



# **VII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

## **II CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA FERROVIARIA**

15, 16 Y 17 DE SEPTIEMBRE DE 2021



**FoDAMI**

Universidad Tecnológica Nacional

VII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica y II Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria : VII CAIM-II CAIFE / compilación de Nancy Quaranta ; Marta Caligaris ; Fernando Palmieri ; editado por Nancy Quaranta ; Marta Caligaris ; Fernando Palmieri. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Universidad Tecnológica Nacional ; San Nicolás de los Arroyos : Facultad Regional San Nicolás, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-42-0210-3

1. Ingeniería. I. Quaranta, Nancy, comp. II. Caligaris, Marta, comp. III. Palmieri, Fernando, comp. IV. Título.

CDD 620.007

ISBN 978-950-42-0210-3



AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN) no percibe fondos desde los congresos / jornadas, la publicación es gratuita y abierta para eventos realizados u organizados en unidades académicas de la UTN



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

# **VII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

## **II CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA FERROVIARIA**

**15, 16 Y 17 DE SEPTIEMBRE DE 2021**

Facultad Regional San Nicolás (UTN)  
Foro Docente del Área Mecánica de las Ingenierías (Fo.D.A.M.I.)



## REPRODUCCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN MODELO SECCIONAL

Jorge O. Marighetti <sup>1</sup>, Maximiliano Gómez <sup>1</sup>, Juan M. Rodríguez Aguirre <sup>2</sup>, Mario De Bortoli <sup>1</sup>, Adrián R. Wittwer <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste  
Av. Las Heras 727, Resistencia, Argentina  
correo-e: jomaringha@gmail.com.

<sup>2</sup> Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional del Nordeste

### RESUMEN

Las estructuras sometidas a cargas de viento son susceptibles de vibrar en oscilaciones caracterizadas por periodos y frecuencias fundamentales, donde las fuerzas inerciales generadas por el movimiento pueden resultar mayores que las fuerzas aerodinámicas inducidas por el viento incidente. Cuando las cargas fluctuantes provocadas por el viento tienen frecuencias cercanas a las frecuencias fundamentales de la estructura se produce el efecto de resonancia. En este caso, cargas fluctuantes de pequeña magnitud pueden generar oscilaciones de gran amplitud o aceleración, incluso con efectos destructivos, como ocurrió en el caso del colapso estructural del puente Tacoma Narrows en 1940. Comportamiento estructural no-lineal y cargas viento aleatorias dificultan encontrar soluciones analíticas cerradas, debiendo recurrir a herramientas de análisis experimentales y de identificación de respuestas.

En este trabajo se detalla la construcción y calibración de un modelo seccional de un tramo de tablero de puente construido en escala geométrica 1:50 para ensayos en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, tratando de reproducir la distribución de masa, amortiguamiento y rigidez estructural, con base en las leyes de semejanza.

La calibración se realiza mediante una balanza dinámica construida para tal fin, con dos grados de libertad (GDL) desacoplados, reproduciendo las frecuencias fundamentales de oscilación de sustentación y angular alrededor del eje longitudinal del modelo dinámico, con una escala de frecuencias de 50/3. Para identificar los modos fundamentales de vibración, se adquieren, almacenan y procesan registros temporales de aceleración en ambos GDL. Los resultados preliminares, comparados con datos del prototipo de referencia y de la bibliografía, permiten identificar los modos de oscilación y, de esta forma, poder iniciar los ensayos de modelos sometidos a cargas de viento no estacionarias.

**Palabras Clave:** Modelos seccionales; propiedades dinámicas; frecuencias fundamentales.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las estructuras civiles esbeltas y flexibles que son sometidas a la acción del viento pueden producirse vibraciones caracterizadas por sus frecuencias fundamentales, Las fuerzas inerciales generadas por el movimiento vibratorio pueden superar a las propias fuerzas aerodinámicas del viento que las inducen [1, 2]. En el caso de puentes suspendidos y/o atirantados, las fluctuaciones de velocidad generadas por turbulencia del viento atmosférico, provocan vibraciones de diversas amplitudes y frecuencias en el tablero del puente y en los elementos flexibles de la estructura. Éstas oscilaciones se originan en las fuerzas aerodinámicas provenientes de las inestabilidades del escurrimiento y de alteraciones del campo de velocidades que, a su vez, son provocadas por la presencia de la propia estructura y por la topografía del lugar de emplazamiento. Fenómenos como separación del flujo en la estructura, re-colamiento del flujo (*re-ataque*), desprendimiento de vórtices (*vortex shedding*), martillamiento (*buffeting*) y aleteo (*flutter*), entre otros, son consecuencia de esas alteraciones en el campo de velocidades. Fluctuaciones de velocidad del viento relativamente pequeñas pueden provocar grandes oscilaciones que, como ocurrió en 1940 con el puente Tacoma Narrows [3], determinan el colapso estructural.

Considerando el comportamiento estructural no-lineal y el hecho de que las cargas de viento son generalmente no-estacionarias, los ensayos de modelos estructurales a escala reducida en túnel de viento resultan un método confiable para evaluar y caracterizar los fenómenos de interacción fluido-estructura [4]. El análisis dimensional y las leyes de semejanza definen la teoría de modelos que permite escalar las características geométricas, cinemáticas y dinámicas del prototipo que, en este caso, es el tablero del puente. El modelo definido de esta manera permite representar y evaluar las características dinámicas del tablero del puente en el túnel de viento.

Los modelos seccionales rígidos de tableros de puente, que incluyen reproducción de parámetros dinámicos estructurales, dan resultados satisfactorios en el análisis de las respuestas dinámicas de estructuras sometidas a la acción del viento atmosférico. Aunque son rígidos, permiten simular las propiedades dinámicas para reproducir los primeros modos de vibración del prototipo mediante un sistema de resortes, amortiguamiento y distribución de masas [5, 6]. Los requerimientos de semejanza incluyen también las características medias y turbulentas del escurrimiento incidente, y la semejanza geométrica de la estructura.

Los métodos numérico-computacionales permiten la determinación de los estados tensionales mediante el análisis de la interacción fluido estructura, sin embargo, la complejidad del fenómeno

limita sus alcances. De igual manera, los programas de diseño y simulación en 3D permiten diseñar y simular el comportamiento de objetos aislados o la interacción entre distintos objetos. Por otro lado, estas herramientas son muy útiles porque permiten realizar un análisis previo del fenómeno de interacción fluido-estructura y, de esta forma, obtener datos e información para el diseño y construcción de los modelos a escala que se utilizarán luego en los ensayos en el túnel de viento.

En este presente trabajo se evalúan las características dinámicas de un tablero puente atirantado, considerándolo como una estructura civil de bordes cortantes y flexible, con el objeto de construir un modelo seccional de dos grados de libertad desacoplados y una balanza destinada a ensayos dinámicos en túnel de viento. Esta balanza permitirá medir los desplazamientos, velocidades y aceleraciones correspondientes a los movimientos de sustentación y de torsión del tablero. Mediante programas computacionales, previamente se simula en 3D, un modelo seccional con una escala geométrica 1:50 del tablero del puente, donde se reproducen los parámetros estructurales dinámicos de masa y rigidez, basados en los requerimientos de semejanza. El modelo físico, construido en base a los resultados de la simulación computacional, se ensaya en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. La balanza dinámica se calibra para obtener la reproducción de las características estructurales del tablero del puente “Guamá”, sobre el río Guamá, en el estado de Pará, Brasil. De esta forma, permitirá reproducir en los ensayos los modos fundamentales de vibración de dicho tablero de puente para los dos grados de libertad que admite el modelo [7]. Para identificar los modos fundamentales de vibración, se adquieren registros temporales de aceleración en ambos GDL [8] que luego se procesan computacionalmente. Estos resultados iniciales son analizados y comparados con datos de la bibliografía específica dando comienzo al estudio de fenómenos dinámicos en puentes flexibles sometidos a cargas de viento en el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE.

## **2. BALANZA PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DE MODELO SECCIONAL**

En estructuras civiles tales como puentes atirantados con tablero de bordes cortantes y además flexibles deben ser analizados los efectos estáticos y dinámicos del viento. El análisis estático se realiza con modelos rígidos y ensayos aerodinámicos comunes de presiones localizadas o de medición de fuerzas globales. Para analizar el comportamiento dinámico, pueden utilizarse modelos seccionales del tablero o modelos aeroelásticos completos del puente que se ensayan en el túnel de viento.

En este trabajo se presenta la técnica de análisis dinámico mediante el desarrollo de una balanza portante del modelo seccional del tablero. La balanza dinámica, cuyo modelo se indica en la Figura

1, está configurada como un sistema soporte con ocho resortes de masa  $m$  ligados a un sólido rígido indeformable de masa  $M$  que representa el modelo seccional. Se consideran 2 GDL que representan el desplazamiento vertical del centro de masa del sistema y la rotación en torno a su eje de simetría transversal (de acuerdo al esquema).

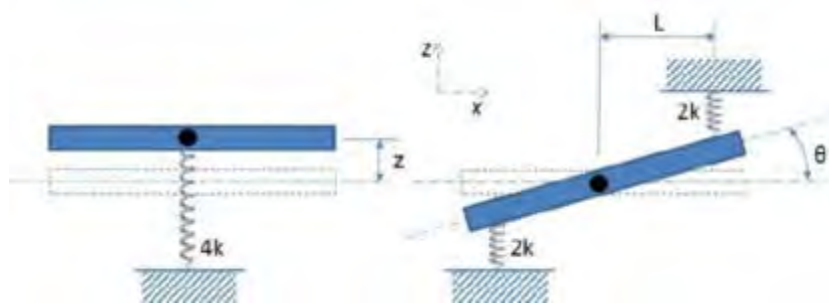


Figura 1: Configuración del modelo de la balanza dinámica

Las ecuaciones de movimiento de los 2 GDL considerados son las Ecuaciones (1) y (2), respectivamente.

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2\zeta_r \frac{dz}{dt} + \omega_r^2 z = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2\gamma \omega_r \frac{d\theta}{dt} + \omega_r^2 \theta = 0 \quad (2)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular de desplazamiento,  $\omega_r$  es la frecuencia angular de rotación,  $z$  es el desplazamiento vertical en el eje de sustentación y  $\theta$  es la rotación. En ausencia de fuerzas de rozamiento, las frecuencias naturales del sistema y el momento de inercia total están dados por las Ecuaciones (3), donde la masa efectiva de los resortes es considerada.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8k}{M + \frac{8m}{3}}}, f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8L^2 k}{I}}, I = I_0 + \frac{8}{3} mL^2 \quad (3)$$

### 3. SEMEJANZA Y ESCALAS DEL MODELO SECCIONAL

Para el diseño de la balanza dinámica con que se estudia el comportamiento dinámico del modelo seccional sometido a las cargas de viento deben aplicarse los criterios de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Este último criterio, relativo a la semejanza de fuerzas, es el más restrictivo y conduce a la igualdad del número de Reynolds (Re), de Euler, etc., para el caso de estudios con modelos a escala. Sin embargo, el criterio de igualdad de Re, por ejemplo, puede relajarse en caso

de estructuras con aristas vivas como es el tablero de un puente, sin embargo, deben considerarse otros parámetros como la inercia, a través de la relación entre las masas específicas estructura/aire, y el amortiguamiento estructural.

Con respecto a las escalas del modelo seccional, tomando como referencia las características geométricas y dinámicas del prototipo del tablero correspondiente al puente “Guamá”, ubicado sobre el Río Guamá en el estado de Pará, Brasil [9], se definieron la escala geométrica y la escala de velocidades. Para definir estas escalas, se tuvieron en cuenta las dimensiones de la cámara de ensayos del túnel de viento de la UNNE y el rango de velocidades de viento. De esta forma, la escala geométrica es  $\lambda_L = 1/50$  y la escala de velocidades es  $\lambda_v = 1/3$ , siendo  $\lambda_L = L_m/L_p$  y  $\lambda_v = V_m/V_p$ , donde  $L_m$  es la longitud del modelo,  $L_p$  es la longitud del prototipo,  $V_m$  es la velocidad en modelo y  $V_p$  es la velocidad en el prototipo. La definición de estos factores de escala permite obtener las demás escalas que aparecen en la Tabla 1, donde, además de  $\lambda_L$  y  $\lambda_v$ , se indican el factor de escala de masa  $\lambda_m$ , el factor de escala de tiempo  $\lambda_T$  y el factor de escala de frecuencia  $\lambda_f$ . El factor de escala para el momento de inercia de masa se obtiene mediante la expresión  $\lambda_{I_1} = \lambda_p \lambda_L^5$ , donde  $\lambda_{I_1}$  es el factor de escala de momento de inercia de masa y  $\lambda_p$  es el factor de escala de masa específica que se considera igual a uno.

Tabla 1. Escalas para el modelo dinámico seccional

Parámetro	Escala	Valor
Longitud	$\lambda_L = L_m/L_p$	1/50
Velocidad	$\lambda_v = V_m/V_p$	1/3
Masa específica	$\lambda_p = \rho_m/\rho_p$	1
Masa por unidad de longitud	$\lambda_m = \lambda_p \lambda_L^3$	1/2500
Tiempo	$\lambda_T = \lambda_L/\lambda_v$	3/50
Frecuencia	$\lambda_f = 1/\lambda_T$	50/3

#### 4. DISEÑO EXPERIMENTAL

La estructura para el montaje del modelo seccional de tablero puente debe adaptarse a las dimensiones y características del túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Éste es un túnel de capa límite y de circuito abierto con una longitud total es de 39,65 m. La cámara de ensayo tiene 2,4 m de ancho x 1,8 m de alto x 22,8 m de longitud con una velocidad



máxima en vacío de 25 m/s. Una descripción más detallada de las características de este túnel de viento puede encontrarse en un trabajo publicado anteriormente [10]. En particular, para la implementación del modelo seccional del tablero se utilizará la parte inicial de la cámara de ensayos donde existe flujo uniforme y pueden modificarse los niveles de turbulencia con grillas de distintas configuraciones geométricas.

Una vez construida la estructura portante del modelo, debe montarse el modelo seccional del tablero de puente. Como fuera mencionado, la estructura prototipo que se considera como referencia es una sección del tablero del puente sobre el río Guamá. En el tablero, considerado a escala real, la cuerda es de 17,3 m y su mayor altura es de 1,2 m [11], mientras que el modelo seccional a ensayar, empleando una escala de 1:50, tiene una cuerda de 0,35 m y una altura máxima de 0,030 m. Considerando las dimensiones del túnel de viento, la longitud adoptada para el modelo seccional es de 2 m.

En la Tabla 2 se resumen las propiedades dinámicas del prototipo del tablero de puente Guamá y del modelo seccional a escala reducida construido para los ensayos en el túnel de viento. Teniendo en cuenta las propiedades y características del modelo, se calculan las dimensiones y ubicación de los apoyos elásticos que se implementarán en la balanza dinámica.

Tabla 2. Propiedades dinámicas del prototipo y del modelo seccional del tablero

Propiedad	Prototipo	Modelo
$F_n$ - frecuencia de sustentación [Hz]	0,424	$\approx 7,00$
$F_o$ - frecuencia de torsión [Hz]	0,792	$\approx 13,20$
$F_o/F_n$	1,87	1,89
$m$ - masa por unidad de longitud [Kg/m]	26500	21,20
$I$ - momento de inercia por unidad de longitud [Kg $m^2$ /m]	992500	0,318

Un conjunto de cuatro pares de resortes de tracción con una constante de rigidez  $k = 5000$  N/m es implementado de acuerdo a las distancias previamente calculadas con una pre-tensión de 200 N. En la Figura 2 se puede observar la representación de la estructura soporte de la balanza dinámica y el modelo seccional de tablero puente en su ubicación de ensayo. A la derecha, una fotografía ilustra el montaje del modelo seccional en la cámara de ensayos del túnel de viento de la UNNE. En la parte inferior de la misma figura, se muestra un esquema del sistema que permite la modificación de las frecuencias naturales del modelo rigidizado por resortes. Otra fotografía, a la derecha, muestra la

parte exterior del túnel donde se observan el soporte y los resortes que configuran la balanza dinámica.



Figura 2: Estructura de la balanza dinámica y modelo en la cámara de ensayos (arriba) - Sistema de resortes del modelo seccional y vista exterior de la balanza (abajo).

## 5. RESULTADOS

A continuación, se indican los resultados parciales obtenidos a través de simulaciones numéricas, en primer lugar, y luego mediante los experimentos preliminares realizados para calibrar el modelo dinámico seccional.

### 5.1. Simulaciones computacionales

Para implementar la simulación numérica, en primer lugar, se establecen los vínculos y se define un mallado sólido basado en curvatura con un tamaño máximo de elementos de 40 mm y en tamaño

mínimo de 5 mm, cuya calidad corresponde a elementos cuadráticos de alto orden. Considerando las características predefinidas para el modelo seccional del tablero, es decir, masa  $m = 21,20 \text{ Kg/m}$  y momento de inercia (por unidad de longitud)  $I = 0,318 \text{ kgm}^2/\text{m}$ , se pudieron observar cinco modos de frecuencias en la simulación, cuyos valores son indicados en la Tabla 3. En la Figura 3 se muestran las simulaciones numéricas que corresponden a los modos 1 y 3, compatibles con los grados de libertad del modelo seccional, es decir, sustentación y torsión en torno al eje longitudinal.

Tabla 3. Formas modales y frecuencias

Modos	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
1	5,788	0,17276
2	11,064	0,09039
3	13,075	0,07648
4	17,740	0,05637
5	33,169	0,03015

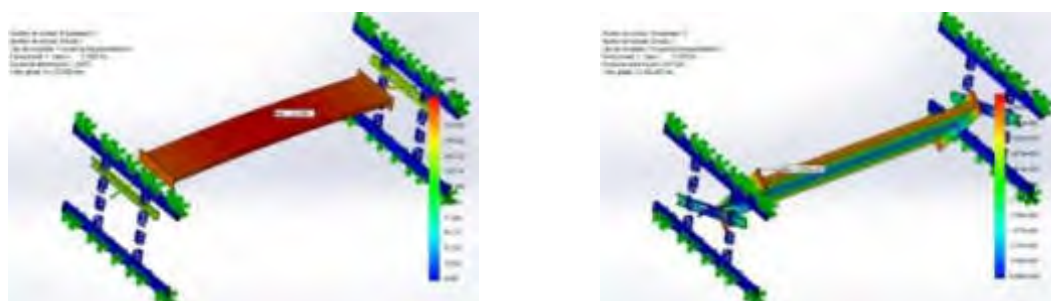


Figura 3: Modos 1 y 3 simulados computacionalmente compatibles con los 2 GDL del modelo seccional

## 5.2. Evaluación experimental de vibraciones libres

Para realizar esta evaluación experimental preliminar, la balanza dinámica con el modelo seccional del tablero de 2 GDL desacoplados fue montada en el soporte descrito en la sección 4. De esta forma, el sistema constituido por el modelo rígido, la balanza y el soporte quedan ya dispuestos en la condición requerida para los ensayos dinámicos. Como se mencionó, tal condición permite reproducir las frecuencias fundamentales de oscilación vertical (sustentación) y angular alrededor del eje longitudinal del modelo dinámico, con una escala de frecuencias de 50/3.

El registro de vibraciones se realizó con dos acelerómetros Isotron-Endevco 102 montados a 0,31 m del eje geométrico del tablero puente. En el soporte exterior, la posición equidistante de los acelerómetros respecto al eje longitudinal fue establecida con el objetivo de poder discriminar efectos asociados a modos de torsión que pudieran presentarse, de forma espuria, en el momento de provocar la excitación vertical del sistema. Esta excitación inicial se logra mediante un desplazamiento vertical de cierta amplitud que genera el movimiento oscilatorio libre. Por otro lado, se agregó lastre (masa) al eje del tablero de acuerdo a los requerimientos de escala. Todo el procedimiento fue desarrollado con el objeto de medir solamente el modo de oscilación vertical, que se corresponde con el modo 1 de la simulación computacional.

Se realizaron registros de las aceleraciones de 20 segundos de duración digitalizados con una frecuencia de adquisición de 100 Hz. La Figura 4 muestra un ejemplo de un registro temporal de la señal correspondiente a uno de los acelerómetros. La configuración de la señal permite observar que no existe amortiguamiento mecánico y que prácticamente solo se verifica aquel provocado por disipación natural.

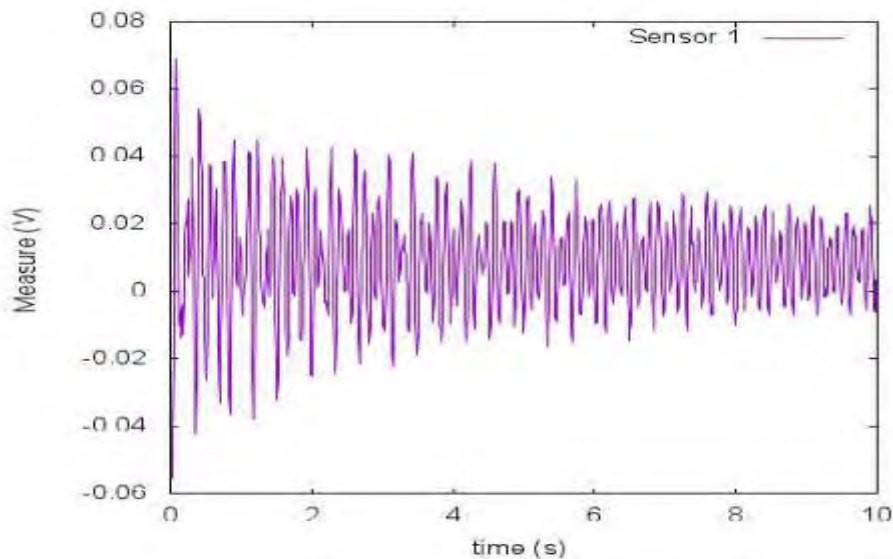


Figura 4: Registro temporal de un acelerómetro

Las series temporales fueron procesadas computacionalmente para obtener los espectros de potencia mediante la aplicación de la Transformada rápida de Fourier (FFT). En la Figura 5 se indican los espectros de potencia correspondientes a las señales de los acelerómetros donde, si bien se identifican tres modos combinados del sistema dinámico, se verifica la frecuencia natural de 8,9 Hz

que corresponde al GDL asociado a la oscilación vertical (sustentación). Los contenidos de energía correspondientes a los otros dos picos espectrales son bastante menores que el identificado en este ensayo.

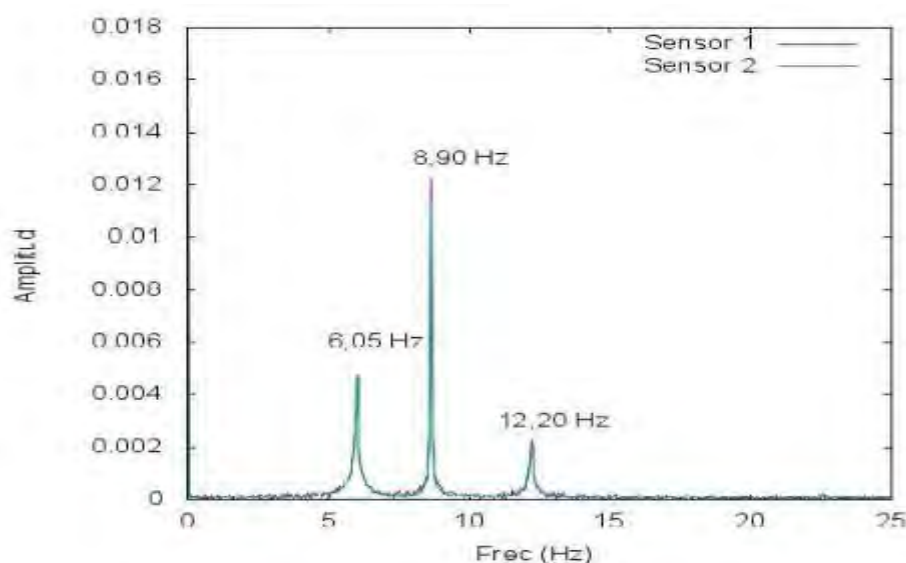


Figura 5: Espectro de potencia de los registros de los acelerómetros

### 5.3. Discusión de los resultados

Los resultados indican una aproximación relativamente buena entre el valor de frecuencia asociada al modo 1 mediante la simulación numérica (5,79 Hz) en el GDL vertical (sustentación) y el valor obtenido experimentalmente (8,90 Hz). De la misma forma, los valores experimentales se aproximan bastante a los valores definidos a partir de prototipo usado como tablero de referencia. Complementariamente, estos valores se verifican a partir de la comparación realizada con los trabajos de Fragas Lima [9, 11].

Sin embargo, los espectros de potencia de la Figura 5 permiten verificar cierto grado de acoplamiento con los modos torsionales. Aproximaciones de mayor exactitud, que permitan el desacoplamiento de los modos de vibración, deberían obtenerse con una distribución de masas y de momento de inercia del modelo seccional del tablero más adecuada. Es decir, si bien el sistema dinámico constituido por la balanza y el modelo permite identificar los modos que se pretende reproducir, deberían realizarse algunos ajustes para obtener una configuración más representativa de las características del tablero de puente usado como prototipo de referencia y del escalamiento establecido.

## 6. CONSIDERACIONES FINALES

La construcción de puentes atirantados o suspendidos de cierta magnitud se ha tornado bastante común en los países de nuestra región. Estas estructuras son sensibles a efectos aerodinámicos del viento atmosférico y, en general, requieren la evaluación experimental de problemas asociados al desprendimiento de vórtices y la inestabilidad dinámica. Este trabajo constituye una primera aproximación al estudio de estos fenómenos mediante el uso de modelos seccionales a escala reducida que se ensayan en un túnel de viento.

En esta etapa, se evaluaron características dinámicas de un modelo seccional de tablero de puente de 2 GDL desacoplados, utilizando una balanza adecuada a ensayos dinámicos en un túnel de viento. El modelo físico fue realizado usando como base las características de un prototipo correspondiente al tablero de un puente atirantado construido en el estado de Pará, Brasil, en 2002. Las características reales del modelo dinámico fueron evaluadas experimentalmente mediante ensayos de vibraciones destinados a verificar la reproducción de los modos de frecuencia fundamentales, asociados a los GDL que representa el modelo.

Los resultados preliminares indican que existe acoplamiento de los modos de traslación vertical y torsionales y que deben realizarse algunos ajustes en la distribución de masas y de momento de inercia del modelo seccional. No obstante, el sistema permite identificar claramente los modos de vibración asociados a las frecuencias fundamentales. Actualmente, ya se han realizado experimentos en el túnel de viento de la UNNE sometiendo el modelo seccional a viento incidente uniforme turbulento con el objeto de determinar velocidades críticas para desprendimiento de vórtices y para oscilaciones torsionales, cuyos resultados están siendo analizados y serán publicados próximamente.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Lawson T. V. *Wind effects on buildings. Vol. I: Design Applications*. Applied Science Publishers Ltd., London, 2005.
- [2] Simiu E., Scanlan R. H. *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Son Publication, New York, USA, 2006.
- [3] Wyatt T.A. *Bridge aerodynamics 50 years after Tacoma Narrows - Part I: Tacoma Narrows Failure and After*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 40, 317-326, 1992.

- [4] Scanlan R. *Bridge Aerolasticity: Present State and Future Challenges*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 36, 63-74, 1990.
- [5] Matsuda K., Kato K., Tamai Y., Misawa K., Ikeda I. *Experimental Study on Aerodynamic Vibrations of a Bracing Member with a Rectangular Cross Section of The Long-Spanned Truss Bridge*. Department of Civil and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu Fukuoka, Yokogawa Bridge Corp., Osaka, Japan Daiwa House Industry Co. Ltd., Hiroshima, Japan, 2015.
- [6] Scanlan R. H., Tomko J. *Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivates*. Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings ASCE, 1717-1737, 1971.
- [7] Kargarmoakhar R., Gan Chowdhury A., Irwin P.A. *Effects of Gap Width on Twin-Deck Bridge Aerodynamics*. Civil and Environmental Engineering/International Hurricane Research Center, Florida International University, Miami, USA, 2015.
- [8] Yang C. Y. *Random vibration of structures*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [9] Fraga Limas L. *Determinação das características aerodinâmicas de seções transversais de pontes em túnel de vento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, PPGEC, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2003.
- [10] A. R. Wittwer, S. V. Möller, "Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 84 (3), pp. 307-320, 2000.
- [11] Fraga Limas L. *Determinação da Influência de Seções Transversais na Resposta Dinâmica de Pontes a través de Ensaios em Túnel de Vento e Identificação de Sistemas*. Tese de Doutorado em Engenharia, PPGEC, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2007.

### Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a Beatriz Iturri del Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE por el apoyo técnico, a la Secretaría General de Ciencia y Técnica, SGCYT-UNNE y a la Facultad de Ingeniería de la UNNE por el apoyo económico.