

OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES AMS PARA EL CONTROL DE LA RESPUESTA DINÁMICA NO LINEAL DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

OPTIMIZATION OF MULTIPLE AMS FOR THE CONTROL OF NONLINEAR DYNAMIC RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Martín Domizio^{a,b}, Hernán Garrido^{a,b} y Daniel Ambrosini^{a,b}

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, Ciudad de Mendoza. Provincia de Mendoza, Argentina, martin.domizio@ingenieria.uncuyo.edu.ar*

^b *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina, <https://www.conicet.gov.ar/>*

Palabras clave: AMS, optimización de enjambre de partículas, respuesta dinámica no lineal, desintonizado

Resumen. Los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) son dispositivos empleados en el control de vibraciones desde principios del siglo XX. En el caso de estructuras que presentan una respuesta dinámica no lineal causada por la acción sísmica, su desempeño se ve afectado tanto por la duración de la excitación como por el efecto del desintonizado. En el presente trabajo se optimizan los parámetros de tres configuraciones diferentes de AMS utilizando el algoritmo de enjambre de partículas. En el proceso de optimización se definen dos funciones objetivo diferentes y cinco relaciones de masa. El desempeño de las tres configuraciones óptimas de AMS es evaluado en tres estructuras con diferentes periodos fundamentales frente a un conjunto de registros de falla lejana. La respuesta dinámica no lineal de las estructuras es obtenida mediante un modelo histerético de Bouc-Wen capaz de reproducir la degradación de resistencia y rigidez de estructuras de hormigón armado.

Keywords: AMS, particle swarm optimization, nonlinear dynamic response, detuning.

Abstract. Tuned mass dampers (TMA) are devices used in vibration control since the beginning of the 20th century. In the case of structures that show a nonlinear dynamic response caused by seismic action, their performance is affected by both the duration of excitation and the effect of detuning. In the present work the parameters of three different AMS configurations are optimized using the particle swarm algorithm. In the optimization process, two different objective functions and five mass ratios are defined. The performance of the three optimal AMS configurations is evaluated on three structures with different fundamental periods against a set of far-fault records. The nonlinear dynamic response of the structures is obtained by means of a hysteretic Bouc-Wen model capable of reproducing the strength and stiffness degradation of reinforced concrete structures.

1. INTRODUCCIÓN

Los amortiguadores de masa sintonizados son dispositivos empleados en el control de vibraciones desde principios del siglo XX (Frahm, 1909), siendo más recientes las aplicaciones para el control de la respuesta dinámica de estructuras civiles. Estos dispositivos de control son capaces de absorber energía oscilando a una frecuencia próxima a la frecuencia fundamental de la estructura a proteger. Por lo tanto, la mayor efectividad por parte de los AMS se alcanza para cargas armónicas de larga duración y frecuencias también próximas a la frecuencia natural de la estructura. En el caso de estructuras que presentan una respuesta dinámica no lineal se produce una variación de la frecuencia fundamental y se produce el efecto de desintonizado, el cual reduce la efectividad de los AMS. Surge entonces la pregunta acerca de la posibilidad de incrementar su efectividad en el caso de estructuras que incursionan en rango no lineal debido a la acción sísmica teniendo en cuenta la posible degradación de rigidez y resistencia.

Con el objetivo de incrementar la robustez de los AMS y reducir el efecto del desintonizado, se han propuesto diversas alternativas, desde emplear múltiples AMS (Zuo, 2009) hasta utilizar elementos no lineales (Huang et al., 2020), de impacto (Shen et al., 2020), o inerters (Garrido et al., 2013) en su composición. Dentro de las alternativas mencionadas, el uso de múltiples AMS ha demostrado ser eficiente, con un comportamiento predecible y lineal y factible de ser materializadas, por lo que se elige como objeto de estudio en el presente trabajo.

En el presente trabajo se propone el uso de tres configuraciones de AMS para controlar la respuesta no lineal de estructuras sujetas a la acción sísmica. Las tres configuraciones evaluadas son el AMS clásico de un grado de libertad y los AMS de dos grados de libertad con disposición paralelo y serie. En primer lugar, se encuentran los valores óptimos de los parámetros de las tres configuraciones de AMS, utilizando el algoritmo de enjambre de partículas. Se plantean dos funciones objetivos diferentes, donde se busca con la primera función objetivo reducir la respuesta en frecuencia de la estructura sana, y con la segunda función objetivo se busca incrementar la robustez de los AMS frente a un escenario de degradación de rigidez. Ambas funciones objetivo se plantean sobre estructuras lineales, comprobando posteriormente su eficacia en tres estructuras no lineales sujetas a la acción de sismos de falla lejana. La no-linealidad de la respuesta dinámica estructural es representada en este caso por un modelo de Bouc-Wen modificado por Pellicari et al. (2020) para poder representar la degradación de rigidez y resistencia de estructuras de hormigón.

2. OPTIMIZACIÓN

2.1. Configuraciones

La primera de las tres configuraciones estudiadas, denominada configuración 1, consiste en un AMS clásico compuesto por una única masa y vinculada a la estructura principal mediante un resorte y un amortiguador viscoso. La segunda configuración, denominada 2P, cuenta con dos masas conectadas en paralelo a la estructura principal, mientras que la tercera configuración, denominada 2S, también cuenta con dos masas, pero conectadas en serie a la estructura principal. La Fig. 1 presenta el esquema que representa a cada una de las configuraciones, con la denominación de los parámetros que serán luego optimizados. El desempeño de estas tres configuraciones frente a cargas armónicas que afectan a estructuras lineales ya fue analizado sobre estructuras lineales en el trabajo de Zuo (2009), pero el objetivo de este trabajo es finalmente evaluar el desempeño de los AMS sobre estructuras no lineales frente a acciones sísmicas. Además, se plantea en este trabajo una función objetivo adicional que intenta incrementar la robustez de los dispositivos y que difiere a la propuesta por Zuo (2009).

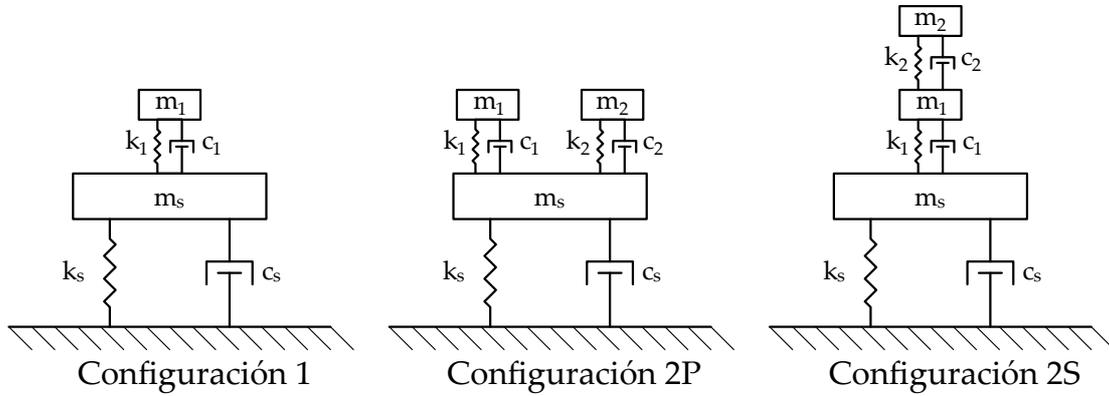


Figura 1: Configuraciones de AMS estudiadas.

2.2. Modelo matemático

Para optimizar los parámetros que definen el comportamiento de los dispositivos de control se utilizó un modelo matemático donde la estructura es representada mediante un único grado de libertad con comportamiento elástico lineal. Esta estructura en conjunto con los AMS adicionados conforman un sistema de n_{dof} grados de libertad. La ecuación de movimiento que gobierna este sistema es por lo tanto la siguiente:

$$M_s \ddot{\mathbf{u}}(t) + C_s \dot{\mathbf{u}}(t) + K_s \mathbf{u}(t) = -M_s \mathbf{b} \ddot{u}_g, \tag{1}$$

donde M_s , C_s y K_s son respectivamente las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema, de dimensión $n_{dof} \times n_{dof}$; $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$, \mathbf{u} son, respectivamente, los vectores de desplazamiento, velocidad y, aceleración relativos, de dimensión $n_{dof} \times 1$; \mathbf{b} es el vector de coeficientes de influencia, de dimensión $n_{dof} \times 1$; y \ddot{u}_g es la aceleración del suelo de magnitud escalar.

Para implementar este modelo en el algoritmo de optimización se utilizó la representación en espacio de estados, donde la Ec. 1 se expresa como un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ -M_s^{-1} K_s & -M_s^{-1} C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} \ddot{u}_g, \tag{2}$$

donde \mathbf{v} es una nueva representación del vector velocidad, de dimensión $n_{dof} \times 1$; \mathbf{I} y \mathbf{O} son respectivamente las matrices identidad y de ceros, de dimensión $n_{dof} \times n_{dof}$; y $\mathbf{0}$ es un vector de ceros de dimensión $n_{dof} \times 1$. Utilizando la nomenclatura clásica de la representación en espacio de estados, la Ec. 1 puede expresarse de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \ddot{u}_g, \tag{3}$$

donde \mathbf{x} es el vector de estado, de dimensión $n_{dof} \times 1$; \mathbf{A} es la matriz de estado, de dimensión $2n_{dof} \times 2n_{dof}$; y \mathbf{B} es la matriz de entrada, de dimensión $2n_{dof} \times 1$. En el presente trabajo, el objetivo del proceso de optimización es el de minimizar los desplazamientos en la estructura

principal, por lo que la salida del sistema y es de magnitud escalar y queda definido por la siguiente expresión:

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (4)$$

donde \mathbf{C} es la matriz de salida del sistema, de dimensión $1 \times 2n_{dof}$, con un 1 en el primer elemento y cero en el resto.

2.3. Parámetros a optimizar

De manera general, los parámetros que definen la respuesta del i -ésimo componente del AMS, y que conforman el objeto de la optimización, son la relación de masa μ_i , la relación de frecuencia α_i y la relación de amortiguamiento ζ_i , definidas mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{m_i}{m_s}, \\ \alpha_i &= \frac{\omega_i}{\omega_s} = \sqrt{\frac{k_i m_s}{m_i k_s}}, \\ \zeta_i &= \frac{c_i}{2m_i \omega_i} \end{aligned} \quad (5)$$

donde k_s , c_s y m_s son respectivamente la rigidez, amortiguamiento y masa de la estructura; y k_i , c_i y m_i son respectivamente la rigidez, amortiguamiento y masa del i -ésimo elemento que compone el AMS. En este caso la relación de masas total μ_{total} igual a la sumatoria de las relaciones de masas de cada uno de los componentes del AMS. En el presente trabajo se analizaron 5 valores asignados a este parámetro (1 %, 2.5 %, 5 %, 10 %, 25 %).

2.4. Funciones objetivo

Se plantearon en la optimización dos funciones objetivo, ambas analizando la norma infinito de la respuesta en frecuencia, $|H(j\omega)|$, del sistema definido mediante las ecuaciones 3 y 4. La primer función objetivo a minimizar, OF_1 , consiste en la norma infinito de la respuesta en frecuencia de la estructura sana con la adición del dispositivo de control, $|H_{k_s=k_h}(j\omega)|$, es decir:

$$OF_1(\mu_i, \alpha_i, \zeta_i) = \|H_{k_s=k_h}(j\omega)\|_\infty = \max_{\omega} |H_{k_s=k_h}(j\omega)| \quad (6)$$

La segunda función objetivo, OF_2 , se plantea para encontrar una respuesta más robusta del dispositivo de control frente a la degradación de la rigidez de la estructura. Debido a esto, para definir la función objetivo se determina la norma infinito de la respuesta en frecuencia de la estructura con dos niveles de reducción de rigidez, definidas este caso como 75 % y 50 % de la rigidez en la condición sana. La función objetivo queda finalmente definida como la suma de la media, $\mu(\mathbf{h})$, y la desviación estándar, $\sigma(\mathbf{h})$, del vector \mathbf{h} que contiene las normas infinito de la estructura sana y la estructura con los dos niveles de degradación de rigidez, es decir:

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &= [\|H_{k_s=k_h}(j\omega)\|_\infty; \|H_{k_s=0,75k_h}(j\omega)\|_\infty; \|H_{k_s=0,5k_h}(j\omega)\|_\infty], \\ OF_2(\mu_i, \alpha_i, \zeta_i) &= \mu(\mathbf{h}) + \sigma(\mathbf{h}). \end{aligned} \quad (7)$$

2.5. Algoritmo de optimización

El problema de optimización queda planteado entonces como la búsqueda de los parámetros del dispositivo de control que minimizan las funciones objetivos planteadas, esto es:

$$(\mu_{i|\text{opt}}, \alpha_{i|\text{opt}}, \zeta_{i|\text{opt}}) = \arg \min_{\mu_i, \alpha_i, \zeta_i} \text{OF}_j(\mu_i, \alpha_i, \zeta_i) \quad (8)$$

Para resolver este problema de optimización se utilizó el algoritmo de enjambre de partículas propuesto por Ebbesen et al. (2012). Para la relación de amortiguamiento y relación de frecuencias se establecieron límites que ayudan a la mayor eficacia y eficiencia del proceso de optimización, siendo estos límites $\alpha_i \leq 2$, y $\zeta_i \leq 2$.

Para establecer la convergencia del algoritmo de enjambre de partículas hacia una solución óptima se realizaron optimizaciones con 100, 250, 500 y 1000 partículas, definiendo en cada caso un número de generaciones igual al número de partículas. Al mismo tiempo se evaluó la repetibilidad de las soluciones encontradas, realizando 10 veces cada una de las operaciones, dado que las posiciones y velocidades iniciales, así como el balance entre la atracción cognitiva y la atracción social son aleatorias para cada partícula.

2.6. Resultados y parámetros óptimos

La distribución óptima de las relaciones de masa μ_i para cada una de las configuraciones y funciones objetivo se presenta en la Fig. 2 como función de la relación de masa total de los AMS μ_{total} . En el caso de las configuraciones con dos AMS se observa como para las relaciones de masa total más bajas la minimización de la OF_2 aumenta la diferencia entre las masas asignadas a cada uno de los AMS de la configuración 2P en comparación con los resultados de obtenidos con la OF_1 . Lo contrario a esto sucede en la configuración 2S. También se observa como las mayores diferencias entre masas asignadas a cada uno de los AMS es mayor en la configuración 2S en comparación con la configuración 2P, asignando generalmente una mayor masa al AMS que está conectado directamente a la estructura.

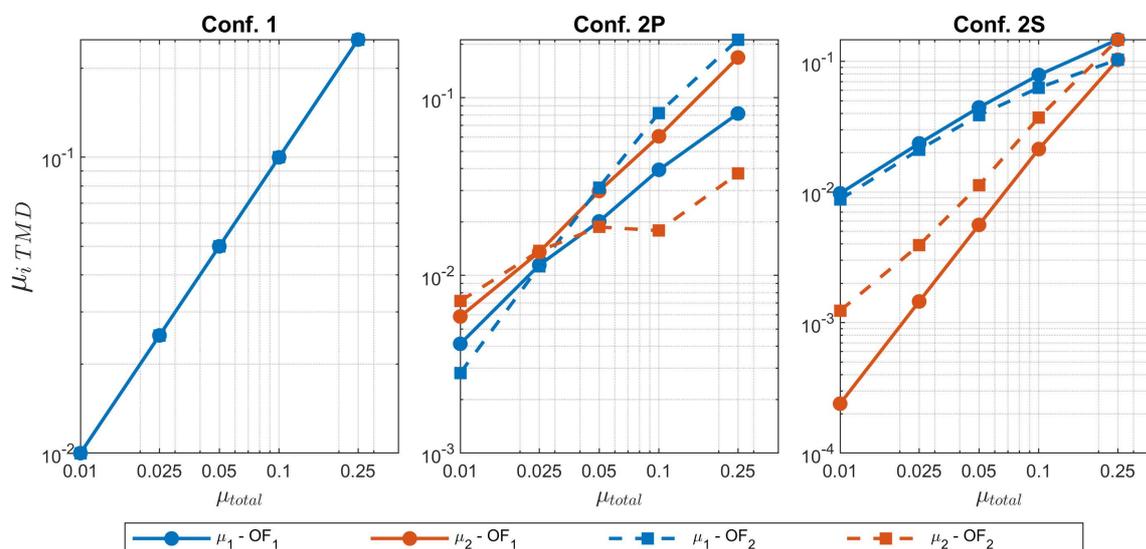


Figura 2: Distribución óptima de la relación de masa.

Las relaciones de frecuencia óptima obtenidas a través del proceso de optimización se presentan en la Fig. 3. En esta figura se observa que en general las relaciones de frecuencia son menores para la OF_2 , ya que se pretende responder en un escenario de degradación de rigidez de la estructura principal. Debido a esto también se observa que las diferencias entre las relaciones de frecuencias de los dos AMS que componen las configuraciones 2P y 2S son mayores

para el caso de la OF_2 . En la figura también se observa que para ambas funciones objetivo hay una tendencia general a reducir la relación de frecuencias a medida que se incrementa la masa.

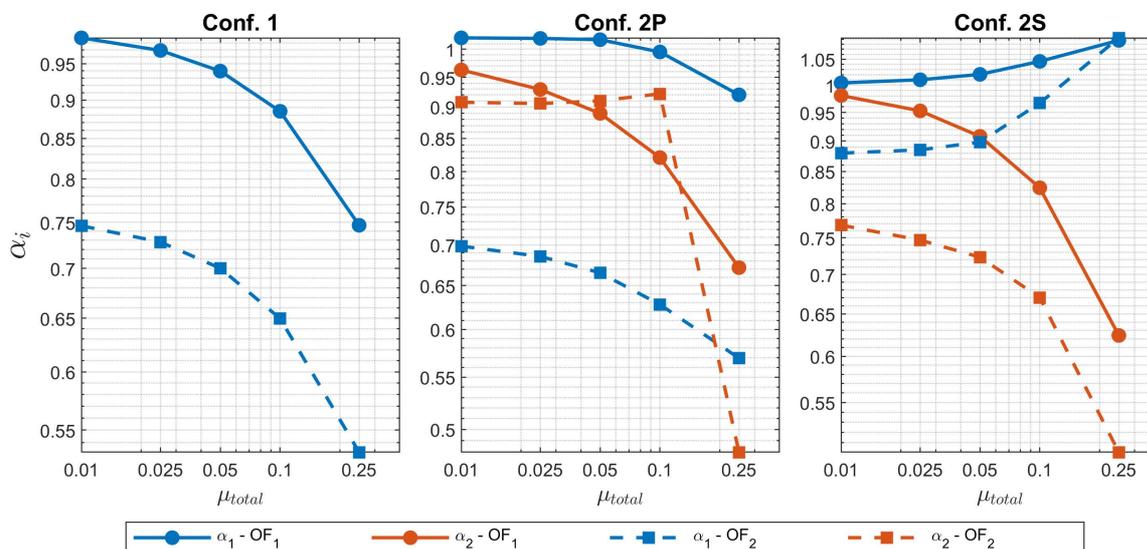


Figura 3: Relaciones de frecuencia óptimas.

Las relaciones de amortiguamientos óptimas obtenidas para los casos de optimización analizados se presentan en la Fig. 4. En la figura se observa una tendencia general a incrementar la relación de amortiguamiento con la masa, y en los casos de la configuración 1 y 2S a incrementar la relación de amortiguamiento cuando se busca minimizar la OF_2 . También puede observarse como las diferencias entre los resultados obtenidos con las dos funciones objetivo disminuyen en general a medida que la relación de masa total aumenta, al igual de lo que se observó en el caso de la distribución óptima de las relaciones de masa. Se observa también una notoria diferencia de amortiguamiento entre los dos AMS que componen la configuración 2S, asignando un amortiguamiento mucho menor al AMS que está vinculado directamente a la estructura principal.

La Fig. 5 presenta los valores mínimos de las funciones objetivo de la optimización de parámetros de los dispositivos de control. En la figura se observa que, para las dos funciones objetivo, la configuración más eficiente resulta ser la configuración 2S, y como en general un incremento de la relación de masa total conlleva a una reducción mayor de la función OF_2 en comparación con la reducción de la OF_1 .

3. DESEMPEÑO EN ESTRUCTURAS NO-LINEALES

3.1. Modelo no-lineal

El modelo empleado para representar la respuesta dinámica no lineal de la estructura principal es el modelo histerético de Bouc-Wen modificado por Pellicari et al. (2020). A diferencia del modelo original de Bouc-Wen, el modelo propuesto por Pellicari et al. (2020) permite reproducir la degradación de resistencia y rigidez de estructuras de hormigón armado, así como el efecto de pinching.

Para implementar el modelo de Pellicari et al. (2020) en el sistema compuesto por la estructura principal y los dispositivos adicionales simplemente se reemplaza el aporte de rigidez de la estructura principal en la matriz de rigidez y se suma una componente restitutiva F_s que tiene

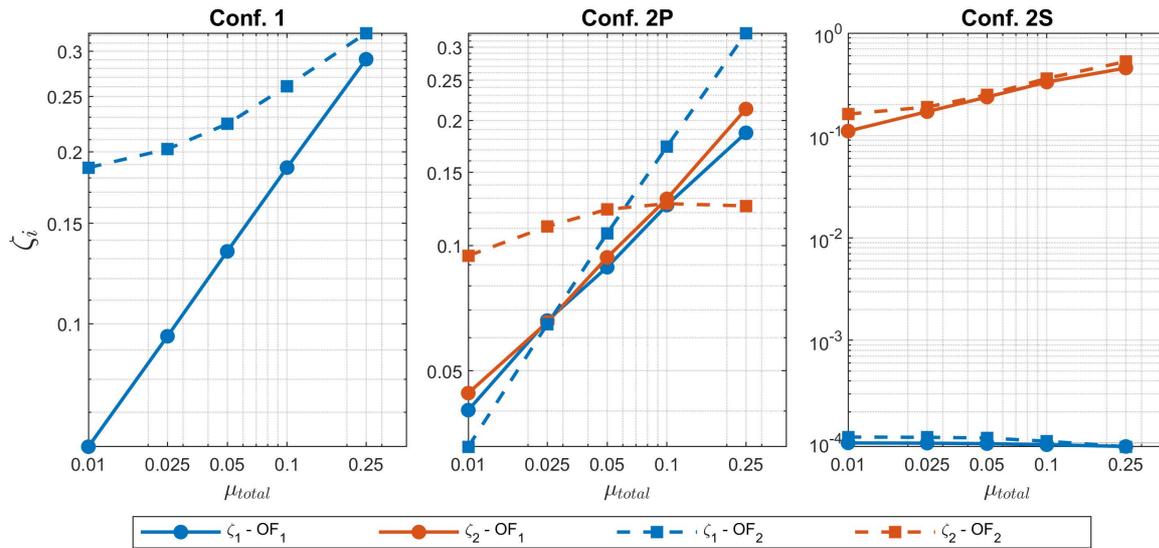


Figura 4: Relaciones de amortiguamiento óptimas.

la siguiente expresión:

$$F_s(u(t), z(t), t) = \alpha k_p(\epsilon)u(t) + (1 - \alpha)k_p(\epsilon)z(t). \tag{9}$$

donde u es el desplazamiento relativo de la estructura principal, α es la relación entre la respuesta lineal y no lineal, k_p la rigidez variable con el efecto de pinching, ϵ es la energía disipada histeréticamente y z es una variable definida mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\dot{z} = A(d_i)\dot{u} - \beta(d_i)(|\dot{u}||z|^{n-1} + \eta_0\dot{u}|z|^n) \tag{10}$$

donde A es un parámetro que define la rigidez tangente; d_i es el índice de daño; y β, η_0 y n son parámetros que definen la forma del ciclo de histéresis.

Para resolver entonces el problema dinámico no lineal se suma la componente de fuerza restitutiva en la ecuación de equilibrio del grado de libertad de desplazamiento de la estructura principal y se adiciona al conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden de la Ec. 9, conformando un sistema de ecuaciones diferenciales implícito. Empleando los parámetros calibrados del modelo de Pelliciani et al. (2020), se definieron tres estructuras con diferentes masas y periodos fundamentales, T_s . Los tres períodos fundamentales son 0.1 s, 0.35 s y 1.0 s.

Los parámetros de las tres estructuras analizadas fueron definidos de modo de tener un factor de resistencia constante, β_s . De acuerdo a la definición propuesta por Pal et al. (1987) este factor tiene la siguiente expresión:

$$\beta_s = \frac{R_y}{m_sPGA} = \frac{k_s u_y}{m_sPGA} = \frac{4\pi^2 u_y}{T_s^2 PGA} \tag{11}$$

donde R_y es el valor de la fuerza restitutiva de la estructura a partir de la cual se produce la fluencia del modelo no lineal, y u_y es el desplazamiento a partir del cual comienza la fluencia de la estructura. Para una PGA de 0.6 g, y un factor de resistencia de 0.5 se determinaron a través de la Ec. 11 los valores de desplazamiento de fluencia de las tres estructuras.

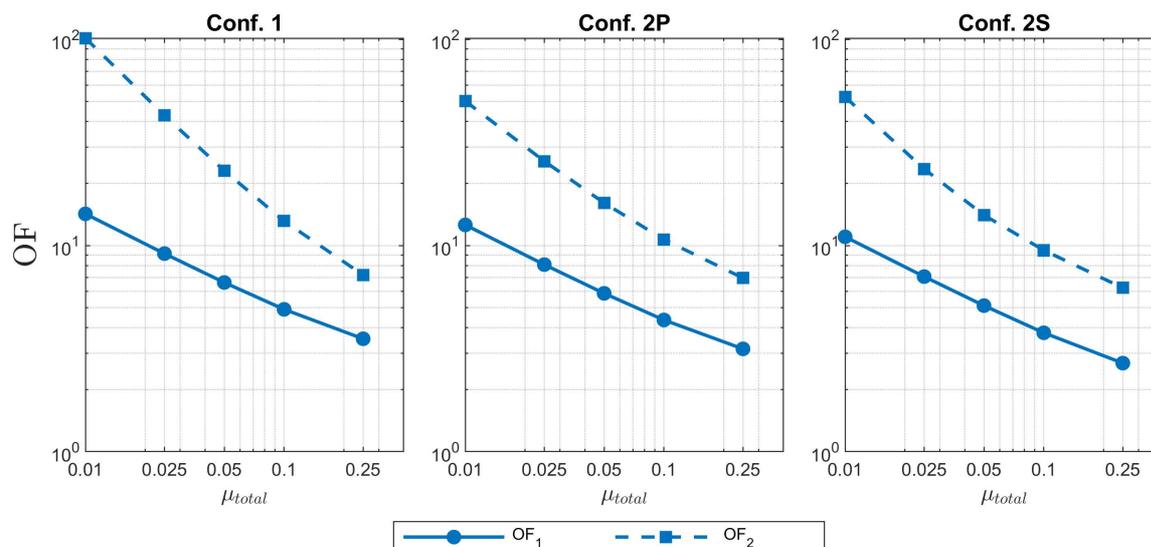


Figura 5: Valores mínimos de las funciones objetivo.

3.2. Influencia de los AMS en la respuesta dinámica no lineal causada por la acción sísmica

Una serie de análisis dinámicos no lineales fueron realizados para evaluar el desempeño de los AMS cuando las estructuras incursionan en rango no lineal debido al efecto de la acción sísmica. Los registros sísmicos seleccionados para este estudio son los definidos en el apéndice A del documento FEMA (2009). El conjunto utilizado tiene 42 registros de aceleraciones horizontales medidos en 21 eventos sísmicos, a más de 10 km de la zona de ruptura, por lo que se clasifican como registros de falla lejana. Los resultados del análisis realizado frente a registros de falla cercana puede encontrarse en Domizio et al. (2022)

Los registros sísmicos fueron escalados de modo de alcanzar en cada una de las estructuras sin control los niveles de demanda de ductilidad, $\mu_{\Delta w/oc}$, de 1, 2.5, 5 y 10. Los registros con estas amplitudes fueron aplicados a la estructura con las diferentes alternativas de AMS y se registró en cada caso la demanda de ductilidad $\mu_{\Delta w/c}$. Posteriormente se estableció el siguiente indicador para medir el beneficio producido por la adición del dispositivo de control:

$$\mu_{\Delta rel} = \frac{\mu_{\Delta w/c}}{\mu_{\Delta w/oc}} \quad (12)$$

Las alternativas de AMS analizadas son en total 12, las cuáles surgen de las tres configuraciones optimizadas para las dos funciones objetivos descritas en la sección anterior, y además se definieron los parámetros considerando dos frecuencias de la estructura principal: la frecuencia fundamental de la estructura sana y una frecuencia del 50% de la frecuencia fundamental sana. A la relación entre la frecuencia a la cual se sintonizó el dispositivo de control y la frecuencia fundamental de la estructura sana se denominó α_{tun} . El resultado obtenido con cada una de las alternativas de control analizada fue caracterizado por la mediana del indicador $\mu_{\Delta rel}$ obtenido para cada conjunto de registros.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1, donde se presenta la alternativa que produjo la mayor reducción del nivel de demanda de ductilidad en función de la estructura analizada, la demanda de ductilidad en la estructura sin control y la relación de masa total asignada al dispositivo de control. En los resultados resumidos en la Tabla 1 puede observarse que el mejor

desempeño se produjo en la estructura de 0.35 s de período y el peor en la estructura con período de 0.10 s, con una diferencia relativa promedio de 8.2 % entre las reducciones obtenidas en ambas estructuras. La mayor diferencia entre estos casos se dio cuando se asignó una relación de masas del 25 % al dispositivo de control. Para la estructura de 0.1 s, los dispositivos con esta relación de masas produjeron peores resultados que los obtenidos con una relación de masas del 10 % para todos los niveles de demanda de ductilidad. La configuración 2S fue en general la que produjo los mejores resultados. En los niveles más bajos de demanda de ductilidad resultado más efectiva la OF₂ y sintonizar el dispositivo a la frecuencia fundamental de la estructura sana. Para los niveles más altos de demanda en general se obtuvieron mejores resultados con la OF₁, sintonizando los dispositivos a una frecuencia del 50 % de la frecuencia fundamental de la estructura sana.

$\mu_{\Delta w/oc}$	μ_{total}	$T_s = 0,10s$				$T_s = 0,35s$				$T_s = 1,00s$			
		Conf.	OF	α_{tun}	$\mu\Delta_{rel}$	Conf.	OF	α_{tun}	$\mu\Delta_{rel}$	Conf.	OF	α_{tun}	$\mu\Delta_{rel}$
1	1.0 %	2P	2	1	0.90	2S	1	1	0.90	2P	2	1	0.95
	2.5 %	2S	2	1	0.84	2S	1	1	0.81	2S	2	1	0.91
	5.0 %	2S	2	1	0.83	2S	1	1	0.74	2S	2	1	0.85
	10.0 %	2S	2	1	0.81	2S	1	1	0.70	2S	2	1	0.79
	25.0 %	2S	2	1	0.84	2S	1	1	0.63	2S	1	1	0.69
2.5	1.0 %	2S	2	1	0.92	2S	1	0.75	0.93	2S	1	0.75	0.95
	2.5 %	2S	1	0.75	0.86	2S	1	0.75	0.87	2S	1	0.75	0.90
	5.0 %	2P	1	0.75	0.84	2S	1	0.75	0.79	2S	2	1	0.85
	10.0 %	2S	2	1	0.82	2S	1	0.75	0.74	2S	2	1	0.79
	25.0 %	2S	2	0.75	0.88	2S	2	1	0.67	2S	2	1	0.71
5	1.0 %	2S	2	0.75	0.92	2S	2	0.75	0.92	2S	1	0.75	0.95
	2.5 %	2S	2	0.75	0.89	2S	2	0.75	0.87	2S	1	0.75	0.90
	5.0 %	2S	2	0.75	0.84	2S	2	0.75	0.80	2S	1	0.75	0.84
	10.0 %	2S	2	0.75	0.82	2S	1	0.75	0.71	2S	1	0.75	0.78
	25.0 %	2S	2	0.75	0.81	2S	1	0.75	0.60	2S	1	0.75	0.68
10	1.0 %	2S	1	0.5	0.94	2S	1	0.5	0.96	2S	1	0.5	0.98
	2.5 %	2S	1	0.5	0.90	2P	1	0.5	0.94	1	1	0.5	0.96
	5.0 %	2P	1	0.5	0.88	2S	2	0.75	0.91	2S	2	0.75	0.93
	10.0 %	2S	1	0.5	0.85	2S	2	0.75	0.85	1	1	0.5	0.91
	25.0 %	2S	2	0.5	0.90	2S	2	0.75	0.74	2S	2	0.75	0.84

Tabla 1: Resumen de resultados del análisis frente a acciones sísmicas.

4. CONCLUSIONES

El estudio presentado en este trabajo trata sobre la optimización de diversas configuraciones de AMS con el objetivo final de controlar la respuesta dinámica no lineal de estructuras ocasionada por la acción sísmica. Se analizaron tres configuraciones siendo la más efectiva la que presenta dos AMS dispuestos en serie.

El estudio sobre la respuesta no lineal se realizó proponiendo 4 niveles de demanda de ductilidad. El análisis de la respuesta sísmica se hizo evaluando las configuraciones óptimas sintonizadas en primer lugar a la frecuencia fundamental de la estructura sana, y en segundo lugar sintonizada con a una frecuencia del 50 % de la frecuencia fundamental original. Este análisis de respuesta sísmica se realizó utilizando un conjunto de registros de falla lejana.

A partir de la mediana de las reducciones relativas de ductilidad conseguidas en cada caso analizado, se observa que en general la configuración de dos AMS en serie es la más eficaz. En

los casos más cercanos al colapso, se consigue una reducción de hasta el 26 % de la demanda de ductilidad cuando se utiliza una relación de masas del 25 %. Esta reducción de la demanda de ductilidad es menor en el caso de la estructura más rígida.

Al analizar las opciones de sintonía, se observa que la sintonía al 50 % de la frecuencia fundamental de la estructura sana es la alternativa más efectiva cuando las demandas de ductilidad son iguales a 10.

En cuanto a las funciones objetivo, la que reduce la magnitud de la respuesta en frecuencia considerando una sola frecuencia fundamental es en general más efectiva que la función que reduce la magnitud de la respuesta en frecuencia de la estructura considerando tres estados de degradación de la rigidez. Esta última función objetivo demostró mejores resultados en el caso de la estructura más rígida.

REFERENCIAS

- Domizio M., Garrido H., y Ambrosini D. Single and multiple tmd optimization to control seismic response of nonlinear structures. *Engineering Structures*, 252:113667, 2022. ISSN 0141-0296. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113667>.
- Ebbesen S., Kiwitz P., y Guzzella L. A generic particle swarm optimization Matlab function. *Proceedings of the American Control Conference*, páginas 1519–1524, 2012. ISSN 07431619. doi:10.1109/acc.2012.6314697.
- FEMA. *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. 2009. ISBN FEMA P-695.
- Frahm H. Device for Damped Vibrations of Bodies. 1909.
- Garrido H., Curadelli O., y Ambrosini D. Improvement of tuned mass damper by using rotational inertia through tuned viscous mass damper. *Engineering Structures*, 56:2149–2153, 2013. ISSN 01410296. doi:10.1016/j.engstruct.2013.08.044.
- Huang H., Mosalam K.M., y Chang W.S. Adaptive tuned mass damper with shape memory alloy for seismic application. *Engineering Structures*, 223:111171, 2020. ISSN 18737323. doi:10.1016/j.engstruct.2020.111171.
- Pal S., Dasaka S.S., y Jain A.K. Inelastic response spectra. *Computers and Structures*, 25(3):335–344, 1987. ISSN 00457949. doi:10.1016/0045-7949(87)90126-X.
- Pellicciari M., Briseghella B., Tondolo F., Veneziano L., Nuti C., Greco R., Lavorato D., y Tarantino A.M. A degrading Bouc–Wen model for the hysteresis of reinforced concrete structural elements. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(7):917–930, 2020. ISSN 17448980. doi:10.1080/15732479.2019.1674893.
- Shen B., Xu W., Wang J., Chen Y., Yan W., Huang J., y Tang Z. Seismic control of super high-rise structures with double-layer tuned particle damper. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (September):1–20, 2020. ISSN 10969845. doi:10.1002/eqe.3372.
- Zuo L. Effective and Robust Vibration Control Using Series Multiple Tuned-Mass Dampers. *Journal of Vibration and Acoustics*, 131(3):031003, 2009. ISSN 07393717. doi:10.1115/1.3085879.