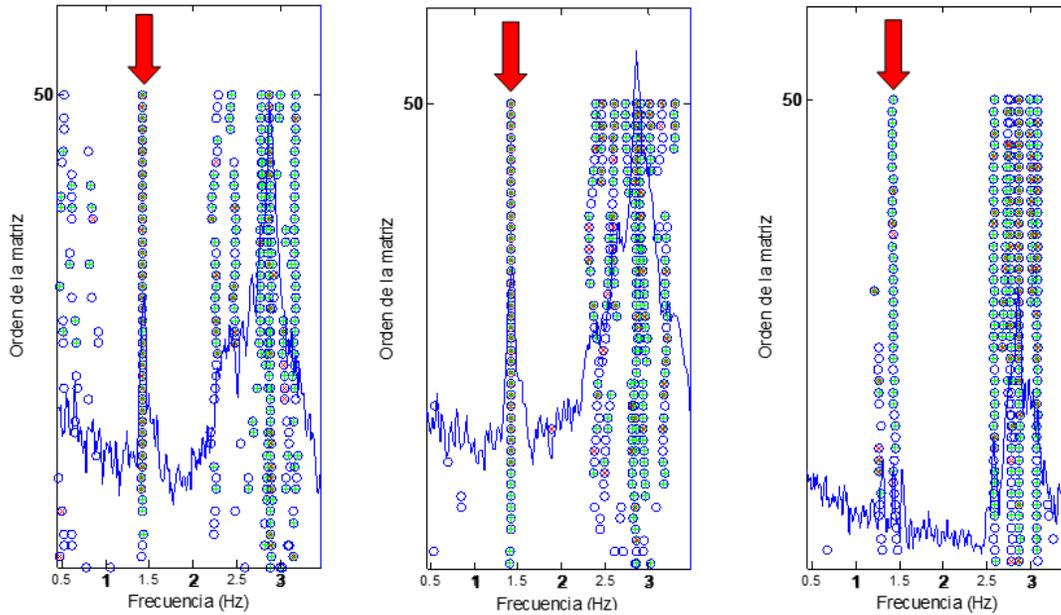
212 Figura. 3. Ejemplo de distribución de sensores en configuración 2 del puente sobre río Virilla, Ruta Nacional 27.

213 **3. RESULTADOS**

214 **3.1 Resultados de los métodos experimentales**

215 En la Figura 4 se presentan ejemplo de los diagramas de estabilización para el modo fundamental del puente
 216 que resultan del análisis de tres diferentes bloques de registros con una decimación de la frecuencia de muestreo
 217 de hasta 8,26 Hz y asignando un orden del sistema de 50. Superpuesto al diagrama de estabilización se presenta
 218 con una línea azul, el primer valor singular obtenido con el método FDD. Un diagrama se considera estable y se
 219 grafica con círculo azul “o” si la diferencia de frecuencia es menor a 1%, con un “+” celeste, si la variación en

220 forma modal es menor a 3% y con un “x” rojo si el cambio en amortiguamiento es menor a 5%, todo lo anterior
 221 comparando resultados obtenidos de la matriz de orden n y n-1. La flecha roja indica el modo fundamental
 222 identificado. Conf. 1 Bloque 6 Conf. 2 Bloque 4 Conf. 3 Bloque 5



223
 224 Figura. 4. Diagramas de estabilización y primer valor singular del método FDD para tres diferentes configuraciones y
 225 bloques de datos.

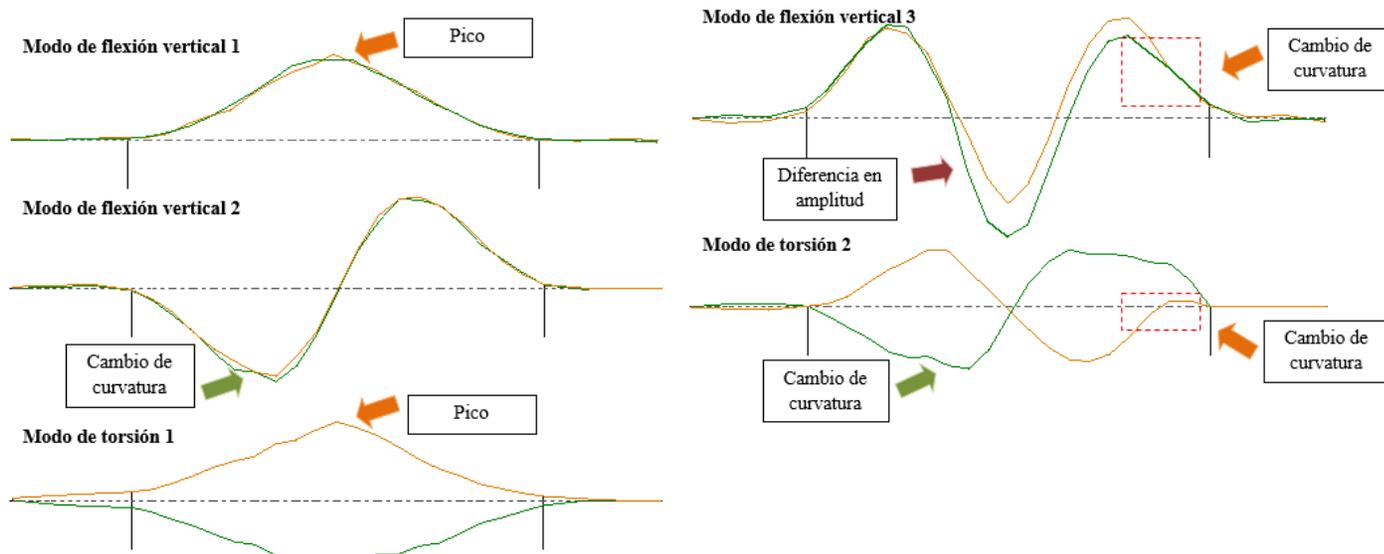
226 En la tabla 1 se presenta el valor mínimo, máximo y el promedio de las frecuencias correspondientes a los
 227 modos identificados y la cantidad de veces que estos fueron encontrados en los diagramas de estabilización y
 228 espectros de FDD.

229 Tabla 1. Resumen de las formas modales operacionales identificadas.

Modo	Frecuencia (Hz)			Cantidad de veces identificado
	Mínimo	Promedio	Máximo	
Flexión vertical 1	1,41	1,43	1,44	21
Flexión vertical 2	2,66	2,89	3,10	59
Torsión 1	4,62	4,69	4,87	29
Flexión vertical 3	4,95	5,00	5,05	16
Torsión 2	7,32	7,40	7,49	7

230 En la Figura 5 se presentan las formas modales con vista en elevación de los modos identificados. Las
 231 líneas naranjas representan el costado suroeste o aguas abajo del puente, mientras que las líneas verdes representan
 232 el costado noreste o aguas arriba. Cabe mencionar que las coordenadas de las formas modales experimentales de

233 los nodos son extraídas directamente de los registros de aceleración por el método SSI-COV, y no se basa en un
 234 análisis con modelos analíticos, por lo tanto, son uno de los resultados más importantes para la detección de daño
 235 en forma directa.



239 Figura. 5. Vista en elevación de formas modales identificadas, la línea naranja representa el costado aguas abajo del
 240 puente (sureste) y la verde, el costado aguas arriba (noreste).

241 Nótese algunas anomalías en las formas modales en el costado suroeste (aguas abajo). Se observa un cambio de
 242 curvatura cerca del nodo 49 (ver forma modal del modo de flexión vertical 3 y modo de torsión 2) y en el nodo 41
 243 (ver forma modal del modo de flexión vertical 1 y modo de torsión 1); mientras que en el costado aguas arriba
 244 (líneas verdes) se presenta un cambio de curvatura entre los nodos 9 y 12 (ver forma modal del modo de flexión
 245 vertical 2 y del modo de torsión 2).

246 Específicamente sobre la anomalía detectada cerca del nodo 49, se deduce que debe de haber daño o un defecto
 247 constructivo porque: 1. la amplitud del tercer modo de flexión del costado aguas abajo es mayor y difiere del otro
 248 costado a partir del nodo 49 hasta el nodo 38, 2. en este mismo nodo 49 y sus nodos colindantes se da un cambio
 249 de curvatura totalmente contrario a lo esperado, 3. considerando el hecho de que la susodicha anomalía no se
 250 evidencia en los modos fundamentales como el primer modo de flexión y de torsión, los que tienen una relación
 251 directa con la deformada de la estructura, y se repite, más bien, en los modos superiores como el tercer modo de
 252 flexión y el segundo modo de torsión con frecuencias de vibración de 5,00 Hz y 7,40 Hz respectivamente y que
 253 son más sensibles al daño, se deduce que dicha anomalía no tiene gravedad suficiente como para alterar los modos

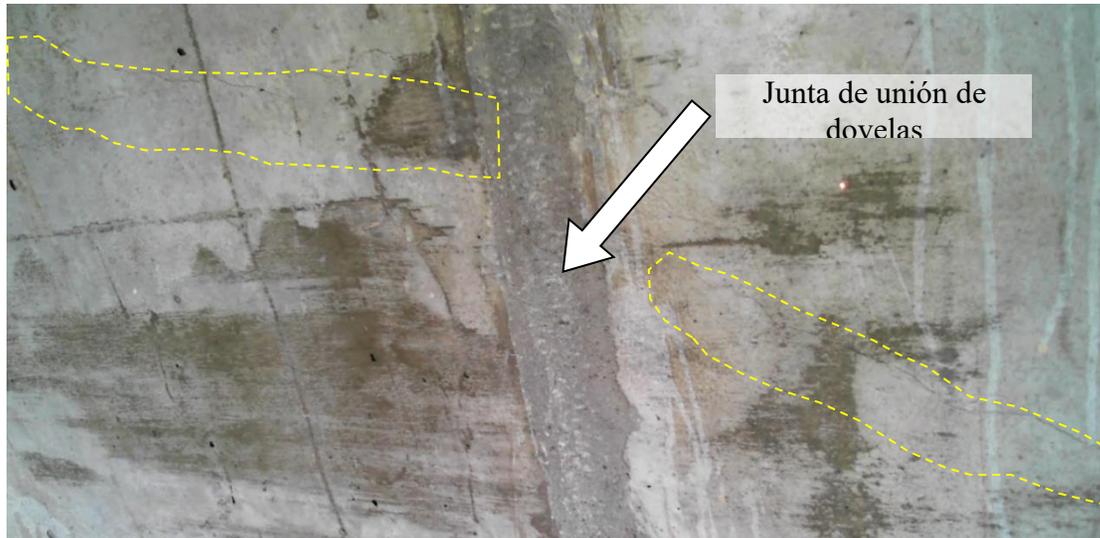
254 fundamentales directamente relacionados con la deformada de la estructura, pero que el nivel o el tipo de daño (o
255 defecto) ha logrado repercutir y afectar la amplitud modal a lo largo de unos 10 nodos de medición en modos
256 superiores, por lo que es poco probable que se trate de un ruido electrónico o un efecto local de la estructura, sino,
257 un daño o defecto estructural en la viga cajón alrededor del nodo 49 reflejado en el cambio del comportamiento
258 dinámico del costado aguas abajo.

259 **3.2 Resultados de la inspección visual**

260 Se trató de verificar la hipótesis anterior con una inspección visual mediante el uso de cámara de video
261 digital sostenida mediante un ensamblaje de barras telescópicas con una máxima longitud de 5,4 m, que permite
262 visualizar en tiempo real la imagen en una computadora, además, la acompaña un foco y un puntero láser, donde
263 este último puede proyectar un punto rojo aproximadamente elíptico en una superficie a una distancia de entre 0,5
264 m a 1,5 m, con el diámetro mayor de 2,5 mm y menor de 2,0 mm aproximadamente, el cual además de permitir
265 discernir si se tratan de rayas superficiales constructivas o agrietamiento en las imágenes captadas, se utilizó como
266 referencia para estimar la dimensión de los fenómenos observados.

267 Se detectó un posible agrietamiento poco inclinado a 2,0 m del nodo 49 con dirección hacia el bastión en
268 el costado aguas abajo como se muestra en la Figura 7, el cual estaría ubicado aproximadamente entre 1,0 m y 1,5
269 m debajo de la cara superior de las alas de viga cajón. Del análisis de la imagen se detecta que el agrietamiento
270 podría tener un ancho alrededor de los 0,3 mm ya que tiene aproximadamente un píxel de ancho. Mediante el
271 conteo de pixeles que existen entre el inicio y el fin de la primera y segunda parte del posible agrietamiento, se
272 puede dar un estimado de las longitudes de este como una recta inclinada, las cuales serían: 311 mm para la parte
273 superior y 293 mm para la parte inferior. Sin embargo, se nota que especialmente para la parte superior del posible
274 agrietamiento, la cámara no está alineada con el plano de la pared del cajón y hay un efecto del ángulo en la
275 imagen, por lo que la distancia real puede ser mayor.

276



277
278 Figura 6. Detección del posible agrietamiento, a la izquierda de la fotografía, parte superior del posible agrietamiento y a la
279 derecha, posible extensión de este después de la junta de unión de dovelas.

280 **CONCLUSIONES**

281 De este trabajo de investigación se concluye sobre la capacidad y la sensibilidad que posee la forma modal
282 de los modos superiores ante agrietamientos en la estructura de concreto, y mediante una comparación entre las
283 formas modales de ambos costados, es posible deducir y detectar la presencia del daño y su localización sin la
284 necesidad de un estado inicial o modelo analítico de referencia. Este hecho valida la implementación de monitoreo
285 de salud estructural basado en vibraciones en estructuras de puentes como una herramienta de gran valor y
286 complementaria a la inspección visual para detectar daños a temprana edad, en lugares inaccesibles a la vista o de
287 difícil alcance para fuerzas humanas, permitiendo así a la administración tomar acciones correctivas en forma
288 oportuna.

289 **AGRADECIMIENTOS**

290 Este documento se basa en el informe de Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones
291 ambientales de la superestructura del puente sobre el río Virilla de la Ruta Nacional No. 27 (Garita-Durán, et al.,
292 2018) realizado a partir de las competencias asignadas por la Ley 8114 a la Unidad de Puentes del Programa de
293 Ingeniería Estructural del LanammeUCR.

294 **REFERENCIAS**

- 295 1. Agüero-Barrantes, P., Vargas-Alas, L. G., Villalobos-Vega, E., Castillo-Barahona, R. (2017). *Evaluación*
296 *de la condición del puente sobre el río Virilla Ruta Nacional No. 27 LM-PIE-UP-P14-2017*. San José,
297 Costa Rica: Programa de Ingeniería Estructural (PIE), LanammeUCR.
- 298 2. Farrar, C.R., Worden, K. (2007). “*An introduction to structural health monitoring*”. Phil. Trans. R. Soc.
299 A 365, 303–315.
- 300 3. Garita-Durán, H., Agüero-Barrantes, P., Liu-Kuan, Y.C., Villalobos-Vega, E., Castillo-Barahona, R.
301 (2018). “*Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales superestructura del*
302 *puente sobre el río Virilla Ruta Nacional No. 27 LM-PIE-UP-M03-2018*”. San José, Costa Rica: Programa
303 de Ingeniería Estructural (PIE), LanammeUCR.
- 304 4. Liu, Y.C.; Loh, C.H.; Ni, Y.Q. (2012). “*Stochastic subspace identification for output-only modal analysis:*
305 *application to super high-rise tower under abnormal loading condition*”. Earthquake Engineering &
306 Structural Dynamics. 42:477-498. Wiley Online Library.
- 307 5. Liu, Y.C., Wu, T.H., Loh, C.H., Ni, Y.Q. (2013). “*Variation of Modal Parameters of Canton Tower under*
308 *Different Earthquake Excitations*”. The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of
309 Intelligent Infrastructure, Hong Kong.
- 310 6. Liu-Kuan, Y.C., Castillo-Barahona, R., Loria-Salazar, L.G. (2013). “*Monitoreo y evaluación estructural*
311 *de puentes utilizando un sistema de Instrumentación Inalámbrico*”. LM-PI-UP-02-2013. Programa de
312 Infraestructura del Transporte (PITRA), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de
313 la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR).
- 314 7. Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015a). “*Desarrollo*
315 *y validación de un sistema portátil de monitoreo y evaluación de puentes LM-PI-UP-07-2015*”. San José,
316 Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- 317 8. Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015b). “*Monitoreo*
318 *estructural de la superestructura No.2 del puente sobre el río Virilla Ruta Nacional No. 32 LM-PI-UP-*
319 *PN12-2015*”. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- 320 9. Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., (2017). “*Introducción al Monitoreo de la condición Estructural*
321 *en Puentes*”. San José, Costa Rica: Boletín Técnico, Programa de Ingeniería Estructural (PIE),
322 LanammeUCR. N°5, Volumen 2, Año 2017, ISSN: 2215-4566. [\[Descargar\]](#)
- 323 10. Loh, C.H., Chen, M.C., Chao, S.H. (2012). “*Stochastic subspace identification for operational modal*

- 324 *analysis of an arch bridge*". Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil,
325 Mechanical, and Aerospace Systems 2012, 834504; doi:10.1117/12.912514.
- 326 **11.** Loh, C.H., Liu, Y.C., Wu, T.H., Ni, Y.Q. (2013). "*Variation of Modal Parameters of Canton Tower Under*
327 *Different Earthquake excitations*". Proceedings of the 6th International Conference on Structural Health
328 Monitoring of Intelligent Infrastructure Hong Kong.
- 329 **12.** Peeters, B. (2000). "*System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*". Ph.D.
330 Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven.
- 331 **13.** Pridham, B. A., Wilson, J. C. (2002). "*Subspace Identificacion of Vincent Thomas Suspension Bridge*".
332 IMAC-XX: A Conference on Structural Dynamics.
- 333 **14.** Quirós-Serrano, C., Castillo-Barahona, R., Loría-Salazar, L.G. (2012). "*Inspección del puente sobre el río*
334 *Concepción Ruta Nacional No. 27 LM-PI-UP-PC03-2012*". San José, Costa Rica: Programa de
335 Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- 336 **15.** Sohn, H.S., Farrar, C., Hemez, F.M., Czarnecki, J.J. (2002). "*A Review of Structural Health Monitoring*
337 *Literature form 1996-2001*". LA-13976-MS. Los Alamos National Laboratory.
- 338 **16.** Vargas-Alas, L. G., Villalobos-Vega, E., Castillo-Barahona, R., Navas-Carro, A. (2017). "*Evaluación de*
339 *la condición del puente sobre el río Concepción Ruta Nacional No. 27 LM-PIE-UP-P16-2017*". San José,
340 Costa Rica: Programa de Ingeniería Estructural (PIE), LanammeUCR.
- 341