

## Semi-active control for 1 story building via a magnetorheological damper <sup>\*</sup>

Andrés Rodríguez-Torres <sup>\*</sup> Jesús Morales-Valdez <sup>\*\*</sup> Wen Yu <sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Automatic Control Department CINVESTAV-IPN, Mexico City, CDMX 07360 Mexico (e-mail: andres.rodriguez@cinvestav.mx, yuw@ctrl.cinvestav.mx).

<sup>\*\*</sup> CONACYT-CINVESTAV IPN, Mexico City, CDMX 07360 Mexico (e-mail: jmoralesv@ctrl.cinvestav.mx)

---

**Abstract:** This paper presents the development of semi-active vibration control via a magnetorheological damper of a seismically-excited 1-story building structure. The control scheme is based on a Proportional Integral Derivative Controller (PID) due to its solid performance and robustness in a wide variety of operating conditions. The PID goal is to reduce the displacement of the building through a magnetorheological damper installed between the first floor and the ground. Furthermore, this control law includes an online algebraic observer that estimates the unmeasured displacement and velocity. Indeed, the obtained expressions depend only on integrals of the measured acceleration output and the control input, which is useful for practical purposes. This approach is robust to measurement noise and provides the estimated states required by the PID controller. Simulation results validate the performance of the proposed scheme.

*Keywords:* PID controller, semi-active control, algebraic state estimation, acceleration feedback.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

El control semiaactivo de vibraciones en edificios es una combinación de los enfoques activos y pasivos de control, ofreciendo la estabilidad de los sistemas pasivos para compensar el movimiento estructural y la adaptabilidad de los sistemas activos ante perturbaciones y/o cambios en las propiedades de la estructura. Por lo tanto, a diferencia de los dispositivos de control activo, los actuadores de control semiaactivo no tienen el potencial de desestabilizar el sistema estructural y requieren menor consumo de energía, el cual puede ser suministrado por una batería en caso de fallo del sistema eléctrico durante un sismo (Lin and Lin, 2021). Para ejercer este tipo de control se encuentran los amortiguadores magnetorreológicos (MRD, por sus siglas en inglés) debido a su rápida respuesta, gran cantidad de fuerza, tamaño compacto y adaptabilidad de sus propiedades en tiempo real. Sin embargo, este tipo de actuadores presentan importantes retos para su aplicación debido a la caracterización de su respuesta de fuerza-velocidad no lineal, producida por fluidos magnetorreológicos (Yoon et al., 2021). Por otra parte, en general, los edificios son equipados con acelerómetros por su bajo costo y su referencia no inercial; lo cual repre-

senta otra dificultad para aplicar el control semiaactivo de vibraciones donde únicamente se disponen de mediciones de aceleración. De hecho, en muchos sistemas mecánicos, los acelerómetros son los únicos dispositivos de medición disponibles para el control por retroalimentación, tales como el control de vibraciones antes mencionado o automóviles con suspensión activa (Choi, 2022), unidades generadoras de energía hidroeléctrica (Lin and Lin, 2021) y algunas aplicaciones de control de posicionamiento (Tran et al., 2021).

En este artículo se presenta un esquema de control de vibraciones por retroalimentación de los estados para edificios de un piso en los que solo es medible la aceleración, siendo ésta la salida disponible para la estabilización. Este objetivo se cumple en dos pasos. En primer lugar, se introduce un observador algebraico para estimar las variables de velocidad, desplazamiento y la integral de la posición. Dichas variables se obtienen simultáneamente en tiempo finito a partir de integrales iteradas de la medición de aceleración y las señales de entrada de control. Una ventaja del observador es que no necesita ajustar las ganancias del observador. Finalmente, las señales estimadas se emplean para la estabilización del edificio mediante un controlador por linealización y un PID, donde las ganancias son calculadas a partir de las frecuencias naturales del sistema. Dicha ley de control es aplicada a través de un MRD

---

<sup>\*</sup> This work was supported by Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) of Mexico for financial scholarship support and Project SEP-Cinvestav 62.

debido a su alto rendimiento en el sistemas de control semiactivo (Tharehalli Mata et al., 2021).

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 describe la dinámica del edificio de 1 piso equipado con un amortiguador magnetoreológico. El observador algebraico se describe en la Sección 2.1. El desarrollo del controlador propuesto se detalla en la Sección 2.2, mientras que los resultados de simulación se exponen en la Sección 3. Finalmente, las conclusiones y observaciones finales se proporcionan en la Sección 4.

## 2. MODELADO DE EDIFICIOS DE 1 PISO

Sea el edificio de 1 piso sometido ha actividad sísmica, el cual se encuentra equipado con un amortiguador magnetoreológico ubicado entre la base y el primer piso, como se ilustra en la figura 1, donde la fuerza del amortiguador es calculada mediante un modelo tangencial hiperbólico con dependencia de la entrada de corriente (Kasprzyk et al., 2014). Por facilidad, proponemos la siguiente simplificación del modelo:

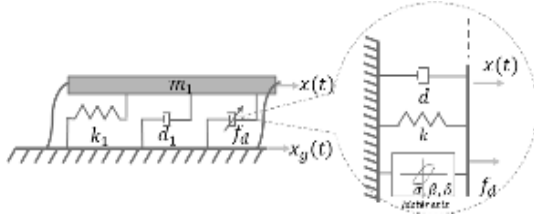


Fig. 1. Edificio de 1-piso equipado con un MRD

$$\begin{aligned} f_d(t) &= d\dot{x}(t) + kx(t) + \sigma w(t)u(t) + f_0, \\ w(t) &= \tanh(\beta\dot{x}(t) + \delta\text{sign}(x(t))) \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $d$  y  $k$  son los coeficientes de viscosidad y rigidez del amortiguador,  $\sigma$  es el factor de escala de la histéresis,  $w(t)$  representa el estado histerético dado por la función tangente hiperbólica,  $u(t)$  es la señal de control y  $f_0$  es la compensación de fuerza del amortiguador. El factor de escala  $\delta$  y el signo de desplazamiento determinan el ancho del ciclo histerético. Además, el coeficiente  $\beta$  es un factor de escala de la velocidad del amortiguador que define la pendiente histerética. Por consiguiente, la dinámica del sistema se puede expresar como

$$m_1\ddot{x}(t) + d_1\dot{x}(t) + k_1x(t) + f_d(t) = 0 \quad (2)$$

Reemplazando (1) en (2) y considerando que la salida es la aceleración, se obtiene

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= m_1^{-1}[(-d_1 - d)\dot{x}(t) + (-k_1 - k)x(t) - \\ &\quad \sigma \tanh(\beta\dot{x}(t) + \delta\text{sign}(x(t)))u(t) - f_0] \\ y(t) &= \ddot{x}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

donde la dinámica (3) depende de señales no disponibles y por lo tanto deben ser estimadas mediante un observador de estados.

### 2.1 Observador algebraico

Definiendo como  $a = -(d_1 + d)/m_1$ ,  $b = -(k_1 + k)/m_1$  y  $u(t) = v(t)/\sigma \tanh(\beta\dot{x}(t) + \delta\text{sign}(x(t)))$ , la ecuación (3) se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= a\dot{x}(t) + bx(t) + v(t) \\ y(t) &= \ddot{x}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

y definiendo la variable  $z(t) = y(t) - v(t)$  que depende de la entrada y salida, se usa el observador algebraico propuesto por Delpoux et al. (2021). Por consiguiente, se verifica la observabilidad del sistema (4) representando todos los estados en términos de la salida y la variable  $z(t)$ , así como de sus derivadas

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

de modo que el sistema es *observable* si satisface  $b \neq 0$ . En la práctica representa la existencia de elasticidad del edificio, lo cual implica que físicamente no es posible el caso  $b = 0$ . Por lo tanto, los estados se pueden estimar con el siguiente observador algebraico

$$P(t)\gamma(t) = q(t) \quad (5)$$

donde  $\gamma(t)$  es el vector conformado por los estados a estimar

$$\gamma(t) = \left( \dot{x}(t), x(t), \int_0^t x(\tau)d\tau, \int_0^t \tau x(\tau)d\tau \right) \quad (6)$$

y  $q(t)$  es un vector conformado a partir de la integración de las mediciones disponibles, definido de la siguiente manera:

$$q(t) = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ F_4(t) \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} \int_0^t \tau^2 y(\tau)d\tau \\ \int_0^t \tau^3 y(\tau)d\tau \\ \int_0^t \tau z(\tau)d\tau \\ \int_0^t \tau z(\tau)d\tau - \int_0^t \int_0^{\tau_1} (z(\tau_2) + ay(\tau_2))d\tau_2 d\tau_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Por otra parte, considerando que

$$\begin{aligned} \int_0^t \int_0^{\tau_1} z(\tau_2)d\tau_2 d\tau_1 &= t \int_0^t z(\tau_1)d\tau_1 - \int_0^t \tau_1 z(\tau_1)d\tau_1 \\ \int_0^t \int_0^{\tau_1} a\tau_2 y(\tau_2)d\tau_2 d\tau_1 &= \frac{at^2}{2} \int_0^t y(\tau_1)d\tau_1 - \frac{a}{2} \int_0^t \tau_1^2 y(\tau_1)d\tau_1 \end{aligned}$$

por facilidad  $F_4(t, z(t), y(t))$  se simplifica como sigue

$$\begin{aligned} F_4(t, z(t), y(t)) &= 2 \int_0^t \tau_1 z(\tau_1)d\tau_1 - t \int_0^t z(\tau_1)d\tau_1 \\ &\quad - \frac{at^2}{2} \int_0^t y(\tau_1)d\tau_1 + \frac{a}{2} \int_0^t \tau_1^2 y(\tau_1)d\tau_1 \end{aligned} \quad (8)$$

Finalmente,  $P(t)$  es una matriz que debe ser *invertible*, definida como:

$$P(t) = \begin{bmatrix} t^2 & -2t & 2 & 0 \\ t^3 & -3t^2 & 0 & 6 \\ 0 & at & -a & b \end{bmatrix} \quad (9)$$

para ello su determinante debe ser estrictamente positivo ( $-b^2t^5 > 0$ ). Esto implica que  $t > 0$  y  $b \neq 0$  para

que  $P(t)$  sea invertible, lo que constituye las condiciones de observabilidad algebraica. Por lo tanto, es necesario definir que  $t \geq \epsilon > 0$  para un  $\epsilon$  arbitrario muy pequeño. Por otra parte, cabe destacar que cuando  $t \rightarrow \infty$  la norma euclidiana  $\|P(t)\| \rightarrow \infty$ , en consecuencia el tiempo también debe ser acotado por un valor máximo  $t_{max}$ . Por lo tanto, los estados estimado son redefinidos:

$$\gamma_e(t) = \left( \dot{x}_e(t), x_e(t), \left[ \int_0^t x(\tau) d\tau \right]_e, \left[ \int_0^t \tau x(\tau) d\tau \right]_e \right) \quad (10)$$

y se calculan como:

$$\gamma_e(t) = \begin{cases} \text{arbitrario para } t \in [0, \epsilon) \\ P^{-1}(t)q(t) \text{ para } t \in [\epsilon, t_{max}] \end{cases} \quad (11)$$

Para el análisis del observador ante la presencia de perturbaciones se redefine  $z(t) = y(t) - \ddot{x}_g(t)$ , donde  $\ddot{x}_g(t)$  representa la acción sísmica y se estiman a través de la Ec. (11).

## 2.2 Ley de control

A partir de los estados estimados en la ecuación (10) se propone la siguiente ley de control

$$u(t) = \frac{-(k_p x_e(t) + k_d \dot{x}_e(t) + k_i \int x_e(t) dt + f_0)}{\alpha \tanh(\beta \dot{x}_e(t) + \delta \text{sign}(x_e(t)))} \quad (12)$$

Con la restricción de que  $\sigma \tanh(\beta \dot{x}_e(t) + \delta \text{sign}(x_e(t))) \neq 0$ , para los casos en que  $\sigma \tanh(\beta \dot{x}_e(t) + \delta \text{sign}(x_e(t))) = 0$  se define un valor arbitrario muy pequeño  $\epsilon_c > 0$ . Por otra parte, asumiendo que  $x_e(t) \approx x(t)$  tenemos que el sistema en lazo cerrado (3) con la ley de control (12) se puede expresar como

$$\ddot{x}(t) + \frac{d_1 + d + k_d}{m_1} \dot{x}(t) + \frac{k_1 + k + k_p}{m_1} x(t) + \frac{k_i}{m_1} \int x(t) dt = 0 \quad (13)$$

o equivalentemente en el dominio de la frecuencia se obtiene

$$s^3 + \frac{d_1 + d + k_d}{m_1} s^2 + \frac{k_1 + k + k_p}{m_1} s + \frac{k_i}{m_1} = 0 \quad (14)$$

lo cual permite por igualación de polinomios encontrar las ganancias del controlador a una frecuencia deseada (Rodríguez-Torres et al., 2021).

## 3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se muestran simulaciones numéricas con la intención de validar la teoría propuesta. Los experimentos se llevaron a cabo en Matlab <sup>®</sup> con un tiempo de muestreo de 1 ms. Los valores nominales del edificio fueron tomados de un prototipo experimental ubicado en el Laboratorio de Control Automático del CINVESTAV-IPN, que cuenta con un amortiguador magnetoreológico modelo RD 8040-1 de la Compañía LORD, donde la dinámica del sistema (3) se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_3 \tanh(\beta x_2 + \delta \text{sign}(x_1))u + \alpha_4 \end{bmatrix}}_{\zeta(t,x,v)} \quad (15)$$

Table 1. Parámetros de simulación de un edificio de 1 piso, equipado con un MRD

Parámetro	Valor
$m_1$	3.17 kg
$k_1$	9199 N/m
$d_1$	7.388 N·s/m
$d$	110.7796 N·s/m
$k$	0.9717 N/m
$\sigma$	0.2517
$\beta$	5.5162
$\delta$	-2.1770
$f_0$	9.9505 N

donde

$$\alpha_1 = (k - k_1)/m_1, \quad \alpha_2 = (d - d_1)/m_1, \\ \alpha_3 = \alpha/m_1, \quad \alpha_4 = f_0/m_1$$

Por otra parte, verificando la controlabilidad del sistema

$$C = [B \ AB]$$

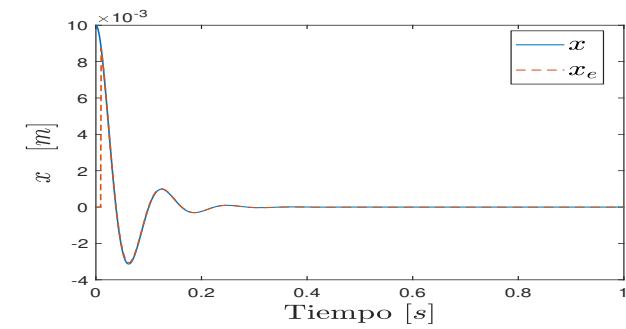
se tiene que el  $\text{rango}(C) = 2$ , por lo tanto el sistema es *completamente controlable*.

### 3.1 Estabilización del sistema en vibración libre

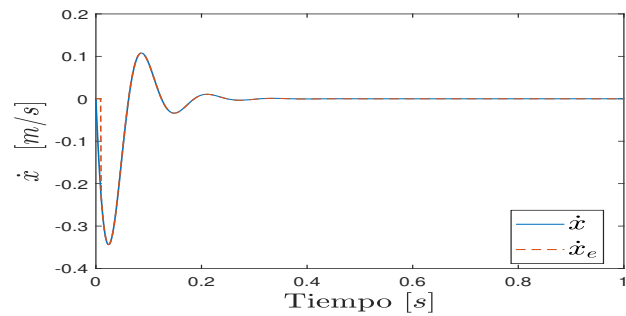
Para la estabilización del sistema a través de los estados estimados por medio del observador algebraico se usan condiciones iniciales arbitrarias  $x(0) = 0.01 \text{ m}$ ,  $\dot{x}(0) = -0.001 \text{ m/s}$  sin perturbación externa, con una constante  $\epsilon = 0.01$  para el observador y ganancias  $k_p = 2$ ,  $k_d = 0.5$ ,  $k_i = 1$  para el controlador PID. En consecuencia, en la figura 2 se presentan la estimación de los estados. A partir de los resultados obtenidos se observa que los errores de estimación son del orden de  $10^{-3}$  como se ilustra en la figura 3. Por otra parte, los estados 2 son usados para crear la señal de control mostrada en la figura 4. Una comparación entre la respuesta libre y controlada se presenta en la figura 5, donde  $x_a$  y  $x_c$  representan los desplazamientos en lazo abierto y cerrado, respectivamente. De este resultado se demuestra la estabilización del sistema con una ley de control continua y saturada por la limitación de voltaje en la entrada del actuador, la cual varía entre 0 y 10 V de acuerdo a la hoja de datos del amortiguador.

### 3.2 Estabilización ante perturbación arbitraria

En esta sección se evalúa el desempeño de la metodología con una perturbación arbitraria. Dicha perturbación es generada a través de un bloque random de amplitud  $10 \text{ m/s}^2$  y frecuencia de  $1 \text{ Hz}$ . Con el fin de verificar el desempeño del observador, las estimaciones se presentan en la figura 6. Las cuales generan errores de estimación en estado estacionario menores a  $5 \times 10^{-3}$ , como se muestra en la figura 7. Mientras la señal de control empleada se presenta en la figura 8. Una comparación entre la respuesta sin control y controlada bajo perturbaciones arbitrarias se presentan en la figura 9. Obteniéndose una reducción del 39.55% del máximo desplazamiento del edificio.

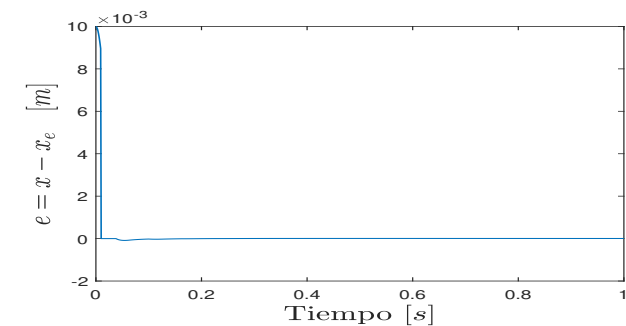


(a) Desplazamiento

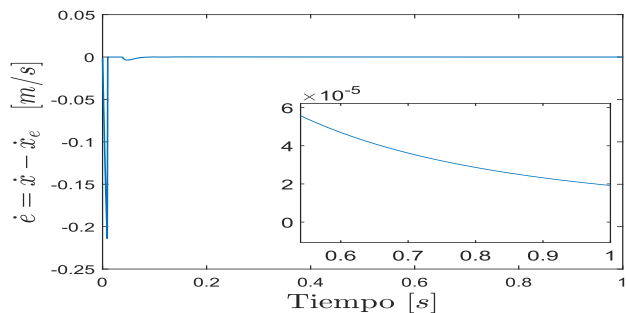


(b) Velocidad

Fig. 2. Estimación de los estados



(a) Error de estimación en desplazamiento



(b) Error de estimación en velocidad

Fig. 3. Errores de estimación

### 3.3 Estabilización ante perturbación sísmica

Con el fin de simular el sistema en entornos más reales, el edificio de un piso es perturbado mediante un reg-

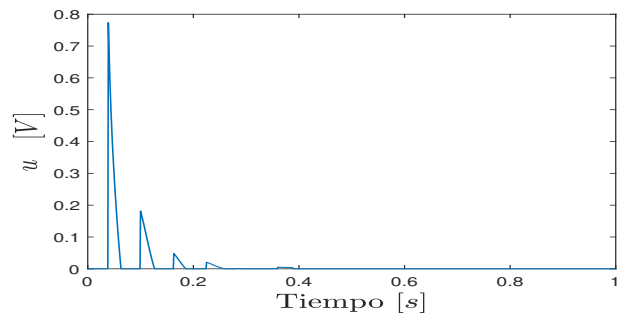


Fig. 4. Señal de control

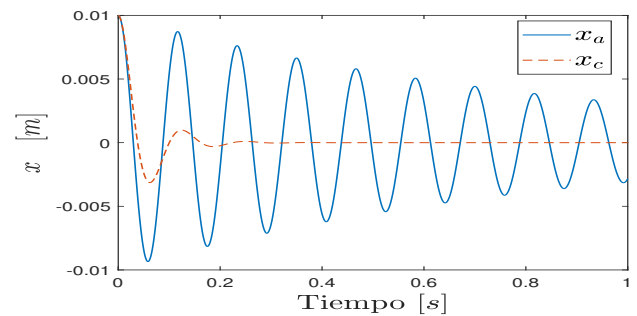
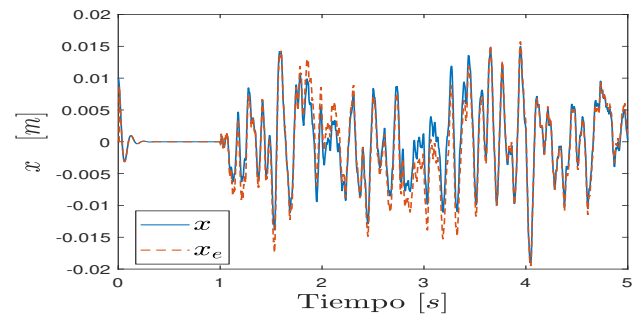
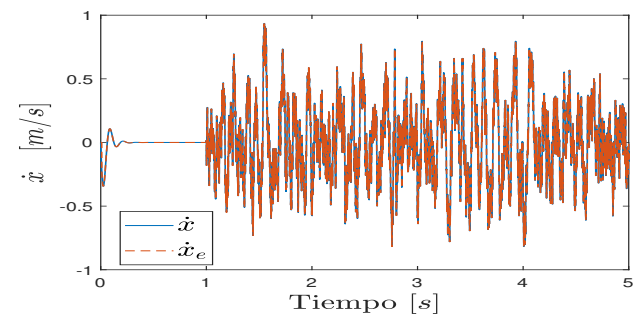


Fig. 5. Respuesta en lazo abierto y cerrado



(a) Desplazamiento



(b) Velocidad

Fig. 6. Estimación de los estados ante perturbación aleatoria

istro sísmico, específicamente la componente Norte-Sur del sismo de 1985 registrado por la Secretaría de Comu-

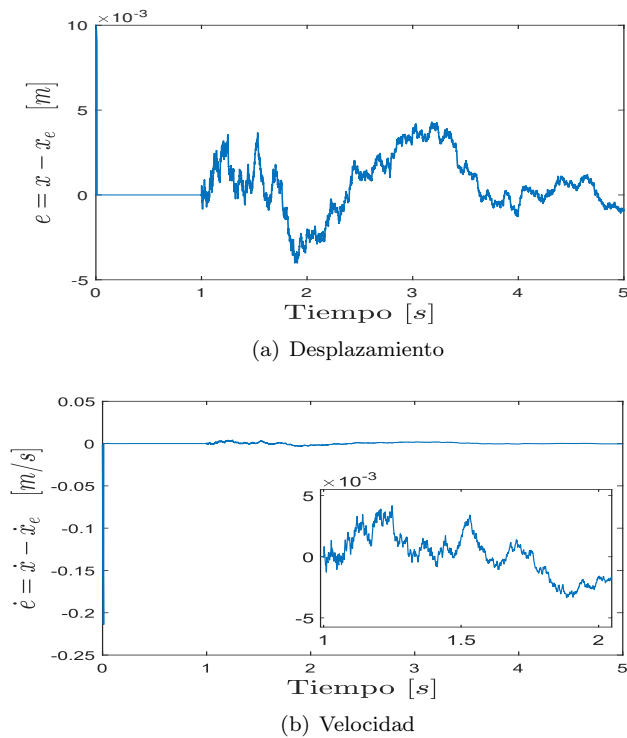


Fig. 7. Errores de estimación ante perturbación aleatoria

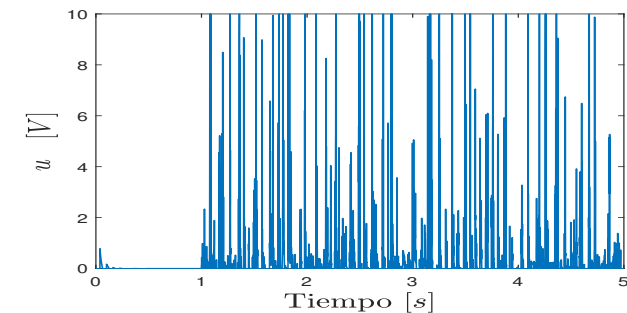


Fig. 8. Señal de control para el sistema perturbado por una señal aleatoria

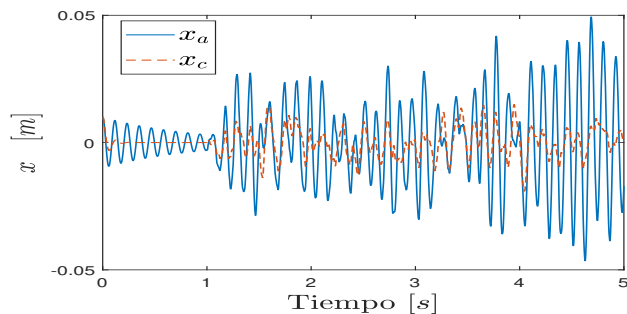


Fig. 9. Respuesta en lazo abierto y cerrado para el sistema perturbado por una señal aleatoria

nificaciones y Transportes (SCT). Adicionalmente, dicha componente sísmica ha sido escalada para ajustarse a los datos del modelo simulado. La figura 10, presenta la señal de control requerida para estabilizar el sistema bajo esta perturbación. La figura 11 presenta la comparación de

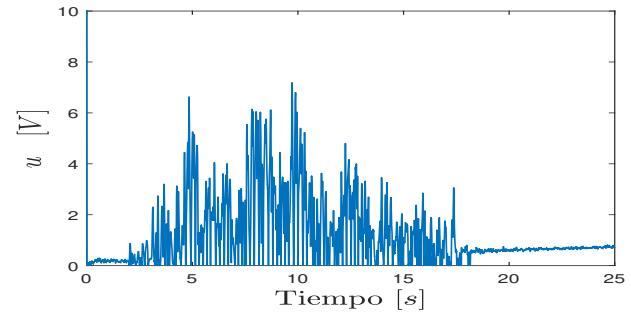


Fig. 10. Señal de control para el sistema perturbado por el sismo de México 1985

la respuesta en lazo abierto y cerrado para el sistema perturbado, donde las estimaciones usadas para el control se presentan en la figura 12. Los errores de estimación en estado estacionario son menores a  $2 \times 10^{-4}$ , como se muestra en la figura 13. De los resultados se puede

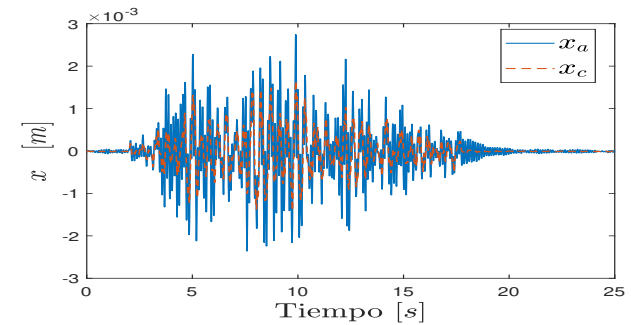


Fig. 11. Respuesta en lazo abierto y cerrado para el sistema perturbado por sismo de México 1985

apreciar que el sistema controlado presenta una reducción del 59.62% del desplazamiento con respecto al sistema en lazo cerrado. Por lo tanto, se demuestra que el control de vibraciones en los edificios es viable a partir únicamente de mediciones de aceleración, y una adecuada ley de control aplicada a un amortiguador magnetoreológico. Como trabajo futuro se pretende extender este análisis a edificios de múltiples grados de libertad.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un controlador PID diseñado a partir de la naturaleza del amortiguador magnetoreológico y del observador algebraico, con el fin de mejorar la respuesta de un edificio de un piso sometido a eventos sísmicos. El observador algebraico es funcional para estimar los estados no medibles a partir de la aceleración, y con ello implementar una ley de control a partir de los

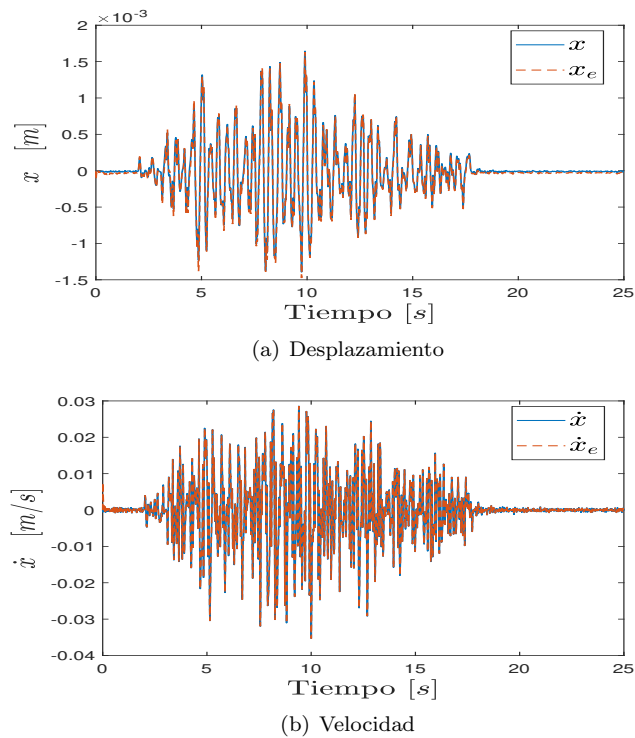


Fig. 12. Estimación de los estados ante perturbación sísmica de México 1985

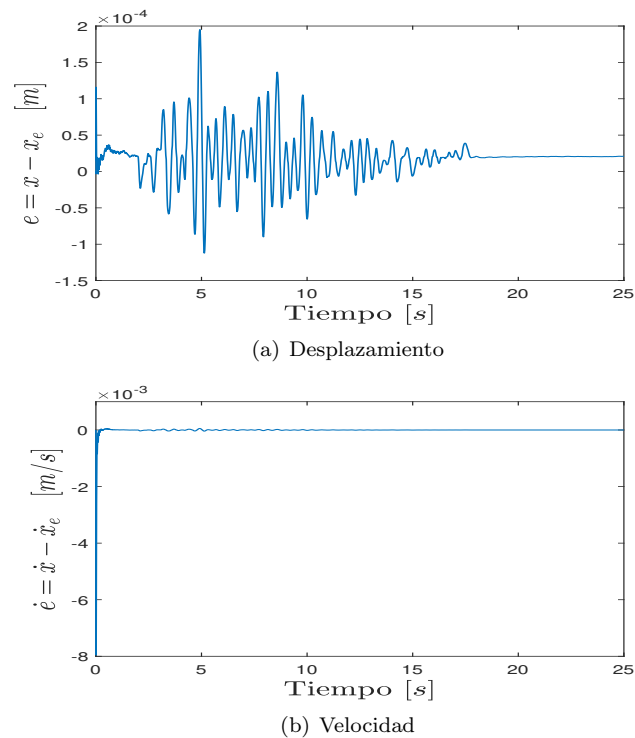


Fig. 13. Errores de estimación ante perturbación sísmica de México 1985

estados estimados. Asimismo, se mostró una reducción de los desplazamientos a través de un amortiguador magnetoreológico en estructuras, eficaz para aplicar en entornos reales. Por lo tanto, la metodología de diseño del controlador reduce considerablemente los desplazamientos y podría evitarse la distorsión entre pisos de los edificios.

#### AGRADECIMIENTOS

El primer autor desea expresar su agradecimiento a CONACyT por la beca otorgada para llevar a cabo esta investigación y al CINESTAV-IPN por el apoyo para la participación en este congreso. Jesús Morales-Valdez desea expresar su agradecimiento al programa Investigadores por México-CONACyT. Esta investigación fue patrocinada por el proyecto SEP-Cinvestav 62.

#### REFERENCIAS

- Choi, D. (2022). Min-max control for vibration suppression of mobile manipulator with active suspension system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 20(2), 618–626.
- Delpoux, R., Floquet, T., and Sira-Ramírez, H. (2021). Finite-time trajectory tracking of second-order systems using acceleration feedback only. *Automation*, 2(4), 266–277.
- Kasprzyk, J., Wyrwał, J., and Krauze, P. (2014). Automotive mr damper modeling for semi-active vibration control. In *2014 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics*, 500–505. IEEE.
- Lin, X. and Lin, W. (2021). Optimal allocation and control of magnetorheological dampers for enhancing seismic performance of the adjacent structures using whale optimization algorithm. *Shock and Vibration*, 2021.
- Rodriguez-Torres, A., Morales-Valdez, J., and Yu, W. (2021). Alternative tuning method for proportional-derived gains for active vibration control in a building structure. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 014233122111021052.
- Tharehalli Mata, G., Mokenapalli, V., and Krishna, H. (2021). Performance analysis of mr damper based semi-active suspension system using optimally tuned controllers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(10-11), 2871–2884.
- Tran, A.S., Vo, A.H., Tu, D.C.T., and Ngo, H.Q.T. (2021). Dynamical analysis and validation of motion control by filtering performance for aerial robotic system. *Journal of Vibroengineering*, 23(6), 1456–1475.
- Yoon, D.S., Kim, G.W., and Choi, S.B. (2021). Response time of magnetorheological dampers to current inputs in a semi-active suspension system: Modeling, control and sensitivity analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146, 106999.