

Identificación paramétrica experimental de un edificio a escala en un plano [★]

Cecilia Cornejo ^{*} Luis Alvarez-Icaza ^{**} Ruben Garrido ^{***}

^{*} Universidad Autónoma de la Ciudad de México
(e-mail: cecilia.cornejo@uacm.edu.mx)

^{**} Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
(e-mail: alvar@iingen.unam.mx)

^{***} Centro de Investigación y Estudios Avanzados
(e-mail: garrido@ctrl.cinvestav.mx)

Resumen: Se presenta la identificación paramétrica con el algoritmo de mínimos cuadrados recursivos implantado en tiempo real de un edificio a escala de cinco pisos con el objetivo de determinar sus coeficientes de amortiguamiento y rigidez. Se dispone de mediciones de desplazamiento y aceleración de cada uno de los pisos y de la base. La aceleración de excitación en un solo plano se genera a través de una mesa vibradora.

Palabras clave: Identificación paramétrica, estructuras civiles, salud estructural.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se edifica una estructura civil, se conocen los materiales de construcción y el diseño estructural, pero no hay precisión en los valores que tienen en realidad sus parámetros dinámicos, tales como los coeficientes de amortiguamiento o rigidez. Para determinarlos se puede recurrir a la aplicación de algoritmos de identificación paramétrica. Distintas estrategias han sido presentadas en este sentido (Jiménez y Alvarez-Icaza, 2007; Angeles-Cervantes y Alvarez-Icaza, 2011; Garrido-Moctezuma y Sánchez, 2012).

Una vez que se cuenta con los parámetros y el modelo matemático de la estructura, se determinan sus frecuencias naturales amortiguadas y a partir de estas se puede conocer la respuesta de la estructura ante fuerzas externas. Un caso de interés por las repercusiones sociales y económicas negativas que presenta, es la reacción de una construcción ante un sismo. De mayor interés aún, es la necesidad de evitar el colapso o los daños estructurales severos, como el desplazamiento de los entrepisos. Las contribuciones en este sentido son amplias y variadas, van desde el diseño estructural y el uso de materiales poco rígidos que ofrecen más flexibilidad a la estructura y como consecuencia menor repercusión ante un terremoto, hasta un enfoque más contemporáneo donde se usa el control semiactivo a través de actuadores tales como amortiguadores magneto-reológicos y electro-reológicos (Dyke y Jansen, 2000; Cornejo y Alvarez-Icaza, 2005), el control activo con masas móviles o el control híbrido, que combina los controles activo y semiactivo (Spencer-Jr., 1999).

El caso que ocupa este artículo, es la identificación paramétrica en línea bajo el esquema del algoritmo mínimos cuadrados recursivos de un edificio a escala de cinco pisos.

Este prototipo está instalado sobre una mesa vibradora que ejerce aceleración en un solo plano vertical. La instrumentación consta de un conjunto de acelerómetros y transformadores de desplazamiento lineal, instalados en cada piso y en la mesa vibradora, por lo que se dispone de señales de desplazamiento y aceleración en cada uno de los pisos y en la base (Carrera, Alvarez-Icaza, y Angeles, 2012).

El modelo matemático usado corresponde a un oscilador armónico amortiguado de cinco grados de libertad, cuyo estado consta del desplazamiento y a la velocidad de cada uno de los pisos y cuya entrada es la aceleración de la base de la mesa vibradora aplicada a todos los pisos.

En el algoritmo de identificación, el vector de parámetros está formado por los coeficientes de rigidez entre masa y los coeficientes de amortiguamiento entre masa. El vector regresor se forma entonces con los desplazamientos y velocidades relativos entre cada par de pisos. La salida es la aceleración total, compuesta por la suma de la aceleración de la base de la mesa y la de cada piso. Esta parametrización hace evidente la necesidad de contar con la medición del desplazamiento y la velocidad de cada piso (Ioannou y Sun, 1996; Isermann, 2011). La primera se obtiene de los sensores mientras la segunda se genera a partir de un filtro (Hugues y C., 2014).

La organización del trabajo es la siguiente. En la sección 2 se presenta el modelo matemático del sistema, mientras que en la sección 3 se discuten los pormenores de la identificación paramétrica. La sección 4 describe las características, condiciones y resultados de la etapa experimental y, finalmente, la sección 5 contiene las conclusiones y el trabajo futuro.

^{*} La primer autora agradece las facilidades otorgadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM durante su estancia sabática.

2. MODELADO MATEMÁTICO

2.1 Prototipo de cinco plantas

El prototipo experimental a escala es una estructura de metal simétrica de cinco plantas que se ilustra en la Figura 1. Está fijada en la base a una mesa vibradora que ejerce aceleración en un plano. Adicionalmente, entre la base y el primer piso está instalado un amortiguador magneto-reológico. Cada piso consta de una placa de aluminio de $0.60\text{ m} \times 0.60\text{ m}$ con una masa de 10 Kg . Las columnas son de perfil cuadrado de $6 \times 10^{-3}\text{ m}$ de lado, tres son de aluminio y una de latón. Los pisos son equidistantes en altura con una separación de 0.35 m .

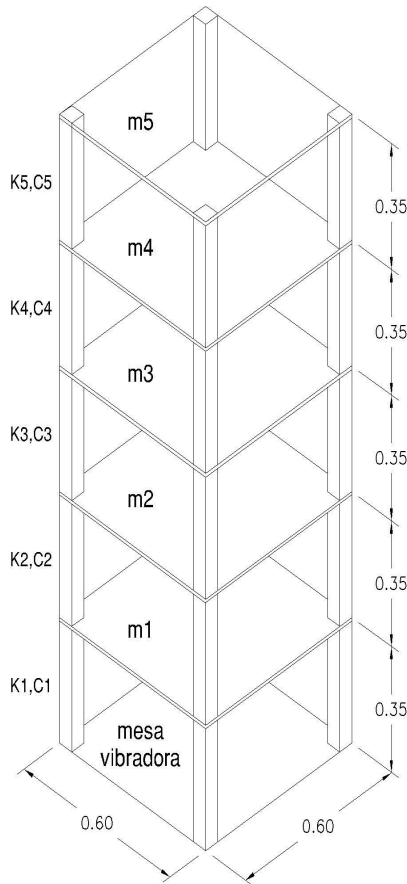


Figura 1. Edificio a escala de cinco pisos

2.2 Ecuación dinámica

La fuerza de excitación del edificio se genera por la aceleración proveniente de la mesa vibradora. La aceleración total, como se mencionó, corresponde con la suma de la aceleración de la base más la aceleración de cada piso respecto a la base. Esto es:

$$F_T(t) = M\ddot{x}(t)_g + M\ddot{x}(t)$$

donde:

M : matriz de masa

$\ddot{x}(t)_g$: vector de aceleración de la mesa vibradora, aplicada a cada piso,

$\ddot{x}(t)$: vector aceleraciones de los pisos respecto a la base.

Dos fuerzas adicionales pueden apreciarse en este sistema. La que corresponde a la aportación de la rigidez

$$F_K(t) = Kx(t)$$

con:

K : matriz de coeficientes de rigidez y

$x(t)$: vector desplazamientos de los pisos respecto a la base.

y la aportación del amortiguamiento

$$F_c(t) = C\dot{x}(t)$$

con:

C : matriz de coeficientes de amortiguamiento y

$\dot{x}(t)$: vector velocidades de los pisos respecto a la base.

Finalmente el principio de D'Alembert establece que la suma de fuerzas sobre un cuerpo es igual a cero. Esto es:

$$M\ddot{x}(t) + M\ddot{x}_g + C\dot{x}(t) + Kx(t) = 0$$

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

Las matrices M , C y K están conformadas de la siguiente manera:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_5 & -c_5 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix}.$$

El subíndice de cada parámetro está asociado al piso correspondiente del edificio.

Una escritura alternativa del modelo (1) es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \\ \vdots \\ \ddot{x}_5 + \ddot{x}_g \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_1 & x_1 - x_2 & 0 & \cdots & 0 & \dot{x}_1 & \dot{x}_1 - \dot{x}_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x_5 - x_4 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dot{x}_5 - \dot{x}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{k_1}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{k_3}{m_2} & \frac{k_3}{m_3} & \frac{k_4}{m_3} & \frac{k_4}{m_4} & \frac{k_5}{m_4} & \frac{k_5}{m_5} \\ \frac{c_1}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_2} & \frac{c_3}{m_2} & \frac{c_3}{m_3} & \frac{c_4}{m_3} & \frac{c_4}{m_4} & \frac{c_5}{m_4} & \frac{c_5}{m_5} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA

Previo al algoritmo de identificación paramétrica, en la subsección 3.1 se introducen los conceptos básicos de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento, así como las ecuaciones para determinarlos analíticamente. Para ello se hace una breve descripción de las particularidades del prototipo experimental. En la subsección 3.2 se describe el algoritmo de identificación paramétrica.

3.1 Cálculo analítico de coeficientes

- **Coefficiente de rigidez:** mide la capacidad de la materia para conservar su forma a pesar de recibir un esfuerzo cortante. El coeficiente de rigidez para una estructura civil sujeta a un esfuerzo cortante se calcula como (Chopra, 2012).

$$k_{total} = \sum_{i=1}^4 k_i = \sum_{i=1}^4 \frac{12E_i I_i}{L_i^3}$$

Donde k : coeficiente de rigidez, E : módulo de elasticidad de Young, I : momento de inercia, L : longitud de la barra, i : número de barras que componen la estructura.

- **Coefficiente de amortiguamiento** mide la disipación de energía de un material, típicamente representa el 10% del coeficiente de rigidez.

Para el cálculo del coeficiente de rigidez de cada piso se utilizan los datos de la Tabla 1.

Tabla 1. Datos del edificio

Datos	Valor
l	$6 \times 10^3 m$
L	$0.35m$
$E_{aluminio}$	$70 \times 10^9 Pa$
E_{laton}	$110 \times 10^9 Pa$

Primero se calcula la inercia de las barras, $I = \frac{l^4}{12}$, $I = 1.08 \times 10^{-10}$. A continuación se calcula el coeficiente de rigidez para la barra de aluminio y la de latón, después la rigidez de cada piso y por último el coeficiente de amortiguamiento de cada piso. Los resultados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de rigidez y amortiguamiento analíticos

$K_{aluminio} = 3325 \frac{N}{m}$
$K_{laton} = 2116 \frac{N}{m}$
$K_{total} = K_{laton} + 3K_{aluminio} = 12100 \frac{N}{m}$
$c = 0.01 \times K_{total} = 121 \frac{Ns}{m}$

Por la parametrización usada para la identificación, es más conveniente escribir los parámetros como

$$\frac{k_i}{m_i} = \frac{12100}{10} = 1210$$

$$\frac{c_i}{m_i} = \frac{121}{10} = 12.10$$

con el subíndice i asociado al piso i del edificio.

3.2 Identificación paramétrica

Para el modelado matemático y análisis de sistemas, el conocimiento de sus parámetros permite determinar las características de su dinámica. Cuando los parámetros son desconocidos se puede recurrir al uso de algoritmos de identificación paramétrica, para conocerlos. La aplicación de los algoritmos de identificación paramétrica requiere de mediciones de las variables de estado, además la señal de entrada debe cumplir con la condición de excitación persistente. La identificación puede llevarse a cabo en línea o fuera de línea (Isermann, 2011).

La identificación paramétrica del edificio se realiza con el algoritmo de mínimos cuadrados recursivo, que identifica los parámetros al minimizar el error cuadrático de estimación; sus ecuaciones se definen como (Ioannou y Sun, 1996).

$$y(t) = \phi(t)\theta \quad (3a)$$

$$\epsilon = y(t) - \phi(t)\hat{\theta} \quad (3b)$$

$$\dot{P} = -P\phi^T\phi P \quad (3c)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = P\phi^T\epsilon \quad (3d)$$

Donde:

$y(t)$: salida

$\phi(t)$: vector regresor.

θ : vector de parámetros.

$\hat{\theta}$: estimado de vector de parámetros.

ϵ : error de salida

P : matriz de covarianza.

La Ec. (3a) modela la dinámica del edificio con la parametrización de la Ec. (2). De ahí se desprende que la salida corresponde al vector de la aceleración total de cada piso, esto es, la aceleración del terreno más la aceleración del piso correspondiente.

$$y_i(t) = \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_i(t)$$

El subíndice i está asociado al piso i del edificio.

El vector regresor y el vector de parámetros son:

$$\phi(t) = \begin{bmatrix} x_1 & x_1 - x_2 & 0 & \dots & 0 & \dot{x}_1 & \dot{x}_1 - \dot{x}_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x_5 - x_4 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dot{x}_5 - \dot{x}_4 \end{bmatrix}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{k_3}{m_2} & \frac{k_3}{m_3} & \frac{k_4}{m_3} & \frac{k_4}{m_4} & \frac{k_5}{m_4} & \frac{k_5}{m_5} \\ \frac{c_1}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_2} & \frac{c_3}{m_2} & \frac{c_3}{m_3} & \frac{c_4}{m_3} & \frac{c_4}{m_4} & \frac{c_5}{m_4} & \frac{c_5}{m_5} \end{bmatrix}$$

El algoritmo de identificación (3) requiere de las mediciones del desplazamiento y velocidad de cada uno de los pisos y de la aceleración del terreno.

La instrumentación de la que dispone el edificio sólo proporciona señales de aceleración y desplazamiento. Para conocer la velocidad podría considerarse la derivación numérica del desplazamiento, hecho indeseable pues amplifica las señales de ruido. Por ello, como sugiere Slotine (1991) se aplica a la Ec. (1) un filtro de la forma

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2}$$

En forma analítica, corresponde a aplicar la transformada de Laplace y el filtro a la Ec. (1) con lo que se genera la siguiente ecuación:

$$\frac{Ms^2\omega_n^2 X(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} + \frac{Cs\omega_n^2 X(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} + \frac{K\omega_n^2 X(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} = \frac{Ms^2\omega_n^2 X_g(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (4)$$

Cada uno de los sumandos de la Ec. (4) se conocen, excepto el que corresponde a la velocidad

$$\frac{Cs\omega_n^2 X(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2}$$

por lo que señal de velocidad se obtiene a partir de la señal filtrada de desplazamiento con

$$H_c(s) = \frac{s\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2},$$

que corresponde a un filtro pasa banda. Al resto de las señales se les aplica el filtro pasa bajas

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2}.$$

Una vez que se conocen los parámetros analíticos, el algoritmo de identificación, las mediciones y los filtros para determinar las mediciones faltantes puede presentarse la parte experimental en la sección siguiente.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Condiciones experimentales

Los experimentos se realizan en el laboratorio de Control de Vibraciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM. A continuación se describen de forma sintética las características del prototipo. Para una explicación detallada consultar (Carrera et al., 2012).

- Actuador, mesa vibradora con movimientos en el plano. Para lograr el movimiento en cada eje posee motores de corriente directa. En este caso particular sólo se usa el desplazamiento en un eje.
- Sensores de desplazamiento transversal del tipo transformador diferencial de variación lineal (LVDT por sus siglas en inglés). Se encuentran ubicados en cada planta de la estructura civil.
- Sensores de aceleración, acelerómetros, ubicados en cada planta.
- Tarjetas de adquisición de datos PCI de National Instruments.
- Software, Real Time Windows Tarjet en Simulink de Matlab.
- Los experimentos se realizan en línea con un tiempo de muestreo de 1 ms.
- Señal de excitación, *chirp* frecuencia inicial 0.5 Hz, frecuencia final 18 Hz, el tiempo en el que alcanza la frecuencia final son 10 s.
- Filtro pasa bajas, frecuencia de corte 5 Hz.
- Filtro pasa banda, frecuencias de corte 4 Hz y 18 Hz.

4.2 Coeficientes experimentales de amortiguamiento y rigidez

El vector de parámetros contiene dieciocho elementos, nueve de ellos corresponden a coeficientes de rigidez y los nueve restantes a coeficientes de amortiguamiento, cada uno dividido entre la masa del piso correspondiente.

El comportamiento de cada uno de los parámetros a lo largo del tiempo puede observarse en la Figura. 2, para los de rigidez entre la masa y en la Figura. 3, para los de amortiguamiento entre masa. El valor al que finalmente converge cada uno de los parámetros puede observarse en las Tablas 3 y 4.

Por último, la señal de error de salida está definida por

$$\epsilon = y(t) - \phi(t)\hat{\theta}$$

Tabla 3. Coeficientes de rigidez/masa

$\frac{k_1}{m_1}$	$\frac{k_2}{m_1}$	$\frac{k_2}{m_2}$	$\frac{k_3}{m_2}$	$\frac{k_3}{m_3}$	$\frac{k_4}{m_3}$	$\frac{k_4}{m_4}$	$\frac{k_5}{m_4}$	$\frac{k_5}{m_5}$
1266	662	1207	853	954	1314	1306	1296	1335

Tabla 4. Coeficientes de amortiguamiento/masa

$\frac{c_1}{m_1}$	$\frac{c_2}{m_1}$	$\frac{c_2}{m_2}$	$\frac{c_3}{m_2}$	$\frac{c_3}{m_3}$	$\frac{c_4}{m_3}$	$\frac{c_4}{m_4}$	$\frac{c_5}{m_4}$	$\frac{c_5}{m_5}$
40.11	5.30	4.51	7.45	7.20	9.83	18.15	16.71	5.73

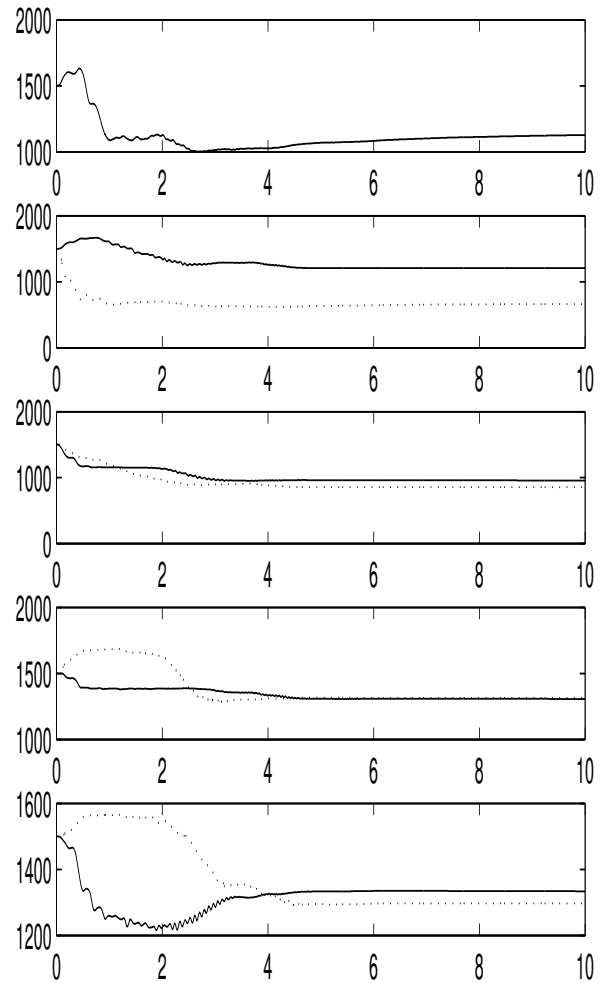


Figura 2. Coeficientes de rigidez identificados, línea continua $\frac{k_i}{m_i}$, línea punteada $\frac{k_i}{m_{i-1}}$. De arriba hacia abajo del primer al quinto piso, respectivamente.

y su evolución con el tiempo puede apreciarse en la Figura. 4.

4.3 Discusión de resultados

De acuerdo a los cálculos realizados en la subsección 3.1, el coeficiente de rigidez en cada piso es de $k = 12,100 \text{ N/m}$, la masa de cada planta es de $m = 10 \text{ Kg}$. Entonces el parámetro analítico $\frac{k}{m}$ vale 1210 N/mKg . A continuación

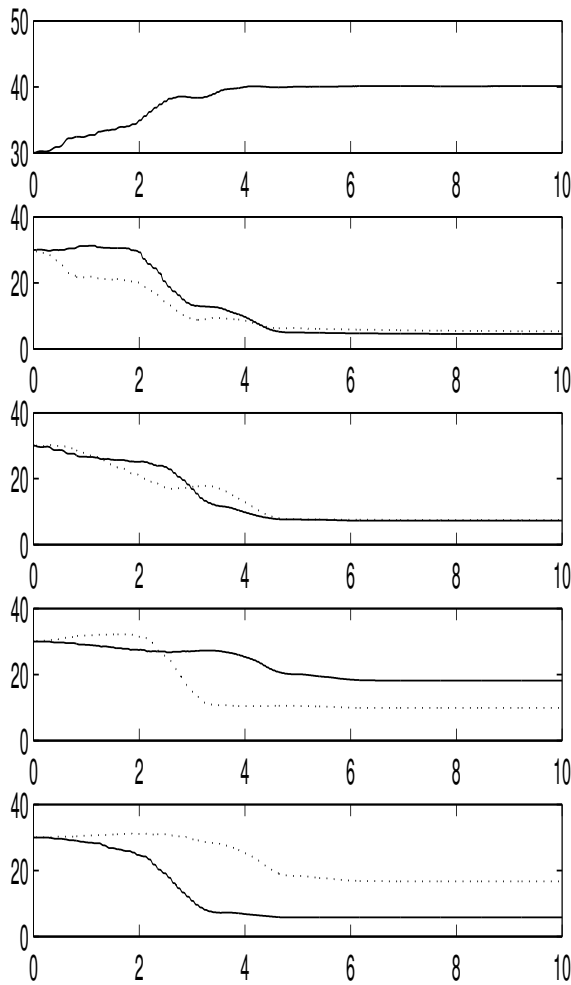


Figura 3. Coeficientes de amortiguamiento identificados, línea continua $\frac{c_i}{m_i}$, línea punteada $\frac{c_i}{m_{i-1}}$. De arriba hacia abajo del primer al quinto piso, respectivamente.

se compara este valor con cada uno de los obtenidos en forma experimental¹ (véase la Tabla 3).

- En el primer piso el parámetro $\frac{k_1}{m_1}$ es de 1266, bastante cercano al cálculo analítico.
- Para el segundo piso se obtienen $\frac{k_2}{m_1} = 662$ y $\frac{k_2}{m_2} = 1207$, en el caso del parámetro $\frac{k_2}{m_1}$ hay una variación grande, respecto al analítico pero $\frac{k_2}{m_2}$ es bastante aproximado al analítico.
- Para el tercer piso se obtienen $\frac{k_3}{m_2} = 853$ y $\frac{k_3}{m_3} = 954$, alejados en un tercio del valor analítico, pero coincidentes entre ellos.
- En el cuarto piso se obtienen $\frac{k_4}{m_3} = 1314$ y $\frac{k_4}{m_4} = 1306$, alejados en un 10 % del valor analítico y coincidentes entre ellos.
- En el quinto piso $\frac{k_5}{m_4} = 1296$ y $\frac{k_5}{m_5} = 1335$, alejados en un 10 % del valor analítico y coincidentes entre ellos.

Según el cálculo del coeficiente de amortiguamiento de la subsección 3.1 corresponde al 10 % del coeficiente de

¹ Se omiten las unidades por simplicidad.

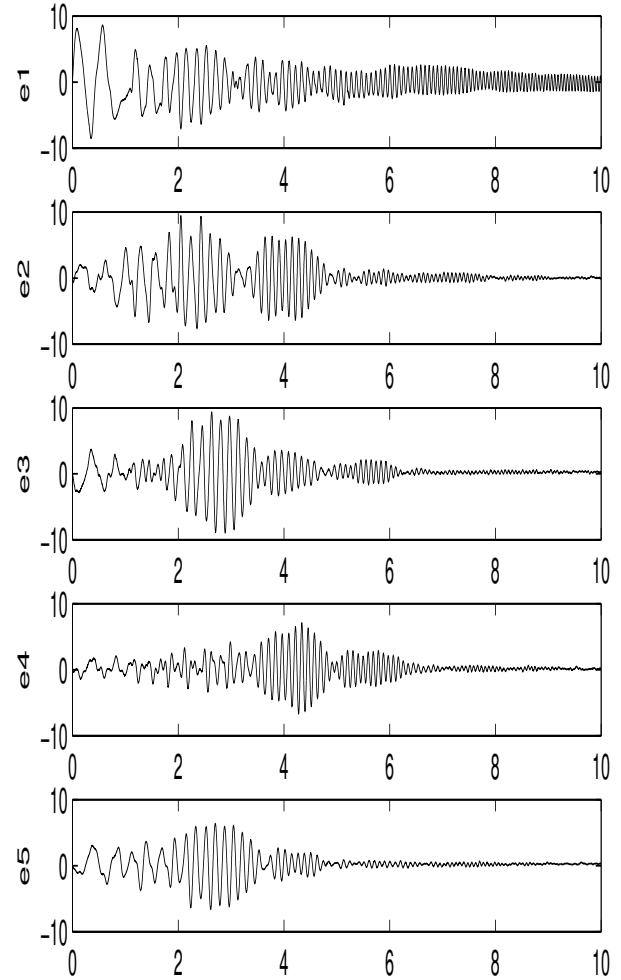


Figura 4. Señal de error de salida. De arriba hacia abajo del primer al quinto piso respectivamente.

rigidez $c = 121 \frac{Ns}{m}$ al dividir entre la masa $\frac{c}{m} = 12.1$. A continuación se compara con cada uno de los parámetros obtenidos experimentalmente (véase la Tabla 4).

- En el primer piso el parámetro experimental $\frac{c_1}{m_1} = 40.11$ es más de tres veces el valor analítico y también considerablemente mayor que el resto de parámetros obtenidos experimentalmente. Este hecho se debe a que en la base del edificio hay un amortiguador magnétoreológico, elemento que aumenta la disipación de energía y ello se ve reflejado en el aumento del coeficiente de amortiguamiento del primer piso.
- En el segundo piso los coeficientes de amortiguamiento entre la masa son $\frac{c_2}{m_1} = 5.30$ y $\frac{c_2}{m_2} = 4.51$, son coincidentes entre si, pero alejados del valor teórico en un 50 %.
- En el segundo piso los coeficientes de amortiguamiento entre la masa son $\frac{c_3}{m_2} = 7.45$ y $\frac{c_3}{m_3} = 7.20$, son coincidentes entre si, pero alejados del valor teórico en un 25 %.
- En el cuarto piso los coeficientes de amortiguamiento entre la masa son $\frac{c_4}{m_3} = 9.83$ y $\frac{c_4}{m_4} = 18.15$, no son coincidentes entre si, y el primero de ellos se acerca al valor analítico.

- En el quinto piso los coeficientes de amortiguamiento entre la masa son $\frac{c_5}{m_4} = 16.71$ y $\frac{c_5}{m_5} = 5.73$, no son coincidentes entre sí, y ambos se alejan del valor analítico.

Por otra parte en la Figura. 4. se observan las señales de error. Las señales dos a cuatro tienen una convergencia a cero. Mientras que la primera señal de error oscila cerca de cero, esto explica la forma de la primera gráfica de la Figura 3.

Observaciones importantes.

- Se presenta el caso en el que los parámetros de rigidez o amortiguamiento son coincidentes entre sí pero tienen variación respecto al valor analítico. Aquí se consideran razonables los parámetros obtenidos experimentalmente, pues en el sistema real intervienen diversos factores que no son considerados en forma teórica, tales como las señales de ruido, los tiempos de muestreo, etc.
- Otro caso corresponde al hecho de que los parámetros de rigidez o amortiguamiento, son distintos y se alejan en forma considerable del valor teórico. En este caso convendría hacer una experimentación más exhaustiva para buscar que los parámetros se asemejen al valor analítico o que sean coincidentes entre sí. Otra causa posible es que la suposición de que el coeficiente de amortiguamiento es el 10% del de rigidez, no sea válida.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se presentó el proceso de identificación paramétrica en tiempo real de los parámetros de masa, rigidez y amortiguamiento de un edificio a escala de cinco pisos. Al disponer de las mediciones de desplazamiento y aceleración y al filtrar la posición, se genera la señal de velocidad necesaria para alimentar al algoritmo de identificación. El sistema de adquisición de datos está compuesto por tarjetas de adquisición de datos PCI de National Instruments y se usa el software Real Time Windows Target de Simulink de Matlab. Los principales retos han sido lograr que la instrumentación esté en condiciones óptimas y que la sintonización de los filtros sea adecuada. Los resultados obtenidos son en general consistentes.

El trabajo futuro puede resumirse en los puntos siguientes,

- Realizar la identificación paramétrica únicamente con las señales de aceleración.
- Realizar la identificación paramétrica únicamente con las señales de desplazamiento.
- Realizar la identificación paramétrica del actuador, amortiguador magnetoreológico.
- Diseñar esquemas de control automático para reducir los desplazamientos en cada uno de los pisos de la estructura.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación contó con el patrocinio del proyecto UNAM-PAPIIT IN109414. Los autores agradecen la colaboración de Antonio Concha Sánchez y de Rolando Carrera Méndez.

REFERENCIAS

- Angeles-Cervantes, 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.
- Carrera, R., Alvarez-Icaza, L., y Angeles, M. (2009). Plataforma experimental para control en modelos de estructuras civiles. En *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*.
- Chopra, A.K. (2012). *Dynamics of Structures*. Pearson.
- Cornejo, C. y Alvarez-Icaza, L. (2005). Passivity based control of a seismically excited building. In *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, volume 16, 409–414.
- Dyke, S. y Jansen, L.M. (2000). Semi-active control strategies for MR dampers: a comparative study. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 126(8), 795–803.
- Garrido-Moctezuma, R. y Sánchez, A.C. (2012). Estimation of the parameters of structures using acceleration measurements. In *16th IFAC Symposium on System Identification*, volume 16, 1791–1796.
- Hugues, G. y C., Y.P. (2014). The advantage of directly identifying continuous-time transfer function models in practical applications. *International Journal of Control*, 87(7), 1319–1338.
- Ioannou, P.A. y Sun, J. (1996). *Robust Adaptive Control*. Prentice Hall.
- Isermann, R. (2011). *Identification of Dynamic Systems*. Springer.
- Jiménez, R. y Alvarez-Icaza, L. (2007). A real-time estimation scheme for buildings with intelligent dissipation devices. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(6), 2427–2440.
- Slotine, L. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.
- Spencer-Jr., B. (1999). New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA. In *Proceedings of International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, Cheju, Korea*.