

## AmemoMe: Diseño e implementación de un sistema de medida basado en acelerómetros MEMS para el análisis de los modos de vibración de una estructura de madera

Juan-José Villacorta-Calvo <sup>a</sup>, Alberto Izquierdo-Fuente <sup>a</sup>, Lara del Val-Puente <sup>a</sup>, Luis Suárez <sup>b</sup>, Roberto Martínez <sup>c</sup>, Leandro Morillas <sup>d</sup> y Luis-Alfonso Basterra <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Procesado en Array. ETSI Telecomunicaciones. Universidad de Valladolid.

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Burgos.

<sup>c</sup> Grupo de Estructuras y Tecnología de la madera. Universidad de Valladolid.

<sup>d</sup> ETS Arquitectura. Universidad de Granada.

[alberto.izquierdo@tel.uva.es](mailto:alberto.izquierdo@tel.uva.es)

**Palabras clave:** acelerómetros, MEMS, procesado de señal, modos de vibración, madera estructural.

### Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo experimental de un sistema de bajo coste, basado en acelerómetros MEMS, para el análisis dinámico de una estructura en servicio y la detección de síntomas de deterioro.

Los acelerómetros ADXL355, de Analog Devices, se conectan a un sistema de procesado en tiempo real myRIO, basado en una arquitectura FPGA/ARM, de Nationals Instrument, mediante cables ethernet standard, de bajo coste y sin pérdidas.

El sistema integra una aplicación de desarrollo propio en LabVIEW, denominada AmemoMe, que permite la captura de la señal y el análisis frecuencial en tiempo real. Con ello es posible monitorizar 6 acelerómetros por cada unidad myRIO, que es autónoma y se interconecta vía WIFI con un sistema central. Esta arquitectura es escalable para monitorizar estructuras con cientos de acelerómetros. También permite monitorizar dos células de carga, así como generar dos señales de excitación para *shaker*, que permiten obtener las funciones FRF para el posterior análisis de los modos de vibración de la estructura.

### Introducción

En la literatura se pueden encontrar múltiples ejemplos del uso de análisis modal para la detección de daños en estructuras de madera [1-2]. En la mayoría de estos ejemplos, para la realización del análisis modal se requiere el uso de complejos y caros sistemas de medida, junto con acelerómetros piezoeléctricos de alto coste. Por otra parte, recientemente hay estudios que describen la utilización de acelerómetros MEMS de precio reducido para la medición de vibraciones en estructuras [3].

En esta contribución se presenta el diseño e implementación de un prototipo de un sistema de medida que utiliza un conjunto de acelerómetros MEMS distribuidos para el análisis de los modos de vibración de una estructura de madera.

### **Sistema de adquisición**

Para el análisis de los modos de vibración se ha diseñado un sistema de adquisición de datos de bajo coste con las siguientes características principales:

- Utilización de acelerómetros MEMS digitales, que integran el sensor analógico, el convertidor a digital y la interfaz de comunicación.
- Multisensor, permitiendo el control y la lectura de hasta 6 acelerómetros simultáneamente.
- Dos canales de entrada analógicos, válidos para la adquisición simultánea de datos de acelerómetros analógicos o células de carga.
- Dos canales de salida analógicos, para la generación de señales de excitación con la posibilidad de elegir distintos modos de funcionamiento, tono sinusoidal de frecuencia única, ruido blanco limitado en banda, ruido rosa, etc.
- Sistema de control autónomo, con conexión inalámbrica vía WIFI entre el sistema de adquisición y el ordenador donde se almacenarán los datos capturados.
- Modo automático de ahorro de energía cuando el sistema deja de utilizarse.

El acelerómetro elegido para implementar el sistema de adquisición es el modelo ADXL355, del fabricante Analog Devices. Se trata de un acelerómetro triaxial de bajo consumo, con salida digital de 20 bits y con un rango dinámico configurable entre  $\pm 2g$  y  $\pm 8g$ ; lo que proporciona una sensibilidad de hasta  $3,9 \mu g/bit$ . Permite la utilización de interfaces SPI e I2C para la lectura de datos a una velocidad máxima de 4000 Hz. Aunque se trata de un integrado de montaje superficial, hay disponibles sistemas de evaluación a precio reducido, lo que facilita la prueba y su utilización sin necesidad de la fabricación de placas de circuito especiales.

Para el control y lectura de los acelerómetros se ha seleccionado la plataforma myRIO. Se trata de un hardware embebido, desarrollado por National Instruments y basado en el chip Zynq 7010 de Xilinx, que integra un procesador ARM Cortex A9 dual Core y una FPGA. Dispone de 40 líneas de E/S digital, 2 canales de entrada y 2 de salida analógica. La plataforma myRIO ejecuta un SO (Sistema Operativo) en tiempo real que permite la ejecución de programas creados con el lenguaje gráfico LabVIEW.

La comunicación entre los acelerómetros y la myRIO se realiza a través de las líneas digitales. Se ha implementado el protocolo SPI en la FPGA para acceder a los datos de aceleración de cada sensor y el programa de control, ejecutándose en los procesadores ARM, se encarga de leer los datos de todos los acelerómetros conectados y enviarlos al sistema central a través de la conexión WIFI.

Para la interconexión física entre la tarjeta de evaluación ADXL355 y los conectores digitales de myRIO se ha optado por utilizar conectores RJ45. La protección contra interferencias de este tipo de cableado permite una mayor distancia entre el sensor y el sistema de control, habiéndose utilizado satisfactoriamente cables de hasta 15 m.

La Fig. 1 muestra un sensor ADXL355 junto con el conector RJ45 en su placa de interconexión, mientras que la Fig. 2 muestra el sensor en su encapsulado, diseñado y fabricado por los autores, para facilitar su colocación en las vigas a medir. Por su parte, en la Fig. 3 se puede ver el sistema myRIO con los 6 conectores RJ45 conectados a sus puertos digitales.

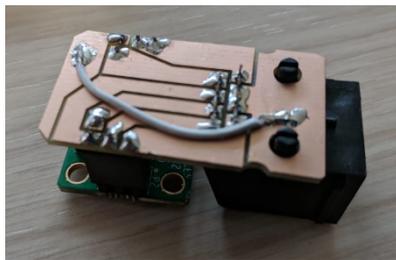


Figura 1. Acelerómetro MEMS y conector RJ45.



Figura 2. Acelerómetro MEMS encapsulado.



Figura 2. myRIO con adaptador RJ45.

Para probar el sistema de adquisición se han colocado 2 sensores de prueba, junto con una célula de carga sobre un *shaker* (Fig. 4), excitado con ruido blanco entre 0 y 200 Hz, obteniéndose la respuesta frecuencial mostrada en la Fig. 5. Se observa que la respuesta es básicamente plana en el rango de frecuencia de trabajo. La poca masa del sensor hace que no sea válido para frecuencias por debajo de 25 Hz.

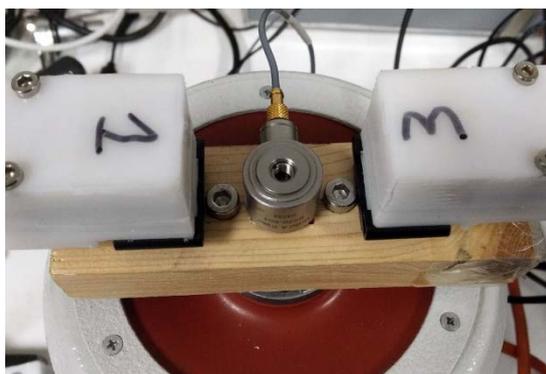


Figura 4. Acelerómetro MEMS sobre shaker.

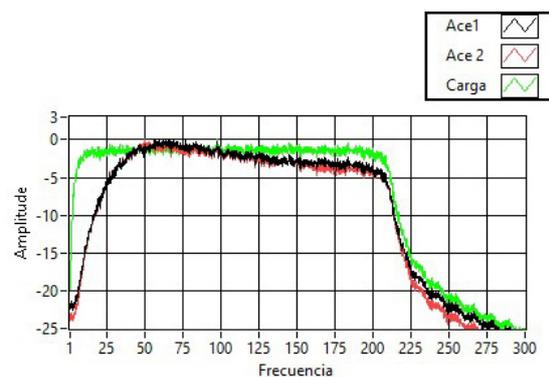


Figura 5. Respuesta frecuencial del acelerómetro MEMS entre 0 y 200 Hz.

### Sistema de medidas modales

El sistema AmemoMe (*Accelerometers MEMS for Modal Measurement*), permite la utilización de uno o más de los sistemas de adquisición presentados previamente para

el cálculo de las funciones FRF (*Frequency Response Function*) necesarias para la estimación de los modos de vibración de una estructura [4].

La aplicación está desarrollada con LabVIEW, y permite la definir la estructura a monitorizar y la posición de los puntos de medida donde se van a colocar los acelerómetros. Después, es capaz de controlar simultáneamente múltiples sistemas de adquisición, pudiendo leer datos de tantos acelerómetros como se definan en la pantalla de configuración (máximo 6 por cada sistema de adquisición).

Una vez configurado el sistema, se procede a la adquisición de datos y el cálculo de las FRF. En el caso de que el número de acelerómetros conectados sea igual al número de puntos de medida, toda la estructura se mide simultáneamente. En caso contrario, el sistema permite medir la estructura en varias etapas, siendo necesario cambiar la posición de los sensores antes de comenzar cada etapa de medida.

En la Fig. 6 se puede ver la interfaz de usuario de la aplicación, en la pantalla de adquisición. Se ha incluido en la aplicación una interfaz web que permite acceder al estado de la medida desde cualquier dispositivo conectado a internet, como se muestra en la Fig. 7.

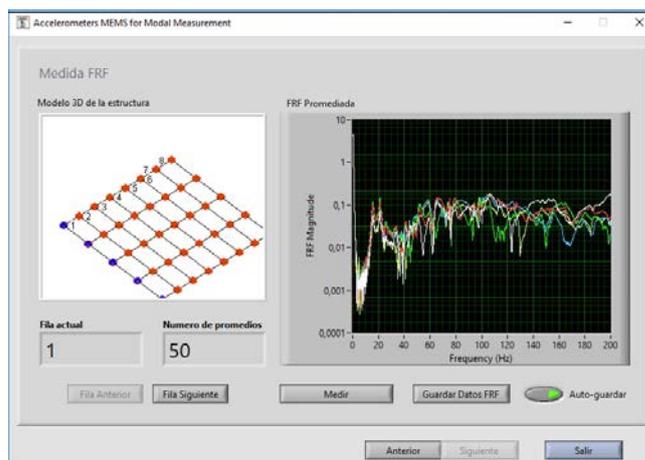


Figura 6. Interfaz de usuario de AmemoMe.

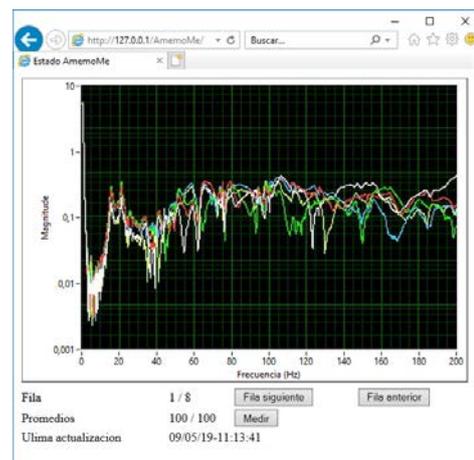


Figura 7. Interfaz web de AmemoMe.

## Validación del sistema

Para validar el funcionamiento del sistema, se han colocado cinco sensores equiespaciados en una viga de madera de 4 m de longitud, suspendida en unos muelles tal y como se muestra en Fig. 8. Como excitación se ha optado por un martillo manual, instrumentado con una célula de carga, para medir la fuerza ejercida. Para el cálculo de las FRF se han realizado 1000 medidas de 1 segundo. En la Fig. 9. se pueden observar las FRF resultantes en un rango de frecuencias entre 0 y 150 Hz, advirtiéndose 2 modos de vibración a 24,15 Hz y 65,04 Hz.



Figura 8. Viga de madera.

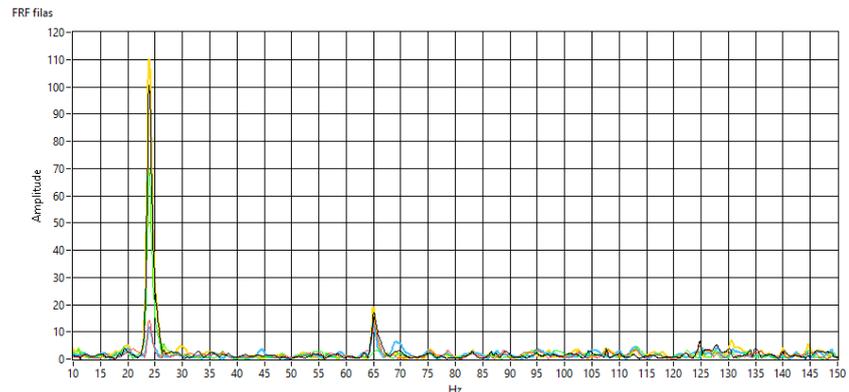


Figura 9. FRF con excitación manual.

Un análisis posterior de las FRF permite detectar los modos de vibración y los patrones de amplitud, verificándose que corresponden con el modelado mediante elementos finitos de la viga de madera.

### Conclusiones y líneas futuras

Se ha diseñado un sistema de medida para el análisis de los modos de vibración de estructuras constituido por un sistema de adquisición basado de bajo coste basado en acelerómetros MEMS y un programa de control y medida. Como principales características, cabe destacar que se trata de un sistema distribuido y escalable que permite la monitorización de estructuras de grandes dimensiones, con cientos de sensores separados decenas de metros.

En un segundo paso se pretende ampliar las pruebas del sistema sobre un forjado experimental de madera a escala natural, formado por 8 viguetas, con un total de 40 puntos de medida, y realizar un estudio comparativo contra un sistema analógico convencional, basado en acelerómetros piezoeléctricos y cadena de medida Pulse, de la empresa Brüel & Kjaer, referente en el sector de medida acústica.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo con ayuda financiera del programa de apoyo a proyectos de investigación de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León, cofinanciado por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (ref. VA095P17).

### Referencias

- (1) Hu, C., Xiao, M., Zhou, H., Wen, W., & Yun, H. Damage detection of wood beams using the differences in local modal flexibility. *Journal of wood science*, 57(6). **2011**, 479-483.

- (2) DUTTA, Anjan; TALUKDAR, S. Damage detection in bridges using accurate modal parameters. *Finite Elements in Analysis and Design*, **2004**, vol 40, no 3, 287-304
- (3) Sabato, A., Niezrecki, C. and Fortino, G. Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: A Review. *IEEE Sensors Journal*, **2017**, vol. 17, no. 2, 226-235.
- (4) Ewins, David J. Modal testing: theory and practice. Letchworth: Research studies press, **1984**.