

PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN PUENTES

AMBIENT VIBRATIONS TESTING ON BRIDGES

IVÁN GÓMEZ ARAUJO

MsC En Ingeniería Civil

Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras

Universidad Industrial de Santander

igomez19@hotmail.com

ESPERANZA MALDONADO RONDÓN

Doctora en Ingeniería Caminos, Canales y Puertos

Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras

Universidad Industrial de Santander

emaldona@uis.edu.co

GUSTAVO CHIO CHO

Doctor en Ingeniería Caminos, Canales y Puertos

Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras

Universidad Industrial de Santander

gchioch@uis.edu.co

Fecha de Recibido: 19/11/2009

Fecha de Aprobación: 26/05/2010

RESUMEN

El diseño, construcción y mantenimiento de estructuras especiales como los puentes, han generado la necesidad de desarrollar pruebas experimentales apropiadas que permitan identificar con exactitud sus propiedades estructurales más importantes (estáticas y dinámicas). La dificultad para utilizar pruebas con vibración forzada o excitación en una forma controlada generó la búsqueda de otros métodos de identificación de mayor aplicabilidad como la utilización de excitaciones debidas a las vibraciones ambientales. Las pruebas de vibraciones ambientales (AVT) han demostrado buenos resultados a nivel de los puentes en el contexto nacional e internacional, de aquí el interés en su estudio. En este documento se presenta un estudio de los principales aspectos relacionados con la aplicación de las AVT, resaltando diferentes temáticas como las mediciones de campo, métodos existentes de identificación modal con vibraciones ambientales y calibración de modelos en elementos finitos a partir de datos experimentales.

PALABRAS CLAVE: Técnicas de identificación modal, vibraciones ambientales, puentes, daño estructural.

ABSTRACT

The design, building and maintenance of special structures such as bridges have generated the need to develop experimental tests in order to identify, in a precise manner, their most important structural properties (statics and dynamics). The difficulty to use forced or excitation-based vibration tests in a controlled manner brought about the quest for other useful and more applicable identification methods such as the use of excitation due to ambient vibrations. The Ambient Vibration Testing (AVT) has yielded good results in bridges at both national and international levels. This is the reason for the interest in their study. This document presents a study of the principal aspects related to the application of AVT, focusing on different issues such as field measurements, existing modal identification methods with ambient vibrations, and calibration of models in finite elements from experimental data.

KEY WORDS: Techniques of modal identification, ambient vibrations, bridges, structural damage.

1. INTRODUCCIÓN

Hace algunas décadas, la mayor preocupación de la ingeniería estructural era el desarrollo y aplicación automática de nuevos y poderosos métodos numéricos para el análisis (estático y dinámico) y diseño de estructuras de gran tamaño. En este contexto el rápido desarrollo de las técnicas de elementos finitos (FE) acompañado del progreso tecnológico en el campo de los computadores, han permitido actualmente contar con excelentes herramientas computacionales de análisis estructural, que son capaces de simular con gran exactitud el comportamiento estructural de obras de ingeniería.

Sin embargo, el diseño y construcción de estructuras complejas y ambiciosas, como presas, grandes puentes colgantes y atirantados, y otras estructuras especiales, dejó al descubierto la necesidad de desarrollar también herramientas experimentales apropiadas que permitan identificar con exactitud las más relevantes propiedades estructurales (estáticas y dinámicas), aportando datos confiables para soportar la calibración, actualización y validación de modelos numéricos de análisis estructural.

Más allá de lo anterior, el continuo envejecimiento y el subsiguiente deterioro de un gran número de estructuras existentes dio origen al interés en el desarrollo y aplicación de técnicas de detección de daño basadas en mediciones de vibraciones soportadas por los sistemas de monitoreo de salud estructural, en el cual la identificación regular de las propiedades modales juega un rol importante.

Luego, las primeras investigaciones en el tema se basaron en importantes desarrollos en sistemas de identificación y análisis experimental modal en Electrónica e Ingeniería Mecánica, realizados con anterioridad. En estas primeras investigaciones se identificaron las principales propiedades dinámicas de estructuras mediante la aplicación de técnicas de identificación modal de vibración forzada (Input-Output)[1].

La dificultad para aplicar vibración forzada o excitación a grandes estructuras civiles en una forma controlada generó la búsqueda de otros métodos de identificación de mayor aplicabilidad. El progreso tecnológico registrado en el área de los transductores y conversores de señales análogas a digitales, hizo posible abrir un nuevo y promisorio camino para la identificación modal de estructuras de gran tamaño, exclusivamente basado en las medidas de la respuesta estructural para excitaciones

producidas por el medio ambiente (Output-Only) y la aplicación de métodos disponibles de identificación modal estocástica.

2. CONCEPTO GENERAL

Las pruebas de vibraciones ambientales (AVT) sobre una estructura no utilizan ninguna excitación artificial, por el contrario la respuesta de la estructura es medida por la excitación producida por el ambiente; como el viento, el tráfico o los microsismos. Siendo los resultados de las pruebas mejores, si la excitación producida por el medio ambiente tiene un gran ancho de banda en frecuencia que permita excitar todas las frecuencias naturales de la estructura [1].

3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

Una de las principales ventajas de una AVT es el no requerir una excitación artificial, de manera que sea comparativamente más económica que los métodos que utilizan vibraciones inducidas (FVT).

Además, las investigaciones con AVT pueden desarrollarse sin interrumpir el normal uso de las estructuras [2]. La ejecución de las AVTs son sencillas y rápidas.

Así mismo, como lo demuestran trabajos presentados por Yao, Wang y Zhao [3] el uso de las vibraciones ambientales en el desarrollo de monitoreo en tiempo real (on line) es un medio atractivo de excitación de la estructura.

Las excitaciones producidas por el ambiente como el viento, el tráfico y los microsismos son conocidas como de múltiples entradas dado que actúan sobre muchos puntos de la estructura al mismo tiempo. Por el contrario, en los métodos FVT la excitación es del tipo de una sola entrada. La anterior diferencia no es relevante en pequeñas estructuras, pero en las grandes y complejas, las investigaciones de Cantieni [4] han demostrado que esta es una ventaja más en las pruebas AVT.

Sin embargo, la excitación debida al ambiente normalmente no es controlada lo que produce una falta de estacionariedad o un problema de estabilidad del estado de vibraciones. Esto puede conducir a problemas debido a la no linealidad que presentan la mayoría de las estructuras en la Ingeniería Civil. En

cuanto a la amplitud de la excitación producida por el ambiente ésta es significativamente diferente para cada toma de datos, por consiguiente en los resultados puede existir cierta dispersión, es decir, se pueden introducir pequeños cambios en las frecuencias naturales de la estructura. Este no es el caso para las FVT donde la vibración inducida a la estructura puede guardar estacionariedad.

Otra desventaja es la incertidumbre en los datos, ya que las variaciones operacionales y medioambientales, como la temperatura, humedad y condiciones de carga tienen una directa influencia sobre la respuesta dinámica de la estructura [5].

4. APLICACIÓN DE LAS PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN LA DETECCIÓN DEL DAÑO

La detección del daño basado en vibraciones es un procedimiento que implica la caracterización dinámica de la estructura. Su uso se ha venido desarrollando rápidamente y un considerable número de métodos han sido desarrollados. Luego, la importancia de caracterizar dinámicamente una estructura es llegar a determinar el posible daño que ella puede estar sufriendo; por consiguiente, es importante estudiar algunos métodos que permiten detectar el daño de las estructuras como los puentes.

4.1 Métodos de detección de daño

La mayoría de los métodos de detección del daño se basan en la correlación del daño con algunos cambios en las propiedades de la estructura como puede ser la frecuencia, los modos de vibración, el coeficiente de flexibilidad, la energía modal y la rigidez; por ejemplo algunos de los métodos que trabajan sobre esta base son (Thakkar *et al.*, 2006) [6]:

- Cambio de frecuencia. La medida de la frecuencia natural de una estructura es fundamental para determinar las buenas condiciones de la estructura. El método más simple se basa en el cambio de la frecuencia natural de una estructura dañada en comparación con la estructura sin daño (Salawu, 1997) [7].
- Cambio modal. El cambio en la forma del modo es utilizado por ser más sensitivo como indicador de daño y por poder identificar su localización. Kim *et al.* (1992) [8], Pandey *et al.* (1991) [9], son algunos casos de aplicación de este indicador.

A su vez, existen otros métodos que toman el cambio en las características dinámicas de los puentes como son: a) Cambio en la flexibilidad dinámica, Aktan *et al.* (1994) [10], Mayes (1995) [11], b) Método de identificación de sistema y datos de salida, Natke y Yao (1988) [12], c) Métodos basados en redes neuronales, Bishop (1994) [13] y Zhu y Tang *et al.* [14] y d) Monitorización de salud mediante vibraciones ambientales, Farrar y James III (1997) [5] y Fujino y Abe (2001) [15].

Además de que las pruebas de vibración ambiental permiten la identificación dinámica de los puentes para con ellos detectar el daño, se convierten en una excelente herramienta para:

- Controlar la calidad de una obra. Las mediciones en puentes recién construidos son utilizados para contrastar los datos obtenidos con los valores teóricos utilizados en el diseño, como es el caso de las pruebas realizadas en la ciudad de México sobre sus vías elevadas (Muria *et al.*, 2005) [16]. Así se puede determinar si ha habido modificaciones importantes entre el diseño y la construcción. Además los resultados obtenidos permiten tener un punto de comparación para mediciones futuras.
- Monitorizar los daños causados por un sismo. Después de la ocurrencia de un evento sísmico las mediciones de vibración ambiental permiten determinar el nivel de daño alcanzado en la estructura.
- Verificar las reparaciones o modificaciones. Las pruebas de vibración ambiental permiten en puentes reparados o reforzados después de haber sufrido daños estructurales, verificar si se han restituido las características estructurales originales.
- Controlar la estructura durante su vida útil. Las mediciones periódicas de vibración ambiental logran determinar la existencia de deterioro estructural debido a eventos sísmicos menores, envejecimiento de los materiales, asentamientos del subsuelo, reparaciones, adaptaciones incorrectas o modificaciones estructurales.

5. ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos en las pruebas de mediciones de vibraciones ambientales involucran la selección del tipo de magnitud a ser medida (aceleración, velocidad o desplazamiento), la definición de los tipos de sensores a ser usados, la localización donde los sensores deben ser colocados, la elección del número y resolución de los sensores, ancho de banda, y el hardware de adquisición/

almacenamiento/transmisión de los datos. La selección de los anteriores parámetros va de la mano de las condiciones económicas [17].

El tipo de sensor seleccionado para la medición de la respuesta tiene que encajar con los requerimientos de sensibilidad y rango de frecuencias. Los acelerómetros en la mayoría de los casos son la mejor opción, por su facilidad de uso y por poder recorrer la estructura en diferentes puntos. Los traductores de velocidad funcionan mejor para estructuras que exhiben frecuencias naturales fundamentales mayores a 4.5 Hz. Luego, dado que la mayoría de las estructuras civiles exhiben frecuencias menores, la mejor opción es utilizar acelerómetros de alta sensibilidad. Los sensores piezoeléctricos tienen mayor funcionalidad para estructuras con frecuencias naturales fundamentales mayores a 1 Hz. Para estructuras que exhiben frecuencias menores se deben utilizar sensores de fuerzas balanceadas [18].

En la realización de las mediciones se debe establecer las direcciones y los puntos de medida dado que los resultados de las formas modales estarán disponibles solo en los puntos y las direcciones de medida. Por lo tanto, se recomienda seleccionar los puntos y las direcciones basados en los resultados de un análisis preliminar de la estructura en un modelo de elementos finitos (FE).

En la mayoría de investigaciones que utilizan vibraciones ambientales [19], [20], [21], [22], [23] para la identificación del sistema el primer paso a desarrollar es el análisis del modelo de FE, el cual es finalmente calibrado a partir de los resultados de las mediciones

El número de puntos de medida depende principalmente de características de la estructura como el tamaño, sistema estructural, materiales, etc., que se reflejan en las formas modales encontradas en el modelo preliminar de FE. Las direcciones de medida que pueden ser dos o tres por punto dependen del número de los grados de libertad que se quieran medir. Es una práctica normal utilizar simultáneamente un número limitado de sensores y recorrer con estaciones móviles los demás puntos hasta completarlos todos. Una prueba, es por consiguiente, realizada en varios arreglos. Es recomendable utilizar más de un punto de referencia a menos que la estructura sea muy simple. Si la respuesta de la estructura es tridimensional al menos un tercer punto, fuera del plano, tiene que ser seleccionado como punto de referencia.

Debido a que los datos pueden ser medidos bajo condiciones variables, la capacidad para normalizar los datos es muy importante en el proceso de mediciones de vibraciones ambientales. Por ejemplo, las medidas de frecuencias fundamentales del puente Alamosa Canyon en Nuevo México, variaron aproximadamente un 5% durante unas mediciones en un periodo de 24 horas [24], [25]. Análisis posteriores concluyeron que el puente poseía un gradiente considerable de temperatura entre los lados oriental y occidental en la placa, a lo largo del día. La normalización de los datos es un procedimiento que permite que los cambios de señal causados por la variación operacional y ambiental del sistema puedan ser separados de los cambios estructurales, como las frecuencias fundamentales. Cuando la variabilidad de las condiciones operacionales y ambientales resulta problemática, se puede generar normalización de los datos de una manera temporal para facilitar la comparación de los datos medidos en tiempos similares de un ciclo de condiciones operacionales y medioambientales iguales. Estudios como el de Qin Pan *et al.* [26] tienen en cuenta un análisis de variabilidad de parámetros en las mediciones de vibraciones ambientales, en función del nivel del tráfico y la cantidad de datos utilizada para la estimación de los valores modales, a pesar que en este trabajo se omitió la temperatura como parámetro variable, se logró evidenciar la influencia de los parámetros considerados sobre la identificación de las frecuencias a la estructura. Otras investigaciones [27], [28] han abordado la evaluación de la incertidumbre en la identificación modal experimental de estructuras producidas no solo por el efecto de las variaciones operacionales y ambientales sino también por condiciones límites y continuidad, excitación y procesamiento de datos.

Finalmente como una regla base, la longitud de las ventanas de tiempo, en el proceso de adquisición de datos debe ser 1000 a 2000 veces el periodo fundamental de la estructura [4].

6. MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN MODAL

Existen dos grupos principales de métodos de identificación para las pruebas de vibraciones ambientales: a) métodos no paramétricos esencialmente desarrollados en el dominio de la frecuencia y b) métodos paramétricos en el dominio del tiempo. Dentro de los métodos no paramétricos se logran identificar los siguientes: “Peak Picking”, “Polyreference LSCE applied to auto and cross correlation”, “Frequency Domain Decomposition” y el “Enhanced Frequency Domain Decomposition”.

Por el lado de los métodos paramétricos, se encuentran los métodos estocásticos y determinísticos. En los métodos estocásticos se tienen por ejemplo: “Least Squares”, “Prediction Error Method”, “Two Stage Least Squares”, “Linear Multi Stage”, “Instrumental Variable (IV) Method” y el “Stochastic Subspace Identification” (combina algunas técnicas de los otros métodos estocásticos); dentro de los determinísticos se tienen: “Prony method” y “Eigensystem Realization Algorithm” (ERA) [29], [30].

A continuación se describen brevemente algunos de los métodos más utilizados.

6.1 Peak Picking (PP)

El primer método ideado para estimar los parámetros modales en un puente a partir de mediciones de aceleraciones es el método conocido simplemente como Peak Picking (PP), el cual es ampliamente usado. Una implementación práctica del método fue realizado por primera vez por Felber en su tesis doctoral [31].

En este método las frecuencias naturales corresponden a los picos del promedio normalizado del espectro de densidad de potencia (Averaged Normalized Power-Spectral Densities, ANSPD). Los ANSPDs son básicamente obtenidos de la conversión de las aceleraciones medidas al dominio de la frecuencia por medio de una transformada discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT). La función de coherencia computada para dos grabaciones de señales tiene valores cerrados a uno en la frecuencia natural. Este hecho ayuda a decidir la frecuencia que puede ser considerada como natural [32].

Las componentes de las formas modales son determinadas por los valores de la función de transferencia en las frecuencias naturales. En el contexto de vibraciones ambientales, una función de transferencia no significa una relación de la respuesta sobre la fuerza, si no la relación de la respuesta medida en un sensor móvil sobre la respuesta medida en un sensor de referencia. Así cada función de transferencia produce una componente de forma modal relativa al sensor de referencia. Se asume entonces que la respuesta dinámica en la resonancia es solo determinada por un modo. La validez de esta asunción aumenta cuando los modos están bien separados y el amortiguamiento es bajo.

El amortiguamiento modal se calcula utilizando el método de ancho de banda [33], en este método se identifican las frecuencias f_1 y f_2 asociadas a la mitad

de la amplitud en el ANSPD, para una frecuencia predominante. Luego se calcula el parámetro A que finalmente sirve para calcular el amortiguamiento modal viscoso equivalente (ψ) (ecuación 1) [34].

$$A = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (1)$$

$$\psi = 0.5 * A(1 - 0.375 * A^2)$$

La investigación realizada por Peeters [35] demuestra que el método Peak Picking presenta inconvenientes en la identificación para frecuencias muy cercanas.

6.2 Stochastic subspace identification (SSI)

Al contrario del método anterior el método SSI directamente trabaja con las señales en el dominio del tiempo.

La formulación en extenso del método se encuentra en [35], [36], [37], [38] y, en ellos se muestra que el comportamiento dinámico de una estructura que es excitada por ruido blanco (como la producida por las vibraciones del medio ambiente) se puede describir por medio de un modelo de espacio de estado estocástico, ver ecuaciones 2.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad (2)$$

Donde $x_k \in \mathfrak{R}^{2n_p \times 1}$ es el vector de estado interno; n_p es el número de polos del sistema (frecuencias naturales); $y_k \in \mathfrak{R}^{l \times 1}$ es el vector de mediciones y w_k, v_k son términos de ruido blanco que representan el proceso de ruido y su medida junto con la entrada desconocida; $A \in \mathfrak{R}^{2n_p \times 2n_p}$ es la matriz de estado que contiene la dinámica del sistema y $C \in \mathfrak{R}^{l \times 2n_p}$ es la matriz de salida.

El método SSI identifica las matrices del espacio de estado basándose en técnicas numéricas avanzadas como QR-factorization (QR), Singular Value Decomposition (SVD) y Least Squares.

6.3 Frequency Domain Decomposition (FDD)

El método FDD es una extensión de la técnica básica del dominio de la frecuencia enunciada anteriormente como Peak Picking. Igual que la metodología PP los

modos son estimados a partir de la densidad espectral calculada en la condición de una entrada de ruido blanco y una estructura ligeramente amortiguada [39], [40], [41]. Sin embargo, la técnica FDD define los modos usando una descomposición en valores propios (SVD) de cada una de las matrices de densidad espectral. Esta descomposición corresponde a la identificación de un solo grado de libertad (SDOF) del sistema para cada valor propio.

La relación entre la entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ de un sistema lineal es expresada en el método mediante la relación enunciada en la ecuación 3 [42], [43].

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (3)$$

Donde $[G_{xx}(\omega)]$ es la matriz espectral de entrada, $[G_{yy}(\omega)]$ es la matriz espectral de salida, $[H(\omega)]$ es la matriz de función de respuesta de frecuencia (FRF).

La técnica FDD fue mejorada en la llamada técnica Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) en un modelo de un grado de libertad impuesto sobre un valor propio en una banda de frecuencia definida por el usuario alrededor de un pico proveyendo la estimación de la frecuencia y el amortiguamiento. Un promedio del correspondiente vector propio, ponderado por el valor propio en la banda, ofrece la estimación de la forma modal. En [44] se encuentra una descripción detallada de la técnica EFDD.

7. CORRELACIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS EN ELEMENTOS FINITOS (FE)

La identificación modal de estructuras especiales, como los puentes, juega un papel importante en términos de la calibración experimental y validación del modelo de FE usado para predecir el comportamiento estático o dinámico en la fase de diseño o en la rehabilitación. Después de una validación apropiada, el modelo de FE ofrece una información base esencial subsecuentemente con la capturada en sistemas de monitoreo para detectar daño estructural.

7.1 Correlación con modelos de FE

La correlación de los parámetros modales del modelo de FE con datos experimentales puede ser analizada en términos de frecuencias naturales calculadas y

de las correspondientes formas modales usando coeficientes de correlación o valores MAC (Modal Assurance Criterion) [45]. Además, las estimaciones del amortiguamiento modal pueden ser, también, comparadas con valores asumidos por el modelamiento numérico. Este tipo de análisis, ha sido desarrollado en el puente Vasco da Gamma or Luiz mostrando resultados excelentes [46], [47].

7.2 Calibración del modelo de FE

La exactitud de la identificación de la mayoría de los parámetros modales basada sobre pruebas de vibraciones ambientales apoya la calibración del modelo FE, permitiendo superar varias incertidumbres asociadas al modelamiento numérico.

La calibración se ha seguido, recientemente, sobre análisis de sensibilidad. Muchas investigaciones han reportado que los análisis de los parámetros de sensibilidad fueron desarrollados o por medio de un software de optimización [48] o manualmente [49]. Luego de establecer los parámetros relevantes en la respuesta de la estructura la calibración se basa en un proceso de optimización para minimizar el error entre la respuesta experimental y la respuesta ofrecida por un modelo de elementos finitos: en términos simples, se realiza una actualización de las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento del modelo de elementos finitos.

Gentile y Saisi [50] usaron un método presentado por Douglas Reid [51] para calibrar un modelo de elementos finitos de la Catedral de Monza y posteriormente fue utilizado en el estudio del comportamiento estructural del puente Morca [20]. El método minimiza la diferencia entre los parámetros dinámicos teóricos y experimentales a través de la dependencia de las frecuencias naturales (u otro parámetro modal) sobre las variables estructurales no conocidas.

Además, de este tipo de análisis, existen otras técnicas automáticas de actualización de modelos de FE, como Balanceo de las Ecuaciones de Eigenvalores y Expansión de Formas Modales [52], [53].

8. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE AVT

En los últimos años ha aumentado la cantidad de estudios de análisis dinámico de estructuras que utilizan como fuente de excitación la del ruido ambiental. Algunos casos relevantes sobre puentes, de diferentes

características a nivel nacional e internacional, se comentan a continuación:

8.1 Internacionales

En el trabajo de [19] se estudia el comportamiento sísmico del puente sobre el río Cumberland diseñado en 1972, que consiste en 6 luces con una longitud de 509 m (ver Figura 1). El estudio se realizó sobre una de las partes del puente dado que las dos que lo conforman son idénticas. La superestructura consiste de dos vigas con altura variable, riostras y rigidizadores y, el sistema de piso. El procedimiento de análisis incluyó:

- Pruebas de vibraciones ambientales.
- Modelamiento en FE.
- Selección del movimientos sísmico, Time History Análisis.
- Evaluación de la seguridad sísmica del puente.

Las pruebas de vibraciones ambientales fueron llevadas a cabo para determinar las características dinámicas del puente como frecuencias, formas modales y porcentajes de amortiguamiento modal. El modelo tridimensional de FE fue calibrado sobre los resultados de las pruebas de vibraciones ambientales.



Figura 1. Puente Cumberland [19].

El procesamiento de datos y la identificación de los parámetros modales fueron llevados a cabo por medio del programa MACEC [35], [54].

Para la identificación de los parámetros modales fueron implementados el método Peak Picking en el dominio de la frecuencia y el método SSI en el dominio del tiempo. En la Figura 2 se ilustra el primer modo de vibración del puente.

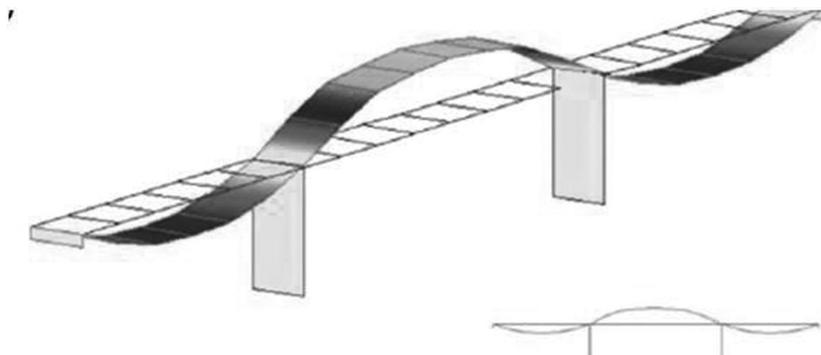


Figura 2 Primera forma modal usando el método SSI, $f=0.875\text{Hz}$, amortiguamiento igual a 0.6% [19].

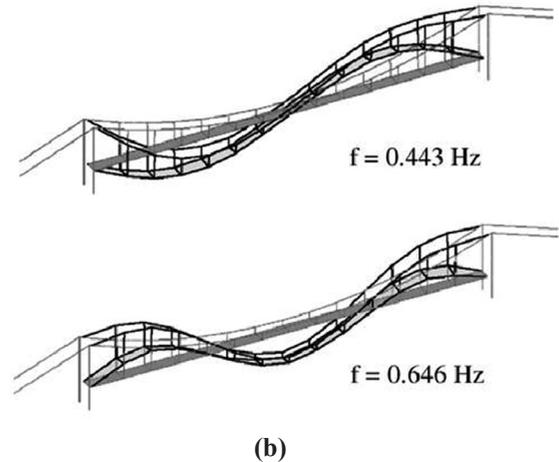
Para realizar la calibración del modelo primero se realizó un estudio paramétrico y se observó la sensibilidad de los parámetros. Solo los modos y frecuencias con mayor participación fueron usados en el proceso de calibración.

En otro trabajo Gentile y Gallino [20] evaluaron el comportamiento dinámico del puente peatonal Morca, al cual se le realizó una rehabilitación estructural. El desarrollo del estudio comprendió las siguientes tareas:

- Estudio de la configuración deformada actual debido a cargas muertas.
- Pruebas de vibraciones ambientales, sobre el puente peatonal excitado por los peatones y las cargas de viento.
- Extracción de los parámetros modales. La identificación modal fue llevada a cabo en el dominio de la frecuencia usando el método espectral clásico Peak Picking y el método más reciente EFDD. En la parte b de la Figura 3 se ilustran dos modos de vibración del puente.
- Pruebas estáticas de carga viva, cuyo objetivo fue proveer una validación adicional en la actualización del modelo de FE.



(a)



(b)

Figura 3 Puente Morca a) Vista del puente colgante Morca, b) Formas modales [20].

Una investigación preliminar de las características dinámicas del puente fue llevada a cabo para demostrar que las vibraciones laterales eran difícilmente excitadas, por consiguiente solo se hicieron mediciones de aceleraciones verticales.

Para establecer una comparación entre los dos métodos de identificación modal se utilizó el Modal Assurance Criterion MAC [45], el cual encontró una excelente correlación entre los dos métodos.

Otro análisis modal analítico y experimental fue llevado a cabo en el trabajo de [23] sobre el puente atirantado Qingzhou en Fuzhou China (Ver Figura 4). La luz principal del puente de 605m es actualmente una de las más largas del mundo. Un análisis modal inicial fue desarrollado sobre un modelo de elementos finitos partiendo de la configuración deformada para obtener las frecuencias y las formas modales. Se realizaron mediciones de vibraciones ambientales sobre la placa del puente y sobre los cables. La identificación de los parámetros modales a partir de las mediciones de campo fue realizada utilizando el método Peak Picking en el dominio de la frecuencia y el Stochastic Subspace Identificación en el dominio del tiempo. Una buena correlación entre el modelo de elementos finitos y los resultados de las mediciones de vibraciones ambientales fue alcanzada.



Figura 4. Puente atirantado Qingzhou, China [23].

En Chile existen tres puentes con aislamiento sísmico, Marga-Marga y Amolanas y el viaducto del Metro de Santiago, que se encuentran instrumentados con redes de acelerógrafos en los cuales a partir de las mediciones de vibración ambiental se corrobora el efecto positivo en la reducción del movimiento por la acción de los sistemas aislantes en dirección horizontal [55].

En la ciudad de México se ha realizado pruebas experimentales de vibración ambiental sobre sus vías elevadas para determinar algunas propiedades básicas de su comportamiento estructural [16]. Esto con el propósito de que los responsables del proyecto tengan elementos de referencia que corroboren los cálculos de diseño, y detecten posibles diferencias que afecten las condiciones de seguridad de la nueva obra vial y, también, para que se defina, si es necesario, hacer ajustes a los criterios de diseño de las vías elevadas de este tipo que se construyan en el futuro tanto en la ciudad de México como en el resto del país. De esta manera, el estudio permitió verificar varios parámetros fundamentales considerados en el diseño, detectar algunos aspectos constructivos que requerirán simplificarse en futuras obras y enriquecer el conocimiento sobre el comportamiento de este tipo de estructuras.

Halling *et al.* [56] determinó las características dinámicas de dos puentes cerca la ciudad de Salt Lake en Estados Unidos a partir de pruebas de vibración ambiental y vibración forzada, los resultados fueron comparados con modelos analíticos.

8.2 Nacionales

En el ámbito nacional se han desarrollado proyectos de investigación con el uso de vibraciones ambientales para la caracterización dinámica de puentes, y a su vez también, con el objeto final de apoyar estudios

de vulnerabilidad y programas de salud estructural. Por ejemplo, es el caso del estudio de vulnerabilidad sísmica del puente de Cajamarca (Figura 5) realizado por Universidad Javeriana [57], en donde se utilizaron mediciones de vibraciones ambientales con el objeto de calibrar el modelo analítico del puente en elementos finitos; para este fin la estructura se instrumentó mediante el uso de cuatro acelerómetros ubicados convenientemente en la parte superior de la estructura y en la cimentación. Las mediciones se realizaron para las condiciones de tráfico y sin tráfico. El procesamiento de los datos para la determinación de las características dinámicas del puente consistió en el siguiente proceso: Aplicación de filtros Pasabanda con el fin de ajustar las frecuencias a las relacionadas con la estructura, análisis en el dominio de la frecuencia por medio de la Transformada Rápida de Fourier para cada registro y determinación de funciones de transferencia entre la cimentación y la parte superior de puente. Por medio de este análisis se pudo establecer las frecuencias predominantes en el sentido transversal y longitudinal de la estructura.

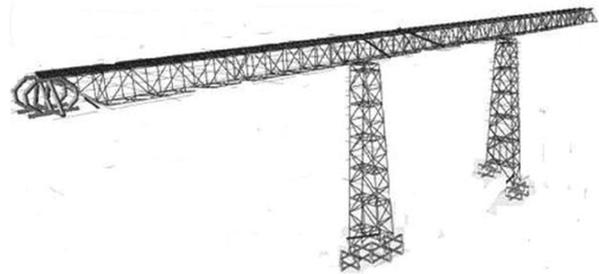


Figura 5. Modelo de elementos finitos del puente Cajamarca [57].

En este mismo aspecto la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle ha realizado diferentes investigaciones en el campo del monitoreo de salud estructural basada en mediciones de vibraciones ambientales, una de estas es el estudio sobre el puente El Hormiguero (ver Figura 6) [58], el cual implicó la monitorización del puente a distancia y en tiempo real. Uno de los aspectos importantes de este estudio fue la implementación de equipos construidos en la misma universidad, conformados por un acelerómetro uniaxial, un amplificador y un transmisor de radio. Las señales registradas en el puente fueron transmitidas hasta el Laboratorio de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad del Valle, en donde se realizó el procesamiento y análisis de los datos. Con el procesamiento y análisis de los datos recopilados,

se implementó un sistema de identificación de daño de Nivel I (Solo existencia de daño) que se basó en los cambios de frecuencias naturales y modos de vibración del puente, mediante comparaciones con un modelo analítico.

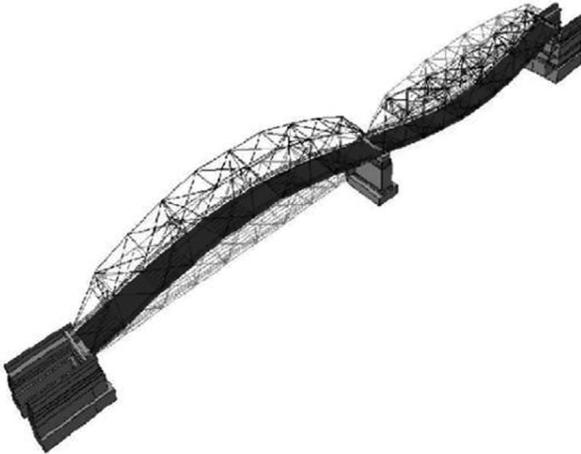


Figura 6. Modelo de elementos finitos con su forma modal del puente El Hormiguero [58].

Otro estudio realizado por la Universidad del Valle sobre monitoreo de salud estructural basado en mediciones de vibraciones ambientales fue sobre el viaducto Dos quebradas (ver Figura 7). En esta investigación se planteó un sistema alerta de fallas que comprendió la construcción de un modelo analítico de la estructura, el diseño de un software para la alerta de fallas en elementos estructurales y su implementación en el sistema de monitoreo del Viaducto, la definición de un sistema de identificación de daños de Nivel II (identificación de daño y su ubicación) y la elaboración de un sistema de identificación de fallo de nivel III (identificación del daño, su ubicación y magnitud). El viaducto Dos quebradas contaba con un sistema de monitoreo compuesto por casi 300 sensores, que incluían acelerómetros, extensómetro, inclinómetros, medidores de temperatura y medidores de corrosión, que se encontraban distribuidos en la estructura metálica, en las pilas y los tirantes [59], [60].



Figura 7. Viaducto Pereira Dos quebradas.

9. CONCLUSIONES

Existe actualmente una clara tendencia en el mundo para explorar y mejorar el potencial de la identificación modal con vibraciones ambientales por encima de las de vibración forzada. La eficiencia y exactitud es claramente demostrada en diferentes investigaciones realizadas a nivel nacional y mundial. Las pruebas de vibraciones ambientales, que pueden ser usadas bajo condiciones de operación normal, pueden proveer una base sólida para: 1) el desarrollo de análisis de correlación de modelos de FE y datos experimentales 2) la actualización y validación del modelo de FE 3) la definición de un conjunto base de propiedades dinámicas de la estructura inicial no dañada, que puede ser subsecuentemente usada para aplicación de técnicas de detección de daño 4) la integración de técnicas de identificación modal con vibraciones ambientales en el sistema de salud estructural.

Los estudios realizados a partir de la utilización de vibraciones ambientales dejan ver la facilidad de su aplicación y el desarrollo que se ha seguido en el procesamiento de los datos. Los métodos de análisis cada vez son mejores manteniéndose la versatilidad en sus aplicaciones.

En lo referente al trabajo en campo se evidencia la importancia de una buena selección, definición y colocación de los instrumentos de medida, la cual debe

depender de la respuesta de la estructura. Por ello la importancia de realizar un estudio preliminar del comportamiento de la estructura para programar las mediciones.

Los desarrollos nacionales dejan ver el avance que se ha tenido en el tema y dado los buenos resultados obtenidos, la importancia de continuar desarrollando estudios de manera que sean implementados en los programas de salud estructural.

A partir de estudios como los mencionados se incentiva, en nuestro medio, los programas de monitorización de estructuras como forma para estudiar el comportamiento real de la estructura y para realizar un seguimiento a su respuesta a lo largo del tiempo.

Finalmente, la buena respuesta que han demostrado los estudios realizados utilizando pruebas de vibración ambiental y la importancia de sus resultados en los programas de salud estructural es importante ampliar su aplicación en el medio colombiano.

10. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido por la Universidad Industrial de Santander a través de la financiación del proyecto titulado *Identificación de las características dinámica de los puentes y dentro del cual se desarrollo este trabajo.*

11. REFERENCIAS

- [1] A. Cunha, E. Caetano, F. Magalhães and C. Moutinho. From input-output to output-only modal identification of civil engineering structures, 1st International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhagen, Dinamarca, 2006.
- [2] R. Brinker, P. Andersen, Ambient response analysis modal for large structures, Sixth international, congress on sound and vibration, 5-8, Copenhagen, Denmark, 1999.
- [3] Y. Zhi-yuan, W. Feng-yuan and Z. Chang-sheng, A method of online damage identification for structures based on ambient vibration, Applied Mathematics and Mechanics, English Edition, Vol. 26, No. 2, 2005, pp 269-276.
- [4] R. Cantieni. Experimental methods used in system identification of civil engineering structures, 2° Workshop: Problemi di vibrazioni nelle strutture civili e nelle costruzioni meccaniche, Perugia, pp. 10-11, Giugno, 2004.
- [5] C. R. Farrar y G. H. James III. System identification from ambient vibration measurement on a bridge, Journal of Sound and Vibration, Vol. 205(1), 1997, pp. 1-18.
- [6] S. K. Thakkar. G. Ghosh y Y. Singh, Y. Structural damage identification and health monitoring of bridges, Proc. National Conference on Advances in Bridge Engineering, March 24-25, 2006, Roorkee, pp. 11-30.
- [7] O. S. Salawu, Detection of structural damage through changes in frequency: a review, Engineering Structures, Vol. 19, No. 9, 1997, pp. 718-723.
- [8] J. H. Kim, H. S. Jeon y C. W. Lee. Application of the modal assurance criteria for detecting and location structural faults, Proc. 10th International Modal Analysis Conference, pp. 536-540, 1992.
- [9] A. K. Pandey, M. Biswas y M. Samman. Damage detection from changes in curvature mode shapes, Journal of Sound and Vibration, Vol. 145 (2), 1991, pp. 321-332.
- [10] A. E. Aktan, K. L. Lee, C. Chuntavan, y T. Aksel, Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities, Proc. of 12th International Modal Analysis Conference, pp. 462-468, 1994.
- [11] R. L. Mayes, An experimental algorithm for detecting damage applied to the I-40 Bridge over the Rio Grande, Proc. 13th International Modal Analysis Conference, pp. 219-225, 1995.
- [12] H. G. Natke y J. T. P. Yao, Proceeding of the International Workshop on Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches, Vieweg, Brunswick, Germany, 1998.
- [13] C. M. Bishop. Neural network and their applications, Review of Scientific Instrumentation, Vol. 65 (6), 1994, pp. 1803-1832.
- [14] H. Zhu. Y. Sima and J. Tang, Damage detection in structures using modified back-propagation neural networks, Acta mechanica solida sinica, Vol. 15, No. 4, pp 358-370, 2002.

- [15] Y. Fujino, M. Abe. Structural health monitoring in civil infrastructures and R&D of SHE of bridges at the University of Tokyo, Proceedings of 17th U.S.-Japan Bridge Engineering Workshop, November 12-14, , 2001, P.W.R.I., Tsukuba City, Japan.
- [16] D. Muria, A. R. Sánchez, R. Gómez, G. Rodríguez, and M. A. Mendoza, Pruebas experimentales en las vías elevadas de la ciudad de México. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas, Concepción, Chile, 2005.
- [17] H. Sohn, C. R. Farrar, F. M. Hemez, D. D. Shunk, D. W. Stinemat, and B. R. Nadler, A review of structural health monitoring literature: 1996–2001, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2003.
- [18] R. Cantieni. Experimental methods used in system identification of civil engineering structures. In: Proceedings of 1st Int. operational modal analysis conference (IOMAC), pp. 249-260, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [19] Wei-Xin Ren, Wael Zatar, Issam E. Harik, Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge, *Engineering Structures* 26, 2004, pp. 631-640.
- [20] C. Gentile, N. Gallino, Ambient vibration testing and structural evaluation of an historic suspension footbridge. *Advances in Engineering Software*, 2007.
- [21] F. Magalhães, E. Caetano and A. Cunha. Operational modal analysis of the Braga Sports Stadium Suspended Roof, Proc. 24th Int. Modal Analysis Conference, St. Louis, USA, 2006.
- [22] E. Caetano and A. Cunha. Experimental and numerical assessment of the dynamic behaviour of a Stress-Ribbon Bridge, *Structural Concrete, Journal of FIB*, 5, No 1, 2004, pp. 29-38.
- [23] Wei-Xin Ren., Xue-Lin Penga and You-Qin Lina, Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge, *Engineering Structures* 27, 2005, pp. 535–548.
- [24] S. W. Doebling and C. R. Farrar. Using statistical analysis to enhance modal-based damage identification. In Proc. DAMAS 97: structural damage assessment using advanced signal processing procedures, University of Shef.eld, UK, pp. 199–210, 1997.
- [25] S. Hoon. Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring, *Phil. Trans. R. Soc. A365*, pp. 539–560, 2007.
- [26] Qin Pan, Kirk A. Grimmelmsan, John Prader y A. Emin Aktan, Evaluation of the quality of ambient vibration monitoring data from the Henry Hudson Bridge. Department of Civil, Architectural & Environmental Engineering, Drexel University, 2005.
- [27] Qin Pan. System identification of constructed Civil Engineering structures and uncertainty, [PhD thesis]. Drexel University, 2007.
- [28] Suleyman Korhan Ciloglu, The impact of uncertainty in operational modal analysis for structural identification of constructed systems, [PhD thesis]. Drexel University, 2006.
- [29] K. A. Petsounis and S. D. Fassois, Parametric time-domain methods for the identification of vibrating structures—A critical comparison and assessments, *Mechanical Systems and Signal Processing* 15(6), 2001, 1031.
- [30] P. Andersen, R. Brinker, B. Peeter, G. De Roeck, L. Hermans and C. Kramer. Comparison of system identification methods using ambient bridge test data, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1999.
- [31] A. J. Felber. Development of a hybrid bridge evaluation system, [PhD thesis]. Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1993.
- [32] J. S. Bendat, and A. G. Piersol. *Engineering applications of correlation and spectral analysis*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, USA, 1993.
- [33] A. Castillo and R. Boroshek. Uso del método de frecuencia no paramétrica y SSI para identificación de propiedades modales de edificios. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas, Concepción Chile, 2005.
- [34] T. Tanaka, S. Yoshizawa, Y. Osawa and T. Morishita. Period and damping of vibration in

- actual building modes, Bull of Seism Soc. Am, 56, 1996, pp. 793-813.
- [35] B. Peeters. System identification and damage detection in civil engineering structures. [PhD thesis]. Heverlee, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2000.
- [36] P. Van Overschee and B. De Moor. Subspace identification for linear systems: theory - implementation - applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996.
- [37] P. Van Overschee and B. De Moor. Subspace algorithms for the stochastic identification problem, Proc. of the 30th IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 1321- 1326, Brighton, UK, 1991.
- [38] P. Valdes. Identificación paramétrica en sistemas estructurales utilizando el método del sub espacio estocástico. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile Santiago de Chile, 2004.
- [39] R. Brincker, L. Zhang and P. Andersen. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, Proc. of the 18th International Modal Analysis Conference, 2000.
- [40] R. Brincker, P. Andersen y N. Møller. Output-only modal testing of a car body subject to engine excitation, Proc. of the 18th International Modal Analysis Conference, 2000.
- [41] S. Gade, N. Møller, H. Herlufsen y H. Konstantin-Hansen. Frequency domain techniques for operational modal analysis, Proceedings of IOMAC Conference, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [42] J. S. Bendat, and A. G. Piersol, Random data, Analysis and measurement procedures, John Wiley and Sons, 1986.
- [43] R. Brincker, and P. Andersen, ARMA (Auto Regressive Moving Average) Models in modal space, Proc. of the 17th International Modal Analysis Conference, 1999.
- [44] S. Gade, N. Møller, H. Herlufsen, and H. Konstantin-Hansen, Frequency domain techniques for operational modal analysis, Proceedings of IOMAC Conference, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [45] R. J. Allemang, The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse, Journals Sound And Vibration, Vol. 262, No. 3, 2003, pp. 651-675.
- [46] A. Cunha, E. Caetano, and R. Delgado, Dynamic tests on a large cable-stayed bridge. An Efficient Approach, Journal Bridge Engineering, ASCE, Vol.6, No.1, 2001, pp. 54-62.
- [47] A. Cunha, and R. Calçada, Ambient vibration test of a steel trussed arch bridge, Proc. of the 18th Int. Modal Analysis Conference, San Antonio, Texas, 2000.
- [48] J. M. W. Brownjohn, and Pin-Qi Xia, Dynamic assessment of curved cable- stayed bridge by model updating, Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No. 2, 2000, pp. 252-260.
- [49] F. N. Catbas, S. K. Ciloglu, O. Hasancebi, K. Grimmelsman, and A. E. Aktan, Limitations in structural identification of large constructed structures. Journal of Structural Engineering, Vol. 133, No. 8, 2007, pp. 1051-1066.
- [50] C. Gentile, and A. Saisi, Dynamic-based F.E. model updating to evaluate damage in masonry towers, Proceedings of the 4th International Seminar on Structural analysis of Historical Constructions, Padova, Italy, Vol. 1, 2004, pp. 439-449.
- [51] B. M. Douglas and W. H. Dynamic tests and system identification of bridges. ASCE J Struct Div, Vol. 108, No. 10, 1982, pp. 2295–312.
- [52] A. Teughels, Inverse modelling of civil engineering structures based on operational modal data. [Ph.D. Thesis]. K.U. Leuven, Belgium, 2003.
- [53] M. I. Friswell, and J. E. Mottershead, Finite element model updating in structural dynamics, Department of Mechanical Engineering, University of Wales Swansea, Kluwer Academic Publishers, 286 p. 1995.
- [54] E. Reynders, M. Schevenels, G. De Roeck, Guido De R. and Macec. A Matlab Toolbox for experimental and operational modal analysis, Report BWM, 2008.

- [55] M. O. Moroni, and M. Sarrazin, Respuesta sísmica de puentes con sistemas de protección sísmica, Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas, Concepción, Chile, 2005.
- [56] M. W. Halling, A. Ball, R. Esplin, K-H. Hsieh, Modal analysis and modeling of highway bridges, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2996, Vancouver, Canada, 2004.
- [57] E. Muñoz, F. Núñez, J. A. Rodríguez, A. Ramos, C. Otálora., Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente en acero basado en confiabilidad estructural, Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 23, No. 3, 2008, pp. 125- 144.
- [58] P. Thomson, J. Marulanda C. and J. Marulanda A. Monitoreo de Salud Estructural, Colombia, Ingeniería y Competitividad, Vol. 2, No. 2, 2000, pp. 40 – 46.
- [59] P. Thomson, N. Galindez, J. Marulanda, A. Orozco, J. Caicedo, S. Dyke, Implementation of A Modal Identification Methodology on the Pereira-Dosquebradas Viaduct, 16th Asce Engineering Mechanics Conference, Estados Unidos, 2003.
- [60] P. Thomson, and J. Marulanda C, Sistema de MSE del viaducto Pereira-Dosquebradas, IV Semana de la Ingeniería, I Simposio de Investigaciones, Colombia, 2005.