

**EMPLEO DE AMORTIGUADORES VISCOSOS PARA LA REHABILITACIÓN
SÍSMICA EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO TIPO PÓRTICO**

**JULIAN RICARDO GALVIS DIAZ
JHON JAVIER MARIN VARGAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**EMPLEO DE AMORTIGUADORES VISCOSOS PARA LA REHABILITACIÓN
SÍSMICA EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO TIPO PÓRTICO**

JULIAN RICARDO GALVIS DIAZ

JHON JAVIER MARIN VARGAS

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

DIRECTOR:

OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO

PHD. INGENIERÍA CIVIL

CODIRECTOR:

JESUS DANIEL VILLALBA

PHD. INGENIERÍA CIVIL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO – MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado se lo dedico principalmente a mi esposa Andrea Alejandra Torres, a quien jure frente a Dios y al Estado ser fiel en las alegrías y penas, en la salud y en la enfermedad, y así, amarla y respetarla todos los días de mi vida hasta la eternidad.

Ella es la fuerza incondicional que me apoya en cada segundo de mi vida, quien hace de mi un mejor hombre, que se esfuerza a diario para ser un ingeniero civil y programador integral, que a partir del conocimiento y de la ética aprendida de mi alma mater para poner todo mi saber a disposición de la construcción de una sociedad ejemplar.

Se lo dedico a Dios y al universo por brindarme vida y sabiduría a cada microsegundo de mi existencia.

Va dirigido a mi abuelo José Galvis Q.E.P.D quien fue como un padre para mi durante toda mi vida y a quien prometí antes de su muerte que dejaría el apellido Galvis muy alto. Va dirigido a mi abuela Angela Diaz quien ha sido un apoyo sumamente importante en mi vida y principalmente en mi etapa universitaria por todo lo que ha hecho por mi incondicionalmente. Va dirigido a mis tías Patricia Galvis y Adriana Galvis quienes han estado pendientes de mi económicamente hablando, garantizando que no me haga falta ninguna de mis necesidades básicas. Va dirigido al director de tesis Oscar Begambre quien siempre ha sido para mí un modelo de sabiduría y quien me ha motivado a ser mejor ingeniero civil y programador de lo que puedo ser cada día, quien confió en mi desde el primer día que empezamos a trabajar y ha estado pendiente en todo este proceso de guiarme adecuadamente. Agradezco al codirector, el profesor Jesús Villalba quien me brindó la oportunidad de trabajar en la Universidad Javeriana y brindarme todos sus conocimientos para realizar de la mejor manera este trabajo de grado, siendo un consejero y guía en todo momento. Por último y no menos importante, agradezco a mi compañero de tesis Jhon Marín por dar su mejor esfuerzo en todas las etapas del trabajo de grado.

Julián Ricardo Galvis Díaz

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Cada una de las personas que he conocido a lo largo de mi vida me han llevado a ser la persona que soy hoy; me han aportado una pequeña contribución, que junto a mis propias experiencias hoy me hacen el ingeniero que desde hace casi una década he soñado con ser.

Este trabajo es fruto de semestres de dedicación. Semestres en los cuales mi madre, Ana, se levantó sin pensarlo todas las madrugadas a preparar mi desayuno y darme lo necesario para ir día a día a aprender; semestres en los que mi padre, Javier, se interesó por mí y tomó una silla cada fin de semana para preguntarme lo que había aprendido y enseñarme lo que sabe; semestres en los que mi hermana, Dayanna, me regaló lindos dibujos en esos días en que la frustración nublabla mi cabeza. Además, todos estos años he contado con la compañía de Paola, una mujer excepcional, capaz de brindarme su tiempo y comprensión para escuchar todas las cosas que necesité contarle a alguien para sentirme en paz, una mujer tan importante en mi vida que cumplió mi gran sueño; Isabella, todos mis triunfos siempre serán por y para ti.

Aunque muchas cosas no se le atribuyen, el azar me ha rodeado de lo más maravilloso: padres ejemplares, que luchan día a día para que sus hijos sean buenas personas; una hermana, particularmente motivadora, que me logra sacar una sonrisa en situaciones muy adversas; una novia que solo se puede describir con la palabra Bendición, y que me ha brindado mi propia familia.

Por su compañía es este logro, a ellos se los debo.

Jhon Javier Marín Vargas

CONTENIDO

	PAG.
INTRODUCCION	22
1. AMORTIGUADOR DE FLUIDO VISCOSO – AVF	24
2. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	27
2.1. UNIFIED PSO - UPSO	28
3. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN	30
3.1. FORMULACION ESTANDAR DE OPTIMIZACION	30
3.2. ALGORITMO POSICION AMORTIGUADORES	30
3.3. CONFIGURACION DEL ALGORITMO UPSO	31
3.4. ANALISIS ESTRUCTURAL	33
4. EJEMPLOS ANALITICOS	34
4.1. PRIMER EJEMPLO	34
4.2. SEGUNDO EJEMPLO	35

4.3. TERCER EJEMPLO	36
4.4. ANALISIS DE RESULTADOS	37
4.5. ANALISIS DEL EFECTO DEL SISMO	38
5. EJEMPLO DE APLICACIÓN	40
6. CONCLUSIONES	47
7. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS	49
CITAS BIBLIOGRAFICAS	50
BIBLIOGRAFIA	51
ANEXOS	53

LISTA DE FIGURAS

	PAG.
Figura 1. Componentes de un amortiguador viscoso fluido.	25
Figura 2. Configuraciones geométricas para la instalación de amortiguadores viscosos fluidos.	25
Figura 3. Diagrama de flujo para la localización óptima de AVF.	32
Figura 4. Configuración de amortiguadores en cada partícula.	33
Figura 5. Estructura del ejemplo 1.	35
Figura 6. Estructura del ejemplo 2	36
Figura 7. Estructura del ejemplo 3	37
Figura 8. Efecto de la cantidad de partículas en la reducción de la deriva.	38
Figura 9. Deriva para cada sismo.	39
Figura 10. Detalle de placa aligerada del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.	40
Figura 11. Vista 3D de la estructura del Centro de Salud	41

Figura 12. Planos generales del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.	43
Figura 13. Distribución óptima de los amortiguadores en los pórticos del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.	44
Figura 14. Modelo 3D de la estructura con distribución óptima de amortiguadores del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.	45
Figura 15. Comparación de desplazamientos nodales software OpenSees y Sap2000	46
Figura 16. Convergencia de la deriva - Ejemplo 1.	54
Figura 17. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 1 amortiguador - Ejemplo 1.	54
Figura 18. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 2 amortiguadores - Ejemplo 1.	55
Figura 19. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 3 amortiguadores - Ejemplo 1.	55
Figura 20. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 4 amortiguadores - Ejemplo 1.	56
Figura 21. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 5 amortiguadores - Ejemplo 1.	56

Figura 22. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 6 amortiguadores - Ejemplo 1.	57
Figura 23. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 7 amortiguadores - Ejemplo 1.	57
Figura 24. Configuración 1 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.	58
Figura 25. Configuración 2 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.	59
Figura 26. Configuración 3 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.	59
Figura 27. Configuración 4 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.	60
Figura 28. Configuración 5 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.	60
Figura 29. Configuración 6 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.	61
Figura 30. Configuración 7 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.	61
Figura 31. Configuración 8 de la estructura del ejemplo 1	62

con 6 amortiguadores.

Figura 32. Configuración 9 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores. 62

Figura 33. Configuración 10 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores. 63

Figura 34. Factor UBest vs iteración con 2 amortiguadores – Ejemplo 1. 64

Figura 35. Factor UBest vs iteración con 7 amortiguadores – Ejemplo 1. 64

Figura 36. Factor UMed vs iteración con 2 amortiguadores – Ejemplo 1. 65

Figura 37. Factor UMed vs iteración con 7 amortiguadores – Ejemplo 1. 65

Figura 38. Convergencia de la deriva - Ejemplo 2. 67

Figura 39. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 1 amortiguador - Ejemplo 2 67

Figura 40. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 2 amortiguadores - Ejemplo 2 68

Figura 41. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 3 amortiguadores - Ejemplo 2	68
Figura 42. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 4 amortiguadores - Ejemplo 2	69
Figura 43. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 5 amortiguadores - Ejemplo 2	69
Figura 44. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 6 amortiguadores - Ejemplo 2	70
Figura 45. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 6 amortiguadores - Ejemplo 2	70
Figura 46. Factor UBest vs iteración con 2 amortiguadores – Ejemplo 2.	71
Figura 47. Factor UBest vs iteración con 6 amortiguadores – Ejemplo 2.	71
Figura 48. Factor UMed vs iteración con 2 amortiguadores – Ejemplo 2.	72
Figura 49. Factor UMed vs iteración con 6 amortiguadores – Ejemplo 2.	72
Figura 50. Convergencia de la deriva - Ejemplo 3	74

Figura 51. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 1 amortiguador - Ejemplo 3	74
Figura 52. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 2 amortiguadores - Ejemplo 3	75
Figura 53. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 3 amortiguadores - Ejemplo 3	75
Figura 54. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 4 amortiguadores - Ejemplo 3	76
Figura 55. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 5 amortiguadores - Ejemplo 3	76
Figura 56. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 6 amortiguadores - Ejemplo 3	77
Figura 57. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 7 amortiguadores - Ejemplo 3	77
Figura 58. Factor UBest vs iteración con 3 amortiguadores – Ejemplo 3.	78
Figura 59. Factor UBest vs iteración con 5 amortiguadores – Ejemplo 3.	78
Figura 60. Factor UMed vs iteración con	79

3 amortiguadores – Ejemplo 3.

Figura 61. Factor UMed vs iteración con 5 amortiguadores – Ejemplo 3.	79
Figura 62. Efecto de las partículas en la reducción de la deriva	82
Figura 63. Deriva vs iteración para 10 partículas.	83
Figura 64. Deriva vs iteración para 20 partículas.	83
Figura 65. Deriva vs iteración para 30 partículas.	84
Figura 66. Deriva vs iteración para 40 partículas.	84
Figura 67. Deriva vs iteración para 50 partículas.	85
Figura 68. Comparación Deriva – Iteración para cada sismo del estudio de microzonificación	87
Figura 69. Configuraciones estructurales para las 3 ejecuciones en cada sismo de microzonificación sísmica – Parte 1.	89
Figura 70. Configuraciones estructurales para las 3 ejecuciones en cada sismo de microzonificación sísmica – Parte 2.	90

LISTA DE TABLAS

	PAG.
Tabla 1. Cargas del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.	42
Tabla 2. Derivas sin amortiguadores del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.	42
Tabla 3. Derivas después del proceso de optimización del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.	46
Tabla 4. Aumento del espacio de búsqueda para diferente cantidad de amortiguadores para el ejemplo 1.	53
Tabla 5. Deriva obtenida en casos 1-10 para el ejemplo 1.	63
Tabla 6. Aumento del espacio de búsqueda para diferente cantidad de amortiguadores para el ejemplo 2.	66
Tabla 7. Aumento del espacio de búsqueda para diferente cantidad de amortiguadores para el ejemplo 3.	73
Tabla 8. Tiempos de ejecución para el ejemplo 1	81
Tabla 9. Tiempos de ejecución para el ejemplo 2	81
Tabla 10. Tiempos de ejecución para el ejemplo 3	81

Tabla 11. Derivas para cada sismo de la microzonificación después de la optimización. 87

Tabla 12. Licencias 91

LISTA DE ANEXOS

	PAG.
ANEXO A. ANALISIS PRIMER EJEMPLO NUMERICO	53
ANEXO B. ANÁLISIS SEGUNDO EJEMPLO NUMÉRICO	66
ANEXO C. ANALISIS TERCER EJEMPLO NUMERICO	73
ANEXO D. ANALISIS DEL EFECTO DE LAS PARTICULAS	82
ANEXO E. ANALISIS DEL EFECTO DEL SISMO	86
ANEXO F. LICENCIAS	91

RESUMEN

TITULO: EMPLEO DE AMORTIGUADORES VISCOSOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO TIPO PÓRTICO*

AUTORES: JULIAN RICARDO GALVIS DIAZ
JHON JAVIER MARIN VARGAS**

PALABRAS CLAVE: REHABILITACION ESTRUCTURAL, PSO, ALGORITMO DE OPTIMIZACION

DESCRIPCION:

La ciudad de Bucaramanga presenta una actividad sísmica alta debido a su cercanía con el segundo nido sísmico más activo en el mundo, ubicado en la mesa de los santos. Esto, sumado a las fallas Bucaramanga-Santa Marta y Frontal de los Llanos Orientales, hace que las estructuras emplazadas en esta ciudad se vean expuestas a una alta amenaza sísmica. Una gran cantidad de las estructuras que actualmente conforman la ciudad fueron construidas mucho antes de que en Colombia existiese una norma de construcción sismo resistente. Por esta razón, estas estructuras generalmente no satisfacen los requerimientos actuales y necesitan una rehabilitación estructural. En este estudio se propone una estrategia de rehabilitación mediante la localización óptima de amortiguadores viscosos en estructuras aporricadas de concreto reforzado. La optimización se da mediante la integración del algoritmo PSO con rutinas de cálculo de la respuesta estructural. En este contexto, el parámetro a optimizar es la deriva de entrepiso. Se presenta un análisis de la calidad de la respuesta y del PSO (particle swarm optimization algorithm) mediante 3 ejemplos numéricos. Posteriormente, y con base a los resultados de los ejemplos presentados, se realiza el proceso de optimización en una estructura clasificada como indispensable según la NSR-10.

*TRABAJO DE GRADO

**FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS. ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL. DIRECTOR:
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO, INGENIERO CIVIL

ABSTRACT

TITLE: USE OF VISCOUS SHOCK ABSORBERS FOR SEISMIC REHABILITATION IN STRUCTURES OF REINFORCED CONCRETE TYPE PORTICO *

AUTHORS: JULIAN RICARDO GALVIS DIAZ
JHON JAVIER MARIN VARGAS**

KEYWORDS: SEISMIC RETROFIT, PSO, OPTIMIZATION ALGOTITHM

DESCRIPTION:

Bucaramanga presents a high seismic activity due to its proximity to the second most active seismic nest in the world, located in La Mesa de los Santos. This, together with the Bucaramanga-Santa Marta and Frontal del Llanos Orientales faults, exposes the structures located in this city to a high seismic threat. A large number of the structures in the city were built long before Colombia was able to regulate a construction-resistant earthquake regulation, so these structures design do not meet the necessary requirements and need structural rehabilitation. This study proposes a rehabilitation strategy through the optimal allocation of viscous dampers in concrete-reinforced framed structures. The optimization is given through the integration of the particle swarm optimization algorithm PSO and structural response software. In that context, the parameter to optimize is the drift. The quality of the structural response and the PSO performance is assessed through 3 numerical examples. Based on the results, the optimization process is performed in a structure classified as indispensable according to the NSR-10.

*BACHELOR THESIS

**FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS. ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL. DIRECTOR:
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO, INGENIERO CIVIL.

INTRODUCCIÓN

El papel principal del ingeniero estructural, según la norma colombiana NSR10, es realizar un diseño que asegure que una edificación no sufra daños estructurales ante sismos de moderada intensidad o que para un sismo de alta intensidad se sufran daños estructurales sin llegar al colapso. Siendo así, es importante considerar que con posterioridad a un sismo la edificación puede llegar a perder parte de su capacidad de disipación de energía y se hace necesario intervenirla con la finalidad de otorgarle las condiciones para resistir las futuras acciones sísmicas. En este contexto, la rehabilitación sísmica es un tema en el cual la industria de la construcción colombiana tiene un gran reto teniendo en cuenta que el reglamento colombiano no cuenta con un apartado especial para la rehabilitación sísmica [1].

La aplicación de sistemas pasivos de disipación de energía en la ingeniería sísmica ha demostrado ser una herramienta útil ya que permite realizar el control de la respuesta estructural. Estos sistemas se usaron inicialmente para controlar vibraciones causadas por el viento en edificios de gran altura. Con el pasar de los años se encontró que su aporte en la respuesta sísmica era considerablemente valioso. Desde entonces, una gran cantidad de estudios se han llevado a cabo para validar su contribución en la reducción de la demanda sísmica de la estructura [1]. En la actualidad se ofrece en el mercado una amplia variedad de elementos de disipación pasiva de energía. Se sabe que esta es una alternativa viable económicamente en comparación con propuestas más invasivas (considerando su mínima intervención para ser instalado en la edificación). En este sentido, el desempeño del sistema de control pasivo (basado en amortiguadores de fluido viscoso - AVF) puede ser optimizado definiendo el número y la ubicación de los dispositivos a ser usados de tal forma que su distribución espacial maximice la capacidad de disipación del conjunto.

La tarea de encontrar la mejor ubicación posible para un grupo de AVF es comúnmente realizada con el método de prueba y error, es decir, el ingeniero, a partir de su experiencia y de algunas iteraciones, decide dónde ubicarlos. Sin embargo, esta solución puede tender a ubicar los amortiguadores en las mismas posiciones, puesto que el diseñador no puede realizar gran cantidad de iteraciones y, generalmente, se basa en el conocimiento que la experiencia le ha otorgado. Teniendo en cuenta los inconvenientes del método de prueba y error, en este trabajo se busca definir el número de AVF y su ubicación mediante el uso de la técnica de optimización PSO. En este sentido, en la literatura internacional se han reportado resultados satisfactorios para la solución del problema planteado (empleando AVF no lineales) en estructuras tridimensionales y en estructuras tipo pórtico.

Para diseñar una estructura que cumpla con las características sismo resistente de la normativa de Colombia NSR 10 [2], es necesario contar con datos que permitan obtener la máxima intensidad de un movimiento telúrico. Esto lleva a que se usen los registros históricos de la actividad sísmica para obtener una aproximación probabilística. Es importante considerar la incertidumbre asociada a esta aproximación probabilística, por lo cual se magnifican las fuerzas producidas en la estructura debido a este movimiento sísmico de diseño. Sin embargo, siempre se encuentra la probabilidad de excedencia, y para estructuras de ocupación especial que deben permanecer en servicio durante y después de un sismo de alta intensidad (tales como hospitales, estaciones de bomberos y plantas nucleares, entre otras), es necesario garantizar la funcionalidad durante y después de un sismo de gran intensidad. Esta es una característica que invita a un mayor estudio del comportamiento de las estructuras que emplean sistemas de disipación de energía en Colombia.

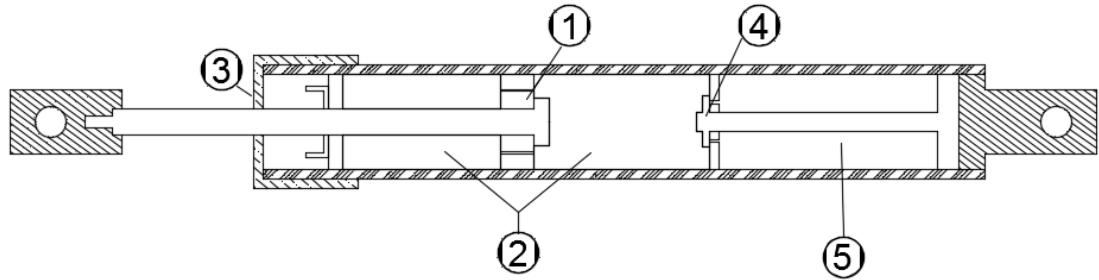
1. AMORTIGUADOR DE FLUIDO VISCOSO - AVF

Los amortiguadores viscosos fluidos (AVF) han tenido gran acogida en la industria militar y aeroespacial debido a su capacidad de disipar la energía de impacto. Aplicaciones como la protección de submarinos de explosiones subacuáticas, protección de misiles bajo ataques nucleares, aislamiento de la vibración debida al viento en las plataformas de lanzamiento de misiles, entre otras, fueron las que llevaron a que esta tecnología tuviera un gran desarrollo. Sin embargo, hasta el final de la guerra fría se desclasificó esta información tal y como se conoce hoy en día. A partir de este punto se han realizado diversos estudios acerca del comportamiento de las estructuras civiles con este tipo de dispositivos [3].

Un AVF se compone principalmente de 5 elementos, la figura 1 muestra un esquema general de este. La cabeza del pistón divide el cilindro en dos cámaras, es común que la cabeza del pistón tenga un material diferente al del cilindro para tener una compensación térmica [3]. Las cámaras contienen el líquido, y permiten su paso de una cámara a otra a través de orificios ubicados a través y alrededor de la cabeza del pistón. Los fluidos más usados generalmente son líquidos de silicona puesto que tienen un comportamiento adecuado en cuanto a la resistencia al fuego y la estabilidad térmica, fundamental para garantizar la integridad del sello retenedor durante la vida útil del AVF que normalmente es de 35 años.

En la figura 1 también se observa la cámara del acumulador que permite controlar la expansión térmica del líquido, además garantiza que siempre haya la cantidad necesaria de fluido para el correcto funcionamiento del amortiguador; sin embargo, un correcto diseño y ensamblaje del amortiguador debe garantizar que los sellos no permitan la más mínima pérdida de forma que no sea requerido un acumulador o un dispositivo de almacenamiento externo de líquido. La barra que sostiene la cabeza del pistón debe ser muy resistente al pandeo, puesto que este podría causar falla en el sello retenedor, otra posible causa de falla en el sello debido a la barra del pistón es que no se encuentre lo suficientemente lisa y genere imperfecciones en su material. Es importante resaltar que el nombre “amortiguador viscoso fluido” se debe al comportamiento macroscópico del amortiguador; los líquidos comúnmente usados presentan viscosidades relativamente bajas (Por ejemplo, aceite de silicona con una viscosidad cinemática de aproximadamente $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ a una temperatura de 20°C).

Figura 1. Componentes de un amortiguador viscoso fluido.

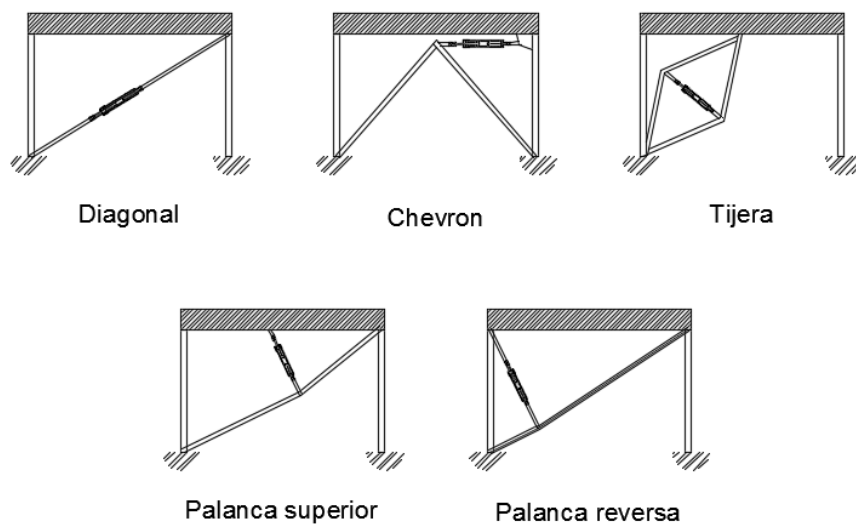


1. Cabeza de pistón con orificios
2. Cámaras del líquido
3. Sello retenedor
4. Válvula de control
5. Cámara de acumulador

Fuente: Taylor Devices.

Por otro lado, se han desarrollado varias configuraciones geométricas para los AVF, siendo las configuraciones Diagonal y Chevron las más usadas; aunque para algunas situaciones es preferible usar configuraciones geométricas como la tijera o palanca [4].

Figura 2. Configuraciones geométricas para la instalación de amortiguadores viscosos fluidos.



Fuente: Taylor Devices.

El principio fundamental por el que trabaja un AVF se basa en hacer que una diferencia de presión se genere en las cámaras al producirse el desplazamiento relativo entre los nodos inicial y final del amortiguador, esto lleva a que el fluido comprimido fluya de una cámara a otra atravesando pequeñas cavidades que aumentan su velocidad y por tanto su energía cinética [4], una vez que el fluido llega a la cámara vacía, se expande de nuevo y reduce su energía cinética al perderla por la turbulencia que genera este proceso, lo que desencadena la pérdida de energía por calor.

La fuerza ejercida por el amortiguador se puede expresar como componente de la velocidad relativa entre los nodos inicial y final (v), la constante del amortiguamiento (C), y un exponente (α) que depende del diseño del amortiguador cuyo valor oscila entre 0.3 y 1, siendo 0.3 el menor valor posible. Valores de α mayores a 1 no son empleados en la ingeniería sísmica puesto que su aplicabilidad en este campo es nula. La expresión que relaciona la fuerza con las variables mencionadas es:

$$F_d = C * |v^\alpha| * \text{sgn}(v^\alpha) \quad 1$$

Donde $\text{sgn}()$ representa la función signo.

El comportamiento del amortiguador en relación con la velocidad relativa se puede clasificar en dos tipos: lineal y no lineal. Para valores de $\alpha=1$ se presenta una relación lineal entre la velocidad y la fuerza, mientras que para valores de $\alpha<1$ se presenta no linealidad, es decir, se desarrolla mucha fuerza para una velocidad pequeña, y una fuerza baja para velocidades altas, lo cual lo hace muy favorable para reducir los impactos que inherentemente tienen velocidades altas.

Los AVF son muy útiles en estructuras flexibles como edificios esbeltos o rascacielos puesto que estas estructuras son también vulnerables a la acción eólica, y el uso de estos amortiguadores aumenta significativamente su capacidad para disipar energía; por lo tanto, reduce el movimiento. Diversos estudios [3], [4] han demostrado la capacidad de los AVF para reducir los desplazamientos, además, se ha encontrado que reducen la demanda de deformación inelástica, pero en eventos extremos es virtualmente imposible otorgar el amortiguamiento suficiente para que la estructura no llegue a la fluencia.

2. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

Gran parte de las investigaciones realizadas en los diferentes campos de la ciencia requiere que se obtengan resultados óptimos, ya sea porque se tenga que minimizar la cantidad de material requerido o reducir el tiempo de ejecución de un proceso con el fin de reducir costos en la experimentación. Una herramienta que permite a los investigadores obtener una solución para este problema es un algoritmo de optimización. Este algoritmo permite, a partir de criterios de búsqueda, obtener la mejor solución posible dentro de un espacio de respuesta acotado por el usuario. Un gran número de algoritmos de optimización se basan en el comportamiento de la naturaleza debido a la facilidad que muestra en la solución de problemas, por ejemplo, la comunicación efectiva entre las hormigas cuando se encuentra una fuente de alimento (modelo social).

El algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO), presentado en 1995 por Eberhart y Kennedy, crea una población en la cual cada partícula es una posible solución al problema, y su ubicación inicial es dada aleatoriamente dentro del espacio de respuesta [5]. Una vez se analiza la calidad de cada partícula, es decir, su valor, se indica a cada partícula en qué dirección debe moverse basado en la mejor respuesta de la población y la mejor respuesta de la misma partícula. En otras palabras, explora el espacio de búsqueda con base en su conocimiento y el conocimiento del enjambre.

Suponiendo que se desea hallar el mínimo valor de una función n-dimensional, entonces se tiene que cada partícula se encuentra en el espacio S, donde $S \subset \mathbb{R}^n$. Para explorar el espacio se tiene un enjambre con N partículas: $\mathbb{S} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, donde $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ es el vector de posición. Además de los vectores de velocidad V, y mejor posición de la partícula P, que también son n-dimensionales:

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}) \quad (2)$$

$$P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}) \quad (3)$$

Donde $i = 1, 2, \dots, N$ es el indicador de la partícula.

Si se almacena la posición de la partícula con el mejor resultado global en una variable G, se tiene que en cada iteración t se debe actualizar la velocidad y posición de la partícula según:

$$V_i(t + 1) = x[V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (G - X_i(t))] \quad (4)$$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (5)$$

Donde x es un parámetro llamado coeficiente de constricción usado para controlar la explosión del enjambre, c_1 y c_2 son valores positivos llamados parámetro cognitivo y social respectivamente, y r_1 y r_2 son valores entre $[0,1]$ generados aleatoriamente. Una vez se ha determinado el costo de cada partícula, se actualiza la mejor posición:

$$P_i(t + 1) = \begin{cases} X_i(t + 1), & \text{si } f(X_i(t + 1)) < f(P_i(t)) \\ P_i(t), & \text{si } f(X_i(t + 1)) \geq f(P_i(t)) \end{cases} \quad (6)$$

La búsqueda de la mejor solución en el espacio de búsqueda por parte de las partículas consiste en dos etapas: exploración y explotación [5]. En la etapa de exploración la principal función de las partículas es explorar la mayor parte del espacio de solución con el fin de ubicar las zonas donde posiblemente se encuentra el óptimo. En la etapa de explotación, las partículas se aseguran de buscar en las zonas que anteriormente fueron detectadas. Estas etapas pueden llevarse a cabo una por una o simultáneamente.

2.1. UNIFIED PSO - UPSO

Dado que la búsqueda de las partículas está basada en la mejor respuesta del enjambre y del mismo individuo, es necesario considerar la posibilidad en la cual el óptimo global no sea el de todo el enjambre sino el de un pequeño grupo, de esta forma se pueden abarcar problemas que contienen varios óptimos locales. Esto se soluciona si se introduce el concepto de vecindario. En esta situación el problema de búsqueda se puede dividir en dos casos: la búsqueda global, que se da cuando se considera que el vecindario de una partícula es todo el enjambre. Y la búsqueda local, que se da cuando el vecindario de una partícula es un pequeño grupo.

El algoritmo de optimización de enjambre de partículas unificado permite potenciar las características de exploración y explotación según sea necesario [6]; suponga que $G_i(t + 1)$ es la actualización de la velocidad en la aproximación global del problema, mientras que $L_i(t + 1)$ es la actualización de la velocidad en la aproximación local del problema, entonces se tiene que [7]:

$$G_i(t + 1) = x[V_i(t) + c_1r_1(P_i(t) - X_i(t)) + c_2r_2(Gg - X_i(t))] \quad (7)$$

$$L_i(t + 1) = x[V_i(t) + c_1r_1(P_i(t) - X_i(t)) + c_2r_2(Gl - X_i(t))] \quad (8)$$

Donde Gg es la posición de la mejor partícula de todo el enjambre, mientras que Gl es la posición de la mejor partícula en el vecindario. Estas dos ecuaciones se pueden combinar para obtener una actualización de velocidad que permita potenciar la característica global o local según se requiera:

$$V_i(t + 1) = u G_i(t + 1) + (1 - u)L_i(t + 1) \quad (9)$$

En esta ecuación se introduce el factor de unificación u , que varía entre cero y uno. Note que un valor de u muy cercano a 1 sería el equivalente a una búsqueda global, y un valor de u muy cercano a 0 sería una búsqueda con tendencia al comportamiento local. Una vez se ha determinado un valor adecuado para el tipo de búsqueda requerido, se puede actualizar la posición de la partícula según:

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (9)$$

3. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

3.1. FORMULACIÓN ESTÁNDAR DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.

En este estudio se propone la minimización de la deriva de entrepiso (función objetivo) de una estructura tipo pórtico mediante el uso de amortiguadores viscosos no lineales localizados óptimamente integrando un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (UPSO) en el análisis de la respuesta dinámica. La función que minimizar es el desplazamiento relativo entre dos pisos; es decir, la deriva de entrepiso (Ec.10).

$$\Delta_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{nd} (\delta_{tot(j)}^i - \delta_{tot(j)}^{i-1})^2} \quad (10)$$

Donde nd es el número de direcciones principales en planta ($nd = 2$ si la estructura es tridimensional, $nd = 1$ si la estructura es un pórtico plano), i es el indicador del nivel (piso), y δ_i es el desplazamiento del piso i .

3.2. ALGORITMO PARA LA LOCALIZACIÓN DE AMORTIGUADORES.

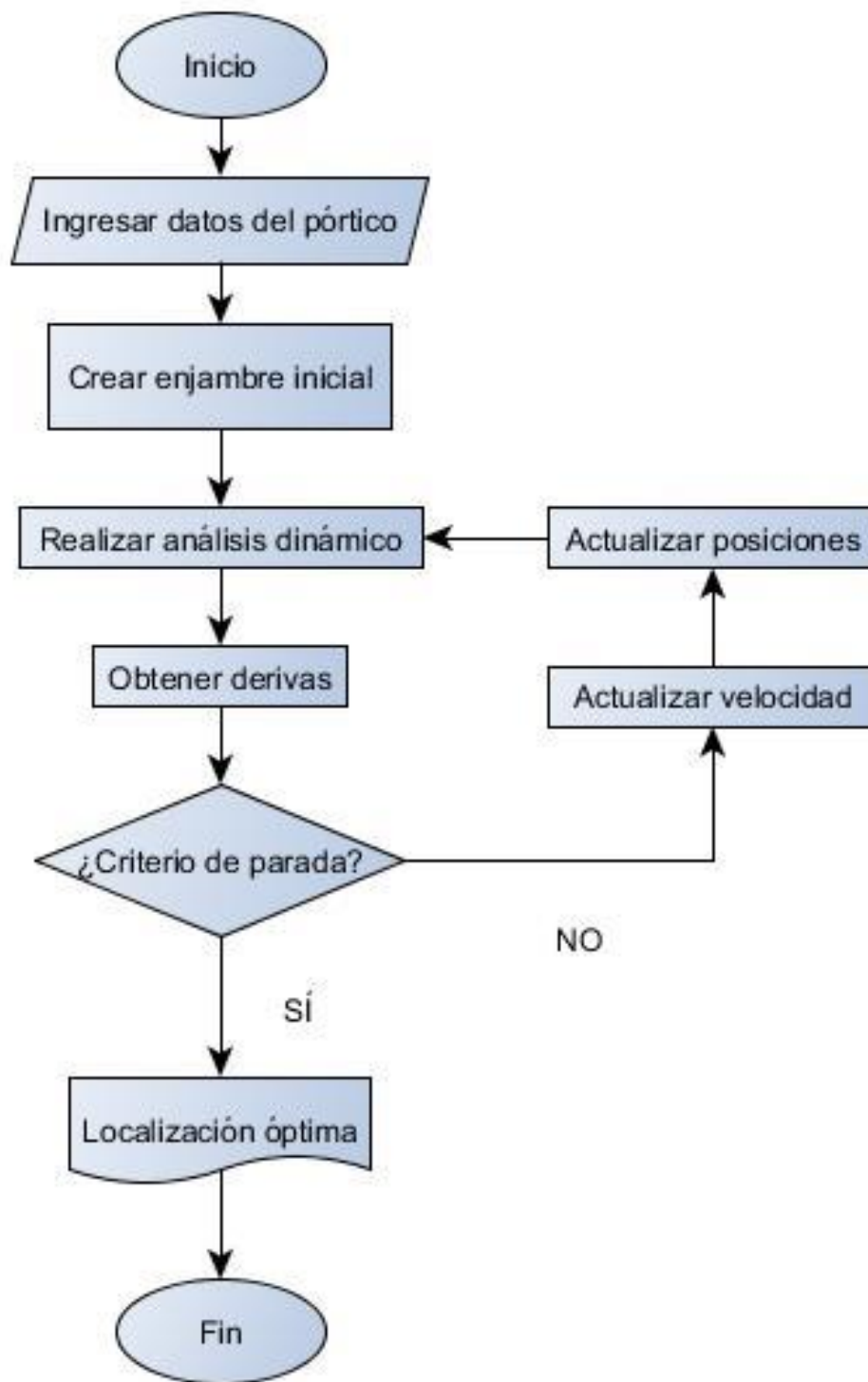
La metodología propuesta para la localización óptima de AVF en estructuras aportricadas de concreto reforzado se presenta en el diagrama de flujo presente en la figura 3. El primer paso es ingresar las propiedades geométricas y de los materiales del pórtico, es decir, coordenadas nodales, conexiones de elementos, secciones de los elementos estructurales, y parámetros de resistencia y fluencia del concreto y acero, respectivamente. Posterior a eso, el programa crea la población inicial de las partículas, es decir, el enjambre inicial, en base a criterios asignados al UPSO como las restricciones del espacio de búsqueda, y el número de partículas deseados. Después de crear el enjambre inicial se hace el análisis dinámico de la respuesta de la estructura, y a partir de este resultado se obtienen las derivas de los nodos, que es la función objetivo.

El criterio de parada para este algoritmo es el número máximo de iteraciones, entonces, si no se ha alcanzado este valor, lo que sigue es actualizar la velocidad de cada partícula con base en la calidad de su respuesta y la mejor respuesta del enjambre [8]. Una vez se actualiza la velocidad de las partículas del enjambre, se debe actualizar la nueva posición y realizar el análisis dinámico de nuevo hasta cumplir el criterio de parada. Cuando se ha alcanzado el número máximo de iteraciones se obtiene la posición de la partícula con mejor respuesta del enjambre y con este dato se da la localización óptima de los amortiguadores en el pórtico.

3.3. CONFIGURACIÓN DEL ALGORITMO UPSO

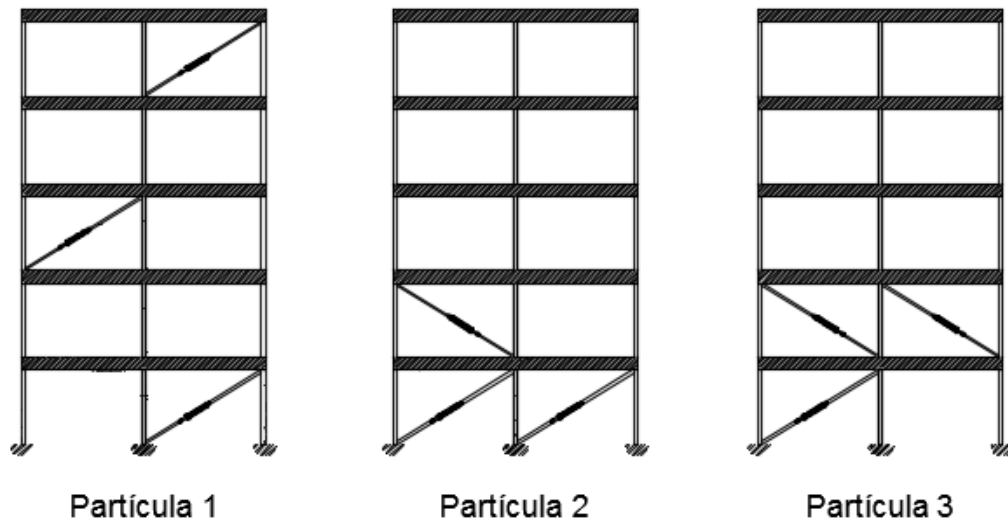
Para representar numéricamente la configuración espacial de los amortiguadores en la estructura se propone el uso de una matriz de localización M.L. El número de columnas de esta matriz está dado por la cantidad de amortiguadores que se deseen ubicar, el número de filas está dado por la cantidad de partículas del enjambre. Por ejemplo, para un análisis en el que se eligen 3 amortiguadores y 3 partículas, la matriz M.L. es de tamaño 3X3, este ejemplo se ilustra en la figura 4.

Figura 3. Diagrama de flujo para la localización óptima de AVF.



En la figura 4 se pueden observar las posiciones de los 3 amortiguadores de la partícula 1, estas posiciones corresponden a los valores 5, 11, 19 en la primera fila de la matriz puesto que la numeración se da de arriba abajo y de izquierda a derecha, considerando también las dos posibles orientaciones del amortiguador en la misma luz; es decir, si se encuentra de izquierda a derecha o de derecha a izquierda. De esta misma forma se pueden obtener las posiciones de los amortiguadores en las partículas 2 y 3.

Figura 4. Configuración de amortiguadores en cada partícula.



Una vez que se tiene la representación numérica de la ubicación de los amortiguadores en la estructura para cada partícula se puede emplear el algoritmo de optimización. El valor asignado para los parámetros cognitivo c_1 y social c_2 es 2,05 para cada uno. El coeficiente de constricción x se asignó como 0,95.

3.4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

Para evaluar la respuesta dinámica del sistema se desarrolló una interacción entre el software OpenSees y Matlab. El análisis en OpenSees se llevó a cabo considerando el comportamiento lineal de la estructura y el comportamiento no lineal de los amortiguadores puesto que el valor empleado para el exponente de la velocidad en todos los casos es de $\alpha = 0,35$. La constante C es también la misma para todos los casos $C = 20000 \left[\frac{Kn \cdot Seg}{m} \right]$.

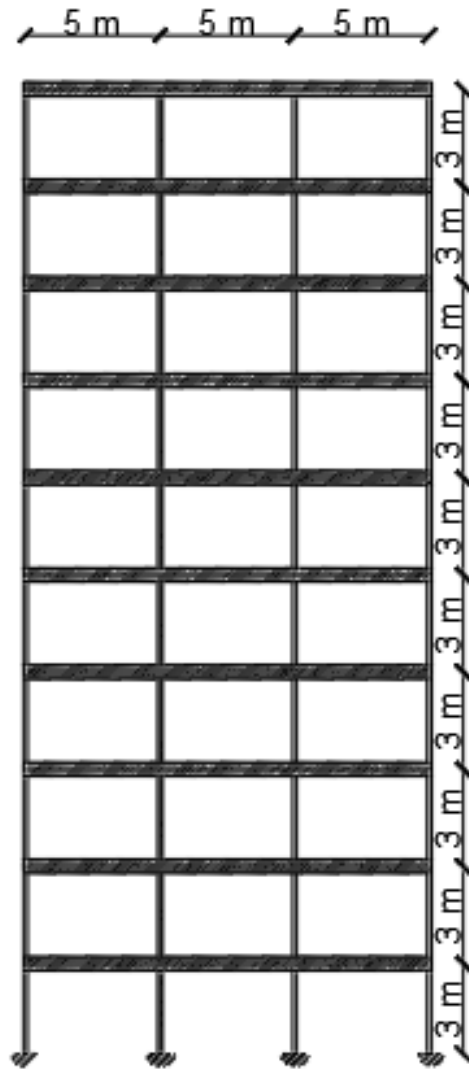
4. EJEMPLOS ANALÍTICOS

Este estudio hace un análisis de la contribución del valor del factor de unificación del UPSO en la respuesta de la estructura para una cantidad determinada de amortiguadores, cada parámetro del UPSO en cada ejemplo fue variado en base al tamaño de la estructura, estos parámetros se indican en el Anexo A. En base a los resultados obtenidos en los ejemplos analíticos se considera si se debe seleccionar un valor para el factor de unificación en el caso de estudio, o si se restringe su dominio. Esto se hace con el fin de reducir el costo computacional y el tiempo de ejecución del algoritmo. En las subsecciones 5.1, 5.2, y 5.3 se presentan 3 ejemplos en los cuales se varía el tamaño de cada estructura, de este modo se garantiza un registro para comparar el desempeño de u.

4.1. PRIMER EJEMPLO.

El primer ejemplo consiste en una estructura tipo pórtico con 3 luces, espaciadas cada 5 metros; 10 pisos con altura de entrepiso de 3 metros; secciones cuadradas de concreto reforzado de 45 cm X 45 cm, concreto con resistencia última a la compresión de 21 MPa y módulo de elasticidad de 21500 MPa. Este se presenta gráficamente en la figura 5.

Figura 5. Estructura del ejemplo 1.



Ejemplo 1

4.2. SEGUNDO EJEMPLO.

El segundo ejemplo consiste en una estructura tipo pórtico con 5 luces, espaciadas cada 5 metros; 15 pisos con altura de entrepiso de 3 metros; secciones cuadradas de concreto reforzado de 47 cm X 47 cm, concreto con resistencia última a la compresión de 21 MPa y módulo de elasticidad de 21500 MPa. Este se presenta gráficamente en la figura 6.

4.3. TERCER EJEMPLO.

El tercer ejemplo consiste en una estructura tipo pórtico con 8 luces, espaciadas cada 5 metros; 4 pisos con altura de entrepiso de 3 metros; secciones cuadradas de concreto reforzado de 47 cm X 47 cm, concreto con resistencia última a la compresión de 21 MPa y módulo de elasticidad de 21500 MPa. Este se presenta gráficamente en la figura 7.

Figura 6. Estructura del ejemplo 2

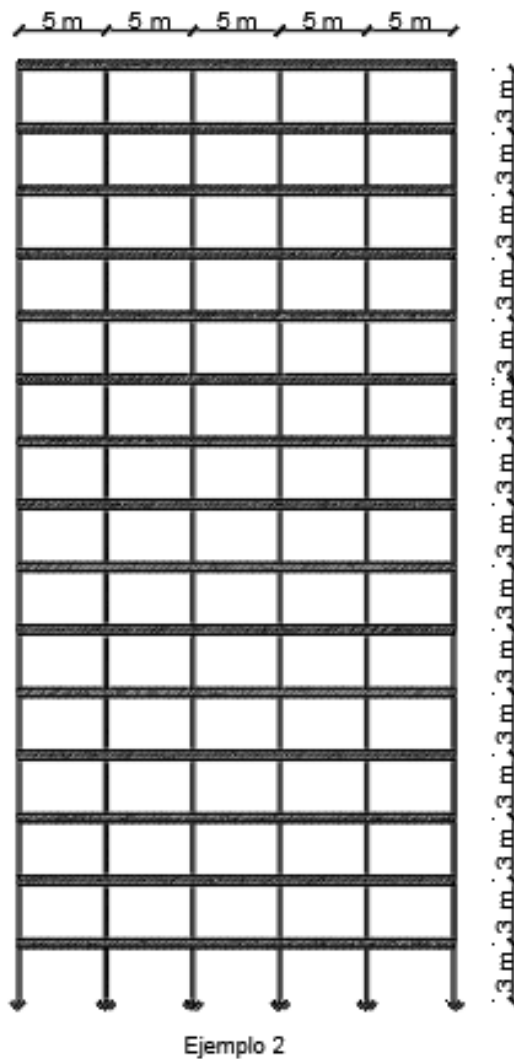
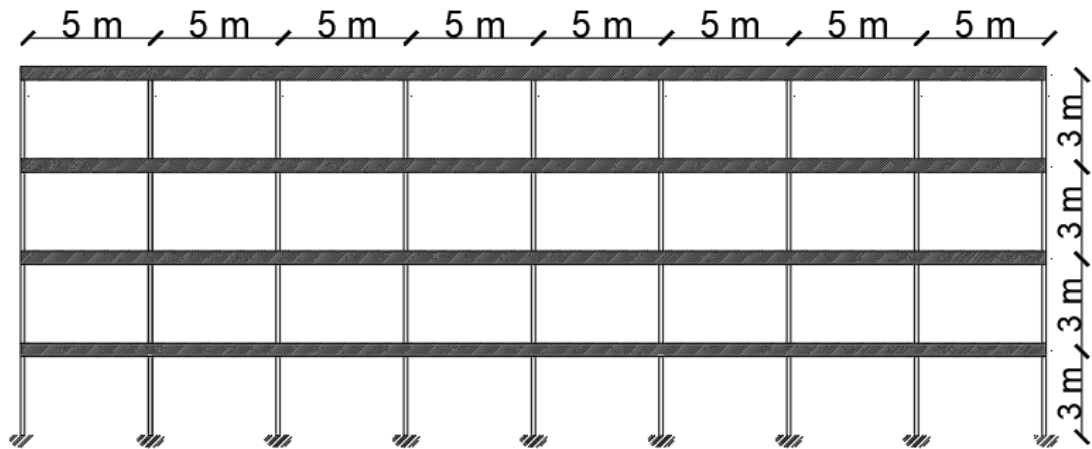


Figura 7. Estructura del ejemplo 3.



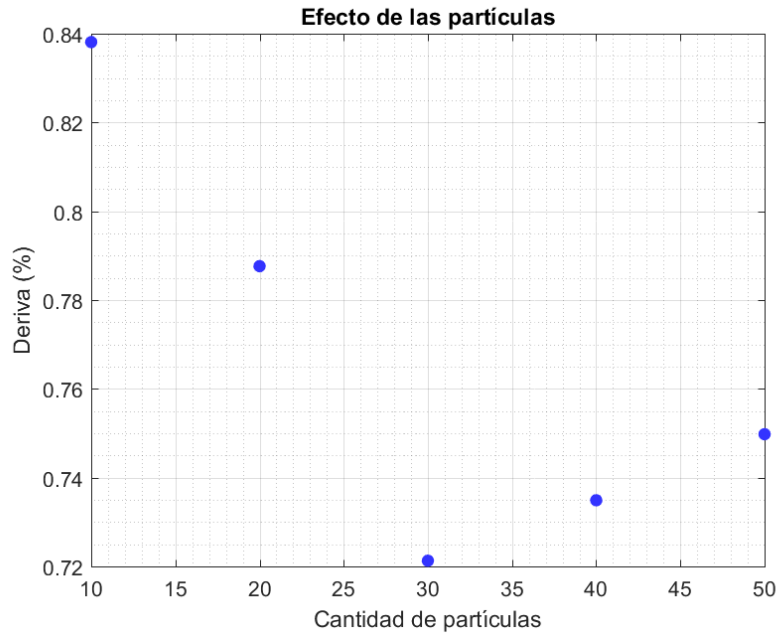
Ejemplo 3

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Mediante la implementación del algoritmo de optimización y el análisis de los tres ejemplos descritos arriba para un número de AVFs igual a 1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7 se pudo determinar que la calidad de la respuesta depende del tamaño del espacio de búsqueda y de la cantidad de partículas empleadas, además que la configuración geométrica de la estructura que se va a analizar juega un papel importante en la convergencia de la deriva, puesto que para edificios con características de muchos pisos en comparación con pocas luces se encuentra un valor en el cual la deriva no se reduce más; pero, para las geometrías con pocos pisos y gran cantidad de luces se aumenta la reducción en la deriva a medida que se aumenta la cantidad de amortiguadores empleados en el análisis.

El análisis llevado a cabo hizo necesario realizar un estudio del efecto de la cantidad de partículas en la reducción de la deriva, y los resultados obtenidos indican que, a diferencia de lo que se podría pensar con simple raciocinio, la respuesta no mejora a medida que se aumentan más partículas. Se encuentra que para 30 partículas hay una mejor respuesta que para 10, 20, 40 o 50 (ver figura 8). Esto invita a hacer un análisis mayor del efecto de las partículas para comprender por qué sucede este fenómeno.

Figura 8. Efecto de la cantidad de partículas en la reducción de la deriva.

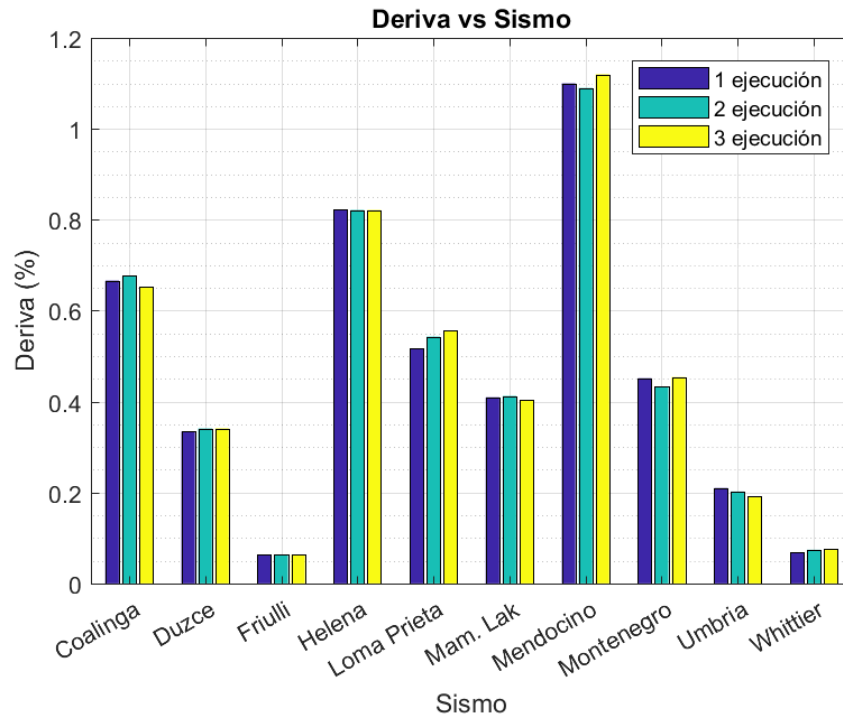


El estudio de los factores de unificación de la mejor partícula de cada iteración y el promedio de la población UBest y UMed, respectivamente, permite deducir que para este tipo de problemas (localización óptima de amortiguadores en estructuras aporricadas) la búsqueda se equilibra entre la exploración y la explotación y no es necesario reducir más el dominio del Factor de Unificación, que para estos análisis se limitó al espacio $0.7 < u < 0.3$ en aras de mantener un equilibrio y no permitir que la búsqueda se haga totalmente en exploración ni explotación.

4.5. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL SISMO.

Se encuentra que la configuración óptima para una estructura no solo depende de las propiedades de sus materiales y configuración geométrica, sino que el sismo juega un papel importante en la forma como se deben localizar los amortiguadores ya que se realizan 3 ejecuciones para cada sismo y en cada una de ellas se aprecia una distribución similar a las otras para el mismo sismo. Además, que la deriva no es la misma (ver figura 9) puesto que el input energético es diferente en cada uno; sin embargo, el empleo del algoritmo de optimización muestra ser una estrategia altamente efectiva para reducir la deriva en estos casos [9].

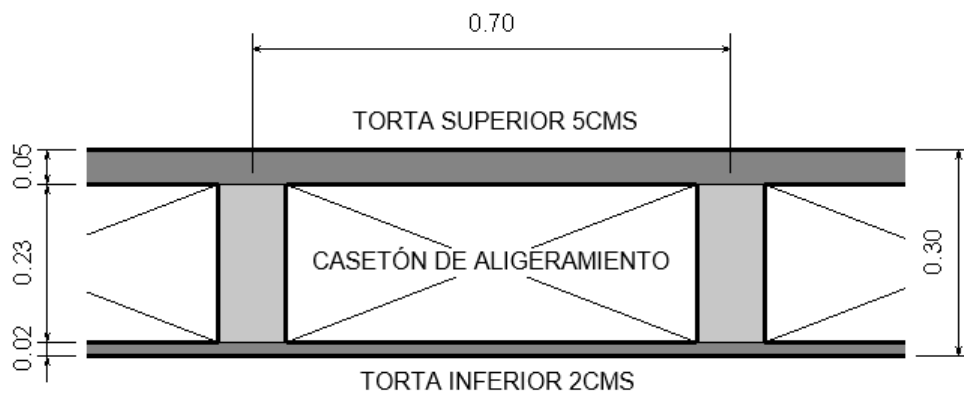
Figura 9. Deriva para cada sismo.



5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

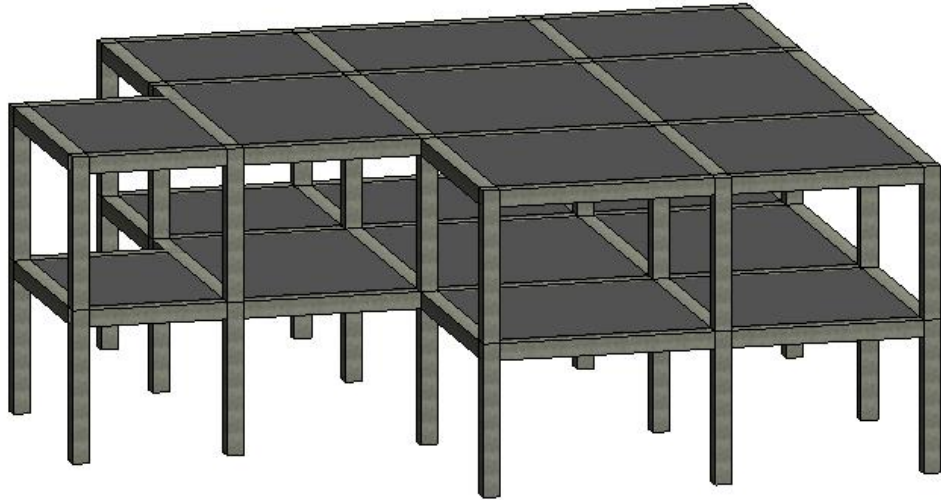
La estrategia de ubicación de amortiguadores se implementó en el análisis de una estructura aporricada de concreto reforzado clasificado como indispensable: Centro de salud Nuestra Señora del Rosario, ubicado en la calle 34# 35-57, Bucaramanga, Santander, se estima que fue edificada hace aproximadamente 50 años. Este edificio presta el servicio de Urgencias, lo que hace que sea necesario proponer una alternativa de rehabilitación para mejorar su estructura. Los planos fueron obtenidos de la secretaría de planeación de Bucaramanga. La estructura cuenta con una sección en la cual no hay dos pisos, sino uno; sin embargo, debido a que el algoritmo permite trabajar con pórticos planos cuya altura no varíe, se asumió que la estructura tiene 2 pisos en todos sus pórticos planos, conservando sus características estructurales. La estructura tiene placa aligerada, con viguetas de 10 centímetros de espesor, altura total de placa de 30 centímetros, esto se puede apreciar en la figura 10. La figura 11, y la figura 12 muestran una vista 3D del sistema de pórtico que compone el centro de salud y los espaciamientos generales de la estructura, que cuenta con columnas de 30x30 centímetros de concreto de 21 Mega pascales y Acero de refuerzo de 420 Mega pascales, además de columnetas de 40x10 centímetros, que no son consideradas parte del sistema de resistencia sísmico.

Figura 10. Detalle de placa aligerada del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.



Fuente: Re digitalizado de planos originales (Secretaría de planeación, Bucaramanga).

Figura 11. Vista 3D de la estructura del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.



Fuente: Modificado de planos originales (Secretaría de planeación, Bucaramanga).

La estrategia propuesta para abarcar la estructura 3d consiste en analizar la deriva inicial sin amortiguadores, posteriormente, se hace el análisis de optimización en pórticos planos que son seleccionados en base a la aferencia de cada uno, luego se modela la estructura 3D con los amortiguadores en las ubicaciones obtenidas mediante este análisis de los pórticos planos.

La carga asignada a la estructura es de $11,6 \left[\frac{Kn}{m^2} \right]$, esto se detalla en la tabla 1.

La respuesta se analiza con 3 sismos: Coalinga (0.25g), Helena (0.25g) y Mendocino (0.15g). De esta forma se garantiza que los eventos sísmicos tienen magnitudes, distancias hipocentrales (o a la falla causante), y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos del lugar. La tabla 2 muestra la deriva obtenida en las dos direcciones principales para la estructura y la deriva total, para los tres sismos mencionados [9].

Tabla 1. Cargas del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.

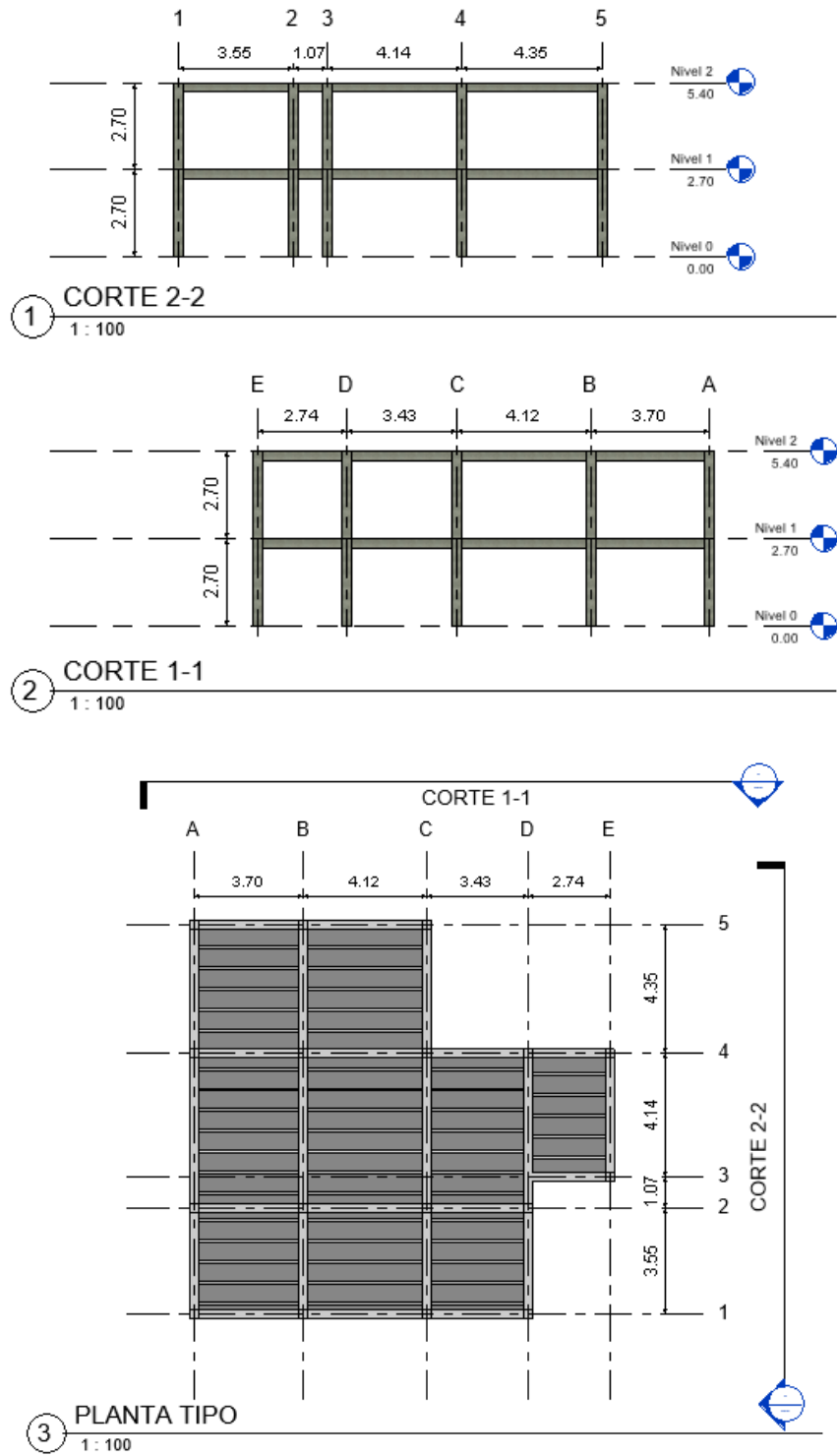
Cargas asignadas		
Concepto	Valor	
Torta superior e inferior	1.68	Kn/m2
Vigueta tipo	0.92	Kn/m2
Ductos mecánicos	0.2	Kn/m2
Entramado metálico	0.7	Kn/m2
Fachada y particiones	2.5	Kn/m2
Afinado de piso y cubierta	1.6	Kn/m2
Cuartos de cirugía	4	Kn/m2
TOTAL	11.6	Kn/m2

Tabla 2. Derivas sin amortiguadores del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.

Derivas modelo 3D sin amortiguadores			
Dirección	Coalinga	Helena	Mendocino
X	0,95%	0,99%	1,21%
Y	1,13%	1,07%	1,08%
Total	1,48%	1,46%	1,62%

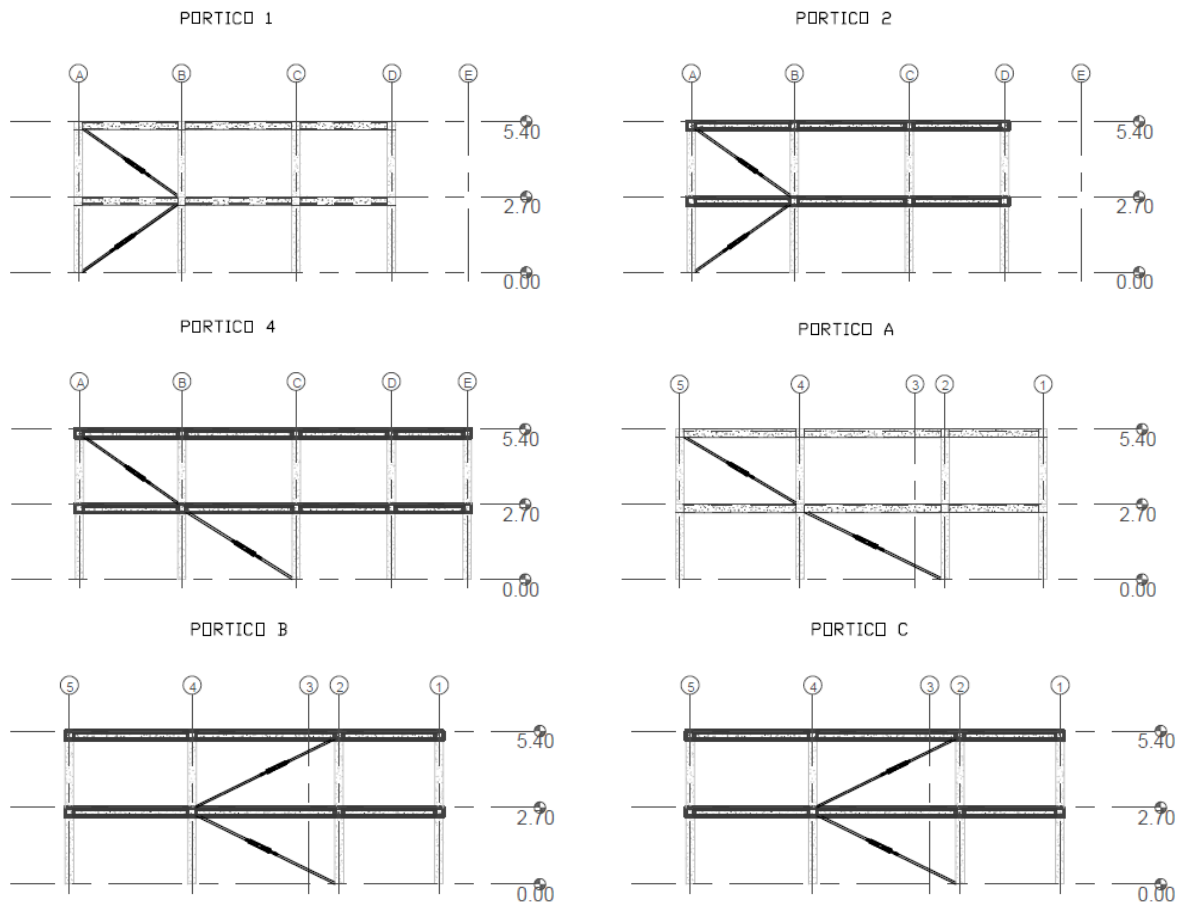
El análisis de pórticos planos se realizó para los pórticos 1, 2 y 4 ubicados en la dirección X; y A, B y C para los pórticos ubicados en la dirección Y. La figura 13 presenta la distribución obtenida al realizar el análisis de optimización con estos pórticos.

Figura 12. Planos generales del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.



Fuente: Re digitalizado de planos originales (Secretaría de planeación, Bucaramanga).

Figura 13. Distribución óptima de los amortiguadores en los pórticos del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.



Una vez se tiene la distribución de los amortiguadores en cada uno de los pórticos seleccionados, se procede a hacer el análisis 3D (Figura 14) con los tres sismos empleados.

La Tabla 3 permite ver las derivas para las direcciones principales y la deriva total para los tres sismos. Se puede ver que inicialmente se tuvo una deriva máxima de 1,62%, y luego del proceso de optimización se obtiene una deriva máxima de 0,78%. Lo cual implica una reducción de casi el 50% de la deriva inicial al emplear la metodología de localización óptima de amortiguadores.

Es importante resaltar que la deriva máxima sin amortiguadores se dio para el sismo de Mendocino; pero, posterior al proceso de optimización, la deriva máxima fue dada por el sismo de Helena. Esto se debe a que la configuración obtenida genera que los efectos torsionales varíen ya que no se puede dar una distribución simétrica en planta de los pórticos con amortiguadores.

Figura 14. Modelo 3D de la estructura con distribución óptima de amortiguadores del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.

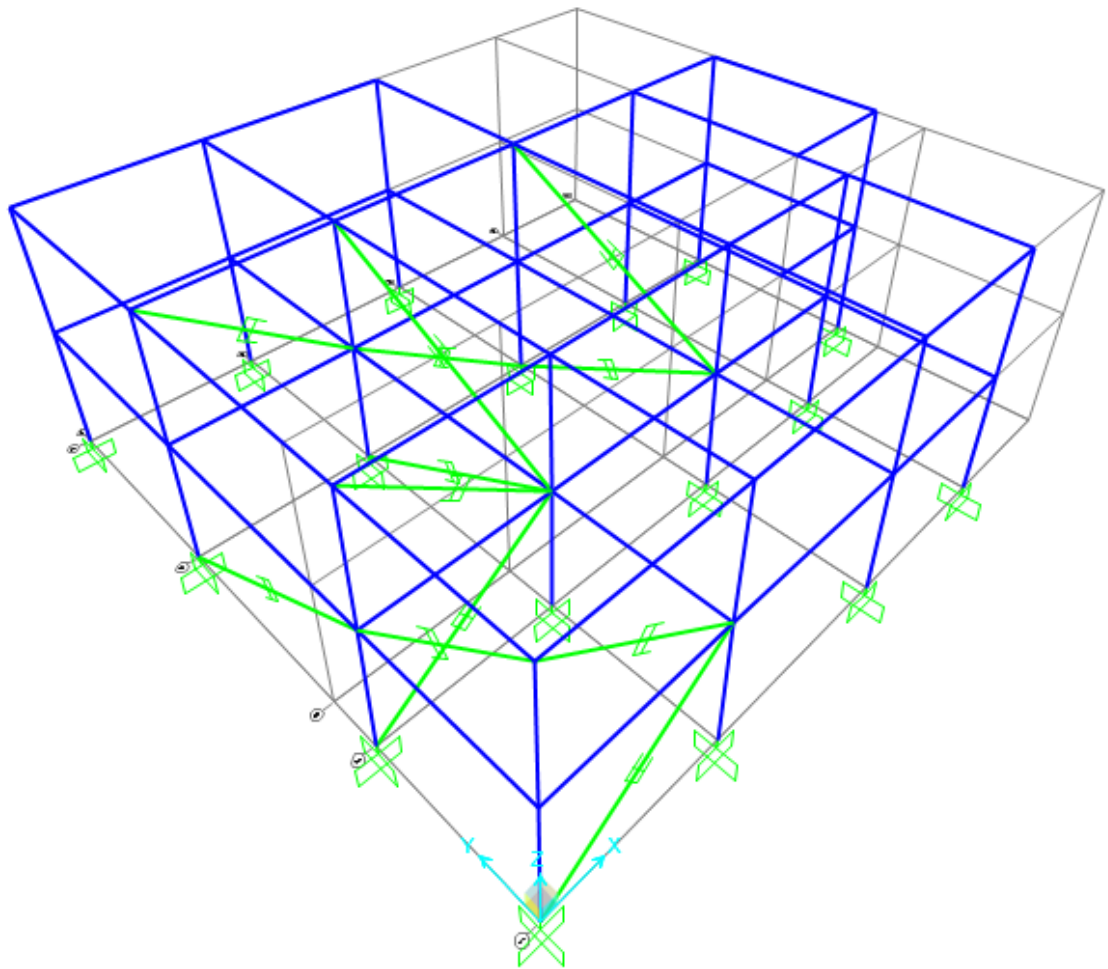
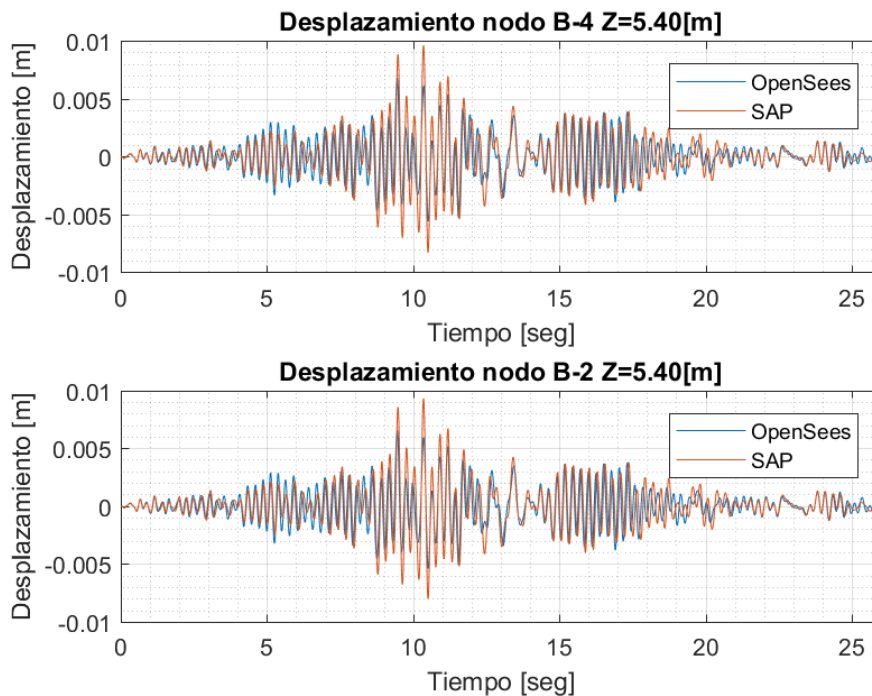


Tabla 3. Derivas después del proceso de optimización del Centro de Salud Nuestra Señora del Rosario.

Derivas modelo 3D con amortiguadores			
Dirección	Coalinga	Helena	Mendocino
X	0,62%	0,60%	0,26%
Y	0,30%	0,50%	0,36%
Total	0,69%	0,78%	0,45%

Se graficaron los desplazamientos de los nodos ubicados en los ejes B-2 y B-4, en Z=5.4 [m] (ver figura 15) para comparar la respuesta del análisis en SAP2000 y OpenSees, se puede apreciar que los comportamientos son similares; Sin embargo, OpenSees representa más precisamente el comportamiento de la estructura frente al sismo, puesto que es un software diseñado con este propósito, para fines investigativos.

Figura 15. Comparación de desplazamientos nodales software OpenSees y Sap2000



6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología para obtener la óptima localización de amortiguadores viscosos con el fin de rehabilitar estructuras aporricadas de concreto reforzado. Este objetivo se alcanzó mediante la integración del algoritmo UPSO en el análisis de la respuesta dinámica del sistema, esto fue posible gracias a que se definieron las variables que determinan la respuesta del sistema estructural con amortiguadores viscosos.

Se realizaron tres ejemplos analíticos con distintas geometrías en los cuales se varió la cantidad de amortiguadores entre 1 y 7, analizando el costo del aumento del espacio de respuesta debido al aumento de la cantidad de amortiguadores. Este análisis permitió encontrar el número óptimo de amortiguadores que se debe usar para no desperdiciar recursos en un proyecto, además, también permitió estudiar los parámetros del algoritmo PSO, que tuvo diferentes características para cada ejemplo, demostrando que el factor de unificación en la población y en la partícula con mejor respuesta siempre se encuentra en variación entre la exploración y la explotación. Los resultados obtenidos también reflejaron la necesidad de hacer un estudio del efecto de las partículas en la solución, por lo cual, este análisis también fue efectuado, demostrando que no se puede simplemente aumentar el número de partículas del algoritmo para intentar mejorar la calidad de la respuesta.

Para comprobar los resultados, se tomaron 10 diferentes configuraciones con 6 amortiguadores, y se estudió su respuesta para uno de los ejemplos, demostrando que la menor de las derivas obtenidas es muy cercana a la obtenida mediante el algoritmo para el mismo número de amortiguadores; pero que, empleando el algoritmo, se puede obtener una deriva menor para menor cantidad de amortiguadores, lo que demuestra la valiosa contribución del algoritmo en el problema de localización de amortiguadores.

Se encontró, mediante un análisis del efecto del sismo, que la localización óptima no depende solamente de la configuración geométrica de la estructura, sino del sismo al que se vea sometida, ya que para la misma estructura las localizaciones obtenidas para los 10 sismos a los que se sometió fueron diferentes.

La metodología propuesta se aplicó a un caso de estudio, con una estructura clasificada como indispensable, se comparó la respuesta obtenida antes y después del procedimiento y se encontró que se logra reducir la deriva al 51% de su valor

inicial, lo cual demuestra la potencia del algoritmo y lo hace una herramienta de gran utilidad para la rehabilitación sísmica.

El objetivo general de esta investigación fue realizar una propuesta de rehabilitación sísmica para una estructura de concreto reforzado tipo pórtico mediante la localización óptima de amortiguadores viscosos, este se logró mediante la subdivisión en 3 objetivos específicos. El primer objetivo específico fue definir las variables y los modelos de análisis que se emplean para determinar la respuesta de sistemas estructurales controlados por amortiguadores viscosos, este objetivo fue alcanzado en el capítulo 2, donde se indica la teoría general de los amortiguadores viscosos fluidos. El segundo objetivo específico fue proponer un algoritmo que permita obtener la localización de un grupo de amortiguadores para optimizar la respuesta sísmica del sistema, este objetivo se alcanzó mediante la integración del UPSO en el análisis de la respuesta dinámica de estructuras de concreto reforzado tipo pórtico, presentado en el capítulo 4. El tercer y último objetivo específico fue aplicar el algoritmo a un caso de estudio y comparar el resultado sin amortiguadores y con amortiguadores (inicial y final), este se alcanzó, y sus resultados son presentados en el capítulo 6, donde se demuestra la gran utilidad de la herramienta presentada.

7. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Cuando se abordan estructuras que presentan regularidad en planta, lo más adecuado para implementar la metodología propuesta, es realizar el análisis de los pórticos planos ubicando los amortiguadores simétricamente para reducir lo más posible los efectos torsionales.

Los resultados obtenidos con los ejemplos analíticos mostraron que el factor de unificación no se debe restringir a un espacio más pequeño que el trabajado, puesto que la población, y la partícula con la mejor respuesta inclusive, presentan factores de unificación que alternan la búsqueda entre la exploración y la explotación; sin embargo, al realizar el análisis del efecto de las partículas, se hace evidente que se debe hacer un análisis más exhaustivo para explicar el comportamiento de la calidad de la respuesta en relación a las partículas.

En el algoritmo de optimización no se dio ningún tipo de restricciones para la penalización del UPSO. Futuras investigaciones pueden contemplar el análisis de distintos aspectos de la respuesta, tales como el cortante basal y el sobreesfuerzo en los elementos para penalizar el algoritmo y obtener resultados que reúnan de una manera más amplia la respuesta de la estructura.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] A. G. Pricopie, «Rehabilitation of Existing Structures by Optimal Placement of Viscous Dampers, » Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, 2013.
- [2] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, Bogotá: Ministerio de Minas, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.
- [3] G. H. Housner, L. A. Bergman y T. K. Cughey, «Structural Control: Past, Present, and Future., » Journal of Engineering Mechanics, pp. 897-958, 1997.
- [4] T. D. INC, «Taylor devices, » 15 06 2017. [En línea]. Available: <https://www.taylordevices.com/>. [Ultimo acceso: 15 Junio 2017].
- [5] L. J. Leu y J. T. Chang, «Optimall Allocation of Non-Linear Viscous Dampers for Three-Dimensional Building Structures, » Procedia Engineering, pp. 2489-2497, 2011.
- [6] M. C. Constantinou, M. D. Symans y P. Tsopelas, «Fluid Viscous Dampers in Applications of Seismic Energy Dissipation and Seismic Isolation» Taylor Devices, 1993.
- [7] S. Mahendra y L. Moreschi, «Optimal Placement of Dampers for Passive Response Control, » Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 995-976, 2002.
- [8] S. Silvestri y T. Trombetti, «Optimal Insertion of Viscous Dampers into Shear-Type Structures: Seismic Performance and Applicability of the MPD System» de 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004.
- [9] INGEOMINAS, «Zonificación Sismo geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga,» INGEOMINAS, Bogotá, 2001.

BIBLIOGRAFIA

A. Ras y N. Boumechra, «Seismic Energy Dissipation Study of Linear Fluid Viscous Dampers in Steel Structure Design» Alexandria Engineering Journal, pp. 2821-2832, 2016.

B. University of California, «OpenSees,» [En línea]. Available: <http://opensees.berkeley.edu/>. [Último acceso: 15 abril 2017].

C. & S. INC, «Computers & Structures INC,» CSI, [En línea]. Available: <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>. [Último acceso: 13 junio 2017].

D. Gómez, J. Marulanda y P. Thompson, «Sistemas de Control para la Protección de Estructuras Civiles Sometidas a Cargas Dinámicas,» Dyna, pp. 77-89, 2008.

Dilip y R. Narkhede, «Behavior of Nonlinear Fluid Viscous Dampers for Control of Shock Vibrations» Journal of Sound and Vibration, pp. 80-98, 2014.

D. Lee y D. Taylor, «Viscous Damper Development and Future Trends» The Structural Design of Tall Buildings, pp. 311-320, 2001.

I. C. Trelea, «The Particle Swarm Optimization Algorithm: Convergence Analysis and parameter selection» Information Processing Letters, pp. 317-325, 2003.

K. E. Parsopoulos y M. N. Vrahatis, «Parameter selection and adaptation in Unified Particle Swarm Optimization» Mathl Modelling, pp. 198-213, 2007.

K. E. Parsopoulos y V. E. Vrahatis, «A Unified Particle Swarm Optimization Scheme» de Proceedings of the International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, Holanda, 2004.

MathWorks, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>. [Último acceso: 15 abril 2017].

M. D. Symans, F. A. Charney y A. S. Whittaker, «Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments» Journal of Structural Engineering, pp. 3-19, 2008.

ANEXO A. ANÁLISIS PRIMER EJEMPLO NUMÉRICO

Parámetros de optimización:

Ejecuciones 10

Iteraciones 10

Partículas 12

El espacio de búsqueda para cada número de amortiguadores se presenta en la tabla 4, allí se aprecia el incremento considerable en el espacio de búsqueda a medida que se aumenta el número de amortiguadores. El incremento del espacio afecta en gran medida la calidad de la respuesta, puesto que un gran espacio debe ser abarcado por la misma cantidad de partículas que inicialmente analizaban un espacio menor.

Tabla 4. Aumento del espacio de búsqueda para diferente cantidad de amortiguadores para el ejemplo 1.

Amortiguadores	Combinaciones
1	60
2	1.770
3	34.220
4	487.635
5	5.461.512
6	50.063.860
7	386.206.920

Las derivas obtenidas para cada cantidad se grafican en la Figura 16, es posible notar que al llegar a 2 amortiguadores la deriva tiende a valores similares, cercanos a 0.7%. El hecho de que para 3 o más amortiguadores se encuentre más deriva que para 2 se puede esclarecer si se observa la Figura 17 a la Figura 23, se encuentra que para las 10 ejecuciones con 1 y 2 amortiguadores las partículas llegan rápidamente al valor mínimo, llegando a necesitar tan solo 3 iteraciones; sin embargo, a medida que se emplean más amortiguadores las gráficas se hacen más inestables, es decir que cada ejecución tiene un comportamiento no tan cercano al de las demás ejecuciones, aunque se aprecia en general que todas las curvas

tienden a los valores mínimos, la razón de este comportamiento: el aumento en el espacio de búsqueda crece de forma abrupta para la misma cantidad de partículas cuando se aumenta la cantidad de amortiguadores, como se mencionó anteriormente.

Figura 16. Convergencia de la deriva - Ejemplo 1.

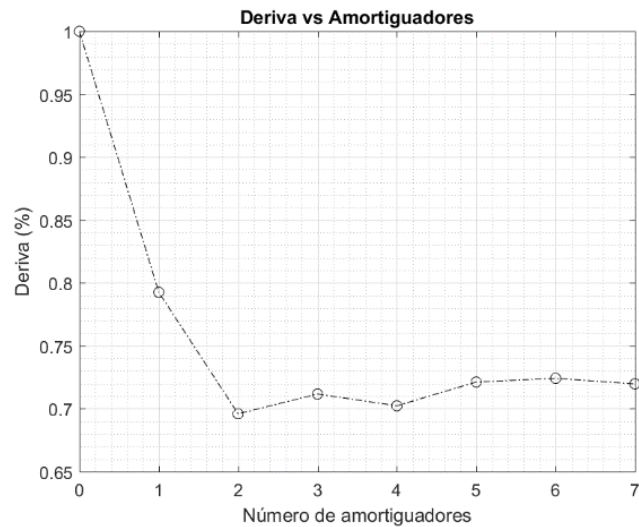


Figura 17. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 1 amortiguador - Ejemplo 1.

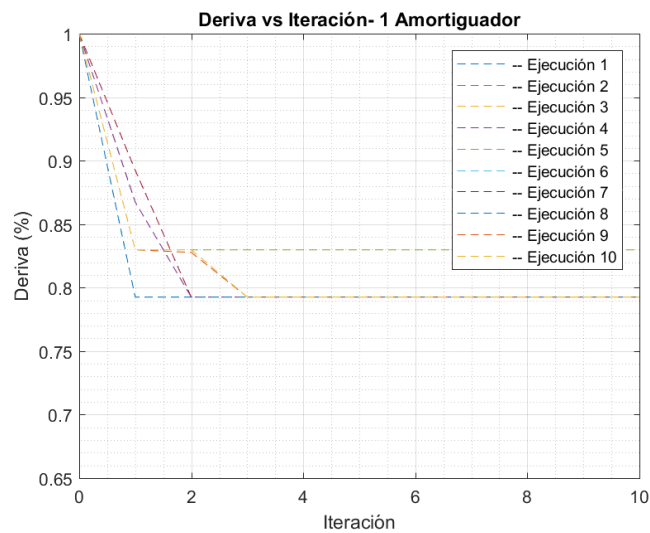


Figura 18. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 2 amortiguadores - Ejemplo 1.

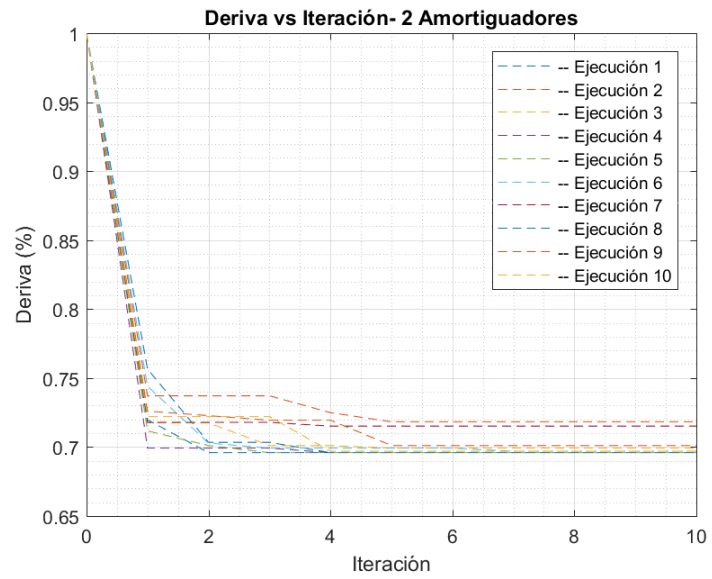


Figura 19. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 3 amortiguadores - Ejemplo 1.

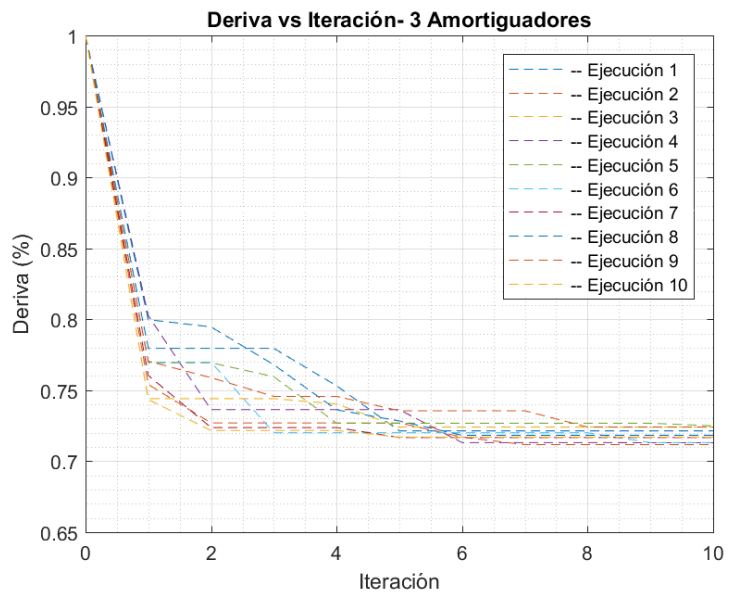


Figura 20. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 4 amortiguadores - Ejemplo 1.

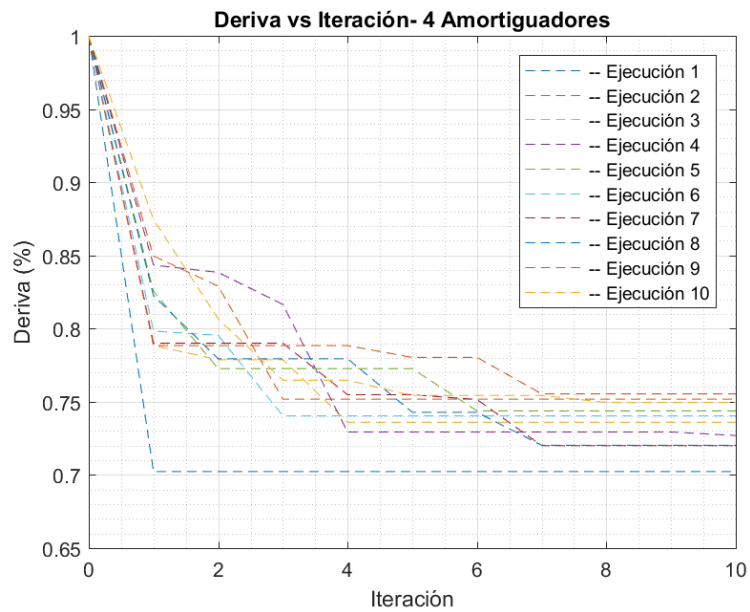


Figura 21. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 5 amortiguadores - Ejemplo 1.

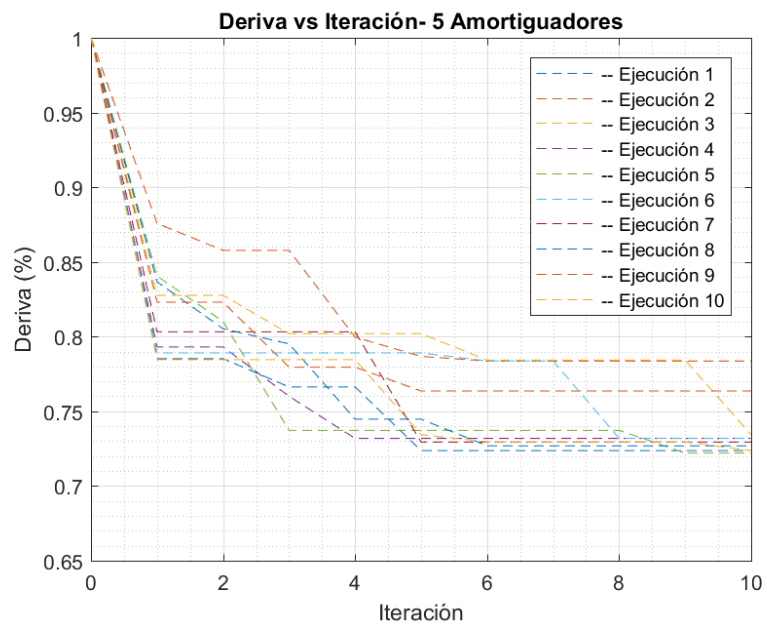


Figura 22. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 6 amortiguadores - Ejemplo 1.

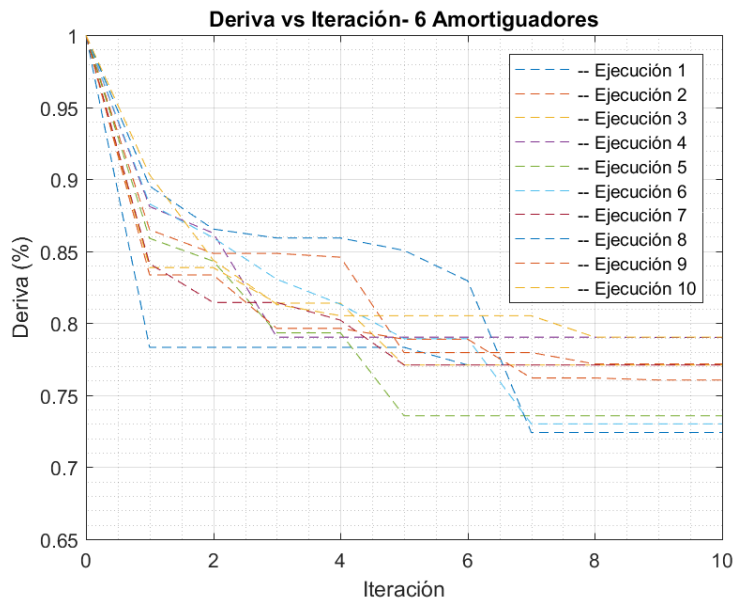
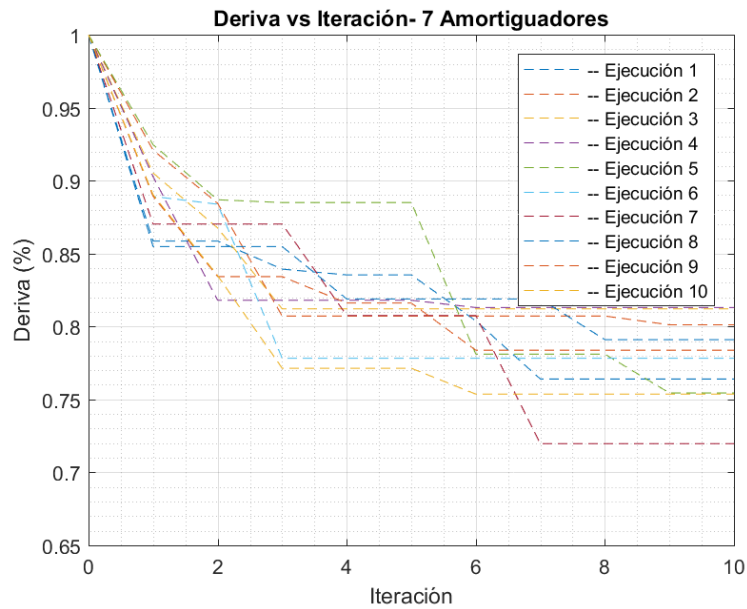


Figura 23. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 7 amortiguadores - Ejemplo 1.



Para comprobar los resultados, se seleccionó la estructura con 6 amortiguadores, posteriormente se realizaron 10 configuraciones al azar y se analizó la deriva en cada caso, la Figura 24 a la Figura 33, muestra las 10 configuraciones realizadas con los amortiguadores en el software SAP2000. Mientras que la tabla 5 muestra los valores obtenidos en cada caso. Se aprecia que la menor deriva obtenida es 0.69%.

Empleando la optimización para 6 amortiguadores se obtuvo una deriva de 0.72%, valor por encima, pero muy, cercano al obtenido con las 10 configuraciones al azar si se considera el espacio de búsqueda: 50.063.860 posiciones. Además, es importante resaltar que el valor obtenido con las 10 configuraciones aleatorias realizadas manualmente con 6 amortiguadores es el mismo obtenido mediante el proceso de optimización empleando solamente 2 amortiguadores, lo que muestra la potencia del algoritmo.

Figura 24. Configuración 1 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

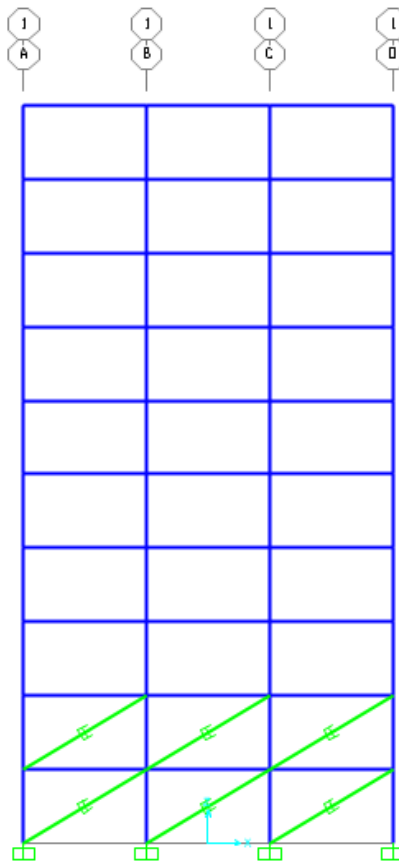


Figura 25. Configuración 2 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

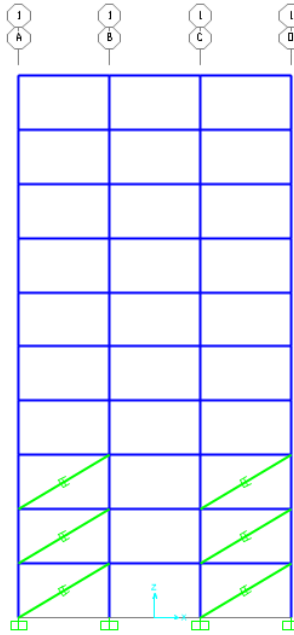


Figura 26. Configuración 3 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

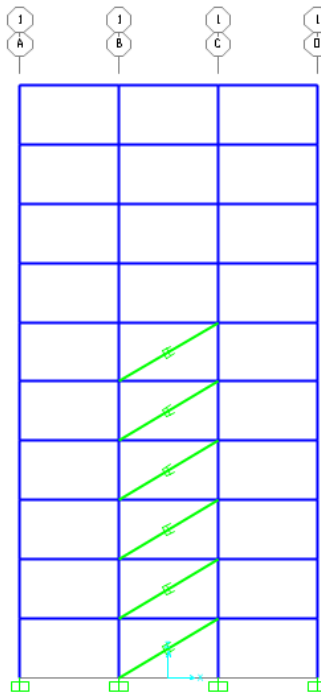


Figura 27. Configuración 4 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

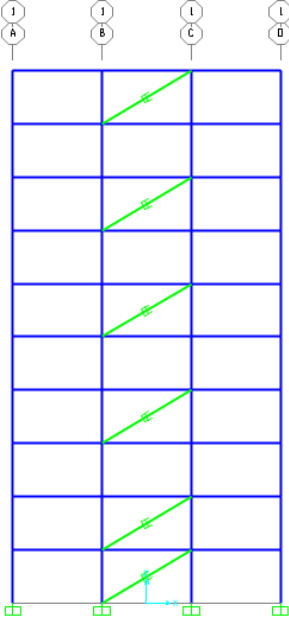


Figura 28. Configuración 5 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

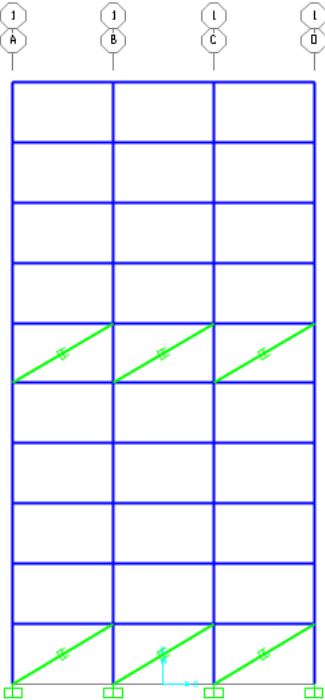


Figura 29. Configuración 6 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

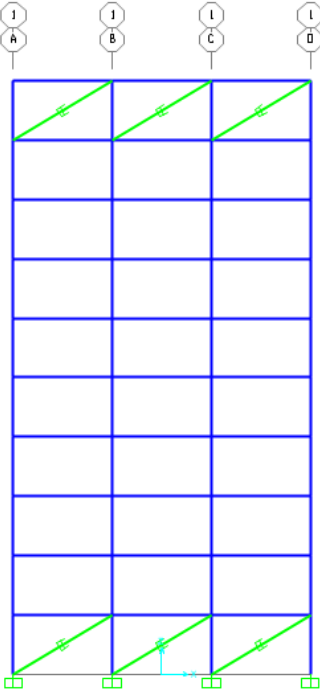


Figura 30. Configuración 7 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

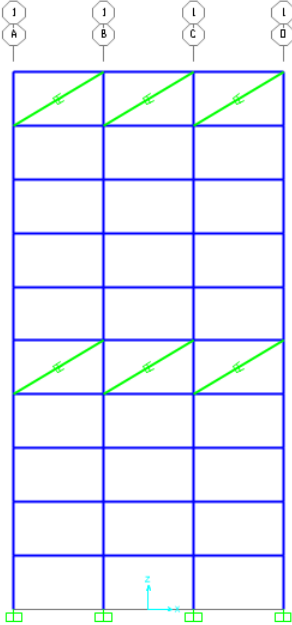


Figura 31. Configuración 8 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

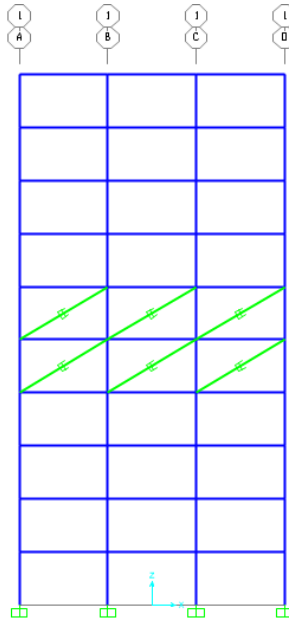


Figura 32. Configuración 9 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

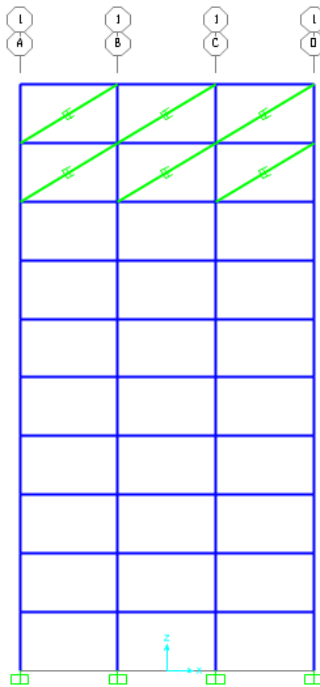


Figura 33. Configuración 10 de la estructura del ejemplo 1 con 6 amortiguadores.

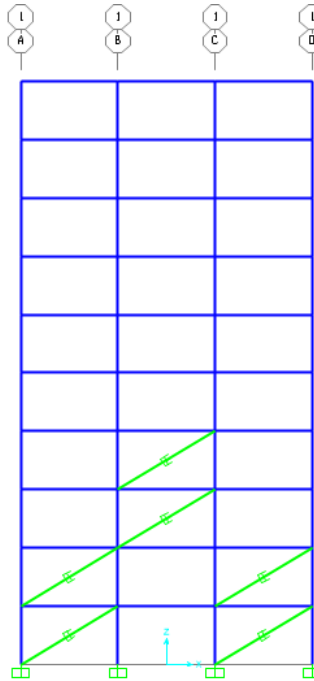


TABLA 5. Deriva obtenida en casos 1-10 para el ejemplo 1.

Caso	Deriva
1	0,91%
2	0,86%
3	1,04%
4	0,69%
5	0,87%
6	0,76%
7	0,79%
8	0,89%
9	0,80%
10	0,85%

Como se desea estudiar el comportamiento del factor de unificación para determinar si es necesario dirigir la búsqueda principalmente a la exploración o explotación, en la Figura 34 y la Figura 35, se grafica el factor de unificación que presenta la mejor posición de todo el enjambre UBest para cada iteración de las 10 ejecuciones. La gráfica se presenta para 2 y 7 amortiguadores respectivamente, puesto que con estas dos se representa satisfactoriamente el comportamiento de todos los análisis.

Figura 34. Factor UBest vs iteración con 2 amortiguadores – Ejemplo 1.

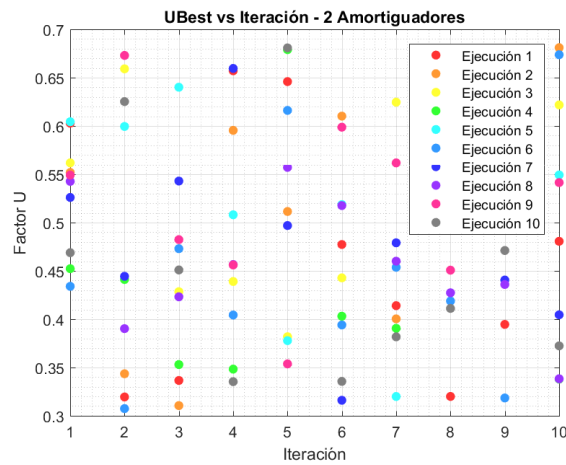
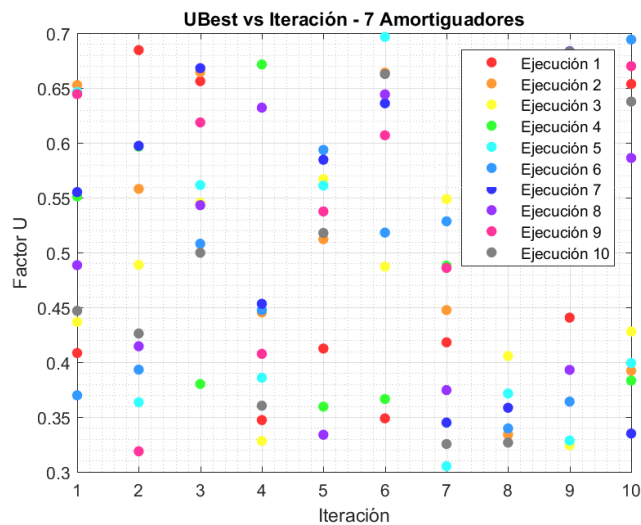


Figura 35. Factor UBest vs iteración con 7 amortiguadores – Ejemplo 1.



Es claro que el factor UBest no presenta tendencia a ningún valor. Esto indica que la partícula con mejor resultado no discrimina entre la exploración y explotación en la búsqueda.

El valor promedio del factor de unificación de la población UMed para cada iteración se presenta en la Figura 36 y la Figura 37, aquí se encuentra una centralización de los valores, esto indica que la población no presenta una tendencia hacia la búsqueda en exploración o explotación; es decir, en cada iteración, la población se encuentra en un equilibrio entre la búsqueda local y global.

Figura 36. Factor UMed vs iteración con 2 amortiguadores – Ejemplo 1.

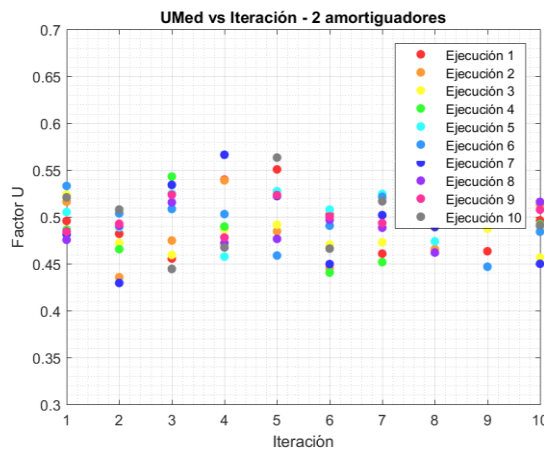
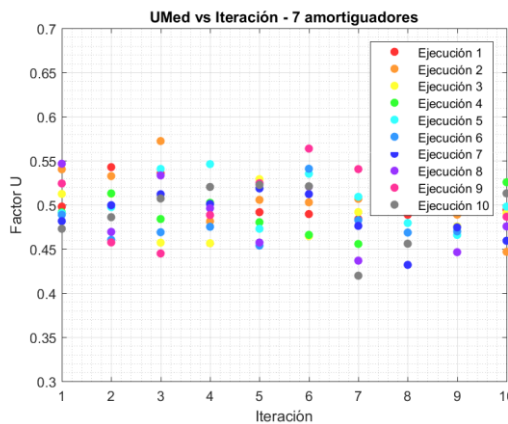


Figura 37. Factor UMed vs iteración con 7 amortiguadores – Ejemplo 1.



ANEXO B. ANÁLISIS SEGUNDO EJEMPLO NUMÉRICO

Parámetros de optimización:

Ejecuciones	2
Iteraciones	15
Partículas	15

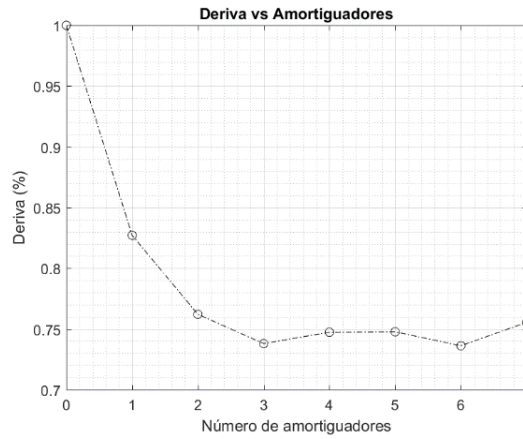
El espacio de búsqueda para cada cantidad de amortiguadores se presenta en la Tabla 6, se puede notar que el espacio de búsqueda es mucho mayor que el ejemplo 1, por lo tanto, se reduce el número de ejecuciones con el fin de aumentar el número de iteraciones y partículas.

Tabla 6. Aumento del espacio de búsqueda para diferente cantidad de amortiguadores para el ejemplo 2.

Amortiguadores	Combinaciones
1	150
2	11.175
3	551.300
4	20.260.275
5	591.600.030
6	14.297.000.725
7	294.109.729.200

La deriva obtenida para cada cantidad de amortiguadores se presenta en la Figura 38. En este caso la convergencia se da con 3 amortiguadores, puesto que para una mayor cantidad la deriva es cercana a la deriva con 3. Se aprecia el mismo comportamiento que en el Ejemplo I: los valores tienen un valor cercano, su diferencia se justifica en el considerable aumento en el espacio de búsqueda.

Figura 38. Convergencia de la deriva - Ejemplo 2.



La Figura 39 hasta la Figura 45, presentan la deriva vs iteración de las dos ejecuciones realizadas en el Ejemplo II, se observa que, aunque el aumento del espacio es mucho mayor que en el Ejemplo I, el hecho de aumentar la cantidad de partículas hace que se llegue con pocas iteraciones a los valores que estabilizan las curvas. Por ejemplo, con 6 amortiguadores se requieren entre 3 y 4 iteraciones para que la curva de la deriva se estabilice. Y con 7 amortiguadores una de las dos ejecuciones se estabiliza en apenas la segunda iteración; para que la segunda curva llegue a este mismo valor se requieren 15 iteraciones; sin embargo, con una sola iteración llega a un valor que está por encima, pero es muy cercano al de la primera curva.

Figura 39. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 1 amortiguador - Ejemplo 2

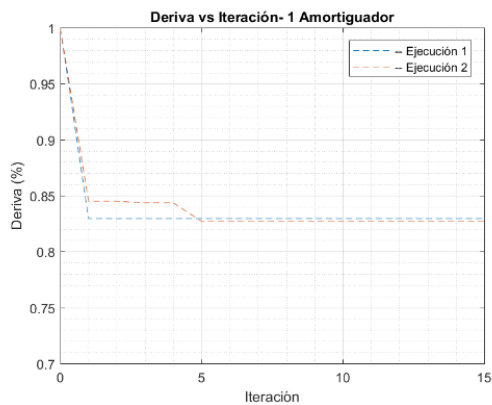


Figura 40. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 2 amortiguadores - Ejemplo 2

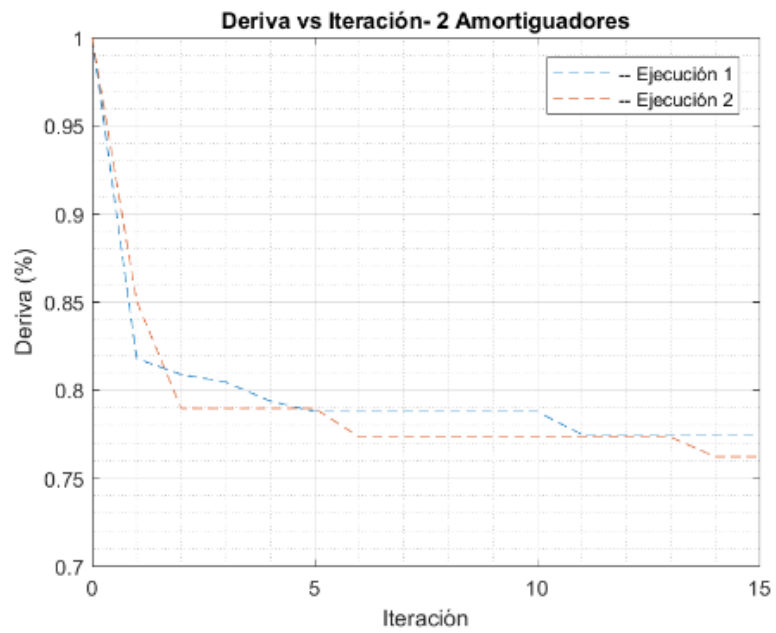


Figura 41. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 3 amortiguadores - Ejemplo 2

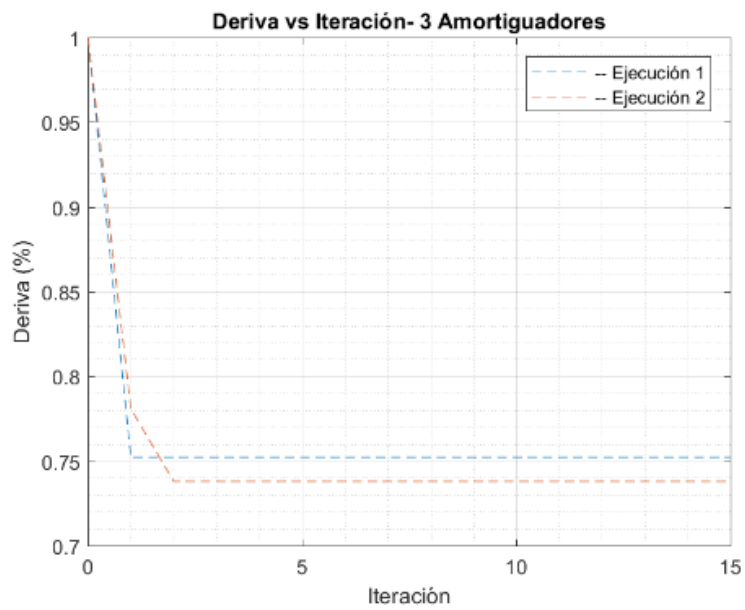


Figura 42. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 4 amortiguadores - Ejemplo 2

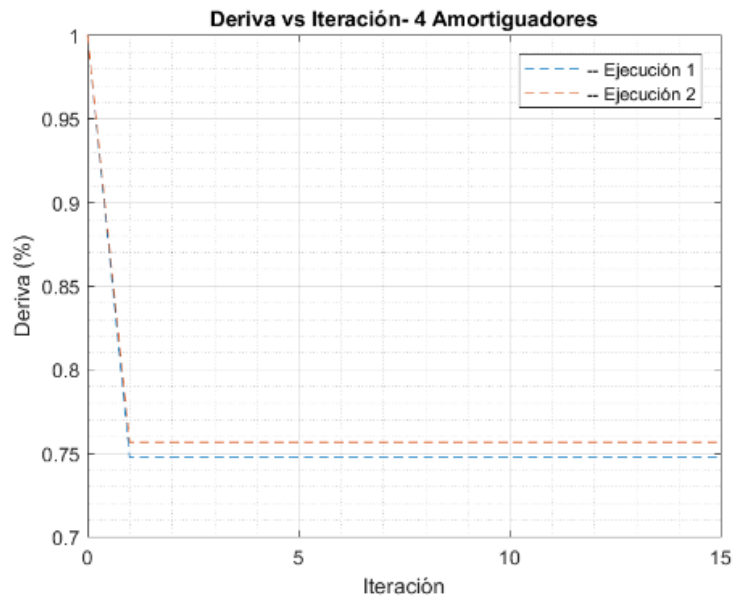


Figura 43. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 5 amortiguadores - Ejemplo 2

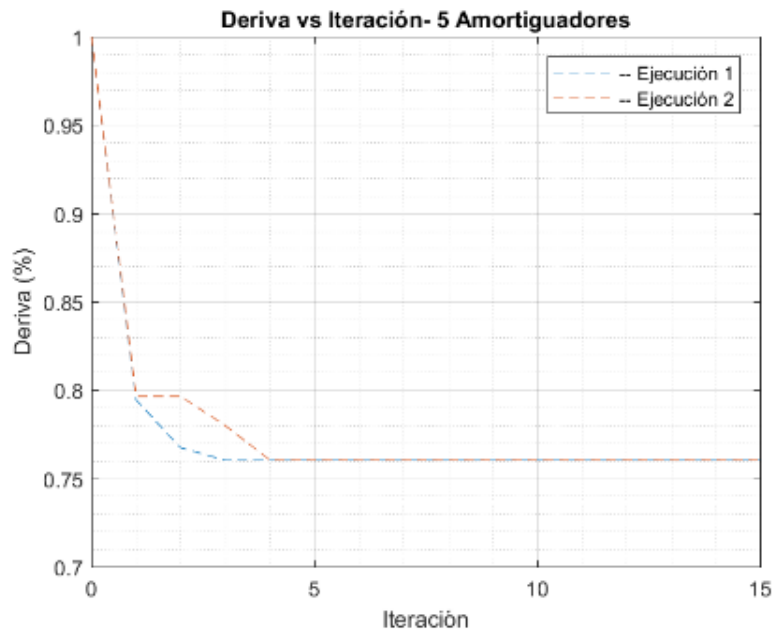
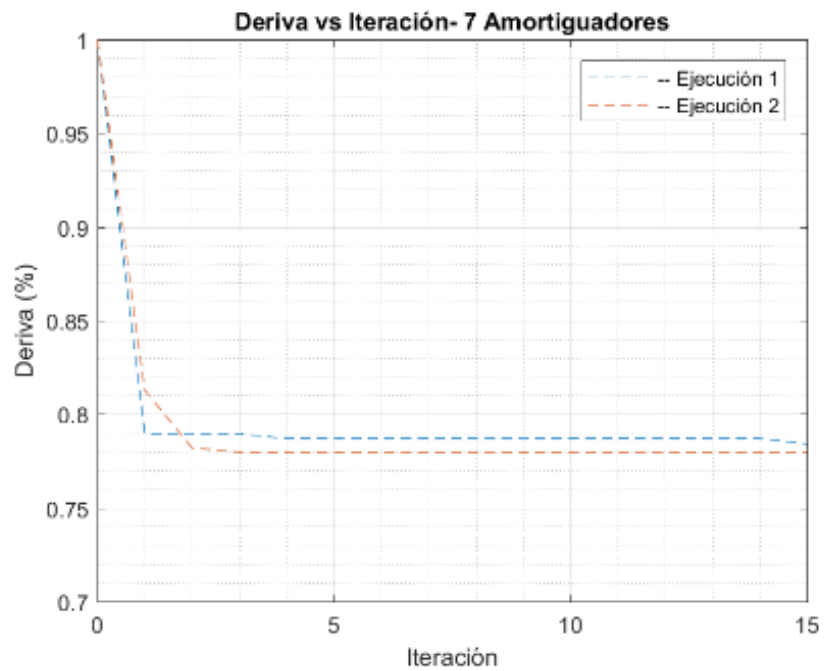


Figura 44. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 6 amortiguadores - Ejemplo 2



Figura 45. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 7 amortiguadores - Ejemplo 2



Para estudiar el factor de unificación en el ejemplo 2, se seleccionaron los casos con 2 y 6 amortiguadores ya que representan satisfactoriamente los casos con amortiguadores entre 1 y 7. La Figura 46 hasta la Figura 49 presentan los factores de unificación UBest y UMed, respectivamente, para cada una de las 15 iteraciones en las 2 ejecuciones. Se encuentra el mismo comportamiento que en el ejemplo 1: El factor UBest no presenta un comportamiento específico, mientras que el factor UMed indica que la población presenta un equilibrio entre la exploración y explotación.

Figura 46. Factor UBest vs iteración con 2 amortiguadores – Ejemplo 2.

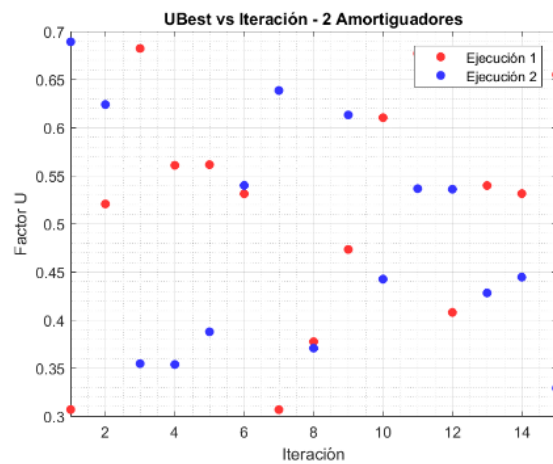


Figura 47. Factor UBest vs iteración con 6 amortiguadores – Ejemplo 2.

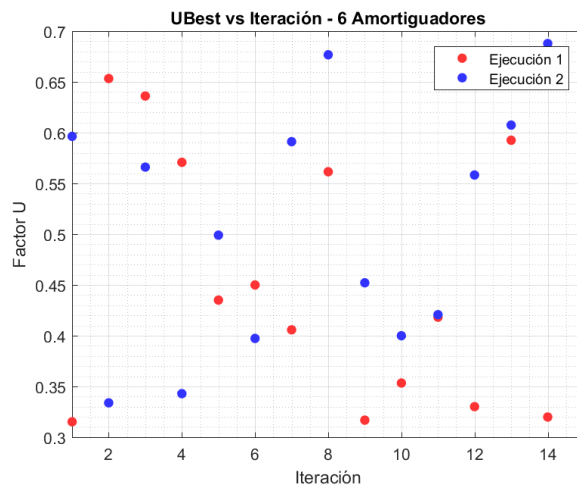


Figura 48. Factor UMed vs iteración con 2 amortiguadores – Ejemplo 2.

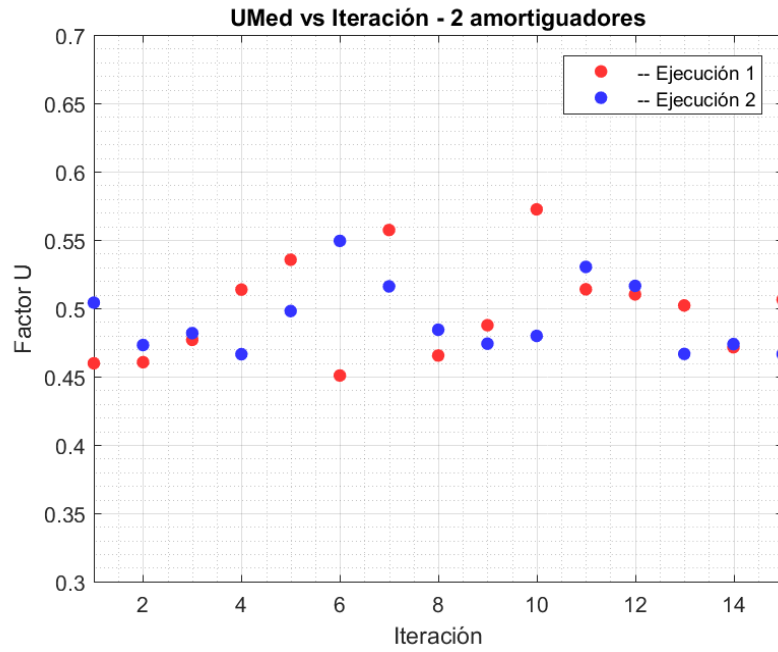
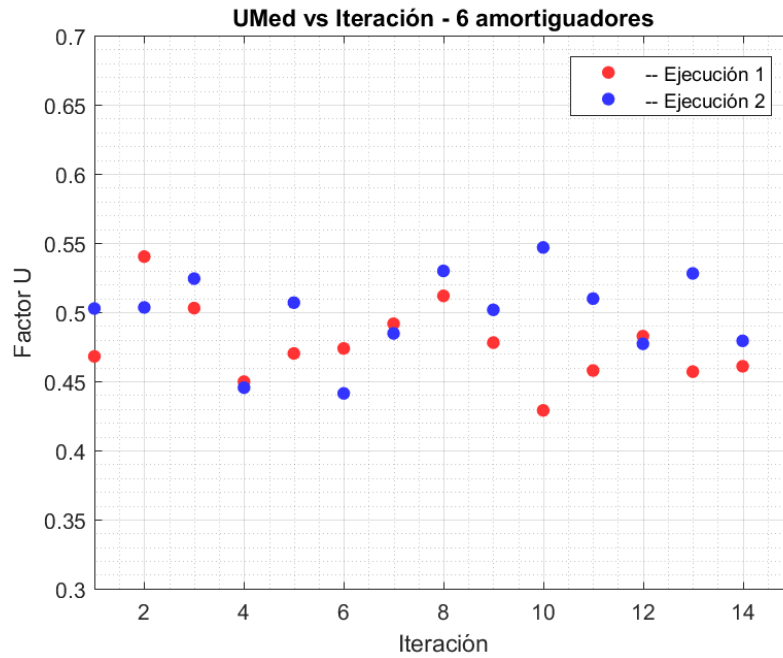


Figura 49. Factor UMed vs iteración con 6 amortiguadores – Ejemplo 2.



ANEXO C. ANÁLISIS TERCER EJEMPLO NUMÉRICO

Parámetros de optimización:

Ejecuciones 10

Iteraciones 15

Partículas 20

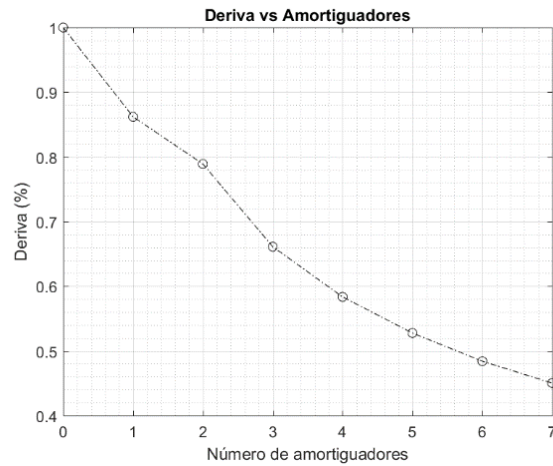
El espacio de búsqueda de las partículas se presenta en la Tabla 7, para un amortiguador se tienen 64 posibles ubicaciones, mientras que para 7 amortiguadores se tienen 621 millones de posibles ubicaciones para el grupo de amortiguadores. En el Ejemplo II se encontraron beneficios al aumentar el número de partículas en relación con el Ejemplo I, por lo tanto, se aumenta la población a 20 partículas, además de emplear de nuevo 10 ejecuciones, dando por sentado que se le da prioridad a la calidad del análisis que al tiempo computacional empleado.

Tabla 7. Aumento del espacio de búsqueda para diferente cantidad de amortiguadores para el ejemplo 3.

Amortiguadores	Combinaciones
1	64
2	2.016
3	41.664
4	635.376
5	7.624.512
6	74.974.368
7	621.216.192

El análisis del Ejemplo III presenta un resultado diferente a los obtenidos anteriormente: a medida que se aumenta la cantidad de amortiguadores, también lo hace la deriva. Es necesario recordar que se aumentó la capacidad del algoritmo al aumentar la población, y esto puede ser la causa de tal comportamiento. Otra posible repuesta al comportamiento en la “convergencia” de la deriva, es que la configuración geométrica del Ejemplo III es diferente a la de los Ejemplos I y II puesto que la geometría del Ejemplo III es de varias luces, pero pocos pisos, mientras que los Ejemplos I y II presentan gran cantidad de pisos en relación con la cantidad de luces.

Figura 50. Convergencia de la deriva - Ejemplo 3



Cuando se emplean 20 partículas se da una convergencia casi inmediata para 1 amortiguador, ya que, en la 3 iteración, las 10 ejecuciones llegan al mismo valor; pero si se aumenta la cantidad de amortiguadores las gráficas se hacen más inestables, en la Figura 51 a la Figura 57, se presenta esta información. Este comportamiento se vio en el Ejemplo I; sin embargo, en este caso la deriva se reduce en cada caso. Esto indica que se debe hacer un análisis mayor del efecto de las partículas en la solución del algoritmo para ver cómo influye la cantidad en este resultado.

Figura 51. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 1 amortiguador - Ejemplo 3

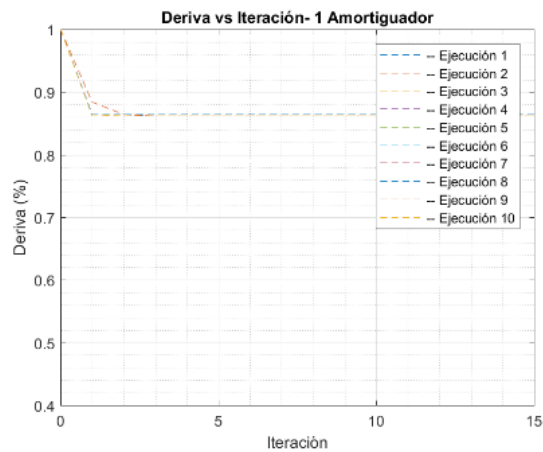


Figura 52. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 2 amortiguadores - Ejemplo 3

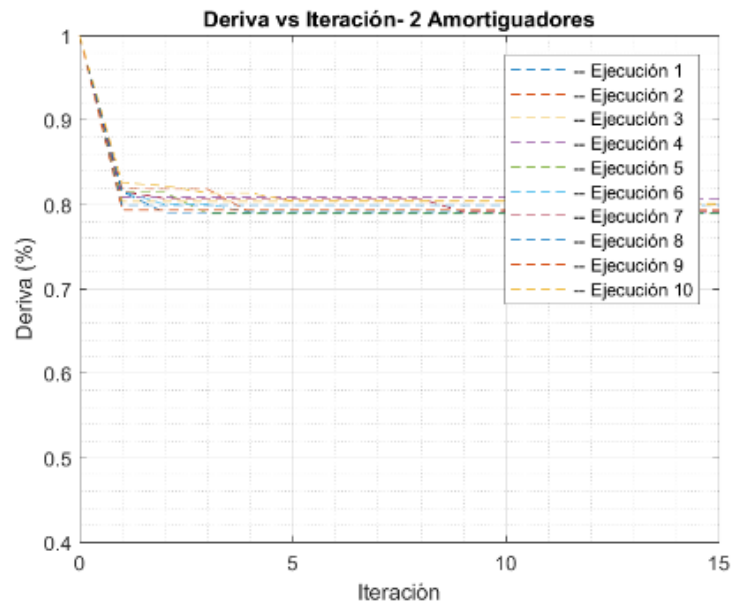


Figura 53. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 3 amortiguadores - Ejemplo 3

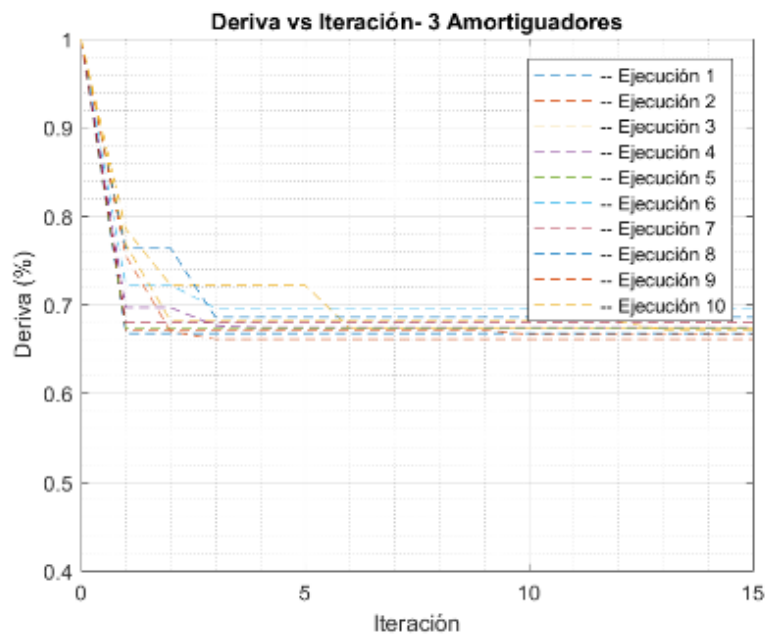


Figura 54. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 4 amortiguadores - Ejemplo 3

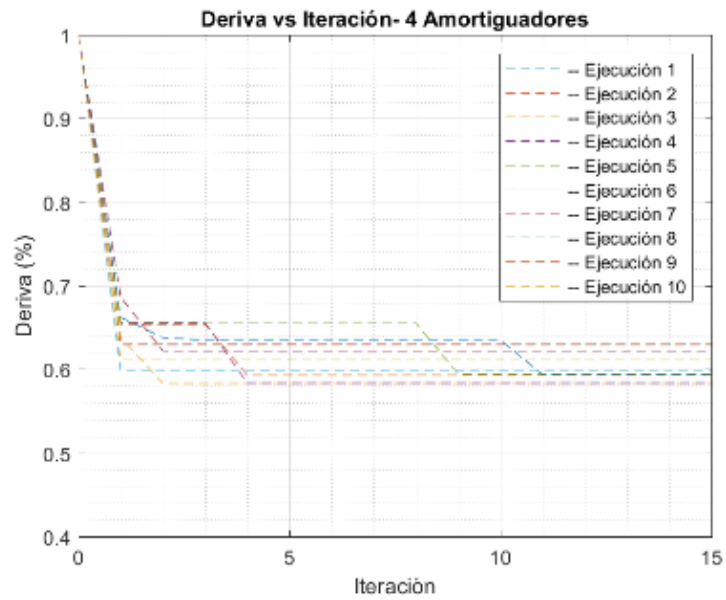


Figura 55. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 5 amortiguadores - Ejemplo 3

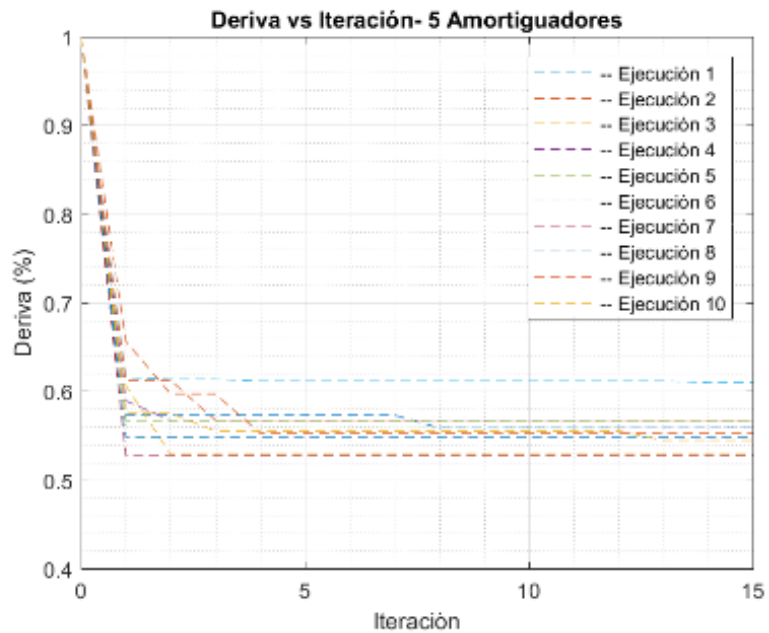


Figura 56. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 6 amortiguadores - Ejemplo 3

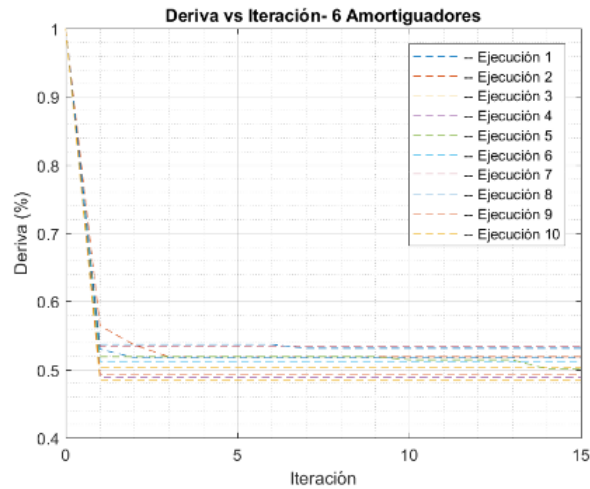
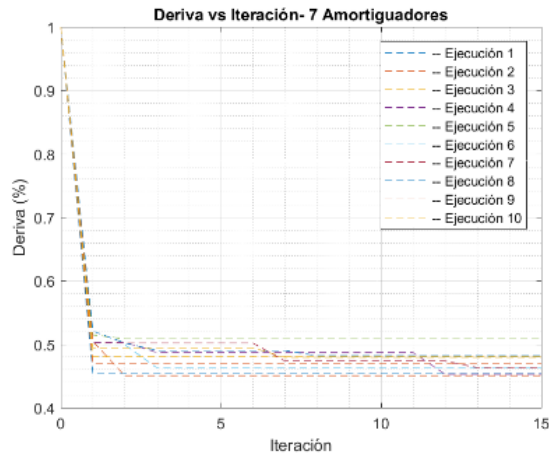


Figura 57. Deriva vs iteración para las 10 ejecuciones con 7 amortiguadores - Ejemplo 3



El factor de unificación se presenta para 3 y 5 amortiguadores y se encuentra que los comportamientos del UBest (Figura 58 y Figura 59) y UMed (Figura 60 y Figura 61) son los mismos que en los ejemplos anteriores, lo que traduce en que el Factor de Unificación para este tipo de problemas no discrimina entre la exploración y la explotación puesto que el UBest y el UMed presentan comportamientos cuyas tendencias indican lo afirmado.

Figura 58. Factor UBest vs iteración con 3 amortiguadores – Ejemplo 3.

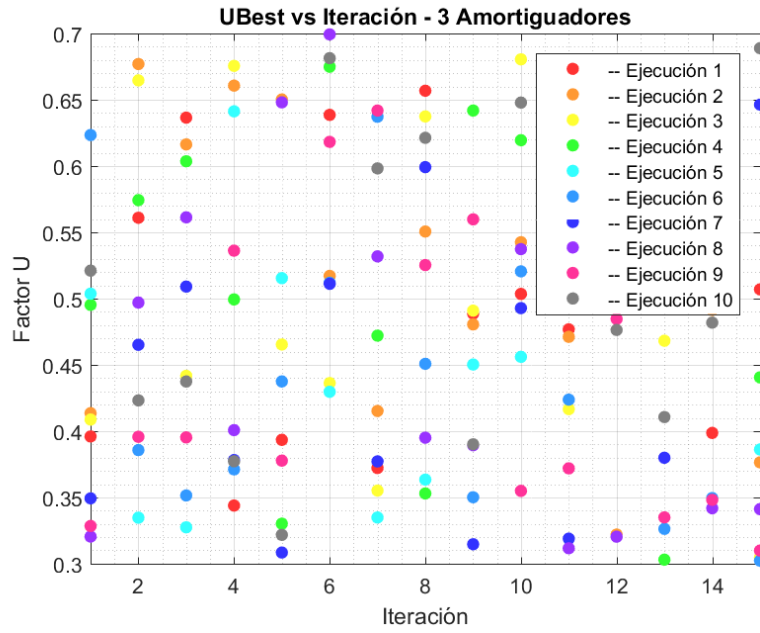


Figura 59. Factor UBest vs iteración con 5 amortiguadores – Ejemplo 3.

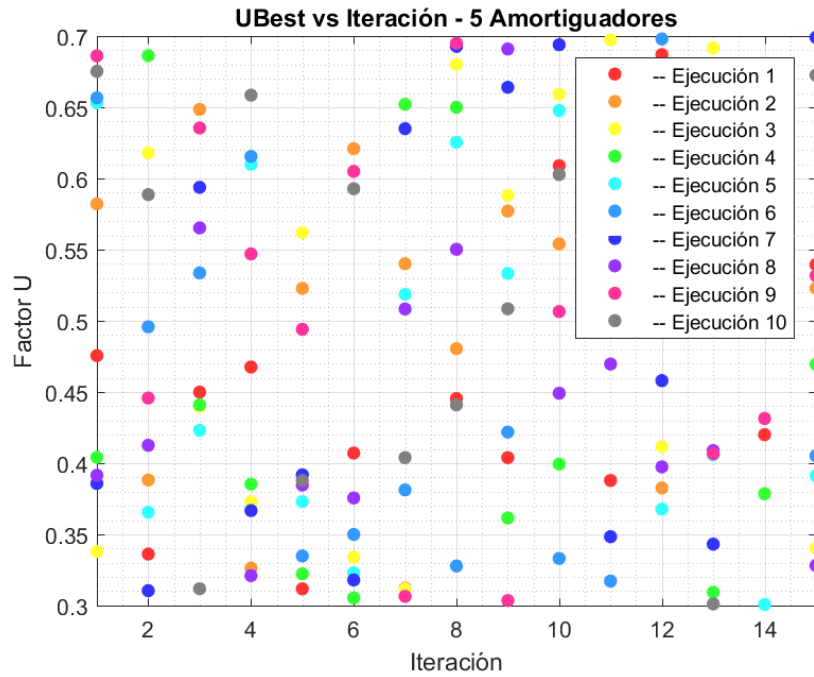


Figura 60. Factor UMed vs iteración con 3 amortiguadores – Ejemplo 3.

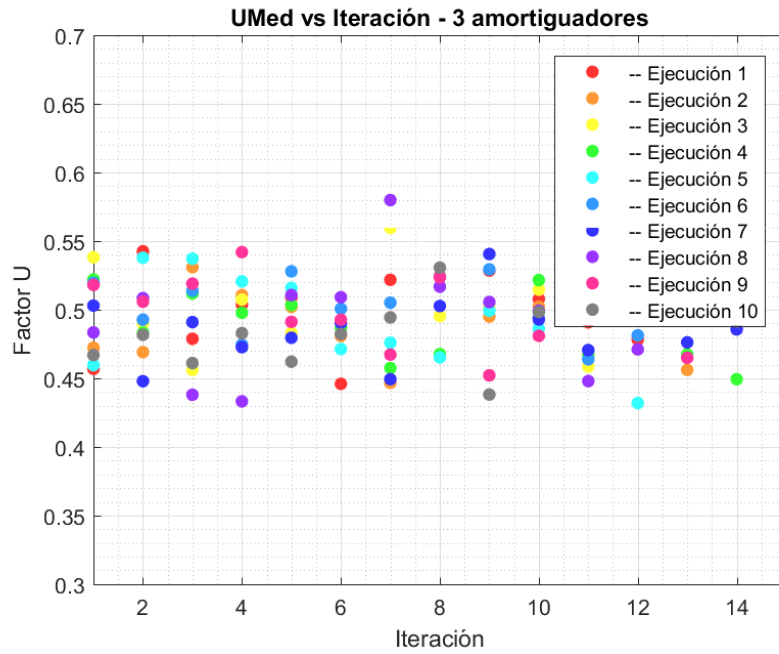
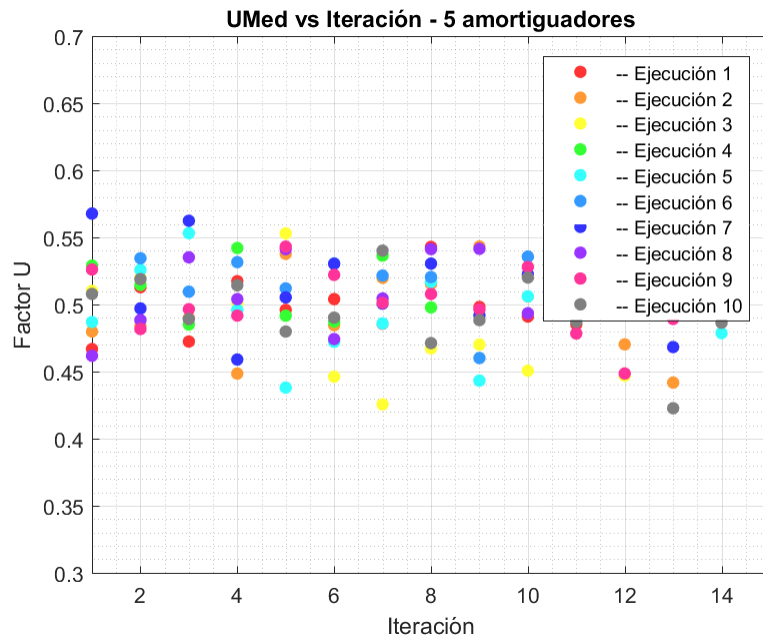


Figura 61. Factor UMed vs iteración con 5 amortiguadores – Ejemplo 3.



Para el análisis de los 3 Ejemplos Numéricos se cuantifica el costo computacional mediante el tiempo de ejecución de cada análisis. Se emplearon 3 equipos con las siguientes características:

Equipo 1:

Procesador	AMD A10-5745M
Capacidad de procesamiento	2.1 GHz
RAM	8Gb
1 núcleo	

Equipo 2:

Procesador	Intel Core i7-7500U
Capacidad de procesamiento	3.5 GHz
RAM	10Gb
4 núcleos	

Equipo 3:

Procesador	Intel Core i7 1 generación
Capacidad de procesamiento	2.2 GHz
RAM	4Gb
2 núcleos	

Las tablas 8,9 y 10 presentan el equipo en el que se realizó cada uno de los análisis indicados en este anexo, y se indica el tiempo de ejecución. Los tiempos de análisis varían entre 1 hora y 12 minutos, y 8 horas y 47 minutos, siendo este último un caso excepcional, puesto que la mayoría tiene tiempos promedio de 2 horas. Estos resultados indican que se puede aumentar la calidad del algoritmo de optimización sin afectar considerablemente el tiempo de análisis siempre y cuando se emplee un equipo con gran capacidad.

Tabla 8. Tiempos de ejecución para el ejemplo 1

Amortiguadores	Equipo	Tiempo de ejecución
1	Equipo 1	2 horas 10 Min
2	Equipo 1	2 horas 5 Min
3	Equipo 1	2 horas 10 Min
4	Equipo 2	2 horas 11 Min
5	Equipo 2	2 horas 21 Min
6	Equipo 2	8 horas 47 Min
7	Equipo 2	2 horas 39 Min

Tabla 9. Tiempos de ejecución para el ejemplo 2

Amortiguadores	Equipo	Tiempo de ejecución
1	Equipo 1	1 hora 26 Minutos
2	Equipo 1	1 hora 30 Minutos
3	Equipo 1	1 hora 52 Minutos
4	Equipo 1	1 hora 49 Minutos
5	Equipo 1	2 horas 8 Minutos
6	Equipo 2	1 hora 12 Minutos
7	Equipo 2	1 hora 25 Minutos

Tabla 10. Tiempos de ejecución para el ejemplo 3

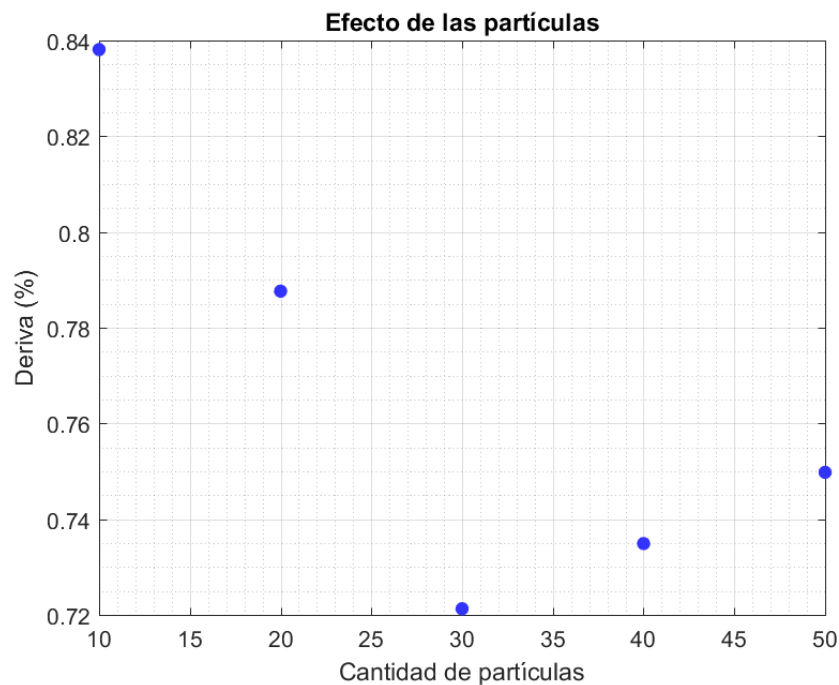
Amortiguadores	Equipo	Tiempo de ejecución
1	Equipo 2	1 hora 56 Minutos
2	Equipo 2	3 horas 14 Minutos
3	Equipo 2	3 horas 17 Minutos
4	Equipo 2	3 horas 12 Minutos
5	Equipo 2	3 horas 45 Minutos
6	Equipo 2	3 horas 42 Minutos
7	Equipo 2	3 horas 49 Minutos

ANEXO D. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS PARTÍCULAS

Para estudiar el comportamiento de la respuesta en relación con la cantidad de partículas empleadas en el análisis, se efectuó el proceso de optimización para el ejemplo 1, para diferente cantidad de partículas: 10, 20, 30, 40 y 50. Para cada uno de los análisis se emplearon 20 iteraciones y 3 ejecuciones.

Una idea inicial basada en el comportamiento natural de las búsquedas, podría sugerir que a mayor número de partículas se podría encontrar una mejor solución con la misma cantidad de iteraciones; sin embargo, si se observa la Figura 62, que representa la mayor reducción de las 3 ejecuciones para cada cantidad de partículas, se puede observar que aunque la deriva con 50 partículas es menor que con 10 partículas, la deriva para 50 partículas es a su vez mayor que para 30, es decir, se observa que 30 partículas es la cantidad que otorga la mayor contribución en la reducción de la deriva.

Figura 62. Efecto de las partículas en la reducción de la deriva



La figura 63 a la Figura 67, que representan la deriva en cada iteración obtenida por una población determinada, sugiere que las curvas que tienen la mayor variación son las relacionadas a 10, 20 y 50 partículas. En el caso de 30 y 40 partículas se observa que las curvas son más estables puesto que se encuentran más cerca entre sí, si se tiene en cuenta que 30 y 40 partículas son también los valores que más contribuyen en la reducción (Figura 62), se puede presumir que la estabilidad de las curvas tiene un factor importante en la determinación del valor óptimo. Es necesario realizar un estudio más profundo para interpretar el significado de la aparente relación entre la estabilidad de la curva y la determinación del valor óptimo.

Figura 63. Deriva vs iteración para 10 partículas.

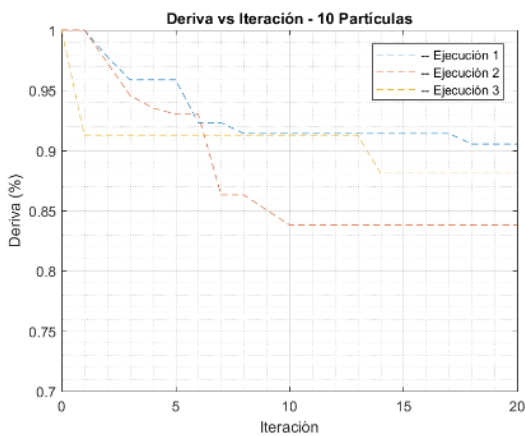


Figura 64. Deriva vs iteración para 20 partículas.

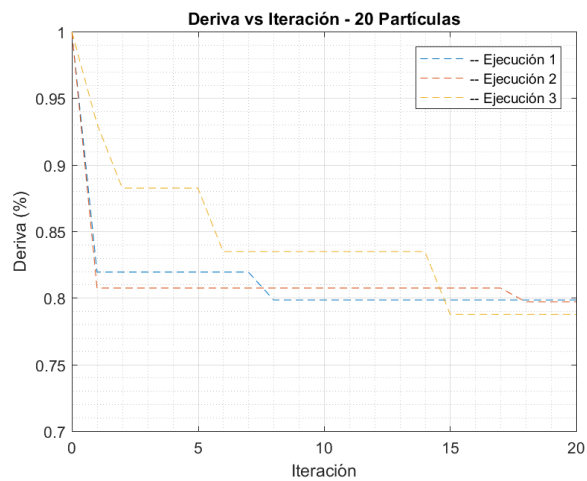


Figura 65. Deriva vs iteración para 30 partículas.

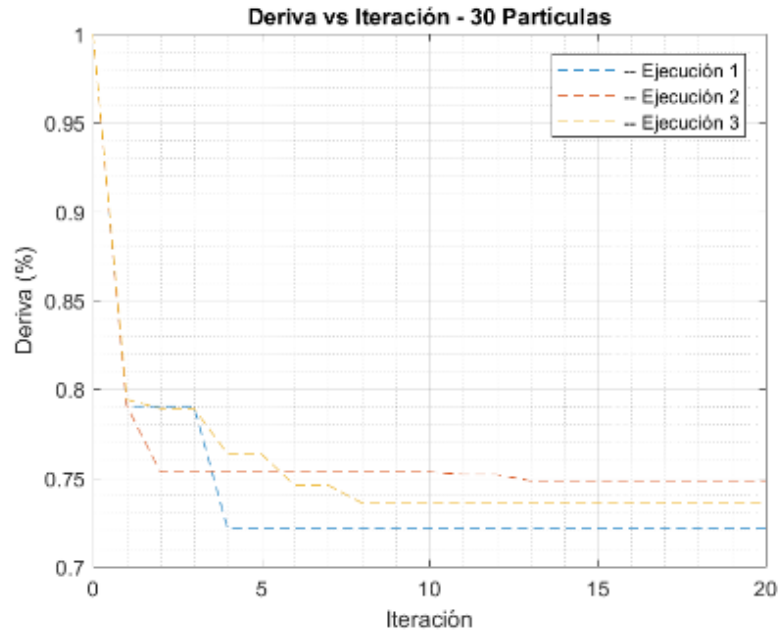


Figura 66. Deriva vs iteración para 40 partículas.

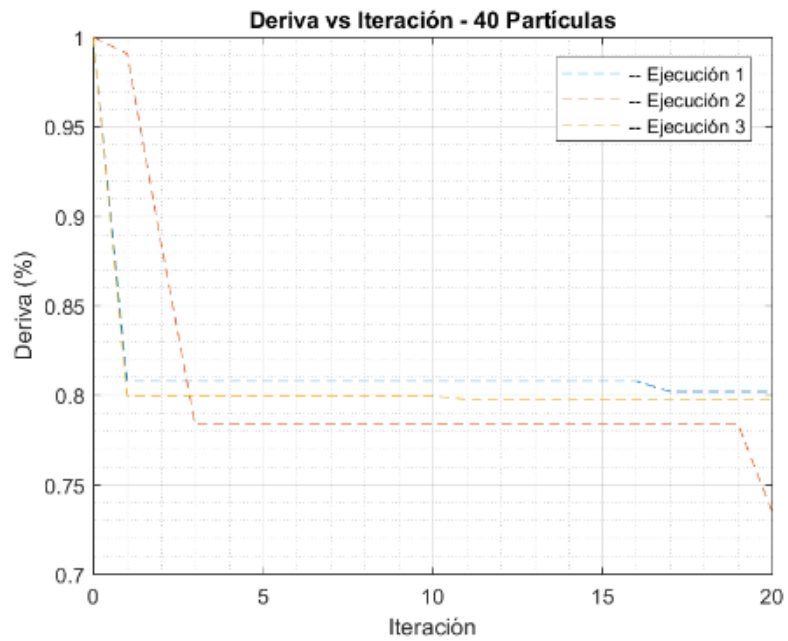
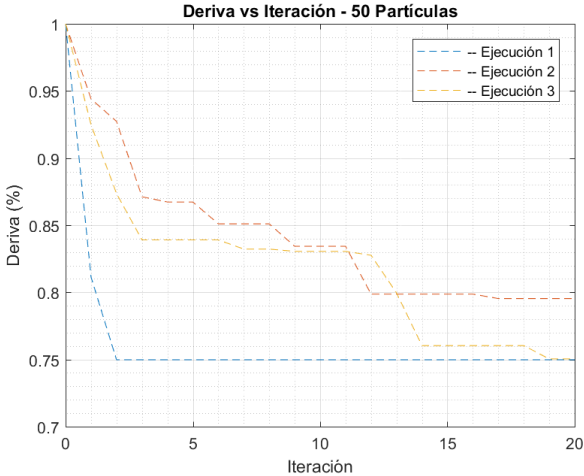


Figura 67. Deriva vs iteración para 50 partículas.



ANEXO E. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL SISMO EN LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL

Para estudiar la afectación de la configuración estructural y la deriva debido al sismo seleccionado, se realizó el proceso de optimización para el Ejemplo 1, utilizando 5 amortiguadores, considerando los 10 sismos del estudio de Zonificación Sismo geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Los sismos anteriormente mencionados se escalaron a una magnitud de 0.35g, puesto que las características de la estructura del ejemplo 1 hacen que la deriva sea de 1% para el sismo del centro escalado a este mismo valor, de esta forma se puede comparar el valor de la deriva en los diferentes casos.

Parámetros de optimización:

Ejecuciones 3

Iteraciones 20

Partículas 20

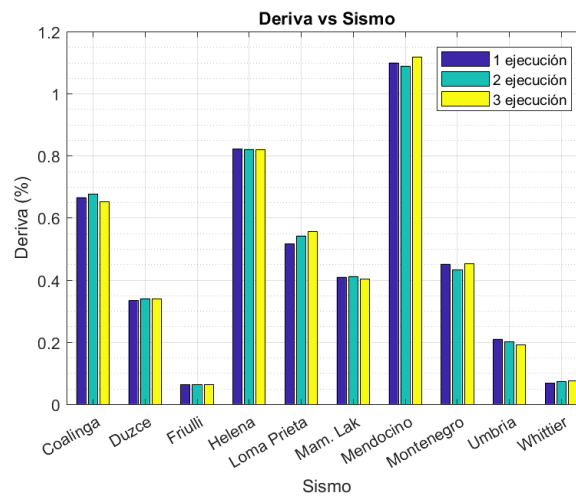
La tabla 11. permite observar que, aunque los sismos están escalados a la misma magnitud, se presentan valores muy diferentes en las derivas después de la optimización, llegando a tener apenas el 19% de la deriva para el sismo del centro. Esto se debe a que, al someter la estructura a cada uno de estos sismos, la deriva sin ningún tipo de sistema de control estructural es diferente a 1%. La principal razón de este fenómeno es que la energía que el sismo entrega a una estructura depende de sí mismo, y aunque los sismos se escalen a una misma magnitud, no se garantiza el mismo resultado.

Tabla 11. Derivas para cada sismo de la microzonificación después de la optimización.

SISMO	DERIVA
Coalinga	0,652%
Duzce	0,334%
Friulli	0,063%
Helena	0,821%
L. Prieta	0,517%
Mam. Lak.	0,403%
Mendocino	1,089%
Montenegro	0,433%
Umbria	0,192%
Whittier	0,068%

Para las 3 ejecuciones se obtuvieron diferentes configuraciones estructurales; sin embargo, todas tienen valores similares, esto se puede apreciar claramente en la figura 68, aquí se encuentra que la variación en la deriva para cada ejecución es baja. También se puede observar que la principal diferencia en la deriva se debe al sismo usado.

Figura 68. Comparación Deriva – Iteración para cada sismo del estudio de microzonificación



Aunque el valor de la deriva para cada sismo es diferente, luego del proceso de optimización se encuentra que cada sismo tiende a una distribución similar en cada una de las tres ejecuciones, esto es apreciable en las figuras 69 y 70.

- Sismo Coalinga: Los amortiguadores se distribuyen únicamente en la parte superior de la estructura.
- Sismo Duzce: Los amortiguadores se distribuyen principalmente en el centro de la estructura; sin embargo, también se ubican en el extremo superior e inferior.
- Sismo Friulli: Los amortiguadores se ubican principalmente en la parte superior de la estructura; sin embargo, uno o dos se ubican en el centro.
- Sismo Helena: Los amortiguadores se ubican únicamente en las partes superior e inferior de la estructura.
- Sismo L. Prieta: Los amortiguadores se ubican en toda la estructura.
- Sismo Mam. Lak: Los amortiguadores se ubican en toda la estructura.
- Sismo Mendocino: Los amortiguadores se ubican principalmente en la parte superior de la estructura.
- Sismo Montenegro: Los amortiguadores se ubican en toda la estructura.
- Sismo Umbria: Los amortiguadores se ubican principalmente en el centro y parte superior de la estructura.
- Sismo Whittier: Los amortiguadores se ubican principalmente en el centro y parte superior de la estructura.

Figura 69. Configuraciones estructurales para las 3 ejecuciones en cada sismo de microzonificación sísmica – Parte 1.

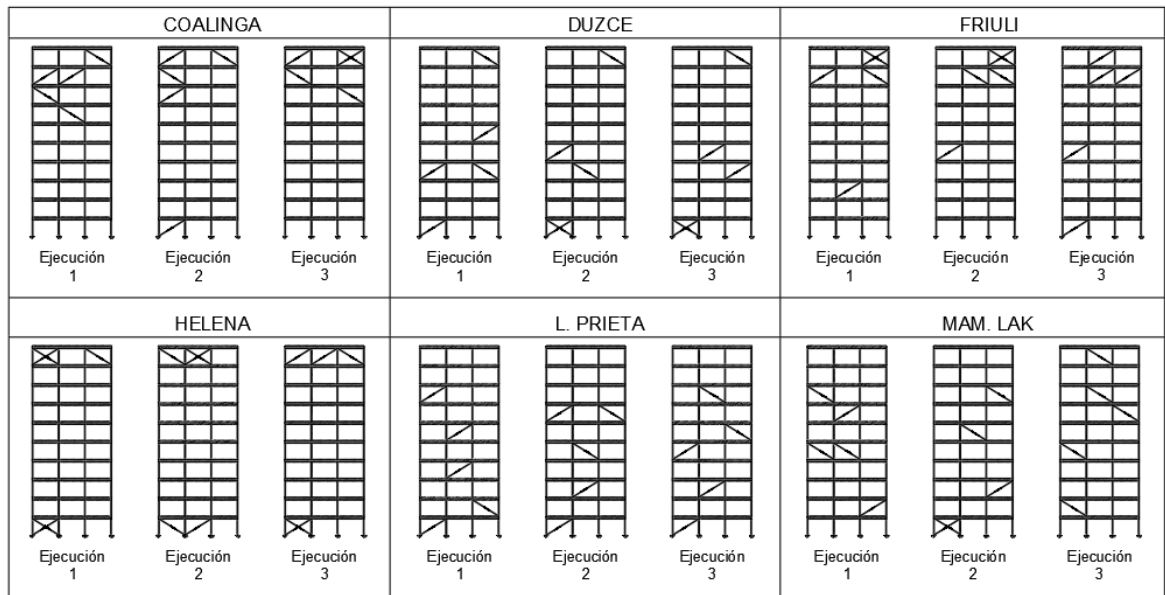
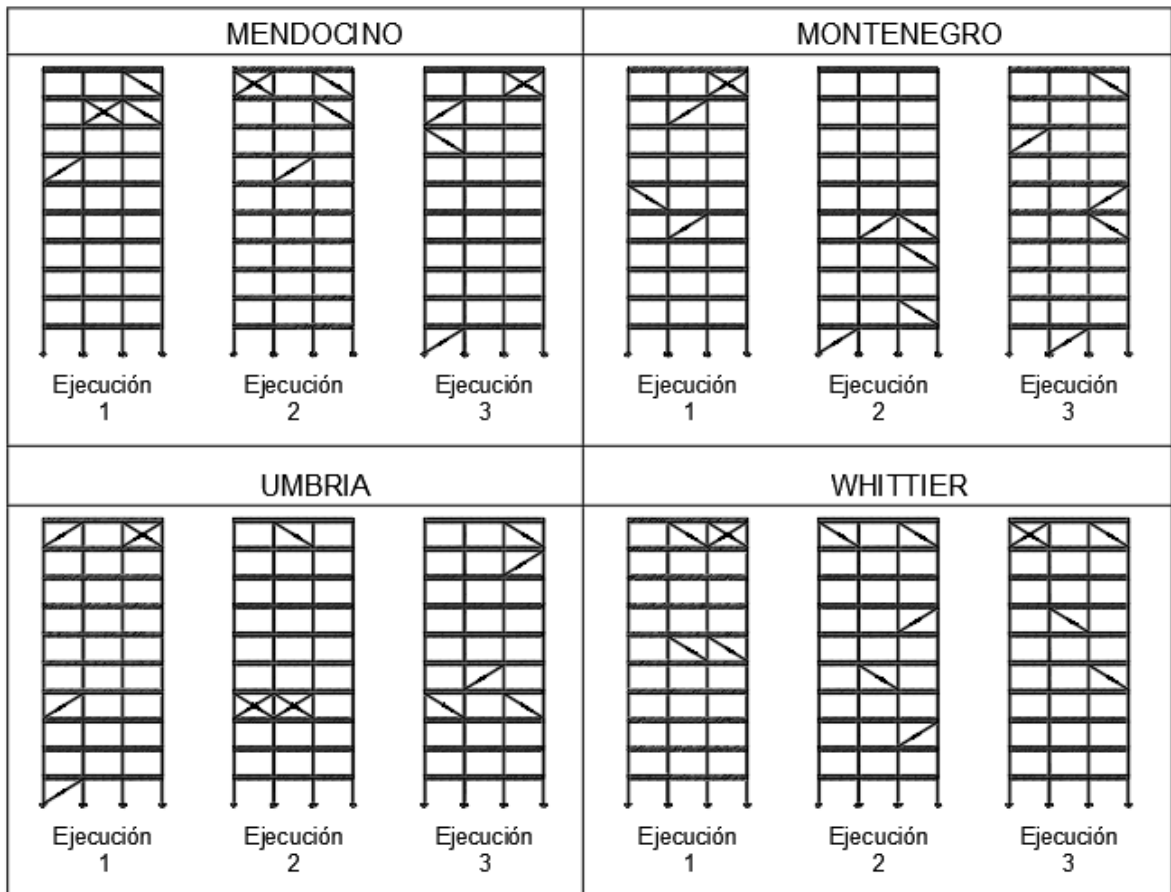


Figura 70. Configuraciones estructurales para las 3 ejecuciones en cada sismo de microzonificación sísmica – Parte 2.



ANEXO F. LICENCIAS

Tabla 12. Licencias

Software	Extensión	Uso	Licencia	Tipo	Suscriptor
Microsoft Office Word 2016	.docx	Editor de texto	00202-50795-19213-AA456	Educación	Ricardo Galvis
Microsoft Office Power Point 2016	.xlsx	Editor de diapositivas	00202-50795-19213-AA456	Educación	Ricardo Galvis
Microsoft Office Excel 2016	.pptx	Editor de cálculos	00202-50795-19213-AA456	Educación	Ricardo Galvis
Adobe Acrobat X	.pdf	Convertor formato edición de texto	-	Software libre	Ricardo Galvis
Matlab	.m	Editor de programación	40550867	Estudiantil	Ricardo Galvis
OpenSees	.tcl	Análisis estructural	-	Software libre	Ricardo Galvis
SAP2000	.sbd	Análisis estructural	Licenciado por el grupo INME UIS	Educación	INME UIS