

# Identificación paramétrica tridimensional de un edificio mediante ruido ambiental

Jesús Morales<sup>†</sup> y Luis Alvarez-Icaza<sup>‡</sup>  
Instituto de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México  
04510 Coyoacán DF, México

**Resumen**—En este trabajo se muestra la viabilidad de utilizar un estimador paramétrico por mínimos cuadrados con factor de olvido para recuperar los parámetros del modelo a cortante de un edificio con tres grados de libertad por piso, a partir de la excitación en dos direcciones ortogonales de señales de baja magnitud conocidas como ruido ambiental. A diferencia de los sismos de gran magnitud, el ruido ambiental tiene la ventaja de no dañar las estructuras y ser fácil de obtener al estar siempre presente. Basta con instalar acelerómetros en los sitios de interés del edificio, registrar su salida y usarla para estudiar el comportamiento dinámico. La meta es la identificación en línea de parámetros estructurales y de las frecuencias de vibración fundamental antes de la presencia de un sismo de gran magnitud, de manera que al ocurrir este ya se cuente con los parámetros del modelo y sea posible la implementación directa de técnicas de control de vibraciones que eviten daño estructural.

**Palabras clave:** ruido ambiental; identificación de parámetros; mínimos cuadrados con factor de olvido; vibración en edificios; control de vibraciones.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sismos son una de las manifestaciones más impresionantes de la naturaleza. La pérdida de vidas humanas y la destrucción de infraestructura muestran lo devastador de este fenómeno. Es de particular importancia conocer la respuesta de los edificios, pues los sismos inducen esfuerzos importantes en sus elementos que pueden provocar fallas. Estos esfuerzos se pueden medir a partir del análisis de las propiedades y características dinámicas de un modelo del edificio. El comportamiento dinámico real de las estructuras se puede recuperar con una adecuada instrumentación que permita registrar la respuesta, procesarla y analizarla. Los registros instrumentales, sin embargo, contienen una combinación de efectos y perturbaciones denominadas *ruido de fondo*. Este ruido, además del naturalmente asociado a los instrumentos de medición, suele ser de tipo diverso y está asociado a causas atmosféricas: vientos intensos, cambios de temperatura o lluvias, pero también a la actividad humana: ocupación del edificio, tráfico, maquinaria, etc. (Todorovska M.I., 2005).

Tradicionalmente, el ruido ha sido considerado como algo negativo que es necesario evitar o cancelar. En la actualidad,

se ha convertido en una herramienta excelente para caracterizar los efectos locales y las propiedades dinámicas del lugar de registro y de las estructuras. Así pues, para los estudios con ruido ambiental, el ruido es *la señal* y las ondas que lo integran se suelen llamar *vibración ambiental*.

El uso de ruido ambiental para propósitos de caracterización dinámica tiene la ventaja sobre la excitación sísmica de ser eficiente, relativamente rápido, fácil de obtener y práctico para realizar pruebas no destructivas sobre edificios, como se puede ver en los trabajos de (Sánchez Sesma F. J., 2010) y (Murià-Vila D., 2007). El primero de ellos (Sánchez Sesma F. J., 2010) presenta resultados de mediciones experimentales en las cortinas de las presas *La Yesca* y *El Cajón*. En él, se estiman las velocidades de propagación de ondas sísmicas en los materiales de las cortinas mediante el uso de fuentes virtuales construidas al apilar correlaciones en ventanas temporales de señales de ruido. Además, se revisan las estimaciones de las velocidades de propagación de ondas sísmicas de los materiales, con base en las técnicas de campos difusos en perfiles uniformes y se examina la posibilidad de obtener información relevante a partir de arreglos irregulares. Por otra parte, (Murià-Vila D., 2007) presenta estudios de pruebas de vibración ambiental en un edificio de 14 niveles ubicado en suelo blando donde se identifican las frecuencias naturales de vibración, los amortiguamientos y las formas modales.

Los trabajos realizados para la identificación paramétrica en línea de edificios no son abundantes, entre ellos se encuentran los trabajos de (Angeles J.M y Alvarez-Icaza L., 2006; Angeles J.M y Alvarez-Icaza L., 2011), donde se presenta un algoritmo para la identificación de parámetros estructurales bajo una excitación sísmica bidimensional y ortogonal, usando mediciones de sensores de aceleración ubicados arbitrariamente en los pisos. El modelo considera tres grados de libertad por cada piso, dos coordenadas ortogonales de desplazamiento y una coordenada de torsión perpendicular al plano formado por aquellas. Además, se introduce una parametrización modificada del algoritmo de mínimos cuadrados que permite una importante reducción en el orden de la matriz de covarianza de la ley de adaptación,

<sup>†</sup>Estudiante de posgrado, jmoralesv@iingen.unam.mx.

<sup>‡</sup>Investigador y corresponsal, alvar@pumas.iingen.unam.mx.

comparada con la formulación estándar, lo que redundaría en un número de cálculos significativamente menor. Un observador adaptable para un edificio equipado con un amortiguador magneto-reológico se presenta en (Jiménez R. y Alvarez-Icaza L., 2008). Este observador es capaz de reconstruir tanto los parámetros estructurales como las posiciones y las velocidades absolutas correspondientes a cada uno de los niveles del edificio, a partir de la medición de las aceleraciones de cada uno de los pisos y de la aceleración del terreno. Cabe señalar que dicho observador no requiere de una forma canónica o transformación de estados. La principal contribución del trabajo es que a través del modelo modificado de LuGre para amortiguadores magneto-reológicos se logra prescindir de la medición de la fuerza.

En este trabajo se propone realizar el proceso de identificación de parámetros estructurales en edificios en tiempo real por el método de mínimos cuadrados con factor de olvido y utilizar como excitación la provista por señales de baja magnitud denominadas ruido ambiental. Es conveniente recalcar que este proceso de identificación se puede realizar mucho antes de la presencia de un sismo de gran magnitud y permitiría tener los valores de las relaciones amortiguamiento-masa y rigidez-masa y las frecuencias de vibración. listos para emplearse en la mitigación del movimiento del edificio, mediante técnicas de control de vibraciones, cuando inicie un movimiento sísmico de gran magnitud. Este enfoque permitiría acortar el tiempo para hacer efectivas las técnicas de control de vibraciones, que en los trabajos que utilizan excitación sísmica fuerte, como en (Angeles J. M y Alvarez-Icaza L., 2006; Jiménez R. y Alvarez-Icaza L., 2008; Angeles J. M y Alvarez-Icaza L., 2011), deben esperar hasta que la convergencia paramétrica se haya logrado. Por otro lado, el uso de ruido ambiental propone una metodología de identificación no destructiva que también se puede usar para detectar salud e integridad estructural.

## II. MODELO MATEMÁTICO DEL EDIFICIO CON 3 GDL

Para la descripción del modelo matemático se utiliza un edificio de  $n$  pisos con tres grados de libertad por cada uno de ellos (dos desplazamientos horizontales ortogonales,  $X$  y  $Y$ , y una rotación,  $\theta$ , perpendicular al plano formado por los dos primeros) en el que se supone que la masa de cada piso está concentrada en el techo y en el centro de éste, las columnas son flexibles a deformación lateral y rígidas en dirección vertical. Además, la estructura está soportada en suelo firme (Meli, R., 1985). La Fig. 1 muestra un esquema del edificio modelado.

El modelo matemático que describe el comportamiento elástico a cortante de un edificio sujeto a fuerzas externas es (Chopra A., 1995):

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -M\ddot{U}_g, \quad (1)$$

donde las matrices  $M > 0 \in \mathcal{R}^{3n \times 3n}$ ,  $C \geq 0 \in \mathcal{R}^{3n \times 3n}$  y  $K > 0 \in \mathcal{R}^{3n \times 3n}$ , son las matrices de masa, amortiguamiento

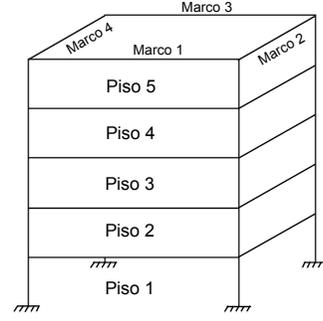


Figura 1. Esquema del edificio de 5 pisos simulado

y rigidez del edificio.  $U \in \mathcal{R}^{3n \times 1}$ ,  $\dot{U} \in \mathcal{R}^{3n \times 1}$  y  $\ddot{U} \in \mathcal{R}^{3n \times 1}$  son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración relativos al suelo, respectivamente, formadas por las coordenadas  $X$ ,  $Y$  y  $\theta$ .  $\ddot{U}_g$  es el vector de aceleración del terreno que se aplica al suelo y a cada uno de los pisos del edificio.

Por otra parte, se sabe que:

$$M = \begin{bmatrix} M_n & 0 & 0 \\ 0 & M_n & 0 \\ 0 & 0 & I_0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{x\theta} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{y\theta} \\ C_{\theta x} & C_{\theta y} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{x\theta} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{y\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix}.$$

donde, cada uno de los subíndices  $xx$ ,  $xy$ ,  $x\theta$ ,  $yx$ ,  $yy$ ,  $y\theta$ ,  $\theta x$ ,  $\theta y$  y  $\theta\theta$  ( $ij$  para generalizar), se refieren a las direcciones de desplazamiento  $X$  y  $Y$  y torsión  $\theta$ . Cada elemento de  $M$ ,  $C$  y  $K$ , es una matriz que contiene los parámetros de masa ( $M_n$ ) o momento de inercia ( $I_0$ ) de cada uno de los pisos, amortiguamiento ( $C_{ij}$ ) y rigidez ( $K_{ij}$ ) de las columnas laterales en las direcciones  $X$ ,  $Y$  y  $\theta$ , respectivamente. Cada matriz pertenece a un espacio de números reales de dimensión  $n \times n$  y están definidas de la siguiente forma:

$$M_n = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix},$$

$$I_0 = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I_n \end{bmatrix},$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \cdots & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & c_n \end{bmatrix},$$

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdots & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & k_n \end{bmatrix}.$$

$$M_n = M_n^T \in R^{n \times n}, I_0 = I_0^T \in R^{n \times n}, \\ C_{ij} = C_{ij}^T \in R^{n \times n} K_{ij} = K_{ij}^T \in K^{n \times n}.$$

Se considera que la estructura cumple con (Paz Mario, 1997):

1. Comportamiento lineal
2. Diafragma de piso rígido
3. Parámetros concentrados
4. Marcos planos.

### III. ALGORITMO DE MÍNIMOS CUADRADOS

En general, la estructura del modelo del edificio es conocida, sin embargo, sus parámetros no lo son y pueden variar con el tiempo debido a cambios en las condiciones de operación. En algunos casos estos parámetros pueden ser medidos o calculados usando leyes físicas, propiedades de los materiales, etc., mientras que en otros esto no es posible y tienen que ser deducidos observando la respuesta del sistema con respecto a una excitación de entrada.

La idea de la estimación en línea, consiste en ajustar los parámetros de la estructura contenidos en un vector  $\theta(t)$  de manera continua de tal manera que la salida estimada del modelo con esta parametrización  $\hat{y}(\theta(t), t)$  sea igual a la salida real  $y(t)$  del sistema a medida que transcurre el tiempo. Si esto sucede bajo la condición de excitación persistente, los valores del vector de parámetros estimados  $\theta(t)$  tienden hacia los valores del vector de parámetros reales  $\theta_0$  del modelo del sistema (Ioannou, P. y J. Sun, 1996).

El método utilizado en este trabajo es el de mínimos cuadrados con factor de olvido, que a diferencia del método convencional, introduce un factor  $\delta$  que pondera más las muestras recientes permitiendo así detectar cambios en los parámetros cuando el algoritmo lleva un tiempo considerable de funcionamiento (Slotine, J.-J. E y W. Li, 1991). El algoritmo de estimación procesa la información obtenida de las mediciones de aceleración en cada uno de los pisos, así como la aceleración del suelo con el objetivo de conocer

el valor de las relaciones amortiguamiento-masa y rigidez-masa en el edificio. Matemáticamente este algoritmo se puede resumir como se muestra a continuación.

Se parte de la ecuación que describe el comportamiento de la estructura, donde  $M$ ,  $C$ , y  $K \in R^{3n \times 3n}$ , son matrices constantes desconocidas

$$M(\ddot{U} + \ddot{U}_g) + C\dot{U} + KU = 0. \quad (2)$$

Una forma de parametrizar el modelo es suponer que los vectores  $\ddot{U}$ ,  $\ddot{U}_g$ ,  $\dot{U}$  y  $U$  son señales medidas<sup>1</sup>, por lo tanto bajo esta consideración se obtiene

$$M(\ddot{U} + \ddot{U}_g) = -C\dot{U} - KU, \\ \ddot{U} + \ddot{U}_g = -M^{-1}C\dot{U} - M^{-1}KU, \quad (3)$$

donde los parámetros a estimar del modelo son los elementos de las matrices  $M^{-1}K$  y  $M^{-1}C$ .

**Teorema** Sea el sistema 2, con  $K, C, M \in R^{3n \times 3n}$  y  $M$  una matriz no singular. Sea la parametrización del sistema (Angeles J.M y Alvarez Icaza L., 2005)

$$Z = \ddot{U} + \ddot{U}_g \in R^{3n \times 1}, \\ \theta = [M^{-1}K \quad M^{-1}C] \in R^{3n \times 6n}, \\ \gamma = [-U^T \quad -\dot{U}^T]^T \in R^{6n \times 1},$$

donde  $\theta$  es la matriz de parámetros reales y  $\gamma$  es el vector regresor que depende de los desplazamientos y velocidades, tal que  $Z$  representa los valores reales de la salida del sistema

$$Z = \theta\gamma, \quad (4)$$

y sea  $\hat{\theta}$  la matriz de parámetros estimados del sistema tal que la salida estimada  $\hat{Z}$  está dada por el producto de la matriz de parámetros estimados  $\hat{\theta}$  por el vector regresor  $\gamma$ , es decir :

$$\hat{Z} = \hat{\theta}\gamma. \quad (5)$$

Entonces el algoritmo de estimación está dado por las Ecs. (6) y (7)

$$\dot{P} = \delta P - P \frac{\gamma\gamma^T}{h^2} P, \quad (6)$$

$$\dot{\hat{\theta}}^T = P\gamma\epsilon^T, \quad (7)$$

<sup>1</sup>Esta consideración se basa en suponer que la velocidad y desplazamiento de los entresijos también son medidos. De no serlo, se puede integrar el diseño del identificador con un observador de estados como en (Jiménez R. y Alvarez-Icaza L., 2008).

con  $P = P^T > 0 \in R^{6n \times 6n}$ ,  $P(0) > 0$ ,  $1 > \delta \geq 0 \in R$ ,  $h^2 = 1 + \gamma^T \gamma$ , satisface  $\gamma/h \in L_\infty$ , que garantizan que el error normalizado de estimación

$$\varepsilon = \frac{Z - \hat{Z}}{h^2} \rightarrow 0 \quad \text{cuando} \quad t \rightarrow \infty.$$

La prueba de convergencia del algoritmo se puede consultar en (Angeles J. M y Alvarez Icaza L., 2005).

#### IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el fin de evaluar el desempeño del algoritmo de estimación propuesto, se llevó a cabo una simulación numérica con parámetros nominales de un edificio de cinco pisos escala reducida, formado cada uno por cuatro marcos y cuatro columnas, tomado de (Angeles J.M, 2010), y que se muestra en la Fig. 1. La tabla IV, muestra los polos y las frecuencias modales de la estructura antes mencionada, donde la parte real de los polos es negativa, lo que implica un sistema estable (Angeles J.M y Alvarez-Icaza L., 2012).

TABLA I

POLOS Y FRECUENCIAS MODALES DEL MODELO SIMULADO

Polos	Frecuencia (rad/s)	Frecuencia (Hz)
$-0.01194 \pm 10.361i$	10.361	1.649
$-0.02568 \pm 15.190i$	15.190	2.418
$-0.10201 \pm 31.073i$	31.073	4.945
$-0.16758 \pm 38.274i$	38.274	6.092
$-0.22371 \pm 45.015i$	45.015	7.164
$-0.24769 \pm 47.787i$	47.788	7.606
$-0.41616 \pm 60.437i$	60.439	9.619
$-0.54777 \pm 69.709i$	69.711	11.01
$-0.52961 \pm 71.227i$	71.229	11.34
$-0.89824 \pm 89.716i$	89.721	14.28
$-1.1589 \pm 101.94i$	102.94	16.38
$-1.4271 \pm 114.28i$	114.29	18.19
$-3.5836 \pm 177.40i$	177.44	28.24
$-5.8500 \pm 229.23i$	229.31	39.50
$-7.5324 \pm 260.83i$	260.94	41.53

En la simulación, esta estructura fue excitada con ruido ambiental real obtenido en el lecho del lago de Texcoco. Estos datos consisten de un registro de aproximadamente 6.4 h, recabados por un sensor de periodo de muestreo de 30 s. Sin embargo, debido a que el registro expresa la velocidad de propagación, se utilizaron diferencias finitas para obtener el acelerograma correspondiente. Cabe mencionar que estos registros de velocidad fueron ya procesados con anterioridad para filtrar en ellos el ruido de alta frecuencia que pudiera influir en el cálculo de la aceleración. Las señales de velocidad y aceleración ambiental utilizadas se aprecian en la Figs. 2 y 3. Las señales de desplazamiento se obtuvieron directamente por integración de los registros de velocidad que, por el procesamiento original mencionado, tienen promedio nulo. Cabe mencionar que las señales de excitación (X y Y) son ortogonales entre si. Al no ser iguales, en general, provocan desplazamientos no uniformes en ambas direcciones que a su vez inducen torsión sobre la estructura mostrada. La

medición directa de la torsión es difícil, más aún cuando se trata de edificios con plantas no simétricas. En este trabajo se utilizó la metodología de cálculo presentada en (Angeles J. M y Alvarez-Icaza L., 2012).

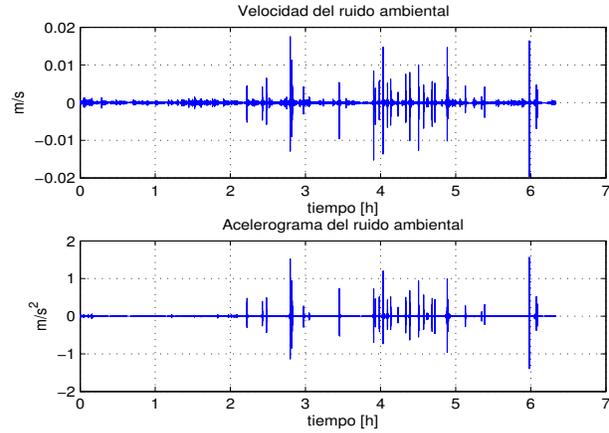


Figura 2. Ruido ambiental en el Lago de Texcoco, dirección X

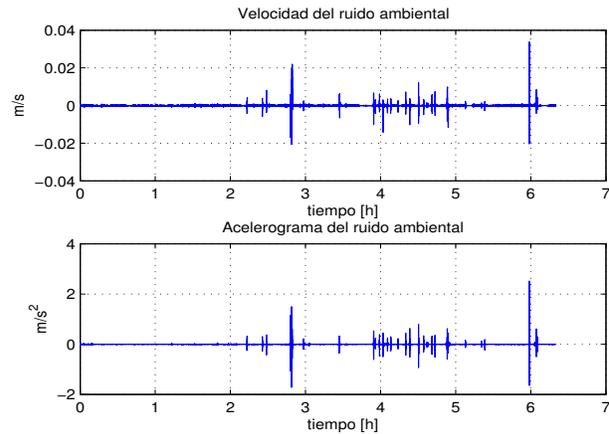


Figura 3. Ruido ambiental en el Lago de Texcoco, dirección Y

Al aplicar los registros de ruido ambiental a la estructura mencionada y resolver las ecuaciones del algoritmo de estimación, se obtienen los parámetros estimados, la señal del error normalizado de estimación y las frecuencias modales de vibración. Las Figs. 4 y 5 muestran la evolución de los elementos (1,1), (2,1), (11,1) y (12,6) de las matrices identificadas  $[M^{-1}K$  y  $M^{-1}C]$ , donde la convergencia paramétrica ocurre en un tiempo menor a los 240 s. En ambos casos solo se muestra el comportamiento de cuatro parámetros de cada una de las matrices mencionadas elegidos de manera aleatoria. Sin embargo, el comportamiento es similar para los 446 elementos restantes. En el algoritmo de identificación implementado la excitación se obtiene a través de mediciones que contienen ruido ambiental surgido

de diferente fuentes como son los vientos intensos, vehículos pesados, maquinaria, cambios de temperatura, movimientos volcánico, entre otros. Al ser este ruido ambiental de baja magnitud es de esperarse que el tiempo de convergencia del algoritmo de mínimos cuadrados sea mucho mayor que el obtenido cuando la excitación es una señal sísmica. Si bien los resultados de identificación muestran un tiempo de convergencia aparentemente alto de 240 s, es importante notar que este tiempo de convergencia no juega un papel importante, pues es muchísimo menor que el tiempo entre sismos. Así, los parámetros del edificio estarían disponibles mucho antes de la presencia de un evento sísmico de gran magnitud.

Como una forma de comprobar que el algoritmo de estimación funciona satisfactoriamente, la Fig. 6 muestra la norma del error de estimación  $\|\varepsilon\|_2$ . En ella se observa como esta disminuye a medida que transcurre el tiempo, lo que indica que la salida estimada converge a la salida real del sistema. En la Fig. 7 se muestra la evolución de las frecuencias modales de la estructura, calculadas a partir de la matriz de parámetros  $[M^{-1}K \ M^{-1}C]$  estimada, lográndose identificar 14 de las 15 frecuencias de vibración. Esto es de gran importancia, pues a través de estos modos de vibración los especialistas en el tema obtienen información de cómo se comporta un edificio bajo determinada excitación. Con esta información se pueden implementar diferentes técnicas de control como un LQR, control basado en pasividad, etc., con el objetivo de reducir los desplazamientos y mitigar las vibraciones en los edificios. Esta información se puede usar también para realizar diseño sísmico. La tabla IV muestra los valores finales de las frecuencias estimadas.

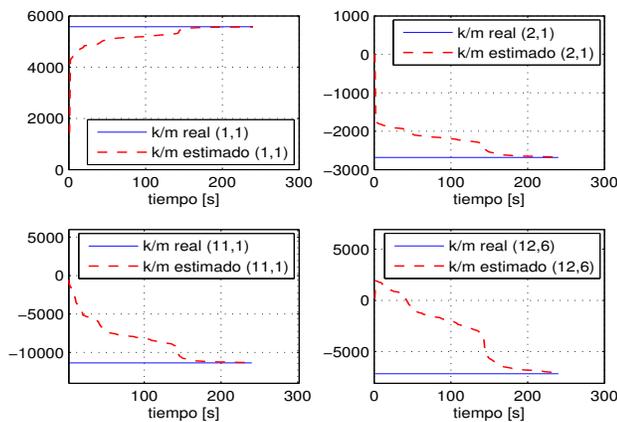


Figura 4. Estimación de los elementos de la matriz  $-M^{-1}K$

Cabe mencionar que los resultados de simulación presentados fueron obtenidos con las condiciones de convergencia favorables, con un factor de olvido de 0,004 y con un valor inicial de la matriz de covarianza de  $10e^{10}$ , con lo cual el tiempo de convergencia paramétrica es de menos de 240 s. En este trabajo se consideran que los efectos del

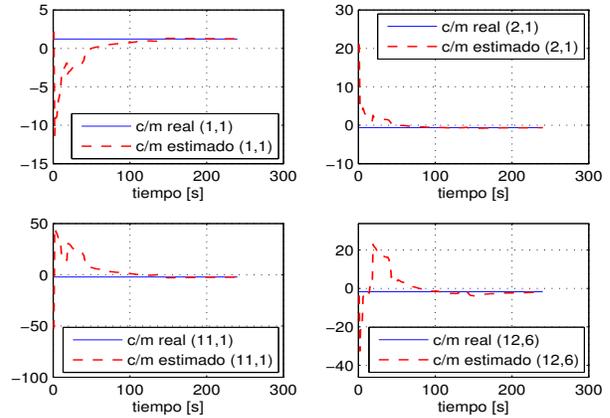


Figura 5. Estimación de los elementos de la matriz  $-M^{-1}C$

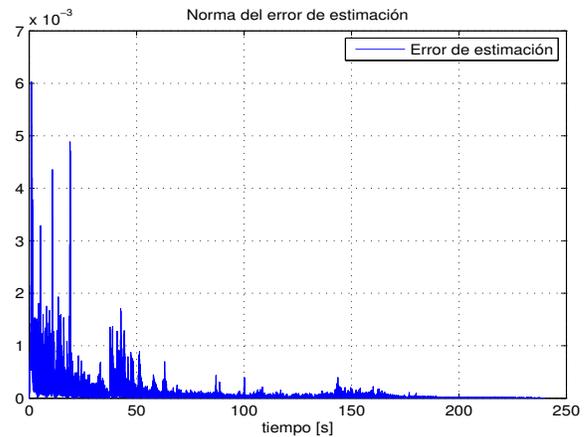


Figura 6. Norma del error de estimación:  $\|\varepsilon\|_2$

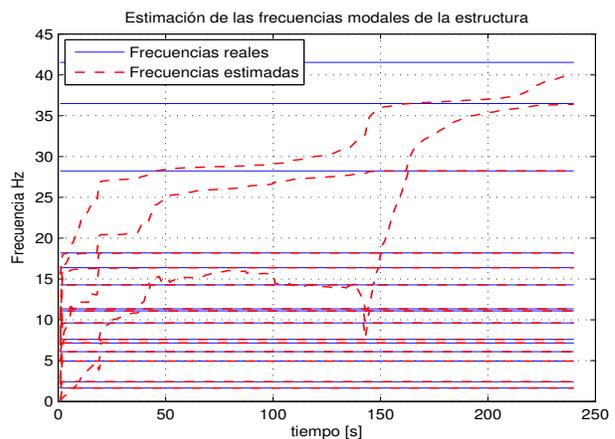


Figura 7. Estimación de las frecuencias modales de la estructura

ruido de medición en los registros sísmicos están incluidos en la señal sísmica de excitación de ruido ambiental, se

F. real Hz	F. estimada Hz	Error final (%)
1.6490	1.6490	0
2.4176	2.4176	0
4.9454	4.9454	0
6.0916	6.0916	0
7.1644	7.1644	0
7.6057	7.6057	0
9.6191	9.6191	0
11.0948	11.0948	0
11.3365	11.3365	0
14.2795	14.2795	0
16.3839	16.3839	0
18.1905	18.1904	0.0005
28.2405	28.2400	0.0017
36.4958	36.3977	0.2687
41.5305	39.9880	3.7141

TABLA II  
ESTIMACIÓN DE LAS FRECUENCIAS MODALES.

## REFERENCIAS

- Todorovska M.I. (2005). Building periods for use in earthquake resistant desing code-earthquake response data compilation and analisis of time and amplitude variations. *Technical report, University of Sourthern California Civil Engineering Department, jun-06.*
- Jiménez R. y Alvarez-Icaza L. (2008). Estimación adaptable de estados en un edificio de marco plano equipado con un amortiguador magneto-reológico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI (5)*, 135–143.
- Angeles J.M y Alvarez-Icaza L. (2006). 3D identification of a seismically excited buildings with sensor arbitrary placed. *Proceedings of the 2006 American Control Conference* , 3807–3812.
- Angeles J. M y Alvarez-Icaza L. (2011). Identification of seismically excited buildings with two orthogonal horizontal components. *Journal of Vibration and Control* **17(6)**, 881–901.
- Sánchez Sesma F. J. (2010). Estimación de las propiedades mecánicas de los materiales de cortinas de presas de enrocamiento mediante el procesamiento de la respuesta ante vibración ambiental. *Instituto de Ingeniería, UNAM*
- Murià-Vila D. (2007). Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados. *Academia de Ingeniería, México*
- Paz Mario (1997). *Structural Dynamics: Theory and Computation*. Fourth Edition, New York, NY, Chapman & Hall, International Thompson Publishing.
- Chopra A. (1995). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- Ioannou, P. y J. Sun (1996). *Robust Adaptative Control*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- Slotine, J.-J. E y W. Li (1991). *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Angeles J. M y Alvarez-Icaza L. (2005). 3D identification of buildings seismically excited. *Proceedings of the 2005 IFAC World Congress*
- Jiménez R. y Alvarez-Icaza L. (2004). A state observer for a building with magneto-rheological damper and parameter uncertainty. *Proceedings of the 2006 American Control Conference* , 2880–2885.
- Angeles J. M (2010). Identificación Paramétrica Tridimensional de un Edificio. *Tesis de Doctorado. Programa de Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México*
- Meli, R. (1985). *Diseño estructural*. Limusa, México
- Morales, J. y Alvarez-Icaza L. (2012). Identificación de edificios en tiempo real mediante ruido ambiental. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático 2012* , 434–439.
- Angeles J. M y Alvarez Icaza L. (2012). Identificación Paramétrica Tridimensional de un Edificio. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático 2012*

puede recurrir a un análisis en el dominio de frecuencia mediante la Transformada de Fourier para discernir entre la señal de excitación y el ruido de medición si se analiza el rango de frecuencias de cada una de ellas.

De los resultados obtenidos, se observa que la convergencia paramétrica obtenida es buena en comparación con los resultados en (Morales, J. y Alvarez-Icaza L., 2012), pese al incremento en el número de los parámetros a identificar.

## V. CONCLUSIONES

Se estudiaron los efectos del ruido ambiental como medio de excitación en edificios para recuperar la respuesta dinámica estructural. Se logró la identificación de parámetros estructurales en línea y de las frecuencias de vibración fundamental. El uso de ruido ambiental, a diferencia de trabajos donde se utilizan sismos de gran magnitud, tiene como ventaja que es sumamente fácil de obtener y que no daña las estructuras. Debido a sus fuentes de origen y a la frecuencia con la que se presenta es posible obtener información en cualquier momento para excitar el sistema y realizar la identificación paramétrica en línea. Esto permite conocer los parámetros antes de la presencia de un sismo de gran magnitud, restando importancia al tiempo de convergencia, de manera que una vez obtenidos los parámetros sea posible utilizarlos en técnicas de control para la mitigación de vibraciones en edificios.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a David Murià-Vila y Francisco J. Sánchez Sesma por facilitar los registros sísmicos y de ruido ambiental respectivamente. El primero también agradece el apoyo de CONACYT y la Coordinación de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Esta investigación fue patrocinada por los proyectos CONACYT 103690 y UNAM-PAPIIT IN105512.