

Observador adaptable aplicado a un modelo de un edificio a escala

J. Mauricio Angeles Cervantes[†] y Luis Alvarez-Icaza[‡]

Resumen— En este artículo se presentan los resultados de un algoritmo de observador adaptable probado con datos reales de un edificio a escala de 5 pisos, sujeto a excitación sísmica bidimensional, con sólo mediciones de aceleración. Esto a través de una mesa vibradora. El algoritmo permite recuperar los parámetros del sistema basados en un modelo matemático lineal que considera tres grados de libertad por piso: dos de traslación (x, y) y uno de rotación (θ), con tres mediciones de aceleración por piso.

Palabras clave: Identificación paramétrica, mínimos cuadrados, observador adaptable.

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la industria de la construcción de grandes edificios, ha visto en ellos una solución en las grandes ciudades para la alta demanda de vivienda u oficinas como resultado de la falta de espacios. No obstante, el hecho de construir estas grandes edificaciones lleva consigo un mayor riesgo, el cual aumenta considerablemente si la construcción está en una zona sísmica. Ejemplo de lo anterior, en el país aún están vigentes los efectos desastrosos del sismo en la ciudad de México en 1985, no obstante que otras ciudades del país también están en zonas sísmicas (Meli R., 1985), (Bazan. E y Meli, R, 1985).

Por lo anterior, para evitar daños a la estructura civil por efectos sísmicos, para los ingenieros civiles es de vital importancia el diseño sísmico en edificios. Para esto es necesario conocer la respuesta dinámica de aquéllos, para determinar si es seguro ante sismos que pudieran suceder en la zona. Para conocer esta respuesta, disponen de diversas técnicas, esto a través de mediciones de aceleración. Estas técnicas en su mayoría son realizadas fuera de línea (Chopra A.K., 1995), (Wang, Jer-Fu. and Lin, Chi-Chang. and Yen, Shih-Min, 2007), (Nagarajaiah, Satish. and Li, Zhiling., 2004).

Ante un riesgo latente de daño en la estructura por una excitación externa, se han hecho trabajos de aplicación de esquemas control en estructuras civiles. Estos esquemas consisten, básicamente, en la modificación de las propiedades mecánicas de la estructura para obtener la respuesta dinámica deseada ante excitaciones externas. La modificación de las propiedades mecánicas se basan en la variación de sus coeficientes de rigidez y/o de amortiguamiento.

Una forma de cambiar el factor de amortiguamiento es mediante la introducción de un dispositivo de disipación de

energía semiactivo; como lo es el amortiguador magneto-reológico, cuyas propiedades pueden ser modificadas en tiempo real, pero no puede aportar energía al sistema (Yang, G., 2001). Para que el amortiguador funcione adecuadamente, es necesario un algoritmo de control, y para que éste tenga un buen desempeño, se requiere conocer la dinámica de la estructura lo más real posible (Jiménez Fabián René Enrique, 2006).

La validez del modelo matemático lineal del edificio, es que éste debe trabajar dentro de la zona elástica y no en su zona plástica (Paz M., 1997). Sin embargo, en un edificio es complicado conocer con certeza el valor de sus parámetros por incertidumbres durante la construcción, modificaciones al diseño original, distribuciones erróneas del peso en cada uno de los pisos, etc., (Chopra A.K., 1995). Para determinar estos parámetros se usa identificación paramétrica, pero esta requiere de valores de velocidad y posición de cada uno de los pisos; mediciones que en un edificio real no se tienen disponibles. Estas mediciones, de acuerdo a la estructura del modelo, se consideran los estados del sistema; para conocerlos es necesario un esquema de observación de estados, pero este esquema requiere de los parámetros. Para resolver lo anterior se usa un esquema de observador adaptable, que con sólo mediciones de aceleración recupere los parámetros de la estructura civil, así como los estados de cada uno de sus pisos.

Un esquema como el que se menciona se desarrolla en (Angeles Cervantes, Juan Mauricio, 2010), con el cual es posible recuperar parámetros y estados del sistema. Además, se hace uso de una configuración en la identificación paramétrica que reduce sustancialmente el orden de la matriz de covariancia, al pasar aquél de ser proporcional con el cuadrado del número de pisos, a ser dependiente lineal de este último. Lo anterior permite que el algoritmo propuesto se pueda implementar en tiempo real. Algo muy importante, si como fin último se busca evitar daños en un edificio a través de un amortiguador magneto-reológico, y cuyo control requiere de un modelo matemático del edificio lo más certero posible.

Se han realizado diversos trabajos de identificación, pero en su mayoría son basados en un modelo de marco plano (una sola coordenada traslacional) (Jiménez R. y Alvarez Icaza L., 2008), (Rainieri, C. and Fabbrocino, G., 2010), (Li, Y. and Mau, S.T., 1991), (Dyke, S.J. and Spencer, B.F. and Sain, M.K. and Carlson, J.D., 1996), (Stewart, J.P. and Fenves, G.L., 1998), y en algunos casos es necesario realizarlos fuera de línea, pues requieren de los datos de los

[†] Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Investigador, mauricio.angeles@uacm.edu.mx, +52 (55) 58501901 ext. 14000.

[‡] Instituto de Ingeniería, UNAM, Investigador y corresponsal, alvar@pumas.iingen.unam.mx, +52 (55) 56233684

sensores que registran los movimientos del suelo y de cada uno de los pisos, de todo el evento sísmico.

En este trabajo se plantea la recuperación de parámetros para un modelo tridimensional (3D) del edificio: dos coordenadas traslacionales (x , y) y una coordenada de rotación (θ) perpendicular al plano formado por los dos primeros (tres grados de libertad - GDL - por piso), y la recuperación de los estados del sistema en tiempo real. Los resultados presentados son con datos reales de un modelo experimental (ME) a escala de un edificio, colocado sobre una mesa vibradora (Carrera, R., Alvarez-Icaza, L. y Angeles, M., 2009).

II. DESARROLLO

El modelo lineal de un edificio en 3D de n pisos¹ está dado por la Ec. (1), con tres GDL por cada uno de ellos.

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

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 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 desplazamientos, velocidades y aceleraciones relativas, respectivamente, formadas por las coordenadas X , Y y θ . \ddot{U}_g es el vector de aceleraciones que sufre el suelo, aplicada a cada uno de los pisos del edificio.

Si se premultiplica la Ec. (1) por M^{-1}

$$\ddot{U} + M^{-1}C\dot{U} + M^{-1}KU = -\ddot{U}_g. \quad (2)$$

Sin embargo, si se consideran desconocidos los coeficientes de amortiguamiento, rigidez y masa de cada uno de los pisos, entonces la Ec. (2) se expresa como

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

donde las matrices $\widehat{M^{-1}C}$ y $\widehat{M^{-1}K} \in \mathcal{R}^{3n \times 3n}$ representan los 18 n^2 parámetros desconocidos del sistema.

Si se define al vector de estados Ψ , al vector de entradas Ω , y al vector de salidas Ξ como

$$\begin{aligned} \Psi &= \begin{bmatrix} U \\ \dot{U} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{6n \times 1}, \\ \Omega &= \begin{bmatrix} -\ddot{U}_g \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{3n \times 1}, \\ \Xi &= \begin{bmatrix} \ddot{U} + \ddot{U}_g \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{3n \times 1}, \end{aligned}$$

donde Ψ está formado por los desplazamientos y velocidades relativos de cada uno de los GDL, Ω es la excitación sísmica, y Ξ es la aceleración absoluta de cada uno de los GDL.

Entonces, la Ec. (1) en variables de estado queda

$$\dot{\Psi} = \begin{bmatrix} O & I \\ -\widehat{M^{-1}K} & -\widehat{M^{-1}C} \end{bmatrix} \Psi + \begin{bmatrix} O \\ I \end{bmatrix} \Omega,$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} -\widehat{M^{-1}K} & -\widehat{M^{-1}C} \end{bmatrix} \Psi,$$

¹El modelo presentado se obtiene si se cumple la condición de diafragma de piso rígido (Meli R., 1985).

reescribiendo lo anterior

$$\begin{aligned} \dot{\Psi} &= \hat{A} \Psi + B \Omega, \\ \Xi &= \hat{E} \Psi. \end{aligned}$$

De acuerdo a (Angeles Cervantes, Juan Mauricio, 2010) es posible recuperar los parámetros y estados del sistema a través de un observador adaptable el cual se define como sigue.

Sea la parametrización del sistema (1)

$$\begin{aligned} Z &= \ddot{U} + \ddot{U}_g && \in \mathcal{R}^{3n \times 1}, \\ \Phi &= \begin{bmatrix} -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} && \in \mathcal{R}^{3n \times 6n}, \\ \Upsilon &= \begin{bmatrix} U^T & \dot{U}^T \end{bmatrix}^T && \in \mathcal{R}^{6n \times 1}, \end{aligned}$$

donde Φ es la matriz de parámetros reales y Υ es un vector regresor formado por velocidades y desplazamientos relativos de cada uno de los GDL, tal que Z representa los valores reales de la salida del sistema.

$$Z = \Phi \Upsilon.$$

Sea \hat{Z} el valor estimado de la salida del sistema, dado por el producto de la matriz de parámetros estimados $\hat{\Phi}$ y el vector regresor observado $\hat{\Upsilon}$, es decir,

$$\hat{Z} = \hat{\Phi} \hat{\Upsilon},$$

donde

$$\begin{aligned} \hat{Z} &= \ddot{\hat{U}} + \ddot{\hat{U}}_g && \in \mathcal{R}^{3n \times 1}, \\ \hat{\Phi} &= \begin{bmatrix} -\widehat{M^{-1}K} & -\widehat{M^{-1}C} \end{bmatrix} && \in \mathcal{R}^{3n \times 6n}, \\ \hat{\Upsilon} &= \begin{bmatrix} \hat{U}^T & \hat{\dot{U}}^T \end{bmatrix}^T && \in \mathcal{R}^{6n \times 1}, \end{aligned}$$

y \hat{U} , $\hat{\dot{U}}$, y $\ddot{\hat{U}}$ son los estimados de los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración relativas, respectivamente. $\ddot{\hat{U}}_g$ es el vector de aceleración del suelo aplicado a cada uno de los pisos. $\widehat{M^{-1}K}$ y $\widehat{M^{-1}C}$ son las matrices de parámetros identificados.

Sea la señal de error paramétrico normalizado² ε , con $h^2 = 1 + \hat{\Upsilon}^T \hat{\Upsilon} \in \mathcal{R}$ que satisface $\hat{\Upsilon}/h \in \mathcal{L}_\infty$

$$\varepsilon = \frac{Z - \hat{Z}}{h^2}. \quad (4)$$

Entonces, sea el observador adaptable, Ecs. (5)-(8),

$$\dot{\hat{\Psi}} = \hat{A} \hat{\Psi} + B \Omega + L \begin{bmatrix} \Xi - \hat{\Xi} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\hat{\Xi} = \hat{E} \hat{\Psi}, \quad (6)$$

$$\dot{P} = \delta P - P \frac{\hat{\Upsilon} \hat{\Upsilon}^T}{h^2} P, \quad (7)$$

$$\dot{\hat{\Phi}}^T = P \hat{\Upsilon} \varepsilon^T, \quad (8)$$

²La señal de error ε no necesariamente está dividida por h^2 , en cuyo caso la señal de error no está normalizada.

con la matriz estimada de estados $\hat{A} \in \mathcal{R}^{6n \times 6n}$, la matriz estimada de salida $\hat{E} \in \mathcal{R}^{3n \times 6n}$, la matriz de entrada $B \in \mathcal{R}^{6n \times 3n}$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} O & I \\ -\widehat{M^{-1}K} & -\widehat{M^{-1}C} \end{bmatrix},$$

$$\hat{E} = \begin{bmatrix} -\widehat{M^{-1}K} & -\widehat{M^{-1}C} \end{bmatrix},$$

$$B = [O \ I]^T.$$

y con una matriz de covariancia $P = P^T > 0 \in \mathcal{R}^{6n \times 6n}$, $P(0) > 0$; un factor de olvido $\delta \geq 0 \in \mathcal{R}$, un vector de estado observado $\hat{\Psi} = [\hat{U}^T \ \hat{U}^T]^T \in \mathcal{R}^{6n \times 1}$, un vector de entrada $\Omega = [-\ddot{U}_g] \in \mathcal{R}^{3n \times 1}$, un vector de salida estimada $\hat{\Xi} = [\ddot{U} + \ddot{U}_g] \in \mathcal{R}^{3n \times 1}$ y $L \in \mathcal{R}^{6n \times 3n}$ una matriz de ganancia del observador.

Si la matriz L cumple la siguiente condición

$$-2LL^T + LT + T^T L^T \leq 0, \quad (9)$$

donde $T = [0 \ I] \in \mathcal{R}^{3n \times 6n}$, entonces el observador adaptable, Ecs. (5)-(8), garantiza que el error de observación de estados, definido como $\tilde{\Psi} = \Psi - \hat{\Psi}$, y el error de estimación paramétrico ε , Ec. (4), satisfacen

$$\tilde{\Psi} \rightarrow 0, \text{ y } \varepsilon \rightarrow 0 \text{ cuando } t \rightarrow \infty.$$

Este observador permite, a través de mediciones de aceleración absoluta, tres en cada piso y dos en el suelo, conocer los parámetros y los estados del sistema: velocidades y desplazamientos relativos, cuando el edificio está sujeto a una excitación sísmica.

La demostración de la validez de la Ec. (9) se encuentra con detalle en (Angeles Cervantes, Juan Mauricio, 2010).

III. RESULTADOS CON DATOS DE LABORATORIO

Las pruebas se realizaron sobre un ME de un edificio de cinco pisos, cuatro marcos y cuatro columnas. Se construyó con asimetría en rigidez y asimetría en masa: la primera está relacionada con la posición del centro de torsión en el piso, C_T , y la segunda con la posición del centro de masa, G_i con $i = 1, 2, \dots, 5$, Fig. 1.

Para lograr asimetría en rigidez, el ME tiene tres columnas de aluminio y una de latón, ésta 1,4 veces más rígida que aquella, logrando que el C_T esté más cerca de los elementos más rígidos. Para la asimetría en masa, se concentra ésta en diversos puntos de cada piso. En la Fig. 1 se muestra un esquema del ME, y en la Fig. 2 se observa cómo es éste colocado sobre la mesa vibradora.

El hecho de que un edificio rote cuando está sujeto a excitación sísmica bidimensional, es porque el centro de torsión y el centro de masa de cada piso no coinciden. La fuerza del sismo aplicada a cada piso es sobre el centro de masa, y aquél rota sobre el centro de torsión. Entre mayor sea esta distancia, mayor será el brazo de palanca para que la fuerza haga girar al piso (Chopra A.K., 1995).

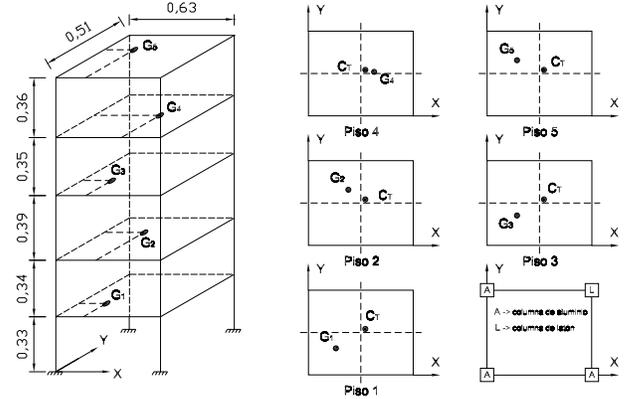


Figura 1. Esquema de edificio experimental, dimensiones en [m]



Figura 2. Modelo experimental de 5 pisos sobre la mesa vibradora

De acuerdo a la Fig. 1, el ME tiene en todos los pisos esta diferencia, y por lo tanto tendrán aceleración angular por torsión provocada por la fuerza sísmica. Lo cual es deseable si se desea recuperar las componentes torsionales del modelo matemático en 3D.

La instrumentación del ME es: 17 acelerómetros, tres en cada piso y dos en el suelo; 12 LVDT³, seis en cada eje, x y y , uno por cada piso y uno en el suelo. Para resolver el observador adaptable no son necesarias las señales de desplazamiento, pero se tienen como señales testigo para comparar con las obtenidas a través del observador.

Al ME se le aplicó el sismo ocurrido en la ciudad de México en 1985. Pero fue necesaria aplicar una escala en tiempo y en amplitud. La escala en tiempo obedece a que el acelerograma real tiene una duración de 180s y una frecuencia fundamental de 0,5Hz, pero esta frecuencia está por debajo de las frecuencias fundamentales del ME,

³LVDT - Linear Variable Differential Transformer, sensor de desplazamiento

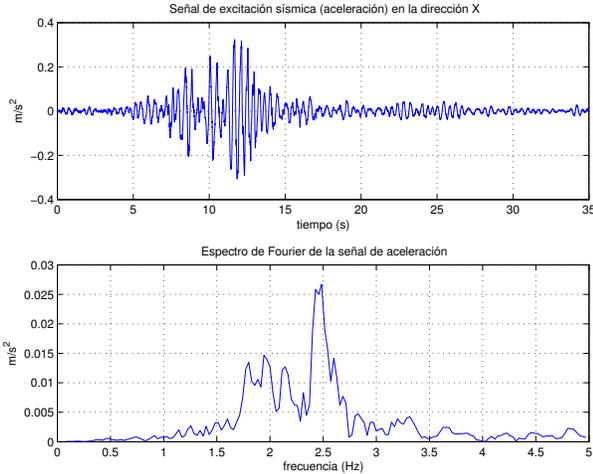


Figura 3. Señal sísmica en la dirección X

por lo que no excitaría suficientemente al sistema para lograr un desempeño adecuado del observador adaptable, Ecs. (5)-(8). La escala en tiempo es 5 veces menor, tal que la duración del sismo es de 35s y una frecuencia fundamental de 2,5Hz, más cercana a las frecuencias del ME. La escala en magnitud obedece al hecho que la mesa vibradora tiene restricciones mecánicas y eléctricas para reproducir señales de amplitud grandes, esta escala reduce la amplitud cuatro veces, aproximadamente, (Carrera, R., Alvarez-Icaza, L. y Angeles, M, 2009).

Las pruebas fueron con un tiempo de muestreo de 2ms. A las señales de los acelerómetros se les aplicó un filtro digital pasabajos de 2º orden, cuya frecuencia de corte es de 20Hz; esta frecuencia es porque las señales de excitación y frecuencias fundamentales del ME son menores a 10Hz. No obstante que se aplicó este filtro, aun se introdujo señales ruidosas que provocaron un desempeño no adecuado del observador adaptable.

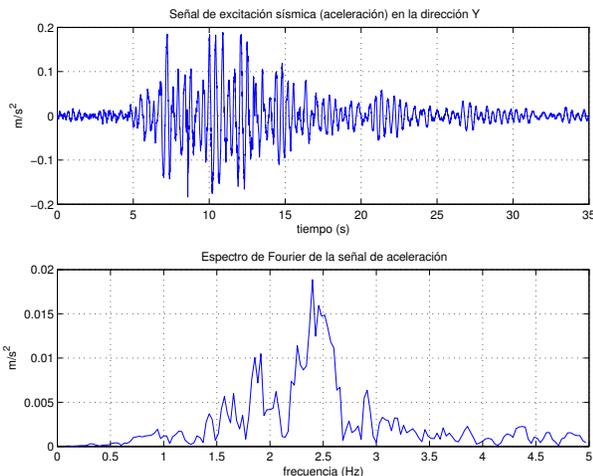


Figura 4. Señal sísmica en la dirección Y

Las señales de excitación se observan en las Figs. 3 y 4. Estas señales son ortogonales entre sí. Los resultados del

observador adaptable aplicado al ME son los siguientes.

La Fig. 5 muestra el comportamiento de los desplazamientos en el segundo piso para cada GDL. Se observa el desplazamiento real, que se mide a través de un LVDT, el desplazamiento obtenido por un observador convencional, y el desplazamiento como resultado del observador adaptable. Se aprecia claramente que las estimaciones para estos estados no son buenas, divergen. Esto en parte es debido a las señales de ruido de baja frecuencia de los sensores mencionadas líneas anteriores, y que dicho error se va acumulando en cada tiempo de muestreo.

La Fig. 6 muestra las velocidades de los tres GDL del segundo piso. Éstas se obtuvieron mediante dos esquemas: un observador adaptable, en el cual se desconocen parámetros y estados, y un observador convencional en el cual se considera conocidos los parámetros que en este caso son los parámetros calculados del ME. Nótese que ambas señales divergen cuando la excitación sísmica disminuye. El valor teórico que se esperaría de la velocidad al finalizar la excitación es cero, sin embargo, no es así en el resultado del observador adaptable.

La causa del desfaseamiento es la acumulación del error debido a las señales de ruido de los sensores, que en el caso de la velocidad no se aprecia en forma drástica, pero que, en el caso de los desplazamientos es muy notorio pues se tiene una componente constante que al integrarse, ésta cambia a una componente cuadrática, Fig 5.

Respecto a las aceleraciones absolutas de salida del observador adaptable, éstas son casi iguales a las aceleraciones absolutas medidas, por lo que se considera que los resultados son satisfactorios, Fig. 7, con lo que se conoce un modelo matemático que recupera la dinámica real de la salida. El error de salida es pequeño tal que casi no se aprecia la diferencia entre las señales obtenidas con el observador adaptable y las señales reales. Es importante decir que el observador adaptable está diseñado para que reduzca el error en la salida, no en los estados, como lo muestra la Ec. (4). Debido a esto es que se tienen errores significativos en los estados, mas no en la salida, que de acuerdo a la parametrización del modelo, es la aceleración absoluta que sufre cada GDL. Como lo muestra la norma de las señales de error, Fig. 8.

Aunado a lo anterior, el observador adaptable es suficientemente robusto para soportar errores de medición debido al ruido, pues lo que busca es que el error de salida sea nulo. Sin embargo, estas señales ruidosas sí afectan a la observación de estados, como lo muestran las Figs. 5 y 6.

El observador adaptable es tal que logra que el error de salida sea nulo en tiempo infinito, sin embargo, para lograrlo los parámetros, que de acuerdo a la estructura tridiagonal de las matrices del modelo matemático, muchos elementos son nulos, en el observador adaptable éstos toman valores no nulos provocando un ajuste en todos los demás elementos de la matriz.

Un ejemplo de lo anterior se muestra en la Fig. 9 que es el comportamiento en el tiempo del elemento (5,5) de la

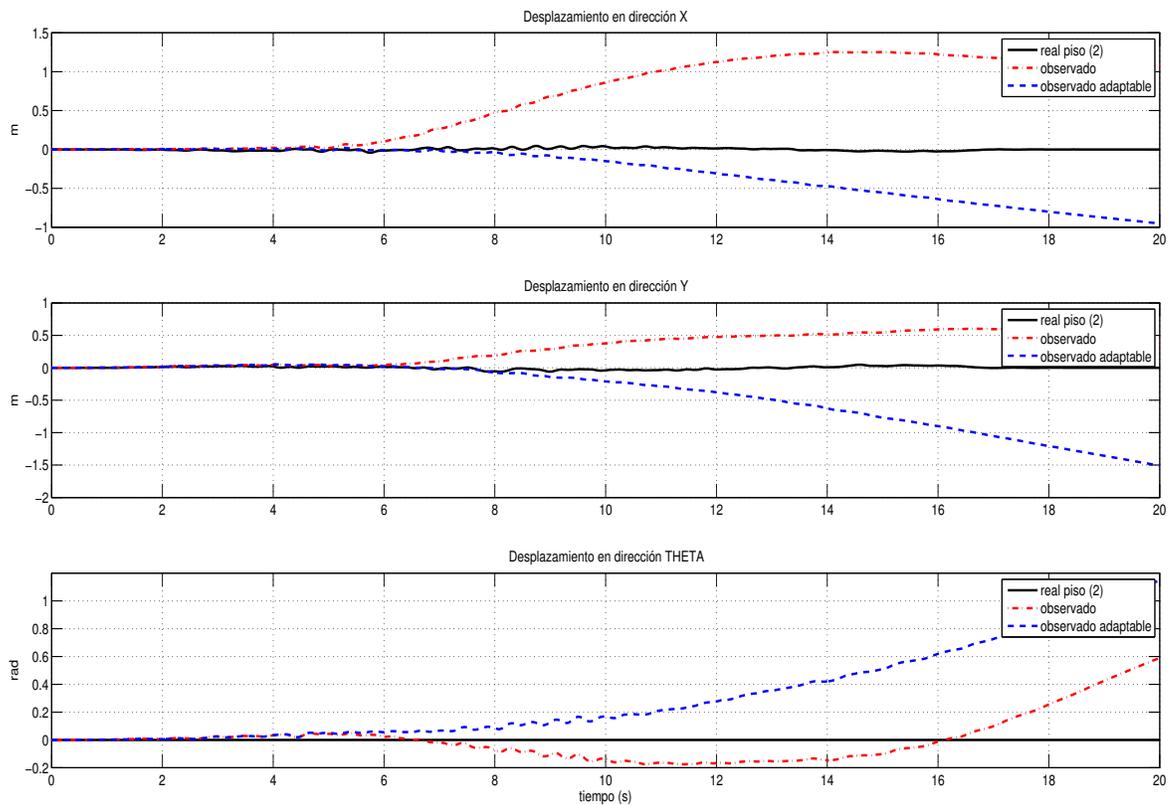


Figura 5. Desplazamiento: real, observado, observado adaptable

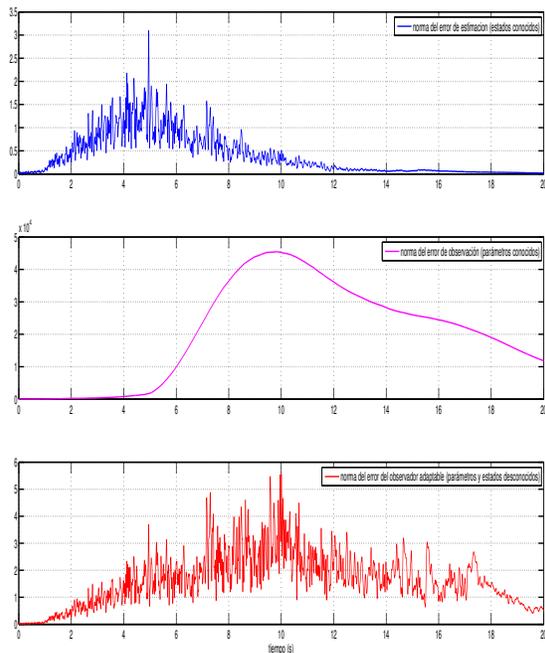


Figura 8. Señales de norma de errores

teórico calculado de acuerdo a la geometría y materiales usados en el ME. Sin embargo, los valores del parámetro son significativamente diferentes, tanto para el observador adaptable como para un identificador paramétrico.

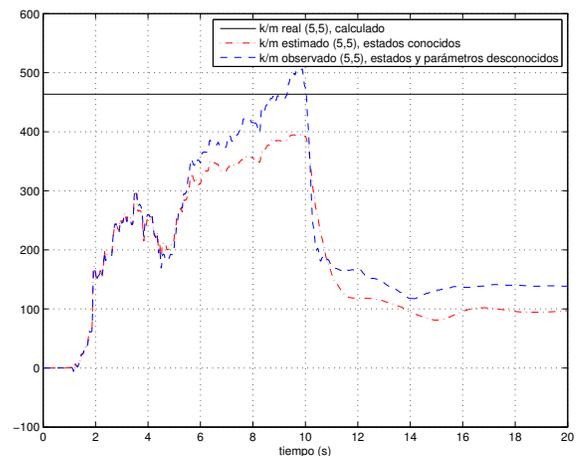


Figura 9. Elemento (5,5) de la matriz $M^{-1} K$

matriz $M^{-1}K$, nótese que la línea continua indica el valor

La Fig. 10 muestra el comportamiento del elemento (2,7) de la matriz $M^{-1}C$. De acuerdo a la estructura tridiagonal de la matriz, el valor del parámetro es cero, mas, el valor obtenido a través del observador adaptable es diferente de

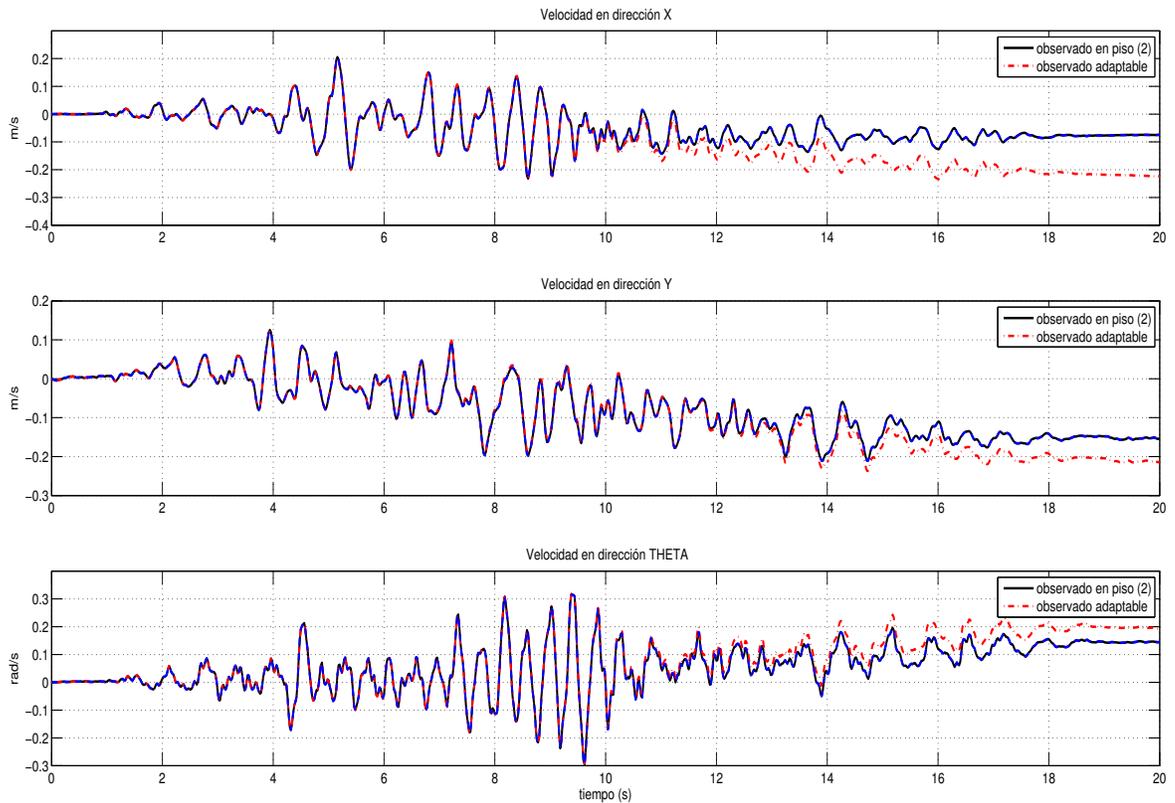


Figura 6. Velocidad: observado, observado adaptable

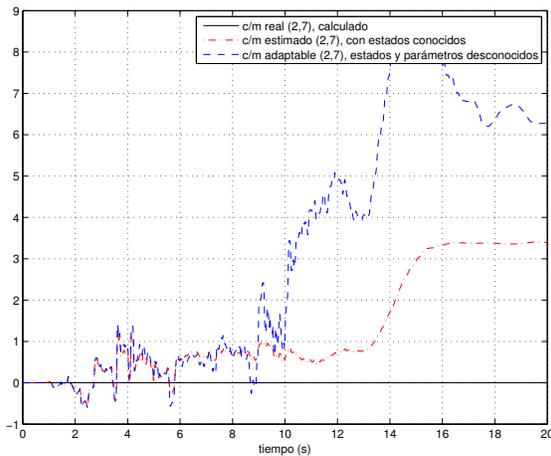


Figura 10. Elemento (2,7) de la matriz $M^{-1} C$

cero. En este caso, el hecho de que la estructura del modelo matemático indique que el parámetro es nulo, implica que no existe relación entre los elementos estructurales correspondientes a la dirección x con los de la dirección y , situación no necesariamente cierta en un edificio real.

IV. CONCLUSIONES

Se han presentado los resultados experimentales de un algoritmo de observador adaptable que permite recuperar

el modelo matemático, en 3D, de un edificio sujeto a excitación sísmica bidimensional, con sólo mediciones de aceleración. El observador adaptable está diseñado para hacer que el error de la salida estimada con respecto a la salida real sea cero, como lo muestra la Fig. 8. Este hecho permite conocer un grupo de parámetros tales que el modelo matemático recupera la dinámica real de la estructura, aun que aquéllos no sean los verdaderos, lo que implica que las matrices no sean tridiagonales, como lo establece el modelo teórico.

Se mostraron los resultados obtenidos para un piso, de cinco posibles, y sólo dos ejemplos de parámetros, de 480 posibles. Sin embargo, el mismo comportamiento sucede con los demás pisos, así como con los parámetros. Para lograr un buen o deficiente desempeño del algoritmo se cambian las condiciones iniciales de las Ecs. (7)-(8) y el valor de la matriz L de la Ec. (5).

Es importante mencionar que la estabilización del modelo se da en poco menos de 20s, lo cual permite aplicar este algoritmo en tiempo real cuando suceda un sismo. Si el objetivo es aplicar algoritmos de control a dispositivos magneto-reológicos, los cuales precisan de la dinámica real del edificio, este observador adaptable es promisorio.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado para la realización de este trabajo a la Secretaría de Ciencia, Tecnología

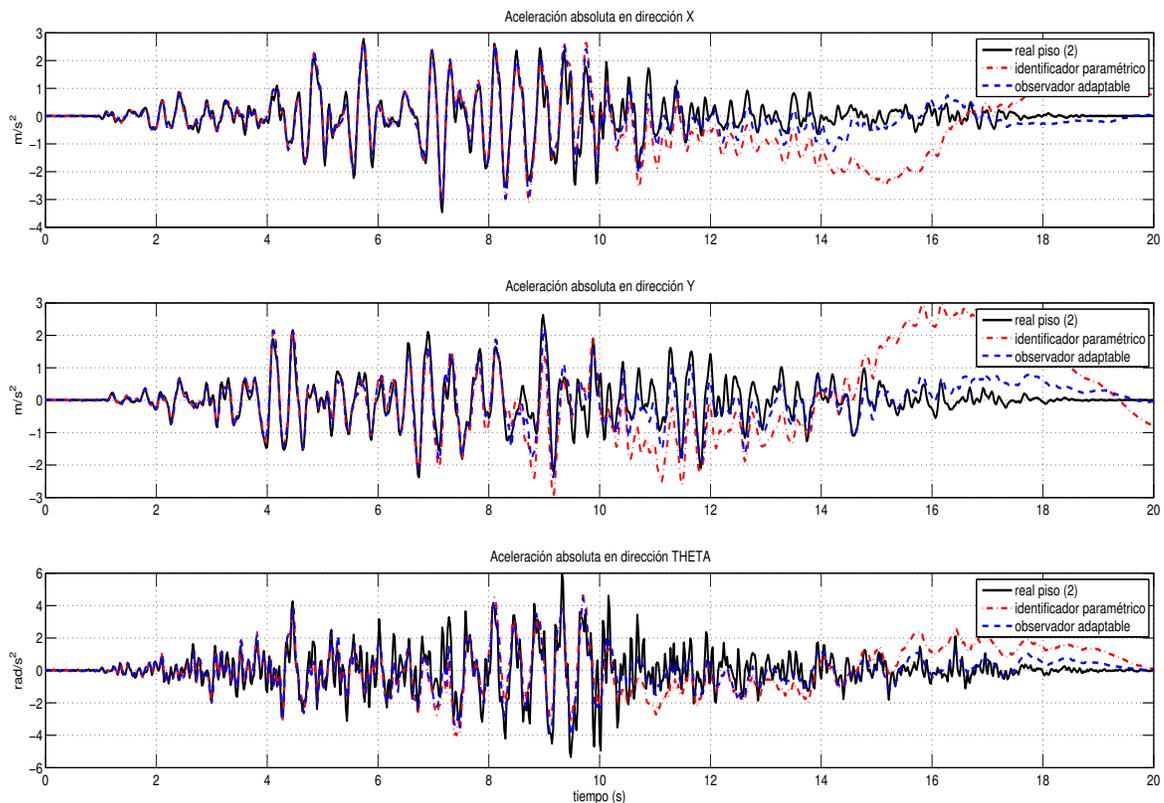


Figura 7. Aceleraciones absolutas

e Innovación del DF, a través del proyecto PIUTE10-188; de la misma forma agradecen a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, a través del proyecto UACM/OAG/ADI/018/2011; así como al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo tecnológico y humano.

REFERENCIAS

- Chopra, A.K.(1995). Dynamics of structures: theory and applications to Earthquake Engineering. *Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ*.
- Bazan, E y Meli, R (1985). Manual de diseño sísmico de edificios. *Limusa*.
- Paz, M.(1997). Structural Dynamics: theory and computation. *Chapman & Hall, International Thomson Publishing*
- Jiménez Fabián, René Enrique (2006). *Control semiactivo de estructuras civiles usando amortiguadores magneto-reológicos*. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México, D.F.
- Angeles Cervantes, Juan Mauricio (2010). *Identificación paramétrica tridimensional de un edificio*. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México, D.F.
- 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.
- Meli, R. (1985). *Diseño estructural*. Limusa. México.
- Yang, G. (2001). *Large-scale magnetorheological fluid damper for mitigation: modeling, testing and control*. Department of Civil Engineering and Geological Sciences, Notre Dame. Indiana. USA.
- Dyke, S.J. and Spencer, B.F. and Sain, M.K. and Carlson, J.D. (1996). Seismic response reduction using magnetorheological dampers. *Proceedings of the 1996 IFAC World Congress, San Francisco*, 145–150.
- Carrera, R., Alvarez-Icaza, L. y Angeles, M (2009). Plataforma experimental para control en modelos de estructuras civiles. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático, Zacatecas, Zac, México*
- Li, Y. and Mau, S.T. (1991). A case of study of MIMO system identification applied to building seismic records. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 20, 1045–1064.
- Safat, E. (1995). Detection and identification of soil-structure interaction in buildings from vibration recordings. *ASCE Journal of Structural Engineering* 121, 899–906.
- Stewart, J.P. and Fenves, G.L. (1998). System identification for evaluating soil-structure interaction effects in buildings from strong motion recordings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 27, 869–885.
- Nagarajaiah, Satish. and Li, Zhiling. (2004). Time segmented least squares identification of base isolated buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, 577–586.
- Rainieri, C. and Fabbrocino, G. (2010). Automated output-only dynamic identification of civil engineering structures. *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, 678–695.
- Wang, Jer-Fu. and Lin, Chi-Chang. and Yen, Shih-Min (2007). A story damage index os seismically-excited buildings based on modal frequency and mode shape. *Engineering Structures* 29, 2143–2157.