

Improvement of an Algebraic Observer for the Control of a one-story building

Jesús-Aureliano Esquivel-Cárdenas,
 Jorge-Adrián Osuna-González

*Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica , Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Norte. Monclova, Coahuila, México. c.p. 25750.
 (jesus.esquivel, j.osuna@uadec.edu.mx)*

Abstract: This article presents an improvement to an algebraic observer to estimate the state of a mechanical system whose only feedback variable is acceleration. This problem appears in different mechanical systems, *e.g.*, structures subject to the effects of earthquakes. The algebraic observer that motivates this work is constrained to a finite time range; it cannot observe for time very close to zero, nor beyond a large value, because it would make singular the matrix involved in the estimation. In this proposal these disadvantages are eliminated by obtaining a matrix with independent-of-time determinant. The objective of the observer is to estimate the position and velocity that correspond to the acceleration measure, for use in a recently published control law of the semi-active control system of a single-story building by means of a magnetorheological damper.

Keywords: Algebraic observer, semi-active control, Process Control, Nonlinear Systems Control, Modeling and Identification of Systems

1. INTRODUCCIÓN

El propósito de la *control estructural* consiste en influir en la dinámica de las construcciones civiles para que respondan, o se adapten, adecuadamente y con el menor daño posible a los embates de las fuerzas de la naturaleza, *e.g.*, terremotos, aire, inundaciones, fuego, etc., Soong (1990). El avance de esta tecnología ha sido posible al avance de otras áreas como la de los sistemas electrónicos que permiten implementar conceptos teóricos complejos en computadoras que gobiernan dispositivos de gran desempeño como lo son los amortiguadores magnetoreológico, Atam (2019); Abé and Igusa (1996).

El control de la dinámica estructural puede ser dividido en tres categorías (a) *control pasivo*, (b) *control activo*, y (c) *control semiactivo*, en base a si (a) no se requiere información, ni energía, (b) se requiere información y energía, y (c) se requiere información, pero no energía, respectivamente, Klein and Healey (1985); Nemir et al.

(1994). En el control pasivo usa un diseño adecuado de sus componentes para limitar la resonancia y la disipación de energía. Sin embargo su diseño implica una estructura rígida y costosa, poco utilizada en contrucciones como los rascacielos, debido a las inevitables vibraciones. En el control activo los sistemas requieren de grandes cantidades de energía para contrarrestar los movimientos de las estructuras, lo cual puede conducir a inestabilidades involuntarias o excitación en los modos de la construcción. Finalmente, la última categoría se refiere al control semiactivo, el cual por naturaleza no agrega energía al sistema, y por lo tanto se eliminan los efectos laterales del control activo. Una técnica, básica del control semiactivo es la transferencia de energía entre las frecuencias modales, Nemir et al. (1994).

Una forma de analizar las estructuras civiles es mediante su modelación matemática como sistemas lineales de parámetros concentrados, *i.e.*, orden finito. En particular, una gran cantidad de ejemplos pueden modelarse por la dinámica de un sistema de segundo orden como lo hacen en Rodríguez-Torres et al. (2022), para un edificio de un piso, ver Figura 1. En este caso se contempla el caso de la entrada de aceleración debido a la fuerza de sismos. El objetivo que se persigue en esta referencia es encontrar la posición y velocidad del edificio de tal manera que pueda ser utilizada en la ley de control en el amortiguador magnetoreológico. Como no se tiene acceso a estas variables se utiliza un observador algebraico para su estimación, con un enfoque de *integración algebraica* en el dominio del tiempo, el cual tiene un desempeño instantáneo, robusto e insensible a las perturbaciones,

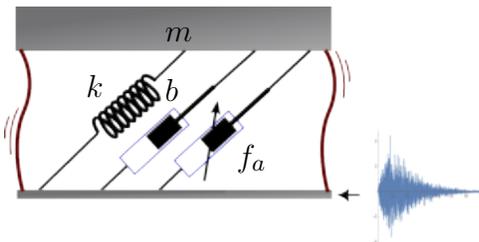


Fig. 1. Elementos dinámicos del edificio de un piso

esto último debido a la acción de filtrado para las altas frecuencias, que tienen en forma natural los integradores utilizados. El concepto del observador algebraico tiene sus raíces en el trabajo del enfoque derivativo algebraico introducido en Fliess and Sira-Ramírez (2003).

Los métodos clásicos para el diseño de observadores basados en diferenciación utilizan ajuste polinomial de mínimos cuadrados, o interpolación, ver Duncan et al. (1996) para aplicaciones fuera de línea. En Ibrir (2004) se utiliza un enfoque para el control lineal, y en Bejarano et al. (2011) se presenta un enfoque no lineal, basado en diferenciadores de modos deslizantes. Todos estos métodos aunque han ganado popularidad han mostrado ser muy sensibles al ruido de medición, Delpoux et al. (2021).

Otras técnicas de control semi-activo es mediante la conmutación de las constantes de resortes en energía cero como la que se presenta en Osegueda and Nemir (1991).

Un problema común previo, o durante, el control de sistemas es la identificación paramétrica. En el caso del control estructural la rigidez y viscosidad de los elementos utilizados en la modelación. Por ejemplo, en Repinaldo et al. (2021) es utilizada la técnica de evolución diferencial, para la estimación de los parámetros, y se utilizó teoría neuro-fuzzy en el control de una estructura de 2DOF mediante actuadores electromecánicos.

Este documento está organizado de la siguiente forma. En la sección II se construye el observador algebraico. En la Sección III se analiza el modelo matemático del edificio con el amortiguador magnetoreológico y se presenta la acción de control. En la sección IV se realizan las simulaciones de aplicación del observador algebraico al modelo matemático del edificio. Finalmente, en la sección V se presentan las conclusiones.

2. OBSERVADOR ALGEBRAICO

2.1 Planteamiento del problema

Considere el sistema lineal, escalar, de segundo orden, dado por la siguiente ecuación diferencial

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= a\dot{x}(t) + bx(t) + u(t), \\ y(t) &= \ddot{x}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}$ y $u(t) \in \mathbb{R}$ son escalares que denotan la posición y la entrada de control. La salida del sistema $y(t)$ es la aceleración $\ddot{x}(t)$, a la cual se tiene acceso. Entonces, en la ecuación anterior tenemos señales conocidas, *i.e.*, $y(t)$ y $u(t)$, y desconocidas, *i.e.*, $x(t)$ y $\dot{x}(t)$, por lo tanto de (1) obtenemos

$$\ddot{x}(t) - u(t) = a\dot{x}(t) + bx(t)$$

o bien

$$y(t) - u(t) = a\dot{x}(t) + bx(t)$$

donde el lado izquierdo son señales conocidas, y el lado derecho es una combinación lineal de señales desconocidas. Entonces, de aquí podemos definir $z(t) \triangleq y(t) - u(t)$, para reescribir finalmente a (1) como

$$\begin{aligned} z(t) &= a\dot{x}(t) + bx(t) \\ y(t) &= \ddot{x}(t) \end{aligned}$$

Para construir el observador algebraico se manipulan las expresiones con variables conocidas y se definen las funciones $F_1(t, y)$, $F_2(t, y)$, $F_3(t, z)$ y $F_4(t, z)$, las cuales serán parte importante en la implementación del observador algebraico. Primero, $F_1(t, y)$ se obtiene mediante la función $\sin(\omega t)$,

$$\begin{aligned} F_1(t, y) &= \int_0^t \sin(\omega\tau)y(\tau)d\tau = \int_0^t \sin(\omega\tau)\ddot{x}(\tau)d\tau \\ &= \sin(\omega t)\dot{x}(t) - \omega \int_0^t \dot{x}(\tau) \cos(\omega\tau)d\tau \\ F_1(t, y) - \omega x(0) &= -\omega \cos(\omega t)x(t) + \sin(\omega t)\dot{x}(t) \\ &\quad - \omega^2 \int_0^t x(\tau) \sin(\omega\tau)d\tau \end{aligned}$$

lo cual se puede escribir como el producto interior

$$\begin{aligned} F_1(t, y) - \omega x(0) &= [-\omega \cos(\omega t) \quad \sin(\omega t) \quad -\omega^2 \quad 0] \\ &\quad \times \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \int_0^t \sin(\omega\tau)x(\tau)d\tau \\ \int_0^t \cos(\omega\tau)x(\tau)d\tau \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Para definir $F_2(t, y)$ utilizamos como kernel la función $\cos(\omega t)$, *i.e.*,

$$\begin{aligned} F_2(t, y) &= \int_0^t \cos(\omega\tau)y(\tau)d\tau = \int_0^t \cos(\omega\tau)\ddot{x}(\tau)d\tau \\ &= \cos(\omega t)\dot{x}(t) - \dot{x}(0) + \omega \int_0^t \dot{x}(\tau) \sin(\omega\tau)d\tau \\ F_2(t, y) + \dot{x}(0) &= +\omega \sin(\omega t)x(t) + \cos(\omega t)\dot{x}(t) \\ &\quad - \omega^2 \int_0^t x(\tau) \cos(\omega\tau)d\tau \end{aligned}$$

que puede reescribirse como el producto interior

$$\begin{aligned} F_2(t, y) + \dot{x}(0) &= [-\omega \sin(\omega t) \quad \cos(\omega t) \quad 0 \quad -\omega^2] \\ &\quad \times \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \int_0^t \sin(\omega\tau)x(\tau)d\tau \\ \int_0^t \cos(\omega\tau)x(\tau)d\tau \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Usando la variable definida como $z(t) = a\dot{x}(t) + bx(t)$, se define la función $F_3(t, z)$ con $\sin(\omega t)$ en el integrando

$$\begin{aligned} F_3(t, z) &= \int_0^t \sin(\omega\tau)z(\tau)d\tau \\ &= \int_0^t \sin(\omega\tau)(a\dot{x}(\tau) + bx(\tau))d\tau \\ &= a \sin(\omega t)x(t) - a\omega \int_0^t x(\tau) \cos(\omega\tau)d\tau \\ &\quad + b \int_0^t x(\tau) \sin(\omega\tau)d\tau \end{aligned}$$

con producto interior

$$F_3(t, y) = [a \sin(\omega t) \ 0 \ b \ -a\omega] \\ \times \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \int_0^t \sin(\omega\tau)x(\tau)d\tau \\ \int_0^t \cos(\omega\tau)x(\tau)d\tau \end{bmatrix}$$

y por último definimos la función $F_4(t, z)$ mediante la función $\cos(\omega t)$

$$F_4 = \int_0^t \cos(\omega\tau)z(t)d\tau \\ = \int_0^t \cos(\omega\tau)(a\dot{x}(\tau) + bx(\tau))d\tau$$

$$F_4(t, z) + ax(0) = a \cos(\omega t)x(t) + a\omega \int_0^t x(\tau) \sin(\omega\tau)d\tau \\ + b \int_0^t x(\tau) \cos(\omega\tau)d\tau$$

también con el producto interior

$$F_4(t, y) + ax(0) = [a \cos(\omega t) \ 0 \ a\omega \ b] \\ \times \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \int_0^t \sin(\omega\tau)x(\tau)d\tau \\ \int_0^t \cos(\omega\tau)x(\tau)d\tau \end{bmatrix}$$

si juntamos las definiciones en una upla de dimensión cuatro,

$$F = \begin{bmatrix} F_1 - \omega x(0) \\ F_2 + \dot{x}(0) \\ F_3 \\ F_4 + ax(0) \end{bmatrix} = M \underbrace{\begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \int_0^t \sin(\omega\tau)x(\tau)d\tau \\ \int_0^t \cos(\omega\tau)x(\tau)d\tau \end{bmatrix}}_{\xi} \quad (2)$$

Considerando condiciones iniciales cero, el vector F es simplemente

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^t \sin(\omega\tau)y(\tau)d\tau \\ \int_0^t \cos(\omega\tau)y(\tau)d\tau \\ \int_0^t \sin(\omega\tau)z(\tau)d\tau \\ \int_0^t \cos(\omega\tau)z(\tau)d\tau \end{bmatrix}$$

En la ecuación (2), el elemento desconocido es ξ , por lo que para encontrarlo solo hay que hacer $\xi = M^{-1}F$. Donde la matriz encontrada M es

$$M = \begin{bmatrix} -\omega \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & -\omega^2 & 0 \\ \omega \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 & -\omega^2 \\ a \sin(\omega t) & 0 & b & -a\omega \\ a \cos(\omega t) & 0 & a\omega & b \end{bmatrix} \quad (3)$$

cuyo determinante $\det M = b^2\omega$ es independiente del tiempo, por lo tanto, como $\omega \neq 0$, es una constante

cuyo valor lo podemos fijar, sin pérdida de generalidad, en cualquier valor, *e.g.*, en $\omega = 1$, y asumiendo que siempre se tiene viscosidad, *i.e.*, $b \neq 0$, la matriz es invertible para todo tiempo. Lo cual es una ventaja respecto al resultado publicado en Delpoux et al. (2021), donde la variable del tiempo impone restricciones en la invertibilidad de la matriz, por ende, en la estimación de la posición y velocidad del sistema analizado.

El valor de ω no afecta las ecuaciones del observador, sin embargo, puede ser asignado convenientemente cuando se tienen incertidumbres en la modelación o condiciones iniciales, al trasladar el espectro de estas (*señal moduladora*) mediante ya sea la función $\sin(\omega t)$ o $\cos(\omega t)$, (*señal portadora*) y atenuar sus efectos por el filtrado natural que tienen los integradores; solo sería necesario establecer la frecuencia más alta o significativa de la incertidumbre. Estos conceptos son ideas para continuar con la investigación en esta área; el observador propuesto en este trabajo sólo es válido para condiciones iniciales cero, o completamente conocidas.

3. MODELACIÓN DEL EDIFICIO DE UN PISO

El modelo de fuerza $f_a(t)$ del amortiguador magnetorreológico utilizado en este trabajo y en (Rodríguez-Torres et al. (2022)) se muestra en la Figura 2 y es

$$f_a(t) = b_a \dot{x}(t) + k_a x(t) + \sigma w(t)u(t) + f_0 \\ w(t) = \tanh(\beta \dot{x}(t) + \delta \text{sign}(x(t))) \quad (4)$$

donde b_a y k_a son los coeficientes de viscosidad y rigidez del amortiguador, σ es el factor de escala de la histéresis, $w(t)$ representa el estado histérico dado por la función tangente hiperbólica, $u(t)$ es la señal de control y f_0 es la compensación de fuerza del amortiguador. Los parámetros β y δ determinan el ancho del ciclo histérico, donde β define la inclinación de la pendiente de la histéresis.

Al incluirse en la dinámica del sistema básico masa-resorte-amortiguador se tiene la siguiente ecuación

$$m\ddot{x}(t) = -b\dot{x}(t) - kx(t) - f_a(t) \quad (5)$$

La variable $x(t)$ sería la misma que se utiliza en (4) por lo que sustituyendo esta ecuación en (5) se tiene

$$m\ddot{x}(t) + (b + b_a)\dot{x}(t) + (k + k_a)x(t) \\ = -\sigma \tanh(\beta \dot{x}(t) + \delta \text{sign}(x(t)))u(t) - f_0 \\ y(t) = \ddot{x}(t)$$

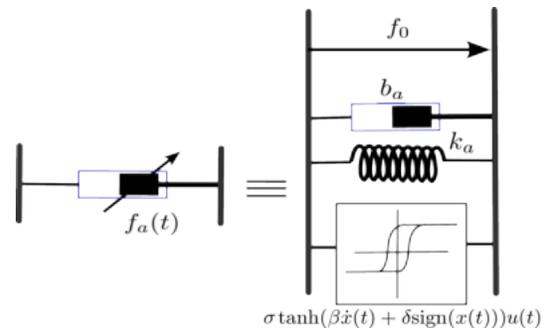


Fig. 2. Equivalencia del amortiguador magnetorreológico

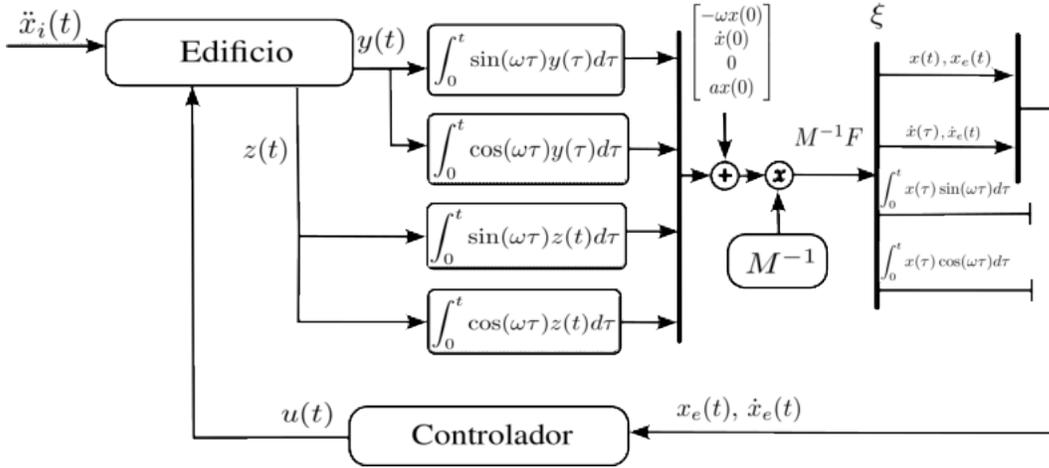


Fig. 3. Esquema de control del edificio

La manera más directa en manipular la expresión anterior es eliminando la no linealidad afin a la entrada, y agregando un controlador PID:

$$u(t) = \frac{1}{\sigma \tanh(\beta \dot{x}(t) + \delta \text{sign}(x(t)))} \times \left\{ \left(k_p e(t) + k_d \dot{e}(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \right) - f_0 \right\}$$

donde $e(t) = x(t) - x_d(t)$ y $\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_d(t)$. Por supuesto, la posición deseada $x_d(t)$ y la velocidad deseada $\dot{x}_d(t)$ del edificio deben de ser cero, *i.e.*, $x_d(t) = 0$ y $\dot{x}_d(t) = 0$, por lo que la ley de control la podemos reescribir como

$$u(t) = \frac{1}{\sigma \tanh(\beta \dot{x}(t) + \delta \text{sign}(x(t)))} \times \left\{ \left(k_p x(t) + k_d \dot{x}(t) + k_i \int_0^t x(\tau) d\tau \right) - f_0 \right\} \quad (6)$$

Sin embargo, esta señal de control depende de $x(t)$ y $\dot{x}(t)$, que no se conocen, por lo que se utilizarán sus estimados $x_e(t)$ y $\dot{x}_e(t)$ en la ley de control u . La ecuación (6) se reescribe como

$$u(t, x_e(t), \dot{x}_e(t)) = \frac{1}{\sigma \tanh(\beta \dot{x}_e(t) + \delta \text{sign}(x_e(t)))} \times \left\{ \left(k_p x_e(t) + k_d \dot{x}_e(t) + k_i \int_0^t x_e(\tau) d\tau \right) - f_0 \right\}$$

Necesariamente el sistema (5) debe ser observable. Aunque esta propiedad ya se analizó en la condición de invertibilidad de la matriz (3), en Diop and Fliess (1991) se demostró que la observabilidad es posible cuando la posición del sistema, $x(t)$, y su velocidad, $\dot{x}(t)$ pueden ser expresados en forma única por las variables conocidas, $y(t)$ y $z(t)$, y un número finito de sus derivadas,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= b^{-1}(\dot{z}(t) - ay(t)), \\ x(t) &= b^{-1}(z(t) - ab^{-1}(\dot{z}(t) - ay(t))) \end{aligned}$$

Esto confirma la observabilidad de (5) mientras el coeficiente b satisfaga la condición $b \neq 0$; la misma que debe satisfacerse para que la matriz (3) sea invertible.

Mediante el principio de separación, utilizamos la Ecuación (6) para obtener la siguiente ecuación integro-diferencial

$$m\ddot{x}(t) + (b + b_a + k_d)\dot{x}(t) + (k + k_a + k_p)x(t) + k_i \int_0^t x(\tau) d\tau = 0$$

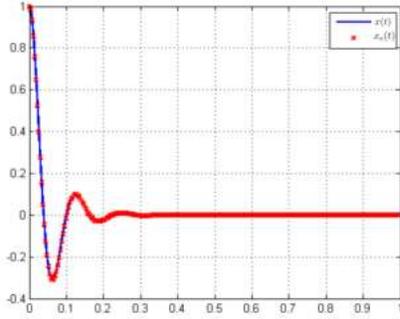
cuya ecuación característica, en el dominio de la variable compleja s , es

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0$$

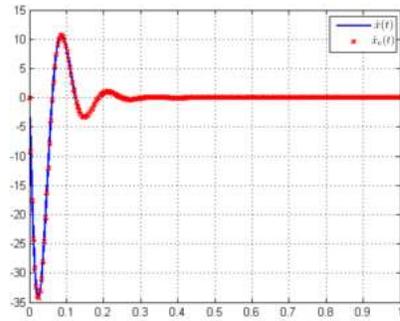
con $a_0 = m$, $a_1 = (b + b_a + k_d)$, $a_2 = (k + k_a + k_p)$ y $a_3 = k_i$. Los parámetros del controlador, *i.e.*, k_p , k_d y k_i , determinan la ubicación de los polos dominantes. Usando los parámetros de Rodríguez-Torres et al. (2022), *i.e.*, la misma ley de control, para tener una referencia de comparación, los coeficientes $a_0 = 3.2$, $a_1 = 118.7$, $a_2 = 9202$ y $a_3 = 1$ colocan a los polos en $s = -1 \times 10^{-4}$ y $-18 \pm 50.52i$, lo cual asegura la estabilidad del sistema, sujeto a la validez en la cancelación de la no linealidad. El diagrama de bloques de control se muestra en la Figura 3; la entrada del observador es la aceleración del sismo $\ddot{x}_i(t)$, que en el caso del sistema analizado es equivalente a la aceleración de la ecuación diferencial $\ddot{x}(t)$, la cual se utiliza para encontrar la posición y velocidad real de la planta, utilizada en el controlador.

4. SIMULACIÓN

Los parámetros de la simulación son los mismos de Rodríguez-Torres et al. (2022), *i.e.*, $m = 3.17$ Kg, $k = 9199$ N/m, $b = 7.388$ N.s/m, $\sigma = 0.2517$, $\beta = 5.5162$, $\delta = -2.1770$, $f_0 = 9.9506$ N. En los resultados de las Figuras 4(a) y 4(b) se utilizaron las condiciones iniciales $x(0) = 1$ y $\dot{x}(0) = -0.1$, esto es cien veces mayor que las utilizadas en Rodríguez-Torres et al. (2022). Podemos observar que las respuestas que se presentan en este trabajo son exactas en *todo momento*. No es necesario esperar un intervalo de tiempo, ni hacerlo en un intervalo finito, por problemas de singularidad en la matriz en el observador algebraico, Delpoux et al. (2021); Rodríguez-Torres et al. (2022).



(a) Posición $x(t)$ y su observación $x_e(t)$



(b) Velocidad $\dot{x}(t)$ y su observación $\dot{x}_e(t)$

Fig. 4. Variables de estado y sus observaciones

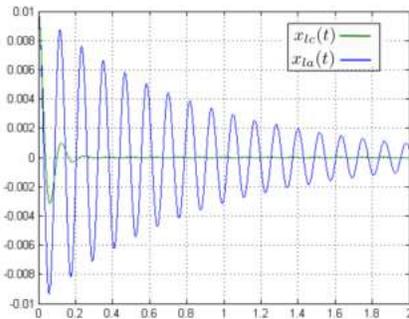


Fig. 5. Señal $x(t)$, en lazo abierto (la) y lazo cerrado (lc): $x_{la}(t)$ y $x_{lc}(t)$, respectivamente

En las Figuras 6(a) y 6(b) se presentan los resultados para cuando el sistema tiene una entrada determinística de la forma

$$\ddot{x}_i(t) = \begin{cases} 10 \sin(t) & 0 < t < 5 \\ 10 e^{-(t-5)} \sin(t) & t \geq 5 \end{cases}$$

las señales numéricamente son idénticas.

Para agregar la señal exógena se modifica la ecuación (5) como

$$m\ddot{x}(t) = -b\dot{x}(t) - kx(t) - f_a(t) + \ddot{x}_i(t)$$

4.1 Entrada estocástica

La señal de aceleración de un sismo puede ser modelada por una señal estocástica, Soong (1990), del tipo Gaus-

siana no estacionaria de la forma

$$\ddot{x}(t) = \psi(t)W(t)$$

en el cual $W(t)$ es ruido blanco Gaussiano estacionario de media cero y $\psi(t)$ es una función moduladora determinística de la forma

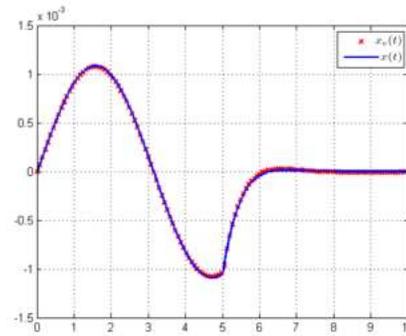
$$\psi(t) = g(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})h(t)$$

donde $h(t)$ es una función escalón unitario y g , α y β son constantes. Por lo tanto, la media de $\ddot{x}(t)$ es cero y su matriz de covarianza es

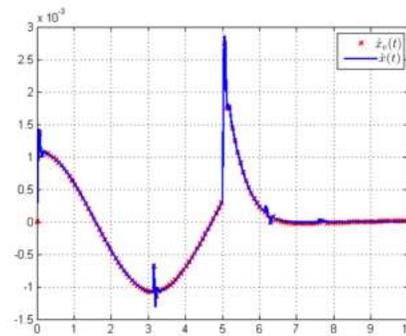
$$E\ddot{x}(t)\ddot{x}(s) = g^2(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})^2 h(t)D\delta(t-s)$$

donde D es la densidad espectral de potencia de $W(t)$. En este trabajo se utilizan los mismos valores de parámetro de Soong (1990), *i.e.*, $\alpha = 0.25$ /s, $\beta = 0.63$ /s, $g = 3.06$ y $D = 0.04$ m²/s⁴ y se generó la señal de la Figura 7.

Los integradores del observador atenúan el espectro de frecuencias a partir de $\omega = 1$ rad/s, corresponde a una frecuencia $f = 1/(2\pi)$ s. El espectro de la señal aleatoria es atenuado para casi todas las frecuencias ya que la frecuencia de muestreo utilizada fue de 50 Hz, y su espectro está entre cero y 25Hz. Su efecto en el sistema con y sin retroalimentación de control se puede observar en las Figuras 8(a) y 8(b). La acción de control utilizando el estado verdadero es prácticamente la misma que el estado observado, por lo que es omitida.



(a) Posición $x(t)$ y su observación $x_e(t)$



(b) Velocidad $\dot{x}(t)$ y su observación $\dot{x}_e(t)$

Fig. 6. Variables de estado y sus observaciones: caso sistema con entrada determinística

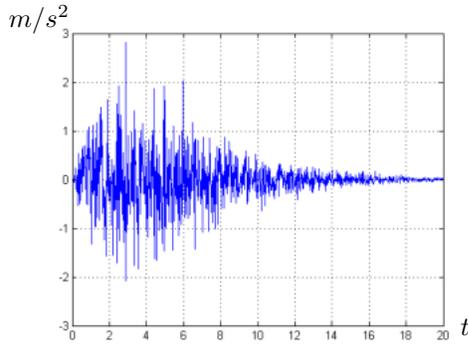
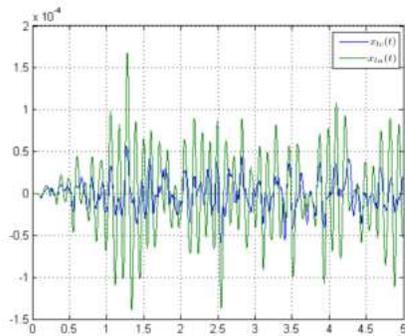
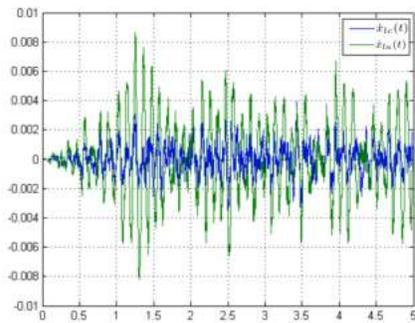


Fig. 7. Aceleración del sismo



(a) $x_{lc}(t)$ y $x_{la}(t)$



(b) Variables de estado, en lazo cerrado (lc) y lazo abierto (la)

Fig. 8. Variables de estado y sus observaciones

5. CONCLUSIONES

Se ha mejorado el observador algebraico reportado en Delpoux et al. (2021) y se ha usado en el mismo sistema de control de Rodríguez-Torres et al. (2022). El observador algebraico de este trabajo es válido *para todo tiempo positivo* y no tiene los problemas de invertibilidad para los instantes del tiempo, o muy cercanos a cero, o muy grandes, del resultado en Delpoux et al. (2021), lo cual causa singularidad en la matriz del observador.

Se utilizó la misma ley de control de Rodríguez-Torres et al. (2022) para tener una referencia de la eficiencia del observador. Este empieza a observar, desde $t = 0$, las variables del estado, y otras dos más, no utilizadas, las cuales *son no medibles, pero observables*. Y mediante

el mismo control PID de esta referencia, utilizando un amortiguador magnetoreológico, se mostró un desempeño eficiente en el desplazamiento de la estructura de un edificio de un piso, para una entrada de aceleración estocástica que simula la señal de un sismo.

REFERENCES

- Abé, M. and Igusa, T. (1996). Semi-active dynamic vibration absorbers for controlling transient response. *Journal of Sound and Vibration*, 5.
- Atam, E. (2019). Friction damper-based passive vibration control assessment for seismically-excited buildings through comparison with active control: A case study. *IEEE Access*, 7, 4664–4675.
- Bejarano, F., Pisano, A., and Usai, E. (2011). Finite-time converging jump observer for switched linear systems with unknown inputs. *Nonlinear Anal. Hybrid Syst.*, 5, 174–188.
- Delpoux, R., Floquet, T., and Sira-Ramírez, H. (2021). Trajectory tracking of second-order systems using acceleration feedback. *Automation*, 2, 266–277.
- Diop, S. and Fliess, M. (1991). Nonlinear observability, identifiability, and persistent trajectories. In *Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control*, 714–719. Brighton, England.
- Duncan, T., Mandl, P., and Pasik-Duncan, B. (1996). Numerical differentiation and parameter estimation in higher-order linear stochastic systems. *IEEE Trans. Autom. Control*, 41, 522–532.
- Fliess, M. and Sira-Ramírez, H. (2003). An algebraic framework for linear identification. *ESAIM Control Optim. Calc. Var.*, 7(9), 151–168.
- Ibrir, S. (2004). Linear time-derivative trackers. *Automatica*, 40, 397–405.
- Klein, R. and Healey, M. (1985). Semi-active control of wind induced oscillations in structures. In *Proc., 2nd Int. Symp. on Struct. Control*, 354–369.
- Nemir, D., Lin, Y., and Osegueda, R. (1994). Semiactive motion control using variable stiffness. *J. Struct. Eng.*, (120), 1291–1306.
- Osegueda, R. and Nemir, D. (1991). Structural motion control using modal energy transference. In *Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control*, 512–514.
- Repinaldo, J.P., Koroishi, E.H., and Lara-Molina, F.A. (2021). Neuro-fuzzy control applied on a 2dof structure using electromagnetic actuators. *IEEE Latin America Transactions*, 19(1).
- Rodríguez-Torres, A., Morales-Valdez, J., and Yu, W. (2022). Semi-active control for 1 story building via a magnetorheological damper. In *Memorias del 2022 Congreso Nacional de Control Automático, Tuxtla Gutiérrez, México*.
- Soong, T. (1990). *Active Structural Control: Theory and Practice*. Longman Scientific & Technical, and John Wiley & Sons, Inc. New York.