

CARACTERIZACIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE MODELOS A PARTIR DE VIBRACIÓN AMBIENTE

Ing. Ruffinelli, María Constanza; Dr. Ing. Bertero Agustín.
Laboratorio de Dinámica de Estructuras, Facultad de Ingeniería, UBA.
mruffinelli@fi.uba.ar – abertero@fi.uba.ar

RESUMEN

Los modelos de elementos finitos de estructuras adoptan gran cantidad de hipótesis simplificadoras e idealizaciones respecto a las propiedades y el comportamiento real de una estructura, lo que en muchos casos puede resultar en diferencias significativas entre la respuesta del modelo y el verdadero comportamiento estructural. Contar con un modelo que describa con la menor discrepancia posible el verdadero comportamiento de una estructura resulta de gran utilidad para evaluar su estado y su respuesta ante futuros escenarios de carga. En este trabajo se describe una técnica de actualización de modelos de elementos finitos a partir de parámetros experimentales, como las frecuencias y modos naturales de vibración, obtenidos con ensayos de vibración ambiente.

Se presenta una primera implementación del método en el puente Ciudad de la Paz (CABA), caracterizado dinámicamente con un nuevo sistema de monitoreo remoto Wireless desarrollado en conjunto entre el Laboratorio de Dinámicas de Estructuras y el Departamento de Electrónica de la FIUBA. Finalmente, se discuten recomendaciones para la realización de este tipo de experiencias en puentes y otras estructuras civiles.

ABSTRACT

Finite element models of structures often include numerous simplifying assumptions and idealizations about the properties and real behavior of a specific structure, which in many cases can result in significant discrepancies between the response of the FE model and the real behavior of the structure. Having a model that is able to describe the real structural behavior as close as possible is very useful for evaluating the structural health and the response to future loading scenarios. This paper describes a finite element model updating technique based on experimental parameters -such as frequency and mode shapes- obtained with ambient vibration tests.

A first implementation of the method on the Ciudad de La Paz Bridge (CABA) is presented. The dynamic properties of the bridge were obtained with a new wireless remote monitoring system developed jointly by the Laboratory of Structural Dynamics and the Department of Electrical Engineering of FIUBA. Finally, recommendations for conducting this type of test on bridges and other civil structures are discussed.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

La práctica actual de la ingeniería estructural se apoya fuertemente en el uso de modelos computacionales para evaluar la respuesta de estructuras ante acciones externas, ya sea durante el proceso de diseño o para la verificación de su seguridad estructural. Estos modelos implican simplificaciones e idealizaciones en cuanto a las propiedades y comportamiento reales de la estructura. La incertidumbre en la geometría, en las características de los materiales y en la rigidez de las uniones, entre muchas otras, pueden llevar a discrepancias significativas entre la respuesta predicha por el modelo y la respuesta real de la estructura. Estas discrepancias afectan a las solicitaciones y las características dinámicas estimadas para la estructura en cuestión (Jaishi & Ren, 2007).

Mediante ensayos dinámicos, es posible obtener las frecuencias y modos naturales de vibración reales, lo que permite ajustar los modelos numéricos para que se asemejen a la estructura real. Este proceso es conocido como actualización del modelo computacional y permite mejorar la estimación de la respuesta ante acciones estáticas y dinámicas. Estas técnicas se han aplicado principalmente en puentes dado que son obras de infraestructura fundamentales para el funcionamiento de las ciudades, cuya inhabilitación puede producir consecuencias severas tanto económicas como de malestar en la sociedad (Alvaro Viviescas, Leon, & Carvajal, 2018; Toksoy & Aktan, 1994; Brownjohn, Moyo, Omenzetter, & Lu, 2003).

La actualización de modelos estructurales a partir de ensayos dinámicos se ha estudiado ampliamente en los últimos años. Sin embargo, su implementación suele limitarse a proyectos de gran envergadura. Esto se explica, fundamentalmente, por los requerimientos asociados a la instrumentación de los ensayos. Para obtener las frecuencias y modos de vibración experimentales, se necesitan múltiples acelerómetros colocados en diferentes puntos, midiendo de forma simultánea y perfectamente sincronizados entre sí, lo que se traduce en elevados costos. La sincronización exige disponer cientos de metros de cableado y un sistema de adquisición de datos capaz de manejar en simultáneo decenas de canales activos de medición (Spencer Jr, Ruiz-Sandoval, & Kurata, 2004).

El problema de los costos ha cambiado radicalmente en el último tiempo debido a la aparición de una nueva generación de sensores de bajo precio, desarrollados principalmente para la telefonía celular. Pero aún se tiene la dificultad de la sincronización de equipos de forma inalámbrica o Wireless (Bertero, 2018). Es por este motivo que, el Laboratorio de Dinámica de Estructuras y el Departamento de Electrónica de la FIUBA han desarrollado en forma conjunta un nuevo sistema de monitoreo que busca sincronizar de forma remota e inalámbrica múltiples acelerómetros digitales. En este trabajo se presentan los resultados de la implementación de este nuevo sistema en el proceso de actualización del modelo computacional del puente Ciudad de La Paz, CABA.

Organiza:

MÉTODOS DE ACTUALIZACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

Como ya se mencionó, el análisis de las estructuras se apoya fuertemente en el uso de modelos numéricos. Al hacerlos se realizan idealizaciones y suposiciones, y existe gran cantidad de incertidumbres que llevan a que la estructura real no se comporte igual que lo obtenido por su modelo numérico. Por esto es de interés estudiar los métodos de actualización de modelos para luego aplicarlos en una estructura real.

Los métodos iterativos consisten en la modificación de parámetros estructurales, como el módulo de elasticidad de los materiales, la rigidez de las vinculaciones o las características de los elementos, buscando minimizar una función objetivo que pone en evidencia la diferencia entre el modelo analítico y los resultados experimentales. Lo que se busca es minimizar una función objetivo $\Pi(x)$, donde x serán los parámetros de actualización del modelo. Estos parámetros serán modificados hasta alcanzar un resultado que brinde los resultados óptimos que minimicen dicha función (Figura 1).

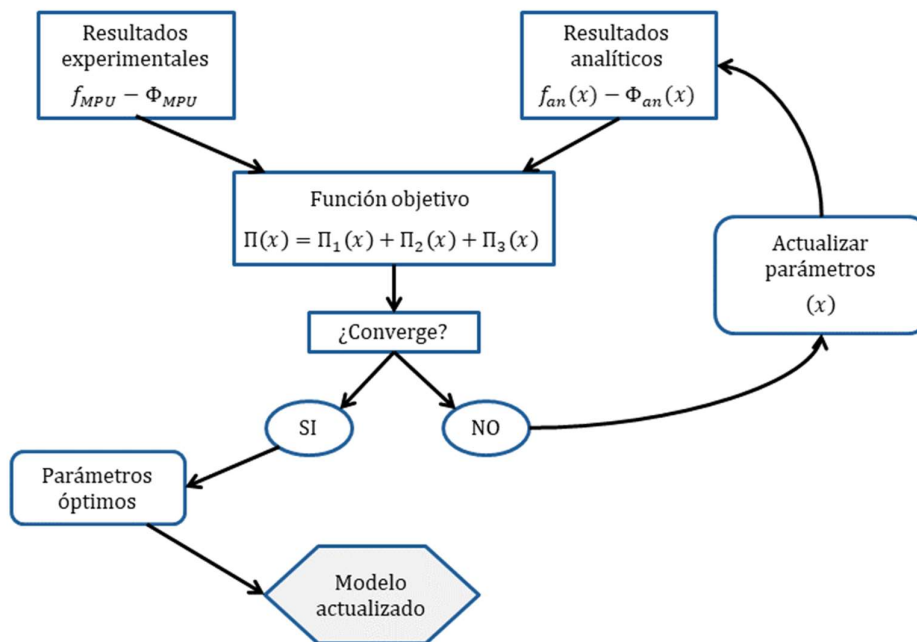


Figura 1: Diagrama de flujo

Fuente: Adaptado de (Abdullah, Sani, Rahman, & Zaman, 2015; Costa C. , y otros, 2016)

Las funciones objetivo generalmente dependen de las frecuencias naturales, los modos de vibración y la matriz de flexibilidad modal. Distintos autores han planteado diferentes variantes y combinaciones entre las funciones. A continuación, se

Organiza:

presenta la función objetivo propuesta por (Jaishi & Ren, 2005) que será utilizada más adelante para actualizar el modelo computacional del puente Ciudad de la Paz.

$$\Pi(x) = \Pi_1(x) + \Pi_2(x) + \Pi_3(x) \quad (1)$$

El primer término $\Pi_1(x)$ es la sumatoria de la diferencia relativa entre las frecuencias naturales experimentales y analíticas

$$\Pi_1(x) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot \left(\frac{fa_j - fe_j}{fe_j} \right)^2 \quad (2)$$

siendo:

- m : Cantidad de modos identificados
- α_j : Factor de peso
- fa_j y fe_j : Frecuencias naturales, analíticas y experimentales

El segundo término $\Pi_2(x)$ incluye la discrepancia entre los modos de vibración naturales,

$$\Pi_2(x) = \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot \frac{(1 - \sqrt{MACae_j})^2}{MACae_j} \quad (3)$$

siendo:

- β_j : Factor de peso
- MAC : Criterio de aseguramiento modal

$$MACae_j = \frac{(\phi_{ai}^T \cdot \phi_{ei})^2}{(\phi_{ai}^T \cdot \phi_{ai}) \cdot (\phi_{ei}^T \cdot \phi_{ei})} \quad (4)$$

El *Modal Assurance Criteria* (MAC), o criterio de aseguramiento modal, se define como un escalar, entre cero y uno, que cuantifica la consistencia entre dos vectores modales. Si se encuentra en el rango 0,85 – 0,90 se considera que la correlación es buena, mientras que si el valor del MAC está por debajo de 0,50 la correlación es mala (Brincker & Ventura, 2015; Benedettini & Gentile, 2011). Este parámetro ha sido ampliamente utilizado para comparar vectores modales obtenidos con distintas

Organiza:

técnicas. Diversos autores como (Benedettini & Gentile, 2011; Brehm, Zabel, & Bucher, 2010) han utilizado el *MAC* para la actualización de modelos estructurales con ensayos dinámicos, particularmente en modelos de puentes.

Otros autores utilizan los términos $\Pi_1(x)$ y $\Pi_2(x)$ con variantes y los combinan para obtener más información (Ribeiro, Calçada, Delgado, Brehm, & Zabel, 2012; Jang, Li, & Spencer, 2013; Costa C. , y otros, 2016).

Nótese que los dos primeros términos $\Pi_1(x)$ y $\Pi_2(x)$ incluyen factores de peso para imponer la importancia relativa entre los modos y las frecuencias. Esto es útil en aquellos casos en los que las variables sean obtenidas con distinta precisión o se le quiera dar más importancia a cierto modo en la actualización del modelo (Moller & Friberg, 1998).

Por último, el tercer término $\Pi_3(x)$ de la función incluye la matriz de flexibilidad modal. La misma se define como la acumulación de las contribuciones de los vectores modales en la flexibilidad, la ventaja de incluirla es que es más sensible a cambios o daños locales en las estructuras (Toksoy & Aktan, 1994; Jaishi & Ren, 2006). De este modo, el tercer término resulta,

$$\Pi_3(x) = \frac{m}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{ua_i - ue_i}{ue_i} \right) \quad (5)$$

donde la flexibilidad modal se expresa en términos de la deflexión para una carga uniformemente distribuida; esto es

$$u_i = \sum_{j=1}^m \frac{\Phi_{ij} \cdot \sum_{k=1}^n \Phi_{kj}}{\omega_j^2} \quad (6)$$

siendo:

- n : GDL medidos
- m : modos identificados
- ω_j : Frecuencia circular
- $[\Phi]$: Matriz de modos normalizados respecto a la masa
- ua_i y ue_i : Deflexión bajo carga uniformemente distribuida en el grado de libertad i , analítica y experimentalmente respectivamente.

Un aspecto que debe tenerse en cuenta es que los modos obtenidos experimentalmente no están normalizados de ninguna forma en particular. Para la utilización de la matriz de flexibilidad modal es importante que los modos estén normalizados respecto a la masa. Para llevar a cabo la normalización de los modos

Organiza:

respecto a la masa se utiliza el método Guyan-Reduced Mass Normalization (GRM) desarrollado en (Doebbling & Farrar, 1996).

IMPLEMENTACIÓN EN PUENTE IN-SITU

Para implementar los métodos de actualización revisados, se lo hizo para el modelo de elementos finitos del Puente Ciudad de la Paz, en la calle Soler (CABA), que cruza las vías del tren Mitre. El propósito fue evaluar la posibilidad de implementar la metodología ya analizada en una estructura real (Ruffinelli, 2024). El puente en cuestión es metálico con tres vigas verticales y una losa de barras con una carpeta de hormigón por encima. Además, el puente tiene adosada una pasarela peatonal (Figura 2).



Figura 2: Puente Ciudad de la Paz

Al momento de realizar el ensayo, el puente se encontraba fuera de servicio a la espera de que comiencen tareas de reparación y modificación. Por este motivo, resulta de particular interés tener un modelo numérico actualizado para luego compararlo con el comportamiento posterior a las modificaciones realizadas.

Para la actualización del modelo se realizó un ensayo de vibración ambiente, este tipo de ensayos se realiza, idealmente, con el puente en servicio. Al estar inhabilitado, la fuente de excitación se limitó al tránsito ferroviario y la acción del viento.

Antes de ensayar el puente, se llevó a cabo una primera caracterización analítica para diagramar una óptima ubicación de cada acelerómetro, buscando identificar los modos principales. Luego se obtuvieron los parámetros dinámicos experimentales y se calibró el modelo realizado con la documentación del puente.

Organiza:

Caracterización analítica

Para realizar una caracterización dinámica inicial de la estructura, se la modeló en el programa *STAAD.Pro* con los planos disponibles (*Figura 3*). La estructura metálica de las vigas y del tablero se modelaron como elementos de barra, y la carpeta de rodamiento como elemento de placa. Dado que las uniones están materializadas con remaches, se modelaron como rígidas. Los apoyos son fijos y se encuentran en el extremo de cada una de las vigas verticales, totalizando seis apoyos.

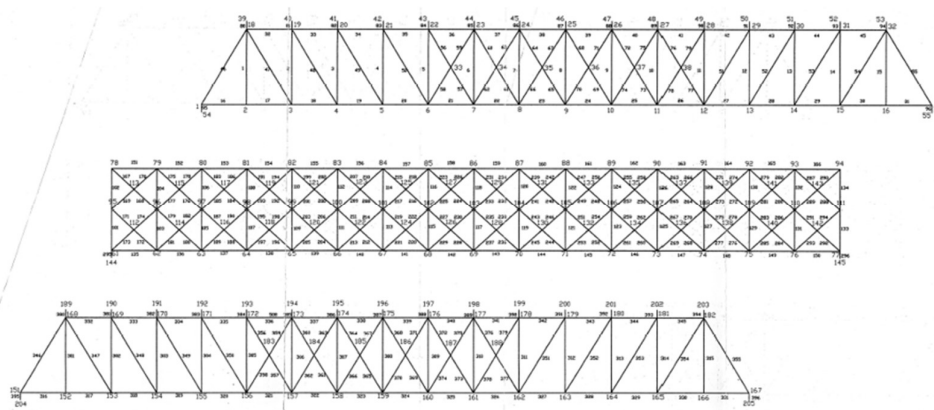


Figura 3: Plano - vigas verticales

Las secciones del reticulado se determinaron con los planos disponibles, el módulo de elasticidad del acero allí informado es 1800 tn/cm^2 . El espesor de la carpeta de rodamiento también se determinó a partir de los planos, siendo éste de 30 cm , y la calidad del hormigón informada es H-21. La pasarela peatonal cuenta con un solado de losetas pretensadas apoyadas, como no aportan rigidez y sólo influyen en el peso se la modeló como una carga distribuida.

Con la estructura modelada en el programa se realizó el análisis dinámico, del que se obtuvieron las frecuencias y modos naturales de vibración. Las primeras seis frecuencias obtenidas son:

$$f_{an} = \begin{pmatrix} 2.5 \\ 3.1 \\ 3.9 \\ 5.4 \\ 5.6 \\ 7.9 \\ \vdots \end{pmatrix} \cdot \text{Hz} \quad (7)$$

Organiza:

También se obtuvieron los modos asociados a cada una de las frecuencias. El primer y quinto modo son principalmente horizontales, de simple y doble curvatura respectivamente. El segundo modo es flexional de simple curvatura. Los modos tres y seis son torsionales, de simple y doble curvatura respectivamente. Y por último el cuarto, es un modo local de flexión de la pasarela peatonal (*Figura 4*).

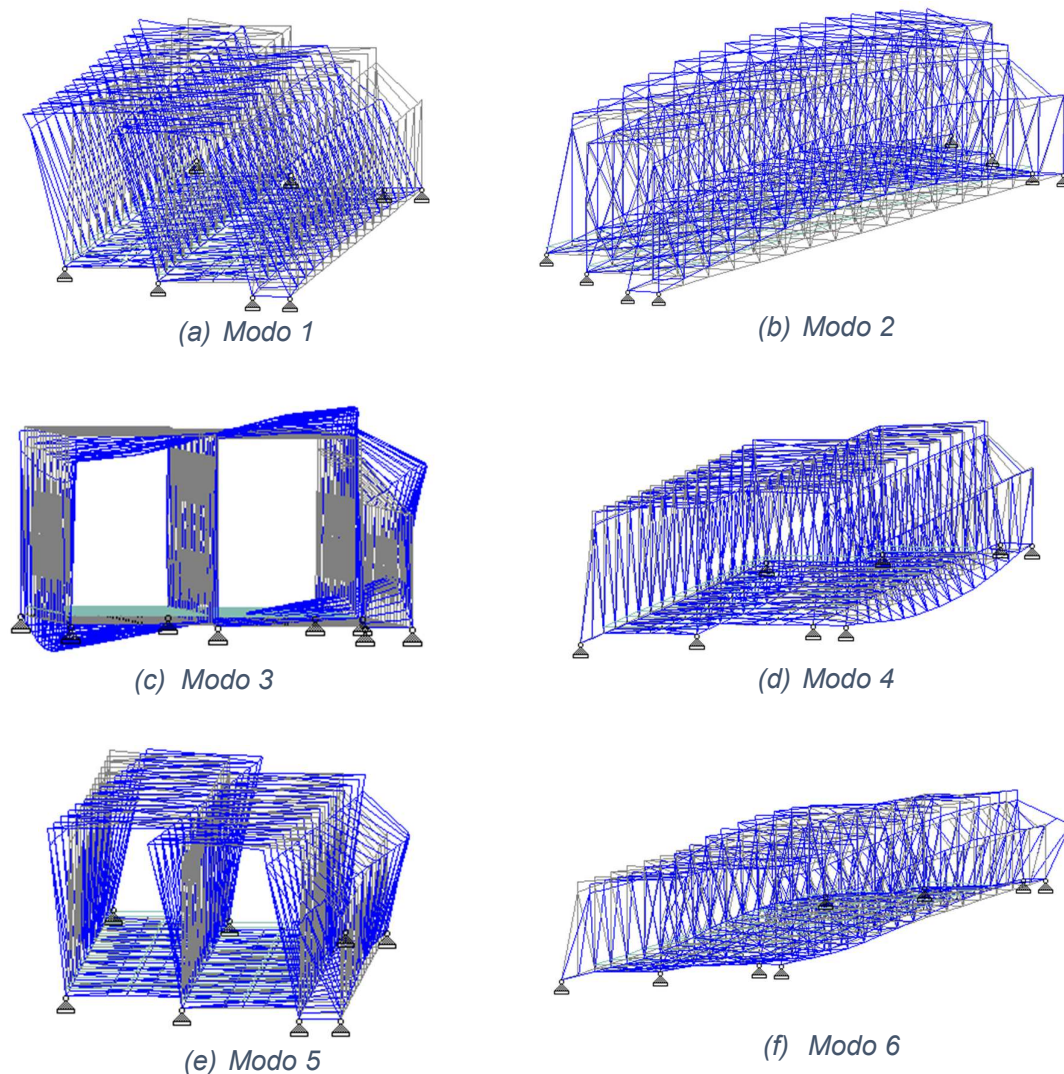


Figura 4: Modos de vibración analíticos

Instrumental utilizado

Para obtener los parámetros modales reales de la estructura se realizó un ensayo de vibración ambiente. El instrumental de medición utilizado consistió en

Organiza:

acelerómetros Wireless equipados con sensores digitales triaxiales MPU-6050. Los mismos fueron desarrollados en el marco del proyecto conjunto entre el LABDIN y el Departamento de Electrónica (Figura 5) (Seivane & Mazzer, 2023).

Como ya se mencionó, las mediciones sincronizadas e inalámbricas brindan muchas ventajas para la materialización de ensayos en grandes estructuras, por lo que los nuevos módulos de acelerómetros se conectan vía WiFi a una antena asegurando que la adquisición de datos sea sincronizada.



Figura 5: Equipamiento utilizado

En (Ruffinelli, 2024) los sensores fueron evaluados en términos de amplitud y ruido con ensayos comparativos respecto a acelerómetros comerciales de similares características y a otros de alta precisión. De los mismos se llega a la conclusión de que en cuanto a amplitud y nivel de ruido para frecuencias menores a los 20 Hz el desempeño es adecuado. Siendo que las estructuras civiles de interés tienen las principales frecuencias por debajo de la mencionada, los sensores serían adecuados para la caracterización de estas.

Asimismo, se evaluó la calidad de la sincronización con el objetivo de determinar si se pueden implementar las técnicas de análisis modal operacional para la caracterización dinámica de estructuras. De estos ensayos se concluye que el error de la sincronización es de 0.004 s, lo que implica un error del 2% del periodo considerando una frecuencia natural de 5Hz.

En el trabajo mencionado, no sólo se evaluaron los acelerómetros individualmente, sino que también se caracterizó y actualizó un modelo de laboratorio. Trabajar sobre el modelo estructural en escala reducida dentro del Laboratorio, en un ambiente controlado, permitió evaluar los acelerómetros, las técnicas basadas en análisis modal experimental y los sistemas de calibración estudiados, para luego aplicarlo en una estructura in-situ.

Las principales conclusiones que se extrajeron de los análisis mencionados anteriormente son que el sistema de medición desarrollado es adecuado para la identificación modal en frecuencias menores a 20 Hz. Además, el método utilizado

Organiza:

para la actualización del modelo permitió obtener un modelo más certero del comportamiento real de la estructura ensayada.

Por ende, teniendo en cuenta que las estructuras civiles tienen sus principales frecuencias naturales por debajo de los 20 Hz, los acelerómetros serían óptimos para la caracterización de este tipo de estructuras con las técnicas del análisis modal operacional.

Caracterización experimental

Al momento del ensayo sólo se contaba con cinco acelerómetros, por lo tanto, el ensayo de vibración ambiente se realizó en dos instancias de medición de 25 minutos cada una. Considerando la forma de los modos informados por el modelo analítico, se decidió ubicar a los sensores como se muestra en la [Figura 6](#). En un primer ensayo los cinco acelerómetros se ubicaron en la viga central para captar los modos de flexión vertical. En el segundo ensayo se ubicaron en forma de cruz para captar los modos torsionales, dejando el nodo central en el mismo lugar para luego unificar ambos ensayos.

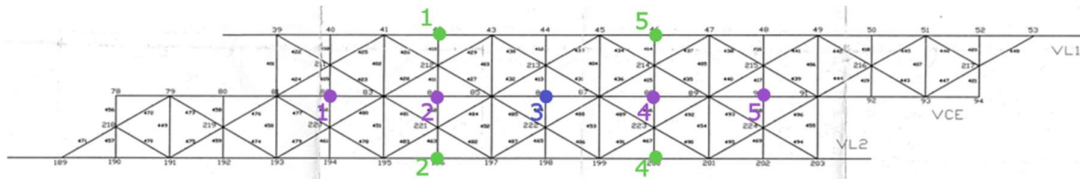


Figura 6: Esquema en planta de la ubicación de los acelerómetros

Una vez realizados ambos ensayos se analizaron los datos con el método de descomposición en el dominio de la frecuencia (*Brincker, Zhang, & Andersen, 2000; 2001; 2000*). Para cada ensayo se graficó la descomposición en valores singulares de la matriz de densidad de potencia espectral. La [Figura 7](#) presenta esos gráficos, en los que se aprecian dos picos muy claros que corresponden a las dos primeras frecuencias naturales 2.8 y 3.9 Hz. En el segundo ensayo se observa claramente un tercer pico en 7.9 Hz correspondiendo a la tercera frecuencia natural (en el primer ensayo este pico también aparece, pero menos pronunciado). Entonces, se concluye que las tres frecuencias naturales identificadas son:

$$f_{exp} = \begin{pmatrix} 2.9 \\ 3.9 \\ 7.9 \end{pmatrix} \cdot \text{Hz} \quad (8)$$

Organiza:

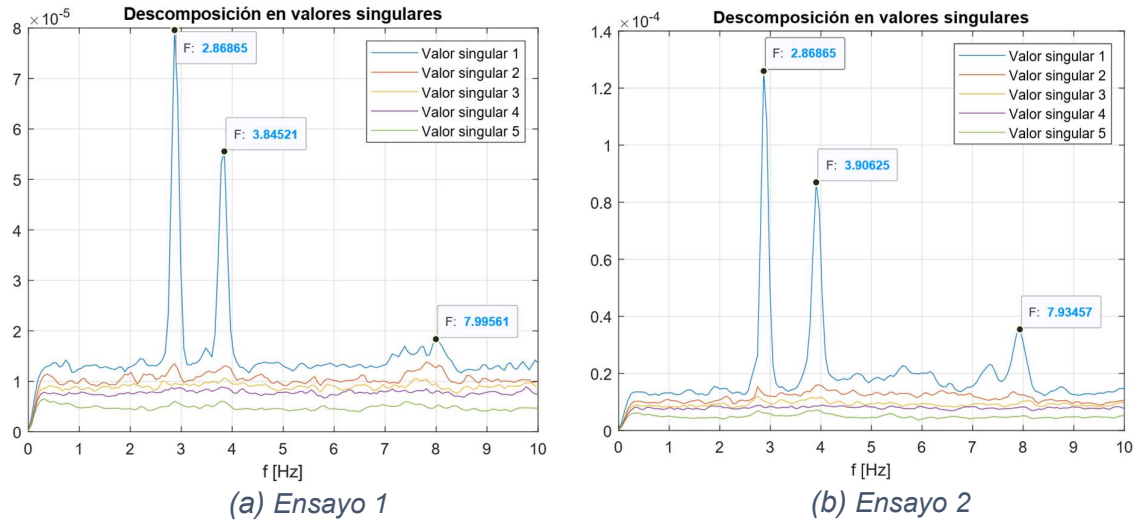


Figura 7: Descomposición en valores singulares para cada ensayo

Una vez obtenidas las frecuencias naturales, los autovectores asociados a cada uno de los valores singulares definen los modos de vibración para cada frecuencia natural de interés. Matricialmente los modos de vibración para cada uno de los ensayos son:

$$\Phi_{exp1} = \begin{pmatrix} -0.69 & -0.38 & -1.97 \\ -0.94 & -0.68 & -0.93 \\ -1 & -1 & -1 \\ -0.92 & -0.98 & 1.53 \\ -0.6 & -0.75 & 0.75 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\Phi_{exp2} = \begin{pmatrix} -0.76 & -2.40 & -1.81 \\ -1.02 & -1.24 & 0.43 \\ -1 & -1 & -1 \\ -0.76 & 1.05 & -0.61 \\ -1.02 & -2.95 & 0.40 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Al normalizar ambos modos para que el GDL en común tome valor unitario, es posible ensamblar ambos vectores obteniendo los modos naturales de vibración con

Organiza:

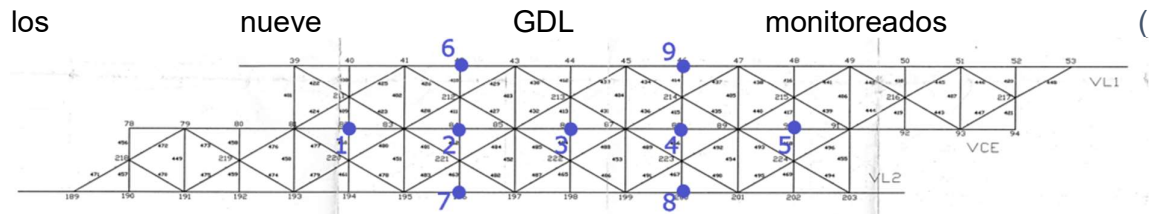


Figura 8). A partir de esto, se graficaron los tres modos identificados con los grados de libertad marcados (Figura 9).

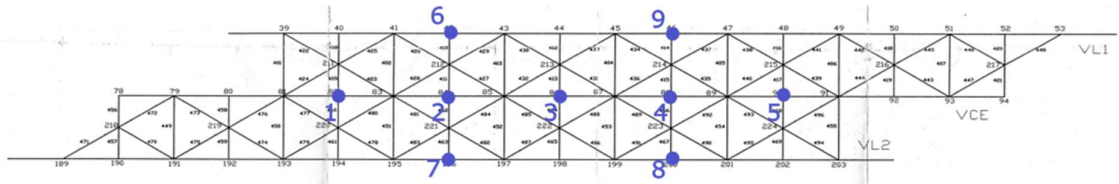


Figura 8: Esquema en planta de ubicación de los acelerómetros - 9 GDL

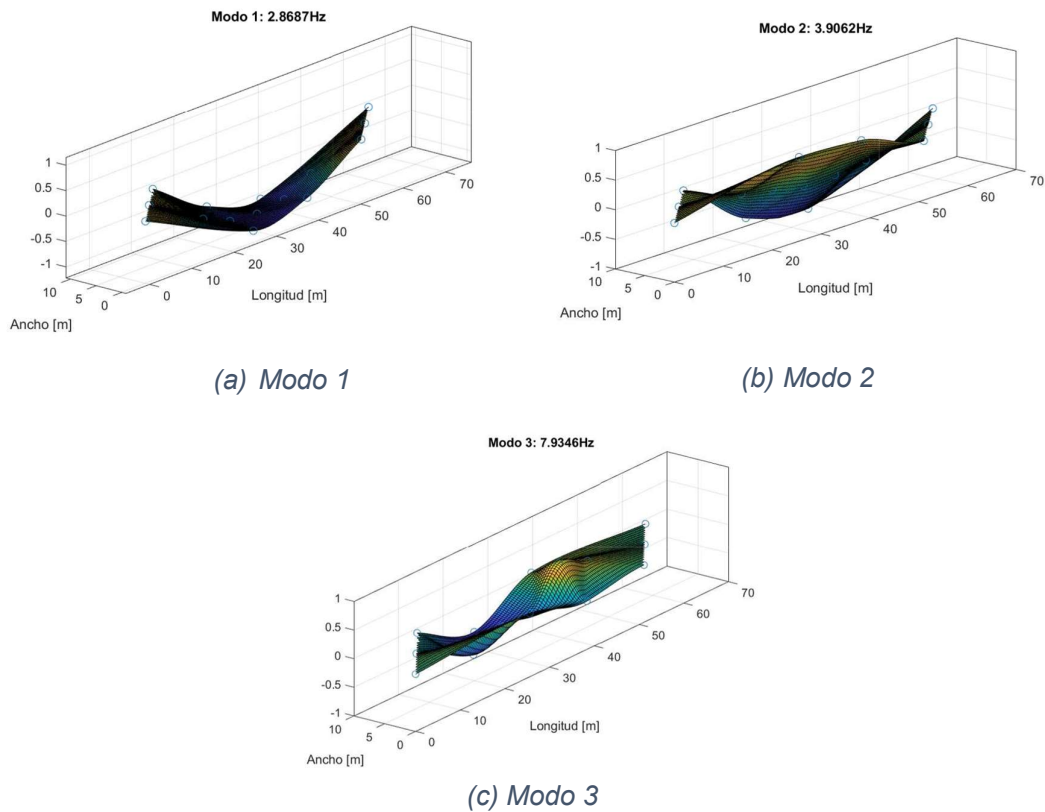


Figura 9: Modos de vibración experimentales

Organiza:

Comparación de los resultados experimentales y analíticos

Si se comparan las frecuencias y la forma de los modos de vibración obtenidas analítica y experimentalmente, se puede observar que los modos 2, 3 y 6 del modelo analítico (*Figura 4*) corresponden a los modos 1, 2 y 3 identificados en el ensayo de vibración ambiente respectivamente (*Figura 9*). Observando la *Figura 4* los modos 1 y 5 no son perceptibles por haber medido solo el tablero, para captarlos deberían instrumentarse las vigas verticales. De forma análoga, el modo 4 solo sería visible si se instrumentara la pasarela. Es por este motivo que los únicos modos que se observan son los 2, 3 y 6; para obtener más modos debería instrumentarse el puente en otros puntos.

En la *Tabla 1* se comparan las frecuencias obtenidas con la diferencia relativa entre ellas. Además, se extrajeron cada uno de los modos analíticos con los nueve grados de libertad monitoreados y se analizó numéricamente utilizando el *MAC* la diferencia contra los modos obtenidos experimentalmente.

Modo	Diferencia de frecuencias (%)	MAC
1	7.3	0.998
2	2.6	0.853
3	0.6	0.487

Tabla 1: Comparación previa a la calibración

La discrepancia entre las frecuencias es más significativa en el primer y segundo modo de vibración. Recordando que el *MAC* varía entre 0 a 1, donde 1 representa la máxima correlación entre los modos analizados, se concluye también que el primer modo muestra una alta correlación, el segundo modo tiene una correlación menor y, por último, la correlación es muy débil para el tercer modo. Esta discrepancia podría atribuirse a la baja excitación en ese rango de frecuencias, a la limitada cantidad de acelerómetros utilizados, y al hecho de utilizar un nodo que al ser central en el modo torsional no brinda gran información.

Una

Organiza:

Actualización del modelo numérico

Teniendo los parámetros dinámicos analíticos y experimentales se actualizó el modelo computacional del puente basado en parámetros nominales utilizando la función de optimización vista anteriormente $\Pi x = \Pi_1(x) + \Pi_2(x) + \Pi_3(x)$ (1).

Como se mencionó anteriormente, para evaluar el término $\Pi_3(x)$ de la función objetivo es necesario que los modos estén normalizados respecto a la masa. Un método para llevar adelante ese proceso es el Guyan-Reduced Mass Normalization (GRM) desarrollado en (Doebbling & Farrar, 1996). Ese procedimiento, sin embargo, requiere conocer la matriz de rigidez del sistema. En muchos casos puede implicar un problema, ya que programas comerciales como *STAAD.Pro* no informan explícitamente la matriz de rigidez asociada al modelo. Para salvar esto se implementa un método alternativo que consiste en expandir el modo a todos los grados de libertad del modelo (Zimmerman & Kaouk, 1992).

Una vez normalizados los modos por masa, se tienen todas las variables para implementar la función de optimización. Para seleccionar los parámetros de actualización se tuvo en cuenta la incertidumbre de los datos nominales del modelo y se evaluaron las características comúnmente modificadas en la bibliografía.

En general, los datos que se actualizan son el módulo de elasticidad de los materiales, las características geométricas de los elementos, la rigidez de los apoyos y la masa. Además, se imponen condiciones de borde a las variables ya que los resultados deben ser físicamente admisibles. Para este caso las variables que se incluyeron en el análisis son:

- El espesor de la carpeta de rodamiento: al cambiar este parámetro se modifica la rigidez de la carpeta y también la masa. Dado que no se tiene el dato exacto del espesor en los planos, esta variable tiene alta incertidumbre. Los límites inferior y superior definidos son:

$$0.5 \cdot esp_{or} < esp_{or} < 1.5 \cdot esp_{or} \quad esp_{or} = 30 \text{ cm}$$

- El módulo de elasticidad del acero: en el modelo se modifica directamente este parámetro, pero implica que cambie la rigidez EA de los elementos, los límites definidos son:

$$0.85 \cdot E_{or} < E_{or} < 1.15 \cdot E_{or} \quad E_{or} = 1800 \text{ kN/cm}^2$$

- La masa: la incertidumbre viene dada por los elementos no modelados, como los remaches, las chapas de unión, los elementos no estructurales, etc. La variación que se definió es:

$$0.8 \cdot Pp_{or} < Pp_{or} < 1.2 \cdot Pp_{or} \quad Pp_{or} = 1$$

Organiza:

Los problemas de optimización típicamente tienen imposiciones en cuanto a las variables y a los resultados intermedios de la misma, para obtener un resultado viable y factible. Para los valores intermedios (Jaishi & Ren, 2005) define dos restricciones al problema, por un lado, en el valor del MAC y por otro en las frecuencias.

$$0 \leq \frac{|fa_i - fe_i|}{fe_i} \leq UL \quad \text{con } UL = 0.2 \quad (11)$$

$$L_1 \leq MAC \leq 1 \quad \text{con } L_1 = 0.7 \quad (12)$$

Al realizar la optimización en *MATLAB*, en primera instancia se utilizó la función *fminimax* propuesta en (Ruffinelli, 2024). Sin embargo, debido a problemas en la convergencia, se cambió a la función *particleswarm*. Esta función no permite resolver un problema con restricciones como lo hace (Jaishi & Ren, 2005), por lo tanto, se lo transformó en un problema sin restricciones, incorporándolas mediante términos de penalización. Estos términos se definieron de manera tal que sean nulos cuando se satisface la restricción y tomen un valor $\neq 0$ cuando no se cumple.

$$con_1(x) = \left[\max \left(0, \frac{|fa_i - fe_i|}{fe_i} - UL \right) \right]^2 \quad (13)$$

$$con_2(x) = [\max(0, L_1 - MAC)]^2 \quad (14)$$

Entonces la función de minimización queda de la siguiente forma:

$$\Pi(x) = \Pi_1(x) + \Pi_2(x) + \Pi_3(x) + con_1(x) + con_2(x) \quad (15)$$

En la función de optimización es posible dar un peso distinto a cada uno de los modos de vibración. Dado que el tercer modo es menos exacto se le da un peso de 0,8 a este modo y un peso de 1 a los demás.

Tras finalizar la optimización del problema, se obtuvo el modelo computacional actualizado. En la *Tabla 2* se presentan los parámetros iniciales y finales, y la variación de estos.

Organiza:

Parámetro	Valor inicial	Valor final	Variación (%)
Espesor	30cm	25.3cm	15.7
E_{acero}	180 kN/mm^2	173.8 kN/mm^2	3.44
Masa	1	1.2	20

Tabla 2: Parámetros actualizados

La *Tabla 3* resume las diferencias en frecuencias, el *MAC* y el valor de la función $\Pi(x)$ antes y después de la actualización del modelo.

Indicadores	Modo	Antes	Después
Diferencia en frecuencias (%)	1	7.3	1.7
	2	2.6	1.0
	3	0.6	4.9
<i>MAC</i>	1	0.998	0.997
	2	0.853	0.860
	3	0.487	0.538
$\Pi(x)$		0.25	0.16

Tabla 3: Indicadores

En términos de frecuencia, el primer modo experimentó una mejora considerable del 5.6%, mientras que el segundo mejoró un 1.6% y el residuo de frecuencias del tercer modo empeoró en un 4.3%. El *MAC*, que mide la correlación entre los modos de vibración del modelo y los modos experimentales, se mantuvo prácticamente igual para el primer modo, pero mejoró para el segundo y tercer modo en un 0.8% y 10.4%, respectivamente.

El valor de $\Pi(x)$, que engloba todos los indicadores juntos, disminuyó un 40%, lo que indica una mejora general del modelo analítico. El resultado es un modelo que describe mejor el comportamiento de la estructura al momento del ensayo que uno basado exclusivamente en los datos extraídos de los planos.

Organiza:

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue evaluar la posibilidad de actualizar modelos computacionales de puentes con los nuevos acelerómetros digitales Wireless desarrollados en conjunto con el Departamento de Electrónica de la FIUBA.

Para ello se realizaron dos ensayos de vibración ambiente en el puente Ciudad de la Paz (CABA), del cual se contaba con sus planos. El puente al momento del ensayo estaba fuera de servicio, por lo que la fuente de excitación provenía únicamente del tránsito ferroviario y del viento. A pesar de la baja excitación se lograron captar tres frecuencias y modos naturales de vibración, concluyendo que los nuevos acelerómetros Wireless son adecuados para la medición de estructuras con un rango de frecuencias naturales entre 1 y 20Hz.

Mediante los parámetros modales analíticos y experimentales, se realizó una primera actualización de un modelo computacional. Esta primera implementación permitió establecer una serie de consideraciones que deben tenerse en cuenta al implementar el método con modelos desarrollados en softwares comerciales, como *STAAD.Pro*.

Por otro lado, durante el procesamiento de los datos del ensayo se identificaron algunas dificultades, tales como la escasa información obtenida en el tercer modo al utilizar el nodo central para acoplar los modos. Para mejorar esto, se propuso modificar la ubicación del nodo para un mejor acoplamiento de modos. Además, se sugiere implementar una técnica de acoplamiento de ensayos más robusta.

Como principal conclusión se tiene que con los ensayos realizados en el puente se logró una primera implementación exitosa del sistema en su totalidad, incluyendo adquisición de datos sincronizados vía Wifi y la actualización de modelos numéricos. Si bien los resultados obtenidos son provisorios, se obtuvo una primera aproximación del modelo actualizado, para realizar futuros ensayos con un mayor número de sensores y la incorporación de otras variables en el análisis. Por último, se confirmó la adecuabilidad del nuevo sistema de medición de vibraciones Wireless para llevar adelante la actualización de modelos estructurales de obras civiles.

Agradecimientos

Al resto del equipo del Laboratorio de Dinámica de las estructuras que colaboró con los ensayos realizados: Alejandro Lehmann, Manuela Medina, Santiago Bertero.

Al Departamento de Electrónica de la FIUBA que diseñó los acelerómetros en conjunto con el Laboratorio de Dinámica de las Estructuras.

Organiza:

Bibliografía

- Abdullah, Sani, Rahman, & Zaman. (2015). A review on model updating in structural dynamics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Alvaro Viviescas, J., Leon, W. J., & Carvajal, L. A. (2018). Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gomez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental. *INGE CUC*, 25-65.
- Benedettini, F., & Gentile, C. (2011). Operational modal testing and {FE} model tuning of a cable-stayed bridge. *Engineering Structures*, 2063-2073.
- Bertero, S. (2018). Determinación de las Frecuencias y Modos de Vibración de Estructuras de Varios Grados de Libertad a Partir de la Vibración Ambiente.
- Brehm, M., Zabel, V., & Bucher, C. (2010). An automatic mode pairing strategy using an enhanced modal assurance criterion based on modal strain energies. *Journal of Sound and Vibration*, 5375-5392.
- Brincker, R., & Ventura, C. (2015). Introduction to Operational Modal Analysis.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *Proceedings of the 18th international modal analysis conference (IMAC)*, 625-630.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Output-Only Modal Analysis by Frequency Domain Decomposition. *Proceedings of ISMA25*.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain. *Smart Materials and Structures*, 441.
- Brownjohn, J. M., Moyo, P., Omenzetter, P., & Lu, Y. (2003). Assessment of highway bridge upgrading by dynamic testing and finite-element model updating. *Journal of Bridge Engineering*, 162-172.
- Costa, C., Ribeiro, D., Jorge, D., Silva, R., Arêde, A., & Calçada, R. (2016). Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters. *Engineering Structures*, 354-371.
- Costa, C., Ribeiro, D., Jorge, P., Silva, R., Arêde, A., & Calçada, R. (2016). Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters. *Engineering Structures*, 354-371.
- Doebling, S. W., & Farrar, C. (1996). Computation of structural flexibility for bridge health monitoring using ambient modal data.
- Filippou, F. (2021). *FEDEASLab - Finite Elements in Design, Evaluation and Analysis of Structures*. Obtenido de [\url{https://fedeeas.net/}](https://fedeeas.net/). Último acceso: 28-09-2023: <https://fedeeas.net/>

Organiza:

- Jaishi, B., & Ren, W. (2005). Structural finite element model updating using ambient vibration test results. *Journal of structural engineering*, 617-628.
- Jaishi, B., & Ren, W. (2007). Finite element model updating based on eigenvalue and strain energy residuals using multiobjective optimisation technique. *Mechanical systems and signal processing*, 2295-2317.
- Jaishi, B., & Ren, W.-X. (2006). Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual. *Journal of Sound and Vibration*, 369-387.
- Jang, S., Li, J., & Spencer, B. F. (2013). Corrosion Estimation of a Historic Truss Bridge Using Model Updating. *Journal of Bridge engineering*, 678-689.
- Moller, P. W., & Friberg, O. (1998). Updating large finite element models in structural dynamics. *AIAA journal*, 1861-1868.
- Ribeiro, D., Calçada, R., Delgado, R., Brehm, M., & Zabel, V. (2012). Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters. 413-435.
- Ruffinelli, M. C. (2024). *Caracterización y actualización de modelos a partir de vibración ambiente*.
- Seivane, A., & Mazzer, L. (2023). *Structural health monitoring*.
- Spencer Jr, B., Ruiz-Sandoval, M. E., & Kurata, N. (2004). Smart sensing technology: opportunities and challenges. *Structural Control and Health Monitoring*, 349-368.
- Toksoy, T., & Aktan, A. (1994). Bridge-condition assessment by modal flexibility. *Experimental Mechanics*, 271-278.
- Toksoy, T., & Aktan, A. (1994). Bridge-condition assessment by modal flexibility. *Experimental Mechanics*, 271-278.
- Zimmerman, D. C., & Kaouk, M. (1992). Eigenstructure assignment approach for structural damage detection}. *AIAA journal*, 1848-1855.

Organiza: