

Identificación de edificios en tiempo real mediante ruido ambiental

Jesús Morales[†] y Luis Alvarez-Icaza[‡]
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
04510 Coyoacan DF, México

Resumen—Se presenta una nueva forma de recuperar la dinámica en edificios mediante el uso de señales de baja magnitud conocidas como ruido ambiental, que a diferencia de trabajos donde utilizan sismos de gran magnitud, tienen la ventaja de ser sumamente económicas de obtener y de no dañar las estructuras. La meta es la identificación de parámetros estructurales en línea y de las frecuencias de vibración fundamental previo a la presencia de un sismo de gran magnitud, de manera que una vez obtenidos los parámetros sea posible la implementación de técnicas de control que eviten daño estructural. El método de identificación empleado es el de mínimos cuadrados con factor de olvido.

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 la respuesta sísmica de edificios, pues los sismos inducen esfuerzos importantes en los elementos de la construcción pudiendo provocar fallas. Las posibles trágicas consecuencias hacen imprescindible conocer el comportamiento de las estructuras cuando se encuentran bajo acciones dinámicas, haciendo necesaria una adecuada instrumentación para registrar las respuestas. Sin embargo, los registros instrumentales contienen una combinación de efectos y perturbaciones denominadas *ruido de fondo*. Este ruido suele ser de tipo diverso, frecuentemente debido a causas atmosféricas como vientos intensos, cambios de temperatura, lluvias, entre otros factores (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 tiene la ventaja sobre los trabajos con excitación sísmica de ser eficiente, rápido y económico debido a la facilidad para obtener información y realizar pruebas no destructivas sobre edificios.

Actualmente, las investigaciones relacionadas con el control de vibraciones y la seguridad en edificios han llevado a muchos investigadores a desarrollar nuevas técnicas de control y esquemas de identificación de parámetros y estados estructurales desconocidos. El problema de estimar simultáneamente los estados de un sistema lineal sin el conocimiento exacto de sus parámetros ha sido estudiado desde 1970. Muchos de estos trabajos introducen una solución al problema mediante el diseño de un observador adaptable para el sistema lineal invariante en el tiempo.

En (Jiménez R. y Alvarez Icaza L., 2008) se presenta un observador adaptable para un edificio equipado con un amortiguador magneto-reológico. 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 (Angeles J.M y Alvarez Icaza L., 2006) 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 usa 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, comparada con la formulación estándar (Angeles J.M y

[†]Estudiante de posgrado, JMoraesV@iingen.unam.mx.

[‡]Investigador y corresponsal, alvar@pumas.iingen.unam.mx.

Alvarez Icaza L., 2011).

Por otra parte, en los últimos años se han realizado trabajos en los cuales se han considerado al ruido ambiental como fuente de excitación. En (Sánchez Sesma F. J., 2010) se presentan 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 mediante el apilamiento de 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.

En (Murià-Vila D., 2007) se presentan 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.

En este trabajo se presenta el proceso de identificación de edificios en tiempo real mediante señales de excitación de baja magnitud denominadas ruido ambiental y mediante el método de mínimos cuadrados con factor de olvido se identifican los valores de las relaciones amortiguamiento-masa y rigidez-masa, así como las frecuencias de vibración.

II. MODELO MATEMÁTICO DEL EDIFICIO

En términos de estructuras, considerando que solo se tiene excitación en una sola dirección del eje coordenado y no se presentan efectos de torsión, hablar de número de pisos es equivalente a hablar de grados de libertad (GDL). Para la descripción del modelo matemático se presenta un edificio de n pisos en el que se asume que la masa de cada uno de ellos 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 es soportada en un suelo firme, tal como se ilustra en la Fig. 1.

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 U es el vector de desplazamiento de cada grado de libertad, \dot{U} y \ddot{U} sus respectivas velocidades y aceleraciones relativas al suelo y \ddot{U}_g corresponde a la aceleración del terreno que se aplica a todos los pisos.

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_n]^T \in R^{n \times 1}.$$

A M se le conoce como la matriz de masa debido a que contiene los parámetros de masa de cada uno de los pisos,

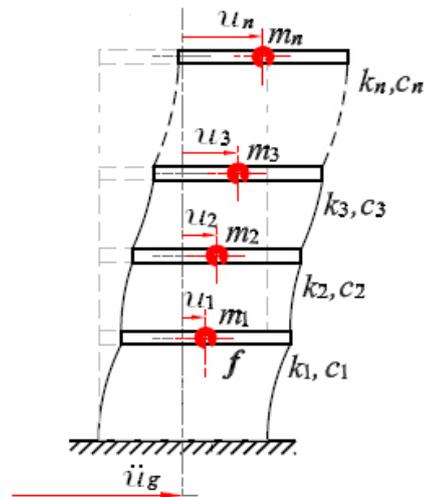


Figura 1. Edificio de n grados de libertad.

m_i para el i -ésimo piso. C es la matriz de amortiguamiento y K es la matriz de rigidez, las cuales contienen los parámetros de rigidez y amortiguamiento de las columnas laterales entre el piso i y el $(i-1)$ respectivamente, cada una de ellas pertenecientes a un espacio de números reales de dimensión $n \times n$, es decir

$$M = M^T \in R^{n \times n}, \quad C = C^T \in R^{n \times n} \text{ y } K = K^T \in K^{n \times n}.$$

Estas matrices están definidas de la siguiente forma:

$$M = M^T = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} > 0,$$

$$C = C^T = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_n \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$K = K^T = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_n \end{bmatrix} > 0.$$

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 muchas aplicaciones, la estructura del modelo del edificio es conocida, sin embargo, en ocasiones los parámetros no lo son y varían con el tiempo debido a cambios en las condiciones de operación. En algunos casos esos parámetros pueden ser medidos o calculados usando leyes físicas, propiedades de los materiales, etc., mientras que en otras 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 $\theta(t)$ de manera continua tal que la salida estimada del modelo parametrizado $\hat{y}(\theta(t), t)$ 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 θ_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. La motivación intuitiva es que los parámetros anteriores son generados por datos anteriores y por lo tanto deben ser actualizados cuando comienza la estimación de los parámetros actuales. A diferencia del método convencional, este algoritmo introduce un factor de olvido δ que pondera más a las muestras recientes permitiendo así detectar un posible cambio en los parámetros cuando el algoritmo lleva un tiempo considerable de funcionamiento (Slotine, J.-J. E y W. Li, 1991).

En este sentido, 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 $K \in R^{n \times n}$, son matrices constantes desconocidas

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

Una forma de parametrizar el modelo es asumir que los vectores \ddot{U} , \ddot{U}_g , \dot{U} y U son señales medidas, por lo tanto bajo esta consideración se obtiene

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

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 , $\in R^{n \times n}$ y M una matriz no singular. Sea la parametrización del sistema

$$\begin{aligned} Z &= \ddot{U} + \ddot{U}_g && \in R^{n \times 1}, \\ \theta &= [M^{-1}K \quad M^{-1}C] && \in R^{n \times 2n}, \\ \gamma &= [-U^T \quad -\dot{U}^T]^T && \in R^{2n \times 1}, \end{aligned}$$

donde θ es la matriz de parámetros reales y γ es el vector de estados conocido como regresor, tal que la salida real es

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

y sea $\hat{\theta}$ la matriz de parámetros estimados del sistema tal que la salida estimada está dada por

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

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

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

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

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

$$\varepsilon = \frac{Z - \hat{Z}}{h^2} \rightarrow 0 \quad \text{cuando} \quad t \rightarrow \infty. \quad (8)$$

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 llevaron a cabo dos simulaciones numéricas con los siguientes parámetros nominales de un edificio de tres pisos escala reducida, tomados de (Jiménez R. y Alvarez Icaza L., 2004).

$$M = \begin{bmatrix} 97,94 & 0 & 0 \\ 0 & 85,93 & 0 \\ 0 & 0 & 120,30 \end{bmatrix} [kg], \quad (9)$$

$$K = 10^6 * \begin{bmatrix} 1,34 & -0,78 & 0 \\ -0,78 & 1,45 & -0,67 \\ 0 & -0,67 & 0,67 \end{bmatrix} [N/m], \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 586,91 & -248,05 & 0 \\ -248,05 & 595,32 & -347,27 \\ 0 & -347,27 & 347,27 \end{bmatrix} [Ns/m]. \quad (11)$$

Para la primera simulación, se aplicó la componente de aceleración del registro de ruido ambiental al modelo del edificio. El ruido se obtuvo como resultado del proceso de sintetización del registro sísmico EJ3E23A.LA. Dada la hipótesis de considerar ruido ambiental como señal de excitación para la identificación de parámetros y tomando en cuenta que en la ciudad de México el ruido ambiental tiene una magnitud de $0,03 \text{ m/s}^2$, equivalente a 3 gales, se realizó el proceso de escalamiento a la señal original hasta alcanzar la magnitud antes mencionada.

En la Fig. 2 se presenta el acelerograma del registro sísmico EJ3E23A.LA, evento 03-1 ocurrido el 21 de enero del 2003, con duración de 240 segundos. Así como el acelerograma del ruido ambiental concerniente al resultado de sintetización.

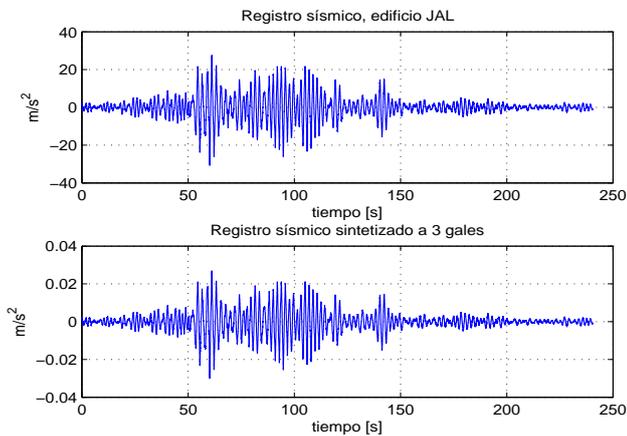


Figura 2. Acelerograma sísmico EJ3E23A.LA.

Al aplicar el registro de ruido ambiental al modelo y resolver las ecuaciones del algoritmo de estimación, se obtienen los parámetros estimados, así como la señal del error normalizado de estimación y las frecuencias modales de vibración. Las Figs. 3 y 4 muestran la evolución de los parámetros identificados, logrando convergencia en un tiempo menor a los 200 s.

Como una forma de comprobar que el algoritmo de estimación funciona satisfactoriamente, la Fig. 5 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. 6 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. En la tabla I se muestran más detalles de las frecuencias.

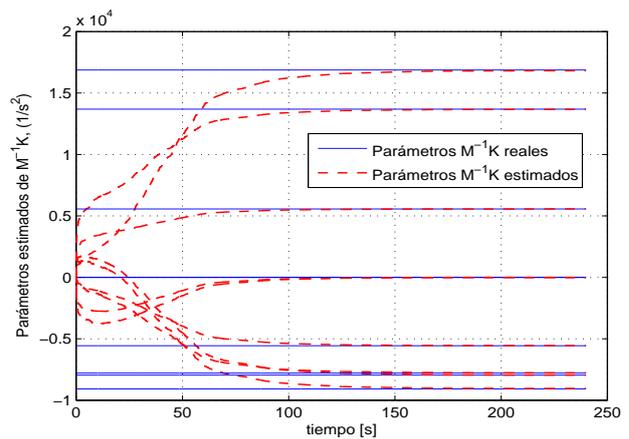


Figura 3. Estimación de los elementos de la matriz $M^{-1}K$.

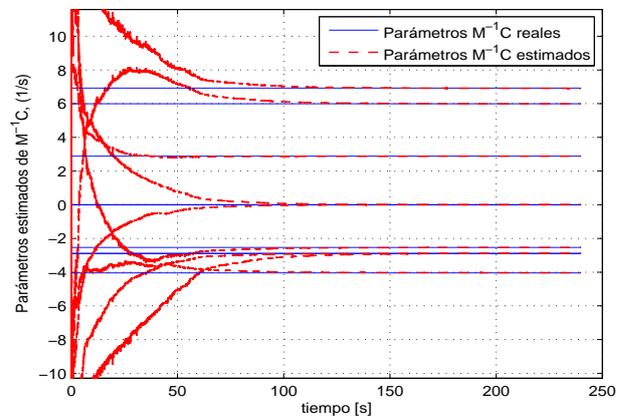


Figura 4. Estimación de los elementos de la matriz $M^{-1}C$.

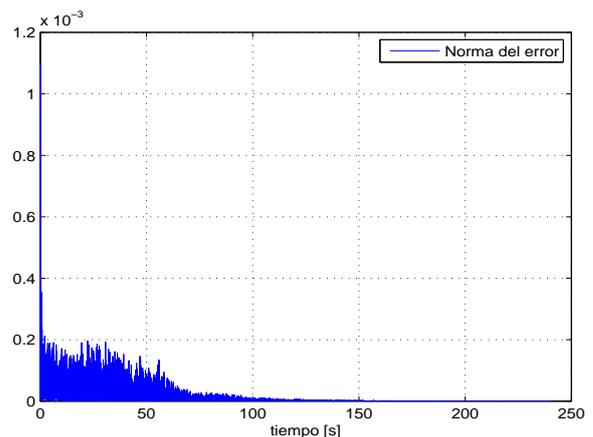


Figura 5. Norma del error de estimación: $\|\varepsilon\|_2$.

En la segunda simulación, se presentan los resultados del modelo de un edificio de tres pisos sometido a la acción de un ruido ambiental real obtenido en el lecho

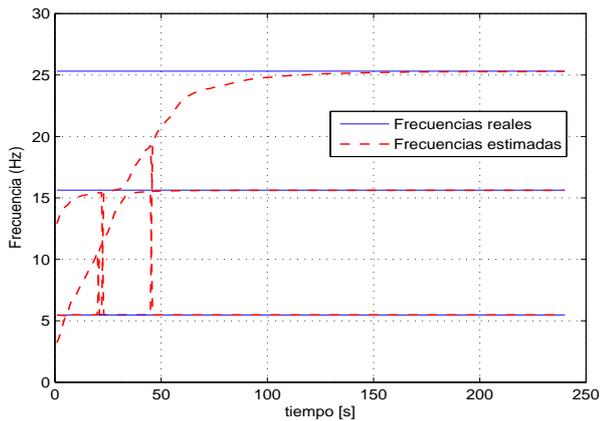


Figura 6. Estimación de las frecuencias modales de la estructura.

TABLA I
ESTIMACIÓN DE LAS FRECUENCIAS MODALES.

F. real Hz	F. estimada Hz	Error final (%)
25,3143	25,2799	0,1358
15,6281	15,6167	0,0729
5,4788	5,4735	0,0957

del lago de Texcoco. Estos datos consisten de un registro de aproximadamente 6,4 horas, recabados por un sensor de periodo fundamental de 30 s. Sin embargo, debido a que el registro expresa la velocidad de propagación, se implementó un algoritmo de diferenciación numérica con el cual se obtuvo el acelerograma correspondiente. Los resultados se aprecian en la figura 7.

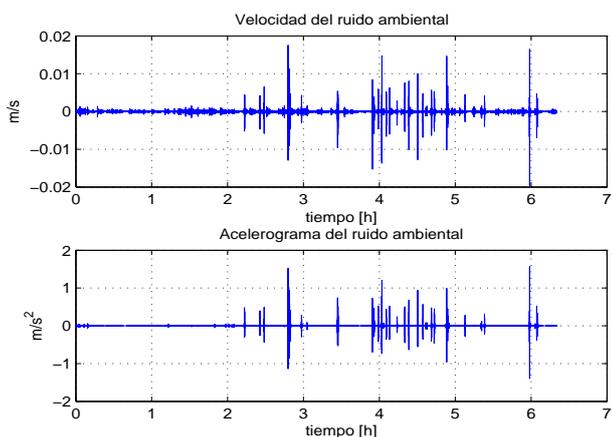


Figura 7. Acelerograma del ruido ambiental en el lago de Texcoco.

Al aplicar el registro de ruido ambiental al modelo y resolver las ecuaciones del algoritmo de estimación, se obtienen los parámetros estimados, así como la señal del error normalizado de estimación y las frecuencias modales de vibración. Las Figs. 8 y 9 muestran la evolución de

los parámetros identificados, logrando convergencia en un tiempo menor a los 6000 s. La Fig. 10 muestra la norma del error de estimación $\|\varepsilon\|_2$, donde al igual que en la Fig. 5 se observa como la norma de éste disminuye a medida que transcurre el tiempo, lo que indica que la salida estimada converge a la salida real del sistema. En la Fig. 11 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. La tabla II, muestra las frecuencias modales finales.

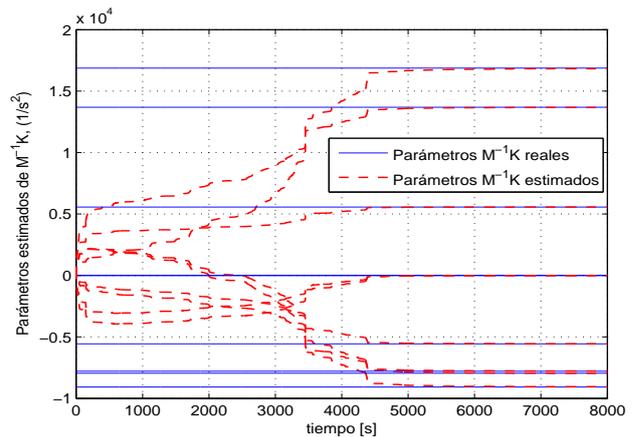


Figura 8. Estimación de los elementos de la matriz $M^{-1}K$.

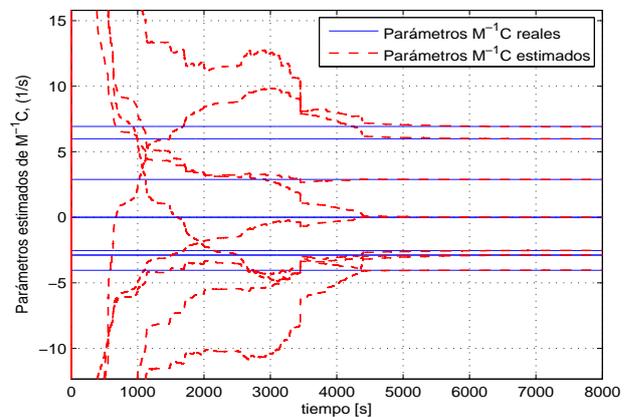


Figura 9. Estimación de los elementos de la matriz $M^{-1}C$.

Cabe mencionar que los resultados de simulación presentes fueron obtenidos con las condiciones de convergencia desfavorables, es decir, si se aumenta el factor de olvido o la condición inicial de la matriz de covarianza, el tiempo de convergencia paramétrica puede disminuir considerablemente.

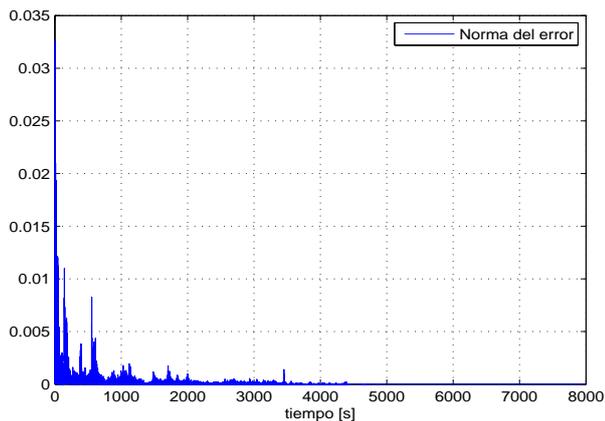


Figura 10. Norma del error de estimación: $\|\varepsilon\|_2$.

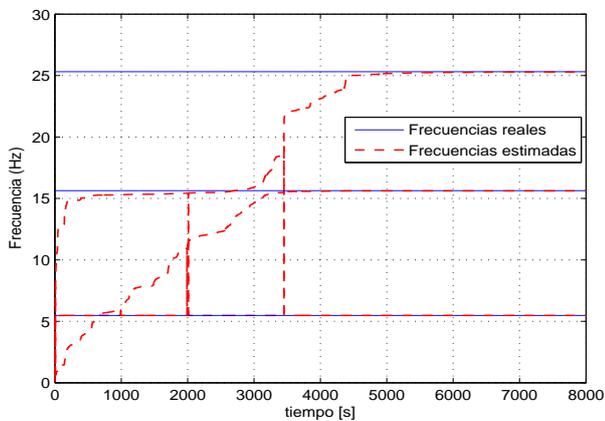


Figura 11. Estimación de las frecuencias modales de la estructura.

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 económico 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. Este hecho

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 implementar técnicas de control para la mitigación de vibraciones en edificios.

Por otra parte, para el caso de edificios con dos y tres GDL por piso, con excitación bidimensional y ortogonal se han obtenido resultados exitosos. Sin embargo, dada la cantidad de parámetros a estimar, es necesario modificar la condición inicial de la matriz de covarianza.

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 103640 y UNAM-PAPIIT IN105502.

REFERENCIAS

- Todorovska M.I. (2005). Building periods for use in earthquake resistant design code-earthquake response data compilation and analysis of time and amplitude variations. *Technical report, University of Southern 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 Adaptive 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.

TABLA II

ESTIMACIÓN DE LAS FRECUENCIAS MODALES.

F. real Hz	F. estimada Hz	Error final (%)
25,3143	25,2842	0,1185
15,6281	15,6167	0,0729
5,4788	5,4735	0,0967