



Optimización del diseño de estructuras conformadas por pórticos de acero resistentes a momentos y amortiguadores de masa sintonizada (TMD)*

Ana Milena Ramírez Ospina^a ■ José Alex González Muñoz^b ■
Orlando Cundumi Sánchez^c ■ Jesús Daniel Villalba Morales^d

Resumen: las metodologías convencionales de diseño de estructuras sismo-resistentes se basan en el diseño de resistencia, rigidez y ductilidad de la estructura en el rango inelástico. Recientes avances en el área, buscan generar nuevas metodologías basadas en la disipación de energía del sismo mediante dispositivos externos. Lo anterior con el fin de disminuir los daños que se puedan presentar en los elementos estructurales después de la ocurrencia de un sismo. En este artículo, se propone una metodología para la optimización del diseño de pórticos de acero resistentes a momentos, equipados con amortiguadores de masa sintonizada. El objetivo es disminuir las deformaciones, los daños estructurales, los no estructurales y el costo de la estructura. En el proceso de optimización se utilizó una heurística basada en la teoría de la evolución de una población y denominada algoritmo de evolución diferencial. Se modificó adicionando dos características para mejorar su funcionamiento. En primera instancia, se le generó una autoadaptación de los parámetros de mutación y cruzamiento. Por otra parte, se le dio características multimodales para ayudar al algoritmo a encontrar el óptimo global. Finalmente, utilizando la metodología de optimización en los diversos casos de estudio, se pudo observar que la calidad de la solución y la convergencia del algoritmo eran buenas. Además, se vio una mejoría en la calidad de optimización debido a las características adicionadas de funciones multimodales y parámetros autoadaptativos. Haciendo que el algoritmo tuviera mayor espacio de exploración y explotación.

Palabras clave: algoritmo de evolución diferencial; amortiguadores de masa sintonizada; optimización estructural; pórticos de acero resistentes a momento; sistemas de protección sísmica

* Artículo de revisión.

- a** Ingeniera civil, magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: ra_ana@javeriana.edu.co ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1981-5333>
- b** Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: gonzalezjose@javeriana.edu.co ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5046-0839>
- c** Ingeniero civil, doctor en Ingeniería Estructural. Pontificia Universidad Javeriana. Cali, Colombia. Correo electrónico: orlando.cundumi@javerianacali.edu.co ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0122-6621>
- d** Ingeniero civil, doctor en Ciencias-Area Estructuras. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jesus.villalba@javeriana.edu.co ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8339-2262>

Recibido: 21/11/2020

Aceptado: 23/06/2021

Disponible en línea: 31/12/2021

Cómo citar: A. M. Ramírez Ospina, O. Cundumi Sánchez, J. A. González Muñoz, y J. D. Villalba Morales, «Optimización del diseño de estructuras conformadas por pórticos de acero resistentes a momentos y amortiguadores de masa sintonizada (TMD)», Cien.Ing.Neogranadina, vol. 31, n.º 2, pp. 9-25, dic. 2021.

Optimizing the Design of Structures Formed by Moment-Resisting Steel Frames Resistant and Tuned Mass Dampers (TMD)

Abstract: Conventional design methods for earthquake-resistant structures are based on the structure's resistance, stiffness, and ductility in the inelastic range. Recent advances in the area seek to engender new methodologies based on seismic energy dissipation through external devices to reduce the damage that may occur in the structural elements after an earthquake. This article proposes a method to optimize the design of moment-resisting steel frames equipped with tuned mass dampers. The objective is to reduce deformations, structural damage, non-structural damage, and the cost of the structure. In the optimization process, a heuristic criterion was used based on the theory of evolution of populations called the differential evolution algorithm, modified by adding two features to improve its performance. First, the mutation and crossing parameters were provided with self-adaptation. Then, the algorithm was given multimodal characteristics to help it find the global optimum. Finally, we observed that the solution quality and algorithm convergence were good using the optimization method in the various study cases. Furthermore, there was an improvement in optimization quality due to the added features of multimodal functions and self-adaptive parameters, expanding the algorithm for exploration and exploitation.

Keywords: Differential evolution algorithm; tuned mass dampers; structural optimization; moment-resisting steel frames; seismic protection systems

Introducción

Con el objetivo de mejorar la respuesta de una estructura ante un evento sísmico de magnitud considerable, la academia y la industria han hecho un esfuerzo conjunto para desarrollar y utilizar un importante número de sistemas de protección sísmica (SPS). Mientras que estructuras convencionales disipan la energía del sismo por medio de deformaciones permanentes en los elementos estructurales, estructuras con SPS cuentan con dispositivos que absorben o disipan gran parte de la energía del sismo y evitan mayores niveles de daño a la estructura principal. En ese sentido, tal tipo de solución es atractiva para el diseño de edificaciones en zonas de amenaza sísmica alta, como es el caso de Colombia. Sin embargo, aún son pocas las edificaciones en el país que cuentan con tal tecnología. Una de las razones para ello está asociada con el costo inicial del sistema estructural resultante.

Un amortiguador de masa sintonizada TMD (*Tuned Mass Damper*) es un dispositivo que entra en la categoría de SPS de tipo inercial. Este se compone de una masa y de un elemento que proporciona rigidez y amortiguamiento [1]. El principio de funcionamiento del TMD se basa en conseguir que la masa oscile como un péndulo alrededor de la posición de equilibrio durante el movimiento sísmico. De tal forma que se generen fuerzas que contrarresten los movimientos del sistema principal. Es importante anotar que existen diversos factores que impactan el desempeño de un TMD en su tarea de reducir la respuesta sísmica de una estructura. Young-Rak *et al.* [2] demostraron que la eficiencia de un conjunto de TMDs para controlar la respuesta sísmica es afectada por la posición de los dispositivos en la estructura. Espinoza *et al.* [3] desarrollaron una metodología que consideraba la influencia del contenido frecuencial de la señal sísmica sobre la definición de los parámetros de sintonización de un TMD. Barros *et al.* [4] encontraron que la eficiencia de un TMD de bastante peso depende sobre la ductilidad y rigidez del sistema principal. Nakai *et al.* [5] desarrollaron un TMD de gran tamaño que permitió contrarrestar los efectos de terremotos de períodos largos en edificios

de gran altura mediante una modificación de su coeficiente de amortiguamiento.

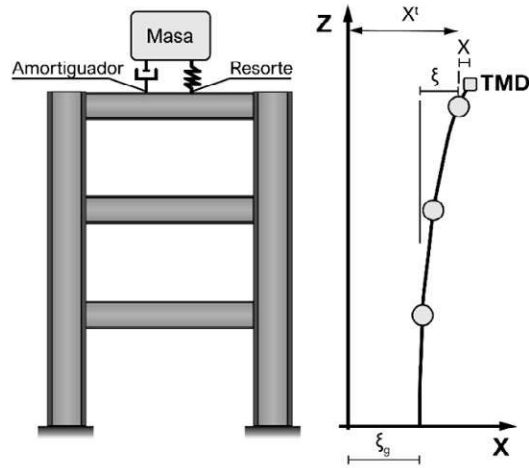
En lo relacionado a la definición de las propiedades del TMD (masa, rigidez y amortiguamiento), Chang en 1990 [6] estableció, inicialmente, un conjunto de ecuaciones sencillas que relacionan las propiedades óptimas del TMD a aquellas de la estructura. Este estudio ha sido utilizado como base de muchas investigaciones reportadas en la literatura. Kaveh *et al.* [7] utilizaron un algoritmo de optimización caótico para determinar la rigidez y amortiguamiento óptimo de un TMD. Lo anterior, considerando como criterio de diseño una función objetivo que combina desplazamientos y aceleraciones. Khazaei *et al.* [8] estudiaron el efecto de la localización en altura de múltiples TMDs para disminuir la respuesta sísmica en edificios de acero altos con plantas en forma de U y L. Caicedo *et al.* [9] propusieron un algoritmo de evolución diferencial para la optimización de las propiedades de TMDs en edificios de gran altura. Para ello, consideraron diferentes funciones objetivo basadas en desplazamientos y aceleraciones de piso. Soheili *et al.* [10] desarrollaron una metodología para la determinación óptima de los parámetros de un TMD que utiliza un algoritmo de colonia de hormigas, una función objetivo basada en la máxima deriva para la reducción y consideraciones de la interacción suelo-estructura.

Como se puede observar, los trabajos anteriores están orientados a optimizar los parámetros y/o localización de los TMDs. Pero no se explora la posibilidad de estudiar el sistema estructura principal-TMD como una única estructura. En este trabajo se propone una metodología para la optimización de edificios aporticados de acero en Colombia, equipados con un amortiguador de masa sintonizada (TMD en el último piso como parte de su sistema de resistencia sísmica). El problema de optimización es resuelto mediante una técnica heurística, ya que estas han mostrado buen desempeño en la solución de problemas del área de ingeniería estructural. La función objetivo corresponde al costo total de la estructura (elementos estructurales más TMD).

1. Amortiguadores de masa sintonizada

De forma ideal, un amortiguador de masa sintonizada (TMD) está constituido por un elemento de masa que se conecta a la estructura principal a través de un elemento tipo resorte y otro tipo

amortiguador viscoso como se observa en la figura 1a. Actualmente, estos dispositivos son producidos a nivel industrial como aquel presentado en la figura 1b de la empresa Maurer.



(a)



(b)

Figura 1. Amortiguadores de masa sintonizada: a) representación, b) ejemplo real de la empresa Maurer.

Fuente: www.maurer.eu

La disipación de la energía del sismo se alcanza cuando el movimiento del TMD entra en desfase con aquel de la estructura principal. Lo cual se alcanza mediante la sintonización de las frecuencias del dispositivo y de la edificación. En ese sentido, la ecuación de movimiento que describe el comportamiento en dos direcciones del piso superior de una estructura con TMD ante una carga sísmica viene dada por [11]:

$$m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) = -m_x \ddot{\xi}_g(t) - m_x \dot{\xi}_g(t) \quad (1)$$

$$m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = -m_y \ddot{\eta}_g(t) - m_y \dot{\eta}_g(t) \quad (2)$$

donde m , c y k son las propiedades del amortiguador (masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente) que deben definirse en las direcciones x e y . La acción sísmica es definida en término de las

aceleraciones del terreno $\ddot{\xi}_g$ y $\ddot{\eta}_g$ en las direcciones x e y , respectivamente. Mientras que la respuesta del último piso es medida en término de las aceleraciones relativas al terreno $\dot{y}$ en las direcciones x e y , respectivamente. Es importante anotar que esta formulación considera que el comportamiento de la estructura principal es elástico durante el sismo.

La determinación de las propiedades del tmd (masa, rigidez y amortiguamiento) para una estructura específica ha sido objeto de estudio desde hace varias décadas. Chang [6] propuso que el diseño del TMD esté basado en la relación (μ) de las masas del TMD (m_{TMD}) y del sistema principal (m_s):

$$\mu = \frac{m_{TMD}}{m_s} \quad (3)$$

la cual está comúnmente entre el 1% y 3%. A partir de este valor se obliga a que la relación (λ_{opt}) entre la frecuencia natural del TMD (w_{TMD}) y la frecuencia del modo fundamental del sistema principal (w_s) sea cercana a 1, así:

$$\lambda_{opt} = \frac{w_{TMD}}{w_s} \quad (4)$$

A partir de esta información se puede determinar la rigidez del TMD mediante:

$$k_{TMD} = w_{TMD}^2 * m_{TMD} \quad (5)$$

Por último, se calcula el amortiguamiento óptimo según la expresión deducida en [6]:

$$\xi_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\mu(1 - \frac{1}{4}\mu)}}{(1 + \mu)(1 - \frac{1}{2}\mu)} \quad (6)$$

2. Algoritmo de evolución diferencial

El algoritmo de evolución diferencial (DEA) es una heurística de búsqueda estocástica basada en población. Fue desarrollado por Rainer y Kenneth en 1995 para resolver problemas de optimización global con espacios de búsqueda grandes y complejos [12]. Su formulación matemática se fundamenta en la teoría de la evolución natural. En esta, una población de individuos (representaciones de soluciones del problema) se somete iterativamente a la aplicación de operadores genéticos para alcanzar la evolución (generación de nuevas soluciones de alta calidad). Cada individuo de la población se forma por un vector que representa una posible solución al problema analizado (cada componente del vector representa a una de las variables del problema) y por su correspondiente valor de calidad (costo). La generación de la población inicial, de tamaño N_V , se puede realizar de forma aleatoria o mediante heurísticas basadas en el conocimiento del problema.

El primer operador que se aplica sobre la población se conoce como mutación. Tiene como objetivo la generación de individuos desde la población actual dado que el cruce de estos puede llevar a mejores individuos. Existen muchos operadores de mutación reportados en la literatura, siendo uno comúnmente utilizado [12]:

$$V_{i,g} = X_{best,g} + F(X_{r1,g} - X_{r2,g})$$

donde $V_{i,g}$ = Vector mutado, F = Factor de mutación, $X_{ri,g}$ = Vectores aleatorios de la población inicial y $X_{best,g}$ = Vector con mayor costo en la población en la generación g . El valor del factor de mutación definido por el usuario afecta la calidad de la solución y la velocidad de convergencia.

Con el fin de incrementar la diversidad del espacio de búsqueda, se procede al proceso de cruce donde se combinan parámetros del vector inicial con el vector mutante para obtener un vector de prueba dado por [12]:

$$u_{i,G,j} = \{v_{i,G,j} \text{ si } rand_j \leq CR \text{ o } j = j_{rand} \text{ en caso contrario} \quad (8)$$

donde CR es la tasa de cruce e indica qué porcentaje del vector mutante y del vector objetivo ($x_{i,G,j}$) formará parte del vector de prueba. El rango para CR es de 0 a 1.

Por último, se realiza el proceso de selección en el cual el vector de prueba y el vector objetivo se evalúan en la función objetivo, y el que tenga una mejor solución o aptitud pasará a la siguiente generación.

$$X_{i,G+1} = \{U_{i,G} \text{ si } f(U_{i,G}) < f(X_{i,G}) \text{ en caso contrario} \quad (9)$$

Este proceso se repite en sucesivas generaciones hasta que se alcance un criterio de paro. Por ejemplo, un número máximo de generaciones, NMG .

3. Metodología propuesta

A continuación, se propone una primera aproximación para la obtención de un diseño de pórticos regulares de acero equipados con TMDs.