



USO DE SENSORES INALÁMBRICOS EN LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MODALES

Manuel E. Ruiz Sandoval Hernández¹, Bartek Blachowski² y B. F. Spencer³

RESUMEN

Este artículo presenta la implementación de sensores inalámbricos en la obtención de parámetros modales. Se utiliza la plataforma Imote2 que es una plataforma abierta desarrollada por Intel. El ejemplo de aplicación es una placa de madera simplemente soportada. Se explica como utilizar el sensor Imote2 y como extraer la información modal de los datos puro.

ABSTRACT

This article presents the implementation of wireless sensors in obtaining modal parameters. The Imote2 platform is used. This is an open platform developed by Intel. The application example is a simply supported wooden plate. It explains how to use the Imote2 sensor and how to extract modal information from the raw data.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras civiles son continuamente expuestas a diversos tipos de cargas, algunas de ellas severas, en algún momento de su vida útil. Estas cargas pueden causar daños que pueden poner en riesgo a sus usuarios. Existen algunas tragedias debidas a fallas estructurales que producen colapsos de edificios y puentes. Eventos tales desafortunadamente conllevan con pérdidas humanas y económicas. Es por esta razón que la gran mayoría de países desarrollados están en la fase de incrementar los presupuestos relativos al monitoreo de su estado estructural (SHM por sus siglas en inglés) de su infraestructura más importante. Los sistemas SHM usualmente ofrecen la oportunidad de reducir el costo de mantenimiento, reparación y refuerzo durante el ciclo de la vida útil de las estructuras. Recientemente, sensores inteligentes inalámbricos han sido considerados una herramienta alternativa para el desarrollo e implementación de sistemas SHM. Los sensores inteligentes son sensores emergentes cuyas características incluyen un microprocesador, sensores, comunicación inalámbrica, baterías y la esperanza de ser de bajo costo (Spencer et al 2004).

El proyecto de salud estructural de Illinois (ISHMP Illinois Structural Health Monitoring Project) ha desarrollado sistemas hardware y software para poder realizar monitoreo confiable y continuo de infraestructura por medio de una densa red de sensores inalámbricos. Este proyecto ha sido difundido a través de librerías de plataforma abierta en las aplicaciones de SHM, así como ejemplos asociados a estas. Mas detalles pueden ser encontrados en el sitio: <http://shm.cs.illinois.edu/index.html>

La extracción de información modal, tal como frecuencias y formas modales de los registros de sensores es muy importante en la determinación del comportamiento de la estructura, así como la calibración de los modelos analíticos. Este artículo se presenta un ejemplo de aplicación de la formación de una red de sensores inalámbricos con la finalidad de obtener la identificación dinámica de la estructura.

¹ Profesor. Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 18, Col. Reynosa-Tamaulipas, 02200 México, D.F. Teléfono, (55) 5318-9455; fax: (55) 5318-9085; mrh@correo.azc.uam.mx

² Department of Intelligent Technologies, Institute of Fundamental Technological Research of the Polish Academy of Sciences, bblach@ippt.gov.pl

³ Profesor y Director del Laboratorio Newmark University of Illinois at Urbana-Champaign
2213 Newmark Civil Engineering Laboratory, MC-250 205 North Mathews Ave Urbana, IL 61801 Teléfono (217)333-8630, bfs@illinois.edu

Existen tres principales partes de este artículo. La primera tiene que ver con la descripción del experimento. La segunda la descripción de algunas de la funcionalidades del software utilizado en la plataforma Imote2. Por último se hace un análisis de los datos obtenidos a través del programa Matlab.

DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA

PLACA Y CONDICIONES DE SOPORTE

Se utiliza una placa madera de triplay de 2.44 x 0.91m de largo y ancho, así como un espesor de 0.019m (ver figura 1). La placa esta soportada en sus extremos por dos ángulos de acero conectados por bisagras. En la parte inferior de los ángulos de acero se coloca plastilina para evitar tener una superficie de contacto no uniforme. En la figura 1 también se pueden observar la disposición de los sensores inalámbricos en la placa.



Figura 1. Placa de madera utilizada en el experimento.



Figura 2. Condiciones de soporte de la placa.

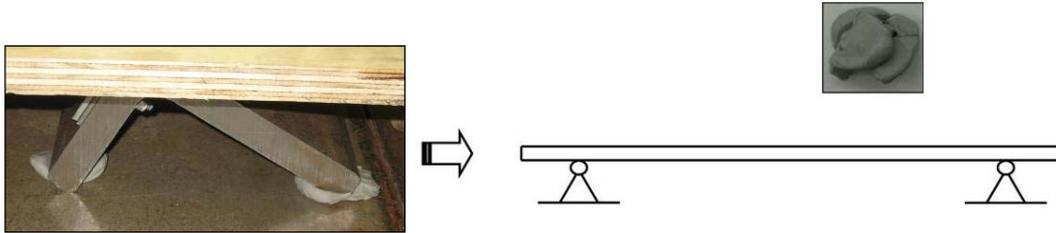


Figura 3. Condiciones de soporte de la placa en vista lateral. Plastilina en la base del apoyo

SENSORES

Computadoras con características de comunicación inalámbricas son ahora de bajo costo, y los precios continúan siendo accesibles aunado a un incremento en su funcionalidad. El producto desarrollado por Intel llamado Imote2 es usado en este experimento. Esta es una nueva plataforma que tiene integrados, y con muy baja cantidad de consumo, los elementos necesarios para la instrumentación de estructuras. El tamaño de estos sensores es de unos pocos centímetros cúbicos (ver figura 4). Un total de 6 sensores fueron utilizados para llevar a cabo el experimento descrito en este artículo (ver figura 1 y 5).

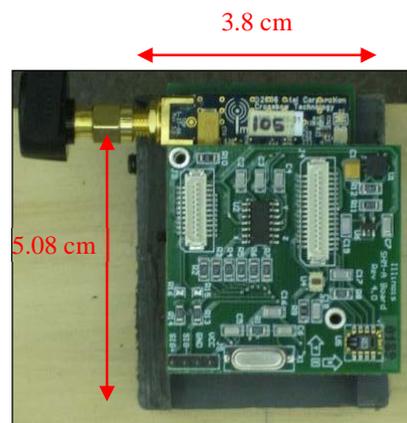


Figura 4. Imote2 con una tablilla de sensores y la tablilla de baterías

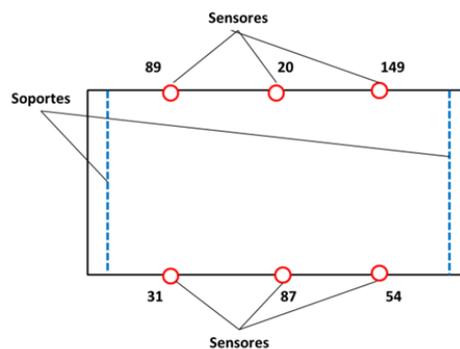


Figura 5 Ubicación de los sensores en la placa de madera.

Los valores asociados a los sensores mostrados en la figura 5 son los de su identificación electrónica. La posición de los sensores es en borde de la tabla. Dado que se considera que es un elemento rígido, se busca encontrar sus modos de vibración al obtener los registros de sus orillas.

Cada uno de los Imote2 consiste de 3 partes (o tablillas) principales: baterías, microprocesador, sensores. La primera consiste de 3 baterías AAA con las que se alimentará al sistema. Conectada a esta tablilla se encuentra la del microprocesador, que adicionalmente incluye el radio de comunicación y la memoria en donde se almacenará la información. Finalmente, la tablilla de sensores que entre otros consiste en 1 acelerómetro triaxial con una sensibilidad de 120 mV/g. Cabe hacer notar que el usuario podría diseñar la tablilla de sensores necesaria para cubrir con su aplicación siempre y cuando cumpla con las posibilidades electrónicas que otorga el Imote2.

Existe algunas de estas tablillas ya diseñadas, como la usada en este experimento, pero hay otras que contienen acelerómetros de alta sensibilidad (Jo et al 2010, Ruiz Sandoval et al 2006)

SOFTWARE

La plataforma que se utilizó en el control y registro de los sensores Imote2 es TinyOS. Esta fue desarrollada por la Universidad de California en Berkeley, así como la compañía Intel. El lenguaje de programación es parecido al C, y que se llama nesC. Una de las ventajas de esta plataforma es que requiere de muy poca memoria para operar. Adicionalmente este lenguaje está ligado al compilador del microprocesador Atmel AVR, que es el microprocesador que se tiene a nivel de sensor.

Los programas utilizados están disponibles en la página del ISHMP en un conjunto de herramientas (Toolsuite). Estas proveen de una biblioteca de funciones que permite ajustar las características de registro de los sensores en función de la aplicación en la que se van a utilizar. La documentación necesaria para una correcta instalación, así como la verificación de que se cuenta con la última versión del sistema puede encontrarse en: <http://shm.cs.illinois.edu/documentation.html>

El objetivo de este artículo no es el de ser un manual del usuario para los usuarios del Imote2. Sin embargo, se describirán en términos generales las principales herramientas necesarias para realizar un registro con los sensores inalámbricos. Así el lector podrá contar con una visión global de este sistema y decidir si esta herramienta puede cubrir las necesidades de su aplicación

Registro remoto

Una de las herramientas para obtener el registro de la información obtenida por los sensores se lleva a cabo por medio de la función *RemoteSensing*. En esta se debe indicar de identificación electrónica de los sensores a ser utilizados en la red.

En teoría no existe límite en el número de sensores que pueden ser utilizados al mismo tiempo. Una de las limitantes puede ser su ubicación respecto de la estación base. Mientras más alejados la comunicación por radio puede ser no posible. También, mientras más sensores se tengan la recolección de datos, mayor será el tiempo que se requiera para completar un registro.

La otra posibilidad de medir los datos es por medio de una red de sensores. Esta aplicación consiste en la formación de redes de tal forma que no necesariamente los sensores deben conectarse directamente con la estación base, sino que forman puntos intermedios. Esta aplicación no se utiliza en el experimento que se muestra en este artículo debido a la proximidad de los sensores entre sí.

Obtención de los datos

La siguiente aplicación necesaria es la herramienta GetData. Los valores requeridos por esta es la indicación del número de canales que serán utilizados. Como se mencionó anteriormente, cada sensor tiene la posibilidad de medir en tres direcciones (x, y & z). Si la aplicación lo amerita se pueden medir las 3 al mismo tiempo o



sólo una o dos de ellas. El costo de medir más de un canal es que la memoria requerida para almacenar todos los registros tal vez no sea suficiente. También, la velocidad de muestreo se ve disminuida y no puede alcanzar su máximo de 4096 Hz.

Adicionalmente a la indicación de los canales que serán utilizados se debe especificar el número de muestras que se desea utilizar, así como la velocidad de muestreo de los registros. La frecuencia de muestreo deberá ser seleccionada en función del contenido de los registros a ser evaluados. Así por ejemplo, una estructura muy rígida requerirá de una alta velocidad de muestreo, y por el contrario una estructura flexible podrá ser registrada con una velocidad de muestreo baja.

Independientemente de la velocidad de muestreo utilizada todos los sistemas de adquisición de datos cuentan con un filtro anti-alias. Esto evita que altas frecuencias se “reflejen” en la zona de muestreo de los registros. El sistema Imote2 no es la excepción por lo que se tiene pre-seleccionados velocidades de muestreo y su respectivo filtro anti alias (ver figura 1).

Tabla 1 Velocidades de muestreo por default para el Imote2

Velocidad de muestreo (Hz)	Filtro digital aplicado a la señal (HZ)
25	10
50	20
100	40
280	70

EXPERIMENTO

Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas en la placa de madera. Una fue la excitación de la estructura por medio un golpe en un punto arbitrario sobre la estructura (ver figura 6). Este tipo de fuerza de impulso permite simular el sistema en vibración libre. Por lo que sus características dinámicas podrán ser más fácilmente obtenidas. Una prueba de este tipo en la vida real puede ser imposible de aplicar. En una estructura de mediana altura no sería posible desplazarla inicialmente, y mucho menos propinarle un golpe lo suficientemente poderoso para excitar alguno de sus modos fundamentales de vibrar. Los registros típicos obtenidos sobre esta estructura se muestran en la figura 7.

La velocidad de muestreo usada fue de 280 Hz. Se utilizaron los 3 canales disponibles. En este trabajo se muestra sólo el correspondiente a la vibración vertical de la placa.

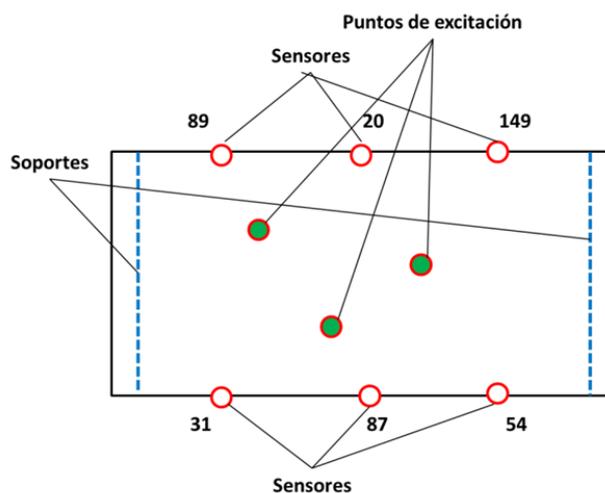


Figura 6 Puntos de excitación por medio de pulso sobre la placa de madera.

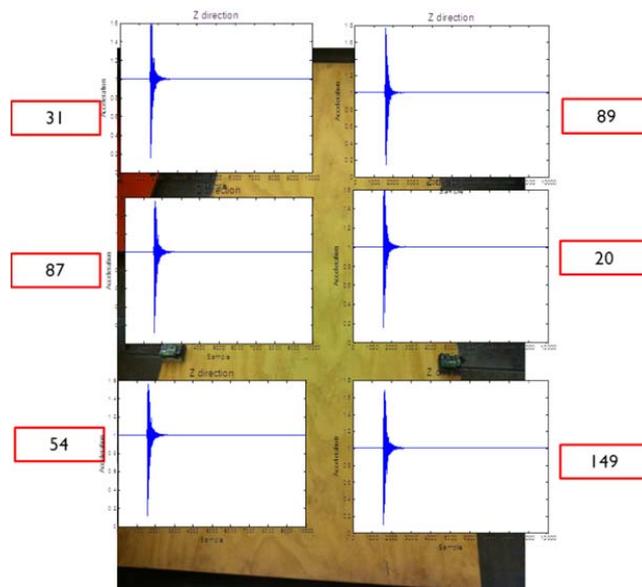


Figura 7 Registro típicos ante un golpe sobre la estructura.

El segundo tipo de excitación fue al golpear aleatoriamente con los dedos a la placa de madera. Este tipo de registro, en las estructuras reales, sería el debido al uso de la estructura (paso de personas), viento, microtemores, tráfico de vehículos etc. A esta excitación se le conoce como vibración ambiental. En la figura 8 se muestran los registro típicos obtenidos sobre la estructura ante este tipo de excitación.

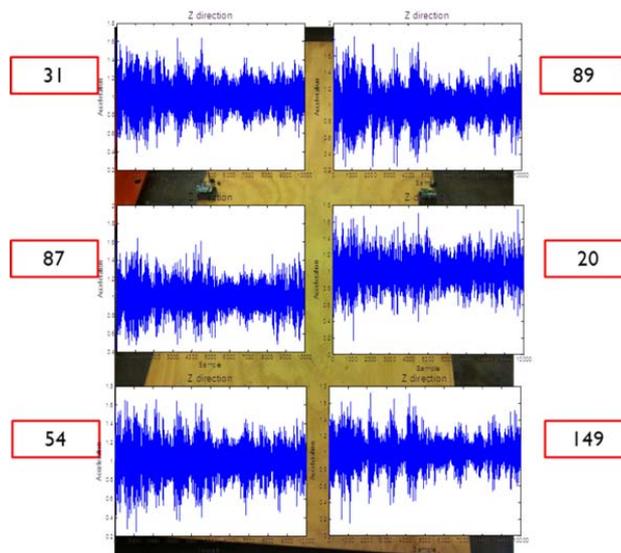


Figura 8 Registro típicos ante vibración ambiental sobre la estructura.

IDENTIFICACIÓN DINÁMICA

Con los registros obtenidos sobre la placa de madera, ambientales y de impulso, se procedió a calcular las frecuencias naturales y formas modales de la estructura. El método utilizado se basa en la técnica NExT/ERA.

NExT/ERA

La técnica de excitación natural (Natural Excitation Technique NExT) fue desarrollada por James et al (1993). Este método extrae los valores modales (frecuencias naturales, amortiguamientos y formas modales) de las estructuras haciendo uso de los registros obtenidos sobre ellas. El algoritmo de Realización de Eigensistemas (The Eigensystem Realization Algorithm ERA) fue desarrollada por Juang y Pappa (1985). La técnica fue desarrollada utilizando la teoría de la mínima realización, y es una de las más populares técnicas de análisis para la ingeniería civil.

NExT fue empleada por primera vez en el Sandia National Laboratory por James et al. en 1993. Los investigadores notaron que cuando una estructura se encuentra en vibración ambiental era posible utilizar una función de correlación cruzada entre dos desplazamientos o aceleraciones, la cual satisfacía la ecuación diferencial homogénea de primer orden que describe el movimiento del sistema. Esto implica que la función de correlación cruzada tiene las mismas características de que en vibración libre.

La técnica Eigensystem Realization Algorithm (ERA) es utilizada para la identificación parámetros modales de sistemas con niveles bajos de amortiguamiento. ERA es una técnica en el dominio del tiempo basada en el concepto de realización mínima de la teoría del control, que identifica los eigenvalores y eigenvectores de un sistema a partir de su respuesta de impulso. Una estructura puede ser representada por un conjunto de ecuaciones diferenciales basadas en algunos estados del sistema. En el caso de estructuras civiles, por sus desplazamientos y velocidades. Estas ecuaciones diferenciales pueden ser propuestas en forma de representación de estados como la mostrada en la ecuación 1.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Este sistema puede también ser visto de una manera simplificada de acuerdo con la figura 9.

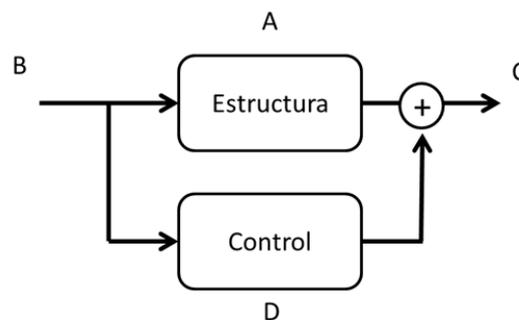


Figura 9. Representación gráfica de la interpretación de A, B, C y D.

De acuerdo con la anterior figura, la forma en que esta excitada la estructura esta estipulado en la matriz B. La descripción propia de la estructura esta intrínseca en la matriz A. La matriz C representa la salida del sistema. Finalmente, la matriz D representaría algún tipo de control o fuerza externa no causal del sistema. En general las únicas matrices de interés son las A, B y C; aunque principalmente los sería la matriz A. La gran mayoría de las estructuras son causales, por lo que el valor de la matriz D sería cero.

El término “Realización” (en el método ERA) se refiere a la determinación de las matrices $[A \ B \ C]$ de un sistema a partir de las respuestas de impulso o parámetros de Markov para un sistema dado. La realización mínima se refiere al modelo con el menor número de orden de estados con la misma relación de entradas y salidas.

Las formas modales encontradas después de aplicar el NEXT/ERA a las señales obtenidas en la placa, tanto en vibración como impacto, son presentadas en las figuras 10 y 11.

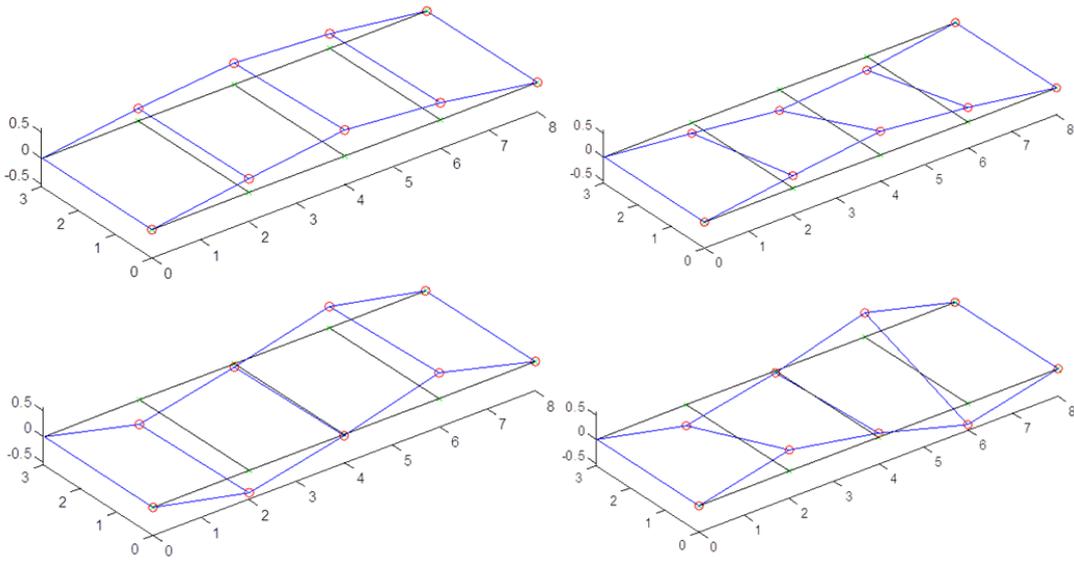


Figura 10. Formas modales identificadas de la vibración ambiental.

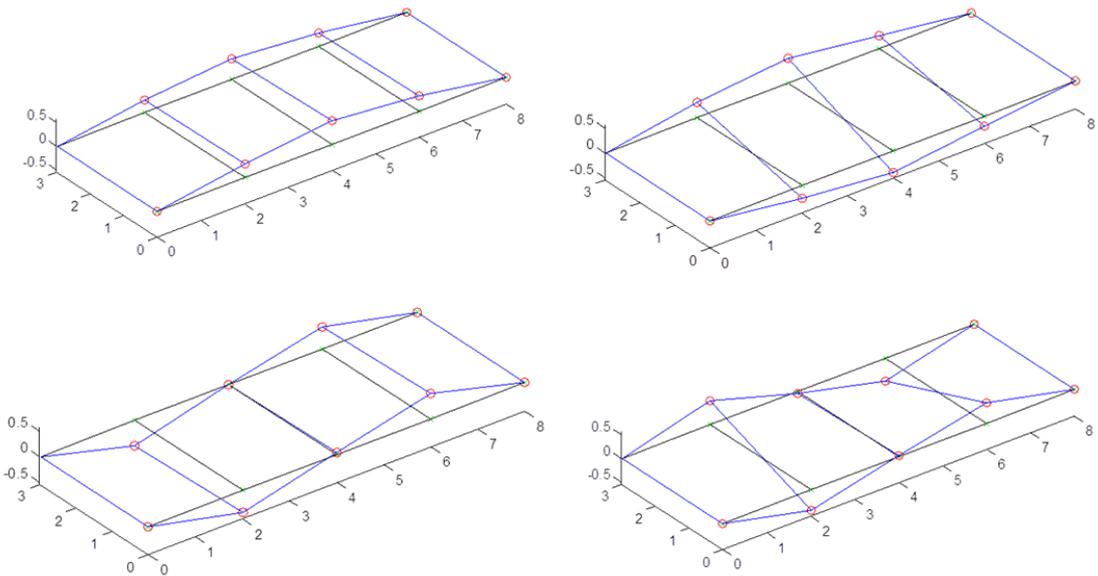


Figura 11. Formas modales identificadas de la prueba de impacto.

Se construyó un modelo de elemento finito en ANSYS. El elemento compuesto utilizado fue el Shell 99 (figura 12).

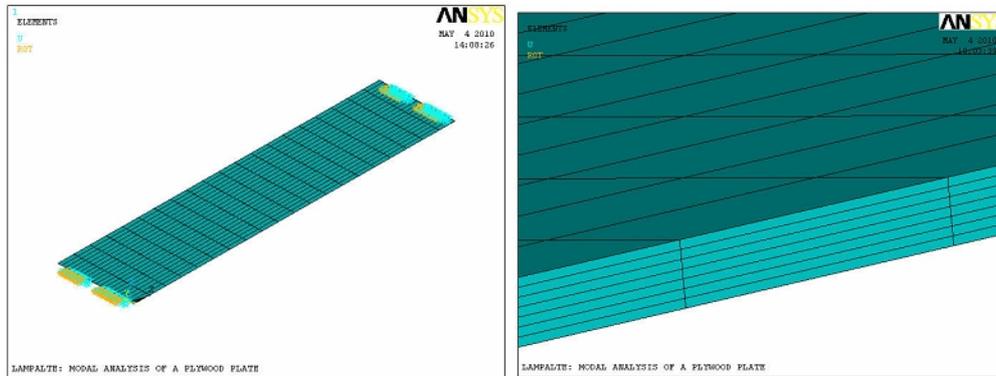


Figura 12. Modelo de elemento finito de la madera de triplay.

La tabla 2 muestra los valores de periodos obtenidos en cada una de las pruebas, y su comparación con los resultados del modelo analítico de la tabla. La tabla 3 muestra la diferencia en porcentaje de cada una de las pruebas, en valor absoluto, con respecto al modelo de elemento finito

Tabla 2. Periodos obtenidos

Vibración ambiental (Hz)	Impacto (Hz)	Elemento finito (Hz)
0.124	0.128	0.136
0.068	0.073	0.073
0.038	0.038	0.034
0.028	0.029	0.027

Tabla 3. Diferencias absolutas en porcentaje de las pruebas con respecto al modelo de elemento finito

Ambiental	Impacto
9.27	5.90
7.24	0.29
10.42	11.47
2.40	6.55

De las figuras 10 y 11 se puede concluir que las pruebas de impacto dieron como resultado formas modales más claras y simétricas que las obtenidas de la vibración ambiental. Los puntos de medición a mitad del claro de la tabla son más cercanos a valores de cero. Así mismo, los valores de las frecuencias identificadas se aproximan más a las calculadas por el modelo de elemento finito. Una posible explicación a este fenómeno es que la vibración ambiental impuesta a la tabla probablemente haya sido sesgada. La excitación no tuvo un rango amplio de frecuencias de excitación como lo puede en realidad la vibración ambiental.

Los periodos obtenidos de las pruebas de impacto y de vibración ambiental son menores para la primera forma modal del modelo de elemento finito. Sin embargo, para las otras frecuencias se encuentran, en general, por arriba de dichos valores.

CONCLUSIONES

Se presentó un experimento de la identificación dinámica de una estructura simplemente apoyada. Esta se llevo a cabo por medio de sensores inteligentes de última generación Imote2. Se identificaron las partes de este sistema de adquisición de datos y se discutieron algunas de las limitaciones en su aplicación.

Para la identificación dinámica se utilizó el método NExT/ERA. Este método conjunto permite, a través de los registros de vibración ambiental de una estructura, obtener sus propiedades dinámicas.

No fue el objetivo de este trabajo describir a detalle cada una de estas técnicas, si no el de mostrar de forma general las bondades del sistema inalámbrico de adquisición de datos, así como los métodos de identificación estructural. Se busca dar ejemplos de aplicación para desarrollo de prácticas de laboratorio en la que los estudiantes, probablemente de posgrado, apliquen los métodos antes descritos. Se demuestra que el uso de diferentes fuentes de excitación conlleva a una variación de resultados, sin embargo estos caen dentro de rangos tolerables. También se demuestra que aún para estructuras sencillas la identificación estructural no es perfecta.

REFERENCIAS

ANSYS (2012) <http://www.ansys.com/>

B.F. Spencer, Jr., M. Ruiz-Sandoval and N. Kurata (2004), "**Smart Sensing Technology: Opportunities and Challenges**," Journal of Structural Control and Health Monitoring, Vol. 11, pp. 349-368.

Imote2 (2012) <http://bullseye.xbow.com:81/Products/productdetails.aspx?sid=253>

ISHMP Illinois Structural Health Monitoring Project <http://shm.cs.illinois.edu/index.html>

James, G.H. (1994) "**Extraction of modal parameters from an operation HAWT using the natural excitation technique (NExT)**", Proceedings of the Energy-Sources Technology Conference, January 23, 1994 - January 26, 1994

Jo, H., Rice, J.A, Spencer, B.F., and Nagayama, T. (2010), "**Development of a High-sensitivity Accelerometer Board for Structural Health Monitoring**," Proc. of SPIE, San Diego.

Juang, J.-N. & Pappa, R. S. (1985) "**An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction.**" Journal of Guidance Control Dynamics 8, 620–627.

MATLAB® (2012) <http://www.mathworks.com>

M. Ruiz-Sandoval, T. Nagayama and B.F. Spencer, Jr., "**Sensor development using Berkeley Mote platform**", Journal of Earthquake Engineering, 10(2), 289-309, 2006.