



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Bogotá  
Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Civil

**METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PÓRTICOS PLANOS EN ACERO  
CONTROLADOS CON DISIPADORES HISTERÉTICOS METÁLICOS BASADA EN  
ALGORITMOS GENÉTICOS DE CODIFICACIÓN BINARIA**

*Por*

Olympia Valentina Siso Flores

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

Magister en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia. Junio de 2017

*Aprobado por*

**Director**

Jesús Daniel Villalba Morales. D.Sc.  
Departamento de Ingeniería Civil  
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Colombia

**Co-director**

Orlando Daniel Arroyo Amell. D.Sc.  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de La Sabana, Bogotá. Colombia

**Jurados**

Dr.- Ing. Fabián Augusto Lamus Báez  
Departamento de Ingeniería Civil  
Jefe de sección- Estructuras  
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Colombia

Dr. -Ing. Orlando Cundumi Sánchez  
Departamento de Ingeniería Civil  
Pontificia Universidad Javeriana, Cali. Colombia

Aprobado en Bogotá, el día 25 de mayo de 2017

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>ALGORITMOS GENÉTICOS</b> .....	<b>8</b>
<b>DISIPADOR TADAS</b> .....	<b>10</b>
<b>PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y OPENSEES</b> .....	<b>12</b>
<b>METODOLOGÍA PROPUESTA</b> .....	<b>13</b>
<b>Formulación estándar del problema de optimización</b> .....	<b>14</b>
Función objetivo .....	14
Variables .....	15
Parámetros.....	15
Restricciones .....	15
Restricciones funcionales.....	15
Restricciones geométricas.....	17
<b>Configuración del algoritmo genético binario de código redundante implícito</b> .....	<b>17</b>
<b>Implementación computacional</b> .....	<b>18</b>
Análisis estructural.....	18
Diseño de pórticos.....	19
<b>EJEMPLOS NUMÉRICOS</b> .....	<b>19</b>
<b>Pórticos analizados</b> .....	<b>19</b>
<b>Comparación de la respuesta sísmica de pórticos con y sin disipadores</b> .....	<b>21</b>
<b>Resultados del proceso de optimización</b> .....	<b>23</b>
Resultados proceso de optimización ejemplo numérico 1 .....	23
Resultados proceso de optimización ejemplo numérico 2 .....	24
Comparación de la optimización del pórtico de 5 pisos con y sin disipadores de energía	25

Resultados del proceso de optimización para el ejemplo 3.....	26
<b>Análisis del proceso de convergencia de las ejecuciones para los 3 ejemplos numéricos...</b>	<b>28</b>
<b>Costo computacional.....</b>	<b>33</b>
<b>Análisis del tamaño de la población en los resultados .....</b>	<b>33</b>
<b>Análisis del resultado del pórtico de 5 pisos optimizado bajo diferentes señales sísmicas</b>	<b>34</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>35</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>36</b>

---

# METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PÓRTICOS PLANOS EN ACERO CONTROLADOS CON DISIPADORES HISTERÉTICOS METÁLICOS BASADA EN ALGORITMOS GENÉTICOS DE CODIFICACIÓN BINARIA

**Grupo de investigación:** Estructuras y Construcción.

**Modalidad de presentación:** Artículo.

**A la revista:** *Numerical Methods*

## RESUMEN

Numerosas investigaciones se han llevado a cabo en las últimas décadas con el objetivo de desarrollar y ensayar disipadores de energía que mejoren la respuesta de una edificación ante un sismo. Sin embargo, determinar la ubicación de los dispositivos de control en el pórtico de tal manera que se obtenga una respuesta estructural donde se maximice la eficiencia del dispositivo y a su vez se reduzcan los costos resulta en un gran reto. En el presente artículo se propone una metodología para el diseño óptimo de estructuras de acero 2D con disipadores de energía metálicos histeréticos tipo TADAS (Triangular plate added damping and stiffness) basada en algoritmos genéticos especiales. Las variables de diseño corresponden a los perfiles asignados para vigas y columnas y a la ubicación y cantidad de dispositivos de control, lo anterior implica la formulación de un proceso de optimización estructurado y no estructurado. La función objetivo que dirige el proceso de optimización está ligada a la minimización del costo total de la estructura incluyendo los disipadores de energía. Se realizaron tres ejemplos, que corresponden a pórticos con variaciones geométricas, el análisis de las estructuras bajo cargas sísmicas se ejecutó en OpenSees.

**PALABRAS CLAVE:** sistemas de control, disipadores de energía pasivos, disipadores histeréticos, optimización estructural y reducción de daños sísmicos.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, en el campo de la ingeniería sísmo resistente se han realizado numerosos estudios con el objetivo de mejorar de manera significativa el análisis y diseño de edificaciones propensas a sismos de altas magnitudes, los cuales pueden provocar que una estructura colapse, quede fuera de servicio o requiriera de reparaciones complicadas y costosas. En ese sentido, se han desarrollado sistemas de control de vibraciones generadas por terremotos, cuya función es minimizar el daño en la estructura a través de la absorción de la energía proveniente del sismo. Estos dispositivos se pueden clasificar de forma general en tres tipos (Duque & Oviedo, 2009): i) de disipación pasiva, ii) de disipación semi-activa y iii) los activos e híbrido. La principal diferencia entre estos sistemas de control radica en el requerimiento de energía externa para su funcionamiento, como es el caso de los dispositivos activos y semi-activos, o que actúan por el movimiento de la estructura como es el caso de los pasivos. Así mismo, pueden existir diferencias en términos de costos, siendo los dispositivos pasivos generalmente más económicos.

Entre los sistemas de control pasivos más utilizados se encuentran los disipadores histeréticos metálicos, los cuales reducen las fuerzas sísmicas y movimientos de la estructura mediante la fluencia del material. Tales dispositivos ofrecen numerosas ventajas, entre las principales están que: i) son de fabricación sencilla, ii) son económicos en comparación con otros sistemas, iii) demuestran eficiencia en edificaciones de diferentes alturas, iv) no requieren de energía externa para su funcionamiento, v) los procedimientos de análisis y diseño son sencillos, vi) al concentrar los daños en el disipador los costos post-sismo disminuyen, ya que solo se basarán en el remplazo del sistema de control pasivo (Duque & Oviedo, 2009).

La efectividad de estos disipadores ha sido ampliamente reportada en la literatura para diferentes sistemas estructurales, siendo que se han obtenido reducciones de desplazamientos de entrepisos de hasta un 70% (Asari, Midorikawa, & Oviedo, 2010). Así mismo, las edificaciones con dispositivos de control han presentado mejor desempeño en comparación con otros tipos de estructuras, específicamente con pórticos arriostrados concéntricamente y excéntricamente (Bisht & Setia, 2014). En resumen, los estudios anteriores arrojaron que los disipadores histeréticos tienen mejor comportamiento ante las acciones sísmicas, ocasionando así una disminución significativa del daño estructural (Alehashem, Keyhani, & Pourmohammad, 2008).

Las investigaciones anteriores comprueban la efectividad del uso de los disipadores de energía para reducir los daños en estructuras propensas a sismos; sin embargo, uno de los principales retos para el ingeniero estructural consiste en definir la ubicación de los dispositivos en el pórtico de manera que se maximice su efectividad con respecto al control de la respuesta sísmica (Curadelli & Martínez, 2014). El efecto que causa la variación de la cantidad y ubicación de los disipadores de energía en un pórtico plano influye significativamente en la respuesta de la estructura ante el sismo, siendo que un número elevado de dispositivos en el pórtico no siempre dará los mejores resultados (Tovar & López, 2004).

---

En lo que se refiere específicamente a la ubicación de disipadores histeréticos metálicos, se han desarrollado metodologías de optimización para la ubicación de dicho dispositivo en pórticos planos de concreto haciendo uso del método SQP (Sequential Quadratic Programming) (Curadelli & Martinez, 2014), los algoritmos genéticos también se han implementado para hallar la solución de este tipo de problema de optimización, obteniendo buenos resultados debido a que este tipo de técnicas numéricas ofrecen numerosas ventajas (Yousefzadeh, Sebt, & Tehranizadeh, 2011).

Las investigaciones anteriores, no incluyeron la optimización de las secciones elementos estructurales como vigas y columnas, ya que son conocidas previamente esto se debe a que en muchos casos se trata de rehabilitación de estructuras. En el caso del diseño de una nueva estructura el problema de optimización se torna más complejo debido a que se desea determinar tanto las secciones de las vigas y columnas (optimización estructurada) como la cantidad y ubicación de los disipadores de energía (optimización no estructurada).

La optimización estructural de tamaño es un proceso iterativo donde se modifica sucesivamente la geometría de las secciones iniciales mientras se verifica el cumplimiento de restricciones constructivas y de diseño, por lo cual se convierte en un proceso bastante tedioso para un cálculo manual. En resumen, los métodos tradicionales son ineficientes al momento de abordar espacios de soluciones muy grandes, con la complejidad adicional de que estos espacios pueden ser dispersos y no convexos (Sánchez, 2012). Sin embargo, se puede proporcionar a un diseñador un conjunto de soluciones óptimas de manera automatizada haciendo uso de meta-heurísticas, debido a que se ha comprobado que son herramientas eficientes para la solución de problemas complejos de ingeniería (Saka et al. 2016). En ese sentido, en el presente trabajo se plantea el uso de los algoritmos genéticos, ya que es un algoritmo robusto, tiene amplias aplicaciones dentro de los procesos de optimización y con la implementación de diferentes codificaciones son capaces de adaptarse para solucionar un problema. Este tipo de algoritmos se puede adecuar para problemas estructurados y no estructurados.

En el presente trabajo se desarrolla una metodología para el diseño de pórticos planos en acero que utilizan disipadores histeréticos metálicos tipo TADAS (Disipadores triangulares de rigidez añadida), donde se permite optimizar los perfiles de vigas, columnas, y también posiciones y cantidades de los disipadores necesarios para una respuesta sísmica favorable. De esta manera se utiliza una técnica de control, con la que sin un alto costo aumenta la protección y durabilidad de las edificaciones. En este sentido, para la solución del problema se realizó una optimización estructurada y no estructurada de pórticos planos en acero controlados con disipadores histeréticos metálicos mediante la formulación de algoritmos genéticos especializados.

El presente artículo se divide en ocho secciones, en la primera se presenta una breve introducción a los algoritmos genéticos, en la sección dos se realiza una descripción de los algoritmos genéticos, en la parte tres se hace un breve resumen del funcionamiento de los disipadores tipo TADAS, en la cuarta y quinta se muestra la formulación del problema de optimización y análisis estructural,

---

en la sección seis y siete se describen y se desarrollan los ejemplos numéricos, en la octava y última sección se las conclusiones y análisis de resultados.

## 2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos hacen analogía con las leyes de selección natural y sobrevivencia del más fuerte para llevar un conjunto de posibles soluciones a evolucionar y así encontrar una respuesta a un problema determinado. Esas soluciones, en problemas que involucran variables continuas, son codificadas en vectores utilizando números binarios o reales (Laier & Villalba, 2010).

La eficiencia de este tipo de algoritmos depende en gran parte de los parámetros genéticos definidos al inicio del proceso evolutivo, los cuales se describen a continuación:

- **Tamaño de población:** este parámetro contiene la cantidad de individuos que formaran parte de la población en un número de generaciones determinadas, la definición acertada de este previene la convergencia prematura a una solución local.
- **Tasa de reproducción:** este parámetro corresponde a un valor decimal que indica la frecuencia de cruce entre un cromosoma padre y otro madre para la producción de hijos (nuevos individuos).
- **Tasa de mutación:** corresponde a un valor decimal que indica la frecuencia con la que los bits de un cromosoma serán mutados (variados). En el caso de no haber mutación se disminuye la diversidad en la población.

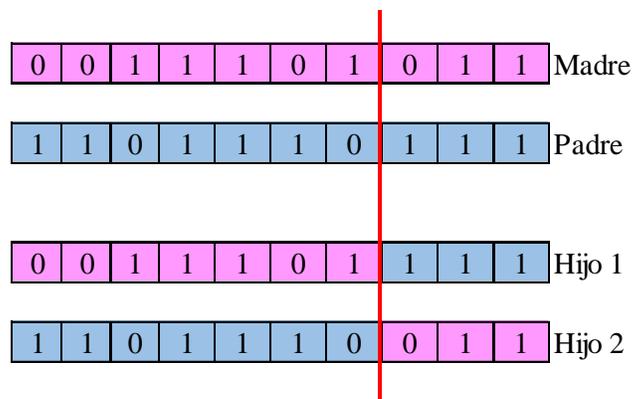
Estos algoritmos permiten realizar procesos de optimización en un periodo de tiempo razonable, mediante la aplicación de tres operadores básicos (selección, reproducción y mutación), los cuales se encargan de mantener la diversidad genética de una población. La selección del individuo se realiza por medio de un proceso aleatorio en la mayoría de los casos, en términos de la magnitud conocida como *fitness* (medida para la determinación de la calidad de un individuo, es definida en términos de la función objetivo). La reproducción se encarga de crear individuos (hijos) a partir de individuos (padres) seleccionados anteriormente en el proceso de selección. Para cada par de padres se debe generar un número aleatorio que determine si se reproducirán o no al ser comparado con una tasa de reproducción. El operador mutación se encarga de producir cambios en los hijos creados por el operador de reproducción, dichos cambios buscan ayudar al algoritmo a salir de óptimos locales y recuperar material genético perdido. El algoritmo realiza un proceso iterativo, debido a esto se debe establecer un criterio de paro.

A continuación, se muestra un resumen de algunos operadores genéticos, específicamente aquellos que serán utilizados en el presente trabajo:

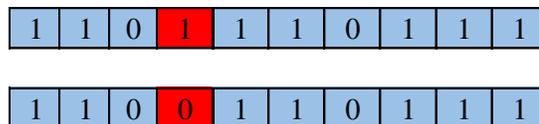
- **Operador de selección:** este operador es el que se encarga de definir quién tendrá derecho a reproducirse, existen numerosos métodos que son utilizados en los algoritmos genéticos

para desarrollar el proceso de selección entre ellos se encuentra el método de la ruleta, torneo y ranking.

- Operador de reproducción: este operador es el responsable de ejecutar el proceso de apareamiento de dos individuos (a partir de la probabilidad de cruce que rige la tasa de reproducción definida), existen variedad de tipo de operadores de cruce, pueden ser determinísticos, aritméticos o multiparentales. Como por ejemplo el operador de cruce de un punto (Ver figura 1) o de dos puntos.
- Operador de mutación: este operador se encarga de proporcionar variabilidad en la población, alterando la información genética de los individuos. En la figura 2 se supone que se generó una probabilidad de mutación positiva (que depende de la tasa de mutación definida) para el bit número 4, por lo cual se cambia su información genética.



**Figura 1.** Operación de cruce entre dos individuos binarios.

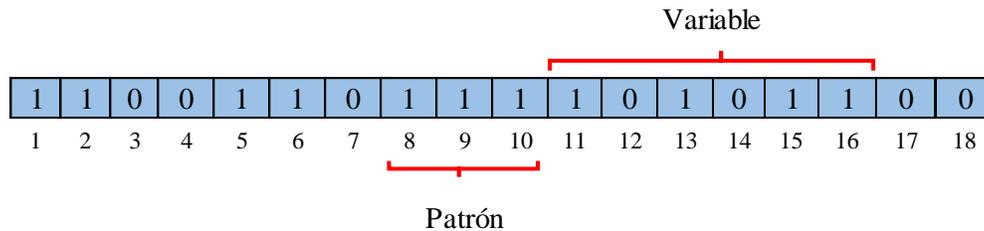


**Figura 2.** Operación de mutación.

En lo que se refiere a la solución del problema de optimización no estructurado (cuando no está definida la cantidad de variables) se configuró el algoritmo genético de código redundante implícito, este se diferencia de un algoritmo genético básico por cómo se toman los genes desde el cromosoma. Para la definición del cromosoma se calcula la longitud del mismo y se establece un patrón de localización de genes, el cual será una secuencia de bits predefinida que indica la ubicación de una variable. Para este algoritmo no es necesario la definición del número de variables debido a que este tipo de codificación permite que el número de variables al ser optimizadas pueda cambiar durante todo el proceso evolutivo (Raich & Jamshid, 1998).

En la figura 3 se supone un ejemplo donde se establece un patrón dado por tres unos (1) seguidos y una variable (gen) de tamaño 6, el procedimiento para la localización de genes comienza con un

recorrido que hace el algoritmo por el cromosoma, y de esta manera al encontrar tres bits seguidos con valor igual a 1 (el patrón), los seis bits que siguen serán definidos como una variable (en la figura 3, del bit 11 al 16), por lo cual existe la posibilidad de que algunos bits no sean utilizados o que en un cromosoma exista más de una variable. Específicamente para el problema en estudio la ubicación de uno o más genes en el cromosoma significará la presencia y ubicación de un disipador en el pórtico.



**Figura 3.** Identificación de variable en codificación binaria redundante implícita.

### 3. DISIPADOR TADAS (Triangular plate added damping and stiffness)

A mediados de los años noventa, se desarrollaron los disipadores de energía por fluencia del material TADAS, que tienen un comportamiento histeréticos similares a los ADAS (Added damping and stiffnes). Los disipadores pasivos por fluencia absorben un porcentaje importante de la energía proveniente del sismo, evitando daños estructurales importantes. La energía proveniente del sismo que reciben los dispositivos hace que fluyan y en el caso más desfavorable se presentaría la falla del dispositivo y no de los elementos estructurales de la edificación (Pimiento et al. 2014).

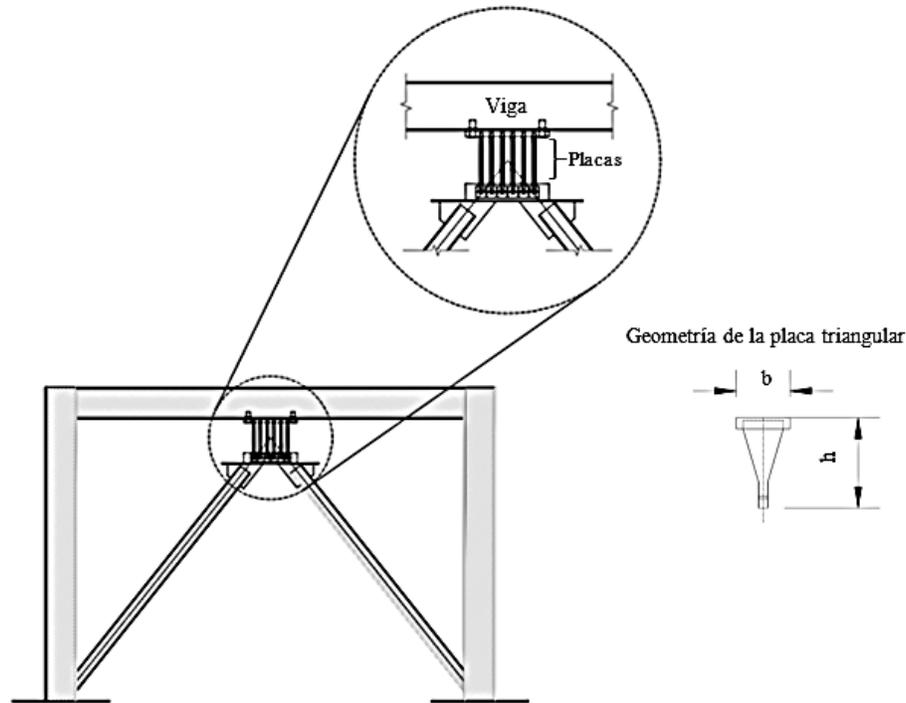
Los disipadores tipo TADAS fueron desarrollados por Tsai et al. (1993), estos dispositivos están formados por placas paralelas de forma triangular de espesor constante, la forma habitual de colocarlos es sobre diagonales de acero en forma de “V” invertida, como se observa en la figura 4. El disipador en la parte superior se encuentra en contacto con la viga con un empotramiento móvil y en la parte inferior se encuentra articulado, permitiendo un desplazamiento vertical a lo largo de las aberturas ovaladas de la placa (desplazamiento relativo) lo cual da origen a la disipación de energía, es importante acotar que desde un punto de vista práctico se puede considerar que el comportamiento de los disipadores TADAS bajo cargas sísmicas es bilineal (Aguiar et al. 2016).

En lo que se refiere al prediseño de un disipador de energía tipo TADAS, se deben tomar en cuenta varios factores, en primer lugar, la demanda sísmica (análisis sísmico de la estructura sin disipadores) y la capacidad sísmica a corte, Aguiar et al. (2016) recomiendan unas dimensiones para los disipadores tipo TADAS, considerando un ancho (b) igual a  $0.5 \cdot h$  para alturas de 30, 25 y 20 cm y para alturas de 15 y 10 cm recomiendan un ancho de 10 cm.

Las características mecánicas que describen a un disipador tipo TADAS principalmente son tres, la curvatura, fuerza y desplazamiento de fluencia y rigidez elástica, las ecuaciones de dichos

---

parámetros se pueden deducir a partir de las propiedades geométricas del dispositivo ( $h$ ,  $b$  y  $t$ ) y la propiedad del material módulo de elasticidad y esfuerzo por fluencia ( $E$  y  $F_y$ ) (Ver figura 4).



**Figura 4.** Disipadores TADAS sobre las diagonales.

#### 4. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

La optimización es un proceso iterativo que consiste en obtener la mejor solución de un problema bajo unas circunstancias determinadas, existen dos métodos utilizados en los últimos años para realizar procesos de optimización, las metaheurísticas y las heurísticas, ya que los métodos tradicionales basados en gradientes en muchos casos no son capaces de afrontar espacios de soluciones tan complejos.

Para la formulación de un problema de optimización es necesaria de la definición en términos de la función objetivo, las variables, parámetros y las restricciones de diseño. Como se define a continuación:

- **Función Objetivo:** representa la medida de calidad de las soluciones del problema en estudio, por lo general se plantea con el objetivo de minimizar o maximizar la función, la cual puede corresponder a costos, beneficios, peso, tiempo de ejecución o producción, entre otros.
- **Variables de diseño:** son todas las que representan el problema en estudio, las cuales al cambiar modifican el resultado de la función objetivo. (Lapadula, 2014)

- 
- Parámetros: son aquellas cantidades que no varían su valor durante el proceso de optimización.
  - Restricciones de diseño: son aquellas que reducen el espacio de búsqueda de las soluciones. La solución a un problema de ingeniería en su gran mayoría debe cumplir con una serie de restricciones las cuales se clasifican en geométricas y funcionales, las primeras se refieren a las limitaciones físicas del sistema y las segundas están asociadas a las limitaciones del comportamiento del sistema. Las restricciones tienen dos formas de representación, por desigualdad o por igualdad, es decir:

$$h_i = \text{fun}_1(x_1) = \text{Valor}_1$$

$$g_i = \text{fun}_2(x_1) < \text{Valor}_2$$

## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y OPENSEES

El análisis estructural para los ejemplos numéricos se realizó en OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), el cual fue desarrollado por la Universidad de California, Berkeley.

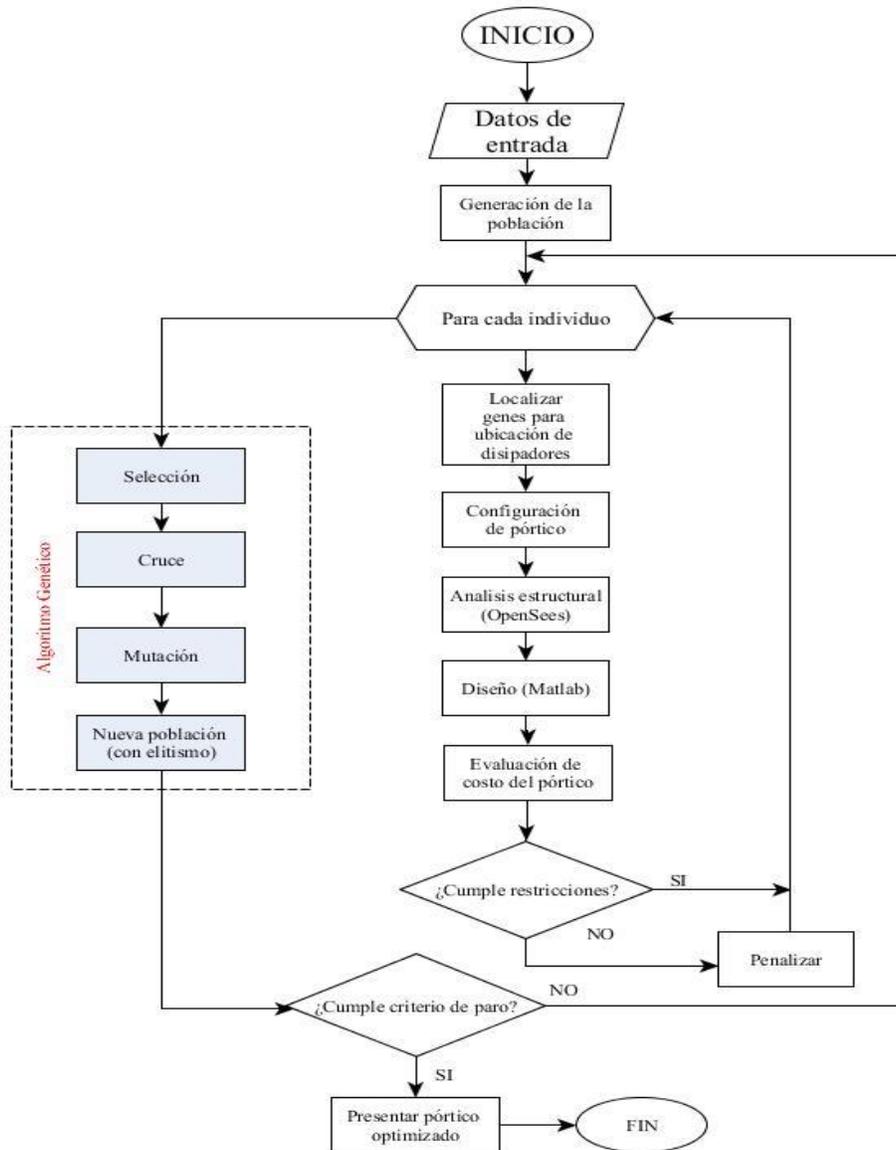
OpenSees es una plataforma informática donde se puede simular estructuras sometidas a eventos sísmicos, esta plataforma permite realizar análisis lineales y no lineales de estructuras tanto en 2D como en 3D. Para el análisis de la estructura el OpenSees utiliza el método de los elementos finitos y usa un lenguaje de interpretación llamado TCL (Tool Command Language), por medio de estos comandos en primer lugar se crea el modelo, luego se realiza la definición de la geometría del problema (coordenadas de nodos y elementos), definición de materiales, secciones, cargas, grabadores (recorders), análisis y definición de funciones (algoritmos de solución). Las numerosas ventajas que ofrece OpenSees facilitaron los análisis de los ejemplos numéricos, debido a que es un programa de código abierto, que permite modificar la codificación para así ajustarlo al problema y de la misma manera permite una interacción sencilla con la configuración del algoritmo genético y el diseño estructural, ambos realizados en Matlab®.

## 6. METODOLOGÍA PROPUESTA

En el presente trabajo se propone una metodología para el diseño de pórticos planos en acero controlados con disipadores histeréticos metálicos tipo TADAS (Disipadores triangulares de rigidez añadida), donde se utilizaron algoritmos genéticos de codificación binaria (optimización estructurada) con una modificación de un código redundante implícito (optimización no estructurada) para optimizar los perfiles de vigas, columnas, y también posiciones y cantidades de los disipadores necesarios para una respuesta sísmica favorable.

Para iniciar el proceso de optimización basado en algoritmos genéticos se deben definir los parámetros de entrada (parámetros genéticos y características del pórtico) (Ver tabla 1); al comienzo se genera aleatoriamente una población partiendo de un número determinado de individuos (tamaño de población). Los individuos conforman una matriz que representa la

generación inicial del proceso evolutivo, estos individuos están formados por cromosomas, donde se localizan los genes que representan los elementos de los pórticos (columnas y vigas) y así mismo la localización de un disipador de energía en la estructura, seguidamente se configura el pórtico con los perfiles de vigas y columnas, cantidad y ubicación de los disipadores arrojado por el proceso evolutivo, estas configuraciones pasan a ser analizadas en OpenSees, los resultados provenientes del análisis estructural (Pu, Mu, desplazamientos y deflexiones) pasan al programa de diseño donde se verifican los requisitos establecidos el código (AISC 360-16), si la configuración del pórtico no cumple con las restricciones establecidas debe ser penalizado y ser sometido a los operadores genéticos (Selección, cruce y mutación), los cuales fueron descritos en la sección 2 (Ver figura 5).



**Figura 5.** Flujograma del proceso de optimización basado en algoritmos genéticos.

---

## 6.1.- Formulación estándar del problema de optimización

Para la formulación del problema de optimización se define la función objetivo, las variables, parámetros y las restricciones de diseño. Como se define a continuación:

6.1.1.- *Función objetivo.* Para la representación de la medida de calidad de las soluciones del problema en estudio, la función objetivo que rige el proceso de optimización se plantea con el objetivo de minimizar el peso de los pórticos, se consideró el peso total de los pórticos que conforman la edificación incluyendo el del dissipador (el peso del dissipador fue estimado como 2 veces el peso de un brazo).

$$\text{Peso Total} = \text{Peso Vigas} + \text{Peso Columnas} + \text{Peso TADAS} + \text{Peso brazos}$$

Donde:

$$\text{Peso Vigas} = \sum_{i=1}^{\text{Nro.V}} Wv_i * Lv_i$$

$$\text{Peso Columnas} = \sum_{i=1}^{\text{Nro.C}} Wc_i * Lc_i$$

$$\text{Peso Brazos} = \sum_{i=1}^{\text{Nro.b}} Wb_i * Lb$$

$$\text{Peso TADAS} = \text{Peso brazos.}$$

$$Wv_i = \text{Peso en } \frac{\text{kg}}{\text{ml}} \text{ de la viga.}$$

$$Wc_i = \text{Peso en } \frac{\text{kg}}{\text{ml}} \text{ de la columna.}$$

$$Lv_i = \text{Londitud de vigas en metros.}$$

$$Lc_i = \text{Londitud de columnas en metros.}$$

$$\text{Nro.Vigas} = \text{Numero de vigas.}$$

$$\text{Nro.Columnas} = \text{Numero de columnas.}$$

$$\text{Nro.brazos} = \text{Numero de brazos.}$$

---

6.1.2.- *Variables*. A continuación, se especifican las variables que rigen el proceso de optimización:

- Perfil viga
- Perfil columnas
- Ubicación y cantidad de TADAS

6.1.3.- *Parámetros*. A continuación, se especifican los parámetros definidos para el proceso de optimización:

- Propiedades del disipador.
- Altura del pórtico, número de vanos y número de pisos.
- Señales sísmicas.
- Propiedades del acero.

6.1.4.- *Restricciones*

6.1.4.1 *Restricciones funcionales*. En lo que se refiere al diseño estructural se desarrolló en Matlab ® cumpliendo con lo establecido en las especificaciones para construcción en acero (AISC 360-16), donde se detallan las propiedades que deben cumplir los perfiles en cuanto a geometría y resistencia.

- Esbeltez de la sección (Alas). Tabla B.4.1.a AISC 360-16

$g1(x): b/t_f < \lambda_r$  “Sección no esbelta”

$$\lambda_r = 0.56 * \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

- Esbeltez de la sección (Almas). Tabla B.4.1.a AISC 360-16

$g2(x): h/t_w < \lambda_r$  “Sección no esbelta”

$$\lambda_r = 1.49 * \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

- Esbeltez por longitud

$g3(x): K.L/r_y < 4.71 * \sqrt{E/f_y}$  “No esbelta”

- Sección Compacta (Alas) Tabla B.4.b AISC 360-16

$g4(x): \lambda_r > \lambda_p$  “Sección compacta”

---

$$\lambda_r = 0.38 * \sqrt{E/f_y}$$

$$\lambda_r = \sqrt{E/f_y}$$

- Sección Compacta (Alma) Tabla B.4.b AISC 360-16

$g5(x)$ :  $\lambda_r > \lambda_p$  "Sección compacta"

$$\lambda_r = 3.76 * \sqrt{E/f_y}$$

$$\lambda_r = 5.7 * \sqrt{E/f_y}$$

- Verificación de ductilidad (Alas). AISC 341-16

$$g6(x): \frac{b}{t} < 0.38 * \sqrt{E/f_y}$$

- Verificación de ductilidad (Alma). AISC 341-16

$g7(x)$ :  $C_a < 0.125$

$$C_a = P_u / (A * F_y * 0.90)$$

- Límite de deflexiones en vigas:

$g8(x)$ :  $\delta \leq \delta_{\text{permisible}}$

$$\Delta_{\text{permisible}} = L/360$$

- Límite de resistencia de los elementos a flexión

$g9(x)$ :  $M_u / \phi M_n - 1 \leq 0$

- Deriva para cada piso

$g10(x)$ : Desplazamiento de entrepiso  $\leq$  Altura del piso \* 1%

- Límite de resistencia para elementos a flexo-compresión

Si  $\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2$  entonces:

$$g11(x) = \left[ \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left[ \left( \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} \right) + \left( \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \right] \right] - 1 \leq 0$$

Si  $\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2$  entonces:

---

$$g_{12}(x) = \left[ \frac{Pu}{2 * \Phi Pn} + \left[ \left( \frac{Mux}{\Phi Mnx} \right) + \left( \frac{Muy}{\Phi Mny} \right) \right] \right] - 1 \leq 0$$

Donde:

Pu = Resistencia de compresión axial requerida

Pn = Resistencia de compresión axial disponible.

Mux = Resistencia de flexión requerida eje x.

Muy = Resistencia de flexión requerida eje y.

Mnx = Resistencia de flexión disponible en la dirección de análisis en el eje x.

Mny = Resistencia de flexión disponible en la dirección de análisis en el eje y.

$\Phi$  = Factor de resistencia. 0.90.

*6.1.4.2.- Restricciones geométricas.* Estas restricciones son todas aquellas que toman en cuenta los aspectos de construcción y arquitectura.

- Inercia de la sección de la columna mayor a la inercia de sección de la viga

$$g_{13}(x): I_{Col} \geq I_{vig}$$

- Inercia de la columna de piso inferior mayor al Inercia de la columna de piso superior

$$g_{14}(x): I_{col\_inf} \geq I_{col\_sup}$$

- Inercia de la viga de piso inferior mayor al Inercia de la viga de piso superior

$$g_{15}(x): I_{vig\_inf} \geq I_{viga\_sup}$$

- Altura de la sección de la columna mayor al ancho del ala de la viga

$$g_{16}(x): h_{Col} \geq b_{vig}$$

- Altura de sección de la columna de piso inferior mayor a la Altura de la sección de la columna de piso superior

$$g_{17}(x): h_{Col\_inf} \geq h_{Col\_sup}$$

*6.1.5.- Penalizaciones.* Cuando las restricciones anteriores son violadas por el algoritmo, se utilizan penalizaciones que afectan directamente la función objetivo y de esta manera se obliga a que las soluciones cumplan con las restricciones funcionales y geométricas. En el presente estudio las penalizaciones fueron establecidas por ensayo y error.

## **6.2.- Configuración del algoritmo genético binario de código redundante implícito**

Para la configuración del algoritmo se fijaron una serie de parámetros y operadores que rigen el proceso evolutivo y garantizan la diversidad de los individuos, los cuales se presentan a

continuación, dichos parámetros se variaron para así analizar la influencia de los mismos en desempeño del algoritmo, (Ver sección 7.6):

- Para los tres ejemplos numéricos se definieron los parámetros genéticos a continuación (Pórtico de dos, cinco y ocho pisos. Ver figura 6):

**Tabla 1.** Parámetros genéticos

Parámetros genéticos	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3
	2 pisos	5 pisos	8 pisos
Tamaño de la población	50	50	50
Tasa de reproducción	0.85	0.85	0.85
Tasa de mutación	0.03	0.03	0.03
Número máximo de generaciones	80	150	150
Número de ejecuciones	5	5	5

Operador selección: en el presente trabajo se utilizó el método de selección por torneo el cual consiste en escoger de manera aleatoria individuos de la población, luego se realiza una comparación entre ellos, y gana el individuo con mejor *fitness*.

Operador reproducción: la configuración del algoritmo genético se realizó haciendo uso del operador de cruce de un punto, este consiste en generar aleatoriamente un punto de corte o intercambio, donde uno de los individuos transfiere todo su código anterior a ese punto y el otro individuo aporta todo su código a partir de ese punto, de esta manera se crea un hijo (Ver figura 1).

Operador mutación: se utilizó el método de Jump, que consiste en alterar el valor de un bit, es decir en el caso de la codificación binaria si el valor del bit es 0 se coloca 1 y si no lo contrario (Ver figura 2).

Elitismo: se utilizó esta técnica que consiste en mejorar la convergencia del algoritmo, manteniendo a los mejores individuos entre las posibles soluciones del problema en estudio.

### 6.3.- Implementación computacional

6.3.1.- *Análisis estructural.* En esta sección se realiza una breve explicación del análisis estructural realizado para los ejemplos numéricos.

Para determinar el desempeño de la metodología propuesta se evaluaron 3 pórticos utilizando acero A572 Gr. 50. El análisis considera que la superestructura permanece lineal elástica, razón por la cual se adoptó un factor de reducción  $R=1$ , el disipador tipo TADAS fue definido en OpenSees como un elemento “*two node link*” de material histerético, con altura de 40 cm. Las unidades de todos los ejemplos numéricos se trabajaron en toneladas y metros. Por otro lado, los elementos (vigas y columnas) fueron definidos como elásticos y los disipadores de energía como no lineales.

---

El análisis sísmico fue definido como *transiente*, con sistemas de ecuaciones tipo *bandGeneral*, solución del algoritmo de *newton*, tipo de integración *newmark* y amortiguamiento *Rayleigh* de 5% .

6.3.2.- *Diseño de pórticos*. Para el diseño de los pórticos se realizó una rutina en Matlab®, siguiendo los requisitos establecidos por las normas AISC 360-16 y AISC 341-16 (especificaciones en la sección de restricciones de la formulación del problema de optimización).

## 7. EJEMPLOS NUMÉRICOS

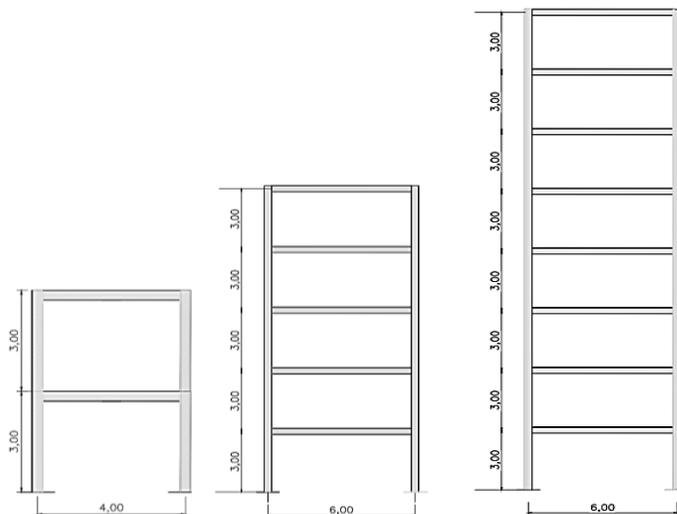
### 7.1 Pórticos analizados

La optimización de las vigas y columnas se realizó partiendo de una base de datos de perfiles W, la cual se redujo a 142 perfiles (ordenados por ID de menor a mayor peso) que cumplen con especificaciones del reglamento en lo que se refiere a secciones no esbeltas y compactas tanto en ala como en alma (Ver tabla 2).

El primer ejemplo numérico consta de 2 pisos, 1 vano de 4 metros de luz y 6 metros de altura total (Ver figura 6). Este pórtico fue sometido a una carga distribuida de 5 toneladas en cada viga y se analizó bajo 3 señales sísmicas diferentes (El centro, Mammoth y Loma prieta).

El segundo ejemplo numérico consta de 5 pisos, 1 vano de 6 metros de luz y 15 metros de altura total (Ver figura 6). Este pórtico fue sometido a una carga distribuida de 3 toneladas en cada viga y se analizó bajo 3 señales sísmicas diferentes (El centro, Mammoth y Loma prieta).

El tercer ejemplo numérico consta de 8 pisos, 1 vano de 6 metros de luz y 24 metros de altura total (Ver figura 6). Este pórtico fue sometido a una carga distribuida de 3 toneladas en cada viga y se analizó bajo 3 señales sísmicas diferentes (El centro, Mammoth y Loma prieta).



**Figura 6.** Pórticos de 2, 5 y 8 pisos.

**Tabla 2.** Tabla de perfiles ordenados de menor a mayor peso.

ID	PERFIL	ID	PERFIL	ID	PERFIL	ID	PERFIL
1	W6X9	41	W12X87	81	W18x211	121	W33X387
2	W6X12	42	W10X88	82	W27X217	122	W30X391
3	W4X13	43	W16X89	83	W24X229	123	W40X392
4	W4X13	44	W12X96	84	W12X230	124	W36X395
5	W6X15	45	W18X97	85	W18x234	125	W40X397
6	W5X16	46	W10X100	86	W27X235	126	W14X398
7	W6X16	47	W10X100	87	W24X250	127	W14X426
8	W8X18	48	W12X106	88	W12X252	128	W40X431
9	W5X19	49	W12X106	89	W14X257	129	W36X441
10	W6X20	50	W14X109	90	W18x258	130	W14X455
11	W8X21	51	W10X112	91	W18x258	131	W36X487
12	W8X24	52	W18X119	92	W27X194	132	W14X500
13	W14X233	53	W12X120	93	W12X279	133	W40X503
14	W6X25	54	W12X120	94	W12X279	134	W36X529
15	W8X28	55	W21X122	95	W27X281	135	W27X539
16	W10X30	56	W18X130	96	W14X283	136	W14X550
17	W8X31	57	W14X132	97	W14X283	137	W40X593
18	W10X33	58	W14X132	98	W33X291	138	W14X605
19	W8X35	59	W12X136	99	W30X292	139	W36X652
20	W10X39	60	W18X143	100	W12X305	140	W14X665
21	W8X40	61	W14X145	101	W24X306	141	W14X730
22	W10X45	62	W21X147	102	W27X307	142	W36X800
23	W10X45	63	W12X152	103	W14X311	136	W14X550
24	W8X48	64	W18X158	104	W18x311	137	W40X593
25	W10X49	65	W14X159	105	W33X318	138	W14X605
26	W12X50	66	W24X162	106	W30X326	139	W36X652
27	W12X53	67	W21X166	107	W40X327	140	W14X665
28	W10X54	68	W12X170	108	W40X331	141	W14X730
29	W8X58	69	W18X175	109	W24X335	142	W36X800
30	W8X58	70	W14X176	110	W12X336		
31	W10X60	71	W14X176	111	W12X336		
32	W8X67	72	W21X182	112	W14X342		
33	W10X68	73	W12X190	113	W33X354		
34	W10X68	74	W24X192	114	W30X357		
35	W12X72	75	W18x192	115	W36X361		
36	W14X74	76	W14X193	116	W40X362		
37	W16X77	77	W21X201	117	W27X368		
38	W10X77	78	W24X207	118	W14X370		
39	W12X79	79	W12X210	119	W14X370		
40	W14X82	80	W14X211	120	W40X372		

---

## 7.2. Comparación de la respuesta sísmica de pórticos con y sin disipadores

Con el fin de comprobar la eficiencia de la implementación de los dispositivos de control en las estructuras propensas a sismos de altas magnitudes, se hizo una comparación de los pórticos presentados en la sección anterior con y sin disipadores antes de ser sometidos al proceso de optimización. Para el pórtico de dos pisos se utilizaron columnas de perfiles W14x257, vigas W12x136 y TADAS en los dos pisos con los brazos de perfiles W6x9. Para el pórtico de cinco pisos columnas W10x30, vigas W8x21y TADAS en los primeros dos pisos con brazos W6x12. El pórtico de 8 pisos se configuro con columnas W14x257, vigas de W12x136, TADAS en los tres primeros pisos y brazos de W6x12.

En la figura 7, se demuestra la eficacia de la colocación de los disipadores de energía para la disminución de desplazamientos de entrepisos, en este primer caso se obtuvo un 82% de reducción de desplazamientos; en la figura 8 se muestra la respuesta de desplazamiento vs. tiempo para el segundo caso (pórtico 5 pisos) donde colocando el disipador en los dos primeros pisos se obtuvo una reducción de desplazamiento del 33% , seguidamente en la figura 9 se presenta la respuesta del pórtico de 8 pisos donde se obtuvo una reducción del desplazamiento máximo en un 54%.

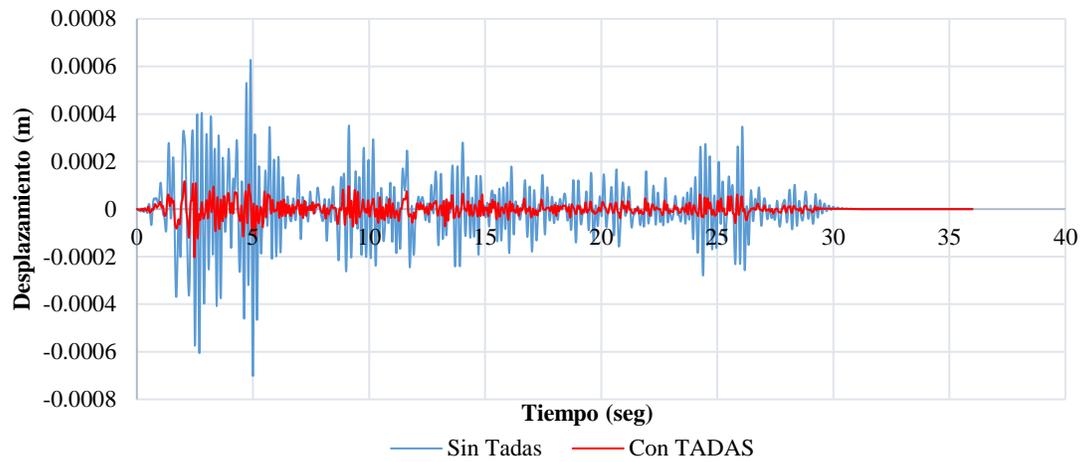
Lo comentado anteriormente permite señalar que la eficiencia de los dispositivos de control varían según su ubicación y la cantidad que se coloque en el pórtico; en la tabla 3 se detalla como la adición de disipadores afecta a la estructura aumentando su rigidez y como consecuencia produce una disminución del periodo y de los desplazamientos máximos de entrepisos, lo dicho indica el buen funcionamiento de los dispositivos provocando que la estructura se mueva menos.

**Tabla 3.** Respuestas de los pórticos en términos de desplazamientos y periodos

Pórtico	Desplazamiento máximo (m)		Periodos (seg)	
	Sin Tadas	Con tadas	Sin tadas	Con tadas
2 pisos	6.28E-04	1.17E-04	0.18	0.1
5 pisos	5.96E-04	4.01E-04	0.35	0.22
8 pisos	2.93E-03	1.35E-03	0.42	0.3

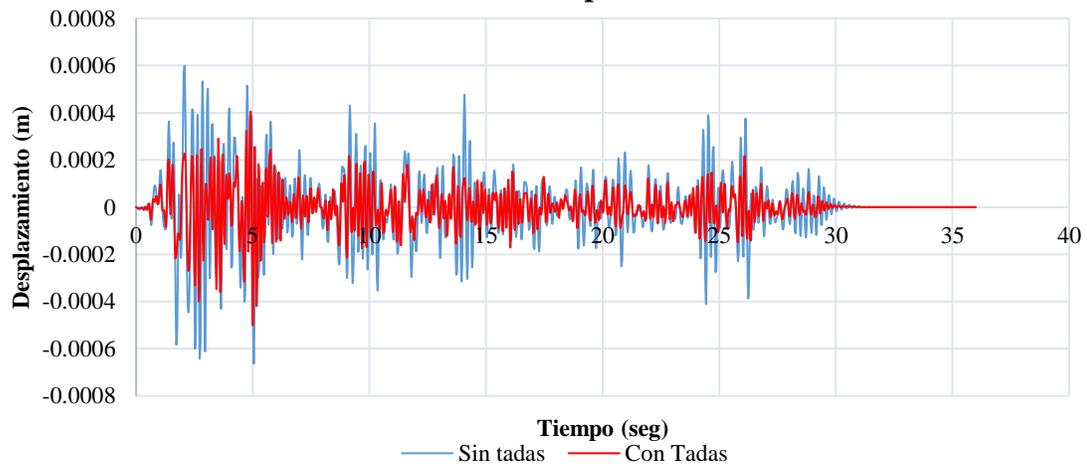
---

### Pórtico 2 pisos

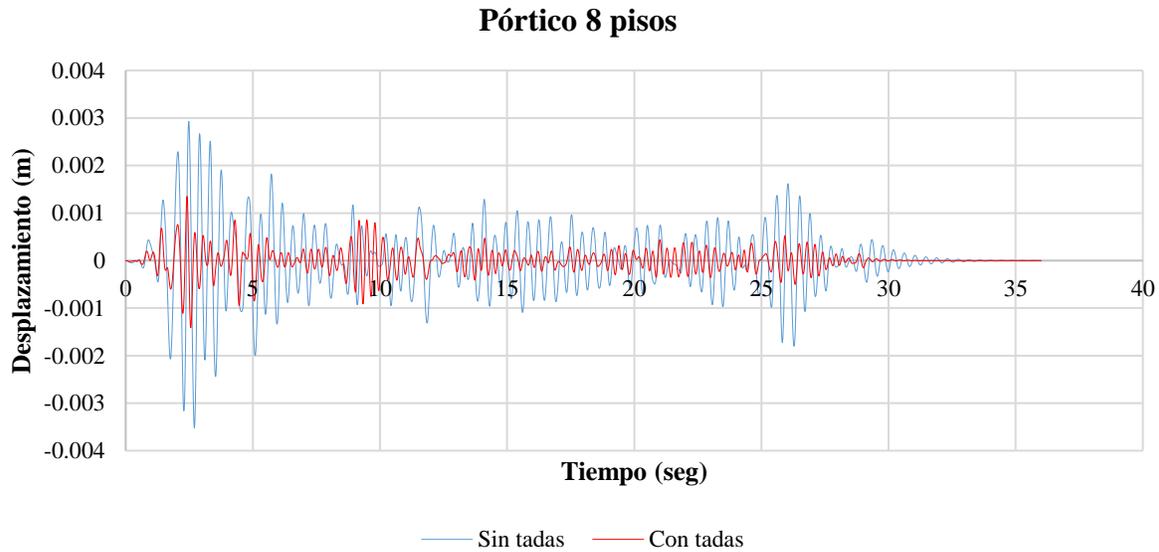


**Figura 7.** Desplazamiento vs tiempo del nodo superior derecho ( $U_x$ ). Ejemplo numérico 1 con y sin disipadores de energía.

### Pórtico de 5 pisos



**Figura 8.** Desplazamiento vs tiempo del nodo superior derecho ( $U_x$ ). Ejemplo numérico 2 con y sin disipadores de energía.



**Figura 9.** Desplazamiento vs tiempo del nodo superior derecho ( $U_x$ ). Ejemplo numérico 3 con y sin disipadores de energía.

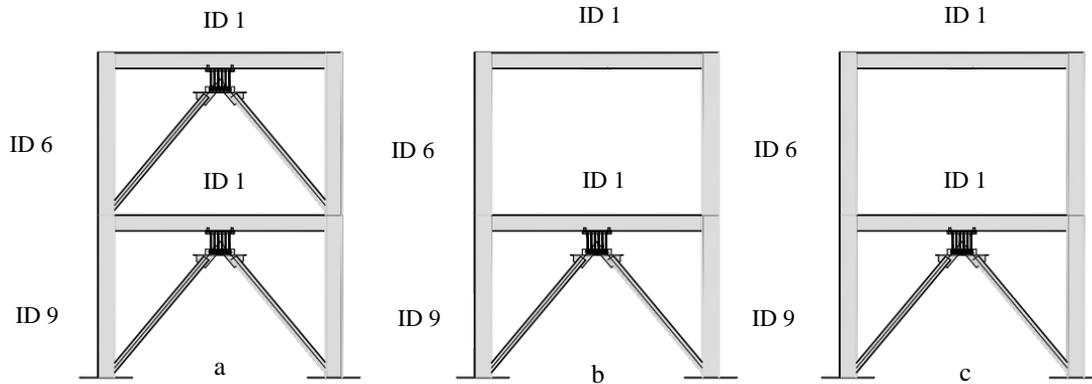
### 7.3. Resultados del proceso de optimización

7.3.1 *Resultados proceso de optimización ejemplo numérico 1.* En la tabla a continuación se presentan los resultados (peso total de la estructura, configuración según ID de columnas y vigas, posición y cantidades de TADAS) para el pórtico de dos pisos bajo las distintas señales sísmicas (El centro, Loma prieta y Mammoth). Adicionalmente en la figura 10, se muestra cómo fue la configuración del pórtico hasta llegar a la solución, para la señal de El centro donde lo más eficiente resultó en colocar un solo dispositivo de control (disipador tipo Tadas) en el primer piso.

**Tabla 4.** Resultados proceso de optimización ejemplo 1

<b>2 PISOS</b>				
Variables		El centro	Loma prieta	Mammoth
Columna	Piso 1	ID 9	ID 9	ID 9
	Piso 2	ID 6	ID 6	ID 6
Viga	Piso 1	ID 1	ID 1	ID 1
	Piso 2	ID 1	ID 1	ID 1
Tadas	Ubicación	Piso 1	Piso 1	Piso 1
Brazos	Tipo	ID 1	ID 1	ID 1
Peso total (t)		0.75	0.75	0.75

La configuración (c) resultó la mejor solución con la reducción del peso en un 30% en comparación con la primera solución (a), la configuración final posee columnas del primer piso de ID 9, segundo piso ID 6, vigas de primer y segundo piso ID 1, brazos de ID 1 y un solo dissipador ubicado en el primer vano (Ver figura 10).



**Figura 10.** Las 3 mejores soluciones para el sismo El Centro.

7.3.2 *Resultados proceso de optimización ejemplo numérico 2.* Para el pórtico de 5 pisos se obtuvo una minimización de peso del 37% a pesar de que algoritmo no llegó a la convergencia por falta de incremento en el número máximo de generaciones (Ver sección 7.4 de análisis de convergencia), obteniendo finalmente un peso total del pórtico de 5 pisos sometido al sismo el centro de 2.48 t (Ver tabla 5).

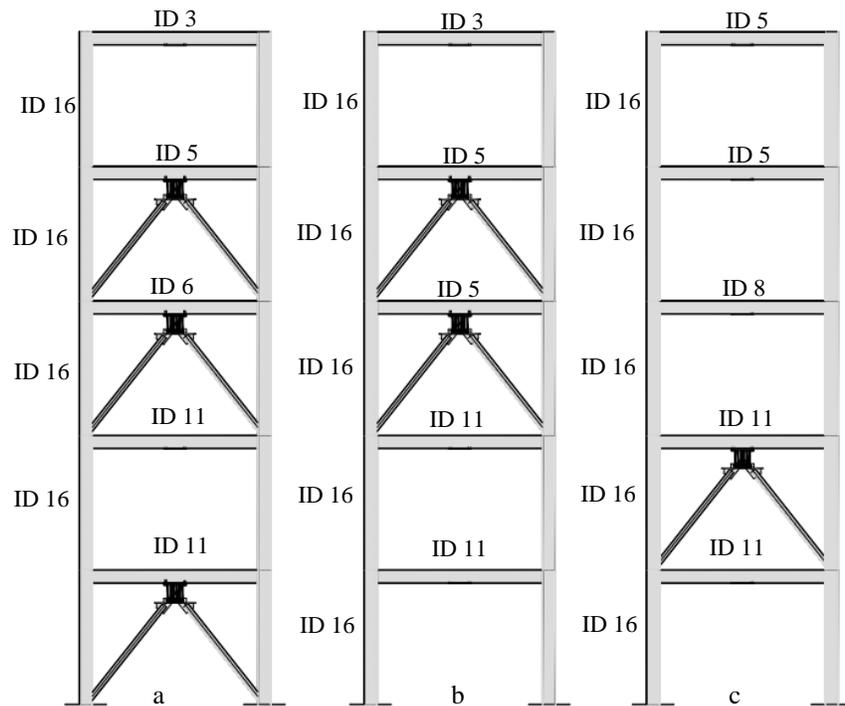
**Tabla 5.** Resultados proceso de optimización ejemplo 2

<b>5 PISOS</b>				
Variables		El centro	Loma prieta	Mammoth
Columna	Piso 1	ID 16	ID 19	ID 16
	Piso 2	ID 16	ID 19	ID 16
	Piso 3	ID 16	ID 19	ID 16
	Piso 4	ID 16	ID 18	ID 16
	Piso 5	ID 16	ID 15	ID 16
Viga	Piso 1	ID 11	ID 8	ID 11
	Piso 2	ID 11	ID 7	ID 11
	Piso 3	ID 8	ID 5	ID 8
	Piso 4	ID 5	ID 3	ID 5
	Piso 5	ID 5	ID 3	ID 6
Tadas	Ubicación	Piso 2	Piso 2	Piso 2
Brazos	Tipo	ID 2	ID 2	ID 2
Peso total (t)		2.48	2.92	2.58

La figura 10 representa los tres mejores resultados para el pórtico de 5 pisos sometido al sismo de El centro, donde la figura 10 (c) fue la mejor configuración obtenida, conformado por columnas de ID 16, vigas de primer y segundo piso ID 11, viga del tercer piso de ID 8, vigas del cuarto y quinto piso de ID 5, brazos de ID 2 y dissipador ubicado en el piso 2.

Es importante mencionar que estructura sometida a la señal sísmica de Loma Prieta resultó con un aumento en el peso de la estructura en comparación con la señal de El centro, dando como resultado un peso total de 2.92 t y una configuración de pórtico final con un dissipador ubicado en el segundo piso.

Por otro lado, para el pórtico de 5 pisos bajo la carga sísmica de Mammoth, se obtuvo un peso total de la estructura optimizada de 2.58 t. con una configuración final de un dissipador de energía en el segundo piso, donde todas las columnas de ID 16, viga de primer y segundo piso ID 11, viga del tercer piso de ID 8, viga del cuarto piso de ID 6 y quinto piso de ID 5 con brazos de ID 2.



**Figura 10.** Configuración de la solución para el sismo el centro.

*7.3.3 Comparación de la optimización del pórtico de 5 pisos con y sin dissipadores de energía.* Con el objetivo de comparar la diferencia de pesos totales entre un pórtico con y sin dissipadores de energía se evaluó adicionalmente el pórtico de 5 pisos bajo la carga sísmica de Loma Prieta pero esta vez sin dissipadores, de igual manera se realizaron 5 ejecuciones con 150 número máximo de generaciones y 50 de tamaño de población, para poder realizar una comparación justa.

Comparando los pesos totales obtenidos que se muestran en la tabla 6 se demuestra que, con la metodología de optimización implementada, al adicionar disipadores de energía al pórtico no necesariamente aumenta el peso de la estructura, esto se debe a que al instalar dispositivos de control de este tipo se disminuyen los desplazamientos y con perfiles de menor sección se cumplen derivas. Lo cual trae como resultado una estructura protegida con dispositivos de control tipo TADAS con una reducción del peso total en un 13%.

**Tabla 6.** Resultados proceso de optimización con y sin Tadas

<b>5 PISOS (Sismo Loma Prieta)</b>			
Variables		Sin Tadas	Con tadas
Columna	Piso 1	ID 24	ID 19
	Piso 2	ID 23	ID 19
	Piso 3	ID 20	ID 19
	Piso 4	ID 20	ID 18
	Piso 5	ID 20	ID 15
Viga	Piso 1	ID 14	ID 8
	Piso 2	ID 14	ID 7
	Piso 3	ID 8	ID 5
	Piso 4	ID 3	ID 3
	Piso 5	ID 3	ID 3
Tadas	Ubicación	N/A	Piso 2
Brazos	tipo	N/A	ID 2
Peso total (t)		3.38	2.92

*7.3.4 Resultados del proceso de optimización para el ejemplo 3.* El proceso de optimización para el pórtico de 8 pisos se llevó a cabo de la misma manera que para los ejemplos anteriores, lo que demuestra la versatilidad y la capacidad de adaptación del algoritmo genético, ya que al modificar los parámetros de entrada este sigue trabajando para encontrar el grupo de mejores soluciones, también es importante mencionar que la mejor solución obtenida para cada pórtico cumple todas las restricciones especificadas en la sección de formulación estándar del problema de optimización. En la tabla 7 se presentan los resultados correspondientes al 3er ejemplo numérico (8 pisos), donde se obtuvo un peso total de 5.73 t. para la estructura sometida a la señal sísmica de El centro y de Mammoth y un peso total de 6.11 t. para el pórtico bajo la carga sísmica de Loma Prieta.

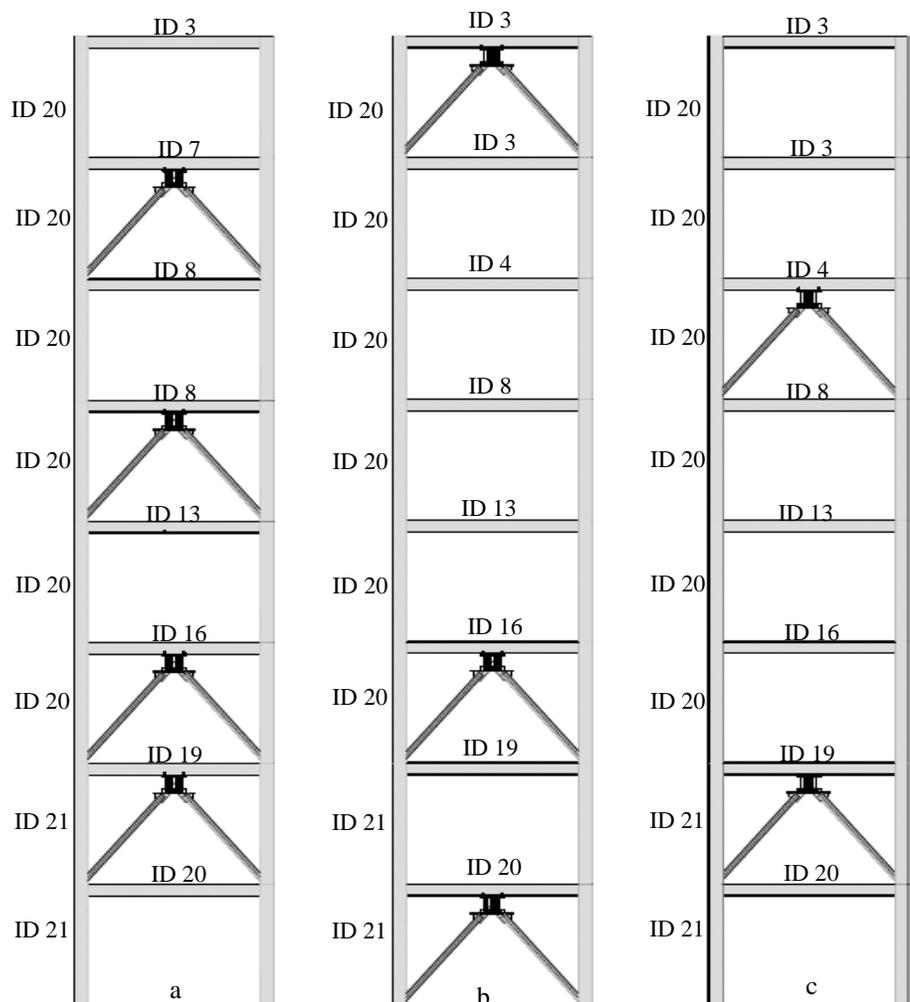
En la figura 11 se muestran las tres mejores configuraciones bajo la señal sísmica de El Centro, donde se obtuvo una reducción de peso entre la primera y la última solución del 10%, tomando en cuenta que el algoritmo no llegó a la convergencia por falta de número de generaciones (Ver sección 7.4).

La mejor configuración (c), resultó con columnas en los primeros dos pisos de ID 21, en los siguientes pisos (del 3ero al 8vo piso) de ID 20; la viga del primer piso es de ID 20, para el piso siguiente de ID 19, la del tercer piso de ID 16, cuarto piso ID 13, seguida de viga de ID 8, ID 4 para el sexto piso y finalmente ID 3 para los últimos dos pisos, con un total de dos disipadores ubicados en el segundo y sexto piso sostenidos por brazos de ID 2 (Ver figura 11).

**Tabla 7.** Resultados proceso de optimización para el ejemplo 3

<b>8 PISOS</b>				
Variables		El centro	Loma prieta	Mammoth
Columna	Piso 1	ID 21	ID 28	ID 21
	Piso 2	ID 21	ID 25	ID 21
	Piso 3	ID 20	ID 21	ID 20
	Piso 4	ID 20	ID 21	ID 20
	Piso 5	ID 20	ID 21	ID 20
	Piso 6	ID 20	ID 20	ID 20
	Piso 7	ID 20	ID 20	ID 20
	Piso 8	ID 20	ID 20	ID 20
Viga	Piso 1	ID 20	ID 18	ID 20
	Piso 2	ID 19	ID 14	ID 19
	Piso 3	ID 16	ID 14	ID 16
	Piso 4	ID 13	ID 13	ID 13
	Piso 5	ID 8	ID 3	ID 8
	Piso 6	ID 4	ID 3	ID 4
	Piso 7	ID 3	ID 3	ID 3
	Piso 8	ID 3	ID 3	ID 3
Tadas	Ubicación	Pisos 2 y 6	Pisos 2 y 4	Pisos 2 y 6
Brazos	Tipo	ID 2	ID 2	ID 2
Peso total (t)		5.73	6.11	5.73

Es importante acotar que la diferencia de peso total de los pórticos entre la implementación de una señal sísmica u otra puede deberse a su contenido frecuencial y a la diferencia en aceleración máxima. Sin embargo, los resultados obtenidos en los tres ejemplos (pórtico de 2, 5 y 8 pisos) demuestran que el cambio de señal sísmica no hace que el algoritmo falle, sino que se afirma la robustez del algoritmo al lograr altos niveles de adaptación.



**Figura 11.** Configuración de las 3 mejores soluciones para el sismo El centro

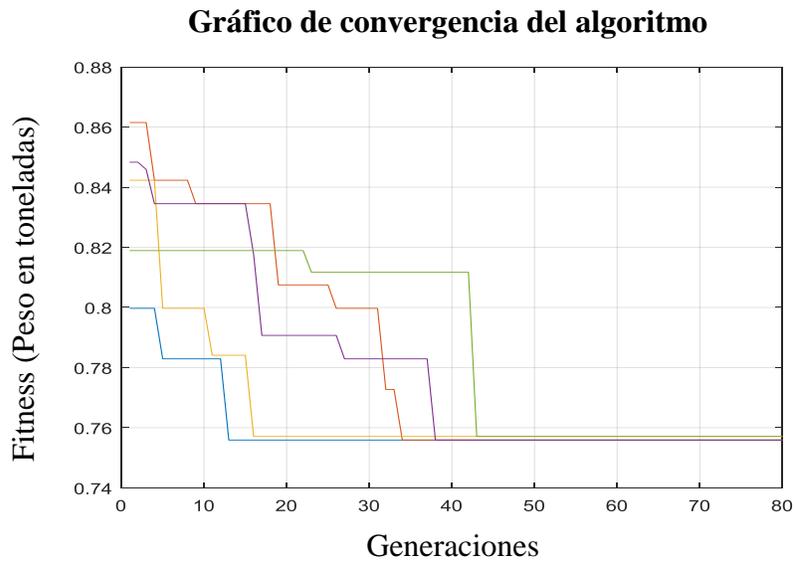
#### 7.4 Análisis del proceso de convergencia de las ejecuciones para los 3 ejemplos numéricos

En las gráficas de convergencia presentadas (Ver figuras 12, 13 y 14) se puede constatar el buen funcionamiento del algoritmo ya que la configuración del pórtico 1 (peso total) va disminuyendo con el paso de las generaciones y de esta manera se comprueba a su vez que la implementación de la técnica de elitismo permitió que el algoritmo conservara a los mejores individuos para las generaciones siguientes. En la figura 12 se observa que aproximadamente en la generación número 43 las cinco ejecuciones convergen en un peso de 0.75 t. para el pórtico de dos pisos bajo la señal el centro.

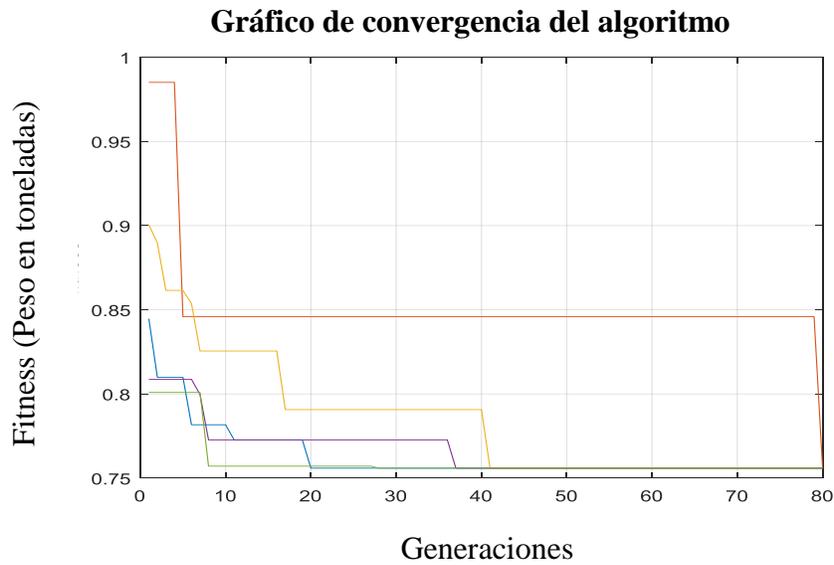
La convergencia en un mismo peso confirma el buen funcionamiento y la robustez del algoritmo genético binario con la modificación de código redundante implícito, en segundo lugar este resultado indica que el número máximo de generaciones fue suficiente para alcanzar una buena solución.

---

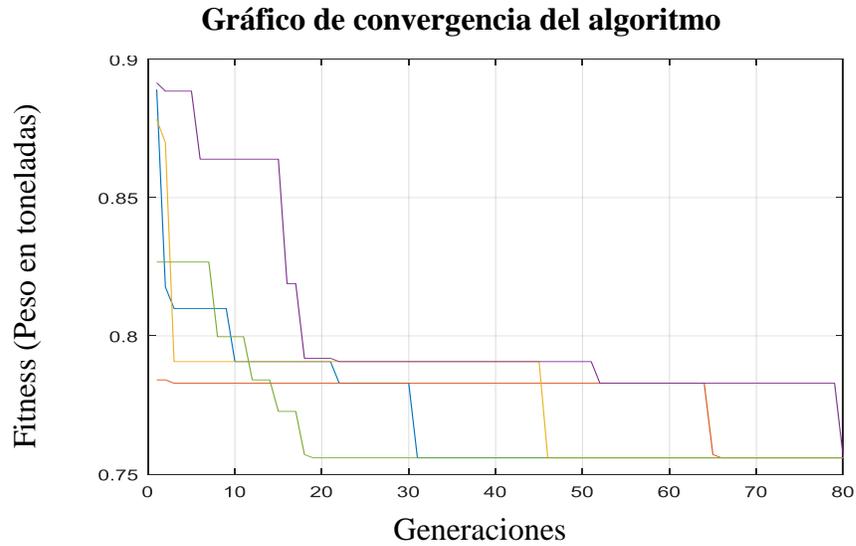
La configuración obtenida para el pórtico de dos pisos respondió perfectamente para los tres sismos, lo que demuestra que el algoritmo se adapta al problema de manera satisfactoria.



**Figura 12.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 1 (El Centro)

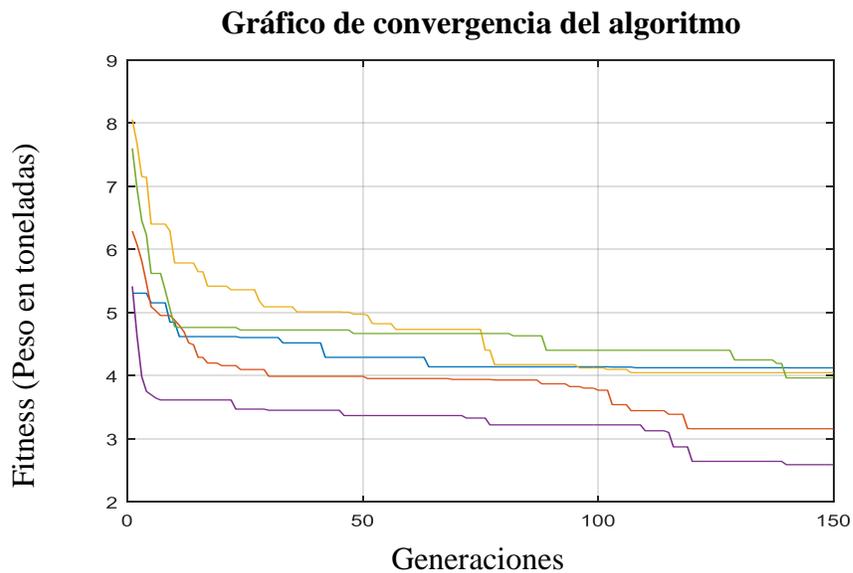


**Figura 13.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 1 (Loma Prieta)

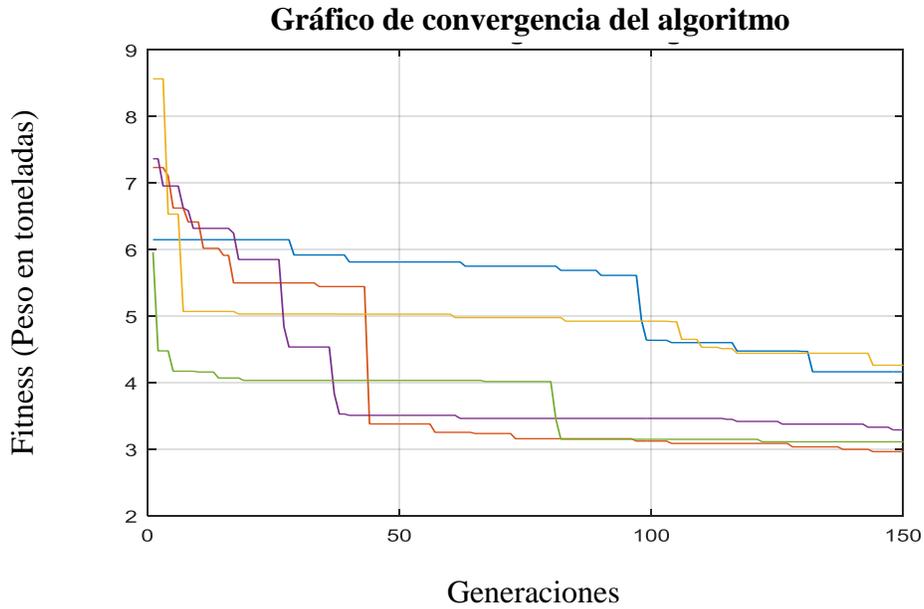


**Figura 14.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 1 (Mammoth)

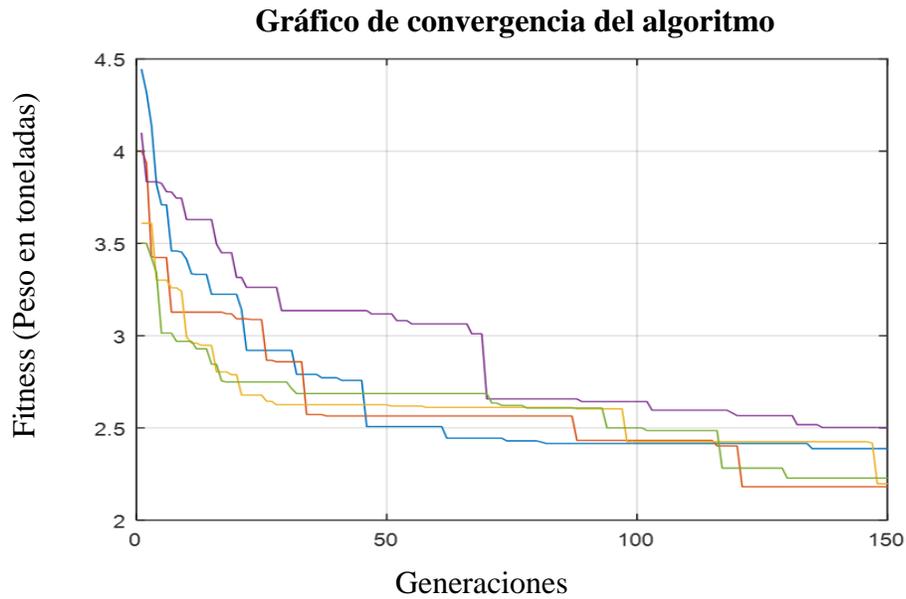
En las figuras 15, 16 y 17 se presentan los resultados para cada ejecución realizada (5 ejecuciones en total), donde se observa que los resultados obtenidos (pesos por configuración de pórtico), tienen una brecha significativa, esto quiere decir que para este caso (pórtico de 5 pisos) se debe aumentar el número de generaciones.



**Figura 15.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 2 (El Centro)

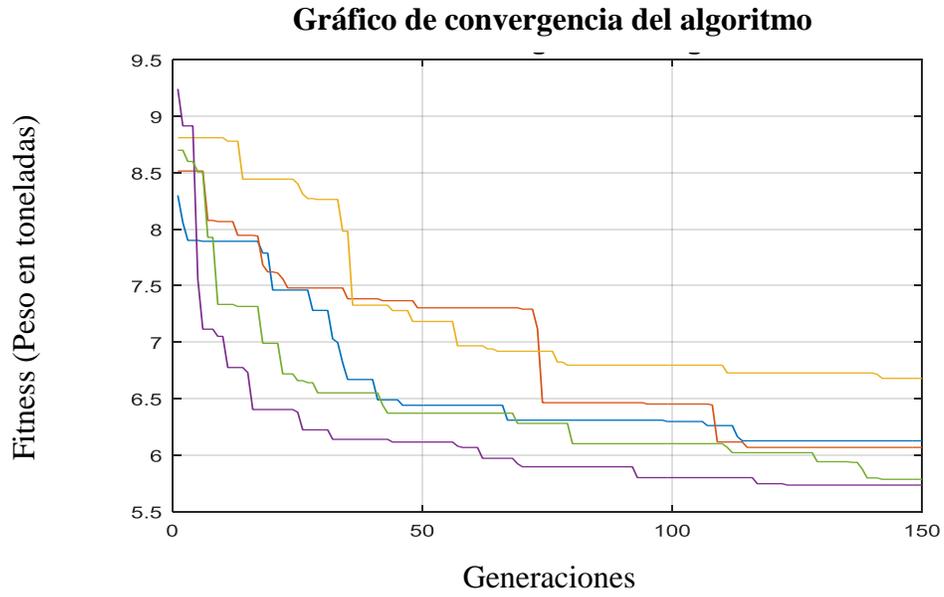


**Figura 16.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 2 (Loma prieta)

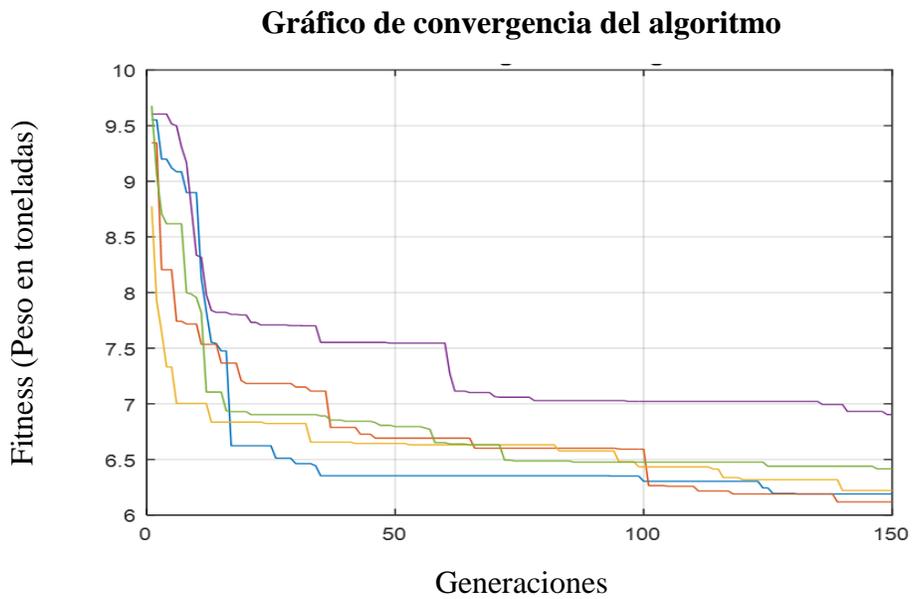


**Figura 17.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 2 (Mammoth)

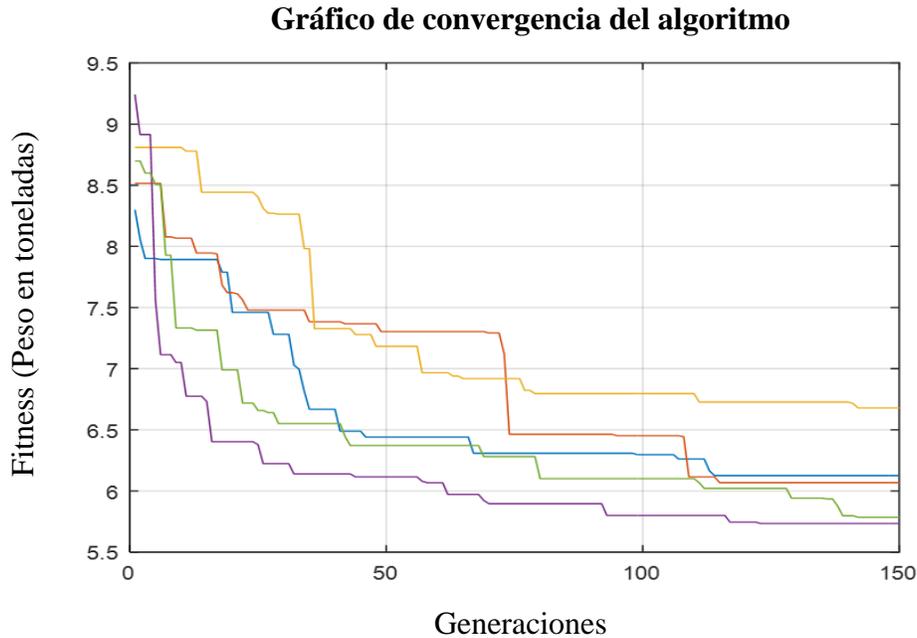
De igual forma, en las figuras 18, 19 y 20 se presentan los resultados para cada ejecución realizada, donde se observa que los resultados obtenidos (pesos por configuración de pórtico), tienen una brecha significativa, esto quiere decir que para este caso (pórtico de 8 pisos) se debe aumentar el número de generaciones.



**Figura 18.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 3 (El centro)



**Figura 19.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 3 (Loma prieta)



**Figura 20.** Convergencia del algoritmo para el ejemplo numérico 3 (Mammoth)

### 7.5 Costo computacional

El costo computacional fue evaluado para cada uno de los pórticos sometidos a las diferentes señales sísmicas haciendo uso de una Dell Tower 5810 con procesador Intel (R) Xeon (R) CPU E5- 1650 v3 @ 3.50 GHz, memoria RAM de 32 GB y sistema operativo de 64 bits, notando así que el aumento del costo computacional depende directamente de ciertos factores como lo son: número de pasos para el análisis sísmico, número de elementos que tenga el pórtico, tipo de análisis (lineal o no lineal), tamaño de la población, número máximo de generaciones, entre otras.

**Tabla 8.** Resultados medición del costo computacional

<b>COSTO COMPUTACIONAL</b>			
Sismo	Pórtico 1	Pórtico 2	Pórtico 3
El centro	8925 seg	39766 seg	40966 seg
Loma prieta	8801 seg	39055 seg	40508 seg
Mammoth	8466 seg	40858 seg	40956 seg

### 7.6 Análisis del tamaño de la población en los resultados

En la tabla 9 se muestra la influencia del tamaño de la población en los resultados, lo cual indica que con un tamaño de población muy pequeño se corre el riesgo de no abarcar todo el espacio de

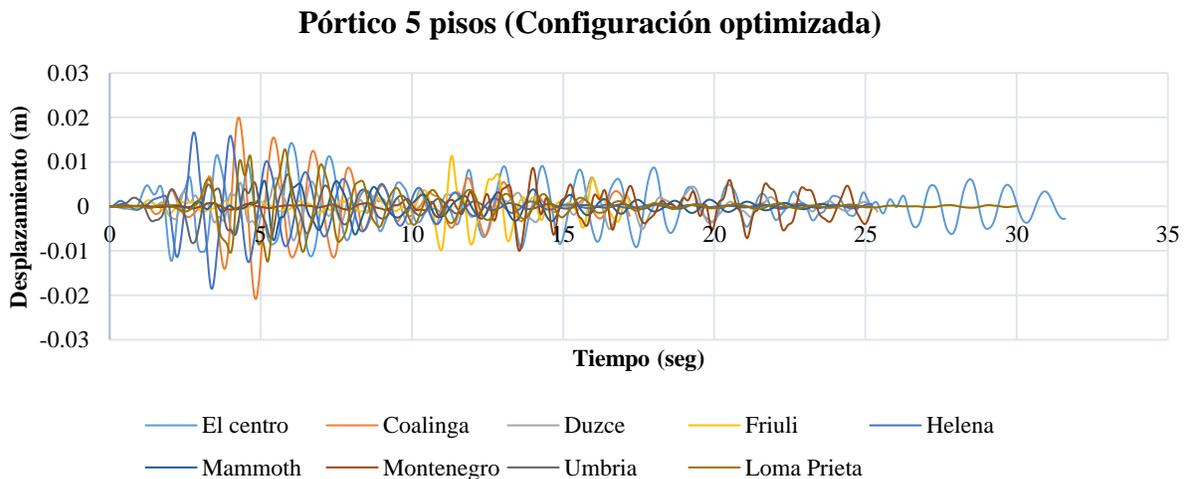
búsqueda y por el contrario, con un tamaño de población demasiado grande el costo computacional se elevaría demasiado.

**Tabla 9.** Efectos del tamaño de la población en los resultados

5 PISOS (Variación Tamaño de la población)						
Variables		TP=10	TP=20	TP=30	TP=40	TP=50
Columna 1	Piso 1	41	33	18	21	19
	Piso 2	26	16	15	21	19
	Piso 3	19	15	15	19	19
	Piso 4	18	15	15	19	18
	Piso 5	16	15	15	16	15
Viga 1	Piso 1	19	13	11	11	8
	Piso 2	19	11	8	11	7
	Piso 3	5	6	5	8	5
	Piso 4	2	3	3	4	3
	Piso 5	2	2	3	3	3
Tadas	Ubicación	Piso 2	Piso 2	Piso 5 y 3	Piso 2	Piso 2
Peso total (t)		3.13	3.10	3	2.96	2.92

### 7.7 Análisis del resultado del pórtico de 5 pisos optimizado bajo diferentes señales sísmicas

Con el objetivo de verificar la respuesta en cuando a desplazamiento vs. tiempo, se analizó el resultado de la configuración para el pórtico de 5 pisos bajo nueve señales sísmicas.



**Figura 21.** Pórtico de 5 pisos bajo 9 señales sísmicas distintas

---

En la figura 21 se observa que la configuración resultante para el pórtico de 5 pisos bajo la señal sísmica de Coalinga, arroja un desplazamiento mayor en comparación con las señales utilizadas en la sección de ejemplos numéricos (El centro, Mammoth y Loma Prieta). Esto quiere decir que para obtener mejores resultados en la implementación de la metodología propuesta es recomendable hacer uso de un mayor número de señales sísmicas.

## 8. CONCLUSIONES

En la presente investigación se propuso una metodología de optimización estructurada y no estructurada basada en algoritmos genéticos de codificación binaria, la cual presentó ventajas de mecanismo adaptativo, ya que los resultados obtenidos para los tres ejemplos (pórtico de 2, 5 y 8 pisos) indican que el cambio de la señal sísmica y el aumento en el número de elementos (vigas y columnas) no hace que el algoritmo falle, sino que se afirma la robustez del algoritmo al lograr altos niveles de adaptación.

En lo que se refiere a la eficiencia de los disipadores de energía tipo TADAS, los resultados obtenidos demuestran que la protección de estructuras con dispositivos de control pasivos, pueden reducir los desplazamientos de entrepisos hasta en un 82%, este porcentaje de reducción puede disminuir o aumentar según la localización y la cantidad de disipadores de energía en el pórtico.

Con respecto a los parámetros genéticos, específicamente el tamaño de la población, tasa de mutación, tasa de reproducción y número máximo de generaciones, se demostró que influyen directamente en los resultados obtenidos y en el proceso de convergencia del algoritmo, estos parámetros deben ser modificados según sea el problema a solucionar. Lo que implica que se requiere de un ensayo y error para hallar los parámetros que mejor se adecúen a la problemática en estudio, debido a que cuando el tamaño de la población es muy pequeña trae como consecuencia un bajo desempeño del algoritmo el cual no abarcaría todo el espacio de soluciones y esto puede ocasionar una convergencia temprana a un óptimo local. Por otro lado, entre mayor sea la relación que define la tasa de reproducción mayor probabilidad habrá de que se añadan nuevos individuos a la población, lo que es beneficioso para el proceso evolutivo, pero si esta tasa es demasiado alta se corre el riesgo de que las mejores soluciones sean desechadas antes de que se produzcan mejoras. Para el caso de tasa de mutación es distinto, debido a que una tasa de mutación baja ayuda a la posibilidad de variación de un bit del cromosoma (lo que añade diversidad a la población), por el contrario una tasa de mutación muy alta puede significar que el individuo no se somete a cambios después de la reproducción. De igual forma la definición de un número de generaciones acertado ayuda a la convergencia del algoritmo a un solo valor, esto implica que el número de generaciones va aumentando proporcionalmente a la complejidad del problema (al número de variables a determinar), ya que se pudo observar que para los pórticos de 5 y 8 pisos es necesario incrementar el número de generaciones para llegar a la convergencia.

Sin embargo, el aumento excesivo del número de generaciones trae como consecuencia un elevado costo computacional, lo que causa inconvenientes en este tipo de estudios, debido a que el aumento

---

del tamaño de la estructura (más elementos) aumenta el tiempo para cada ejecución, así como también el número de pasos para el análisis sísmico; el tipo de análisis (lineal o no lineal) y el tamaño de la población son factores que intervienen directamente en el tiempo computacional final. Dicho esto, se recomienda realizar un buen proceso de ensayo y error que permita establecer los parámetros adecuados y así disminuir la posibilidad de gastos computacionales excesivos.

Por medio de esta investigación se demostró que no en todos los casos la mayor cantidad de disipadores de energía en una estructura la hace más eficiente ante un evento sísmico, de la misma forma la presencia de dispositivos de control no significa un peso más elevado de la estructura. Por lo cual es importante resaltar que con la implementación de una metodología de optimización basada en algoritmos genéticos se puede obtener la cantidad y localización de disipadores metálicos en la estructura de manera que se mejore su desempeño ante un sismo de alta magnitud, disminuyendo así los daños post sismo y obteniendo a su vez estructura sostenible de pesos razonables. Esta disminución de peso en la estructura es posible debido que al instalar dispositivos de control de este tipo se disminuyen los desplazamientos y con perfiles de menor sección se cumplen derivas.

## 9. REFERENCIAS

- Aguiar, R., Rodriguez, M., & Mora, D. (2016). *Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energia tipo ADAS y TADAS*. Monograia CIMME IS-75.
- Alehashem, S., Keyhani, A., & Pourmohammad, H. (2008). *Behavior and performance of structures equipped with ADAS y TADAS damper*. Beijing: World conference on earthquake engineering.
- Asari, T., Midorikawa, M., & Oviedo, J. (2010). *Earthquake response of ten-story-drift- controlled reinforced concrete frames with hysteretic dampers*. Engineering structures 32: 1735-1746.
- Aydin, E. (2012). *Optimal damper placement based on base moment in steel building frames*. Turkia: Journal of constructional steel 79: 216-225.
- Bisht, Y., & Setia, S. (2014). *Seismic behaviour of a soft storey building with and without viscous dampers*. Haryana, India: International journal of engineering research and applications ISSN: 2248-9622.
- Curadelli, O., & Martinez, C. (2014). *Optimal placement of nonlinear hysteretic dampers on planar structures under seismic excitation*. Engineering Structures 65: 89-98.
- Duque, M., & Oviedo, J. (2009). *Disipadores histeréticos metalicos como técnica de control de respuesta sismica en edificaciones colombianas*. Medellin: Revista EIA, ISSN 1794-1237 12:113-124.
- Ji-ting, Q., & Li, H. n. (2012). *Optimal placement of passive energy dissipation devices by genetic algorithms*. Mathematical problems in engineering. Volumen 2012: 21 pages.
- Laier, J., & Villalba, J. (2010). *Detección de daño estructural por algoritmos genéticos: una comparación de diferentes tipos de codificación de individuos*. Sao Paulo: Ingeniería y desarrollo, 27: 169-189.

- 
- Lapadula, V. (2014). *Estudio comparativo sobre la aplicacion de los algoritmos PSO Y SQP en la optimizacion de porticos planos de concreto armado*. Bogota D.C.
- Pimiento, J., Ruiz, D., & Salas, A. (2014). *Desempeño sisimico de un portico con disipadores de energia pasivos de placas ranuradas de acero*. Bogota: RIC Vol 29, nro 3: 283-298.
- Raich, A., & Jamshid, G. (1998). *Implicit representation in genetic algorithms using redundancy*. Evolutionary computation. Volumen 5, Numero 3: 277-302.
- Saka, M. P., Hasancebi, O., & Geem, Z. (2016). *Metaheuristics in structural optimization and discusions on harmony search algorithm*. Swarm and evolutionary computation. Volumen 28: 88-97.
- Sanchez, S. (2012). *Optimizaci3n estructural y top3logica de estructuras morfol3gicamente no definidas mediante algoritmos gen3ticos*. Valencia: Universitat Politecnica de Valencia.
- Singh, M., & Moreschi, L. (2002). *Optimal placement of dampers for passive response control*. Virginia: Earthquake engineering and structural dynamics. 31:955-976.
- Tovar, C., & L3pez, O. (2004). *Effect of the position and number of dampers on the seismic response of frame structures*. Vancouver: 13 th. World Conference on Earthquake Engineering. Paper No. 1044.
- Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., & Su, Y.-F. (1993). *Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction*. Resistant Construction. Earthquake Spectra: August 1993, Vol. 9, No. 3, pp. 505-528.
- Yousefzadeh, A., Sebt, M., & Tehranizadeh, M. (2011). *The optimal TADAS damper placement in moment resisting steel structures based on cost-benefit analysis*. International journal of civil engineering, Vol. 9.