

Desarrollo de un algoritmo híbrido de control de amortiguadores magnetoreológicos para optimizar la respuesta dinámica en pórticos *

David Marcelo Bedoya-Zambrano 

Profesor Ocasional, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín - Colombia
dmbedoyaz@unal.edu.co

Luis Augusto Lara-Valencia 

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín - Colombia
lualarava@unal.edu.co

John Jairo Blandón-Valencia 

Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín - Colombia
jjblandon@unal.edu.co

RESUMEN

PALABRAS CLAVE

Algoritmos genéticos; lógica difusa; amortiguadores magnetoreológicos; control estructural

Esta investigación presenta una metodología para optimizar fuerzas de control en edificaciones, las cuales se encuentran sometidas a cargas sísmicas. Se desarrolló un sistema de control llamado CLF-MR_1, el cual combina un algoritmo genético de clasificación no dominada NSGA-II y un sistema de control basado en lógica difusa. El controlador fue ensayado numéricamente en una edificación real de 96 m de altura, en la cual se instalaron 6 amortiguadores magnetoreológicos MR. La estructura fue sometida a 8 aceleraciones de sismo con diferentes rangos frecuenciales. Los parámetros de entrada para el sistema de control propuesto fueron los desplazamientos y las velocidades del primer piso de la edificación y como único parámetro de salida, se definió el voltaje de los dispositivos MR. La eficiencia del CLF-MR_1 fue comparada con un segundo controlador llamado CLF-MR_2, el cual funciona mediante un sistema de inferencia basado en parámetros lingüísticos. Los resultados obtenidos indican que el CLF-MR_1 mejora significativamente la respuesta dinámica de la edificación, en comparación con los resultados obtenidos con el CLF-MR_2 y con la condición no controlada de la edificación.

Recibido: 02/06/2023 Evaluado: 05/08/2023 Aceptado: 11/10/2023

Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) Published by Universidad Libre - Cali, Colombia.

Fuentes de financiación: Esta investigación no recibió financiación específica de alguna entidad de los sectores privados, públicos, comercial o sin fines de lucro.

Contribución de los autores

- Todos los autores: Conceptualización, análisis formal, investigación, redacción del borrador original, revisión y edición de la redacción.

Cómo citar este artículo/How to cite: BEDOYA-ZAMBRANO, David Marcelo; LARA-VALENCIA, Luis Augusto; BLANDÓN-VALENCIA, John Jairo. Desarrollo de un algoritmo híbrido de control de amortiguadores magnetoreológicos para optimizar la respuesta dinámica en pórticos. En: Entramado. Enero - Junio, 2024. vol. 20, no. 1 e-10270 p. 1-25. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.10270>



Development of a hybrid control algorithm for magnetorheological dampers to optimize the dynamic response in frames

ABSTRACT

KEYWORDS

Genetic algorithms; fuzzy logic; magnetorheological dampers; structural control

This research presents a methodology to optimize control forces in buildings, which are subjected to seismic loads. A control system called CLF-MR_1 was developed, which combines a genetic algorithm of non-dominated classification NSGA-II and a control system based on fuzzy logic. The controller was numerically evaluated in a real 96 m high building, in which 6 MR magnetorheological dampers were installed. The structure was subjected to 8 earthquake accelerations with different frequency ranges. The input parameters for the proposed control system were the displacements and velocities of the first floor of the building and the only output parameter was the voltage of the MR devices. The efficiency of CLF-MR_1 was compared with a second controller called CLF-MR_2, which operates using an inference system based on linguistic parameters. Results obtained show that CLF-MR_1 significantly improves the dynamic response of the building, compared to the results obtained with CLF-MR_2 and the uncontrolled condition of the building.

Desenvolvimento de um algoritmo de controle de amortecedor magnetorreológico híbrido para otimizar a resposta dinâmica em estruturas de portal

RESUMO

PALAVRAS-CHAVE

Algoritmos genéticos; lógica fuzzy; amortecedores magnetorreológicos; controle estrutural

Esta pesquisa apresenta uma metodologia para otimizar as forças de controle em edifícios sujeitos a cargas sísmicas. Foi desenvolvido um sistema de controle denominado CLF-MR_1, que combina um algoritmo genético de classificação não dominada NSGA-II e um sistema de controle baseado em lógica difusa. O controlador foi testado numericamente em um edifício real de 96 m de altura, no qual foram instalados 6 amortecedores magnetorreológicos MR. A estrutura foi submetida a 8 acelerações de terremoto com diferentes faixas de frequência. Os parâmetros de entrada para o sistema de controle proposto foram os deslocamentos e as velocidades do primeiro andar do edifício, e a tensão dos dispositivos MR foi definida como o único parâmetro de saída. A eficiência do CLF-MR_1 foi comparada com um segundo controlador chamado CLF-MR_2, que opera usando um sistema de inferência baseado em parâmetros linguísticos. Os resultados obtidos indicam que o CLF-MR_1 melhora significativamente a resposta dinâmica do edifício, em comparação com os resultados obtidos com o CLF-MR_2 e a condição não controlada do edifício.

I. Introducción

Las estructuras son susceptibles a presentar deformaciones laterales excesivas, cuando se encuentran sometidas a cargas severas de sismo o de viento. Estas condiciones afectan de forma significativa su comportamiento dinámico. Por este motivo, en diferentes estudios se han propuesto diversas metodologías para mejorar esta condición ([Abdelwahab, Djerouni, Ounis, Athamnia y Noroozinejad-Farsangi, 2023](#); [Han, Huang, Ji y Lin, 2019](#); [Mahrous, Abdelrahman y Galal, 2022](#); [Wang, Pan y Zhang, 2020](#)).

Los avances más recientes en el área del control estructural han incentivado a los ingenieros e investigadores a buscar alternativas más sofisticadas que ayuden a mejorar el desempeño de las estructuras ante este tipo de eventos ([Wani, Tantray y Sheikh, 2021](#)). Una de las estrategias que ha sido aplicada para mitigar los efectos de las fuerzas laterales en estructuras, es el uso de dispositivos de control pasivo ([Balaji y Karthik-Selvakumar, 2021](#); [Barkhordari y Tehranizadeh 2020](#); [Zhang y Wang, 2020](#)) activo ([Hosseinaei, Ghasemi y Etedali, 2021](#); [Mei, Chen, Wang y Gao, 2020](#); [Zare y Zahrai, 2021](#)), semiactivo ([Bathaei y Zahrai, 2022](#); [Lavassani y Doroudi, 2020](#); [Zareie y Zabihollah, 2022](#)) e híbrido ([He y Lu, 2019](#); [Hosseini-Lavassani, Shangapour, Homami y Gharehbaghi, 2022](#); [Wu, Yan, Zhu y Bai, 2020](#)).

Dentro del grupo de sistemas de control semiactivo se destaca el amortiguador magnetoreológico (MR damper), ya que este dispositivo tiene la capacidad de generar fuerzas de control a gran escala. Esta herramienta fue desarrollada ampliamente desde los años 1990 en sistemas de suspensión para automóviles ([Yoon, Kim y Choi, 2021](#)), prótesis humanas ([Saini, Chandraohan, Sujatha y Kumar, 2020](#)) y asientos de vehículos comerciales ([Zhang y Zhao, 2021](#)).

En el campo de la ingeniería civil, los amortiguadores MR han sido utilizados en diferentes investigaciones para mejorar el desempeño de las estructuras civiles y de sistemas mecánicos. Se han desarrollado sistemas de arriostramiento lateral inteligentes e híbridos, basados en fluidos magnetoreológicos ([Zareie, Issa, Seethaler, Zabihollah y Ahmad, 2021](#)). En otras investigaciones se han concebido amortiguadores MR rotacionales en modo de cizalla con rigidez variable SR-RMRD, para el control estructural adaptativo en tiempo real ([Yu, Royel Yousefi, Gu, Li y Li, 2020](#)). Algunos autores han trabajado en el diseño de amortiguadores MR para la reducción de la respuesta sísmica de estructuras aisladas en la base, teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura ([Abdeddaim, Djerouni, Ounis, Athamnia, Noroozinejad, 2022](#)).

Las propiedades reológicas y la capacidad de amortiguamiento de los dispositivos MR, pueden variar rápidamente en presencia de un campo magnético ([Wang et al., 2019](#)). Debido a su alta capacidad de amortiguamiento, bajo costo, alto rango dinámico y facilidad para adaptarse a diferentes temperaturas, estos mecanismos son ideales para generar fuerzas de control que permiten mejorar el comportamiento dinámico de las estructuras ante sollicitaciones severas generadas por cargas dinámicas ([Wang et al., 2021](#); [Wiehe, Kieburg y Mass, 2013](#)). Sin embargo, los amortiguadores MR tienen la desventaja de presentar un comportamiento altamente no lineal, lo cual es una condición que dificulta notablemente su implementación en los sistemas estructurales.

En algunas investigaciones se han implementado estrategias para generar fuerzas de control optimizadas empleando amortiguadores MR ([Bhaiya, Bharti, Shrimali y Datta, 2020](#); [Fu, Zhang, Li y Duan, 2019](#); [Raeesi, Azar, Veladi y Talatahari, 2020](#); [Zhao, Xu y Wang, 2019](#)). La mayoría de estas técnicas se basan en la optimización del rendimiento del sistema, mediante la minimización de la energía de control empleando ciertos parámetros de entrada.

Alternativamente se han desarrollado técnicas de control estructural basadas en algoritmos genéticos (Genetic Algorithms-GA), las cuales son eficientes para ejercer control en sistemas dinámicos altamente no lineales, caracterizándose principalmente por encontrar de forma eficiente una solución óptima desde un espacio de solución complejo y discontinuo ([Reza y Enrico, 2001](#)). Esta metodología de control forma parte de un grupo de técnicas denominadas metaheurísticas (Metaheuristic Algorithms), las cuales se fundamentan en los procesos de evolución biológica, grupos de individuos y procesos asociados con las leyes de la física ([Bonabeau, Dorigo y Theraulaz, 1999](#)). Los GA se definen de forma más generalizada como grupos de poblaciones que emplean operadores de selección, combinación y mutación, para generar nuevas poblaciones con características de optimización mejoradas ([Gen y Cheng, 1999](#)).

En los últimos años se han venido realizando diversas investigaciones en el campo de la ingeniería estructural basadas en GA, obteniéndose resultados prometedores. [Leyva et al. \(2021\)](#) optimizaron el diseño sísmico de un edificio de concreto reforzado con riostras de pandeo restringido (BRD), utilizando un algoritmo multi-objetivo. [Di Trapani et al. \(2020\)](#) propusieron la rehabilitación sísmica de un edificio de concreto reforzado, utilizando GA ([Di, Malavisi, Marano, Sberna y Greco, 2020](#)). [Das y Chakraborty](#) optimizaron un amortiguador de columna líquido sintonizado magnetorreológicamente (MRTLCD), en el cual los parámetros óptimos de diseño fueron determinados a través de un GA ([Das y Charkraborty, 2020](#)).

De forma particular el algoritmo genético de clasificación no dominada (NSGA-II), desarrollado en 2002 ha venido tomando relevancia ([Deb, Pratap, Agarwal y Meyarivan, 2002](#)). Este algoritmo se caracteriza por tres aspectos fundamentales: emplea una metodología de selección elitista, utiliza un operador de clasificación eficiente y su funcionamiento no requiere que sea operado manualmente por un usuario. [Bakhshinezhad y Mohebbi \(2020\)](#) desarrollaron un método efectivo para diseñar un amortiguador de fluido viscoso optimizado por NSGA-II. [Dehghani et al. \(2021\)](#) trabajaron en el análisis de un amortiguador de placa de acero cortado con láser, empleando una metodología Toggle-Brace-Curveddamper (TBCD) combinada con NSGA-II, para mejorar el desempeño sísmico en edificaciones.

En esta investigación se diseñó un controlador llamado CLF-MR_I que permite generar y optimizar fuerzas de amortiguamiento en estructuras a través de un amortiguador MR. A diferencia de otros trabajos semejantes desarrollados en esta área ([Kim y Kang, 2012](#)), el CLF-MR_I fue diseñado específicamente para contrarrestar los efectos adversos generados por las fuerzas sísmicas en la estructura y para reducir la dificultad de operación del dispositivo MR, que se caracteriza por tener un comportamiento altamente no lineal. Se emplea un novedoso sistema de control, el cual genera en tiempo real un conjunto de sistemas de inferencia optimizados con el criterio de no dominancia y permite evaluar

de forma simultánea el grado de eficiencia alcanzado para la respuesta pico de aceleraciones, el valor medio cuadrático máximo RMS de desplazamientos y el valor de la respuesta pico de desplazamientos. Adicionalmente de forma indirecta se optimizan las derivas máximas de piso, lo cual hace que la estructura desarrolle un mejor comportamiento en su función respuesta, cuando está sometida a cargas sísmicas.

La metodología de control propuesta fue implementada en una edificación de 32 niveles de piso que forma parte de una estructura real, la cual fue sometida a un grupo de 8 aceleraciones de suelo con diferentes rangos frecuenciales. El CLF-MR_1 optimiza de forma simultánea 50 controladores de lógica difusa, compuestos por sistemas de inferencias que emplean funciones de membresía gaussianas. Con el propósito de comparar la eficiencia del CLF-MR_1 se diseñó paralelamente un segundo controlador llamado CLF-MR_2, el cual funciona con lógica difusa clásica. Este segundo controlador está configurado mediante un conjunto de 49 funciones de membresía triangulares y ha sido utilizado en otras investigaciones similares ([Liu, Gordaninejad, Evrensel y Hitchcock, 2001](#)). Los resultados obtenidos demuestran que el CLF-MR_1 mejora significativamente la respuesta dinámica de la edificación (derivadas, respuestas pico de desplazamientos y aceleraciones, máxima respuestas RMS de desplazamientos y máxima respuesta RMS de aceleraciones), en comparación con el controlador CLF-MR_2 y con el sistema no controlado.

2. Marco teórico

Existen diferentes mecanismos que permiten simular el comportamiento de los amortiguadores MR, los cuales pueden agruparse en dos grandes categorías: modelos no paramétricos y modelos paramétricos. Los modelos no paramétricos se caracterizan por requerir una gran cantidad de datos que simulen el comportamiento del dispositivo bajo diferentes casos de carga. Los modelos paramétricos representan las características del dispositivo, a través de una serie de elementos lineales y no lineales ([Sapiński y Filuś, 2003](#)).

En esta investigación se implementa un modelo paramétrico conocido en la literatura como modelo fenomenológico ([Dyke, Spencer, Sain y Carlson, 1997](#)), el cual permite relacionar la fuerza de amortiguamiento del dispositivo MR, con la velocidad y el voltaje aplicado. La [Figura 1](#) muestra una representación gráfica de este modelo.

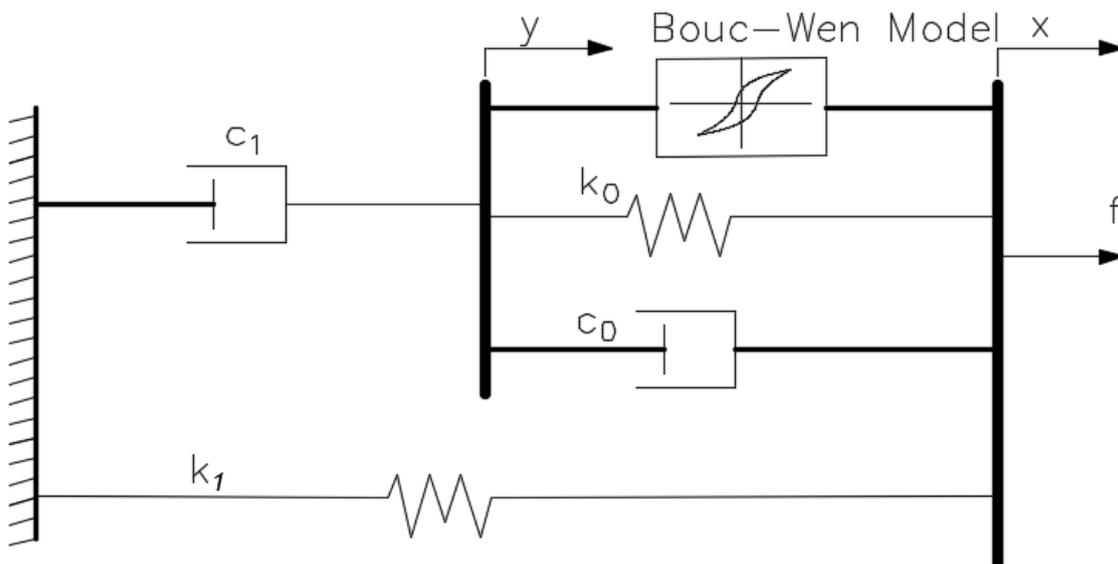


Figura 1. Representación gráfica del modelo fenomenológico para el amortiguador MR
Fuente: Elaboración propia

La ecuación (1) permite determinar la fuerza f generada por el amortiguador MR:

$$f = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (1)$$

El parámetro z se conoce como la variable evolutiva y se calcula según la ecuación (2):

$$\dot{z} = -\gamma | \dot{x} - \dot{y} | z | z |^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y}) | z |^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2)$$

Donde:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (3)$$

El parámetro k_I corresponde a la rigidez del amortiguador, c_0 y c_1 son el amortiguamiento viscoso a largas y bajas velocidades, respectivamente; k_0 es la rigidez del amortiguador a grandes velocidades, x es el desplazamiento relativo en un extremo del amortiguador MR, \dot{x} es la velocidad del amortiguador, y es el desplazamiento interno del amortiguador, x_0 es el desplazamiento inicial del resorte; k_p, γ, β, A y α son los parámetros que controlan la forma de los ciclos de histéresis, γ y β son parámetros que se encargan del estado interno f y determinan su acoplamiento con la fuerza y su evolución.

Los parámetros α, c_0 y c_1 , y son funciones que dependen del voltaje aplicado y se determinan mediante las ecuaciones (4)-(7):

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (4)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (5)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} u \quad (6)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) u \quad (7)$$

Donde α, c_0 y c_1 y v son los voltajes de entrada, voltajes de salida y la constante de tiempo para el filtro de primer orden, respectivamente. Las variables $\alpha_a, \alpha_b, c_{0a}, c_{0b}, c_{1a}$ y c_{1b} y son parámetros fijos que relacionan la fuerza del amortiguador MR, con el voltaje aplicado al conductor de corriente y la corriente magnética resultante.

De otro lado, la ecuación (8) permite modelar el comportamiento dinámico de la estructura analizada, cuando está se encuentra sometida a un registro de aceleraciones del suelo:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{\mathbf{x}}_g + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (8)$$

Donde $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ y \mathbf{b} son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura, respectivamente; $\mathbf{x}(t)$, $\dot{\mathbf{x}}(t)$ y $\ddot{\mathbf{x}}(t)$, y $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración de la estructura, respectivamente; $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ es el vector de aceleraciones de sismo, \mathbf{E} es la matriz de localización de fuerzas externas, \mathbf{D} es la matriz de localización de las fuerzas de control y \mathbf{b} es la fuerza de control desarrollada por los amortiguadores MR.

La anterior expresión puede ser reescrita en la forma de espacio-estado, según se indica en la ecuación (9):

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{H}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (9)$$

Donde:

$$\mathbf{z}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{Bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix}$$

Para el caso particular de esta investigación, fue utilizado el amortiguador MR propuesto por [Jung, Spencer y Lee \(2003\)](#). Este dispositivo tiene la capacidad de generar fuerzas de amortiguamiento hasta de 20 ton con un rango de voltaje variable que oscila entre 0V y 10V. La [Tabla 1](#) presenta las propiedades de diseño de este amortiguador.

Tabla I.
Parámetros para el modelo fenomenológico del amortiguador MR empleado

Parámetros para el amortiguador MR			
c_{0a}	110 kN.sec/m	α_a	46.2 kN/m
c_{0b}	114.3 kN.sec/m/V	α_b	41.2 kN/m/V
c_{1a}	8359 kN.sec/m	γ	164 m ²
c_{1b}	7482.9 kN.sec/m	β	164 m ²
k_0	0.01 kN/m	A	1107.2
k_1	0.485 kN/m	n	2
x_0	0.0 m	η	100 sec ⁻¹

Fuente: Modificado de ([Jung et al., 2003](#))

3. Metodología de optimización

En este trabajo se presentan dos metodologías que permiten administrar las fuerzas de control generadas por el amortiguador MR. La primera estrategia de control combina un algoritmo genético multi-objetivo llamado NSGA-II con lógica difusa. Aunque en investigaciones similares se ha empleado este procedimiento para mejorar el comportamiento dinámico en edificios de gran altura sujetos a carga de viento ([Kim y Kang, 2012](#)), la alternativa de control propuesta no ha sido implementada para controlar fuerzas de sismo, lo cual se pretende en este trabajo.

En la segunda metodología se implementa un controlador de lógica difusa clásica que emplea parámetros lingüísticos obtenidos por métodos empíricos para generar el sistema de inferencia del controlador. Esta metodología ha sido empleada en otras investigaciones para mejorar el comportamiento sísmico en sistemas aporticados ([Jung et al., 2003](#)).

3.1. Enfoque del NSGA-II

La concepción general bajo la cual opera un GA, se fundamenta en el concepto de supervivencia del más apto. Partiendo de una población inicial, las nuevas generaciones surgen mediante el uso iterativo de operadores genéticos (selección combinación y mutación), que actúan sobre los individuos presentes en cada generación ([Katoch, Chauhan y Kumar, 2021](#)). En la [Figura 2](#) se resume el modo de operación de un GA típico.

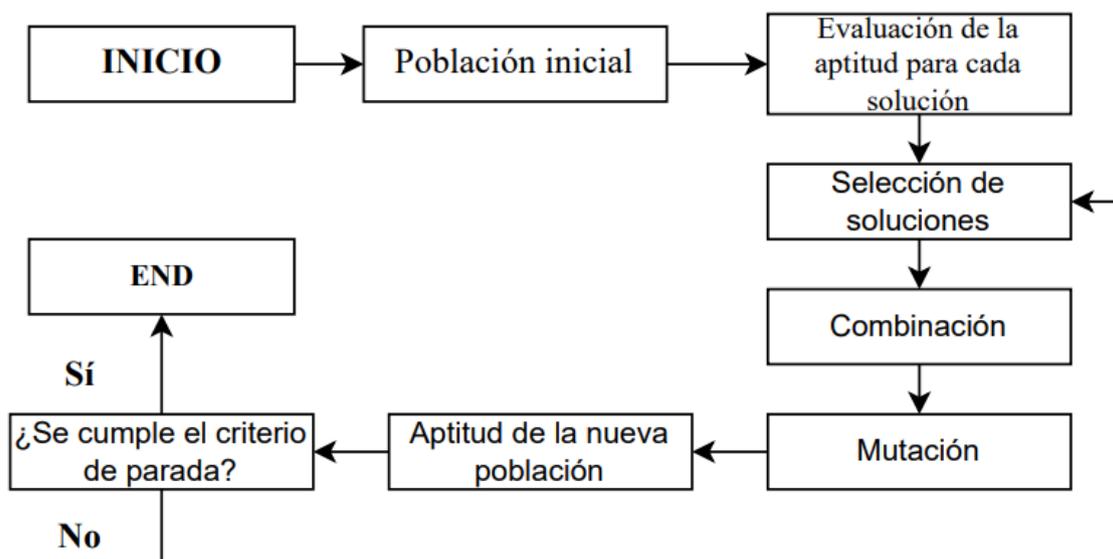


Figura 2. Modo de operación de un GA convencional

Fuente: Modificado de ([Nicklow et al., 2010](#)).

[Deb et al. \(2002\)](#) propusieron un GA, al cual denominaron algoritmo genético de clasificación no dominada (nondominated sorting genetic algorithm NSGA-II). Este algoritmo difiere de los métodos clásicos de optimización, los cuales sugieren convertir un problema multi-objetivo en un problema de optimización de un solo objetivo. El NSGA-II tiene tres características principales: (1) es un algoritmo elitista, lo cual le permite conservar hasta el final las mejores soluciones encontradas en iteraciones anteriores; (2) los individuos de la población se clasifican de acuerdo con su nivel de no dominancia, a través de un procedimiento rápido de ordenación y (3) el NSGA-II no requiere un parámetro de ajuste, lo que hace que el algoritmo sea independiente del usuario.

El procedimiento de optimización del NSGA, se puede resumir en 6 pasos. Paso 1: se genera una población P de posibles soluciones del problema multi-objetivo (MOP), la cual está conformada por N individuos y se evalúa la aptitud de estos elementos a través de las funciones objetivo, definidas por el usuario. Paso 2: clasificar los individuos en diferentes frentes de Pareto F_i , según el enfoque de no dominancia característico del algoritmo. Paso 3: generar una población descendiente P' de tamaño N, mediante operadores genéticos de combinación y mutación. Paso 4: se evalúa la aptitud de la población P' mediante las funciones objetivo. Paso 5: combinar las poblaciones P y P' , generando una población de tamaño 2N y se ordenan sus elementos en diferentes rangos mediante el enfoque de no dominancia. Paso 6: finalmente, se seleccionan los individuos contenidos en los frentes F_i de mejor rango, los cuales pasarán al siguiente proceso iterativo hasta cumplir el criterio de parada.

Se debe garantizar que el tamaño de la población final de los frentes seleccionados no supere el valor de N. En caso de que esto no suceda, se deben eliminar las soluciones con la menor distancia de hacinamiento. Esta condición genera que cada individuo de la población cuente con dos características principales: el rango y la distancia de hacinamiento.

El concepto de no dominancia hace referencia al conjunto de soluciones del MOP, que no se encuentran dominados entre sí, pero que son superiores al resto de soluciones en el espacio de búsqueda. Este conjunto de soluciones recibe el nombre particular de frente de Pareto ([Emmerich y Deutz, 2018](#)). Para el caso del NSGA-II, entre dos soluciones de diferentes rangos de no dominancia, se prefiere la solución con menor rango y entre dos individuos del mismo frente, se prefiere la solución con mayor distancia de hacinamiento. La [Figura 3](#) presenta el diagrama de flujo mediante el cual opera el NSGA-II.

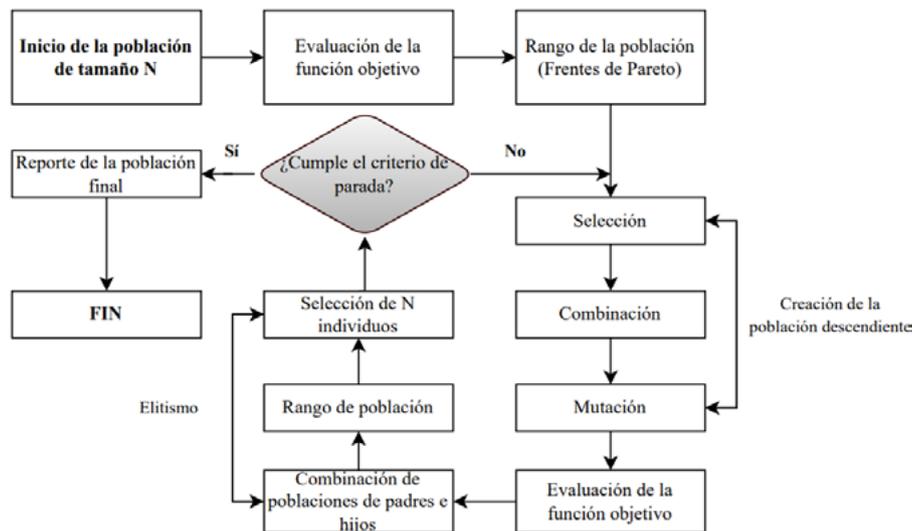


Figura 3. Diagrama de flujo del NSGA-II
 Fuente: Modificado de ([Kim y Kang, 2012](#))

3.2. Enfoque de la lógica difusa

Genéricamente la lógica difusa se define como un conjunto de reglas de control lingüístico, que relaciona los conceptos duales de implicación difusa y reglas de inferencia composicional, mediante un controlador de lógica difusa FLC. Esta metodología de control fue desarrollada en 1975 por Zadeh ([Lara, 2011](#)).

El uso de esta herramienta permite desarrollar estrategias de control automático, trabajando con información que es interpretada cualitativamente o que contiene algún grado de incertidumbre (Mittal, Jain, Vaisla, Castillo y Kacprzyk, 2020).

Un FLC genérico está compuesto por 4 elementos principales. El conocimiento base (1), en el cual se almacena las reglas de control lingüístico. La interfaz de fuzzificación (2), que se usa para transformar los datos reales en datos difusos. El sistema de inferencia (3), en el cual se toman las decisiones tomando como referencia el conocimiento base. La interfaz de desfuzzificación (4), en la cual se traslada la acción de control difuso a una acción de control real (Lee, 1990).

El funcionamiento de los sistemas difusos se rige con la caracterización de las funciones de membresía y las reglas de control difuso. Las funciones de membresía pueden adquirir diferentes formas geométricas y generan el grado de pertinencia del elemento. Las reglas de control difuso generan el sistema de inferencia en el controlador y se caracterizan por su configuración condicional (Si...entonces). Si se cumplen un conjunto de condiciones, entonces un conjunto de consecuencias se puede inferir. La Figura 4 presenta la configuración de un FLC convencional.

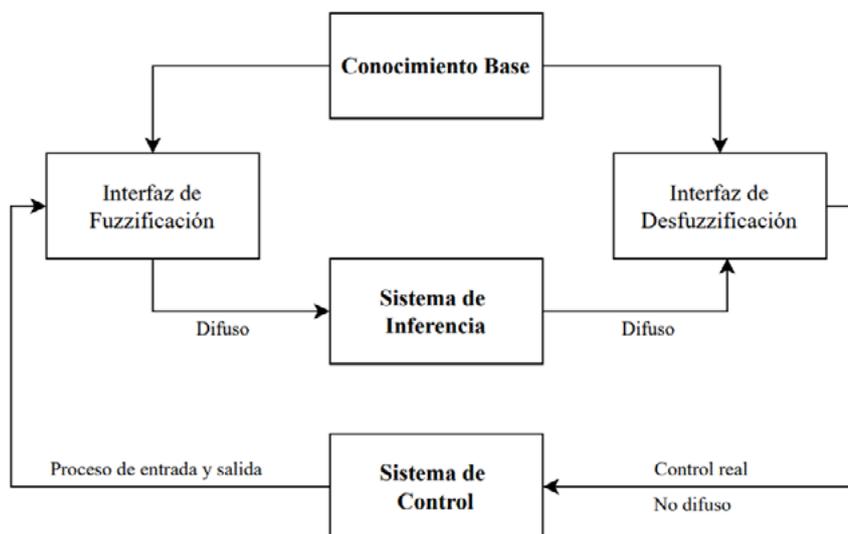


Figura 4. Modo de operación de un FLC convencional
Fuente: Modificado de (Lee, 1990)

4. Desarrollo de los sistemas de control estructural

En esta sección se presenta el procedimiento de análisis y diseño de los controladores CLF-MR_1 y CLF-MR_2, respectivamente. En los dos casos se pretende administrar y optimizar fuerzas de amortiguamiento a través de los dispositivos MR instalados en la edificación, con el propósito de mejorar el comportamiento dinámico de la estructura, la cual está sujeta a cargas sísmicas.

4.1. Diseño del controlador CLF-MR_1

El controlador CLF-MR_1 optimiza el número de reglas y los parámetros de las funciones de membresía de un FLC convencional, mediante la implementación de un algoritmo genético tipo NSGA-II. Para conseguir este objetivo se definen dos parámetros de entrada asociados con los desplazamientos y las velocidades del primer piso de la edificación y un único parámetro de salida, el cual corresponde al valor del voltaje requerido por el amortiguador MR para generar las fuerzas de control que buscan reducir la magnitud de la respuesta en la estructura.

Estos parámetros permiten configurar las funciones de membresía del sistema de inferencia, las cuales almacenan las características de una función gaussiana y permiten aproximarse de forma sencilla a otras funciones convencionales, ajustando el valor numérico de estos parámetros. La ecuación (10) presenta la expresión mediante la cual fueron definidas estas funciones:

$$f(x, a, b) = \exp \left[-\frac{(x - b)^2}{2a^2} \right] \tag{10}$$

Donde b es la media y a la desviación estándar para una función de membresía gaussiana. La [Figura 5](#), presenta el diagrama de flujo que describe la configuración del CLF-MR_1.

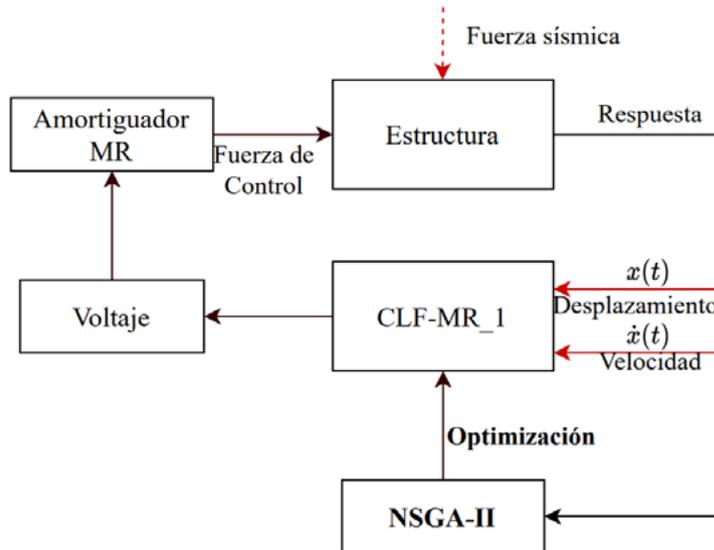


Figura 5. Diagrama de flujo para el CLF-MR_1
Fuente: Modificado de ([Kim y Kang, 2012](#))

4.2. Definición del entorno difuso

De forma semejante a un FLC convencional, el CLF-MR_1 relaciona los parámetros de entrada y de salida utilizando el mecanismo de declaración “si... entonces” (if...then), conocidos con el nombre de reglas difusas ([Kim y Kang, 2012](#)). La primera parte de la regla se denomina antecedente (sí) y la segunda se llama consecuente (entonces). Las afirmaciones de estas reglas difusas son resueltas en el antecedente con un grado de pertinencia que varía entre 0 y 1.

La [Figura 6](#) se presenta un ejemplo de cómo deben interpretarse estas reglas: si el desplazamiento del primer nivel de la edificación es 12.5 cm (MF1_R1) y la velocidad es de 20 cm/s (MF2_R1), entonces el voltaje aplicado es MF3_R1. Las variables MF1_R1, MF2_R1 y MF3_R1 son las funciones de membresía para la regla difusa 1 y sus parámetros son optimizados por el NSGA-II. Para este caso en particular, a la entrada 1 se le asigna un valor de 0.8 en la regla MF1_R1, mientras que a la entrada 2 se le asigna un valor de 0.5 en la regla MF2_R1.

Luego de introducir los valores de entrada y fuzzificarlos, se aplica el operador difuso al antecedente y los dos resultados que se obtuvieron (0.5 y 0.8) se convierten en un único valor numérico en el parámetro de salida (0.5), mediante la función del “mínimo (Min.)” para el operador difuso “y”.

Cuando al antecedente se le asigna un valor inferior a 1, entonces el conjunto difuso de salida se limita de acuerdo con el método de implicación empleado para la función “mínimo”. Este conjunto difuso posteriormente será defuzzificado asignándole un valor al voltaje de salida. Por lo general, en una entrada puede estar involucrada más de una regla y esto es una característica del razonamiento difuso ([Kim y Kang, 2012](#)).

En resumen, el procedimiento de evaluación de todas las reglas puede simplificarse en cinco pasos: **Paso 1:** Entradas difusas. **Paso 2:** Aplicar el operador difuso. **Paso 3:** Aplicar el método de implicación. **Paso 4:** Agregar todas las salidas. **Paso 5:** Defuzzificación. La [Figura 7](#) presenta un ejemplo numérico mediante el cual se describe este procedimiento.

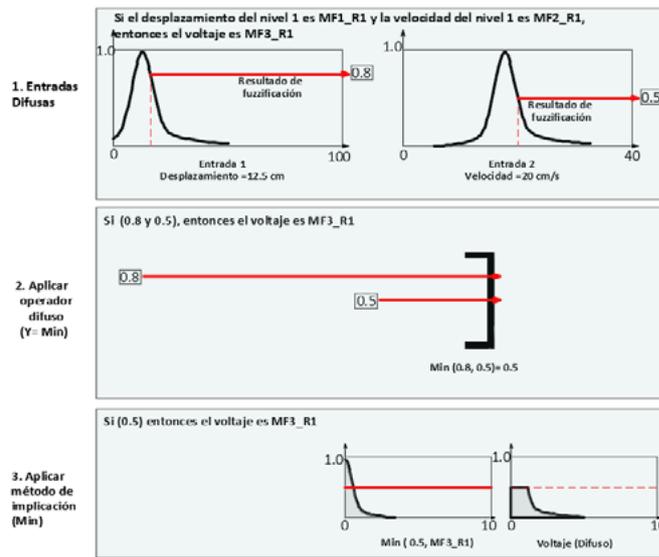


Figura 6. Enfoque de interpretación de una regla difusa para el CLF-MR_I
Fuente: Modificado de (Kim y Kang, 2012)

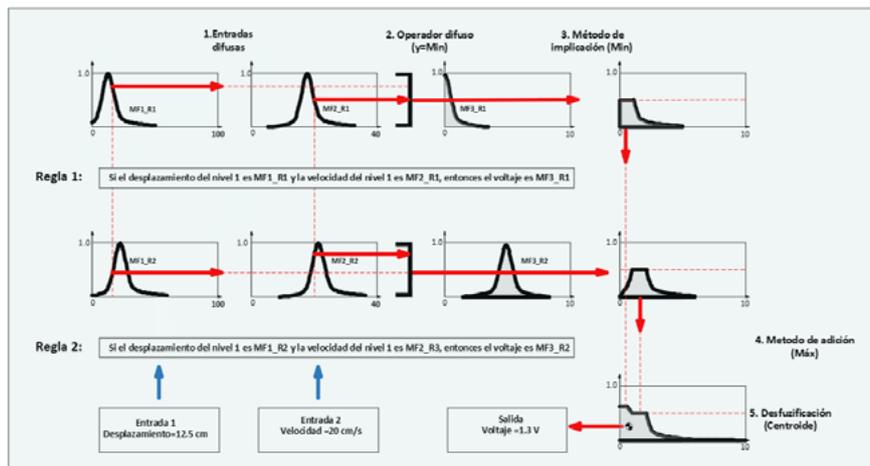


Figura 7. Ejemplo de funcionamiento general del controlador CLF-MR_I
Fuente: Modificado de (Kim y Kang, 2012)

4.3. Funciones objetivo y sistema de codificación

Se definieron tres funciones objetivo, mediante las cuales se evaluó el desempeño del controlador: la respuesta pico de aceleraciones J_1 , el máximo valor RMS de desplazamientos J_2 y la respuesta pico de desplazamientos J_3 . Las ecuaciones que se indican en la [Tabla 2](#) presentan la definición de estas funciones:

Tabla 2. Funciones objetivo a optimizar:

Funciones objetivo para el NSGA-II		
Respuesta pico de aceleraciones	Valor RMS máximo de desplazamientos	Respuesta pico de desplazamientos
$J_1 = \frac{\max_{t,i} \ddot{x}(t) }{ \ddot{x}_{max} }$	$J_2 = \frac{\max_{t,i} \text{RMS}(x(t))}{\text{RMS}(x_{max})}$	$J_3 = \frac{\max_{t,i} x(t) }{ x_{max} }$

Fuente: Los autores

x^{max} y \ddot{x}^{max} corresponden al valor máximo de desplazamiento y aceleración de la estructura no controlada respectivamente, evaluados en el tiempo t y en el nivel de piso i . Las variables $x(t)$ y $\ddot{x}(t)$ son los valores de desplazamiento y aceleración del sistema controlado, evaluados en el tiempo t y en el nivel de piso i .

Para la operación del CLF-MR_1 se definió una población inicial de 50 individuos, los cuales fueron optimizados durante un ciclo de 100 generaciones. En cada iteración se empleó un radio de convergencia para el operador de combinación $\rho_c=0.80$, con el objeto de mejorar la aptitud de cada individuo y para el operador de mutación $\rho_m=0.10$, con el propósito de evitar ciclos de convergencia temprana.

Los elementos que definen las características genéticas de cada individuo fueron estructurados en un cromosoma compuesto por los siguientes elementos: 20 reglas difusas constituidas por funciones de membresía gaussianas que fueron evaluadas en paralelo, los valores de aptitud para cada función objetivo, el rango y la distancia de hacinamiento asociada a cada cromosoma.

La [Figura 8](#) presenta la configuración estándar empleada en esta investigación, para un cromosoma convencional empleado en el proceso de optimización del CLF-MR_1. Las variables a_1, b_1 , indican los parámetros para las funciones de membresía de desplazamiento, a_2, b_2 , los parámetros para las funciones de membresía de velocidad y a_3, b_3 los parámetros para las funciones de membresía del voltaje.

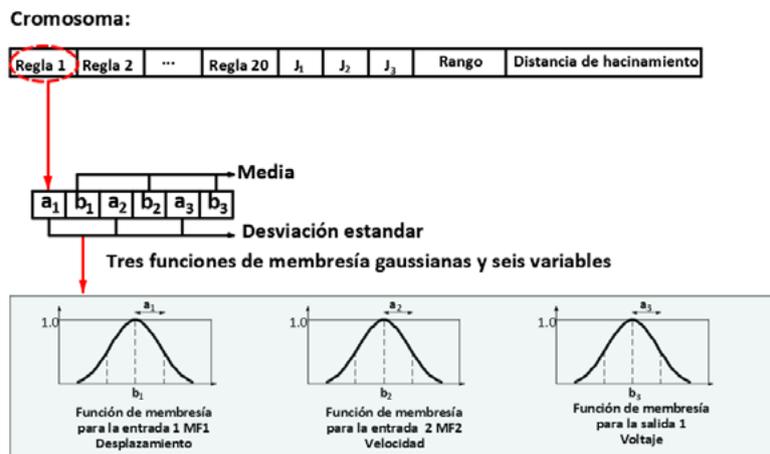


Figura 8. Estructura de codificación para un cromosoma de CLF-MR_1
Fuente: Modificado de (Kim y Kang, 2012)

4.4. Controlador CLF-MR_2

El CLF-MR_2 es un controlador de lógica difusa tradicional, que se encuentra conformado por un conjunto de 49 funciones de membresía triangulares. La configuración de estas funciones obedece al planteamiento desarrollado por Liu et al. (2001). De forma semejante al CLF-MR_1, se emplearon como parámetros de entrada para el CLF-MR_2 los desplazamientos y velocidades del primer piso de la edificación y como único parámetro de salida, se definió el voltaje requerido por el amortiguador para generar las fuerzas de control. Este controlador busca mantener la estructura en una posición de equilibrio bajo la siguiente premisa: si la edificación se encuentra por fuera de su posición de equilibrio y tiende a alejarse de esta posición, entonces será necesario incrementar el voltaje. Por otro lado, si la estructura tiende a acercarse a la posición de equilibrio, será necesario disminuir la magnitud del voltaje, e incluso no aplicarse.

Para fuzzificar los parámetros de entrada del controlador, el desplazamiento y la velocidad fueron definidos en el intervalo $[-1 \ 1]$ y se emplearon los factores de escala η_d y η_v que se indican en las ecuaciones (11) y (12), respectivamente:

$$\eta_d = k_d \cdot x \tag{11}$$

$$\eta_v = k_v \cdot \dot{x} \tag{12}$$

Donde k_d y k_v son los factores de escala para el desplazamiento y la velocidad respectivamente, x y \dot{x} son los valores de entrada para el desplazamiento y la velocidad en el primer piso de la edificación, respectivamente.

La función de salida para el voltaje fue definida en el rango [0 1] y los resultados fueron desfuzzificados empleando la ecuación (13)

$$V = V_{max} \left(\frac{5}{3}s - \frac{1}{3} \right) \quad (13)$$

Donde V_{max} es el voltaje máximo que puede proporcionar el dispositivo MR y s es el valor numérico de salida obtenido al evaluar los parámetros de entrada en el controlador.

En el sistema de inferencia para el controlador fueron empleados los siguientes parámetros lingüísticos: NG (negativo grande), NM (negativo mediano), NP (negativo pequeño), ZO (cero), PP (positivo pequeño), PM (positivo mediano), PG (positivo grande). La [Tabla 3](#) presentan el sistema de inferencia definido para el CLF-MR_2. ([Liu et al., 2001](#)).

Tabla 3.
Sistema de inferencia para el CLF-MR_2.

	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
NG	PG	PG	PG	PM	ZO	ZO	ZO
NM	PG	PG	PG	PP	ZO	ZO	PP
NP	PG	PG	PG	ZO	ZO	PP	PM
ZO	PG	PM	PP	ZO	PP	PM	PG
PP	PM	PP	ZO	ZO	PG	PG	PG
PM	PP	ZO	ZO	PP	PG	PG	PG
PG	ZO	ZO	ZO	PM	PG	PG	PG

Fuente: Modificado de ([Liu et al., 2001](#))

4.5. Definición del modelo estructural

El modelo estructural empleado en esta investigación es un pórtico plano de 32 niveles, el cual forma parte de una edificación real localizada en la ciudad de Medellín, Colombia. La estructura tiene una altura aproximada de 97 m, el sistema principal de resistencia sísmica está compuesto por vigas en reforzado de 21 MPa y columnas en concreto reforzado con una resistencia a la compresión variable entre 21 MPa y 49 MPa. En el análisis estructural se utilizó la hipótesis de diafragma rígido reduciendo la matriz de rigidez a un solo grado de libertad por piso. La matriz de amortiguamiento se calculó empleando el amortiguamiento de Rayleigh, asumiendo un 5,0% del amortiguamiento crítico (ξ) para el primer y último modo de la edificación. La matriz de masa diagonal considera el peso propio de la estructura y la carga muerta sobreimpuesta debida al uso.

Mediante un procedimiento de análisis de tanteo y error se realizaron diferentes simulaciones variando la posición y cantidad de amortiguadores MR en la estructura para distintas aceleraciones de suelo. Se concluyó que la respuesta estructural de la edificación presenta un mejor comportamiento, cuando en el sistema se incluyen 6 dispositivos MR localizados en los niveles 1, 6, 12, 18, 24 y 30 de la edificación. La [Figura 9](#) se presenta la localización de los amortiguadores MR utilizados, y la configuración en elevación de la estructura.

4.6. Registros sísmicos empleados

Fueron definidas ocho aceleraciones de suelo, las cuales se caracterizan por presentar diferentes registros frecuenciales y generan un grado de afectación relevante en el sistema principal de resistencia sísmica de la estructura. La [Figura 10](#) presenta los espectros de aceleraciones de estos registros en el dominio de la frecuencia, los cuales se obtuvieron empleando la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform-FFT). La [Tabla 4](#) provee la características generales de estos sismos, obtenidos de la base de datos del Center for Engineering Strong Motion Data-CESMD ([The Center for Engineering Strong Motion Data \(CESMD\), n.d.](#)).

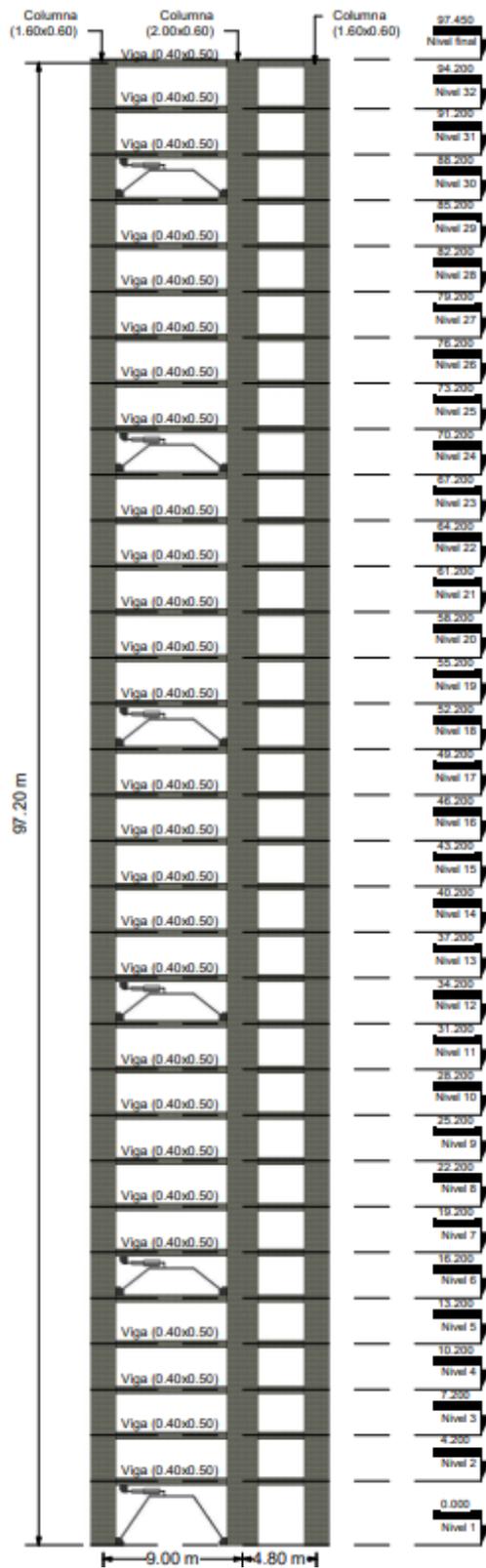


Figura 9. Alzado general de la edificación y localización de los amortiguadores MR
Fuente: Elaboración propia

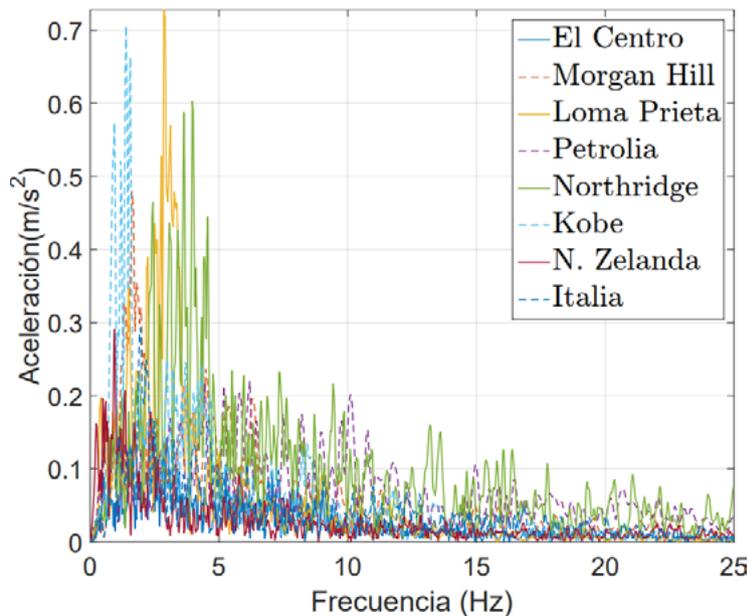


Figura 10. Espectros de aceleraciones en el dominio de la frecuencia
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.
Caracterización de las aceleraciones de suelo utilizadas

Sismo	Año	Estación	PGA[G]	Duración [s]
El Centro	1940	El Centro	0.34	53.7
Morgan Hill	1984	C. Lake Dam	1.16	59.8
Loma Prieta	1989	Watsonville	1.20	39.9
Petrolia	1992	C. Peak	1.14	60.0
Northridge	1994	Tarzana	1.78	60.0
Kobe	1995	Takatori	0.68	30.0
N. Zelanda	2010	Greendele	0.75	150.0
Italia	2016	F. Canapine	0.93	40.0

Fuente: Elaboración propia

5. Análisis, resultados y discusión

El análisis de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones, fueron divididos en dos partes. En la primera etapa se comparan algunos parámetros genéricos obtenidos para las simulaciones de las 8 aceleraciones de sismo seleccionadas: Valor Medio Cuadrático-RMS de desplazamientos y aceleraciones, derivas máximas de piso, índices de desempeño de las funciones objetivo, entre otros. En la segunda etapa se realiza un análisis más detallado de los resultados que se obtuvieron con el controlador CLF-MR_I para el sismo de Kobe, con el objeto de conocer las condiciones de funcionamiento operacional del NSGA-II.

5.1. Resultados generales de desempeño

Las Tablas 5 y 6 presentan los valores máximos de las respuestas RMS de aceleraciones y RMS de desplazamientos para los registros sísmicos analizados, respectivamente. Esta información permite establecer que el desempeño promedio de la respuesta máxima RMS de aceleraciones del CLF-MR_I, supera en un 24.6% a los resultados obtenidos con el CLF-MR_2. En relación con la respuesta máxima RMS de desplazamientos, el CLF-MR_I supera al FCL-2 en un 26.8 %. Respecto al sistema no controlado el CLF-MR_I mejora en promedio un 54.5% la respuesta máxima RMS de desplazamientos y en un 33.0% la respuesta RMS de aceleraciones.

Tabla 5.

Valores máximos para el parámetro RMS de aceleraciones

RMS de aceleraciones máximas obtenidas para los casos de estudio					
Sismo	No controlado (m)	CLF-MR_1 (m/s ²)	Reducción (%)	CLF-MR_2 (m/s ²)	Reducción (%)
El Centro	1.428	0.944	33.86	1.028	28.01
Morgan Hill	2.237	1.860	16.87	1.902	14.99
Loma Prieta	4.562	3.202	29.82	3.518	22.88
Petrolia	1.846	1.460	20.92	1.570	14.97
Northridge	5.080	3.617	28.81	3.830	24.60
Kobe	5.911	2.529	57.22	3.107	47.45
N. Zelanda	2.345	1.419	39.50	1.621	30.87
Italia	2.848	1.802	37.71	1.983	30.38

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.

Valores máximos para el parámetro RMS de desplazamientos

RMS de desplazamientos máximas obtenidas para los casos de estudio					
Earthquake	Uncontrolled (m)	CLF-MR_1 (m)	Reduction (%)	CLF-MR_2 (m)	Reduction (%)
El Centro	0.095	0.036	62.47	0.047	50.67
Morgan Hill	0.060	0.032	45.76	0.045	24.00
Loma Prieta	0.227	0.091	59.79	0.133	41.40
Petrolia	0.124	0.062	50.07	0.080	35.82
Northridge	0.130	0.084	35.92	0.101	22.28
Kobe	0.389	0.172	55.76	0.228	41.35
N. Zelanda	0.320	0.111	65.16	0.163	49.01
Italia	0.100	0.039	61.35	0.056	43.46

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis de los índices de desempeño obtenidos con la implementación del NSGA-II en el controlador CLF-MR_1. El mejor índice desempeño que se obtuvo para la respuesta pico de aceleraciones, corresponde para el sismo de Kobe con un valor $J_1 = 0.480$. En relación con la respuesta RMS de desplazamientos, el mejor resultado se obtuvo para el sismo de Nueva Zelanda con un valor $J_2 = 0.348$. Para la función objetivo de la respuesta pico de desplazamientos, el valor con mejor desempeño corresponde al sismo El Centro con $J_3 = 0.319$. La [Tabla 7](#) presenta los valores obtenidos en las simulaciones realizadas, para cada una de las funciones objetivo.

La [Tabla 8](#) presenta las derivas máximas de piso que se obtuvieron en el análisis. Se observa que el mejor desempeño para el CLF-MR_1 y el CLF-MR_2 se obtienen en el sismo El centro, en el cual hay una reducción en comparación con el sistema no controlado de 60.2% y el 44.0%, respectivamente.

Tabla 7.

Resultados obtenidos de los índices de desempeño del NSGA-II para el controlador CLF-MR_1

Resultados obtenidos para los índices de desempeño			
Sismo	J_1	J_2	J_3
El Centro	0.702	0.374	0.319
Morgan Hill	0.877	0.542	0.616
Loma Prieta	0.690	0.402	0.559
Petrolia	0.908	0.506	0.556
Northridge	0.838	0.635	0.677
Kobe	0.480	0.442	0.567
N. Zelanda	0.666	0.348	0.530
Italia	0.903	0.355	0.368

Fuente: Los autores

Tabla 8.
Derivas máximas de piso obtenidas en cada controlador

Valores máximos obtenidos para las derivas de piso					
Sismo	No controlado (m)	CLF-MR_1 (m)	Reducción (%)	CLF-MR_2 (m)	Reducción (%)
El Centro	0.701	0.279	60.18	0.393	43.98
Morgan Hill	1.021	0.824	19.29	0.835	18.19
Loma Prieta	1.593	1.053	33.89	1.276	19.92
Petrolia	0.515	0.328	36.43	0.441	14.43
Northridge	1.444	1.152	20.26	1.284	11.07
Kobe	2.296	1.210	47.30	1.462	36.32
N. Zelanda	1.821	1.022	43.85	1.270	30.22
Italia	1.345	0.787	41.47	1.054	21.63

Fuente: Los autores

La [Figura 11](#) y la [Figura 12](#) presenta los esquemas de las derivas máximas de piso, en cada una de las simulaciones realizadas, para los controladores CLF-MR_1, CLF-MR_2 y el sistema no controlado. En todos los casos los resultados obtenidos por el CLF-MR_1 para este indicador de daño, son mejores en relación con el CLF-MR_2 y al sistema no controlado

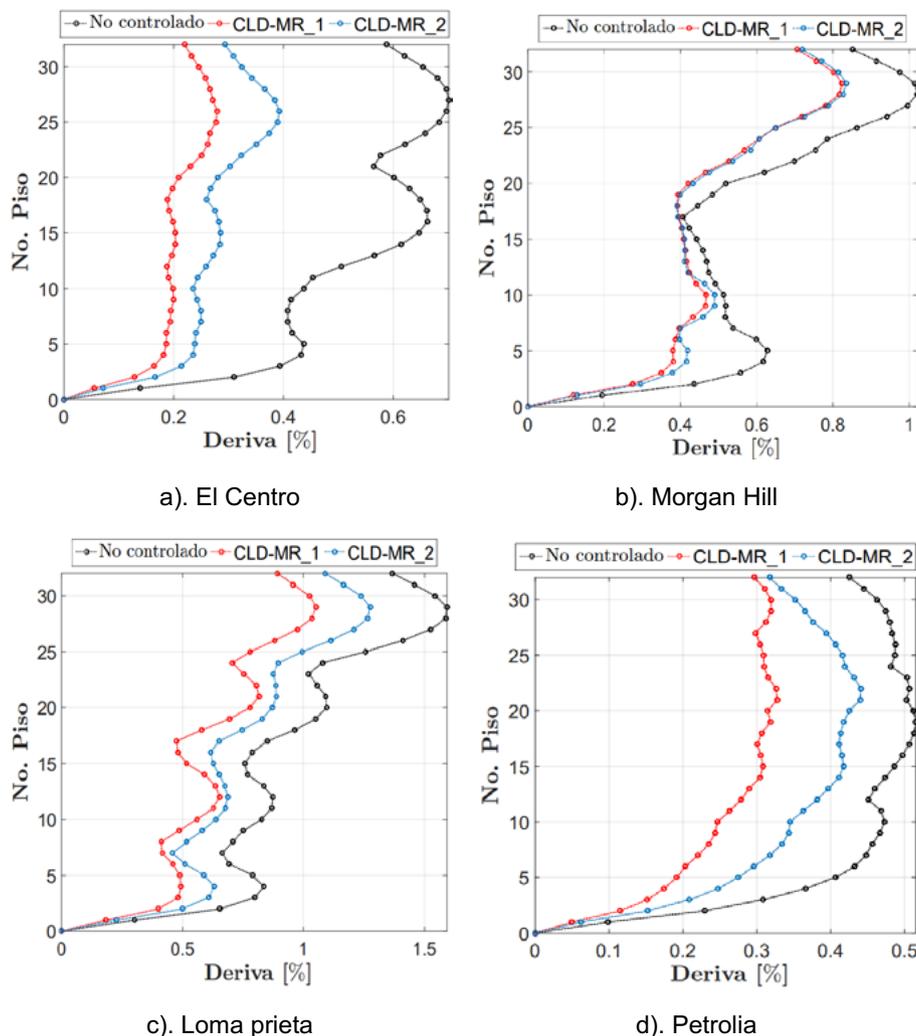


Figura 11. Derivas máximas de piso
Fuente: Elaboración propia

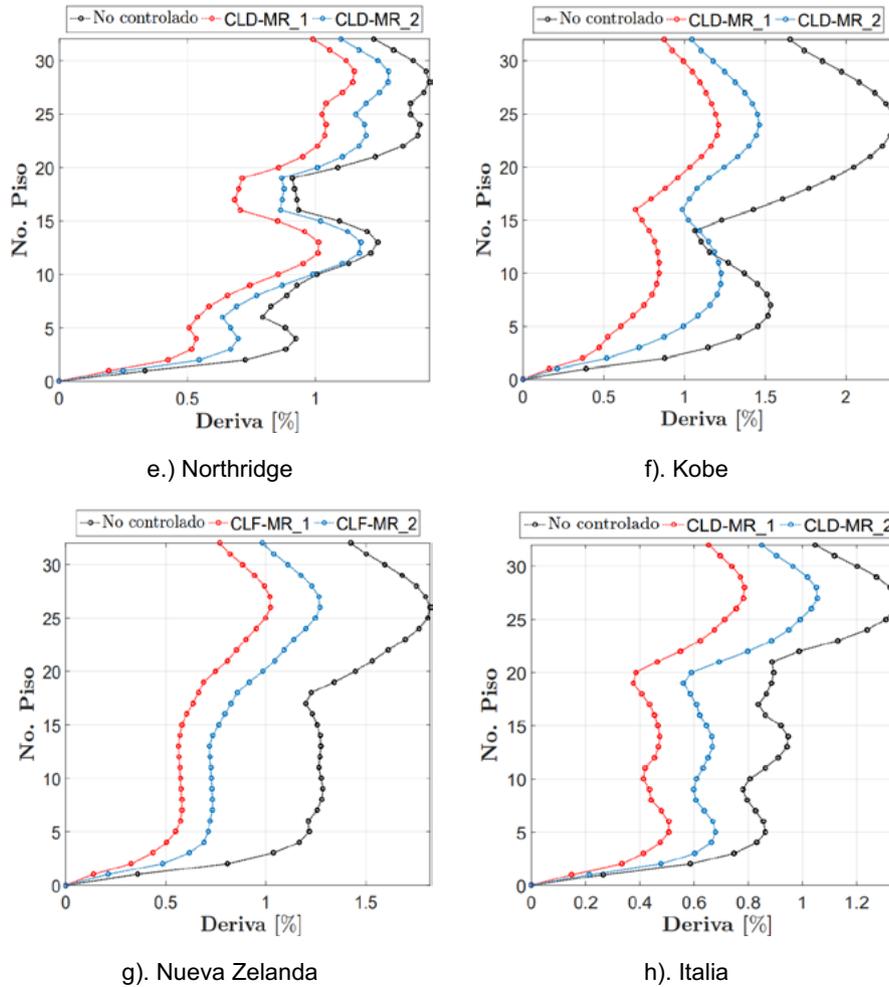


Figura 12. Derivas máximas de piso
Fuente: Elaboración propia

5.2. Análisis particular del sismo de Kobe

En esta sección se analizará con un mayor detalle, los resultados de optimización generados con el CLF-MR_1 a través del NSGA-II para el sismo de Kobe. Se ha seleccionado este registro de aceleraciones en particular, ya que fue la simulación en la cual se obtuvieron los mejores resultados de optimización, para las funciones objetivo propuestas en el análisis.

De forma similar a los demás registros de aceleraciones seleccionados, en este caso fueron optimizados 50 controladores de lógica difusa durante 100 generaciones. El procedimiento de optimización de estos controladores fue desarrollado empleando la metodología de control propuesta para el CLF-MR_1, a través del NSGA-II.

Se definieron 20 reglas difusas compuestas por funciones de membresía gaussianas caracterizadas por los parámetros a_1 , b_1 , según lo indicado en la ecuación 10. Se emplearon las variables de desplazamiento y velocidad del primer piso de la edificación como parámetros de entrada del sistema de inferencia y el voltaje como único parámetro de salida.

La [Tabla 9](#) presenta los resultados de los parámetros para el controlador con mejor desempeño, caracterizado por tener el menor valor del rango y el mayor valor para la distancia de hacinamiento. En este caso a_1 , b_1 son los parámetros del desplazamiento a_2 , b_2 son los parámetros de la velocidad y a_3 , b_3 son los parámetros del voltaje. Las [Figuras 13, 14 y 15](#) indican la representación gráfica de las funciones de membresía para el desplazamiento, la velocidad y el voltaje, respectivamente. La [Figura 16](#) indica el gráfico de superficie generado por las funciones de membresía del controlador seleccionado.

Tabla 9.
Para optimizados por el NSGA-II para el controlador CLF-MR_I

Reglas	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3
1	0.327	-0.534	0.270	-0.744	0.482	9.426
2	0.159	-0.768	0.137	0.208	0.198	2.168
3	0.155	-0.296	0.100	-0.109	0.459	8.291
4	0.191	-0.182	0.062	0.878	0.430	9.380
5	0.175	0.426	0.107	0.351	0.163	9.327
6	0.194	-0.162	0.056	0.753	0.073	3.644
7	0.00	0.352	0.133	-0.874	0.090	8.728
8	0.145	0.086	0.159	-0.386	0.550	1.408
9	0.215	-0.929	0.077	0.190	0.073	2.233
10	0.058	-0.461	0.170	0.224	0.163	4.491
11	0.042	0.993	0.043	-0.664	0.166	9.591
12	0.244	-0.106	0.451	0.709	0.347	9.904
13	0.081	-0.694	0.150	-0.230	0.479	7.173
14	0.139	0.772	0.409	0.990	0.365	9.884
15	0.368	-0.937	0.101	-0.220	0.140	8.304
16	0.158	0.896	0.163	-0.390	0.266	6.736
17	0.018	-0.114	0.048	0.507	0.465	1.395
18	0.053	0.065	0.008	-0.944	0.309	7.465
19	0.167	-0.982	0.002	0.796	0.161	2.114
20	0.212	0.408	0.020	-0.153	0.339	9.757

Fuente: Los autores

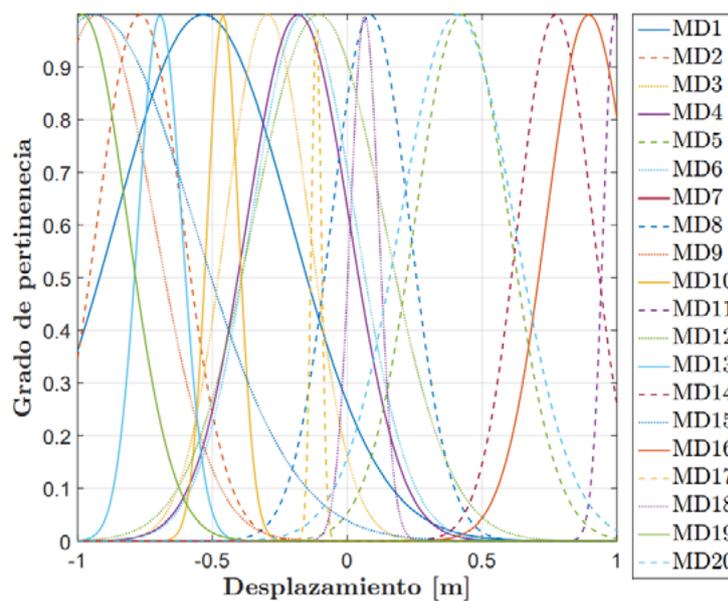


Figura 13. Funciones de membresía para el desplazamiento del CLF-MR_I

Fuente: Los autores

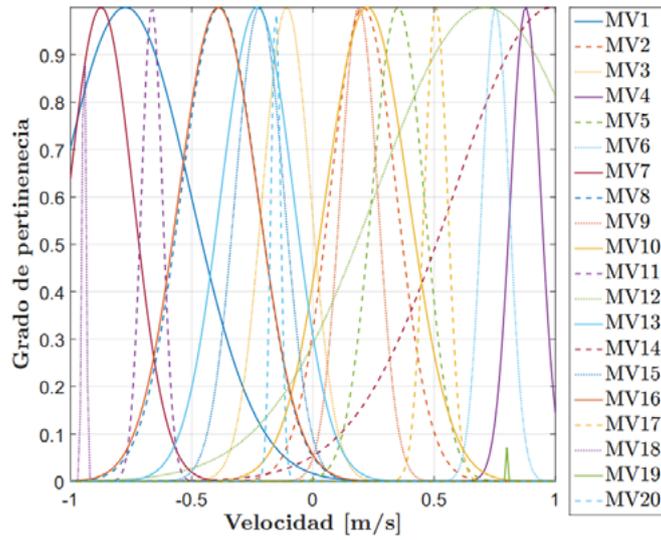


Figura 14. Funciones de membresía para la velocidad del CLF-MR_I
Fuente: Los autores

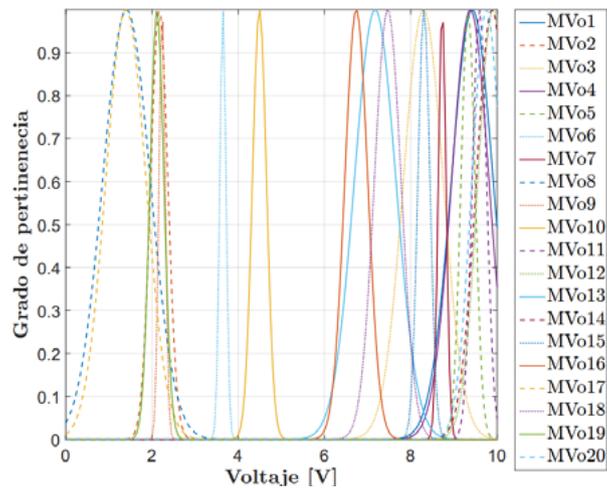


Figura 15. Funciones de membresía para la aceleración del CLF-MR_I
Fuente: Los autores

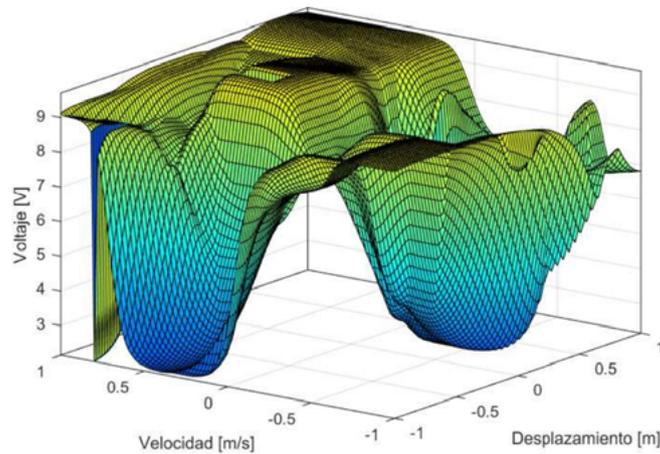


Figura 16. Diagrama de superficie difusa para el CLF-MR_I seleccionado
Fuente: Los autores

La [Figura 17](#) presenta la evolución de la aptitud de control de las funciones objetivo (J_1 , J_2 y J_3), para los controladores generados por el NSGA-II en las generaciones 01, 25, 50 y 100, respectivamente. En este esquema se observa que los individuos de las primeras generaciones se encuentran dispersos entre ellos y en la medida que aumenta el número de generaciones, los individuos convergen a un espacio del conjunto de soluciones más puntualizado.

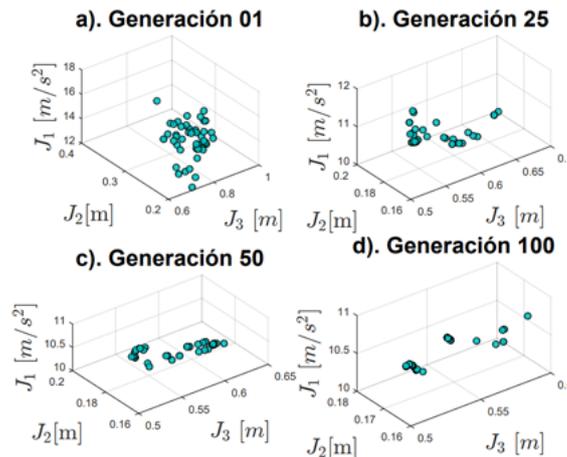


Figura 17. Evolución de la aptitud de control optimizados por el NSGA-II
Fuente: Los autores

La [Figura 18](#) realiza una comparación del desempeño de los individuos de la última generación, de acuerdo con las funciones objetivo-propuestas en análisis. Los resultados generados por el controlador que presenta un mejor desempeño fueron diferenciados mediante una marcación de color rojo en las gráficas.

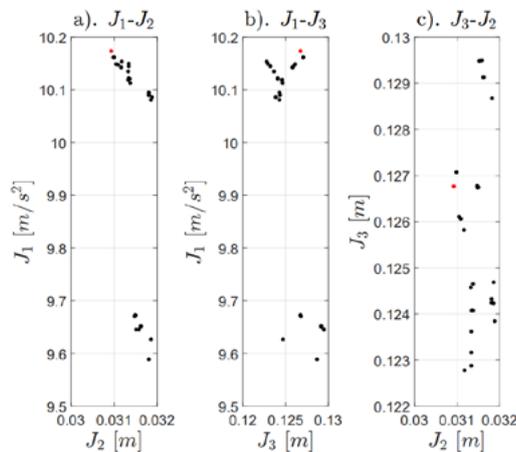


Figura 18. Comparación de las funciones objetivos para los individuos de la última generación
Fuente: Los autores

La [Figuras 19 y 20](#) presentan las curvas características del comportamiento histerético generadas por el amortiguador MR. Teóricamente, la superposición de las áreas generadas por estas curvas, representan la cantidad de energía que disipa el amortiguador MR durante la simulación.

La [Figura 21](#) indica la curva de voltaje en función del tiempo para los amortiguadores MR empelados en el caso de estudio. Una de las características más destacables en el comportamiento de este amortiguador, se asocia con las condiciones de variación del voltaje. El controlador asigna valores altos de voltaje, cuando el desplazamiento del último nivel de la edificación aumenta considerablemente. Esta tendencia permite ejercer un mejor control en la función de respuesta de la edificación.

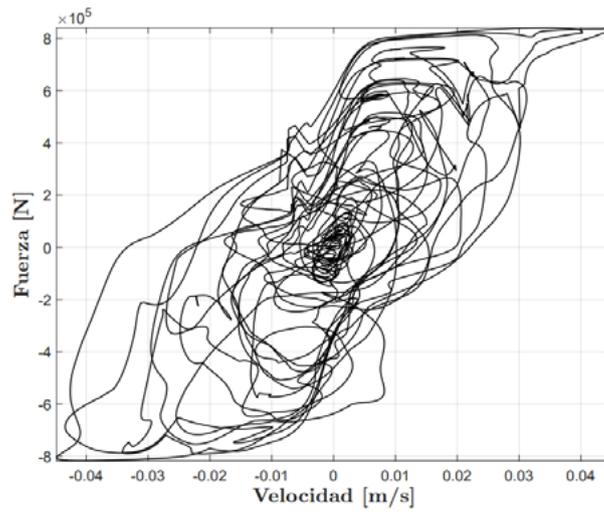


Figura 19. Curva de histéresis para el ciclo de velocidad del amortiguador MR
Fuente: Los autores

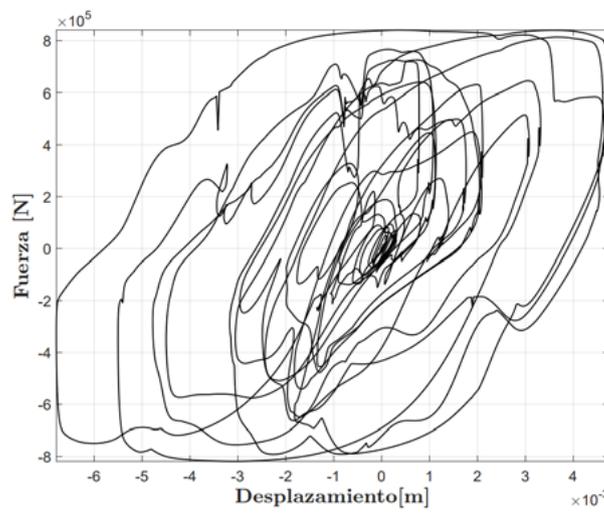


Figura 20. Curva de histéresis para el ciclo de desplazamiento del amortiguador MR
Fuente: Los autores

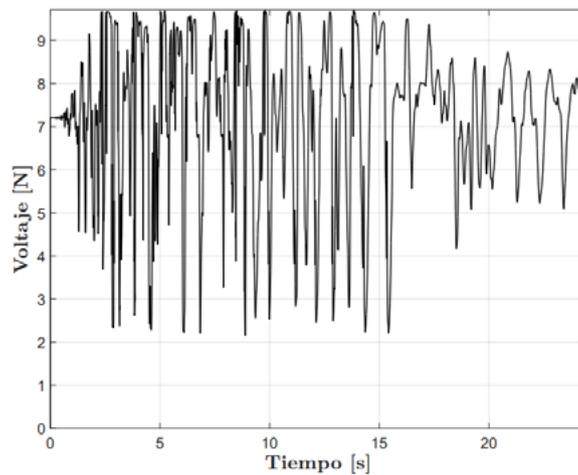


Figura 21. Variación de la curva de voltaje en el tiempo del amortiguador
Fuente: Los autores

5.3. Discusión

El enfoque principal de la metodología de control propuesta con el CLF-MR_1, busca evaluar la capacidad que tiene este controlador para optimizar fuerzas de control en estructuras sometidas a cargas sísmicas. De forma alterna se elaboró un segundo controlador llamado CLF-MR_2 que operan con lógica difusa tradicional, con el fin de contar con una metodología de control alterna que permita comparar el grado de desempeño del CLF-MR_1.

En términos generales se observa los dos sistemas de control propuestos presentaron un nivel de desempeño superior durante las simulaciones realizadas. Respecto a los resultados obtenidos para el sistema no controlado se alcanzaron reducciones de hasta un 57.2% en los valores máximos de la respuesta RMS de aceleraciones y una reducción de hasta un 65,2% para los valores máximos de la respuesta RMS de desplazamientos.

Adicionalmente, se evidencia que los resultados de estas reducciones para el CLF-MR_1 son significativamente mejores en comparación con los resultados obtenidos con el CLF-MR_2. El CLF-MR_1 supera al CLF-MR_2 hasta en un 9,8% para el caso de la respuesta máxima RMS de aceleraciones y hasta en un 21,8% para el caso de la máxima RMS de desplazamientos. De otro lado se pudo verificar que al ejercer un control sobre los parámetros de desplazamiento y aceleración empleando las funciones objetivo en el controlador CLF-MR_1, se realiza de forma indirecta un control para reducir las derivas máximas de piso de la edificación, en las cuales se alcanzaron reducciones no inferiores a un 20.3%, respecto al sistema no controlado.

6. Conclusiones

Para las 8 aceleraciones de suelo a las cuales fue sometida la estructura, se optimizaron de forma simultánea 50 controladores de lógica difusa a través del NSGA-II durante 100 generaciones. La ejecución del algoritmo se realizó en un equipo convencional empleando programación serial en el software Matlab V2018. El tiempo promedio efectuado en cada simulación tuvo una duración aproximada de 36 horas. Este resultado permite inferir que el esfuerzo computacional que demanda el NSGA-II para la depuración del algoritmo es relevante. Esta condición particular puede mejorarse en la medida que se use un equipo que tenga una mayor capacidad de procesamiento. Sin embargo, se destaca que a través de esta metodología es posible explorar de una forma más eficiente el conjunto de reglas y funciones de membresía que optimizan la administración de las fuerzas de control en el amortiguador MR.

De forma contraria al CLF-MR_1, los resultados muestran que con el CLF-MR_2 se reducen los tiempos de depuración en el proceso de optimización. Aunque es importante mencionar que con el CLF-MR_2, la cantidad de sistemas de inferencias se reduce solamente a uno. Esta condición impide explorar de forma completa el conjunto de parámetros que optimizan las reglas y funciones de membresía que generan del mejor desempeño del sistema de control.

Se destaca que en esta investigación se realizaron otras simulaciones, en las cuales se empleó una población de 20 individuos para el controlador CLF-MR_1. Con los resultados obtenidos en este caso, se determinó que es necesario generar una cantidad aproximada de 300 generaciones, para obtener resultados semejantes a los alcanzados con las poblaciones de 50 individuos y la diferencia en los tiempos de ejecución en los dos casos es similar.

Realizando un análisis de los resultados obtenidos para las derivas máximas de piso, el mejor desempeño para el CLF-MR_1 se obtuvo en el sismo El Centro. El porcentaje de reducción obtenido respecto al sistema no controlado fue del 60.18%, mientras que el porcentaje de reducción del CLF-MR_2 en este mismo caso fue del 43.98%. Esta condición indica que el CLF-MR_1 fue superior al CLF-MR_2 en un 16.2%.

Adicionalmente, el CLF-MR_1 superó en promedio en un 33.0% la respuesta RMS de aceleraciones y en un 54.5% la respuesta RMS de desplazamientos, respecto al sistema no controlado. Estos porcentajes fueron superiores a los alcanzados por el CLF-MR_2, en los cuales se generó una reducción promedio de 26.8% para la respuesta RMS de aceleraciones y de un 38.5% para la respuesta RMS de desplazamientos. Particularmente se observa que en los dos controladores se genera una mayor mejora en la respuesta RMS de desplazamientos, en comparación la respuesta RMS de aceleraciones.

Finalmente, en relación con los índices de desempeño promedio obtenidos por el CLF-MR_1 para la respuesta pico de aceleraciones J_1 , el valor RMS máximo de desplazamientos J_2 y la respuesta pico de desplazamientos J_3 fueron de 0.76, 0.45

y 0.52, respectivamente. Bajo esta condición puede deducirse que el CLF-MR_I tiene una mayor tendencia a mejorar los objetivos que relacionan la función de respuesta de desplazamiento en la edificación. 

Agradecimientos

Los autores de esta investigación agradecen a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por el apoyo dado para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

1. ABDEDDAIM, Mahdi; DJEROUNI, Salah; OUNIS, Abdelhafid; ATHAMNIA, Brahim; NOROOZINEJAD-FARSANGI, Ehsan. Optimal design of Magnetorheological damper for seismic response reduction of Base-Isolated structures considering Soil-Structure interaction. In: Structures, 2022. vol. 38, p. 733–752. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.039>
2. ABDELWAHAB, Mohamed; GHAZAL, Tarek; NADEEM, Kaina; ABOSHOSHA, Haitham; ELSHAER, Ahmed. Performance-based wind design for tall buildings: Review and comparative study. In: Journal of Building Engineering, 2023. vol. 68, p. 106–103. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106103>
3. BAKHSHINEZHAD, Sina; MOHEBBI, Mohtasham. Multi-objective optimal design of semi-active fluid viscous dampers for nonlinear structures using NSGA-II. In: Structures, 2020. vol. 24, p. 678–689. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.004>
4. BALAJI, PS; KARTHIK-SELVAKUMAR, K. Applications of Nonlinearity in Passive Vibration Control: A Review. In: Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2021. vol. 9, p. 183–213. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00216-3>
5. BARKHORDARI, M. S.; TEHRANIZADEH, M. Ranking Passive Seismic Control Systems by Their Effectiveness in Reducing Responses of High-Rise Buildings with Concrete Shear Walls Using Multiple-Criteria Decision Making. In: International Journal of Engineering, 2020. vol.33, p. 1479–1490. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.08b.06>
6. BATHAEI, Akbar; ZAHRAI, Seyed Mehdi. Improving semi-active vibration control of an 11-story structure with non-linear behavior and floating fuzzy logic algorithm. In: Structures, 2022. vol. 39, p. 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.022>
7. BHAIYA, Vishisht; BHARTI, Shiv Dayal; SHRIMALI, Mahendra Kumar; DATTA, Tushar Kanti. Hybrid seismic control of buildings using tuned mass and magnetorheological dampers. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 2020. vol. 173, p. 471–487. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00090>
8. BONABEAU, Eric; DORIGO, Marco; THERAULAZ, Guy. Swarm intelligence: from natural to artificial systems (Issue 1). In: Oxford university press. 1999.
9. DAS, Sourav; CHAKRABORTY, Arunasis. Optimal Design of MRTLCD for Semi-active Vibration Control of Building Structures Using Genetic Algorithm. Springer Singapore. 2020. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-5693-7_43
10. DEB, K; PRATAP, A; AGARWAL, S; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. In: IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002. vol. 6, p. 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
11. DEGHANI, S; FATHIZADEH, S F; VOSOUGH, A R; FARSANGI, E N; YANG, T Y; HAJIRASOULIHA, I. Development of a novel cost-effective toggle-brace-curveddamper (TBCD) for mid-rise steel structures using multi-objective NSGA II optimization technique. In: Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021. vol. 63, p. 661–688. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02718-w>
12. DI TRAPANI, Fabio; MALAVISI, Marcia; MARANO, Giuseppe Carlo; SBERNA, Antonio Pio; GRECO, Rita. Optimal seismic retrofitting of reinforced concrete buildings by steel-jacketing using a genetic algorithm-based framework. In: Engineering Structures, 2020. vol. 219, p. 110864. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110864>
13. DYKE, S. J.; SPENCER, B. F.; SAIN, M. K.; CARLSON, J. D. Phenomenological model of a magnetorheological damper. In: Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997. vol. 123, p. 230–238. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:3(230))
14. EMMERICH, Michael T M; DEUTZ, André H. A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. In: Natural Computing, 2018. vol. 17, p. 585–609. <https://doi.org/10.1007/s11047-018-9685-y>
15. FU, Weiqing; ZHANG, Chunwei; LI, Mao; DUAN, Cunkun. Experimental Investigation on Semi-Active Control of Base Isolation System Using Magnetorheological Dampers for Concrete Frame Structure. In Applied Sciences, 2019. Vol. 9, p. 3866. <https://doi.org/10.3390/app9183866>
16. GEN, Mitsuo; CHENG, Runwei. Genetic algorithms and engineering optimization (Vol. 7). Wiley-Interscience. 1999. 512p 10.1002/9780470172261
17. HAN, Xiaolei; HUANG, Difang; JI, Jing; LIN, Jinyue. Component deformation-based seismic design method for RC structure and engineering application. In: Earthquakes and Structures, 2019. vol. 16, p. 575–588. <https://doi.org/10.12989/eas.2019.16.5.575>
18. HE, Xiangdong; LU, Z Zheng. Seismic fragility assessment of a super tall building with hybrid control strategy using IDA method. In: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019. vol. 123, p. 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.05.003>
19. HOSSEINAEI, Saeed; GHASEMI, Mohammad Reza; ETEDALI, Sadegh. Optimal Design of Passive and Active Control Systems in Seismic-excited Structures Using a New Modified TLBO. In: Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2021. vol. 65, p. 37–55. <https://doi.org/10.3311/PPci.16507>
20. HOSSEINI LAVASSANI, Seyed Hossein; SHANGAPOUR, Saman; HOMAMI, Peyman; GHAREHBAGHI, Vahidreza; NOROOZINEJAD FARSANGI, Ehsan; YANG, T Y. An innovative methodology for hybrid vibration control (MR+TMD) of buildings under seismic excitations. In: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022. vol. 155, p. 107175. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107175>
21. JUNG, Hyung-Jo; SPENCER, Billie F; LEE, In-Won. Control of Seismically Excited Cable-Stayed Bridge Employing Magnetorheological Fluid Dampers. In: Journal of Structural Engineering, 2003. vol. 129(7), p. 873–883. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2003\)129:7\(873\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:7(873))

22. KATOCH, Sourabh; CHAUHAN, Sumit Singh; KUMAR, Vijay. A review on genetic algorithm: past, present, and future. In: *Multimedia Tools and Applications*, 2021. vol: 80(5), p. 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
23. KIM, Hyun-Su; KANG, Joo-Won. Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm. In: *Engineering Structures*, 2012. vol: 41, p. 242–257. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.038>
24. LARA VALENCIA, Luis Augusto. Estudio de Algoritmo de Control Semi-Activo Aplicados a Amortecedores. Tese (doutorado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, 2011. 223p. <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/621217>
25. LAVASANI, Seyed Hossein Hosseini; DOROUDI, Rouzbeh. Meta heuristic active and semi-active control systems of high-rise building. In: *International Journal of Structural Engineering*, 2020. vol: 10(3), p. 232–253. <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2020.108529>
26. LEE, C. C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1990. vol: 20(2), p. 404–418. <https://doi.org/10.1109/21.52551>
27. LEYVA, Herian; BOJÓRQUEZ, Juan; BOJÓRQUEZ, Edén; REYES-SALAZAR, Alfredo; CARRILLO, Julián; LÓPEZ-ALMANSA, Francisco. Multi-objective seismic design of BRBs-reinforced concrete buildings using genetic algorithms. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021. vol: 64(4), p. 2097–2112. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02965-5>
28. LIU, Yanming; GORDANINEJAD, Faramarz; EVRENSEL, Cahit A; HITCHCOCK, Gregory H. Experimental study on fuzzy logic vibration control of a bridge using fail-safe magnetorheological fluid dampers. In: *Proc. SPIE, Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways 2001*. vol: 4330. <https://doi.org/10.1117/12.434135>
29. MAHROUS, Amgad; ABDELRAHMAN, Belal; GALAL, Khale. Seismic response analysis of reinforced masonry core walls with boundary elements. In: *Engineering Structures*, 2022. vol: 270, p. 114882. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114882>
30. MEI, Zhen; GUO, Zixiong; CHEN, Lincong; WANG, Haifeng; GAO, Yichao. Genetic algorithm-based integrated optimization of active control systems for civil structures subjected to random seismic excitations. In: *Engineering Optimization*, 2020. vol: 52(10), p. 1700–1719. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2019.1677632>
31. MITTAL, Kanika; JAIN, Amita; VAISLA, Kunwar Singh; CASTILLO, Oscar; KACPRZYK, Janusz. A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020. vol: 95, p. 103916. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103916>
32. NICKLOW, John; REED, Patrick; SAVIC, Dragan; DESSALEGNE, Tibebe; HARRELL, Laura; CHAN-HILTON, Amy; KARAMOUZ, Mohammad; MINSKER, Barbara; OSTFELD, Avi; SINGH, Abhishek; ZECHMAN, Emily. State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010. vol: 136, p. 412–432. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000053)
33. RAEESI, Farzad; AZAR, Bahman Farahmand; VELADI, Hedayat; TALATAHARI, Siamak. An inverse TSK model of MR damper for vibration control of nonlinear structures using an improved grasshopper optimization algorithm. In: *Structures*, 2020. vol: 26, p. 406–416. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.026>
34. REZA, S M; ENRICO, S. Analysis of Steel-Concrete Composite Frames with Bond-Slip. In: *Journal of Structural Engineering*, 2001. vol: 127(11), p. 1243–1250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:11\(1243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:11(1243))
35. SAINI, R S T; CHANDRAMOHAN, S; SUJATHA, S; KUMAR, H. Design of bypass rotary vane magnetorheological damper for prosthetic knee application. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020. vol: 32(9), p. 931–942. <https://doi.org/10.1177/1045389X20942577>
36. SAPIŃSKI, Bogdan; FILUŚ, Jacek. Analysis of parametric models of MR linear damper. In: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2003. vol: 41(2), p. 215–240. <http://www.ptmts.org.pl/jtam/index.php/jtam/article/view/v41n2p215>
37. THE CENTER FOR ENGINEERING STRONG MOTION DATA (CESMD). (n.d.). Strong-Motion Data Set. <https://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/archive.pl>
38. WANG, Guangshuo; GENG, Jiahong; QI, Xiongwei; DU, Tianxiang; ZENG, Yingzhe; YU, Ruitao; YUAN, Mingwei; PENG, Hesong; LI, Haibin; CHEN, Chao. Rheological performances and enhanced sedimentation stability of mesoporous Fe₃O₄ nanospheres in magnetorheological fluid. In: *Journal of Molecular Liquids*, 2021. vol: 336, p. 116389. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116389>
39. WANG, Wenxi; HUA, Xugang; WANG, Xiuyong; WU, Jiali; SUN, Hongxin; SONG, Gangbing. Mechanical behavior of magnetorheological dampers after long-term operation in a cable vibration control system. In: *Structural Control and Health Monitoring*, 2019. vol: 26(1), p. e2280. <https://doi.org/10.1002/stc.2280>
40. WANG, Zhen; PAN, Wei; ZHANG, Zhiqian. High-rise modular buildings with innovative precast concrete shear walls as a lateral force resisting system. In: *Structures*, 2020. vol: 26, p. 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.006>
41. WANI, Zubair Rashid; TANTRAY, Manzoor; SHEIKH, Javed Iqbal. Experimental and numerical studies on multiple response optimization-based control using iterative techniques for magnetorheological damper-controlled structure. In: *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2021. vol: 30(13), p. e1884. <https://doi.org/10.1002/ta.1884>
42. WIEHE, A; KIEBURG, C; MAAS, J. Temperature induced effects on the durability of MR fluids. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2013. vol: 412(1), p. 1 2017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/412/1/012017>
43. WU, Qiaoyun; YAN, Huichao; ZHU, Hongping; BAI, Xixuan. Shaking table test study on the seismic isolation effect of a hybrid passive control system. In: *Measurement*, 2020. vol: 164, p. 108125. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108125>
44. YOON, Dal-Seong; KIM, Gi-Woo; CHOI, Seung-Bok. Response time of magnetorheological dampers to current inputs in a semi-active suspension system: Modeling, control and sensitivity analysis. In: *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021. vol: 146, p. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106999>
45. YU, Yang; ROYEL, Sayed; LI, Yancheng; LI, Jianchun; YOUSEFI, Amir M; GU, Xiaoyu; LI, Shaoqi; LI, Huan. Dynamic modelling and control of shear-mode rotational MR damper for mitigating hazard vibration of building structures. In: *Smart Materials and Structures*, 2020. vol: 29(11), p. 114006. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abb573>
46. ZARE GOLMOGHANY, Mohsen; ZAHRAI, Seyed Mehdi. Improving seismic behavior using a hybrid control system of friction damper and vertical shear panel in series. In: *Structures*, 2021. vol: 31, p. 369–379. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.007>
47. ZAREIE, Shahin; ISSA, Anas Salem; SEETHALER, Rudolf; ZABIHOLLAH, Abolghassem; AHMAD, Rafiq. A novel SMA-magnetorheological hybrid bracing system for seismic control. In: *Engineering Structures*, 2021. vol: 244, p. 112709. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112709>

48. ZAREIE, Shahin; ZABIHOLLAH, Abolghassem. A semi-active SMA-MRF structural stability element for seismic control in marine structures. In: *Applied Ocean Research*, 2020. vol: 100, p. 102161. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102161>
49. ZHANG, Chunwei; WANG, Hao. Swing vibration control of suspended structures using the Active Rotary Inertia Driver system: Theoretical modeling and experimental verification. In: *Structural Control and Health Monitoring*, 2020. vol: 27(6), p. e2543. <https://doi.org/10.1002/stc.2543>
50. ZHANG, Na; ZHAO, Qiang. Back-Stepping Sliding Mode Controller Design for Vehicle Seat Vibration Suppression Using Magnetorheological Damper. In: *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2021. vol: 9(8), p. 1885–1902. <https://doi.org/10.1007/s42417-021-00333-7>
51. ZHAO, Yu-Liang; XU, Zhao-Dong; WANG, Cheng. Wind vibration control of stay cables using magnetorheological dampers under optimal equivalent control algorithm. In: *Journal of Sound and Vibration*. 2019. vol. 443, p. 732-747. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.12.016>