**SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES DE LA CONVENCIÓN CCI-UCLV 2021**

**Título: Procedimientos para las mediciones de vibraciones y deformaciones en Estructuras**

***Title: Procedures for vibration and deformation measurements in structures***

Ing. Idalma Elena Castro Santos3, Ms. C. Ing. Alexis Claro Duménigo2, Dr. Ing. Ernesto L. Chagoyen Méndez1,

1-3 Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5 ½.

1e-mail: chagoyen@uclv.edu.cu, 2e-mail: aclaro@uclv.cu, 3e-mail: icastro@uclv.cu.

**Resumen**

El análisis modal es un método experimental que permite determinar las características de un sistema dinámico y definir el modelo dinámico de una estructura. Este es utilizado para el monitoreo de estructuras. Para ello se debe realizar una correcta medición de vibraciones, para procesar los resultados y llegar a un correcto análisis modal de la estructura. En este trabajo se realiza una síntesis de los procedimientos para la medición de vibraciones y deformaciones, respondiendo a las problemáticas identificadas en el proceso de selección, colocación, conexión de los distintos tipos de sensores, y para el procesamiento e interpretación de los resultados de las mediciones de vibración durante el monitoreo de estructuras. Para la realización de esta investigación se tuvieron en cuenta métodos de investigación del nivel teórico (Método histórico-lógico, la modelación) y del matemático estadístico (El análisis numérico y comparativo). Es necesario establecer el estado actual de los conocimientos sobre estos procedimientos y elaborarlos detalladamente para que los especialistas puedan contar con una guía para el monitoreo de estructuras, la cual no existe hasta el momento, por lo que se tiene como objetivo: Elaborar una guía para efectuar las mediciones de vibraciones y deformaciones en estructuras. De igual manera, se explican los pasos para las mediciones de deformaciones usando galgas extensométricas. Se contribuye al conocimiento de los procedimientos que posibilitan efectuar correctamente las mediciones de vibraciones y deformaciones, lo cual permite una evaluación más acertada del estado de las estructuras investigadas.

***Abstract***

*Modal analysis is an experimental method to determine the characteristics of a dynamic system and to define the dynamic model of a structure. It is used for the monitoring of structures. For this purpose, a correct vibration measurement must be performed in order to process the results and arrive at a correct modal analysis of the structure. In this work a synthesis of the procedures for the measurement of vibrations and deformations is made, responding to the problems identified in the process of selection, placement, connection of the different types of sensors, and for the processing and interpretation of the results of the vibration measurements during the monitoring of structures. For the realization of this research, research methods of the theoretical level (historical-logical method, modeling) and mathematical-statistical (numerical and comparative analysis) were taken into account. It is necessary to establish the current state of knowledge on these procedures and to elaborate them in detail so that specialists can have a guide for monitoring structures, which does not exist so far, so the objective is: To develop a guide to perform vibration and deformation measurements in structures. Likewise, the steps for deformation measurements using strain gauges are explained. It contributes to the knowledge of the procedures that make it possible to perform vibration and deformation measurements correctly, which allows a more accurate evaluation of the condition of the investigated structures.*

**Palabras Claves**

Medición de vibraciones, Análisis Modal, acelerómetros, mediciones de deformaciones, galgas extensométricas.

***Key words***

*Vibration measurement, Modal Analysis, accelerometers, strain measurements, strain gauges.*

## Introducción

El análisis modal es un método experimental que permite determinar las características de un sistema dinámico y definir el modelo dinámico de una estructura. La técnica e instrumentación para este análisis depende de la complejidad de la estructura y de los recursos disponibles.

La identificación experimental de parámetros modales de estructuras de ingeniería civil significa la extracción de parámetros modales (frecuencias, razones de amortiguamiento, formas modales y los factores de escala modal) a partir de mediciones dinámicas (Wei-Xin Ren & Zhou-Hong, 2004). Estos parámetros modales sirven de base para calibrar modelos de elementos finitos de las estructuras monitoreadas, detectar y localizar los posibles daños o fatiga en las estructuras, monitorear a largo plazo las mismas y realizar la evaluación de su seguridad contra diferentes eventos severos como terremotos, cargas de viento. También se puede identificar fuerzas en estructuras con cables, fatiga, etc., partiendo de los parámetros modales de las estructuras monitoreadas.

El monitoreo de vibraciones y desplazamientos transitorios de estructuras de ingeniería civil como edificios, puentes y torres es de suma importancia para la identificación temprana de problemas estructurales y para permitir acciones correctivas a tomar. El monitoreo dinámico se implementa actualmente mediante sensores de contacto, como redes de acelerómetros piezoeléctricos u objetos ópticos instalados sobre la estructura. Dichos sensores son precisos y confiables, pero deben colocarse en contacto con la estructura que se investiga. También proporcionan información que se limita al punto específico de la posición del sensor, inhibiendo así la posibilidad de obtener un mapa global continuo de la vibración de la estructura. (Pieraccini, Fratini, Parrini, Macaluso, & Atzeni, 2004)

Este tema ha sido motivo de investigación de un grupo de especialistas en varias partes del mundo, incluyendo profesionales de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas en convenio con la Universidad Católica de Leuven (KU Leuven), en Bélgica, a través de dos proyectos de colaboración internacional financiados por el Consejo Interuniversitario Flamenco (VLIR-UOS), denominados “Computational Techniques for Engineering Applications” (VLIR-UOS, 2012), y “Vibration Based Assessment of Civil Engineering Structures” (VLIR-UOS, 2016). Basados en el estudio de este tema se han desarrollado varios trabajos de diploma, tesis de maestría, etc. (del Sol Companioni , 2016) (Piñeiro Reyes, 2017) (Claro Duménigo, 2018)

Para la realización de pruebas modales basadas en mediciones de vibraciones y de deformaciones se cuenta con equipamiento adquirido mediante el proyecto TEAM-VLIR “Evaluación de estructuras de Ingeniería Civil basada en vibraciones”(VIBRAS) pero se necesita una metodología para su uso, ya que para alcanzar un correcto procesamiento de los datos obtenidos a través de los sensores, es necesario realizar una buena adquisición de datos, porque si esta tiene errores, el procesamiento ulterior también los tendrá y los resultados no se corresponderán a la realidad (Chagoyen Méndez, 2018).

Para una correcta adquisición de datos se requiere seguir un procedimiento minucioso en la selección, colocación, conexión de los distintos tipos de sensores, procesamiento e interpretación de los resultados de las mediciones, que es necesario seguir. Estos procedimientos en muchos casos aparecen dispersos en la literatura (artículos, libros) que reflejan su aplicación a casos de estudio en particular, pero no describen los pasos necesarios de forma general, lo cual nos conduce a una problemática relacionada con los procedimientos necesarios a seguir, para una adecuada selección, colocación, conexión de los distintos tipos de sensores, y para el procesamiento e interpretación de los resultados de las mediciones de vibración durante el monitoreo de estructuras de Ingeniería Civil. Para solucionar este problema científico se ha planteado el objetivo de: Elaborar los procedimientos para efectuar las mediciones de vibraciones y deformaciones en estructuras, con vistas a completar posteriormente el Análisis Modal de estructuras. Para la investigación se han trazado varios objetivos específicos que permiten conducirnos durante el desarrollo de la misma con el fin de organizarla. Estos son:

1. Establecer el estado actual del conocimiento sobre los procedimientos para efectuar mediciones de vibraciones y deformaciones en estructuras de ingeniería civil, orientadas al completamiento del análisis modal posterior.
2. Elaborar los procedimientos en detalle, para efectuar las mediciones de vibraciones y de deformaciones en estructuras de Ingeniería Civil, incluyendo todo el software en Matlab y Labview requerido para organizar, en ejemplos genéricos, la adquisición de datos y la comunicación sensores-computadora, así como la utilización de la técnica de multi-setup.

## Metodología

Para la realización de esta investigación se han tenido en cuenta métodos de investigación, tanto del nivel teórico como del matemático estadístico.

Métodos del nivel teórico:

**Método histórico lógico**, para el establecimiento del estado actual del conocimiento sobre los métodos para realizar la modelación de estructuras desde el punto de vista dinámico y los métodos para el procesamiento de las señales obtenidas de pruebas de cargas dinámicas, con vistas a la identificación de algunos de los parámetros del comportamiento dinámico de la estructura como son las frecuencias de oscilación natural, los modos o formas principales de oscilaciones propias, entre otros, mediante el cual se realizará un análisis histórico de la temática y se determinará cuáles han sido las tendencias; se definirán los conceptos claves sobre estas temáticas así como se elaborará una síntesis de las principales concepciones al respecto, identificando los aspectos positivos y realizando análisis críticos de las deficiencias.

**La modelación**, para estudiar las diferentes variables que inciden en el comportamiento dinámico de las estructuras, mediante el empleo de los softwares existentes (SAP 2000, Matlab, MACEC, etc.).

Métodos del nivel matemático estadístico:

**El análisis numérico** (transformada rápida de Fourier, ajuste de curvas, ***decimate***, ***detrend,*** filtrado, etc.) de las señales obtenidas de experimentación modal de estructuras reales de puentes, se utiliza para identificar los parámetros dinámicos del sistema estructural.

**Del análisis comparativo** de la respuesta modelada y medida de la estructura de los puentes estudiados, se pueden inferir conclusiones sobre el comportamiento dinámico real y modelado de dichas estructuras, su nivel de daño estructural, la localización de los mismos, etc.

## Resultados y discusión

Los procedimientos para la realización de ensayos modales no están estandarizados de forma permanente en el mundo actual. Una buena razón para ello es que las técnicas de medición, los sensores, etc., se encuentran en constante evolución, por lo que contar con procedimientos actualizados, resulta una tarea actual de los investigadores. En ese sentido, la adquisición mediante el proyecto TEAM-VLIR “Evaluación de estructuras de Ingeniería Civil basada en vibraciones”(VIBRAS) de un equipamiento para la realización de pruebas modales basadas en mediciones de vibraciones y también de mediciones de deformaciones, nos obliga a elaborar y detallar los procedimientos para ello, que en estos momentos se presentan como novedosos para nuestro país, en el contexto de las condiciones de la práctica profesional actual en ese campo de acción y de investigación en Cuba.

El resultado fundamental del trabajo es de carácter metodológico, ya que, como procedimiento al fin, constituye una guía para la acción, en cuanto a la organización de los medios disponibles para efectuar las mediciones con el mayor rigor posible, a fin de lograr datos lo más desprovistos de ruido y otros errores, que permitan establecer de forma certera las propiedades de las estructuras investigadas.

También posee un valor práctico, ya que el material elaborado sirve de base para su asimilación por especialistas de la ENIA, la Estación Comprobadora de Puentes y otras entidades que practiquen el análisis modal de estructuras, para los fines y las aplicaciones descritas anteriormente, ya bien sea como guía para la realización de las mediciones o en forma de curso de posgrado.

De manera general, se pueden definir el siguiente procedimiento para realizar las mediciones de vibraciones para el monitoreo de estructuras de Ingeniería Civil. Posteriormente se explica brevemente cada paso de este proceso.

|  |
| --- |
|  |
| Fig. 3.1 Procedimiento propuesto para realizar mediciones de vibraciones en Estructuras |

**I. Antecedentes. Levantamiento por invariantes y de Patologías de la Estructura**

Se deben investigar los antecedentes de la estructura, realizar un levantamiento por invariantes, teniendo en cuenta todos los aspectos geométricos, su material, condiciones de apoyo, vínculos, entre otros.

**II. Construcción de un modelo en EF de la Estructura en un software con interfaz. Extracción de las** $ω\_{i}$ **y** $ϕ\_{i}$ **de los modos globales.**

Al Construir un modelo en elementos finitos preliminar de la estructura, será seleccionado un software con interfaz con los principales lenguajes de programación, preferiblemente MATLAB, con el objetivo de luego poder plantear y resolver el problema de posicionamiento óptimo de los sensores de referencia y los móviles en los distintos setups. Por tanto, preferiblemente se adoptará el SAP 2000 (Academia, 2020) u otro de la familia CSI (Academia, 2013), o ANSYS (Academia Ignova, 2020).

**III. Diseño de un sistema de sensores mediante la solución de un problema de posicionamiento óptimo de sensores.**

Este paso es vital para la etapa de adquisición de los datos de campo y la ulterior identificación de los modos. Puede resultar tan sencillo o tan complejo en función de la complejidad de la estructura y los modos a identificar. Primeramente, se debe determinar las posiciones de los sensores a ser cubiertas, luego las de los sensores de referencia y las de los sensores en múltiples configuraciones (setups)

**IV. Selección de la instrumentación adecuada, planificación, diseño de las pruebas, establecimiento del tiempo de medición, etc.**

Se seleccionan los acelerómetros, la unidad de adquisición de datos y el martillo

**V. Realización del proyecto en LabVIEW que permita la adquisición de los datos de las mediciones de vibración con el sistema NI-cDAQ**

Para esto es necesario conocer las características esenciales del LabVIEW, software especializado en la comunicación sensor-DAU-PC, así como de los sensores y DAU seleccionados.

**VI. Realización de las pruebas para el Análisis Modal y adquisición de los datos**

Se procede a la colocación, conexión de los sensores y la excitación de la estructura.

**VII. Conversión de los datos \*.TDMS a \*.MAT**

La conversión de datos envuelve la conversión de las señales de Volts(V) a unidades de ingeniería. Esta conversión es realizada en Matlab

**VIII. Pre-procesamiento de los datos: time window, remove shift, remove channels, decimate, filtrado, etc.**

El procesamiento de los datos se realiza antes del análisis modal para optimizar la calidad y el contenido de la información de los datos adquiridos. Para ello se utiliza MACEC.

**IX. Creación de ficheros de geometría (coordenadas de los nudos), grados de libertad, masters-slaves, etc.**

**X. Identificación del sistema: selección del método, intervalos de orden, preselección. de modos del diagrama de estabilización, PSD, MPD, MPC, por setups.**

**XI. Estimación de los parámetros del sistema: frecuencias, formas modales, razones de amortiguamiento, factores de escala modal, por setups.**

**XII. Repetir los pasos del VII al X para todas las puestas de instrumentos (Setups).**

 **XIII. Elaborar Tabla de frecuencias y modos por setups. Evaluar coincidencia y selec. modos realmente identificados.**

**XIV. MACs entre los modos seleccionados, de forma que se garantice que sean linealm. independientes o coincidan.**

**XV. Definición de los parámetros definitivos del sistema, a partir de la combinación de los setups con los modos identificados.**

## Conclusiones

Con este trabajo se ha podido establecer el estado actual del conocimiento sobre los procedimientos para efectuar mediciones de vibraciones y deformaciones en estructuras de Ingeniería Civil, orientadas al completamiento del análisis modal posterior, observando que existe bibliografía de este tema, pero la mayoría lo trata de manera general y no existe una guía lo suficientemente completa como para tomarla como referencia para realizar estas mediciones.

Se ha podido elaborar los procedimientos en detalle, para efectuar las mediciones de vibraciones y de deformaciones en estructuras de Ingeniería Civil. Se han incluido los softwares Matlab y LabVIEW, requeridos para organizar la adquisición de datos, así como la conversión y procesamiento de los mismos y la utilización de la técnica de multi-setup.

Se recomienda el uso de este trabajo como guía para efectuar mediciones de vibraciones y deformaciones en estructuras en Ingeniería Civil, especialmente en entidades que practiquen el análisis modal de estructuras, tanto como guía para la realización de las mediciones o en forma de curso de posgrado.

## Referencias bibliográficas.

1. Academia. (septiembre de 2013). *CSi Analysis Reference Manual.* Obtenido de https://www.academia.edu/11951965/CSi\_Analysis\_Reference\_Manual
2. Academia. (22 de septiembre de 2020). *Primeros Pasos con SAP2000.* Obtenido de https://www.academia.edu/11321718/PRIMEROS\_PASOS\_CON\_SAP2000\_Primeros\_Pasos\_con\_SAP200
3. Academia Ignova. (22 de septiembre de 2020). *Curso básico ANSYS.* Obtenido de https://academia.ingnova.es/recursos/apuntes\_demo/Ansys\_basico.pdf
4. Chagoyen Méndez, C. A. (2018). Ensayo de Materiales y Extensometría. Santa Clara: Curso de Posgrado. Facultad de Ing. Mecánica e Industrial. Universidad Cen real "Marta Abreu" de Las Villas.
5. Claro Duménigo, A. (2018). *Identificación de sistemas estructurales basado en vibraciones. Aplicación a Casos de Estudio.* Recuperado el 17 de marzo de 2020, de http://dspace.uclv.edu.cu
6. del Sol Companioni , F. D. (2016). *Análisis Modal Operacional en estructuras mediante el empleo de acelerómetros.* Recuperado el 24 de mayo de 2020, de http://dspace.uclv.edu.cu/handle/
7. Pieraccini, M., Fratini, M., Parrini, F., Macaluso, G., & Atzeni, C. (2004). High-speed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures. *ELECTRONICS LETTERS, 40*(14), 1.
8. Piñeiro Reyes, L. C. (2017). *Análisis Modal Operacional mediante Georadar IBIS.* Recuperado el 17 de marzo de 2020, de http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/8760
9. VLIR-UOS. (2012). “Computational Techniques for Engineering Applications” (ZEIN2012Z106). Obtenido de https://www.vliruos.be/en/projects/project/22?pid=2219)
10. VLIR-UOS. (2016). “Vibration Based Assessment of Civil Engineering Structures” (ZEIN2016PR419). Obtenido de https://www.vliruos.be/en/projects/project/22?pid=3106
11. Wei-Xin Ren, R., & Zhou-Hong, Z. (2004). Output-only modal parameter identification of civil engineering structures. *Structural Engineering and Mechanics, 17*(3-4), 1.