

Semiactive vibration control for vibration reduction in buildings through ADRC [★]

Israel de Jesús Hernández Saldaña ^{*} Jesús Morales-Valdez ^{**}
Andrés Rodríguez-Torres ^{*} Wen Yu ^{*}

^{*} Automatic Control Department CINVESTAV-IPN, Mexico City, CDMX 07360 Mexico (e-mail: israel.hernandezs@cinvestav.mx, andres.rodriguez@cinvestav.mx, yuw@ctrl.cinvestav.mx)

^{**} CONACYT-CINVESTAV IPN, Mexico City, CDMX 07360 Mexico (e-mail: jmoralesv@ctrl.cinvestav.mx)

Resumen In this paper an Active Disturbance Reflection Control (ADRC) technique is proposed for semi-active vibration control for building structures. The ADRC objective is to reduce the displacement of the building, regulating the force of a magnetorheological damper to provide rigidity to the structure and thus cancel the effects of seismic disturbances. In addition, an algebraic state estimator is proposed to estimate the displacement and velocity required by the ARDC. Simulation results validate the performance of the proposed scheme.

Keywords: semi-active control, active disturbance rejection control, algebraic observe, seismic disturbance, building structure

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad en las estructuras civiles ha sido objeto de extensas investigaciones, particularmente en lugares con importante actividad sísmica, con el fin de reducir el riesgo de colapso en edificios, puentes, subterráneos, entre otros.

El control de vibraciones en estructuras se puede clasificar principalmente en pasivos y activos. La combinación de estos métodos se le conoce como control híbrido, dentro de ellos destaca el control semi-activo. El enfoque principal son sistemas cuyo consumo de energía es menor al que se usaría con el control activo convencional. Otra diferencia, es que la acción de control es producida por el movimiento de la estructura, pero está regulado por una fuente externa de energía, que se caracteriza por adaptarse a los requerimientos del sistema en tiempo real, modificando sus propiedades mecánicas y generan una mayor fuerza (Oliveira Fernando et al , 2018).

En el marco del control automático, existe la necesidad de diseñar controladores que reduzcan los efectos de los sismos para evitar desplazamientos que puedan dañar las estructuras civiles. En el trabajo de Qing et al (2017), se propone un control semi-activo usando algoritmos con funciones discontinuas en combinación con una red neuronal Deep Learning para estabilizar la estructura. Otro ejemplo de interés es el desarrollado en Jianhui et al

(2019), donde usan un control por modos deslizantes para minimizar desplazamientos producto de sismos, junto con una terminal neuronal para evitar el fenómeno del chattering. En el artículo de Xiofang et al (2021) se propone una estrategia de control descentralizado por superposición y control H_∞ , para suprimir las vibraciones de un conjunto de estructuras aledañas.

En este artículo se plantea el diseño del control con un amortiguador magnetoreológico (MRD, siglas en inglés), que presenta un comportamiento no lineal, el cual no es medible. Sin embargo, usando la estrategia de control por rechazo activo de perturbaciones se puede estimar y con ello minimizar la perturbación sísmica. El objetivo práctico de ésta propuesta es minimizar los desplazamientos por esfuerzo cortante causado por un sismo, y con ello reducir la posibilidad de daño estructural. Adicionalmente, me introduce un observador algebraico que estima las señales no disponibles de desplazamiento y velocidad requeridas por el ADRC.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 describe la dinámica del edificio de múltiples pisos equipado con un amortiguador magnetoreológico en el primer nivel. El observador algebraico se describe en la Sección 4. El desarrollo del controlador propuesto se detalla en la Sección 3, mientras que los resultados de simulación se exponen en la Sección 5. Finalmente, las conclusiones y trabajo futuro se proporcionan en la Sección 6 y 7, respectivamente.

[★] This work was supported by Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) of México for financial scholarship support and Project SEP-Cinvestav 62.

2. MODELO MATEMÁTICO

Un edificio se puede modelar como una estructura rígida con determinada elasticidad y amortiguamiento, características obtenidas por los materiales que intervienen en su construcción. Una representación matemática que describe su comportamiento, es el modelo de la viga de Timoshenko:

$$EI \frac{\partial^2 \alpha(x, t)}{\partial x^2} - GA_s (\alpha(x, t) - \frac{\partial r(x, t)}{\partial x}) = \rho I \frac{\partial^2 \alpha(x, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

donde ρ define la densidad de la masa, A_s corresponde al área de la sección transversal, I es el momento de inercia, E es el módulo de elasticidad, G es el módulo de cortante, dx describe el largo de una sección de la viga de tamaño L , $r(x, t)$ define el desplazamiento lateral y finalmente, $\alpha(x, t)$ describe la rotación.

Considerando las propiedades de ortogonalidad de las formas modales, y haciendo la debida transformación se puede obtener la forma dinámica del modelo de la viga de Timoshenko Timoshenko (1921), tal que:

$$\ddot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) + 2\xi \mathbf{w} \dot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) + \mathbf{w}^2 \mathbf{T}(\mathbf{t}) = -\Gamma \ddot{\mathbf{u}}_{\mathbf{g}}(\mathbf{t}) \quad (2)$$

donde Γ es el factor de participación modal, en concordancia con el documento de Rostami et al (2021).

A partir del sistema de segundo orden (2), se construye la representación de estado para la n -ésima forma modal. Realizando el cambio de variables $\mathbf{T}(\mathbf{t}) = \mathbf{z}_1 \rightarrow \dot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) = \mathbf{z}_2$, $\dot{\mathbf{z}} = [\dot{\mathbf{z}}_1 \dot{\mathbf{z}}_2]$ y considerando $\mathbf{D} = \mathbf{0}$, se obtienen las matrices \mathbf{A} , \mathbf{B} y \mathbf{C} , definidas:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ K_g & D_g \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} \\ -\Gamma_1 \\ \vdots \\ -\Gamma_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{S} \cdot [\phi_1 \cdots \phi_n] [K_g \ D_g]$$

donde $\mathbf{I}_{n \times n}$ es una matriz identidad, $\mathbf{0}_{n \times n}$ es una matriz nula, \mathbf{S} es la matriz de ubicación del sensor, Φ es la matriz modal. Se definen las matrices modales:

$$K_g = \begin{bmatrix} -w_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -w_n^2 \end{bmatrix} \quad D_g = \begin{bmatrix} -2\xi_1 w_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -2\xi_n w_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Es claro que se requiere conocer el total de las perturbaciones para cancelar su efecto. Con ayuda del control por rechazo activo de perturbaciones (ADRC, siglas en inglés), y un observador de estado extendido se puede alcanzar la meta deseada. Este último permite estimar las incertidumbres y perturbaciones no modelada, e inclusive las no linealidades del MRD, para posteriormente cancelar su efecto en el edificio empleando el ADRC.

3.1 Diseño del ADRC

Para implementar la estrategia ADRC, se considera el modelo discretizado (2), y se agrega el elemento de control \mathbf{U}_{MR} , resultando:

$$\ddot{\mathbf{T}} + 2\xi \mathbf{w} \dot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) + \mathbf{w}^2 \mathbf{T}(\mathbf{t}) = -\Gamma \ddot{\mathbf{u}}_{\mathbf{g}} + \Gamma \mathbf{U}_{MR} \quad (5)$$

donde $\mathbf{U}_{MR} = \mathbf{I}_{MR} \mathbf{F}_{MR}$. Se sabe que \mathbf{F}_{MR} es la fuerza del MRD, \mathbf{I}_{MR} es un vector para indicar la ubicación del actuador MRD en el edificio. Del artículo de Félix-Herrán et al (2006), se toma el modelo de Bouc-Wen, tal que :

$$\mathbf{F}_{MR} = \alpha \epsilon + \sigma_1 \dot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) + \sigma_2 \mathbf{T}(\mathbf{t}) \quad (6)$$

Sustituyendo (6) en (5), se obtiene:

$$\ddot{\mathbf{T}} + 2\xi \mathbf{w} \dot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) + \mathbf{w}^2 \mathbf{T}(\mathbf{t}) = \quad (7)$$

$$-\Gamma \ddot{\mathbf{u}}_{\mathbf{g}} + \Gamma \mathbf{I}_{MR} (\alpha \epsilon + \sigma_1 \dot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) + \sigma_2 \mathbf{T}(\mathbf{t})) \quad (8)$$

a partir de (8), la acción de control se divide en una parte lineal $U_L = \sigma_1 \dot{T}(t) + \sigma_2 T(t)$, y otra no lineal, $\eta = \alpha \epsilon$, esta última se considerada como una incertidumbre del actuador. En consecuencia la ecuación (8) se vuelve:

$$\ddot{\mathbf{T}} = -2\xi \mathbf{w} \dot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) - \mathbf{w}^2 \mathbf{T}(\mathbf{t}) - \Gamma \ddot{\mathbf{u}}_{\mathbf{g}} + \Gamma \mathbf{I}_{MR} (\eta + \mathbf{U}_L) \quad (9)$$

por simplicidad, se definen: $\mathbf{f}_d = 2\xi \mathbf{w} \dot{\mathbf{T}}(\mathbf{t})$, $\mathbf{f}_s = \mathbf{w}^2 \mathbf{T}(\mathbf{t})$, $\mathbf{f}_e = \Gamma \ddot{\mathbf{u}}_{\mathbf{g}}$ y además,

$$\phi = \Gamma \mathbf{I}_{MR} \eta, \quad \mathbf{U}_t = \Gamma \mathbf{I}_{MR} \mathbf{U}_L \quad (10)$$

sustituyendo las expresiones de (10) en (9), se obtiene:

$$\ddot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) = -\mathbf{f}_d - \mathbf{f}_s - \mathbf{f}_e + \mathbf{U}_t + \phi$$

agrupando términos se llega a la forma:

$$\ddot{\mathbf{T}}(\mathbf{t}) = U_t + \zeta(\mathbf{t}) \quad (11)$$

$$\zeta(\mathbf{t}) = -[f_d + f_s + f_e - \phi] \quad (12)$$

Finalmente las ecuaciones (11) y (12), presentan la forma para aplicar la estrategia ADRC. Note que $\zeta(\mathbf{t})$ es desconocido y por lo tanto se debe estimar mediante un observador de estados.

3.2 Observador de perturbaciones

Para diseñar el observador de estados se sigue la metodología presentada en (Ramírez-Neria et al , 2021). Partiendo de (11), se realiza el cambio a variables $y_1 = T(t)$ y $y_2 = \dot{T}(t)$. De manera que el sistema dinámico (9) se puede reescribir como sigue

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2 \\ \dot{y}_2 &= U_t + \zeta(\mathbf{t}) \end{aligned} \quad (13)$$

Para modelar la dinámica de las perturbaciones usando un polinomio de Taylor, se define $z_e \approx \zeta(\mathbf{t})$, tal que $\zeta(\mathbf{t}) \approx 0$. Por consiguiente el sistema (13), se reescribe en forma de una cadena de integradores

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2 \\ \dot{y}_2 &= U_t + z_e \\ \dot{z}_e &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Por otro lado, las variables \hat{y}_1 y \hat{y}_2 son introducidas para indicar la estimación de $\zeta(t)$, tal que:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{y}}_1 &= \hat{y}_2 + \Lambda_2(y_1 - \hat{y}_1) \\ \dot{\hat{y}}_2 &= U_t + \hat{z}_e + \Lambda_1(y_1 - \hat{y}_1) \\ \dot{\hat{z}}_e &= \Lambda_0(y_1 - \hat{y}_1)\end{aligned}\quad (15)$$

donde Λ_l son las matrices de ganancia para el observador con $l = \{0, 1, 2\}$, $e_{y_1} = y_1 - \hat{y}_1$ es el error de estimación del observador. Para modelar la dinámica del error se emplea el polinomio de Taylor de grado tres, obteniéndose:

$$\zeta(t) = \mathbf{e}_{y_1}^{\text{III}} + \Lambda_2 \ddot{e}_{y_1} + \Lambda_1 \dot{e}_{y_1} + \Lambda_0 e_{y_1} \quad (16)$$

recordando que $\zeta(t) \approx 0$, se tiene:

$$\mathbf{e}_{y_1}^{\text{III}} + \Lambda_2 \ddot{e}_{y_1} + \Lambda_1 \dot{e}_{y_1} + \Lambda_0 e_{y_1} = \mathbf{0}$$

bajo la suposición de condiciones iniciales nulas y aplicando la transformada de Laplace, el polinomio anterior se puede expresar en el dominio de la frecuencia como:

$$\mathbf{e}_{y_1}(s)[\mathbf{I}_n s^3 + \Lambda_2 s^2 + \Lambda_1 s + \Lambda_0] = \mathbf{0}$$

simplificando el polinomio:

$$\mathbf{I}_n s^3 + \Lambda_2 s^2 + \Lambda_1 s + \Lambda_0 = \mathbf{0}$$

donde I_n es una matriz identidad de orden n . Sí suponemos que las matrices Λ_l tienen parámetros constantes, y aproximando sus valores de tal forma que sean las raíces del polinomio de Taylor, se hace la siguiente conjetura:

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_n s^3 + \Lambda_2 s^2 + \Lambda_1 s + \Lambda_0 &\approx \mathbf{I}_n s^3 + 3\mathbf{W}_o s^2 + 3\mathbf{W}_o^2 s + \mathbf{W}_o^3 \\ \mathbf{I}_n s^3 + 3\mathbf{W}_o s^2 + 3\mathbf{W}_o^2 s + \mathbf{W}_o^3 &= (\mathbf{I}_n s + \mathbf{W}_o)^3\end{aligned}$$

donde \mathbf{W}_o es una matriz diagonal cuyos valores pertenecen al ancho de banda del observador, $\omega_{o_k} \in R^+$, con $k = \{1, 2, \dots, n\}$. Por definición resulta:

$$\mathbf{W}_o = \text{diag}[\omega_{o_1} \ \omega_{o_2} \ \dots \ \omega_{o_n}] \quad (17)$$

tal que $\hat{z}_e \approx z_e \rightarrow \hat{z}_e \approx \zeta(t)$, por lo tanto se puede decir que se conoce el total de la perturbaciones, no linealidades e incertidumbres no modeladas.

3.3 Diseño de control PD para el ADRC

Proponiendo una estrategia lineal de control proporcional derivativo (PD), tal que:

$$\mathbf{U}_t = -\mathbf{K}_D \dot{\hat{\mathbf{T}}}(t) - \mathbf{K}_P \hat{\mathbf{T}}(t) - \hat{\mathbf{z}}_e \quad (18)$$

con $\mathbf{K}_D = 2\xi\mathbf{w} + \Gamma\mathbf{I}_{MR}\sigma_1$ y $\mathbf{K}_P = \mathbf{w}^2 + \Gamma\mathbf{I}_{MR}\sigma_2$, tal que la dinámica del edificio en lazo cerrado se expresa:

$$\ddot{\hat{\mathbf{T}}} + \mathbf{K}_D \dot{\hat{\mathbf{T}}}(t) + \mathbf{K}_P \hat{\mathbf{T}}(t) = \zeta(t) - \hat{\mathbf{z}}_e \quad (19)$$

donde, \mathbf{K}_D y \mathbf{K}_P representan el amortiguamiento y rigidez del edificio compensado por el MRD. En el dominio de la frecuencia el sistema en lazo cerrado (19) queda expresado:

$$s^2 \mathbf{I}_n + \mathbf{K}_D s + \mathbf{K}_P = s^2 \mathbf{I}_n + 2\mathbf{W}_{cl} s + \mathbf{W}_{cl}^2 \quad (20)$$

donde W_{cl} es una matriz diagonal que contiene las frecuencias del controlador, $\mathbf{W}_c = \text{diag}[\omega_{c_1} \ \omega_{c_2} \ \dots \ \omega_{c_n}]$.

4. ESTIMADOR ALGEBRAICO

En esta sección se introduce un observador algebraico con el fin de estimar las mediciones de desplazamiento y velocidad, que no están disponibles durante un evento sismo.

Partiendo de la dinámica en lazo cerrado del sistema, se tiene:

$$\ddot{T}_i + 2\xi_i w_i \dot{T}_i(t) + w_i^2 T_i(t) = -\Gamma_i \ddot{u}_g + \Gamma_i I_{MR} F_{MR} \quad (21)$$

con $i = \{1, \dots, n\}$, para la n -ésima forma modal. Note que, en esta sección se emplea el caso escalar para (21), tal que

$$\begin{aligned}\ddot{T}_i &= -2\xi_i w_i \dot{T}_i(t) - w_i^2 T_i(t) + u_i(t) \\ y_i(t) &= \dot{T}_i\end{aligned}$$

donde $y_i(t)$ es la salida del sistema y $u_i(t) = -\Gamma_i \ddot{u}_g + \Gamma_i I_{MR} F_{MR}$ la señal de entrada, ambas medibles. Luego, se define $z_i(t) = y_i(t) - u_i(t)$ para posteriormente formar el sistema

$$\begin{aligned}z_i(t) &= -2\xi_i w_i \dot{T}_i(t) - w_i^2 T_i(t) \\ y_i(t) &= \dot{T}_i\end{aligned}\quad (22)$$

ahora se definen los estados $\dot{T}_i(t)$ y $T_i(t)$ a partir de las variables medibles, derivando $z_i(t)$

$$\dot{z}_i(t) = -2\xi_i w_i \ddot{T}_i(t) - w_i^2 \dot{T}_i(t) \quad (23)$$

Suponiendo que $-\omega_i^2$ es invertible, entonces

$$\begin{aligned}\dot{T}_i(t) &= [-\omega_i^2]^{-1}[\dot{z}_i + 2\xi_i w_i \ddot{T}_i(t)] \\ &= [-\omega_i^2]^{-1}[\dot{z}_i + 2\xi_i w_i y(t)] \\ &= [-\omega_i^2]^{-1}[\dot{z}_i + 2\xi_i w_i \dot{T}_i] \\ &= [-\omega_i^2]^{-1}[\dot{z}_i + 2\xi_i w_i [-\omega_i^2]^{-1}[\dot{z}_i + 2\xi_i w_i y_i(t)]]\end{aligned}$$

y finalmente se obtiene:

$$\begin{aligned}\dot{T}_i(t) &= [-\omega_i^2]^{-1}[\dot{z}_i + 2\xi_i w_i y_i(t)] \\ T_i(t) &= [-\omega_i^2]^{-1}[\dot{z}_i + 2\xi_i w_i (-\omega_i^2)^{-1}(\dot{z}_i + 2\xi_i w_i y_i(t))]\end{aligned}\quad (24)$$

Para hacer la estimación se necesita formar un sistema de ecuaciones lineales con las señales medibles. Para ello se propone multiplicar la salida $y_i(t)$ por funciones t^2 y t^3 , y posteriormente se integran con respecto al tiempo, lo que produce:

$$\begin{aligned}F_1(t, y) &\triangleq \int_0^t \tau_1^2 y_i(\tau_1) d\tau_1 \\ \int_0^t \tau_1^2 \ddot{T}_i(\tau_1) d\tau_1 &= t^2 \dot{T}_i(t) - 2 \int_0^t \tau_1 \dot{T}_i(\tau_1) d\tau_1 \\ F_1(t, y) &= t^2 \dot{T}_i(t) - 2t T_i(t) + 2 \int_0^t T_i(\tau_1) d\tau_1\end{aligned}\quad (25)$$

la segunda expresión es:

$$\begin{aligned}
 F_2(t, y) &\triangleq \int_0^t \tau_1^3 y_i(\tau_1) d\tau_1 \\
 &\int_0^t \tau_1^3 \ddot{T}_i(\tau_1) d\tau_1 = t^3 \dot{T}_i(t) - 3t^2 T_i(t) + 6 \int_0^t \tau_1 T_i(\tau_1) d\tau_1 \\
 F_2(t, y) &= t^3 \dot{T}_i(t) - 3t^2 T_i(t) + 6 \int_0^t \tau_1 T_i(\tau_1) d\tau_1 \quad (26)
 \end{aligned}$$

La tercera ecuación se calcula premultiplicando por t a la variable $z_i(t)$, e integrando con respecto al tiempo, tal que:

$$\begin{aligned}
 F_3(t, z) &\triangleq \int_0^t \tau_1 z_i(\tau_1) d\tau_1 = \\
 &(-2\xi_i w_i)(tT_i(t) - \int_0^t T_i(\tau_1) d\tau_1) - w_i^2 \int_0^t T_i(\tau_1) d\tau_1 \quad (27)
 \end{aligned}$$

por último, se selecciona (23) y se multiplica por t , y posteriormente se integra en dos ocasiones, logrando:

$$\begin{aligned}
 &\int_0^t \int_0^{\tau_1} \tau_2 \dot{z}_i(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1 = \\
 &(-2\xi_i w_i) \int_0^t \int_0^{\tau_1} \tau_2 y_i(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1 - w_i^2 \int_0^t \int_0^{\tau_1} \tau_2 \dot{T}_i(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1 \\
 F_4(t, z, y) &= -2w_i^2 \int_0^t \tau_1 T_i(\tau_1) d\tau_1 + w_i^2 t \int_0^t T_i(\tau_1) d\tau_1 \quad (28)
 \end{aligned}$$

A partir de las expresiones (25), (26), (27) y (28), se formula un sistema lineal que dependen de la integración de mediciones disponibles, que permite estimar las variables desconocidas, como se presenta a continuación:

$$P(t)\nu(t) = \mu(t) \quad (29)$$

donde, $\nu(t)$ es el vector de variables a estimar

$$\nu(t) = \begin{bmatrix} \dot{T}_i(t) \\ \hat{T}_i(t) \\ \int_0^t T_i(\tau_1) d\tau_1 \\ \int_0^t \tau_1 T_i(\tau_1) d\tau_1 \end{bmatrix}$$

$P(t)$ es la matriz de parámetros

$$P(t) = \begin{bmatrix} t^2 & -2t & 2 & 0 \\ t^3 & -3t^2 & 0 & 6 \\ 0 & -2\xi_i w_i t & 2\xi_i w_i & -w_i^2 \\ 0 & 0 & w_i^2 t & -2w_i^2 \end{bmatrix}$$

y $\mu(t)$ es el vector de variables medibles:

$$\mu(t) = \begin{bmatrix} F_1(t, y) \\ F_2(t, y) \\ F_3(t, z) \\ F_4(t, z, y) \end{bmatrix}$$

Si, $\det(P(t)) \neq 0$, entonces existe un $P(t)^{-1}$ para un $t > 0$ con $w_i^2 \neq 0$, tal que

$$\nu(t) = P(t)^{-1}\mu(t) \quad (30)$$

Entonces, los estados estimados corresponden a $\dot{\hat{T}}_i(t) = \nu_{1,i}(t)$ y $\hat{T}_i(t) = \nu_{2,i}(t)$, con $i = \{1, \dots, n\}$ para la n -ésima forma modal.

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el objetivo de validar el desarrollo teórico presentado, a continuación se presentan una serie de simulaciones numéricas a partir de los datos de la estructura de ensayos presentando en el artículo de Ramírez-Neria et al (2021), cuyos parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez, son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de la estructura de ensayos

Piso	M (Kg)	C (Ns/m)	K (N/m)
1	10.78	700.14	19, 110
2	9.17	278.18	12,108
3	9.14	546.84	11, 966
4	9.12	372.54	11, 850
5	9.08	375.97	12, 406

Para el proceso de transformación modal señalado en (Inman , 2006), se puede usar la matriz:

$$\psi = \begin{bmatrix} 0,1023 & 0,1781 & 0,1850 & -0,1214 & 0,0401 \\ -0,1768 & -0,1427 & 0,0805 & -0,2030 & 0,0988 \\ 0,1948 & -0,0532 & -0,1731 & -0,1284 & 0,1489 \\ -0,1552 & 0,1926 & -0,1090 & 0,0469 & 0,1855 \\ 0,0613 & -0,1087 & 0,1444 & 0,1795 & 0,2037 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Para realizar la simulación se emplea el registro sísmico de 1985 en la componente Norte Sur, registrado por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), el cual ha sido escalada previamente para que su magnitud esté acorde a los datos del prototipo, como se ilustra en la fig. 1. El tiempo de muestreo en la simulación es de 1 ms. La comparación entre señales estimadas por

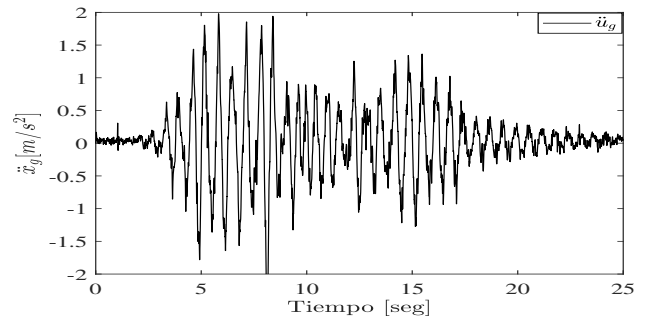


Figura 1. Excitación sísmica

el observador algebraico y la respuesta obtenida por la estructura de ensayos, se visualizan en las figuras 2 y 3, que corresponden al primer y quinto piso respectivamente. Note que estas señales convergen a los valores esperados. Aunque existe una pequeña diferencia, ésta tiende a cero conforme transcurre el tiempo.

Por otro lado, las figuras 4 y 5 presentan la respuesta de los desplazamientos de los pisos 1 y 5, respectivamente,

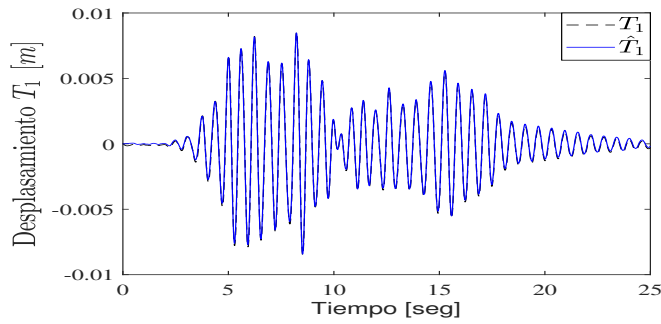


Figura 2. Estado T_1 vs \hat{T}_1 .

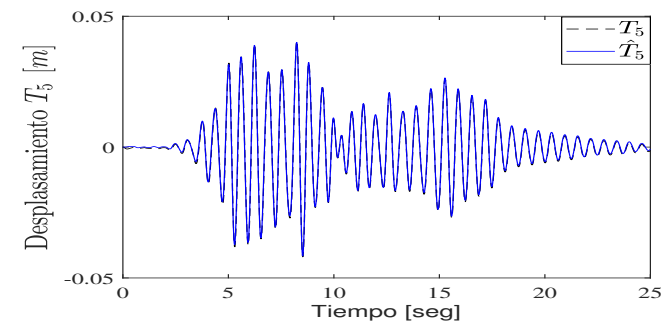


Figura 3. Estado T_5 vs \hat{T}_5 .

para la estrategia de control $ADRC+OA$ en comparación con la respuesta libre en las figuras 2 y 3. Los niveles de atención por piso alcanzados mediante la técnica $ADRC+OA$, se pueden encontrar en la tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de atenuación por nivel de la estructura.

Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5
56.8152	29.9301	24.4805	22.0204	21.1109

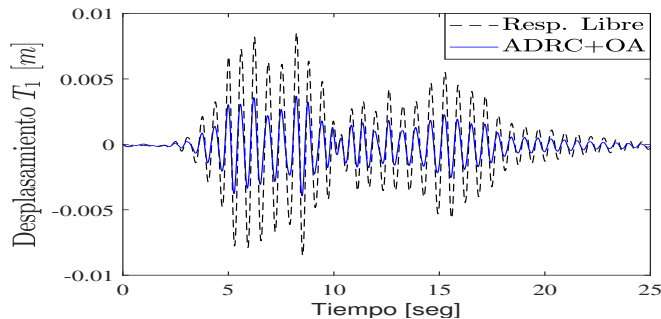


Figura 4. Desplazamiento Primer Nivel.

Se visualiza una salida nominal máxima de 7,0840N. La señal de fuerza del MRD bajo la estrategia de control $ADRC+OA$, aparece en la figura 6, la cual satisface las restricciones físicas de un actuador.

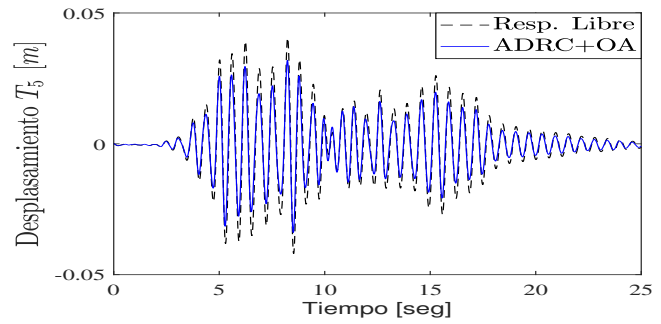


Figura 5. Desplazamiento Quinto Nivel.

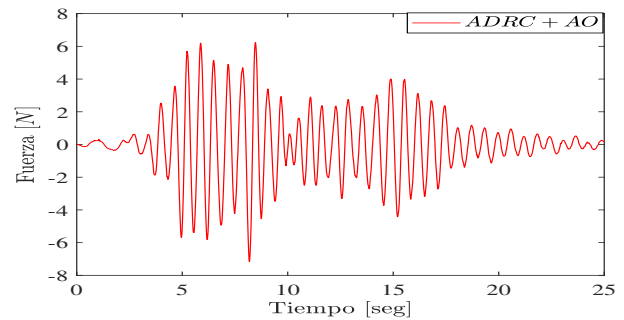


Figura 6. Fuerza del amortiguador MR.

6. CONCLUSIÓN

Se ha presentado el diseño de un $ADRC+AO$ que permite minimizar los desplazamientos en estructuras de edificios causados por acciones sísmicas. Otro aspecto a destacar es que solo se consideran señales medibles, esto incluye la acción no lineal del amortiguador magnetoreológico, la cual es estimada por el observador extendido, luego con el control $ADRC$ se usa para rechazar las perturbación sísmica, lo que permite el diseño de un control lineal para poder manipular la fuerza de salida del actuador.

7. DISCUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se ha abordado el diseño de la estrategia $ADRC+OA$ para minimizar los efectos de vibraciones en estructuras, cuya validación se ha llevado a cabo mediante simulaciones numéricas. El trabajo futuro consiste en llevar a cabo experimentos en laboratorio, con el actuador MRD y la estructura de ensayos.

8. RECONOCIMIENTO

El primer y tercer autor desean expresar su agradecimiento a CONACYT por la beca otorgada para la realización de esta investigación. Jesús Morales-Valdez desea expresar su agradecimiento al programa Investigadores por México-CONACYT. Esta investigación fue patrocinada por el proyecto SEP-Cinvestav 62.

REFERENCIAS

- OLIVEIRA FERNANDO, AYALA BOTTO MIGUEL, MORAIS PAULO, SULEMAN AFZAL, *Semi-active structural vibration control of base-isolated buildings using magnetorheological dampers*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control (2018), Vol. 37(3) pag. 565–576, 2017
- QING WANG, JIANHUI WANG, XIAOFANG HUANG AND LI ZHANG, *Semiactive nonsmooth control for building structure with deep learning*, Hindawi, Complexity, Volume (2017), Article ID 6406179, 8 pag, <https://doi.org/10.1155/2017/6406179>
- JIANHUI WANG, WENLI CHEN, ZICONG CHEN, YUNCHANG HUANG, XING HUANG, WENQIANG WU, BIAOTAO HE AND CHUNLIANG ZHANG, *Neural terminal sliding-mode control for uncertain systems with building structure vibration*, Hindawi, Complexity, Volume (2019), Article ID 1507051, 9 pag, <https://doi.org/10.1155/2019/1507051>
- XIAOFANG KANG, JIAN WU, YEWELI ZHANG, GUOLIANG LIU, SUHUI ZHANG, XUETING TAO, GUANGHUI XIA, DAWELI MAN AND QINGHU XU, *Overlapping decentralized control strategies of building structures vibration with time delay based on H_∞ control algorithms under seismic excitation*, Hindawi, Shock and Vibration, Volume (2021), Article ID 9115938, 12 pag, <https://doi.org/10.1155/2021/9115938>
- DELPOUX, R., FLOQUET, T., SIRA-RAMÍREZ, H., *Finite-Time Trajectory Tracking of Second-Order Systems Using Acceleration Feedback Only*, Automation (2021), 2, 266–277. <https://doi.org/10.3390/automation2040017>
- LUIS C. FÉLIX-HERRÁN, JOSÉ DE JESÚS RODRÍGUEZ-ORTIZ, RICARDO A. RAMÍREZ-MENDOZA, *Modelo de una Suspensión Semiactiva con un Amortiguador Magnetoreológico*, Congreso Nacional de Control Automático, UNAM (2006)
- INMAN, D.J., *Vibration with control*. John Wiley & Sons, (2006). pag. 63-81
- RAMÍREZ-NERIA, M., MORALES-VALDEZ, J., AND YU, W.. *Active vibration control of building structure using active disturbance rejection control*. Journal of Vibration and Control, (2021), 10775463211009377.
- ROSTAMI, P., MAHSULI, M., FARID GHAHARI, S., AND TACIROGLU, E. , *Bayesian joint state-parameter-input estimation of exible-base buildings from sparse measurements using timoshenko beam models*. Journal of Structural Engineering, (2021),147(10), 04021151.
- TIMOSHENKO, S.P.. *On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars*, (1921), The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(245), 744-746.