

INFLUENCES OF THE CHARACTERISTICS OF A SEMI-ACTIVE FRICTION-TYPE SEISMIC PROTECTION SYSTEMS IN THE SEISMIC RESPONSE OF PLANAR REINFORCED CONCRETE FRAME

Gomez-Martínez A. D.

Villalba-Morales J. D.

A_gomezm@javeriana.edu.co

Jesus.villalba@javeriana.edu.co

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá

Cr 7 Num 40-62, Bogotá, Colombia

Cundumi O.

Orlando.cundumi@javerianacali.edu.co

Pontificia Universidad Javeriana, Cali

Calle 18 Num 118-250, Cali, Colombia

Abstract.

The use of semi-active control devices to protect building from the occurrence of earthquakes have received focused attention in the last decades as these systems combine characteristics from passive and active control devices. The determination of the optimal parameters of a semi-active system, including the number and position of the devices, depends on the characteristics of the protection system, the main structural configuration and the seismic hazard. This research deals with the assessment of the influence in the seismic response of planar reinforced concrete (PRC) frames of equipping it with proposed friction-type semi-active dampers. The device is of variable damping, which has a passive reaction while the ranges of displacements do not exceed the imposed limit to generate the operation of the active part of the device. The active part has a function is used that allows to generate different frictional forces in the device that depend on the displacements of the structure due to the earthquake. The function has a minimum and maximum force that is exclusive of the capacity of the friction device. The assessment criteria correspond to the number, position and properties of the devices. The state space formulation for a shear-building configuration including semi-active dampers is reported and implemented in Matlab. Six PRC frames are subjected to the ten earthquake signals corresponding to the seismic hazard of Bucaramanga (Colombia).

Keywords: Semi-active Control, Dissipators , Structural Control , Energy balance , Friction , Dampers.

1 Introducción

Estructuras en Colombia se ven sometidas a diferentes tipos de cargas, siendo los efectos sísmicos los más importantes en gran parte de las ciudades pobladas del país. Colombia a lo largo de su historia ha tenido eventos sísmicos importantes y muchas zonas del país se catalogan como de alto riesgo sísmico donde en algunos eventos hubo pérdidas humanas, lo cual ha llevado al país a avanzar en temas de normas para diseño estructural, incluyendo los sistemas de protección sísmica.

Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar según la forma como realizan el control de la respuesta estructural. Los tipos de control más utilizados son el pasivo, semi-activos, activos e híbridos. Todos estos manejan el mismo objetivo el cual es disipar la energía de un evento sea sísmico o de viento, con métodos distintos en su diseño y diferente efectividad a la hora del evento. Los sistemas de control semi-activo son una clase de sistemas de control activo para los que la energía externa requerida es de menor orden de magnitud y una parte de ellos funciona sin una fuente de potencia (Oviedo and Duque 2006).

Las primeras investigaciones de sistemas semi-activos se dan en 1983 por Hrovat con controles de tipo masa sintonizada, Patten y Symans en 1996 y 1997 obtienen avances en sistemas semi activos con actuadores hidráulicos y sistemas de amortiguamiento viscoso. En la actualidad, se han realizado investigaciones y propuestas de diferentes tipos de controles semi-activos como por ejemplo controles magneto-reológicos (Xuan Bao Nguyen, Toshihiko Komatsuzaki, Yoshio Iwata, Haruhiko Asanuma), nuevas teorías de nodos que permitan controlar los momentos actuantes en la estructura (Blazej Poplawski, Grzegorz Mikułowski, Arkadiusz Mróz, Łukasz Jankowski). Ya en el caso de disipadores de fricción se observan trabajos como los de Lyan-Ywan Lu, donde se realiza un análisis completo de un control, una modelación espacio temporal para la descripción del sistema y un diagrama en 2D, pero no se encuentra disponible el algoritmo de solución propuesto por dichos autores para el sistema semi-activo.

En este artículo se presenta el algoritmo de control semi-activo propuesto por Cundumi y Suarez (2005) adaptado para disipadores tipo fricción, teniendo en cuenta un funcionamiento magnético siguiendo los principios de corrientes de Eddy para frenos magnéticos. El dispositivo de control ajusta la magnitud del campo magnético y/o la interacción y cercanía de las placas metálicas generando mayores fuerzas de fricción. El coeficiente de amortiguamiento requerido es calculado por un algoritmo de control (closed-loop control) Q_v . El algoritmo es efectivo para la reducción de la respuesta sísmica el coeficiente de amortiguamiento $C(t)$ durante el sismo es ajustado teniendo límite superior C_{max} y un inferior C_{min} .

2 Método

El comportamiento de estructuras de un grado de libertad (SDOF) y múltiples grados de libertad (MDOF) sujeta a aceleraciones en la base $\ddot{x}_g(t)$ se representa mediante la ecuación de movimiento Eq. (1):

$$[M]_{n \times n} \{\ddot{x}_g(t)\} + [C]_{n \times n} \{\dot{x}_g(t)\} + [K]_{n \times n} \{x_g(t)\} = -[M]_{n \times n} \{E\} \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente. Los vectores \ddot{x}_g , \dot{x}_g y x_g , son la aceleración, velocidad y desplazamientos, respectivamente, para cada grado de libertad de la estructura. $\{E\}$ es un vector de coeficientes de influencia y n es el número de grados de libertad del sistema. Si todos los grados de libertad del modelo estructural coinciden con la dirección de aplicación del movimiento de tierra el vector $\{E\}$ es un vector que contiene unos (1).

Si la estructura tiene dispositivos de control donde r se va a definir con el número de dispositivos encontrados en el sistema la ecuación anterior se reescribe de la siguiente manera:

$$[M]_{n \times n} \{\ddot{x}_g(t)\} + [C]_{n \times n} \{\dot{x}_g(t)\} + [K]_{n \times n} \{x_g(t)\} = -[M]_{n \times n} \{E\} \ddot{x}_g(t) + [D]_{n \times r} \{u(t)\} \quad (2)$$

La matriz [D] define la localización de los controles r como se mencionó anteriormente es el número de controles y $\{u(t)\}$ es el vector de r dimensiones que describe la fuerza del control. Para la solución de la Ecuación (2), es conveniente utilizar una representación lineal en espacio-estado. Introduciendo las matrices descritas anteriormente se obtienen lo que se conoce como matrices y vectores de estado.

$$\begin{aligned} \{z(t)\} &= \begin{Bmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{Bmatrix}, & [A] &= \left[\begin{array}{c|c} 0 & I \\ \hline -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{array} \right], \\ [B] &= \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix}, & [H] &= \begin{bmatrix} 0 \\ -E \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

La ecuación 2 se escribe de la siguiente forma al remplazar lo anterior.

$$\{\dot{z}(t)\}_{2n \times 1} = [A]_{2n \times 2n} \{z(t)\} + [B]_{2n \times 2r} \{u(t)\} + [H]_{2n \times 1} \{x(t)\} \quad (4)$$

Para definir la variación de las fuerzas del control $u(t)$ es necesario un método o algoritmo de control para solución de la ecuación donde es utilizado en este caso el algoritmo Qv (O. Cundumi).

Algoritmo modificado Qv:

Para la utilización del algoritmo Qv hay dos opciones (closed-loop control and closed-open-loop control) que están basados en la teoría instantánea de control óptimo. Se les denomina algoritmos Qv generalmente, a aquellos cuya fundamentación se basa en la minimización de un índice de rendimiento J cuadrático en el estado vector $\{z(t)\}$ y en la fuerza de control $\{u(t)\}$. Sin embargo, en el algoritmo modificado, una forma cuadrática de la velocidad absoluta $\{\dot{x}_a(t)\}$ se agrega a J. Se impone una penalización en el vector de estado a través de una matriz Q, en el vector de control a través de una matriz R y en el vector de velocidad absoluta a través de una matriz Qv. Q y Qv son dos matrices de ponderación semidefinidas positivas simétricas de tamaño $2n \times 2n$ y $n \times n$, respectivamente, y R es una matriz de ponderación definida positiva $r \times r$. El detalle completo de esta teoría puede ser encontrado en la referencia original [10].

El índice de rendimiento toma la forma:

$$J = \int_0^{t_f} [\{z(t)\}^T [Q] \{z(t)\} + \{\dot{x}_a(t)\}^T [Q_v] \{\dot{x}_a(t)\} + \{u(t)\}^T [R] \{u(t)\}] dt \quad (5)$$

La integral está definida en el tiempo de excitación de la estructura. Para dispositivos semi-activos, la excitación está incluida en la definición de rendimiento, se encontró que para un dispositivo semi-activo con amortiguación variable como el presentado en esta investigación, que incluye la excitación en la definición de J a través de la velocidad absoluta tiene un efecto beneficioso sobre la efectividad del dispositivo [11]. El vector de velocidad absoluta se calcula como:

$$\{\dot{x}_a(t)\} = [A_v]_{n \times 2n} \{z(t)\} + \{S_v\}_{n \times 1} \dot{x}_g(t) \quad (6)$$

donde $[A_v]_{n \times 2n} = [0|I]$, $\{S_v\} = \{1\}$, $[I]$ es una matriz identidad de $n \times n$, $\{1\}$ es un vector de unos (1's) de tamaño n y $\dot{x}_g(t)$ es la velocidad del sismo.

Para definir el control en lazo cerrado y la respuesta de los vectores en el algoritmo modificado Qv, las variables $\{u(t)\}$ y $\{z(t)\}$ se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$\{u(t)\} = -\frac{\Delta_t}{2} [R]^{-1} [B]^T [[A_2]\{z(t)\} + [A_3]\dot{x}_g(t)] \quad (7)$$

$$\{z(t)\} = \left[[I] + \frac{\Delta_t^2}{2} [B][R]^{-1}[B]^T[A_2] \right]^{-1} \left[[T]\{d(t - \Delta_t)\} - \frac{\Delta_t^2}{2} [B][R]^{-1}[B]^T[A_3]\dot{x}_g(t) + \frac{\Delta_t}{2} [H]\ddot{x}_g(t) \right] \quad (8)$$

donde Δ_t es el paso del tiempo, $[A_2] = [Q] + [A_v]^T [Q_v][A_v]$, $[A_3] = [A_v]^T [Q_v][S_v]$ y $\{d(t - \Delta_t)\}$ es un vector que contiene la respuesta de excitación en el tiempo $t - \Delta_t$ se define como:

$$\{d(t - \Delta_t)\} = e^{\Lambda \Delta_t} T^{-1} \left\{ z(t - \Delta_t) + \frac{\Delta_t}{2} [[B]\{u(t - \Delta_t)\} + [H]\ddot{x}_g(t - \Delta_t)] \right\}; \quad \Lambda = T^{-1} A T \quad (9)$$

Dispositivo Magnético Tipo fricción

Para el dispositivo de control se tiene un actuador de amortiguamiento variables tipo fricción magnético que sigue el principio de corrientes de Eddy como se muestra en la Figura 1. Que describe una placa metálica afectada por un campo magnético teniendo resultantes de fuerza contraria a dirección de la velocidad a la que está sometida la placa.

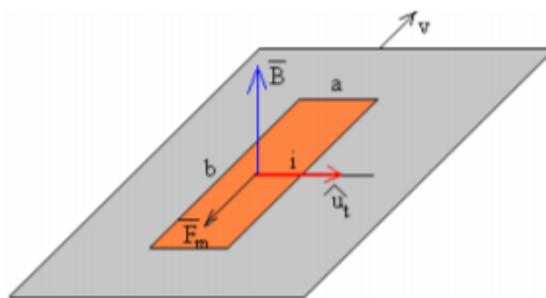


Figura 1 Placa afectada por un campo magnético (Fricción Magnética) [15]

Las ecuaciones que representan el comportamiento y el fenómeno ocurrido son:

$$r = \frac{a}{\sigma * \delta * b} \quad (10)$$

$$i = \frac{v * B * a}{R + r} = \frac{\sigma * \delta * b * B}{1 + \frac{R}{r}} * v \tag{11}$$

$$Fm = \frac{\sigma * \delta * a * b}{1 + \frac{R}{r}} * B^2 * v \tag{12}$$

donde i es intensidad de corriente, B es el campo magnético, r es la resistencia asociada a la pieza metálica que está bajo la influencia del campo magnético uniforme B , R es la resistencia restante de la pieza metálica, σ es la conductividad del material, a y b son las dimensiones de la pieza metálica que está bajo la influencia del campo magnético uniforme B y δ es el espesor de la placa metálica.

3 Resultados

En este documento se presentan dos ejemplos para ilustrar la efectividad del dispositivo VFD (Amortiguador variable tipo fricción) en la reducción La respuesta sísmica: un sistema SDOF y una estructura MDOF. La respuesta obtenida aplicando el algoritmo modificado de control de bucle cerrado Q_v comparado con la respuesta de las estructuras no controladas. Los ejemplos corresponde a edificios en una formulación de cortante donde la masa es concentrada en cada piso y la rigidez es la equivalente de todas las columnas del piso. En este caso se considerará un único control en la estructura. La Figura 1 muestra el caso de una estructura de 1 piso, mientras la Figura 2 muestra todos los posibles casos para una estructura de 4 piso. En ambos problemas la rigidez por piso es 930800 KN/m, la masa por piso es 158000 Kg, la altura de cada piso es de 2.4m y el amortiguamiento es obtiene mediante la ecuación $C_s = (2 * \xi * m * w)$, tomados de [10, 11]

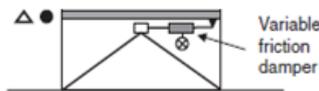


Figura 2 Sistema de un Grado de Libertad

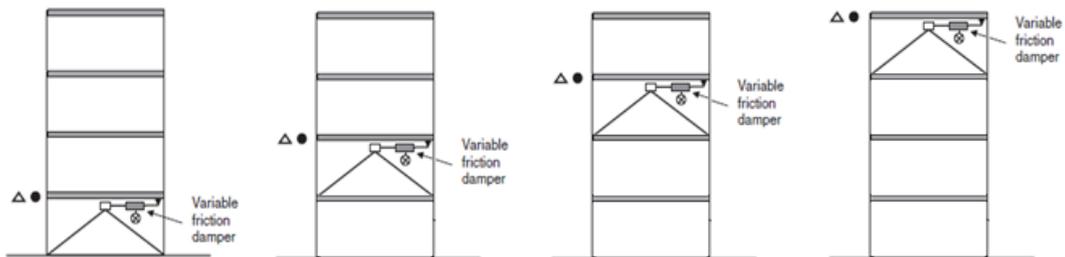


Figura 3 Sistema de múltiples grados de libertad y posibles localizaciones del sistema

Adaptado de [8]

▲• = Sensores de desplazamientos y velocidades

Las estructuras estarán sujetas a la componente horizontal de cuatro sismos diferentes (Loma prieta, Los Santos, Coalinga y Helena), escalados a 0.25g, como se puede observar en figuras 4 a 7.

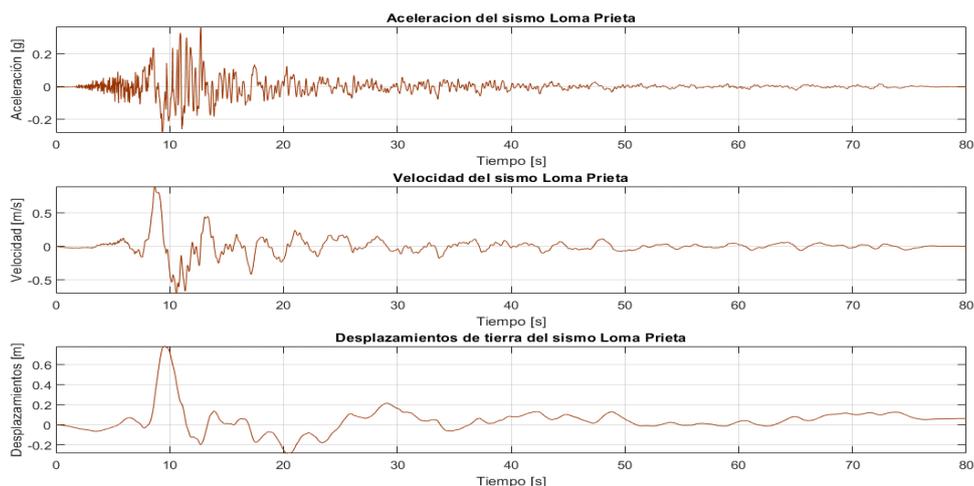


Figura 4 Sismo Loma Prieta

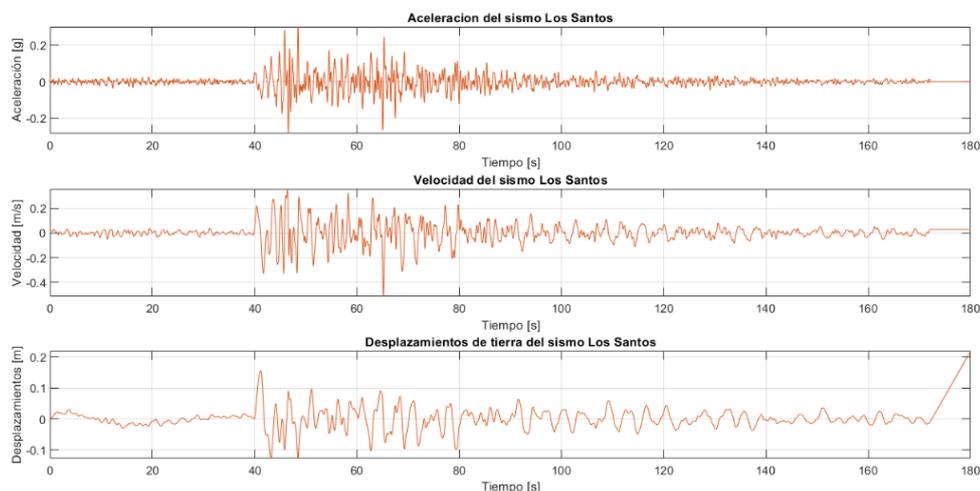


Figura 5 Sismo Los Santos

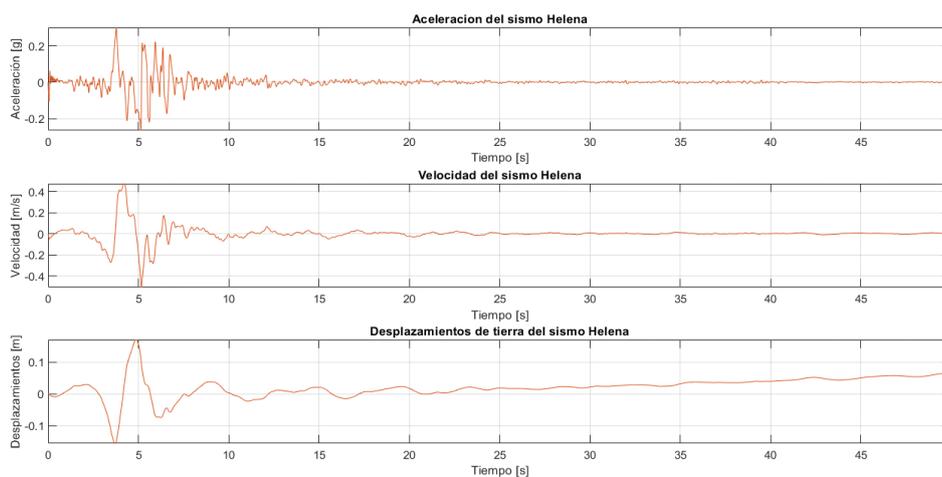


Figura 6 Sismo Helena

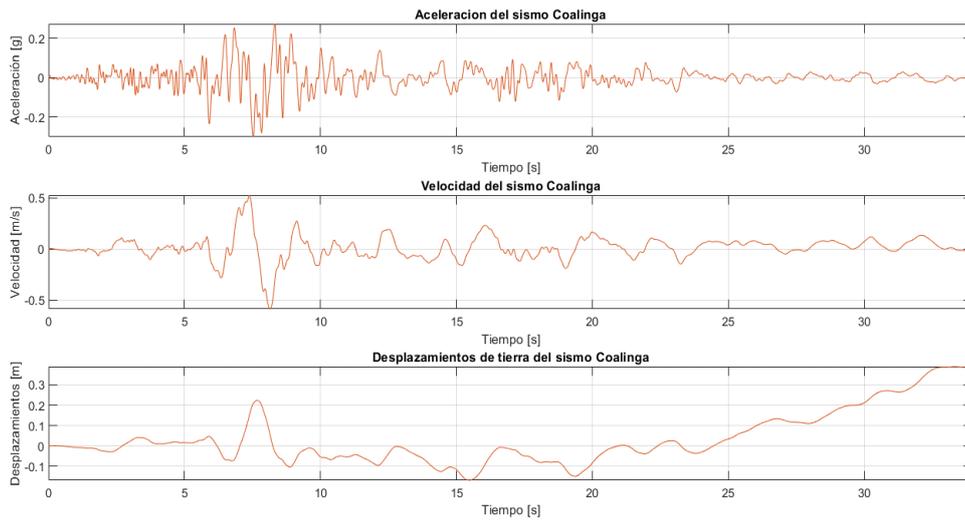


Figura 7 Sismo Coalinga

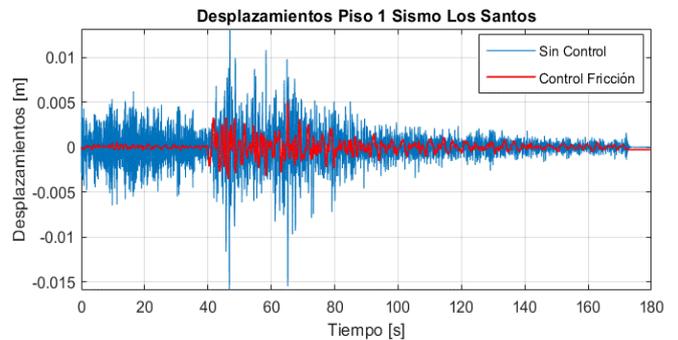
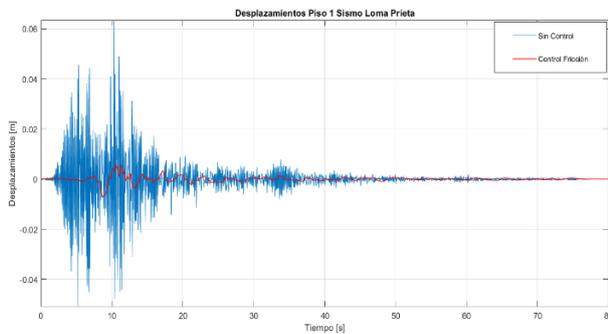
• **Resultados para un sistema de un grado de libertad SDOF:**

En la tabla 1 se encuentra los resultados de desplazamientos máximos y derivas máximas de la edificación de un piso, sin utilizar el dispositivo de control y utilizándolo donde se encuentran disminución de los desplazamientos máximos y derivas entre el 68% para el sismo Los santos y mayores al 88% en los sismos restantes.

Tabla 1 Desplazamientos máximos y derivas máximas SDOF .

Sismo	Desplazamientos Max(m)		Derivas Max (%)	
	Sin Control	VFD	Sin Control	VFD
Loma Prieta	0,0635	0,0072	2,644	0,3013
Los Santos	0,016	0,0051	0,6647	0,2123
Helena	0,0692	0,005	2,8825	0,2092
Coalinga	0,0574	0,0058	2,3931	0,2418

Primero se presenta la respuesta del sistema SDOF a la aceleración de la base de los sismos Loma Prieta, Los Santos, Helena y Coalinga. La ilustración 8 muestra una comparación de las historias de tiempo de desplazamiento relativo para la estructura no controlada y la estructura controlada con el dispositivo VFD.



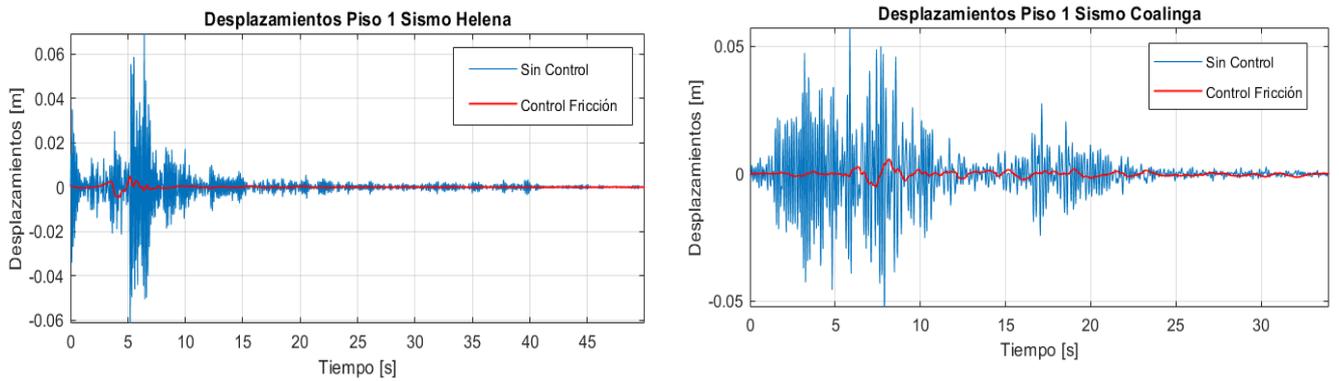


Figura 81 Resultados desplazamientos del piso 1

En la ilustración 9 se muestra la fuerza que ejerce el dispositivo tipo fricción en base a los sismos mencionados anteriormente. Donde el dispositivo tipo fricción ejerce fuerzas pico entre 160 Kn y 300 Kn en los casos expuestos para un sistema de un grado de libertad.

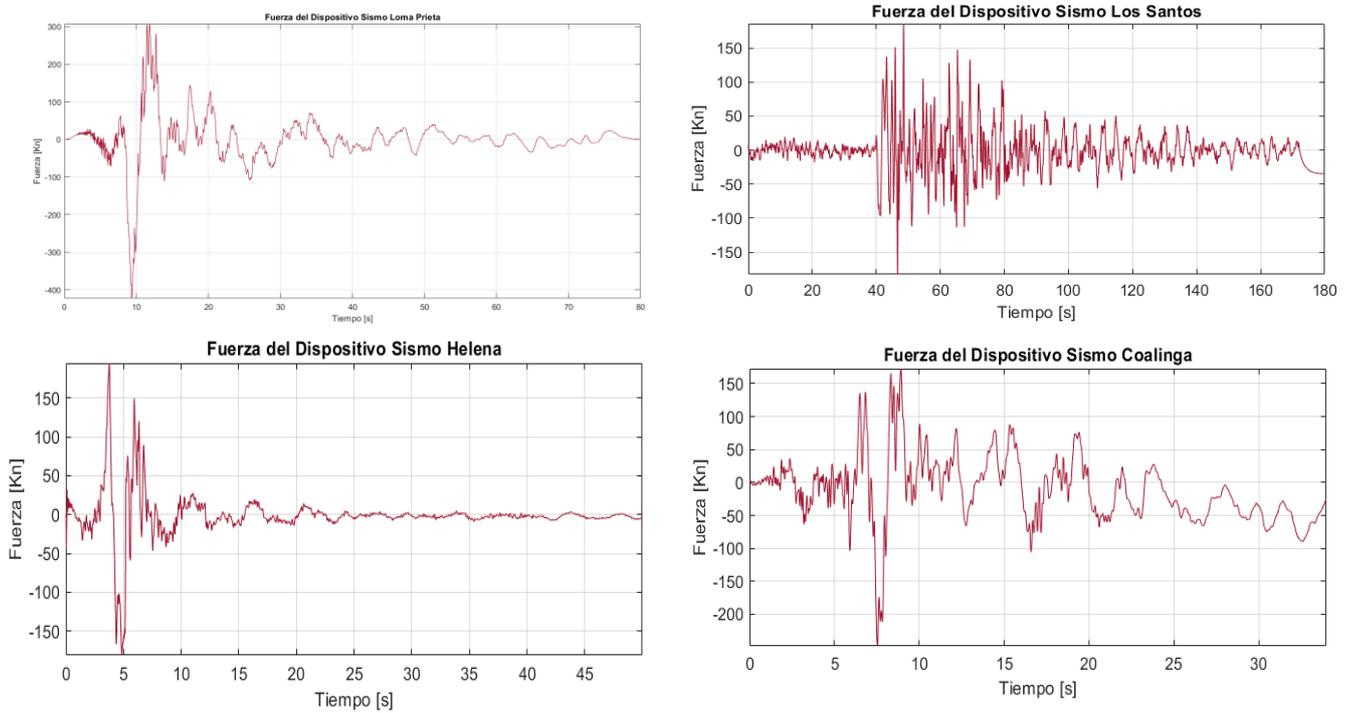


Figura 9 Fuerza del dispositivo de control para cada sismo

- Resultados para un sistema de múltiples grados de libertad MDOF Para 4 pisos:

La tabla 2 y 3 tiene los desplazamientos máximos y derivas máximas para sismos Loma Prieta y Coalinga variando la ubicación del dispositivo en los 4 pisos. Donde se encuentra que dependiendo de la localización del dispositivo se encuentra una mejor respuesta de la estructura mayor que en otras localizaciones, se puede observar en la tabla 2 para el sismo Loma Prieta las derivas aumentan al localizar el dispositivo en el piso 1 mientras que si se ubica en el piso 4 la mejora de las derivas es mayor al 50% y la disminución de los desplazamientos en la tabla 3 está entre el 50% y 90%.

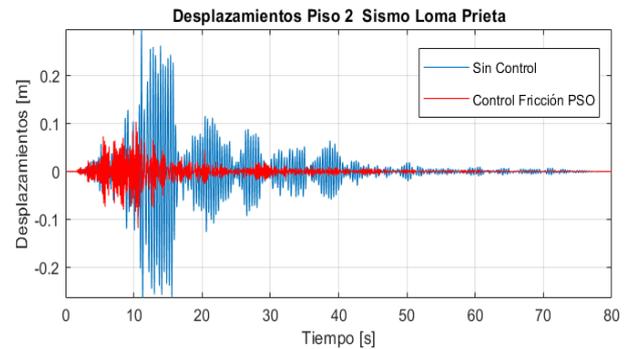
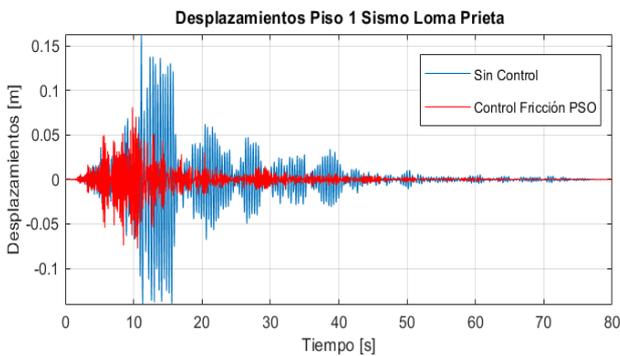
Tabla 2 Derivas máximas MDOF 4

Sismo	Piso	Derivas Max (%)				
		Sin Control	VFD P1	VFD P2	VFD P3	VFD P4
Loma Prieta	P1	6,8048	0,3012	7,8424	5,3679	3,3856
	P2	5,7559	9,1552	7,9261	4,9026	2,6975
	P3	4,7243	6,7924	6,8873	6,9016	3,7218
	P4	2,6941	4,029	8,6034	7,8783	4,1205
Coalinga	P1	9,1504	0,244	4,5448	3,2545	5,5117
	P2	8,1123	6,9788	4,5444	4,0286	3,3912
	P3	6,0791	4,9075	8,5755	6,1757	3,3793
	P4	3,3129	2,7986	9,2345	5,2833	7,6934

Tabla 3 Desplazamientos máximos MDOF 4

Sismo	Piso	Derivas Max (%)				
		Sin Control	VFD P1	VFD P2	VFD P3	VFD P4
Loma Prieta	P1	0,1633	0,0072	0,1882	0,1288	0,0813
	P2	0,2969	0,2179	0,0072	0,1628	0,1179
	P3	0,4074	0,3724	0,1612	0,0072	0,0992
	P4	0,472	0,4691	0,2905	0,1924	0,0072
Coalinga	P1	0,2196	0,0059	0,1091	0,0078	0,1323
	P2	0,4143	0,1625	0,0058	0,1462	0,1744
	P3	0,5602	0,2803	0,2035	0,0058	0,1834
	P4	0,6391	0,3472	0,297	0,1238	0,0058

Se obtiene para el sismo Loma Prieta que la localización adecuada es en el piso 4 y para el sismo Coalinga la localización adecuada en el piso 3 generando las mejores reducciones en la deriva máxima para cada sismo. En las ilustraciones 10 y 11 se puede observar los desplazamientos en el tiempo para la ubicación mencionada anteriormente.



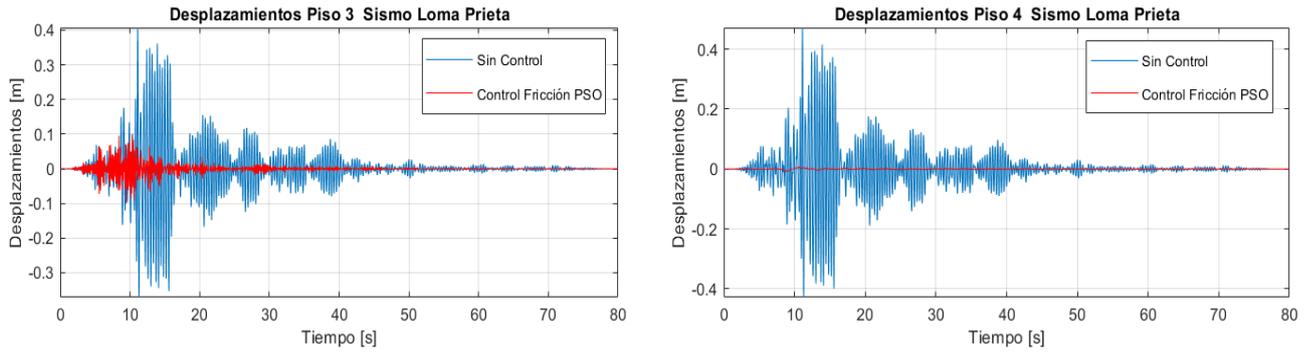


Figura 10 desplazamientos para cada piso MDOF 4 con VFD en el piso 4 Loma Prieta

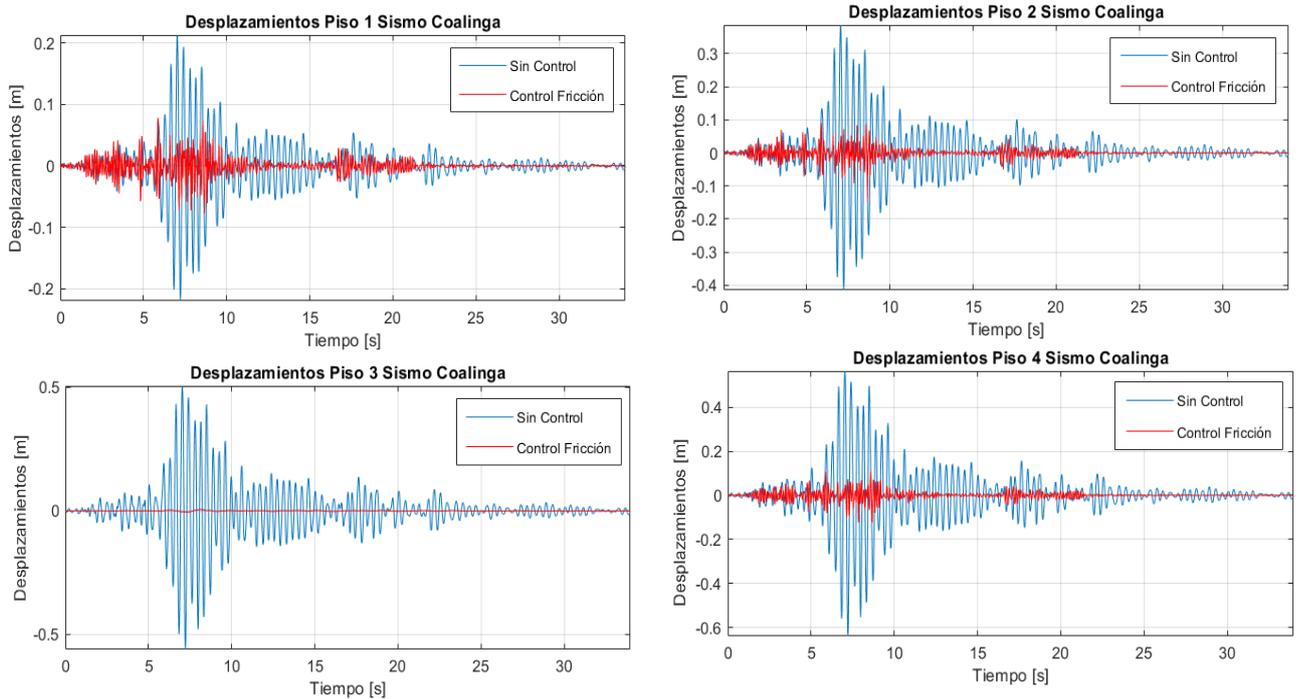


Figura 11 Desplazamientos para cada piso MDOF 4 con VFD en el piso 3 Coalinga

En la ilustración 12 se muestra la fuerza que ejerce el dispositivo tipo fricción en base a los sismos Loma Prieta y Coalinga. Donde el dispositivo tipo fricción ejerce fuerzas pico entre 400 Kn y 300 Kn en los casos expuestos para un sistema de múltiples grados de libertad (4).

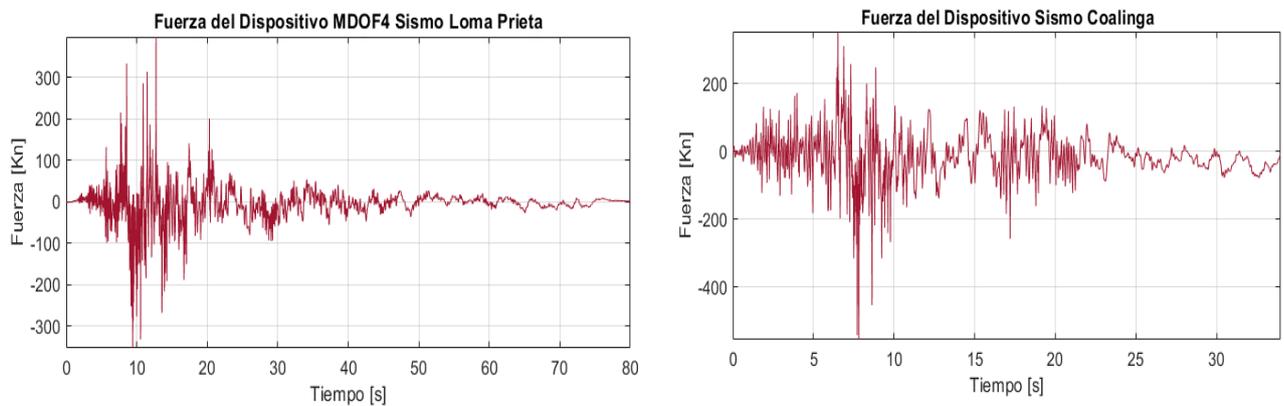


Figura 12 Fuerza del dispositivo para cada sismo

4 Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los revisores del artículo por sus valiosos comentarios y a la Pontificia Universidad Javeriana por su colaboración en el proceso.

5 Conclusiones

Los resultados obtenidos con la utilización del algoritmo Qv de bucle cerrado para solución de sistemas semi-activos con un dispositivo tipo fricción (VFD) fueron similares a los resultados obtenidos en los artículos [10] y [11] de O. Cundumi y L. Suárez que obtienen disminuciones los desplazamientos mayores 70% y 80% de las estructuras evaluadas con un dispositivo tipo VSDA, en los resultados obtenidos en este artículo se encuentran disminuciones de desplazamientos mayores al 50% en las estructuras evaluadas y mayores 75% en algunos casos.

Los resultados analizados muestran la importancia de la localización de un dispositivo de control sísmico debido a que los cambios de la respuesta sísmica de la estructura dependen de la localización de forma directa y es importante que se realice análisis futuros de la afectación que esto genera en problemas complejos para múltiples grados de libertad mayores a los expuestos en el artículo.

El dispositivo tipo fricción (VFD) es ideal siguiendo leyes físicas y debido a que la parte experimental no es cubierta en esta investigación, sus resultados pueden variar, se debe continuar en el diseño y construcción del dispositivo para mejorar y verificar el algoritmo utilizado en la solución del problema.

Referencias

- [1] Cheng, F. Y., H. Jiang, and K. Lou. 2008. Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control. United States of America: CRC Press.
- [2] Oviedo Juan Andrés, Duque María del Pilar. 2006. SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES. Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia).
- [3] T T SOONG And B F SPENCER, JR. 2000. ACTIVE, SEMI-ACTIVE AND HYBRID CONTROL OF STRUCTURES. Earthquake Engineering.
- [4] Xuan Bao Nguyen, Toshihiko Komatsuzaki b, Yoshio Iwata, Haruhiko Asanuma. 2017. Modeling and semi-active fuzzy control of magnetorheological elastomer-based isolator for seismic response reduction. Mechanical Systems and Signal Processing. Pag 449-466
- [5] Lyan-Ywan Lu. 2004. Predictive control of seismic structures with semi-active friction dampers. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Pag 647-668
- [6] Y.L. Xu. Chen. 2007. Integrated vibration control and health monitoring of building structures using semi-active friction dampers: Part I—methodology. Engineering Structures. Pag 1789-1801.
- [7] Lyan-Ywan Lu, Tzu-Kang Lin, Rong-Jie Jheng, Hsin-Hsien Wu. 2017. Theoretical and experimental investigation of positioncontrolled semi-active friction damper for seismic structures. Journal of Sound and Vibration. Pag 184-206.
- [8] Lyan-Ywan Lu, Lap-Loi chung , Ging-Long Lin. 2004. A General Method for Semi-active Feedback Control of Variable Friction Dampers. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. Pag 393-412.
- [9] D. Hrovat, P. Barak, and M. Rabins, "Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control", J. Eng. Mech., ASCE 109:3 (1983), 691–705.

- [10] O. Cundumi, A variable damping semiactive device for control of the seismic response of buildings, Ph.D. Dissertation, the University of Puerto Rico at Mayagüez, Department of Civil Engineering, Mayagüez, Puerto Rico, 2005.
- [11] O. Cundumi and L. E. Suárez, “A new variable damping semi-active (VDSA) device for seismic response reduction of civil structures”, in The IX pan american congress of applied mechanics (PACAM IX), Mérida, Mexico, January 2–6 2006a.
- [12] O. Cundumi and L. Suárez, “Seismic response reduction using semi-active control with a new variable damping device and modified algorithm Qv”, in Proceedings of the eight U.S. national conference on earthquake engineering, San Francisco, California, April 18–22 2006b.
- [13] W. N. Patten, R. L. Sack, and Q. He, “Controlled semi-active hydraulic vibration absorber for bridges”, J. Struct. Eng., ASCE 122:2 (1996), 187–192.
- [14] M. Symans and M. C. Constantinou, “Seismic testing of a building structure with a semiactive fluid damper control system”, Earthquake. & Eng. Struc. Dyn. 26:7 (1997), 759–777.
- [15] Der-Ming Ma, Jaw-Kuen Shiau. 2011. The design of eddy-current magnet brakes. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 35, No. 1