

Algoritmo híbrido de optimización de la ballena y la lógica difusa para amortiguadores magnetoreológicos

Hybrid Optimization Algorithm Based on Whale Optimization and Fuzzy Logic for Magnetorheological Dampers

Verónica Valencia-Valencia¹ Luis A. Lara-Valencia¹ 

¹Universidad Nacional de Colombia. Núcleo Robledo. Medellín Colombia.

Resumen

Introducción: para mitigar las vibraciones en estructuras sometidas a cargas dinámicas, se han estudiado los amortiguadores magnetoreológicos (MR) como una solución eficaz para reducir las fuerzas y deformaciones causadas por estas cargas. Debido a su comportamiento altamente no lineal, es necesario implementar algoritmos de control no lineales para lograr fuerzas de control óptimas que minimicen la respuesta de las estructuras.

Objetivo: este estudio tiene como objetivo reducir la respuesta de un edificio real ubicado en Medellín, Colombia, equipado con amortiguadores MR. Se busca optimizar un controlador de lógica difusa, utilizando funciones de membresía Gaussianas que serán mejoradas mediante el algoritmo de optimización de la ballena, para encontrar el voltaje adecuado que debe aplicarse al amortiguador y generar fuerzas de amortiguación óptimas.

Resultados: los resultados muestran que la implementación de un conjunto de amortiguadores MR, controlados por lógica difusa y optimizados con el algoritmo de la ballena, reduce significativamente la respuesta estructural ante cargas sísmicas. Se observaron reducciones del 68% en desplazamiento, 42% en velocidad, 12% en aceleración, 42% en la deriva entre pisos y 75% en el valor RMS de desplazamiento en comparación con un sistema sin control.

Conclusiones: la aplicación del controlador propuesto demuestra ser efectiva para mejorar el rendimiento de los amortiguadores magnetoreológicos en la reducción de la respuesta estructural ante cargas dinámicas, lo que resalta su potencial en el diseño de sistemas de control para la mitigación de vibraciones en edificaciones.

Palabras clave: control de estructuras, Dinámica de estructuras, Lógica difusa, Amortiguador magnetoreológico, Algoritmo de optimización de la ballena

¿Cómo citar?

Valencia-Valencia, V., Lara-Valencia, L.A. Algoritmo híbrido de optimización de la ballena y la lógica difusa para amortiguadores magnetoreológicos. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(3)e-20614128

<https://doi.org/10.25100/iyv.v26i3.14128>

Recibido: 21-05-24

Evaluado: 04-07-24

Aceptado: 29-08-24

Online: 23-09-24

Correspondencia

vvalenciav@unal.edu.co
Carrera 80 N.º65-223. Medellín
Colombia.



Abstract

Introduction: to mitigate vibrations in structures subjected to dynamic loads, magnetorheological (MR) dampers have been studied as an effective solution to reduce the forces and deformations caused by these loads. Due to their highly nonlinear behavior, it is necessary to implement nonlinear control algorithms to achieve optimal control forces that minimize the response of the structures.

Objective: this study aims to reduce the response of a real building located in Medellín, Colombia, equipped with MR dampers. The goal is to optimize a fuzzy logic controller, using Gaussian membership functions that will be enhanced through the whale optimization algorithm, to find the appropriate voltage to be applied to the damper and generate optimal damping forces.

Results: the results show that the implementation of a set of MR dampers, controlled by fuzzy logic and optimized with the whale algorithm, significantly reduces the structural response to seismic loads. Reductions of 68% in displacement, 42% in velocity, 12% in acceleration, 42% in interstory drift, and 75% in the RMS value of displacement were observed compared to a system without control.

Conclusions: the application of the proposed controller proves to be effective in enhancing the performance of magnetorheological dampers in reducing the structural response to dynamic loads, highlighting its potential in the design of control systems for vibration mitigation in buildings.

Keywords: control of structures, Dynamic of structures, Fuzzy logic, Magnetorheological damper, Whale optimization algorithm

¿Por qué se realizó?:

Este estudio se realizó para mejorar el desempeño de los amortiguadores magnetorreológicos (MR) en estructuras bajo diferentes condiciones sísmicas. El objetivo principal fue optimizar la entrada de voltaje a los amortiguadores para lograr fuerzas de amortiguamiento óptimas y reducir la respuesta estructural durante eventos sísmicos. Para lograr esto, se utilizó el Algoritmo de Optimización de Ballenas (WOA) para optimizar los parámetros de las funciones de pertenencia gaussianas en un sistema de Control de Lógica Difusa (FLC). La integración de estos métodos tuvo como objetivo mejorar el control no lineal de los amortiguadores MR.

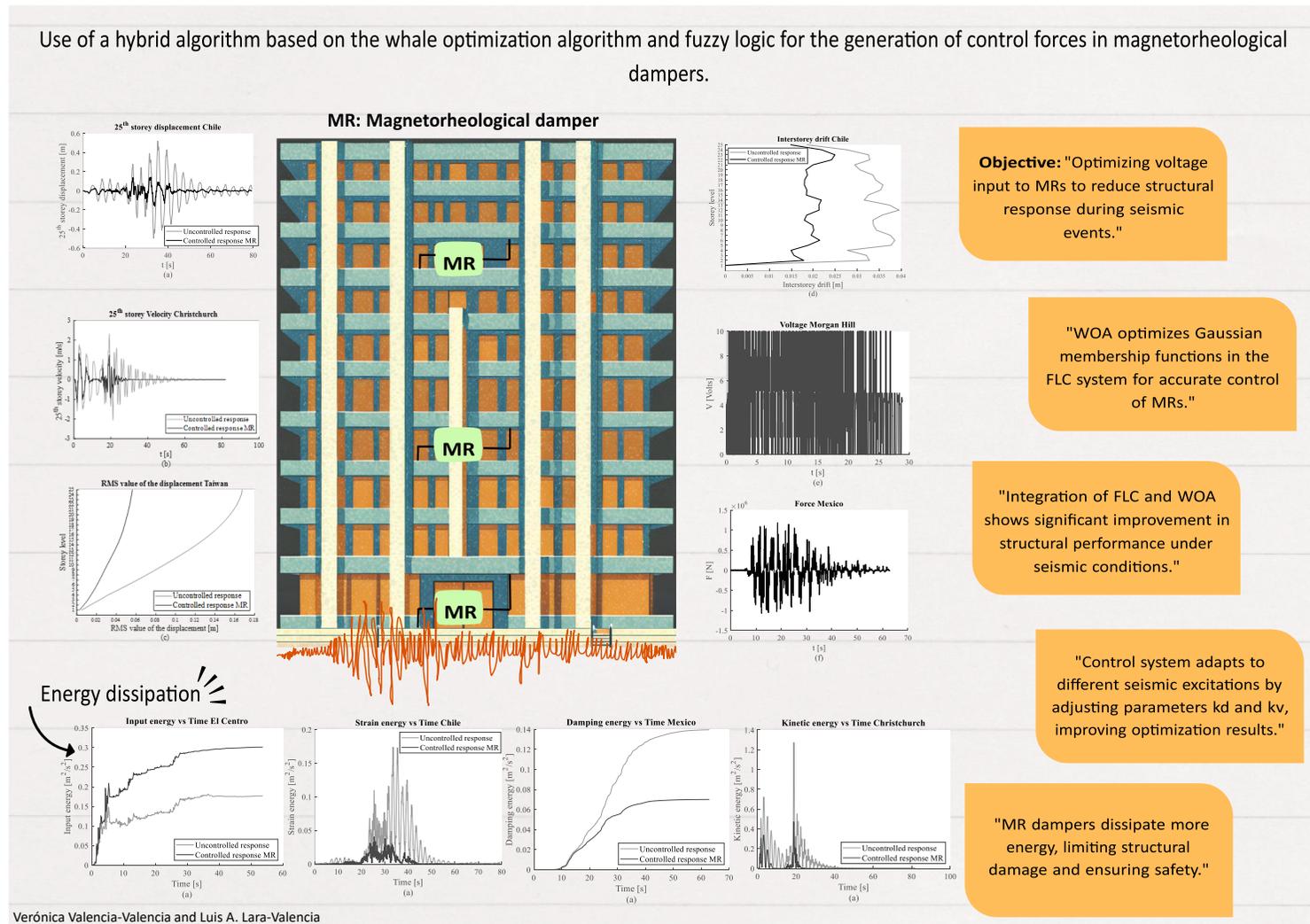
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados más relevantes incluyen reducciones significativas en varios parámetros de respuesta estructural en comparación con estructuras no controladas, tales como: reducción de desplazamiento de hasta 68%, reducción de velocidad de hasta 42%, reducción de aceleración de hasta 12%, reducción de deriva entre pisos de hasta 42%, valor RMS de desplazamiento reducido hasta en 75%. Además, el sistema de control demostró adaptabilidad a diferentes excitaciones sísmicas al ajustar los factores de escala clave k_d y k_v . El estudio también demostró que los amortiguadores MR disipan más energía que los casos no controlados, mejorando la seguridad general y limitando el daño estructural.

¿Qué aportan estos resultados?

Estos resultados contribuyen significativamente a mejorar el control de las respuestas estructurales en edificios bajo cargas sísmicas, demostrando que la integración de amortiguadores MR con un sistema FLC optimizado utilizando WOA es eficaz para reducir desplazamientos, velocidades, aceleraciones y derivas entre pisos. La flexibilidad del sistema para adaptarse a diferentes excitaciones sísmicas y su alta eficiencia en la disipación de energía mejoran su capacidad para mitigar el daño estructural y mejorar la seguridad general de las estructuras durante eventos sísmicos.

Graphical Abstract



Introducción

Las vibraciones en las estructuras producidas por cargas dinámicas se pueden controlar mediante sistemas de control estructural que se utilizan para disminuir y disipar la energía de las estructuras producida por estas cargas como las excitaciones sísmicas (1,2). Los sistemas de control semiactivos son dispositivos de control que pueden regular una estructura cuando está sometida a una carga sísmica, utilizando menos energía que un sistema de control activo y utilizando la fiabilidad inherente de un sistema de control pasivo (3-6). Estos controladores utilizan la respuesta de la estructura para calcular las fuerzas de control destinadas a reducir la respuesta durante los eventos sísmicos (7,8). Entre los sistemas de control semiactivos se encuentra el amortiguador magnetorreológico (MR). El amortiguador MR es un controlador semiactivo que emplea un fluido MR controlable que puede gestionar las vibraciones en tiempo real (9). El fluido contiene partículas polarizables magnetizadas en un medio aceitoso y está controlado por un campo magnético; cuando aparece, el fluido funciona como un líquido semisólido porque el campo aumenta la resistencia, y sin él, el fluido fluye como un líquido (10-12). En 1996, Dyke *et al.* (13) presentaron una estrategia de control óptima para reducir las respuestas estructurales durante las cargas sísmicas utilizando controladores de RM. En 1997, Spencer *et al.* (14) introdujo el modelo fenomenológico no lineal del amortiguador MR. Este modelo se basa en un modelo de histéresis de Bouc-Wen modificado que pretende ser manejable computacionalmente mientras

muestra tendencias históricas (15). Los amortiguadores de resonancia magnética aprovechan las propiedades de los fluidos de resonancia magnética, que pueden cambiar rápidamente cuando se exponen a un campo magnético. Como resultado, estos amortiguadores pueden modificar las fuerzas de amortiguación de manera eficiente y segura, demostrando sus notables capacidades de histéresis (16-18). Sin embargo, el fuerte comportamiento no lineal de los amortiguadores MR es uno de los problemas importantes que proporcionan. Como resultado, es fundamental diseñar un controlador adecuado que intente maximizar la salida de fuerza y minimizar el consumo de energía (19). Por lo tanto, es necesario trabajar en algoritmos de control no lineales derivados de formulaciones matemáticas o métodos inteligentes basados en redes neuronales (20-22), lógica difusa (23-25) y modelos de regresión múltiple (26).

Los investigadores también estudiaron cómo diseñar y optimizar los amortiguadores de resonancia magnética. Ding y cols. (27) presentó un diseño innovador con fuerzas de amortiguación de ajuste bidireccional para mejorar la propiedad a prueba de fallos del amortiguador MR. Además, propusieron un modelo de Gompertz para describir el comportamiento histórico no lineal del dispositivo. En 2021, Wani et al. (28) propuso un estudio experimental y numérico que determinó la eficiencia del control de optimización de respuesta múltiple utilizando un amortiguador de RM para mitigar la respuesta estructural. Diptesh y cols. (29) formuló un algoritmo de control de lógica difusa (FLC) que utiliza las características del amortiguador de RM sin necesidad de un enfoque del modelo de Bouc-Wen que implique la fuzzificación de las propiedades del amortiguador de RM.

Por otro lado, los algoritmos metaheurísticos se aplican a algunos problemas de optimización difíciles e imitan características de la naturaleza para superar las limitaciones de algunos métodos clásicos (30). Estos métodos intentan hacer un algoritmo robusto para la resolución rápida de problemas significativos y son bastante fáciles de usar e implementar en cualquier trabajo, también se dividen en algoritmos metaheurísticos basados en soluciones únicas y basados en poblaciones (31). El algoritmo de murciélagos (BA) se basa en la ecolocalización de murciélagos para evitar obstáculos, detectar sus nidos en la oscuridad y localizar comida y presas, vuelan aleatoriamente con velocidad, dirección y frecuencia, cambiando su longitud de onda y volumen para buscar comida y presas (32-34). Una investigación de Bekdas y cols. (35) presentó una nueva optimización utilizando el BA para mejorar la respuesta de estructuras utilizando amortiguadores de masa sintonizada. El algoritmo del lobo gris (GWO) utiliza la jerarquía del lobo, donde el alfa lidera la caza, seguido del beta y el delta, y los omegas buscan a la presa. La idea es encontrar las mejores soluciones actualizando la posición de los demás miembros (36-38). En 2021, Takin et al. (39) aplicó amortiguadores de RM a un edificio utilizando un algoritmo difuso y seleccionó la ubicación de los amortiguadores utilizando un GWO. El algoritmo de optimización de ballenas (WOA) se desarrolla con base a los comportamientos sociales de las ballenas jorobadas que utilizan una estrategia de red de burbujas cuando cazan peces, cuando deciden qué ballena tiene la mejor solución, las otras ballenas actualizan sus posiciones (40-42). Lin y cols. (42) propusieron una estrategia de control para las estructuras adyacentes utilizando amortiguadores MR usando un FLC para la asignación, y los amortiguadores se diseñaron utilizando WOA. El algoritmo de búsqueda de cuco (CS) está inspirado en la reproducción de las aves cuco y su agresiva estrategia de cría, el algoritmo intenta encontrar la mejor solución cuando cada ave encuentra un nido para poner su huevo con una mayor probabilidad de eclosionar (43-45). Rosli y cols. (46) propusieron una optimización de los parámetros de histéresis de Bouc-Wen para los amortiguadores de RM utilizando el algoritmo CS para la optimización.

Este estudio se centra en mejorar el rendimiento de un conjunto de amortiguadores de RM en un edificio de mediana altura bajo diferentes condiciones sísmicas. El objetivo principal es optimizar la entrada de voltaje a los amortiguadores para lograr las fuerzas de amortiguación óptimas para reducir la respuesta estructural durante eventos sísmicos. Para lograr esto, el estudio emplea el WOA para optimizar los parámetros de las funciones de membresía gaussiana utilizadas en el sistema FLC. Esta integración entre FLC y WOA permite la identificación de parámetros precisos en este sistema de control no lineal, lo que lleva a mejores estrategias de control para los amortiguadores MR. Además, el estudio evalúa la energía disipada para proporcionar una evaluación completa del rendimiento del sistema.

Metodología

El problema dinámico en términos de la ecuación espacio-estado

La ecuación (1) establece el equilibrio dinámico de un sistema de n grados de libertad. En esta ecuación, M , C y K representan la masa, la amortiguación y la rigidez, respectivamente. Los vectores x , \dot{x} , e \ddot{x} indican el desplazamiento relativo, la velocidad y la aceleración de la estructura, respectivamente. El vector f representa las cargas impuestas, mientras que w representa las fuerzas de control que actúan sobre la estructura. E y D son las matrices donde se localizan las fuerzas externas y las fuerzas de control (47).

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Dw(t) + Ef(t) \quad (1)$$

El sistema dinámico se dará como una colección de ecuaciones diferenciales de primer orden llamada representación del espacio de estados. Esto simplifica la manipulación de algunas expresiones matemáticas. Las Ecas (2) y (3) ilustran esta transformación en una ecuación de espacio de estados por conveniencia, donde las matrices A , B y H se presentan en las Ecas (4), (5) y (6) respectivamente. Donde $\mathbf{0}$ es una matriz cero ($n \times n$) e \mathbf{I} es la matriz identidad ($n \times n$).

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bw(t) + Hf(t) \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M^{-1}D \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$H = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M^{-1}E \end{bmatrix} \quad (6)$$

Modelo fenomenológico de amortiguadores magnetorreológicos

Spencer y cols. (14) sugirieron un modelo fenomenológico paramétrico para mejorar la replicación del comportamiento fuerza-velocidad de los amortiguadores MR. La figura 1 representa el modelo Bouc-Wen modificado, que incorpora el modelo Bouc-Wen original e introduce un muelle conectado en paralelo a todo el sistema, aumentando su rigidez. Además, se integra un amortiguador adicional en serie. Esta modificación mejora el rendimiento general del modelo Bouc-Wen, convirtiéndolo en una representación más versátil y precisa del sistema.

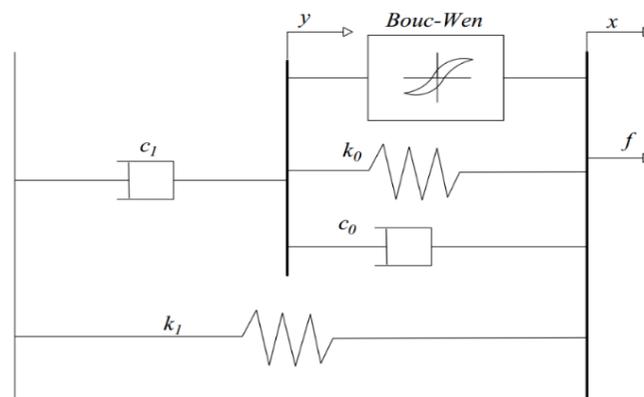


Figura 1. Modelo fenomenológico

La fuerza producida por el controlador en este modelo se rige por la Ec (7). El parámetro x_0 representa el desplazamiento inicial del resorte; x , denota el desplazamiento relativo en un extremo del amortiguador; \dot{x} , la velocidad del amortiguador; \dot{z} , la variable evolutiva presentada en la Ec (8); C_0 y C_1 denotan la amortiguación viscosa a altas y bajas velocidades, respectivamente; K_0 , es la rigidez del amortiguador a altas velocidades, y K_1 , representa la rigidez del amortiguador. Además, los parámetros γ , β , y A determinan la forma del ciclo de histéresis y son valores constantes, mientras que α y n regulan el estado interno z y su evolución en relación con la fuerza f (47). El parámetro γ es el desplazamiento interno del amortiguador. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este parámetro es teórico y no corresponde a ningún desplazamiento físico real dentro del amortiguador MR (48).

$$f = \alpha z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) + k_1 (x - x_0) \quad (7)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z| |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (8)$$

La Ec (9) define \dot{y}

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y)] \quad (9)$$

Además, los valores α , c_0 y c_1 dependen del voltaje u (49) y sus formulaciones se muestran en las Ecas (10), (11) y (12).

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (10)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (11)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} u \quad (12)$$

Donde α_a , α_b , c_{0a} , c_{0b} , c_{1a} y c_{1b} son parámetros fijos que están conectados entre la fuerza del amortiguador y el voltaje determinado a través de resultados experimentales. Además, la dinámica implicada en que el fluido MR logre el equilibrio reológico se modela mediante el filtro de primer orden que se muestra en la Ec (13):

$$\dot{u} = -\eta(u - v) u \quad (13)$$

Donde u , v y η son el voltaje de entrada, el voltaje de salida y la constante de tiempo para el filtro de primer orden, respectivamente.

Algoritmo de optimización de ballenas (WOA)

En 2016, Mirjalili y Lewis (40) presentaron el WOA, un método de optimización metaheurístico inspirado en el comportamiento social de las ballenas jorobadas y su distintiva técnica de alimentación con redes de burbujas. La estrategia principal de este algoritmo consiste en crear una población de ballenas, que equivale a un conjunto de soluciones aleatorias. Cada solución está vinculada a una ballena que intenta encontrar una nueva ubicación en el espacio de búsqueda, y la ballena con mejor rendimiento del grupo sirve como punto de referencia para las demás (50).

La estrategia inicial utilizada por el algoritmo imita el método de ataque bubble-net, también conocido como fase de explotación. Este comportamiento implica que las ballenas creen una espiral de burbujas alrededor de su presa antes de nadar hacia la superficie (51). En este momento, el modelo matemático utiliza dos métodos: el cerco y la formación de redes de burbujas por actualización en espiral, por lo que la probabilidad de que empleen cualquiera de las dos técnicas enumeradas es igual.

En el método de envolvimiento, las ballenas encuentran las posiciones tanto del objetivo como de la presa y proceden a rodearlas. Al principio, no todas las ballenas tienen la estrategia óptima para identificar a la presa dentro del área de búsqueda. En cambio, se espera que la ballena

más cercana a la respuesta óptima la revele de la principal candidata. Al perfilar a este agente de búsqueda de alto rendimiento, los agentes de búsqueda restantes ajustan sus enfoques para coordinarse con la dirección del mejor agente (52). Esta estrategia se puede representar mediante las Ecs (14) y (15):

$$\Delta = |C' \cdot X_i^* - X_i| \quad (14)$$

$$X_{i+1} = X_i^* - A' \cdot \Delta \quad (15)$$

Donde es la solución óptima proporcionada dentro del vector de posiciones denotado como X_i^* , X , Δ es la distancia entre la ballena y la presa, i es la iteración actual, y v son vectores de coeficiente calculados como se presentan en las Ecs (16) y (17), respectivamente. $A' C'$

$$A' = 2a \cdot r - a \quad (16)$$

$$C' = 2 \cdot r \quad (17)$$

En este contexto, el vector se selecciona arbitrariamente entre r [0, 1], mientras que el valor de a se disminuye sistemáticamente de 2 a 0 durante las fases de explotación y exploración.

Al formar redes de burbujas a través de la actualización en espiral, el método presenta dos opciones: seleccionar un agente de búsqueda aleatorio cuando $A' \geq 1$ u optar por la mejor solución para actualizar las posiciones de los agentes cuando $A' < 1$. Se supone que la selección entre un mecanismo de cerco o un modelo en espiral es igualmente probable, con el objetivo de mejorar las posiciones de los agentes de búsqueda y acercarlos a la solución óptima durante el proceso de optimización (53). Este proceso está formulado matemáticamente como se muestra en las Ec (18) y (19):

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i^* - A' \cdot \Delta & \text{if } p < 0.5 \\ \Delta' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_i^* & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (18)$$

$$\Delta' = |X_i^* - X_{i|}| \quad (19)$$

Donde Δ' define la distancia entre la ballena y la presa, p es un número arbitrario entre [0, 1], b caracteriza la forma de espiral y l es un número aleatorio entre [0, 1].

Otra estrategia que utiliza el algoritmo es la búsqueda de la presa o la fase de exploración. Para cazar, las ballenas rodean a sus presas y ajustan su posición para lograr el mejor resultado. La presa objetivo se considera la mejor solución candidata actual, y la posición de la ballena se actualiza de acuerdo con un agente de búsqueda elegido al azar en lugar de la mejor solución disponible en ese momento. Para hacer posible esta fase, la ballena actual puede buscar lejos de la mejor solución, y la WOA puede hacer una búsqueda global evitando los óptimos locales (54). Esta formulación utiliza las mismas Ecs (14) y (15) pero cambia para un valor aleatorio. $X_i^* X_{rand}^*$

Control de lógica difusa (FLC)

Zadeh (55) propuso por primera vez la lógica difusa, vinculando la implicación difusa y las reglas de inferencia composicional con las reglas de control lingüístico a través de un controlador de lógica difusa. FLC es un sistema basado en reglas, ideal para sistemas complejos y dinámicos debido a su ambigüedad e incertidumbre. Se basa en una base de datos bien estructurada que

tiene reglas de control lingüístico que especifican las relaciones entre las variables de entrada y salida. FLC requiere una interfaz de fuzzificación para transformar los datos del mundo real en datos difusos para la gestión del sistema. Su sistema de inferencia para la toma de decisiones utiliza la base de conocimientos para formar inferencias lógicas basadas en datos de entrada difusos y criterios establecidos. En el proceso de inferencia, las entradas ambiguas se traducen efectivamente en acciones de control adecuadas. Por último, una interfaz de defuzzificación convierte la salida de la acción de control difusa en una acción de control concreta y accionable (51). Los sistemas difusos se ejecutan en a partir de las funciones de pertenencia y las reglas de control difuso, con funciones de pertenencia que indican qué tan bien encaja un elemento en un conjunto específico.

La finalidad del responsable del tratamiento se basa en los conceptos descritos por Liu et al. (56), es mantener la estructura en una posición de equilibrio. Si la estructura se desvía, el controlador aumenta el voltaje para mejorar la amortiguación y estabilizar la estructura. Por el contrario, cuando la estructura se acerca al punto de equilibrio, el controlador disminuye o cesa la entrega de voltaje, ya que ya no es necesario. Liu y cols. (56) propusieron siete funciones de pertenencia gaussiana para la interfaz de fuzzificación para definir el desplazamiento y la velocidad dentro del rango [-1, 1]. Estas funciones asignan un grado de pertenencia a cada valor de desplazamiento y velocidad en función de su proximidad a las variables lingüísticas. También se requieren factores de escala, n_d y n_v para el desplazamiento y la velocidad respectivamente. Las fórmulas para calcular estos parámetros se proporcionan en las Ecs (20) y (21):

$$n_d = k_d x \quad (20)$$

$$n_v = k_v \dot{x} \quad (21)$$

Estas ecuaciones utilizan las variables de entrada x y \dot{x} para el desplazamiento y la velocidad en el primer piso del edificio, incorporando los coeficientes de escala k_d y k_v para el desplazamiento y la velocidad, respectivamente. Como se describe en la Tabla (1), el sistema de inferencia del controlador consta de siete reglas difusas que utilizan los términos lingüísticos negativo grande (NL), medio negativo (NM), pequeño negativo (NS), cero (ZO), pequeño positivo (PS), medio positivo (PM) y grande positivo (PL) (56).

Tabla 1. Sistema de inferencia FLC

	NL	NM	NS	ZO	P.D	PM	PL
Vel Dis							
NL	PL	PL	PL	PM	ZO	ZO	ZO
NM	PL	PL	PL	P.D	ZO	ZO	P.D
NS	PL	PL	PL	ZO	ZO	P.D	PM
ZO	PL	PM	P.D	ZO	P.D	PM	PL
P.D	PM	P.D	ZO	ZO	PL	PL	PL
PM	P.D	ZO	ZO	P.D	PL	PL	PL
PL	ZO	ZO	ZO	PM	PL	PL	PL

El voltaje de salida se calcula utilizando cuatro funciones de membresía gaussiana (ZO, PS, PM y PL) con valores entre [0, 1]. Estas funciones utilizan el método del centroide para calcular los valores de voltaje. La equalizadora (22) se utiliza para cambiar el voltaje de salida de una acción de control difusa a una acción de control real entre 0 y 10 V (57), y V es el voltaje del amortiguador que se aplicará y s es el valor de salida FLC.

$$V = 10 \cdot \left(\frac{5}{3} s - \frac{1}{3} \right) \quad (22)$$

Algoritmo híbrido WOA-FLC

El WOA ha demostrado ser una herramienta impresionante para resolver una variedad de problemas de optimización. Sin embargo, uno de sus problemas es el largo tiempo que se tarda en alcanzar el óptimo mundial (58). Para abordar esta limitación, se utiliza FLC para mejorar los resultados obtenidos. El valor medio y la desviación estándar que se utilizarán en las funciones de pertenencia gaussiana, como se muestra en la Ec (23), son especificados por el WOA que proporciona valores aleatorios para μ y σ , luego, estas funciones mejoradas se utilizan para mejorar los aspectos de desplazamiento, velocidad y voltaje. Armado con estos ajustes personalizados, el FLC calcula el voltaje y las fuerzas necesarias que se aplicarán y envía los nuevos resultados a la función objetivo de la WOA.

$$f(x, \sigma, \mu) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (23)$$

El propósito fundamental del algoritmo es tener una función objetivo que trate de minimizar la respuesta dinámica de la estructura bajo excitaciones sísmicas y optimizar el rendimiento estructural. El estudio se centra en determinar los valores más bajos de la respuesta RMS para los desplazamientos máximos, con el objetivo de mejorar la estabilidad general de la estructura frente a eventos sísmicos. La función objetivo propuesta es fundamental para guiar el proceso de optimización, lo que en última instancia conduce a diseños estructurales mejorados con reacciones dinámicas más bajas y mayor resistencia sísmica. Finalmente, si se genera el mejor valor, el algoritmo ajusta el mejor valor actual y repite el proceso hasta que se complete el número dado de ballenas y generaciones. El proceso de optimización aumenta la eficiencia y la precisión debido a esta estrategia combinada WOA-FLC, lo que fomenta la búsqueda de soluciones mejoradas en escenarios de optimización complejos. La figura 2 muestra un diagrama que representa cómo funciona el algoritmo híbrido WOA-FLC en el proyecto de control propuesto.

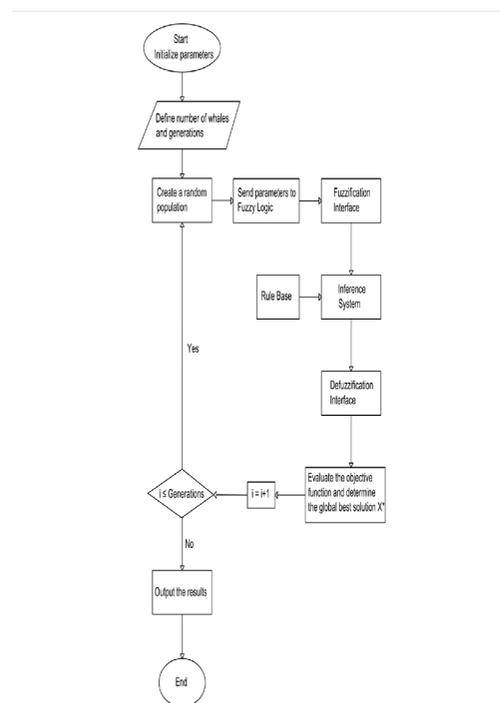


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo híbrido WOA-FLC

Caso de estudio

La validación de un estudio de caso es fundamental para demostrar la efectividad del proyecto de control propuesto. Para ello, se utilizó como caso de estudio un edificio de 25 pisos ubicado en Medellín, Colombia. La estructura tiene las características de un edificio de mediana altura y tiene 73 metros de altura en total. Su sistema de resistencia a la fuerza lateral está compuesto por marcos de momento resistentes. Tras un análisis de prueba y error, se consideró que la implementación de tres controladores en los pisos 1, 10 y 20 se destaca como uno de los métodos más efectivos para mejorar el rendimiento general de todo el sistema. El caso de estudio es un marco plano presentado a lo largo del eje C y la configuración de la estructura se muestra en la Figura 3.

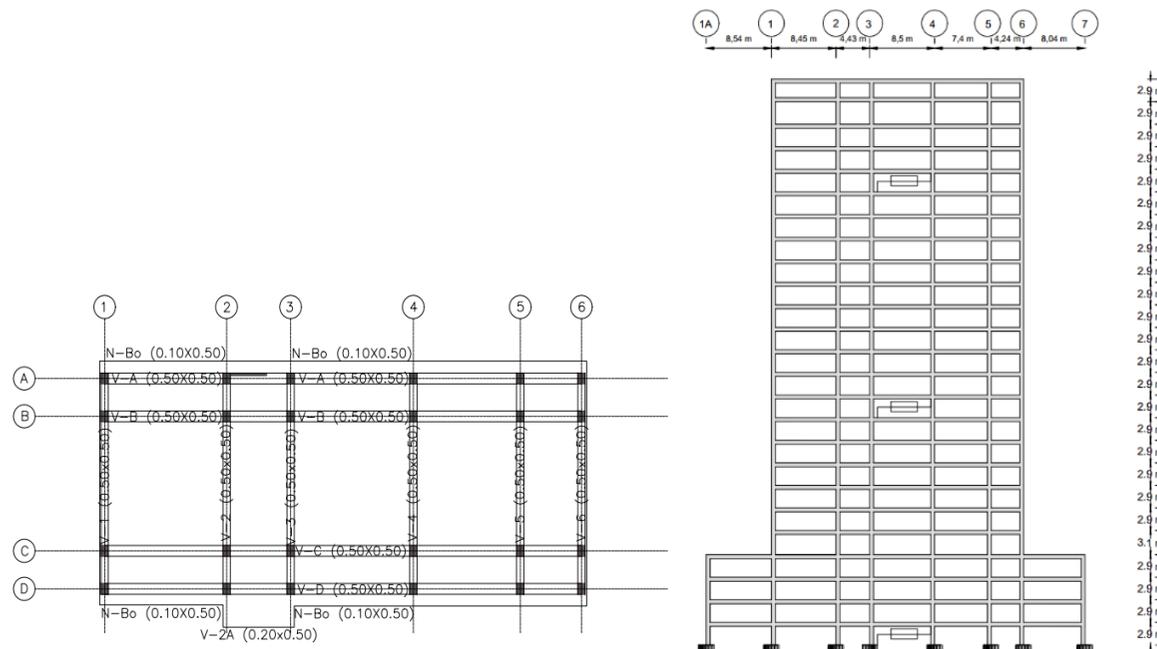


Figura 3. Configuración de la estructura

Al suponer que los diafragmas del suelo son infinitamente rígidos y utilizar la condensación estática para reducir los grados de libertad de rotación, la matriz de rigidez se simplificó a un único grado de libertad por suelo. Junto con la matriz de rigidez, la matriz de masa se utiliza para calcular la respuesta dinámica de la estructura. Las entradas diagonales de la matriz de masa indican la masa de cada piso. Se empleó el amortiguamiento de Rayleigh para determinar la matriz de amortiguamiento, con un 5.0% de amortiguamiento crítico (ξ) aplicado a los modos dinámicos inicial y final de la estructura. En la tabla 2 se presentan los parámetros utilizados para el fenomenológico del amortiguador MR.

Tabla 2. Parámetros del dispositivo de resonancia magnética utilizado. Modificado de (59)

Parámetros utilizados en el modelo fenomenológico			
c_{0a}	110 kN·s/m	α_a	46,2 kN/m
c_{0b}	114,3 kN·s/m/V	α_b	41,2 kN/m/V
c_{1a}	8359 kN·s/m	γ	164 1/m ²
c_{1b}	7482.9 kN·s/m	β	164 1/m ²
k_0	0,01 kN/m	A	1107.2
k_1	0,485 kN/m	n	2
x_0	0	η	100 1/s

La capacidad del amortiguador para disminuir las vibraciones y mejorar la estabilidad general de la estructura se determinará analizando y comparando los resultados obtenidos de ocho excitaciones sísmicas diferentes que se seleccionaron en función de sus magnitudes, duraciones y ubicaciones para validar la efectividad del amortiguador. Este enfoque permite un análisis exhaustivo de la respuesta de la estructura bajo diferentes escenarios sísmicos. Mediante el uso de un conjunto diverso de excitaciones, es posible estudiar el comportamiento de la estructura en una variedad de condiciones, proporcionando información valiosa sobre su rendimiento dinámico y características de respuesta. Las excitaciones utilizadas en este trabajo se enumeran en la tabla 3 y se adquirieron del Centro de Datos de Movimiento Fuerte de Ingeniería (60). La tabla tiene detalles de cada excitación, como la dirección, la aceleración máxima del suelo (PGA) y la duración de cada excitación, así como el lugar, el año y la magnitud del evento sísmico.

Tabla 3. Excitaciones sísmicas.

Evento	Año	Estación	Componente	Magnitud	PGA [g]	Duración [s]
El Centro	1940	El Centro (117)	S90W	6.9	0.348	53.73
Central Chile	1985	Melipilla	0	7.8	0.686	79.36
Christchurch	2011	Christchurch Resthaven	S88E	6.3	1.039	81.90
Kobe	1995	PISTA: Nishi-Akashi	90	6.9	0.503	41.00
México	1985	La Unión	S00E	8.1	0.169	62.93
Colina de Morgan	1984	USGS	250	6.1	0.640	28.91
Petrolía	1992	Cabo Mendocino, CA	90	7.0	0.710	59.98
Taiwán	1999	Taichung	90	7.6	1.010	159.99

Resultados y discusión

Se utilizó el WOA para obtener las configuraciones del FLC. Esto implicó ajustar iterativamente las funciones de membresía para entradas y salidas para identificar la configuración óptima que minimiza la función de aptitud. A continuación, se utilizó el FLC para evaluar las reacciones dinámicas de la estructura a ocho excitaciones sísmicas diferentes, armado con estos parámetros ajustados.

Se probaron diferentes combinaciones de ballenas y generaciones durante la implementación de la WOA. Los resultados demostraron que el uso de un mayor número de ballenas dio produce una optimización más precisa de los parámetros. Esto se relacionó con una mayor capacidad poblacional de las ballenas para explorar un espacio de búsqueda y evitar quedar atrapadas en los óptimos locales. En particular, el estudio encontró que el uso de 80 ballenas y 30 generaciones disminuyó en gran medida la reacción controlada durante toda la fase de optimización. Sin embargo, se descubrió que se requerían diferentes coeficientes de escala, k_d y k_v , para que las diferentes excitaciones sísmicas obtuvieran mejores resultados, como se muestra en la tabla 4. El WOA se adaptó a las características individuales de las excitaciones sísmicas, lo que resultó en resultados de optimización superiores en cada escenario.

Tabla 4. Coeficientes de escala k_d y k_v .

Evento	K_d	K_v
El Centro	500	70
Central Chile	400	70
Christchurch	500	70
Kobe	400	70
México	400	70
Colina de	500	70
Petrolía	400	70
Taiwán	700	75

En la mayoría de las excitaciones sísmicas, los valores suelen permanecer constantes; sin embargo, para Taiwán, hay un aumento en los valores para k_d y k_v . Este fenómeno puede atribuirse al mayor PGA experimentado en Taiwán, que persiste en el tiempo, lo que resulta en la necesidad de valores elevados de k_d y k_v para responder y mitigar de manera efectiva las fuerzas sísmicas ejercidas sobre las estructuras.

Funciones de membresía gaussiana

Las representaciones gráficas de las funciones de pertenencia gaussianas definidas por FLC con WOA se crearon para las variables de desplazamiento, velocidad y voltaje. Exhiben específicamente siete reglas difusas definidas para el desplazamiento y la velocidad, así como las cuatro reglas difusas de voltaje establecidas. Estos gráficos muestran visualmente la relación entre las variables lingüísticas y sus correspondientes grados de membresía, destacando el enfoque de control de lógica difusa empleado por la WOA. La figura 4 presenta las funciones de membresía gaussiana para la excitación sísmica de Christchurch optimizadas utilizando la metodología metaheurística.

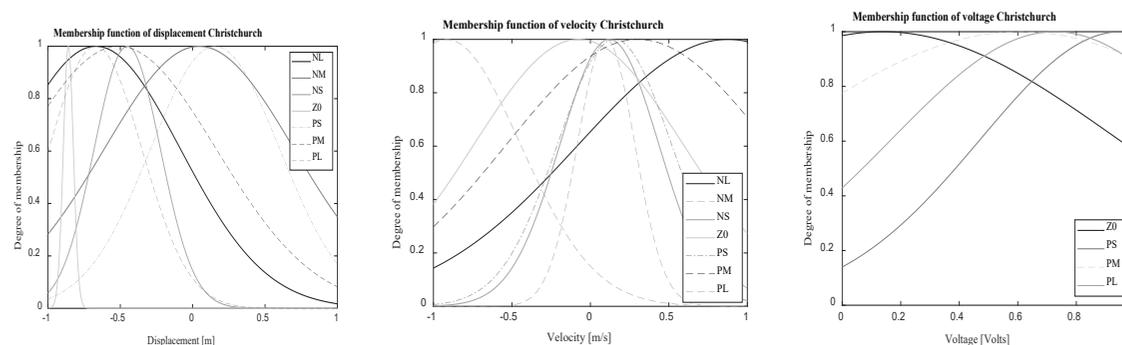


Figura 4. Funciones de membresía en Christchurch

Respuesta incontrolada y controlada

Los resultados obtenidos para la respuesta de la estructura se encuentran en la tabla 5, mostrando las reducciones por desplazamiento, velocidad, valor RMS del desplazamiento y deriva máxima entre pisos durante diferentes excitaciones sísmicas.

Tabla 5. Reducciones de desplazamiento, velocidad, valor RMS de desplazamiento y deriva máxima.

Evento	Reducción de desplazamiento	Reducción de velocidad [%]	Reducción de la aceleración [%]	Valor RMS de la reducción del	Reducción máxima de
El Centro	31.15	15.70	6.19	39.06	17.89
Central Chile	68.74	42.11	11.96	75.58	42.20
Christchurch	29.82	42.23	27.43	54.57	27.29
Kobe	28.36	10.00	12.01	47.82	16.24
México	39.36	19.66	2.02	56.37	24.86
Colina de	50.70	24.79	19.20	56.10	22.56
Petrolía	11.33	25.48	7.66	40.66	17.42
Taiwán	41.24	34.76	6.10	66.27	28.29

Los amortiguadores MR exhiben una efectividad significativa en la reducción del desplazamiento a través de diferentes eventos sísmicos. Las reducciones oscilan entre el 11,33% en Petrolí y el 68,74% en la zona central de Chile. Además, demuestran una notable reducción de la velocidad, que oscila entre el 10,00% en Kobe y el 42,23% en Christchurch. El valor RMS del desplazamiento proporciona una medida general de la efectividad durante todo el evento sísmico, con reducciones que van desde el 40,66% en Petrolia hasta el 75,58% en Chile Central, lo que indica una efectividad sustancial. La máxima reducción de la deriva entre pisos es crucial para limitar el daño estructural y garantizar la seguridad de los ocupantes, oscilando entre el 16,24% en Kobe y el 42,20% en la zona central de Chile, lo que demuestra que los amortiguadores reducen efectivamente la deriva máxima experimentada por la estructura. Esto indica que los amortiguadores son efectivos para limitar el desplazamiento general y la velocidad de la estructura bajo cargas sísmicas.

El análisis de las diferentes excitaciones sísmicas destaca el excepcional desempeño del controlador en el evento de la zona central de Chile. En este escenario, la respuesta estructural tiene la mayor reducción en comparación con otros eventos sísmicos, particularmente en términos de velocidad y valor RMS de desplazamiento. Esta reducción indica una mitigación exitosa de la excitación sísmica en la estructura.

Por otro lado, el caso de la excitación sísmica de Kobe exhibe la menor reducción en la velocidad y la deriva entre pisos. En contraste, el rendimiento del controlador para la excitación sísmica de Morgan Hill se destaca por su notable reducción en el desplazamiento, el valor RMS del desplazamiento y la deriva entre pisos. Sin embargo, el caso en el que la excitación sísmica de México es notable por requerir la menor fuerza aplicada, con el sistema de control reduciendo significativamente el desplazamiento, la velocidad, la deriva entre pisos y el valor RMS del desplazamiento. Por último, Petrolia y Taiwán, muestran reducciones significativas en todos los componentes. Estos hallazgos subrayan la efectividad de varias estrategias de mitigación para reducir el impacto de los eventos sísmicos en las estructuras, y cada excitación sísmica presenta desafíos únicos y oportunidades de mejora.

Las fuerzas máximas de control desarrolladas por los amortiguadores MR, como se muestra en la tabla 6, varían dependiendo del evento sísmico, oscilando entre 1181 kN en México y 2277 kN en Taiwán, representando las fuerzas máximas aplicadas a los amortiguadores para controlar la respuesta de la estructura durante cada evento. La razón de los altos requisitos de fuerza de Taiwán y Christchurch es probablemente que sus valores de PGA son notablemente más altos.

En la figura 5 se muestran estos resultados, destacando algunos de los resultados significativos mencionados. Muestra en particular las reducciones inducidas por el dispositivo de control e ilustra el voltaje que va de 0 a 10 V durante la excitación, junto con la fuerza óptima aplicada.

Tabla 6. Fuerza máxima desarrollada por los amortiguadores MR.

Evento	Fuerza máxima de control [kN]
El Centro	1585
Central Chile	1339
Christchurch	2130
Kobe	1473
México	1181
Colina de Morgan	1451
Petrolía	1783
Taiwán	2277

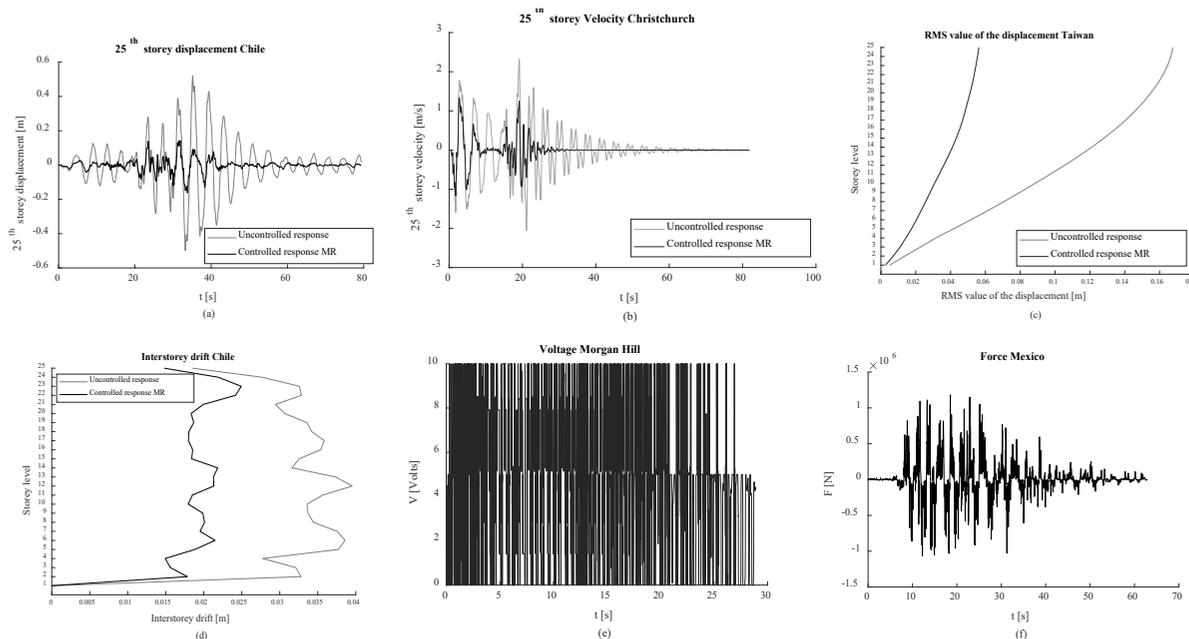


Figura 5. Respuesta de la estructura sometida a diferentes excitaciones sísmicas. (a) Piso 25 de desplazamiento máximo en Chile. (b) Velocidad máxima del piso 25 en Christchurch. (c) Valor RMS del desplazamiento por piso en Taiwán. (d) Máxima deriva entre pisos en Chile. (e) Voltaje en Morgan Hill. (f) Fuerza en México

Curvas de energía

El análisis de la disipación de energía mediante amortiguadores es una de las formas más eficientes de confirmar la eficacia de un sistema de control. En este caso, se evaluaron la energía de entrada, la energía de deformación, la energía de amortiguamiento y la energía cinética. La validación garantiza la precisión y fiabilidad de los sistemas de control objeto de evaluación mediante el examen y el contraste de estos elementos. El rendimiento y la eficacia de los sistemas de control se pueden comprender de manera clara y completa mediante la realización de un estudio exhaustivo de estos factores relacionados con la energía.

La figura 6 muestra los resultados obtenidos para la energía de entrada. Se presenta que la energía de entrada es mayor para la respuesta controlada de la estructura utilizando el amortiguador MR. Esto es posible porque este controlador semiactivo inyecta energía, a diferencia de los controladores pasivos que no requieren energía externa.

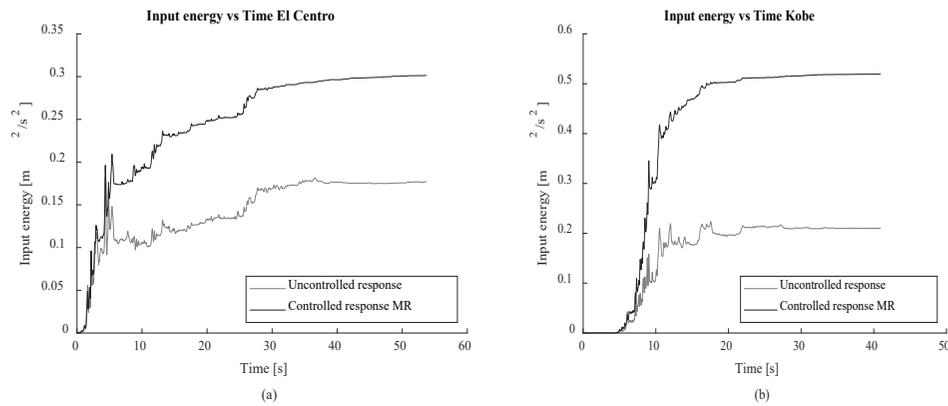


Figura 6. Energía de entrada. a) Energía de entrada para El Centro. (b) Energía de entrada para Kobe.

Los resultados muestran una reducción significativa en la energía de deformación como se muestra en la figura 7. Para la excitación sísmica en Chile, la reducción promedio fue del 77%, una de las mejores reducciones. En Taiwán, la reducción fue de alrededor del 50%, lo que indica que la disipación de la energía de deformación fue muy efectiva.

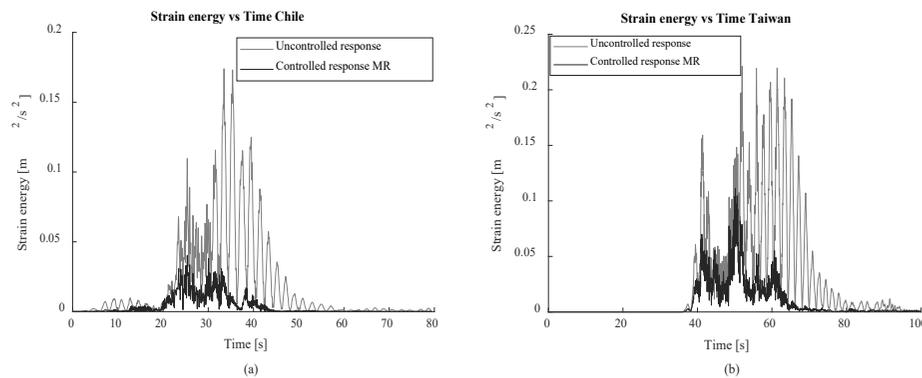


Figura 7. Tensar la energía. a) Energía de deformación para Chile. b) Strain Energy para Taiwán.

Los resultados también muestran una reducción en la energía de amortiguación. Para la excitación sísmica de México, la reducción promedio fue de 57%, mientras que en Petrolia, la reducción promedio fue de 39%. Esto demuestra que la disipación de la energía de amortiguación fue efectiva, como se muestra en la figura 8.

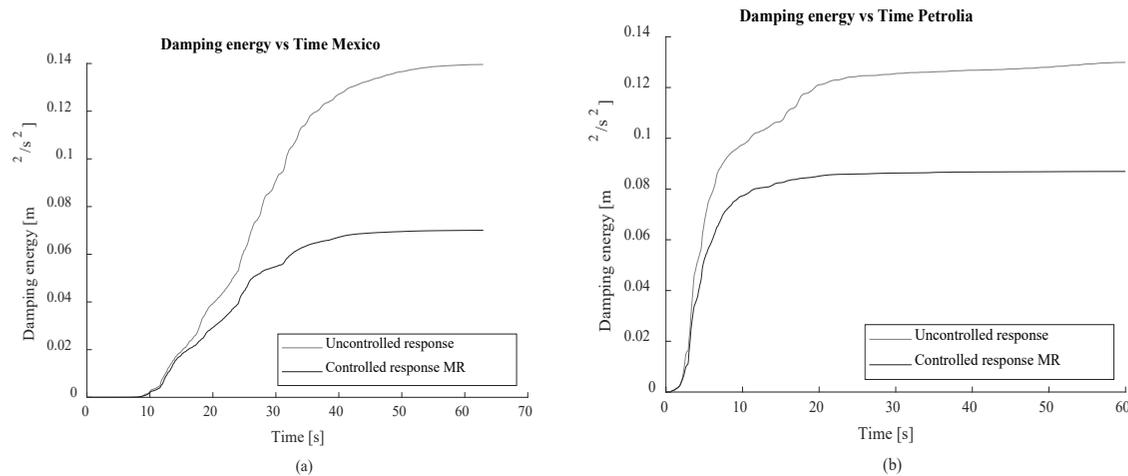


Figura 8. Energía de amortiguación. a) Energía de amortiguación para México. b) Energía de amortiguación para la petrolia.

Finalmente, se obtuvieron diferentes resultados para la reducción de la Energía Cinética. Para la excitación sísmica de Christchurch, la reducción promedio fue del 62%, mientras que en Morgan Hill, la reducción fue del 23%. La figura 9 demuestra que la disipación de la energía cinética fue efectiva.

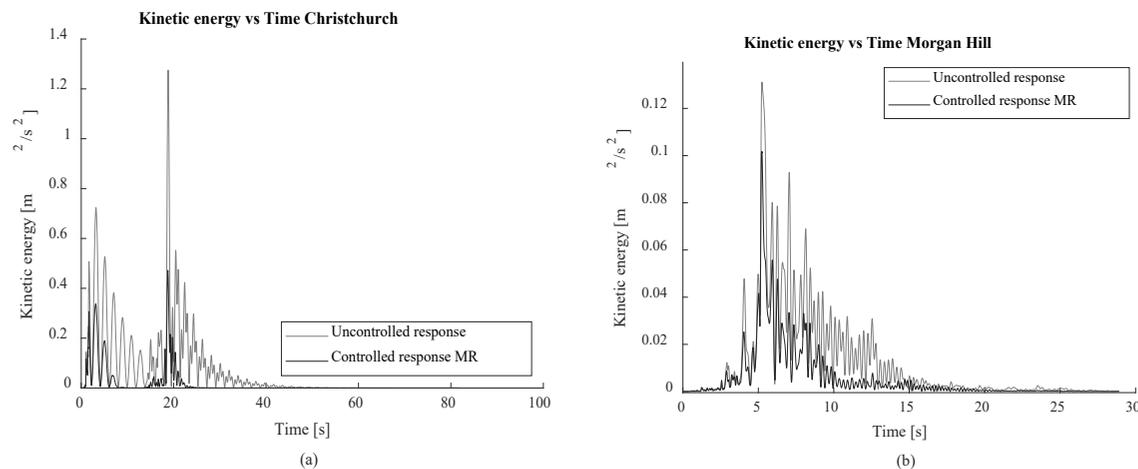


Figura 9. Energía cinética. (a) Energía cinética para Christchurch. (b) Energía cinética para Morgan Hill.

Conclusiones

La integración de un amortiguador MR con FLC utilizando parámetros optimizados a través del WOA ha demostrado una eficacia significativa en la mejora de la respuesta estructural a una amplia gama de eventos sísmicos.

Este sistema de control da como resultado una reducción significativa del desplazamiento (hasta un 68%), la velocidad (hasta un 42%), la aceleración (hasta un 12%), la deriva entre pisos (hasta un 42%) y el valor RMS del desplazamiento (hasta un 75%) en comparación con las estructuras no controladas.

Este rendimiento mejorado desempeña un papel importante en la mitigación de posibles daños y en la garantía de la seguridad de las estructuras sometidas a cargas dinámicas.

Este sistema de control puede adaptarse a las diferentes características de las excitaciones sísmicas. Esta adaptabilidad se demuestra por los diferentes requisitos de los factores de escala k_d y k_v en respuesta a diferentes eventos sísmicos. Esta flexibilidad en el ajuste de los parámetros mejora los resultados de optimización para cada excitación y aumenta la eficacia del amortiguador MR controlando las respuestas estructurales.

El análisis de disipación de energía se ha convertido en un método confiable para evaluar la efectividad del sistema de control. El amortiguador MR disipa más energía que los casos no controlados, demostrando su eficacia en la reducción del impacto total de las fuerzas sísmicas sobre la estructura. Este mecanismo de disipación de energía es un factor clave para limitar el daño estructural y garantizar la seguridad de la estructura.

Referencias

1. Saaed TE, Nikolakopoulos G, Jonasson JE, Hedlund H. Una revisión del estado del arte de los sistemas de control estructural. Vol. 21, JVC/Revista de Vibración y Control. SAGE Publications Inc.; 2015. págs. 919-37.
2. Priya SD, K UP, Iyer NR. Mejora de la respuesta sísmica de los edificios con métodos de disipación de energía: una visión general. Revista de Investigación en Ingeniería Civil [Internet]. 2014; 2014(2A):17–22. Disponible en: <http://journal.sapub.org/jce>
3. Casciati F, Rodellar J, Yildirim U. Control activo y semiactivo de estructuras: teoría y aplicaciones: una revisión de los avances recientes. Vol. 23, Revista de Sistemas y Estructuras Materiales Inteligentes. 2012. Págs. 1181-95.
4. Bitaraf M, Ozbulut OE, Hurlbauss S, Barroso L. Aplicación de estrategias de control semiactivo para la protección sísmica de edificios con amortiguadores MR. Estructura Eng. Octubre de 2010; 32(10):3040–7.
5. Lavasani SHH, Doroudi R. Meta sistemas de control activos y semiactivos heurísticos de edificios de gran altura. Revista Internacional de Ingeniería Estructural. 2020; 10(3):232–53.
6. Hiramoto K, Matsuoka T, Sunakoda K. Diseño óptimo simultáneo del modelo estructural para el diseño de control semiactivo y el control semiactivo basado en modelo. Struct Control Health Monit. 2014; 21(4):522–41.
7. Arash Bahar. CONTROL SEMIACTIVO JERÁRQUICO DE ESTRUCTURAS AISLADAS EN BASE. Barcelona; Abr. 2009
8. Lara L, Brito J, Valencia Y. Análisis comparativo de algoritmos de control semiactivo aplicados a amortiguadores magnetorreológicos. Ingeniare Revista chilena de ingeniería. 2017; 25:39–58.
9. Fisco NR, Adeli H. Estructuras inteligentes: Parte I - Control activo y semiactivo. Vol. 18, Scientia Iranica. Universidad Tecnológica Sharif; 2011. Págs. 275-84.
10. Lara L, Brito J, Yamile V. REDUCCIÓN DE VIBRACIONES EN UN EDIFICIO MEDIANTE AMORTIGUADORES MAGNETORREOLÓGICOS. 2012; 79:205–14.
11. Yazid IIM, Mazlan SA, Kikuchi T, Zamzuri H, Imaduddin F. Diseño de amortiguador magnetorreológico con una combinación de modos de cizallamiento y compresión. Mater Des. 2014; 54:87–95.
12. Das D, Datta TK, Madan A. Control difuso semiactivo de la respuesta sísmica de los marcos de edificios con amortiguadores MR. Earthq Eng Struct Dyn. 2012; 41(1):99–118.
13. Dyke SJ, Spencer BF, Sain MK, Carlson JD. Reducción de la respuesta sísmica mediante amortiguadores magnetorreológicos. Volúmenes de las Actas de la IFAC. junio de 1996; 29(1):5530–5.

14. F Spencer Jr BB, Dyke SJ, Miembro A, Sain MK, Carlson JD. Modelo fenomenológico para amortiguadores magnetorreológicos [Internet]. 1997. Disponible en: <http://www.rheonetic.com/mrfluid/>
15. Kwok NM, Ha QP, Nguyen MT, Li J, Samali B. Identificación de parámetros del modelo Bouc-Wen para un amortiguador de fluido MR utilizando GA. *ISA Trans.* 2007; 46(2):167–79.
16. Guo S, Yang S, Pan C. Modelado dinámico de los comportamientos de los amortiguadores magnetorreológicos. *J Intell Mater Syst Struct.* Enero de 2006; 17(1):3–14.
17. Bathaei A, Zahrai SM, Ramezani M. Control sísmico semiactivo de un modelo de edificio de 11-DOF con amortiguador TMD+MR utilizando algoritmos difusos de tipo 1 y -2. *JVC/ Revista de Vibración y Control.* 1 de julio de 2018; 24(13):2938–53.
18. Lara L, Brito J, Graciano Gallego CA. Estrategias de control estructural basadas en amortiguadores magnetorreológicos gestionados mediante redes neuronales artificiales y lógica difusa. *Revista UIS Ingenierías [Internet].* 1 de septiembre de 2017; 16(2):227–42. Disponible en: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/6292/7075>
19. Rahman M, Ong ZC, Julai S, Ferdaus MM, Ahamed R. Una revisión de los avances en amortiguadores magnetorreológicos: su diseño, optimización y aplicaciones. Vol. 18, *Revista de la Universidad de Zhejiang: Ciencia A.* Universidad de Zhejiang; 2017. págs. 991-1010.
20. Xia PQ. Un modelo inverso de amortiguador de RM que utiliza una red neuronal óptima y la identificación de sistemas. *J Sonido Vib.* 2 de octubre de 2003; 266(5):1009–23.
21. Khalid M, Yusof R, Joshani M, Selamat H, Joshani M. Identificación no lineal de un amortiguador magnetorreológico basado en redes neuronales dinámicas. *Ingeniería Civil y de Infraestructuras Asistida por Ordenador.* marzo de 2014; 29(3):221–33.
22. Wei S, Wang J, Ou J. Método para mejorar el modelo de red neuronal del amortiguador magnetorreológico. *Proceso de señal del sistema mecánico.* 15 de febrero de 2021;149.
23. K-Karamodin A, H-Kazemi H. Control semiactivo de estructuras mediante algoritmo neuropredictivo para amortiguadores de resonancia magnética. *Struct Control Health Monit.* Abril de 2010; 17(3):237–53.
24. Uz ME, Hadi MNS. Diseño óptimo de control semiactivo para edificios adyacentes conectados por un amortiguador de resonancia magnética basado en lógica difusa integrada y algoritmo genético multiobjetivo. *Estructura Eng.* 15 de junio de 2014; 69:135–48.
25. Braz-César M, Barros R. Optimización de un controlador de lógica difusa para amortiguadores de resonancia magnética mediante un procedimiento neuro-difuso adaptativo. *Revista Internacional de Estabilidad y Dinámica Estructural.* 1 de junio de 2017; 17(5).
26. Nanthakumar AJD, Jancirani J. Optimización del diseño de la geometría del amortiguador magnetorreológico utilizando el método de superficie de respuesta para lograr el máximo límite elástico. *Revista de Ciencia y Tecnología Mecánica.* 1 de septiembre de 2019; 33(9):4319–29.
27. Ding Y, Zhang L, Zhu HT, Li ZX. Un nuevo amortiguador magnetorreológico para el control sísmico. *Estructura de Smart Mater.* noviembre de 2013; 22(11).
28. Wani ZR, Tantray M, Sheikh JI. Estudios experimentales y numéricos sobre el control basado en la optimización de respuestas múltiples utilizando técnicas iterativas para la estructura controlada por amortiguadores magnetorreológicos. *Diseño estructural de edificios altos y especiales.* 1 de septiembre de 2021; 30(13).
29. Das D, Datta TK, Madan A. Control difuso semiactivo de la respuesta sísmica de los marcos de edificios con amortiguadores MR. *Earthq Eng Struct Dyn.* 2012; 41(1):99–118.

30. De León-Aldaco SE, Calleja H, Aguayo Alquicira J. Métodos de optimización metaheurística aplicados a convertidores de potencia: una revisión. *Electrón de potencia trans IEEE*. 1 de diciembre de 2015; 30(12):6791–803.
31. Rasdi Rere LM, Fanany MI, Arymurthy AM. Algoritmos metaheurísticos para redes neuronales de convolución. *Comput, Intell Neurosci*. 2016;2016.
32. Dokeroglu T, Sevinc E, Kucukyilmaz T, Cosar A. Un estudio sobre algoritmos metaheurísticos de nueva generación. *Comput Ind Eng*. 1 de noviembre de 2019;137.
33. Gandomi AH, Yang XS, Alavi AH, Talatahari S. Algoritmo Bat para tareas de optimización restringidas. *Neural Comput Appl*. 1 de mayo de 2013; 22(6):1239–55.
34. Chakri A, Khelif R, Benouaret M, Yang XS. Nuevo algoritmo bat direccional para problemas de optimización continua. *Expert Syst Appl*. 1 de marzo de 2017; 69:159–75.
35. Bekdaş G, Nigdeli SM, Yang XS. Un novedoso algoritmo de murciélago basado en el ajuste óptimo de los amortiguadores de masa para mejorar la seguridad sísmica de las estructuras. *Estructura Eng*. 15 de marzo de 2018; 159:89–98.
36. Kumar A, Pant S, Ram M. Optimización de la confiabilidad del sistema mediante el algoritmo optimizador de Gray Wolf. *Qual Reliab Eng Int*. 1 de noviembre de 2017; 33(7):1327–35.
37. Kamgar R, Samea P, Khatibinia M. Optimización de los parámetros del amortiguador de masa sintonizada sometido a un terremoto crítico. *Diseño estructural de edificios altos y especiales*. 1 de mayo de 2018; 27(7).
38. Kamgar R, Gholami F, Zarif Sanayei HR, Heidarzadeh H. Amortiguadores líquidos ajustados modificados para la protección sísmica de edificios teniendo en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura. *Revista Iraní de Ciencia y Tecnología - Transacciones de Ingeniería Civil*. 1 de marzo de 2020; 44(1):339–54.
39. Takin K, Doroudi R, Doroudi S. Control de la vibración de la estructura mediante la optimización de la colocación de amortiguadores semiactivos y controladores de lógica difusa. *Revista Australiana de Ingeniería Estructural*. 2021; 22(3):222–35.
40. Mirjalili S, Lewis A. El algoritmo de optimización de ballenas. *Avances en Software de Ingeniería*. 1 de mayo de 2016; 95:51–67.
41. Lin X, Lin W. Control neuro-difuso adaptativo LQG-adaptativo basado en algoritmos de optimización de ballenas para la mitigación de vibraciones sísmicas con amortiguadores MR. *Golpes y vibraciones*. 28 de marzo de 2022; 2022:1–21.
42. Lin X, Lin W. Asignación y control óptimos de amortiguadores magnetorreológicos para mejorar el rendimiento sísmico de las estructuras adyacentes utilizando el algoritmo de optimización de ballenas. *Golpes y vibraciones*. 2021;2021.
43. Rosli R, Mohamed Z. Optimización del modelo de Bouc-Wen modificado para el amortiguador magnetorreológico utilizando el algoritmo de búsqueda de cuco modificado. *JVC/Revista de Vibración y Control*. 1 de septiembre de 2021; 27(17–18):1956–67.
44. Zabihi-Samani M, Ghanooni-Bagha M. Control estructural semiactivo óptimo con un controlador de lógica difusa de búsqueda de cuco basado en ondículas. *Revista Iraní de Ciencia y Tecnología - Transacciones de Ingeniería Civil*. 1 de diciembre de 2019; 43(4):619–34.
45. Rosli R, Mohamed MZ, Priyandoko G, Rashid MFFA. Optimización de los parámetros de histéresis de Bouc-Wen para el amortiguador magnetorreológico utilizando el algoritmo de búsqueda de Cuckoo. En: *Actas de la Conferencia AIP*. Instituto Americano de Física Inc.; 2020.
46. Rosli R, Mohamed MZ, Priyandoko G, Rashid MFFA. Optimización de los parámetros de histéresis de Bouc-Wen para el amortiguador magnetorreológico utilizando el algoritmo de búsqueda de Cuckoo. En: *Actas de la Conferencia AIP*. Instituto Americano de Física Inc.; 2020.

47. Valencia-Valencia V, Castro-Osorio M, Vallejo-Paniagua D, Echavarría-Montaña S, Lara-Valencia LA. CONTROL DE ESTRUCTURAS SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS MEDIANTE AMORTIGUADORES MAGNETORREOLÓGICOS. En: Actas de COMPDYN. Universidad Técnica Nacional de Atenas; 2023.
48. Boreiry M, Ebrahimi-Nejad S, Marzbanrad J. Análisis de sensibilidad de vibraciones caóticas de un modelo de vehículo completo con amortiguador magnetorreológico. *Caos, Solitones, Fractales*. 1 de octubre de 2019; 127:428–42.
49. Jung HJ, Spencer BF, Asce M, Lee IW. Control de puentes atirantados excitados sísmicamente que emplean amortiguadores de fluidos magnetorreológicos. Disponible en: <http://wusceel.cive.wustl.edu/>
50. Castro-Osorio M, Vallejo-Paniagua D, Valencia-Valencia V, Lara-Valencia LA, Blandón-Valencia JJ. DISEÑO ÓPTIMO DE UN INERTERO DE AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA MEDIANTE UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE BALLENAS PARA EL CONTROL DE EDIFICIOS SOMETIDOS A ACELERACIONES DEL SUELO. En: Actas de COMPDYN. Universidad Técnica Nacional de Atenas; 2023.
51. Azizi M, Ejlali RG, Mousavi Ghasemi SA, Talatahari S. Algoritmo de optimización de ballenas actualizado para el control de vibraciones basado en lógica difusa de estructuras de acero no lineales. *Estructura Eng*. 1 de agosto de 2019; 192:53–70.
52. Wadood A, Khurshaid T, Farkoush SG, Yu J, Kim CH, Rhee SB. Algoritmo de optimización de ballenas inspirado en la naturaleza para la coordinación óptima de relés de sobrecorriente direccional en sistemas de energía. *Energías (Basilea)*. 2019; 12(12).
53. Lara-Valencia LA, Caicedo D, Valencia-González Y. Un novedoso algoritmo de optimización de ballenas para el diseño de amortiguadores de masa sintonizada bajo excitaciones sísmicas. *Ciencias Aplicadas (Suiza)*. 1 de julio de 2021; 11(13).
54. Gharehchopogh FS, Gholizadeh H. Un estudio exhaustivo: Algoritmo de optimización de ballenas y sus aplicaciones. *Enjambre Evol Comput*. 1 de agosto de 2019; 48:1–24.
55. Gupta MM. Cuarenta y cinco años de conjuntos difusos y lógica difusa: un homenaje al profesor Lotfi A. Zadeh (el padre de la lógica difusa). Vol. 18, *Scientia Iranica*. Universidad Tecnológica Sharif; 2011. Págs. 685-90.
56. Liu Y, Gordaninejad F, Evrensel CA, Hitchcock G. Un estudio experimental sobre el control de la vibración de lógica difusa de un puente utilizando amortiguadores de fluidos magnetorreológicos a prueba de fallos [Internet]. 2001. Disponible en: <http://Web.me.unr.edu/ciml>
57. Lara-Valencia LA, Valencia-González Y, Luis Vital De Brito J. Uso de lógica difusa para la administración de un sistema de control estructural basado en amortiguadores magnetorreológicos. Vol. 74, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N*. 2015.
58. Sun Y, Yang T, Liu Z. Un algoritmo de optimización de ballenas basado en la interpolación cuadrática para problemas de optimización global de alta dimensión. *Revista de Computación Blanda Aplicada*. 1 de diciembre de 2019;85.
59. Jung HJ, Spencer BF, Asce M, Lee IW. Control de puentes atirantados excitados sísmicamente que emplean amortiguadores de fluidos magnetorreológicos. Disponible en: <http://wusceel.cive.wustl.edu/>
60. Centro de Ingeniería de Datos de Movimiento Fuerte (CESMD) [Internet]. [citado 25 de diciembre de 2022]. Disponible en: www.strongmotioncenter.org.