

**OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DE EDIFICACIONES DE ACERO Y
AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO MEDIANTE UN ALGORITMO
GENÉTICO MODIFICADO**

JESÚS ALBERTO SUÁREZ PERDOMO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
CALI – VALLE DE CAUCA
2023**

**OPTIMIZACIÓN SIMULTÁNEA DE EDIFICACIONES DE ACERO Y
AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO MEDIANTE UN ALGORITMO
GENÉTICO MODIFICADO**

JESÚS ALBERTO SUÁREZ PERDOMO

**DIRECTOR
PETER THOMSON, PhD**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA, ÉNFASIS EN INGENIERÍA CIVIL**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
CALI – VALLE DE CAUCA
2023**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
1. OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	13
1.1. OBJETIVO GENERAL:	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	13
2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO	22
2.1.1. Análisis De Palabras Clave	27
3. MARCO TEÓRICO	30
3.1. SISTEMAS DE CONTROL SÍSMICO	31
3.1.1. Sistemas de control pasivo con comportamiento viscoso y viscoelástico....	32
3.1.1.1. Disipadores Viscoelásticos	33
3.1.1.2. Disipadores de Fluido Viscoso.....	34
3.1.2. DISPOSICIÓN DE AMORTIGUADORES	38
3.1.3. DISEÑO DE AMORTIGUADORES SEGÚN NSR-10, ASCE 7-16.	42
3.2. OPTIMIZACIÓN	48
3.2.1. Función Objetivo.....	50
3.2.2. Restricciones.....	51
3.3. TRABAJO COMPUTACIONAL EN PARALELO	52
3.4. ALGORITMO GENÉTICO (AG).....	53
4. ALGORITMO GENÉTICO MODIFICADO (AGM).	55
4.1. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE AGM	56
4.1.1. Problemas Con Restricciones.....	57
5. FORMULACIÓN Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS CON AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO.	59

5.1.	VARIABLES DE DISEÑO.	64
5.2.	PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS CON AMOTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO.	64
6.	INTERFAZ GRÁFICA DE ACOPLAMIENTO CON ETABS®	65
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
7.1.	EDIFICIO DE PRUEBA – PÓRTICO DE ACERO DE 5 PISOS.	71
7.2.	EDIFICIO DE PRUEBA – PÓRTICO DE ACERO DE 9 PISOS CON RETROCESO EN ALTURA.	89
7.3.	EDIFICIO REAL	102
8.	CONCLUSIONES	124
9.	TRABAJOS FUTUROS	125
	REFERENCIAS	126

Lista de Figuras

Figura 1 Métodos de optimización [10].	15
Figura 2 Coocurrencia de palabras clave.	28
Figura 3 Coocurrencia de palabras con Particle Swarm Optimization (Izquierda); b) Genetic Algorithms (Derecha).	29
Figura 4 Coocurrencia de palabras con Damping.	29
Figura 5 Sistemas de control estructural [37].	31
Figura 6 Ciclos de histéresis idealizados de amortiguador viscoelástico (a) y de fluido viscoso (b) [34].	32
Figura 7 Configuración típica de un disipador viscoelástico [33].	33
Figura 8 Disipadores de fluido viscoso [33].	34
Figura 9 Relación Fuerza-Velocidad de un amortiguador de fluido viscoso de comportamiento lineal y no lineal.	36
Figura 10 Energía absorbida por amortiguadores con diferente valor de α [35].	36
Figura 11 Modelo riostra-amortiguador teoría de Maxwell [37].	37
Figura 12 Amortiguadores dispuestos en marco tipo <i>Chevron</i> [35].	38
Figura 13 Amortiguadores en diagonal [35].	39
Figura 14 Amortiguadores dispuestos en marco tipo palanca (<i>Toggle Brace Frame</i>) [35].	40
Figura 15 Amortiguadores en pórticos de espacio abierto (<i>Open Space Systems</i>) [35].	40
Figura 16 Amortiguadores en sistema estabilizante (<i>Outrigger Systems</i>) [35].	41
Figura 17 Amortiguadores con sistema de aislamiento de base [35].	42
Figura 18 Vista en planta edificio de 5 pisos.	72
Figura 19 Vista en alzada del pórtico resistente a momento edificio 5 pisos.	72
Figura 20 Resultados de perfiles, ubicación y cantidad de amortiguadores para edificio de 5 pisos.	83
Figura 21 Nombre único de elementos modelo Etabs - Edificio de cinco pisos.	84
Figura 22 Vista en planta edificio de 9 pisos con retroceso en altura.	89
Figura 23 Vista en alzada del pórtico resistente a momento edificio 9 pisos con retroceso en altura.	90
Figura 24 Resultados de perfiles, ubicación y cantidad de amortiguadores para edificio de 9 pisos con retroceso en altura.	91
Figura 25 Nombre único de elementos modelo Etabs® - Edificio de 9 pisos con retroceso en altura.	93
Figura 26 Vista en planta edificio de 5 pisos.	102
Figura 27 Vista en alzada del pórtico resistente a momento edificio 5 pisos.	103
Figura 28 Vista en alzada - Ejes externos dirección X.	103
Figura 29 Vista en alzada - Ejes internos dirección X.	103
Figura 30 Resultados de perfiles, ubicación y cantidad de amortiguadores para edificio de 3 pisos – ejes extremos dirección X.	114
Figura 31 Resultados de perfiles, ubicación y cantidad de amortiguadores para edificio de 3 pisos – ejes internos dirección Y.	114

Figura 32 Nombre único de elementos modelo Etabs - Edificio de tres pisos – ejes externos dirección X.	115
Figura 33 Nombre único de elementos modelo Etabs - Edificio de tres pisos – ejes internos dirección Y.	116

Lista de Gráficas

Gráfica 1 Número de documentos por año.	24
Gráfica 2 Número de documentos por autor.	25
Gráfica 3 Número de documentos por país.	26
Gráfica 4 Número de documentos por área temática.	27
Gráfica 5 Espectro de diseño para sismo de diseño (DBE) y sismo máximo esperado (MCE _R).	73
Gráfica 6 Corrección a línea base sismo 1995-02-08 - 18:40:25 - VALLE DEL CAUCA – CALIMA.	75
Gráfica 7 Corrección a línea base sismo 1996-11-17 - 18:44:15 - VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO.	76
Gráfica 8 Corrección a línea base sismo 1997-12-11 - 07:56:29- VALLE DEL CAUCA – TULUA.	76
Gráfica 9 Corrección a línea base sismo 1999-07-19 - 16:13:17 - VALLE DEL CAUCA – TRUJILLO.	76
Gráfica 10 Corrección a línea base sismo 2000-04-03 - 09:52:46 - VALLE DEL CAUCA – GINEBRA.	77
Gráfica 11 Corrección a línea base sismo 2001-09-22 - 03:23:39 - VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO.	77
Gráfica 12 Corrección a línea base sismo 2004-01-15 - 00:25:05- VALLE DEL CAUCA – BUGALAGRANDE.	77
Gráfica 13 Intensidad de área – Sismo 1995-02-08 - 18:40:25 - VALLE DEL CAUCA – CALIMA.	78
Gráfica 14 Intensidad de área – sismo 1996-11-17 - 18:44:15 - VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO.	78
Gráfica 15 Intensidad de área - sismo 1997-12-11 - 07:56:29- VALLE DEL CAUCA – TULUA.	79
Gráfica 16 Intensidad de área - sismo 1999-07-19 - 16:13:17 - VALLE DEL CAUCA – TRUJILLO.	79
Gráfica 17 Intensidad de área - sismo 2000-04-03 - 09:52:46 - VALLE DEL CAUCA – GINEBRA.	79
Gráfica 18 Intensidad de área - sismo 2001-09-22 - 03:23:39 - VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO.	80
Gráfica 19 Intensidad de área – sismo 2004-01-15 - 00:25:05- VALLE DEL CAUCA – BUGALAGRANDE.	80
Gráfica 20 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (DBE)	81

Gráfica 21 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (MCE _R).....	81
Gráfica 22 Convergencia estructura de 5 pisos.	82
Gráfica 23 Deriva de piso en la dirección de análisis - Edificio de 5 pisos.....	83
Gráfica 24 Gráficas fuerza axial vs deformación: a) Sismo (MCE)THSx1, b) Sismo (MCE)THSx2, c) Sismo (MCE)THSx3, d) Sismo (MCE)THSx4, e) Sismo (MCE)THSx5, f) Sismo (MCE)THSx6, g) Sismo (MCE)THSx7.	87
Gráfica 25 Energía disipada por estructura optimizada equipada con amortiguadores de fluido viscoso.....	89
Gráfica 26 Convergencia estructura de 9 pisos con retroceso en altura.	91
Gráfica 27 Deriva de piso en la dirección de análisis - Edificio de 9 pisos con retroceso en altura.	92
Gráfica 28 Gráficas fuerza axial vs deformación: a) Sismo (MCE)THSx1, b) Sismo (MCE)THSx2, c) Sismo (MCE)THSx3, d) Sismo (MCE)THSx4, e) Sismo (MCE)THSx5, f) Sismo (MCE)THSx6, g) Sismo (MCE)THSx7.	100
Gráfica 29 Energía disipada por estructura optimizada equipada con amortiguadores de fluido viscoso.....	102
Gráfica 30 Espectro de diseño para sismo de diseño (DBE) y sismo máximo esperado (MCER).	104
Gráfica 31 Corrección a línea base sismo EW 1995-02-08 - 18:40:25 - VALLE DEL CAUCA – CALIMA.	105
Gráfica 32 Corrección a línea base sismo EW 1996-11-17 - 18:44:15 - VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO.	106
Gráfica 33 Corrección a línea base sismo EW 1997-12-11 - 07:56:29- VALLE DEL CAUCA – TULUA.....	106
Gráfica 34 Corrección a línea base sismo EW 1999-07-19 - 16:13:17 - VALLE DEL CAUCA – TRUJILLO.	106
Gráfica 35 Corrección a línea base sismo EW 2000-04-03 - 09:52:46 - VALLE DEL CAUCA – GINEBRA.	107
Gráfica 36 Corrección a línea base sismo EW 2001-09-22 - 03:23:39 - VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO.	107
Gráfica 37 Corrección a línea base sismo EW 2004-01-15 - 00:25:05- VALLE DEL CAUCA – BUGALAGRANDE.....	107
Gráfica 38 Intensidad de área – Sismo EW 1995-02-08 - 18:40:25 - VALLE DEL CAUCA – CALIMA.	108
Gráfica 39 Intensidad de área – sismo EW 1996-11-17 - 18:44:15 - VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO.	108
Gráfica 40 Intensidad de área – sismo EW 1997-12-11 - 07:56:29- VALLE DEL CAUCA – TULUA.....	109
Gráfica 41 Intensidad de área – sismo EW 1999-07-19 - 16:13:17 - VALLE DEL CAUCA – TRUJILLO.	109
Gráfica 42 Intensidad de área - sismo EW 2000-04-03 - 09:52:46 - VALLE DEL CAUCA – GINEBRA.	109
Gráfica 43 Intensidad de área – sismo EW 2001-09-22 - 03:23:39 - VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO.	110

Gráfica 44 Intensidad de área – sismo EW 2004-01-15 - 00:25:05- VALLE DEL CAUCA – BUGALAGRANDE.....	110
Gráfica 45 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (DBE) – dirección Norte-Sur.	111
Gráfica 46 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (MCE _R) – dirección Norte-Sur.	111
Gráfica 47 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (DBE) – dirección Este-Oeste.....	112
Gráfica 48 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (MCE _R) – dirección Este-Oeste.....	112
Gráfica 49 Convergencia estructura de 3 pisos.	113
Gráfica 50 Deriva de piso en la dirección de análisis - Edificio de 3 pisos.....	115
Gráfica 51 Gráficas fuerza axial vs deformación: a) Sismo (MCE)THSx1, b) Sismo (MCE)THSx2, c) Sismo (MCE)THSx3, d) Sismo (MCE)THSx4, e) Sismo (MCE)THSx5, f) Sismo (MCE)THSx6, g) Sismo (MCE)THSx7.....	121
Gráfica 52 Energía disipada por estructura optimizada equipada con amortiguadores de fluido viscoso.....	123

Lista de Tablas

Tabla 1 Funciones de prueba con restricciones.	57
Tabla 2 Desempeño del AGM en funciones con restricciones.	58
Tabla 3 Parámetros para creación de espectro de diseño y MCE_R	73
Tabla 4 Criterios de búsqueda de movimientos sísmicos.	74
Tabla 5 Información de registros sísmicos.	75
Tabla 6 Promedio índices de sobre esfuerzo elementos estructurales - Edificio de 5 pisos.	84
Tabla 7 Propiedades amortiguadores - edificio de 5 pisos.	85
Tabla 8 Dispositivos de amortiguamiento proporcionados por Taylor Devices Inc.	87
Tabla 9 Promedio índices de sobre esfuerzo elementos estructurales - Edificio de 9 pisos con retroceso en altura.	93
Tabla 10 Propiedades amortiguadores - edificio de 9 pisos con retroceso en altura.	96
Tabla 11 Dispositivos de amortiguamiento proporcionados por Taylor Devices Inc.	100
Tabla 12 Parámetros para creación de espectro de diseño y MCE_R de acuerdo con el título A de la NSR-10.	104
Tabla 13 Promedio índices de sobre esfuerzo elementos estructurales - Edificio de tres pisos.	116
Tabla 14 Propiedades amortiguadores - edificio de tres pisos.	119
Tabla 15 Dispositivos de amortiguamiento proporcionados por <i>Taylor Devices Inc.</i>	122

RESUMEN

La optimización estructural de edificaciones generalmente se basa según criterios y experiencias del diseñador, motivo por el cual se pueden obtener diferentes diseños para un mismo edificio, más aún cuando se requiere un desempeño elevado de comportamiento estructural, lo que conlleva al uso de sistemas de protección sísmica (SPS). En Colombia, generalmente el uso de los SPS representa un costo elevado, por lo cual no han llegado a ser ampliamente implementados. Debido a lo anterior se ha venido planteando en los últimos años el uso de métodos metaheurísticos que permita encontrar diseños optimizados de estructuras con SPS bajo criterios predefinidos que cumplan parámetros normativos y constructivos.

En el presente trabajo inicialmente se realiza una revisión del estado del arte de los algoritmos metaheurísticos aplicados a la optimización de estructuras equipadas con sistemas de control, seguidamente se proponen modificaciones a un algoritmo genético con el objetivo de mejorar su capacidad de convergencia en el proceso de optimización, lo cual es comprobado con problemas *Berchmans* reportados en la literatura especializada. En estos problemas el algoritmo se comportó de manera eficiente, estable y robusta teniendo en cuenta parámetros estadísticos y los tiempos de cómputo obtenidos.

Debido al buen comportamiento del Algoritmo Genético Modificado (AGM) en problemas de prueba, es utilizado posteriormente para optimizar simultáneamente edificaciones de acero equipadas con amortiguadores de fluido viscoso. Fueron optimizadas tres estructuras diferentes, una de cinco pisos, otra de nueve pisos con retroceso en altura y una de tres pisos analizada en las dos direcciones en planta a diferencia de las dos primeras. La estructura de cinco y nueve pisos corresponde a edificaciones reportadas en la literatura, la tercera corresponde a un edificio real de la ciudad de Cali, Colombia. Los resultados obtenidos evidencian que el algoritmo propuesto (AGM) es capaz de encontrar resultados optimizados cumpliendo requisitos normativos y constructivos.

Para poder hacer un uso práctico del algoritmo genético modificado se realiza una interfaz gráfica denominada OptimaStructureDamper (OSD) que permite al usuario vincular el modelo estructural de la edificación. El modelo debe ser realizado en el software Etabs® según criterios y recomendaciones dadas en el capítulo 6 del presente documento.

Palabras Clave: Optimización Estructural, Amortiguadores Viscoelásticos, Algoritmos genéticos.

INTRODUCCIÓN

En lo que a edificaciones se refiere, el ser humano ha trabajado a lo largo del tiempo en el objetivo de obtener estructuras resistentes para mejorar su calidad de vida y prevenir calamidades ante eventos naturales como los sismos, huracanes, nevadas, etc. Los avances obtenidos, generalmente, se han conseguido realizando pruebas experimentales, a través de procedimientos de prueba y error, basados en deducciones empíricas y a partir de la observación de la naturaleza, plasmando posteriormente los resultados en formulaciones matemáticas que han ayudado a moldear el comportamiento de las edificaciones. Con el desarrollo de estructuras cada vez más complejas en los últimos años, se han desarrollado herramientas computacionales y propuesto distintas formulaciones basadas en los estudios teóricos precedentes para resolver problemas concretos y así poder predecir la respuesta estructural ante diferentes cargas impuestas (gravitacionales, sísmicas, viento, etc.).

El impacto de las fuerzas sísmicas generalmente son las que más daño hacen a las estructuras en zonas de amenaza sísmica alta. Aunque las actuales normas sismorresistentes establecen criterios en el diseño para que las edificaciones no colapsen ante un eventual sismo, estas quedan afectadas y no pueden ser ocupadas de manera inmediata. Una solución ha sido la implementación de diferentes sistemas de control en las estructuras, con lo cual se reducen las deformaciones laterales y, por ende, el respectivo daño.

La implementación de sistemas de protección sísmica (SPS) conlleva a disminuir las sollicitaciones (fuerzas en los elementos) de la estructura, lo que resulta en el mejoramiento de las propiedades dinámicas, con base en los diferentes tipos de control, ya sea pasivo, activo, semiactivo o híbrido. Cada uno de estos sistemas posee diferentes tipos de dispositivos.

En la categoría de dispositivos pasivos, se encuentran los amortiguadores viscoelásticos y de fluido viscoso, de los cuales se han realizado numerosas configuraciones y propuestas. En los últimos años, estos han sido altamente utilizados a nivel mundial en gran número de obras civiles. Solo los amortiguadores de la empresa *Taylor and Devices Inc.* han sido utilizados en múltiples estructuras,

por ejemplo, se incluyen 12 amortiguadores en las torres de iluminación del *Rich Stadium* en Buffalo, New York, para minimizar las vibraciones producidas por el viento; 100 amortiguadores en el puente Golden Gate en San Francisco, California; y 12 amortiguadores en el puente entre las torres de las Petrona Twin Tower, Malasia [1], entre otros.

A pesar de los significativos avances en ingeniería, las técnicas de cálculo y diseño tanto para edificaciones como para los sistemas de control presentadas hasta el momento se limitan a comprobar la validez de la solución planteada. El número de variables de diseño, la cantidad de soluciones posibles y el número de restricciones de diseño son factores que influyen en el tiempo que necesitan los diseñadores para encontrar diseños optimizados. Algunas de las variables significativas en el diseño de estructuras con sistemas de control son: 1) secciones de los elementos estructurales, 2) características del dispositivo de control, 3) ubicación de los dispositivos en la estructura.

La esencia del comportamiento estructural, que reside en definir los valores correspondientes a las variables antes planteadas, se propone, fundamentalmente, según criterios experimentales y personales del diseñador, lo cual genera que se utilice en la práctica distintas soluciones para un mismo problema en función de la persona que se encarga del diseño.

El uso de los SPS en edificaciones conlleva a obtener un mejor desempeño estructural, preservando las vidas de los ocupantes de la edificación y posteriormente, evitando reparaciones costosas en los elementos estructurales ante un evento sísmico. Por lo tanto, teniendo en cuenta el objetivo principal, la cantidad de variables en el problema de optimización propuesto y el número de soluciones posibles, hace que se deban implementar técnicas no determinísticas para encontrar o aproximarse al diseño óptimo deseado.

El problema del diseño óptimo, en términos matemáticos, se formula mediante la selección de un conjunto de variables de diseño, de forma que se minimice una función de coste, o función objetivo, y se verifiquen unas restricciones que se expresan en general mediante ecuaciones e inecuaciones. El problema así descrito se conoce con el nombre de "problema de optimización", y al conjunto de métodos que permiten obtener su solución, se las denomina "técnicas de optimización".

En la actualidad, en Colombia, la implementación de sistemas de control de vibraciones en edificaciones representa un mayor costo, por lo cual, muchas empresas dedicadas a la construcción no presentan elevado interés en implementar estos dispositivos en sus proyectos.

Por tal motivo, se hace necesario realizar estudios teórico-numéricos en lo que concierne a la optimización, con el fin de aumentar la capacidad de análisis y diseño y poder obtener estructuras acompañadas de amortiguadores viscoelásticos y de fluido viscoso, en las cuales, el costo no sea elevado de manera significativa respecto a una estructura convencional.

Este planteamiento, de manera general, dio origen a la Optimización Estructural (OE), disciplina que pretende establecer un modelo matemático que permita buscar la mejor solución estructural (por medio de técnicas de optimización) que cumpla la función para la que ha sido diseñada de acuerdo con las necesidades predefinidas, que a su vez consiga establecer un equilibrio entre costo y confiabilidad del diseño, realizándolo de manera eficiente. Debido a lo anterior, en el actual trabajo de investigación se presenta la formulación para optimización de estructuras de acero equipadas con amortiguadores viscosos mediante un algoritmo genético modificado (AGM).

1. OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

1.1. OBJETIVO GENERAL:

Desarrollar e implementar un algoritmo metaheurístico estable y eficiente para la optimización simultánea de edificaciones de acero y amortiguadores de fluido viscoso.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Formular el problema de optimización de edificaciones de acero equipadas con amortiguadores de fluido viscoso. Para ello será necesario realizar un estudio de la función objetivo a utilizar y analizar la forma más adecuada de imponer las restricciones.

- Elaborar y programar en MatLab® el procedimiento para la resolución de problemas de optimización, utilizando un Algoritmo Genético Modificado como optimizador global, junto con la aplicación de la dinámica estructural.
- Evaluar y comparar el desempeño del algoritmo desarrollado, empleando problemas (*benchmark test*) reportados en la literatura especializada.
- Desarrollar una interfaz gráfica con interacción MatLab® - Etabs®.
- Aplicación en un problema práctico.

La estructura es analizada y diseñada mediante el programa Etabs®, y es optimizada mediante una propuesta de algoritmo genético modificado (AGM) programada en Matlab® enlazada a través de *Application Programming Interface* (API) con el software Etabs®.

El trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: En el capítulo 2 se presenta el estado del arte de los temas de investigación relacionados en el presente trabajo y se presentan algunos trabajos relevantes en los últimos años, de igual manera se realiza un análisis bibliométrico según criterios de búsqueda específicos en la base de datos científica *Scopus*. Seguidamente en el capítulo 3 se presenta el marco teórico correspondiente a los sistemas de control sísmico, optimización, computación en paralelo y algoritmo genético.

En el capítulo 4 se presenta una propuesta de algoritmo genético modificado (AGM) y se evalúa su desempeño en problemas con restricciones conocidos en la literatura de la optimización combinatoria. Seguidamente en el capítulo 5 se presenta la formulación y resolución de problemas de optimización de estructuras equipadas con amortiguadores de fluido viscoso, cuyos resultados y discusión son presentados en el capítulo 7.

En el capítulo 6 se presenta la interfaz gráfica con la cual se enlaza los modelos estructurales del programa Etabs® con el algoritmo de optimización propuesto. En este capítulo se presentan recomendaciones de uso del algoritmo con el objetivo de obtener un buen desempeño del AGM. Por último, en los capítulos 8 y 9 se presentan las conclusiones y propuesta de trabajos futuros de acuerdo con los resultados obtenidos.

2. ESTADO DEL ARTE

En las ciencias aplicadas al igual que en el conocimiento teórico, existen problemas de optimización lineal o no lineal que involucran al mismo tiempo variables continuas y discretas. Cuando las dimensiones y la complejidad matemática del problema son grandes, aparece el fenómeno denominado explosión combinatoria, debido a la gran cantidad de soluciones factibles y no factibles que pueden aparecer lo que hace que el problema de optimización sea más dispendioso a medida que el problema de ingeniería se hace más grande, en el cual las técnicas tradicionales (determinísticas - **Figura 1**), suelen ser exitosas en problemas muy acotados en tamaño y de mediana y baja complejidad [2]. En este contexto, las técnicas metaheurísticas de optimización se presentan como una buena alternativa para resolver estos problemas de optimización. Algunas de las técnicas más usadas en aplicaciones de ingeniería son: Recocido Simulado (Simulated Annealing - SA) [3], Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) [4], Algoritmos Genéticos (AG) [5], Optimización con Colonias de Hormigas (ACO) [6], *Harmony Search* (HS) [7], *Colliding Bodies Optimization* (CBO) [8], *Big Bang–Big Crunch* [9], entre otras.

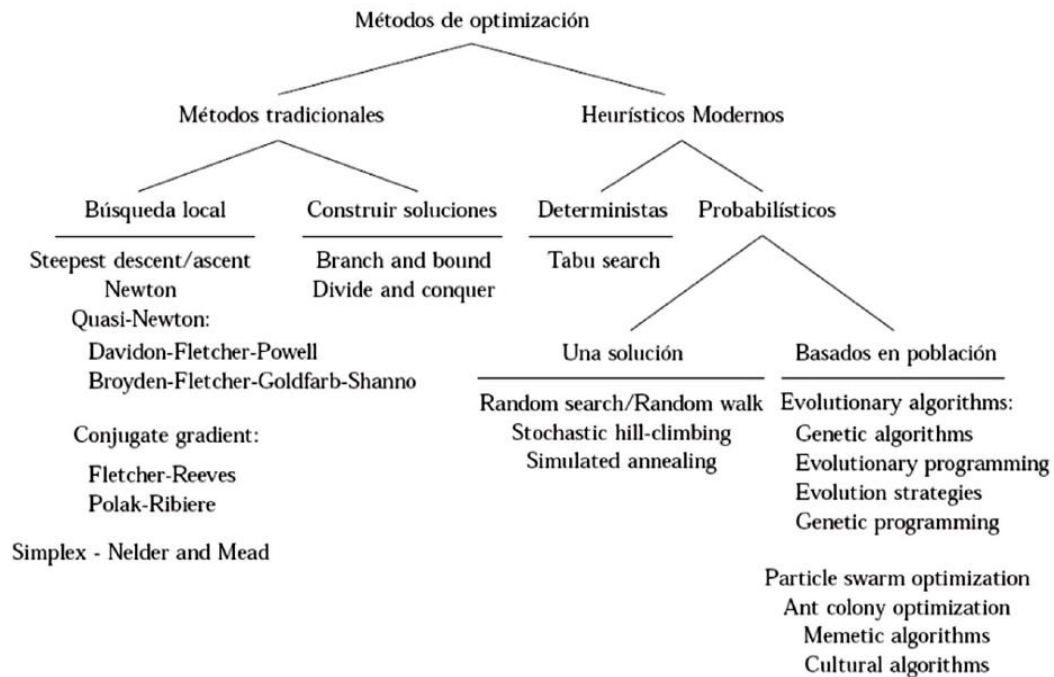


Figura 1 Métodos de optimización [10].

Estas técnicas se caracterizan por emular procesos naturales, las cuales cuentan con una componente aleatoria (estocástica). Si bien no poseen una

rigurosidad matemática como las técnicas exactas, están soportados mediante una matemática sencilla, que se encuentra distribuida de forma implícita en cada uno de los pasos que realiza. Cada uno de estos pasos, según el algoritmo, debe ser calibrado (sintonizado) dependiendo del problema a resolver. En el caso de SA, se debe calibrar la temperatura inicial y final, la velocidad de enfriamiento y el número de iteraciones. Lo mismo sucede con el PSO, en el cual se deben ajustar el parámetro cognitivo y social, el número de partículas, entre otros. De igual manera sucede con cada algoritmo que se desee implementar, por lo cual es importante conocer la influencia de estos parámetros en el proceso de optimización, ya que de esto depende obtener un buen desempeño del algoritmo [2].

La optimización está presente en todo momento del que hacer del ingeniero estructural, debido a que la función principal es diseñar sistemas novedosos, eficientes, y económicos (sobre todo en la implementación de disipadores de energía y aislamiento sísmico). El aumento de la demanda por el uso de sistemas de control en diferentes edificaciones con alto desempeño y bajo costo ha obligado a realizar un gran volumen de investigación en el campo de la optimización metaheurística de los sistemas de control en las últimas décadas, tanto en su diseño como en la cantidad y distribución de estos en la estructura. Por ejemplo, a finales del siglo XX, Cheng, Bruno y Salama [11], proponen el uso del algoritmo estocástico *Simulated Annealing* para obtener una ubicación óptima de amortiguadores activos y pasivos teniendo como función objetivo la maximización de la energía acumulada disipada. Los problemas analizados corresponden a 2 armaduras tridimensionales, una de 54 y otra de 150 elementos. Los resultados obtenidos mostraron que el algoritmo utilizado consigue ubicar de manera óptima los dispositivos.

Posteriormente, Leung, Zhang y Cheng [12] usaron el algoritmo PSO para obtener los valores óptimos de masa, amortiguamiento y relación de frecuencias cuando un sistema controlado por *Tuned Mass Damper* (TMD) es excitado por una aceleración de terreno aleatoria no estacionaria para minimizar la respuesta cuadrática media de desplazamiento. Tres ejemplos numéricos fueron usados utilizando diferentes excitaciones no estacionarias, demostrando la eficiencia y viabilidad del método y su uso conveniente en la ingeniería práctica. Del mismo modo, Shayeghi et al, [13] implementaron el algoritmo GA en la optimización de un sistema TMD en un caso real, un edificio de 11 pisos ubicado en la ciudad de Rasht, Irán. El sistema de TMD es aplicado a la estructura de múltiples grados de libertad sin especificar cuál de los modos va a ser controlado. Los resultados obtenidos

muestran un TMD capaz de reducir la respuesta en desplazamiento ante diferentes excitaciones sísmicas.

Por otro lado, Lavan, G. Dargush [14] proponen la optimización multiobjetivo del diseño de amortiguadores histéricos, viscoelásticos y viscosos a través del Algoritmo GA, teniendo en cuenta como funciones objetivo minimizar las derivas y aceleraciones de piso simultáneamente. A su vez, formulan mejoras a la capacidad de búsqueda del GA para así obtener una familia de resultados pareto óptima según las funciones objetivo, el sistema de control pasivo y su ubicación en la estructura. Tres tipos de estructuras fueron analizadas aplicando esta metodología.

Así mismo, Bekdas et al [15] usaron el algoritmo HS para determinar los parámetros óptimos de un TMD al reducir la respuesta sísmica de edificios. El criterio de optimización (función objetivo) corresponde a minimizar los valores máximos de desplazamientos de primer piso y la función de transferencia de aceleración. Los ejemplos numéricos utilizados consisten en dos edificaciones de diez pisos, en donde la comparación de resultados con otras técnicas de optimización, muestran la versatilidad y eficiencia del algoritmo para optimizar este tipo de problemas.

Cha, Kim, Raich et al. [16] proponen mejoras al algoritmo base GA con el objetivo de realizar la optimización multiobjetivo de sistemas de control sísmico en edificaciones tridimensionales de gran altura que son sometidos a una variedad de cargas sísmicas. La metodología propuesta encuentra la distribución mínima de actuadores (controladores lineales cuadráticos gaussianos y actuadores hidráulicos) y sensores en la estructura para obtener la respuesta mínima en derivas. La propuesta fue aplicada a dos edificios tridimensionales analizados con el método de elementos finitos. La efectividad del algoritmo propuesto se evidenció al comparar los resultados con los obtenidos por otros autores que usaron un diferente tipo de AG modificado, además de contrastar la respuesta de las estructuras con y sin control sísmico. Del mismo modo, Cruz. A [17], implementa AG de manera práctica, para determinar la posición óptima de sensores en el estadio Pascual Guerrero en la ciudad de Cali, Colombia, con el objetivo de maximizar la capacidad de identificación de frecuencias naturales y formas modales.

Por otro lado, Farshidianfar y Soheili [18] usaron el ACO para encontrar los parámetros óptimos de un TMD involucrando los efectos de interacción suelo-estructura en una edificación de 40 pisos. La masa del TMD, el coeficiente de

amortiguamiento y la rigidez del resorte fueron asumidas como variables de diseño, con el objetivo de disminuir el desplazamiento máximo y aceleración en cada piso. Los resultados muestran que se consigue optimizar de manera eficiente los parámetros de TMD según los diferentes tipos de suelos utilizados, los cuales afectan de manera significativa las variables de diseño del TMD.

Amini y Ghaderi [19] proponen un algoritmo híbrido entre el HS y ACO para encontrar ubicaciones óptimas de amortiguadores en una edificación. Utiliza conceptos probabilísticos de selección del ACO (concepto de feromona) en el proceso de optimización por HS. Los ejemplos numéricos mostraron que su propuesta encuentra soluciones óptimas en un menor número de iteraciones que el HS original, evitando de una mejor manera el estancamiento en óptimos locales. El algoritmo fue probado en tres ejemplos numéricos: 1) un edificio de corte de 16 pisos, donde se encuentra la ubicación óptima de amortiguadores magneto-reológicos en 6 pisos, excepto el primero, usando como función objetivo la minimización del cortante basal; 2) una cercha en 2D, donde se busca minimizar el desplazamiento máximo al incorporar ocho amortiguadores viscosos de manera óptima; 3) Un pórtico de diez pisos y tres vanos, donde se encuentra la ubicación óptima de diez amortiguadores viscosos, teniendo la posibilidad de instalar más de un amortiguador en el mismo sitio, utilizando como función objetivo minimizar el cortante de piso.

Abbasi y Markasi [20] utilizan el AG para encontrar el número y posición óptima de actuadores en una edificación de referencia de 20 pisos que cuenta con sensores para detectar la respuesta del edificio. La optimización de este problema de referencia es multiobjetivo teniendo en cuenta diferentes índices que relacionan la deriva, daño estructural, aceleraciones y fuerzas de control del actuador. Los resultados mostraron que el algoritmo encuentra soluciones óptimas de referencia y que éstas son sensibles al peso de cada objetivo seleccionado, lo cual está a criterio del diseñador.

Soong, [21] propone el uso de NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*) para encontrar las fuerzas de fricción y ubicación de amortiguadores de fricción. En el proceso se consideró la optimización simultánea de la media y la varianza del desplazamiento máximo, encontrando así un conjunto de soluciones óptimas de Pareto. Para evidenciar la efectividad del método propuesto, optimizó un edificio de corte de seis pisos y cuatro vanos, contrastando los resultados con la estructura sin controlar y con la optimización determinística. La comparación expresa una mejora significativa respecto a la estructura sin controlar, además de

evidenciar que el resultado de la optimización determinística no hace parte de la frontera de Pareto obtenida con NSGA-II.

Nigdeli y Bekdaş, [22] proponen la optimización de TMD mediante el algoritmo HS. La propuesta fue empleada en un edificio de corte de siete pisos utilizando dos funciones objetivo, reducir el desplazamiento en el primer piso y la aceleración absoluta en el último. Un análisis de historia en el tiempo bajo varias excitaciones de terremotos fue utilizado. Los resultados para cada función objetivo y sismos utilizados fueron comparados, donde evidenciaron que el TMD obtenido fue efectivo para todos los casos estudiados.

Miguel, Miguel y López [23] proponen el uso del *Backtracking Search Optimization Algorithm* (BSA) para optimizar amortiguadores de fricción. La efectividad de esta metodología fue probada en un edificio de corte de seis pisos y en una torre de transmisión. Las funciones objetivas fueron minimizar las derivas de piso, para el caso del edificio, y minimizar el desplazamiento en la parte superior de la torre. La ubicación de los amortiguadores y fuerzas de fricción fueron tomadas como variables de diseño. Al comparar los resultados con la estructura sin controlar, se evidencia la efectividad de la metodología propuesta. Posteriormente, los autores desarrollan un nuevo algoritmo de optimización denotado como *Search group algorithm* (SGA) [24], el cual implementaron en el mismo problema de optimización para la edificación de seis pisos. Los resultados obtenidos mostraron que el nuevo algoritmo optimiza este tipo de problemas con tiempos de cómputo y desviación estándar bajos según el número de optimizaciones realizadas.

Bekdas, Nigdeli y Yang [25] probaron tres algoritmos metaheurísticos de optimización, el HS, *Flower pollination algorithm* (FPA) y *Teaching learning based optimization* (TLBO), evidenciando las ventajas de cada uno. Las tres metodologías fueron probadas al optimizar los parámetros de un TMD en una estructura de corte de 10 pisos. La función objetivo fue minimizar la función de transferencia del último piso de la estructura. Los resultados obtenidos arrojaron que los tres algoritmos consiguen obtener el TMD óptimo, aunque cada uno presenta sus ventajas en cuanto a velocidad de cálculo, robustez y facilidad de aplicación.

Seguidamente, Nigdeli y Bekdas [26], en este caso, proponen usar el HS para optimizar como variable adicional, la ubicación de TMD, además de los parámetros propios de diseño. Esta consideración empieza a ser importante en edificaciones donde se presentan valores diferentes de rigidez en cada piso, de tal manera que la posición óptima no es el último piso. Esta metodología fue probada

en un edificio de corte de 6 pisos en el cual, los dos primeros pisos tienen menor rigidez que los dos siguientes, siendo los dos últimos pisos los de mayor rigidez. Los resultados obtenidos se comparan con la respuesta de la estructura con el TMD en el último piso, evidenciando la importancia de tener en cuenta la ubicación del TMD tras excitaciones sísmicas. La respuesta en desplazamiento fue menor en el caso donde la ubicación del TMD fue tomada como variable de diseño.

Consecutivamente, Bekdas y Nigdeli [27] proponen utilizar dos algoritmos metaheurísticos para el diseño óptimo de amortiguadores de masa sintonizada en problemas de interacción suelo-estructura. En su metodología usan los algoritmos Búsqueda Armónica (HS) y algoritmo de murciélago (BA) para encontrar los valores óptimos de masa, periodo y amortiguamiento del TMD con el objetivo de minimizar el desplazamiento máximo de la estructura. Los problemas analizados corresponden a estructuras de un solo grado de libertad para diferentes características de suelos, periodos de la estructura y relaciones de amortiguamiento. Además, implementó la metodología en una estructura de 40 pisos, logrando reducir el desplazamiento crítico hasta en un 25%, en donde evidencia las ventajas de cada uno de los algoritmos utilizados.

Keshtegar y Etedali [28] proponen un nuevo algoritmo, el *adaptive dynamic harmony search* (ADHS), el cual posee modificaciones de parámetros del HS original para mejorar su eficiencia. La propuesta es validada con problemas matemáticos de prueba y lo compara con otros algoritmos basados en HS. La eficiencia en ingeniería se evidencia al optimizar las variables de diseño del TMD para una edificación de diez pisos expuesta a excitaciones sísmicas. Los resultados demostraron que la metodología propuesta optimiza de manera eficiente este tipo de problemas, obteniendo resultados iguales y ligeramente mejores que otros algoritmos de optimización.

Bekdas, Nigdeli y Yang [29] proponen un algoritmo basado en *Bat algorithm* (BA) para optimizar las variables de diseño de un TMD en un edificio de corte de diez pisos, con el objetivo de minimizar el desplazamiento máximo del primer piso. La edificación fue expuesta a diferentes sismos con contenidos frecuenciales diferentes, debido al desconocimiento del contenido frecuencial a los que puede estar expuesta una estructura. Los resultados mostraron que la metodología es más eficiente que otros algoritmos con los que se comparó, obteniendo un comportamiento robusto y evitando óptimos locales, según análisis adicionales después del proceso de optimización.

Recientemente Lu, Li, Ouyang et al. [30] proponen el uso del algoritmo DE para optimizar el TID de una edificación de veinte pisos, evaluando el comportamiento no lineal. En el proceso construyeron un modelo reducido de la edificación y compararon los modos de vibración, con los obtenidos a través de un modelamiento por el método de elementos finitos, con el objetivo de reducir el costo computacional. Los resultados obtenidos fueron comparados con la respuesta de la estructura sin sistema de control, controlada con sistema diseñado convencionalmente y con la estructura que posee el sistema de control optimizado. Las comparaciones evidencian que este último consiguió disminuir en mayor proporción la respuesta de la estructura antes diferentes eventos sísmicos. También comprobaron que el TID optimizado logra disminuir el número de rótulas plásticas en comparación con el comportamiento de la estructura con el diseño tradicional del controlador y la estructura sin controlar.

Del mismo modo, Nigdeli y Bekdas, [31] proponen optimizar el uso de múltiples TMD en una edificación a través del FPA. La metodología se aplicó a cuatro casos de estudio: 1) optimizó dos TMD en una estructura con dos grados de libertad que cuenta con aislamiento de base; 2) optimiza los TMD a colocar en cada piso de una estructura de quince pisos que cuenta con el primer piso flexible; 3) el planteamiento anterior es usado en una estructura de diez pisos que cuenta con las mismas propiedades en cada piso; 4) el mismo concepto pero en una estructura de diez pisos que cuenta con rigidez decreciente del primer piso al último. Los resultados mostraron un eficiente uso del algoritmo, además de concluir que, aunque la mejor posición de un TMD es en la parte superior de la estructura, se pueden utilizar múltiples TMD, con el objetivo de que estos no cuenten con grandes masas en comparación con un solo TMD en la parte superior, demostrando que la diferencia en respuesta entre uno y múltiples TMD no es significativa. Además, justifica el uso de múltiples TMD para el caso en el que la estructura entre al rango no lineal ante cargas cíclicas, debido a que los pisos superiores se comportarían mejor al tener una menor carga axial que cuando se tiene un solo TMD en la parte superior.

Por otro lado, Park [32], utilizó el GA para realizar el diseño óptimo integrado de un sistema estructural amortiguado viscoelásticamente. El problema de optimización fue formulado teniendo en cuenta como variables de diseño el tamaño de los elementos estructurales, la cantidad y ubicación de los amortiguadores viscoelásticos. La función objetivo fue formulada teniendo en cuenta el costo de ciclo de vida de la edificación, el cual consiste en el costo de construcción inicial y las pérdidas potenciales durante la vida útil de la estructura, teniendo en cuenta el

peligro sísmico. La metodología propuesta fue probada en una edificación de ocho niveles, en donde realizaron diseños optimizados teniendo en cuenta diversas intensidades sísmicas y tipos de perfiles de suelo.

Las anteriores investigaciones demuestran que los algoritmos metaheurísticos de optimización se han venido desarrollando y presentando como una herramienta ideal para obtener diseños optimizados. La robustez y eficiencia que ostentan ante problemas de alta complejidad, con múltiples variables, presentes en la ingeniería sísmica, motivan al desarrollo y aplicación de estas técnicas en los ámbitos investigativos y prácticos.

En el presente trabajo se realiza la optimización de la estructura y dispositivos de fluido viscoso en tres edificaciones de acero, dos de prueba de cinco y nueve pisos y un edificio real ubicado en la Ciudad de Cali, Colombia. La optimización se realiza mediante la propuesta de un algoritmo genético modificado (AGM), el cual fue programado en Matlab® y acoplado a través de *Application Programming Interface* (API) al software comercial Etabs®. La función objetivo implementada tiene en cuenta los costos iniciales (Viga, columnas, amortiguadores y riostras de conexión entre amortiguadores y estructura), debido a que estos son los más atractivos a las empresas de diseño y construcción en nuestro país. Por otro lado, se opta por realizar una interfaz gráfica con el objetivo de que el uso de la metaheurística sea práctico en el qué hacer profesional, la cual posee recomendaciones de uso para obtener buenos resultados, estas son dadas más adelante.

2.1. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

De manera simplificada podemos obtener la siguiente información del tema en investigación. Utilizando la herramienta de búsqueda avanzada de la base de datos científica *Scopus*, se utilizó el siguiente código el día 30 de noviembre del 2022, arrojando un total de 12423 datos.

Palabras clave: KEY ("Integrated Optimum Design") OR KEY ("Viscoelastic Damper") OR KEY ("Metallic Damper") OR KEY ("Optimal Damper") OR KEY ("Viscous Damper") OR KEY ("Base Isolations") OR KEY ("Base Isolator") OR KEY ("Tuned Mass Damper") OR KEY ("TMD") OR KEY ("Damped System") OR KEY ("Structural Control") OR KEY ("Structural Design") OR KEY ("Multi-Objective Optimization") OR KEY ("Passive Energy Discipations Systems") OR KEY ("Optimal Placement") OR KEY ("Discrete Optimization") OR KEY ("Optimal Damper Placement") OR KEY ("Passive

Control") OR KEY ("Stochastic Analysis") OR KEY ("Seismic Base Isolation") OR KEY ("Metaheuristic Algorithm") OR KEY ("Optimal Design") OR KEY ("Robust Design Optimization") OR KEY ("Friction Damper") OR KEY ("Friction Damper Optimization") OR KEY ("Energy Dissipations Devices") OR KEY ("Metaheuristic Methods") OR KEY ("Passive Vibration Control") OR KEY ("Optimum Position") OR KEY ("Optimization of Passive Control Devices") OR KEY ("Mixed Discrete and Continuous Variables") OR KEY ("Fluid Viscous Damper") OR KEY ("Simulated Annealing") OR KEY ("Particle Swarm Optimization") OR KEY (pso) OR KEY ("Genetic Algorithm") OR KEY ("Harmony Search") OR KEY ("Ant Colony Optimization") OR KEY ("Backtracking Search Algorithm") OR KEY ("Backtracking Search Optimization") OR KEY ("Search Group Algorithm") OR KEY ("Flower Polination Algorithm") OR KEY ("Teaching Learning Based Optimization") OR KEY ("Cuckoo Search") OR KEY ("Bat Algorithm") OR KEY ("Differential Evolution") OR KEY ("Evolutionary Algorithm") AND KEY (structural AND optimization)

Limitado a las siguientes áreas temáticas: Ingeniería y Ciencias de la computación "AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP"))".

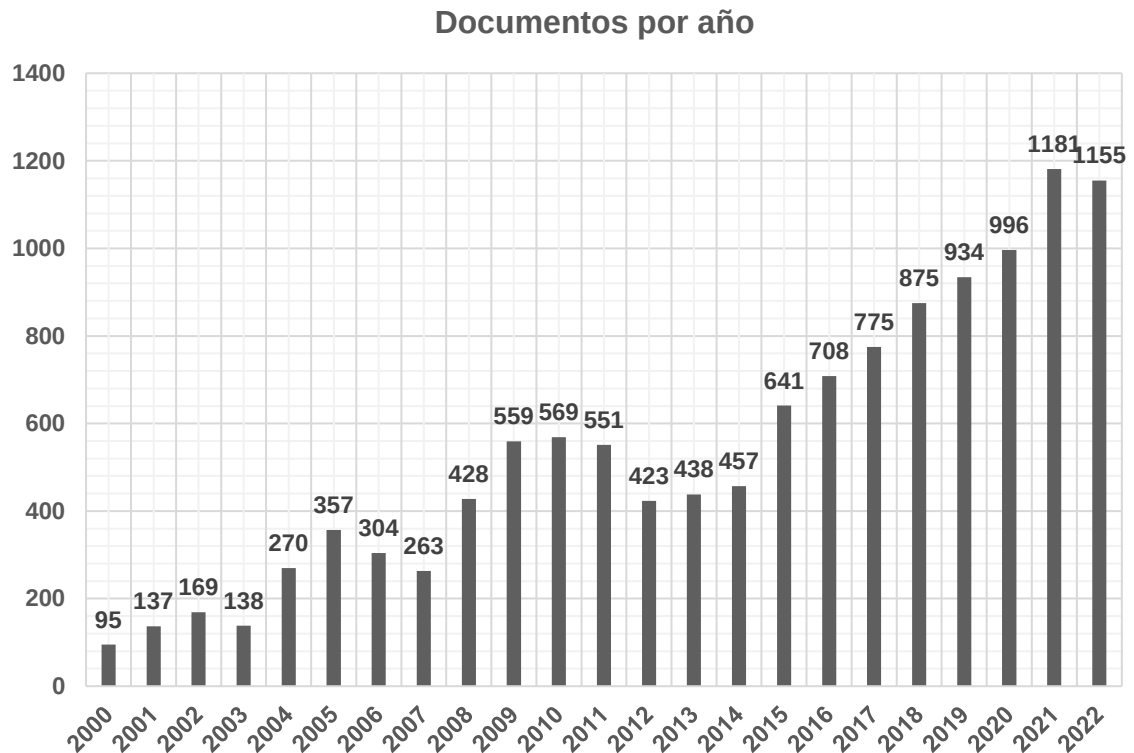
Limitado a documentos tipo: Artículo "AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))".

Limitado al siguiente tipo de fuente: Revistas "AND (LIMIT-TO (SRCTYPE, "j"))".

Limitado a los siguientes años de publicación: Desde 2000 al 2022 "AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2009) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2008)) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2007) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2006) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2005) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2004) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2003) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2002) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2001) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2000))".

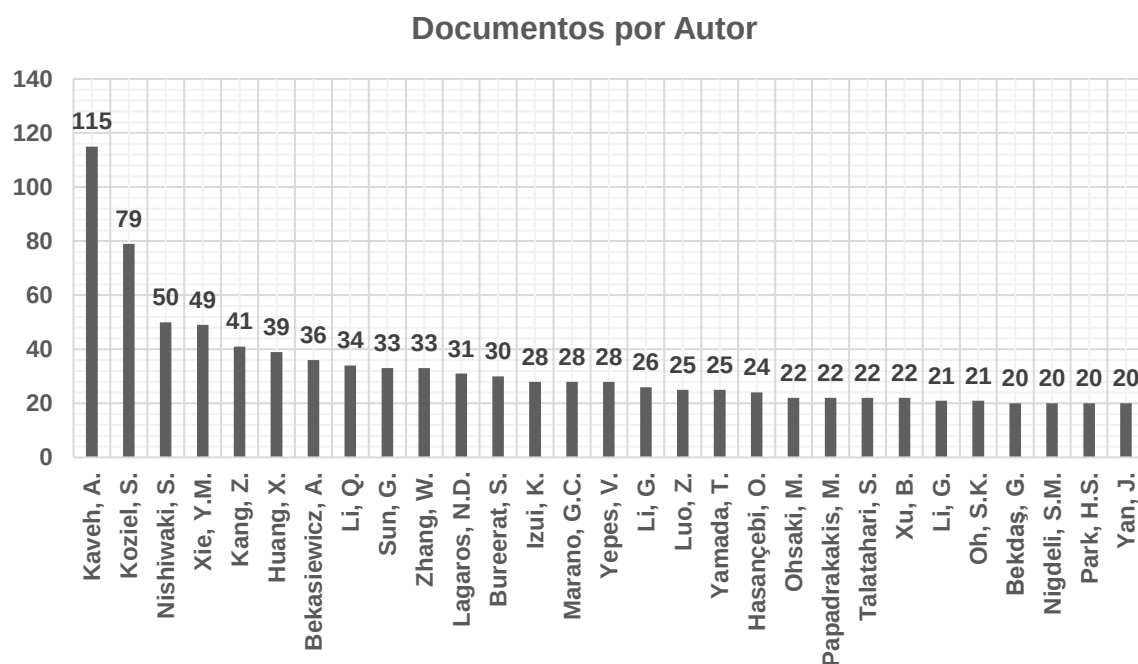
De los resultados obtenidos se manejó la siguiente información: número de documentos por año, por autor, por país y por área temática. Esta información fue examinada a través de la opción de análisis de datos de la plataforma *Scopus*.

De la **Gráfica 1**, se observa que en las últimas décadas se ha tenido un alto crecimiento en el número de artículos publicados, pasando de 95 artículos en el año 2000 a 1155 en el año 2022. Lo anterior evidencia el alto interés que han despertado los algoritmos metaheurísticos y los sistemas de control de vibraciones con el transcurrir del tiempo.



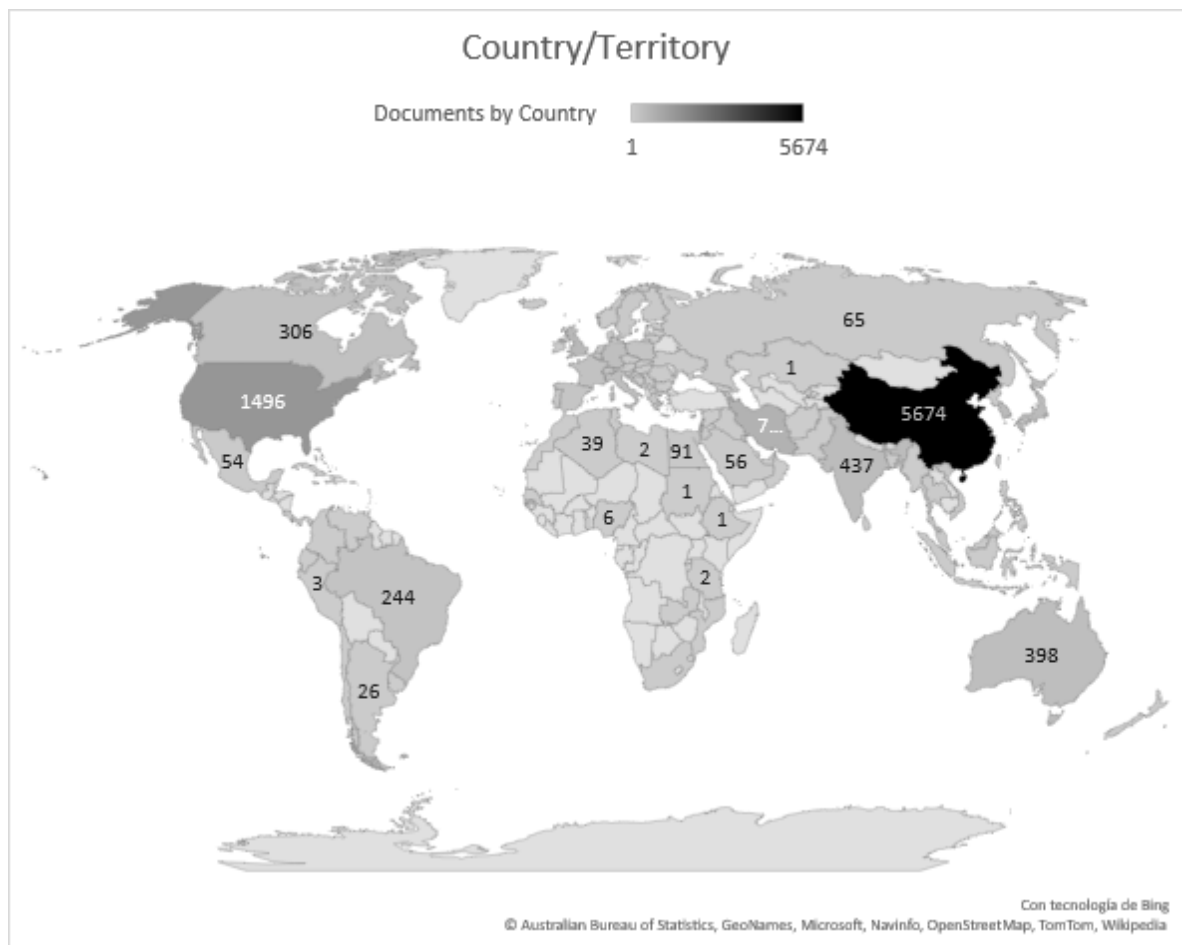
Gráfica 1 Número de documentos por año.

Por otro lado, en la **Gráfica 2**, se evidencia la cantidad de documentos por autor que se tiene reportado según los criterios de búsqueda utilizados en la plataforma *Scopus*. En la gráfica se indican los autores con más de 20 artículos publicados en el rango de fechas consultado (2000-2022), se evidencia que el autor con mayor número de documentos es Kaveh, A., con un total de 115 artículos de investigación.

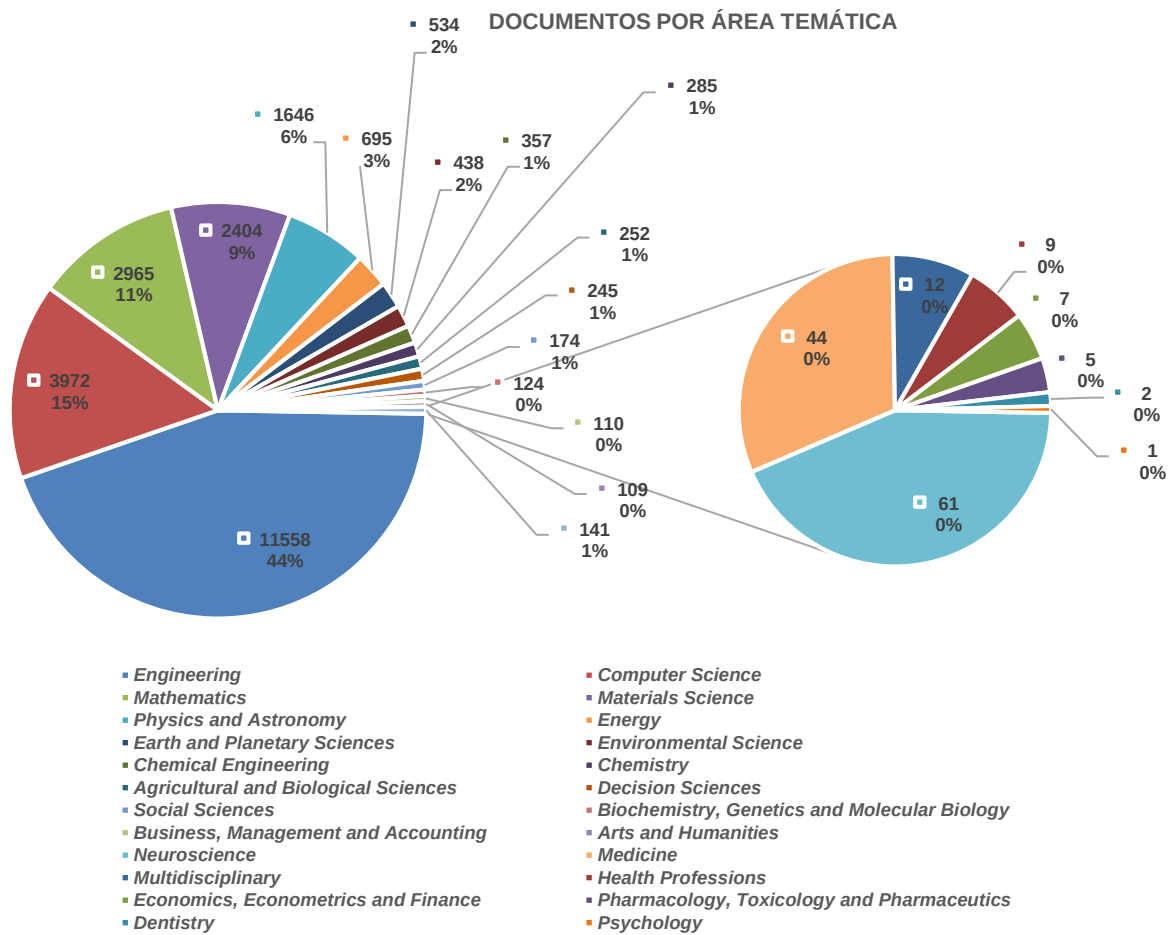


Gráfica 2 Número de documentos por autor.

Adicionalmente, en la **Gráfica 3**, se indica el número de documentos por país que se han reportado en las últimas décadas, siendo China, el territorio que más ha optado por seguir esta línea de investigación con un total de 5674 artículos. Seguidamente, le siguen países como Estados Unidos e Irán, reportando 1496 y 728 artículos respectivamente. En américa latina, el país con mayor número de documentos reportados es Brasil, con un total de 244, seguidos por México, Argentina y Colombia, con 54, 26 y 19 artículos reportados respectivamente. Lo anterior indica que, aunque los países como China, Estados Unidos e Irán representan el mayor número de documentos, en américa latina se ha venido adelantando un trabajo significativo en lo referente a este tema de investigación, lo que demuestra la importancia de continuar con los estudios referentes a este campo, específicamente en Colombia.



Del mismo modo, en la **Gráfica 4**, se reporta el número de documentos reportados y sus respectivos porcentajes por áreas temáticas. Cabe resaltar que uno de los criterios de búsqueda fue limitar los resultados a documentos pertenecientes a las áreas de ingeniería y ciencias de la computación, las cuales representan los mayores porcentajes, 44% y 15% respectivamente en la gráfica indicada, sin embargo, algunos de los artículos están incluidos, además, en otras áreas de investigación como son las matemáticas y la ciencia de materiales, con porcentajes del 11% y 9% respectivamente. Lo anterior indica que, aunque los algoritmos metaheurísticos son implementados en la ingeniería y ciencias de la computación, su aporte en líneas de investigación de las diferentes áreas temáticas también es de gran relevancia, lo cual refleja la importancia de seguir trabajando con este tipo de metodologías para la optimización de diferentes problemas, específicamente en lo que a la ingeniería estructural se refiere.



Gráfica 4 Número de documentos por área temática.

2.1.1. Análisis De Palabras Clave

De los 12423 documentos encontrados, se exportaron los datos de palabras clave en formato .CSV para realizar análisis de coocurrencia de palabras, las cuales fueron procesadas con el software especializado VOSviewer®. Como se observa en la **Figura 2**, la optimización estructural está altamente relacionada con dos algoritmos principales, la optimización por enjambre de partículas (PSO) y los algoritmos genéticos (AG). Estos a su vez, como se identifica, están relacionados con sistemas de control de vibraciones, en mayor medida con los sistemas de amortiguamiento de masa sintonizada (*Tuned Mass Damper-TMD*).

De igual manera, en la **Figura 4**, se evidencia como el amortiguamiento está claramente conectado de forma directa con los dos algoritmos más utilizados en los últimos años, el PSO y AG.

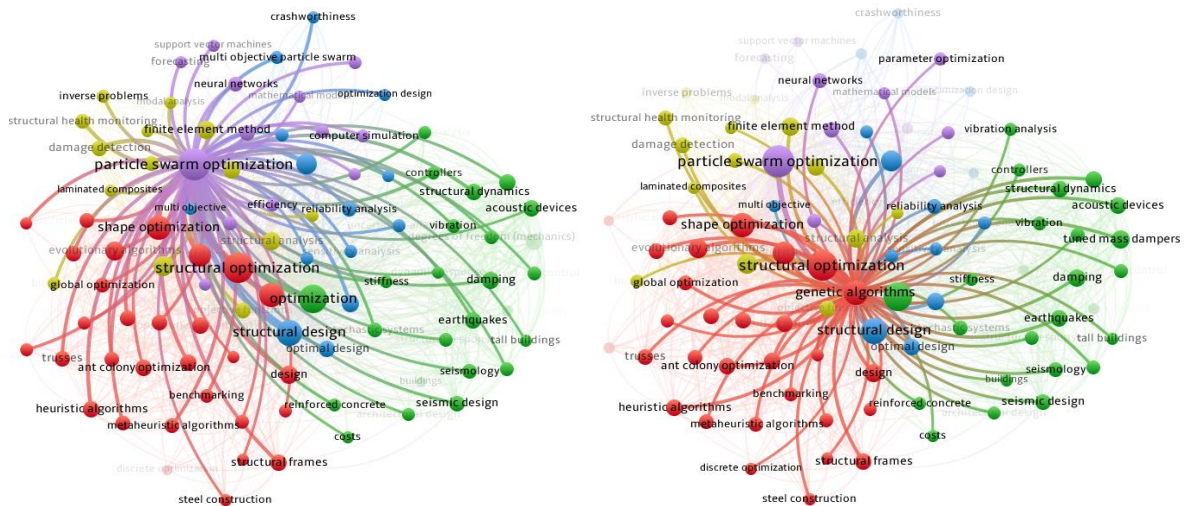


Figura 3 Coocurrencia de palabras con Particle Swarm Optimization (Izquierda); b) Genetic Algorithms (Derecha).

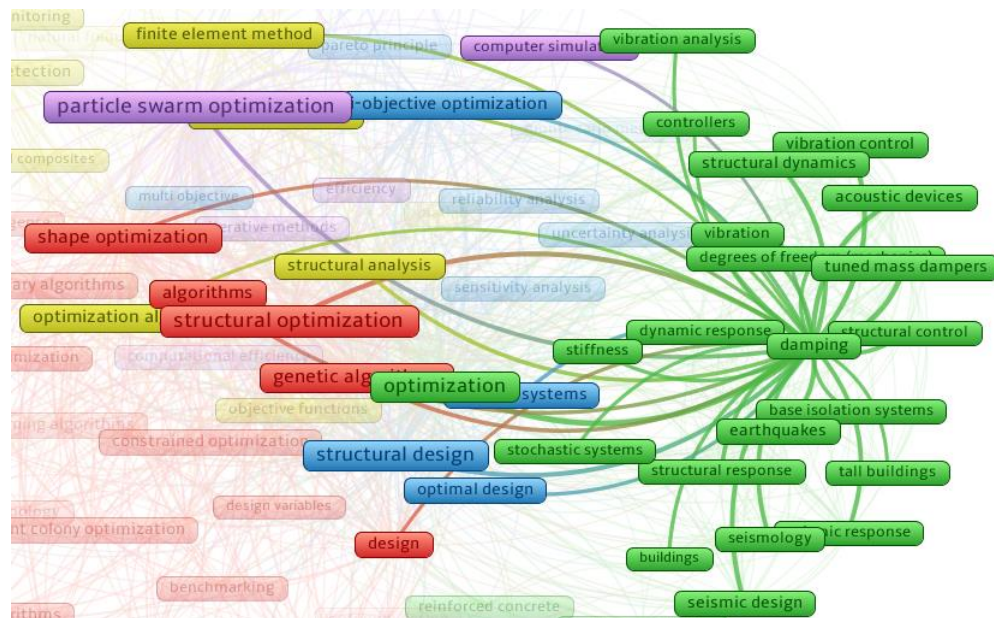


Figura 4 Coocurrencia de palabras con Damping.

Lo anterior revela un campo significativo en la ingeniería, como lo es el uso de algoritmos metaheurísticos en la optimización de estructuras con sistemas de control. Este campo, ha incrementado el interés de diferentes investigadores alrededor del mundo, como se evidenció en los diferentes gráficos y figuras, lo cual, a su vez, soporta la importancia del presente trabajo de investigación. Así mismo, según los resultados de la pesquisa realizada y teniendo en cuenta la relación de coocurrencia mostrada en la **Figura 3**, se opta por utilizar como algoritmo base el GA en el presente trabajo de investigación. Las mejoras y complementos a esta metaheurística se presentan en el capítulo 4.

3. MARCO TEÓRICO

En la actualidad, además de conocer la respuesta estructural, se busca disminuirla o controlarla. Las cargas producidas por sismo y viento (para edificaciones de gran altura), son las que generan la mayor reacción estructural, por tal motivo, se ha venido trabajando en la implementación de diferentes sistemas que buscan, a través del control de la respuesta estructural, mejorar el desempeño de la edificación.

Los sistemas de control están divididos en cuatro grupos: control pasivo, activo, semiactivo e híbrido. Cada uno de estos sistemas cuenta con diferentes variables de diseño que mejoran su desempeño. El diseño de estos, por ende, se centra en encontrar las variables adecuadas para encontrar un equilibrio entre economía y eficiencia (diseño óptimo), procedimiento que en la actualidad se realiza de manera iterativa, lo cual se convierte en un problema de optimización.

El proceso de encontrar la mejor solución puede ser una tarea desgastante a nivel de diseño y por ende requiere de tiempos computacionales bastante altos cuando las estructuras son complejas. Por esta razón han surgido metodologías de diseños basadas en métodos heurísticos para obtener soluciones aproximadas a problemas complejos, reduciendo los recursos computacionales. A continuación, se describen los conceptos asociados a sistemas de control sísmico (en específico los que se propone implementar en la investigación, amortiguadores viscosos y viscoelásticos), normativas que rigen el diseño, problemas de optimización y computación en paralelo.

3.1. SISTEMAS DE CONTROL SÍSMICO

Los sistemas de control de vibraciones tienen el objetivo de mitigar la respuesta estructural. Lo anterior se consigue haciendo uso de uno de los siguientes recursos [33]:

- Modificación de las propiedades dinámicas del edificio.
- Disipación de la energía introducida al sistema a través de dispositivos mecánicos.
- Control de dispositivos que ejerzan fuerzas para contrarrestar las cargas laterales.

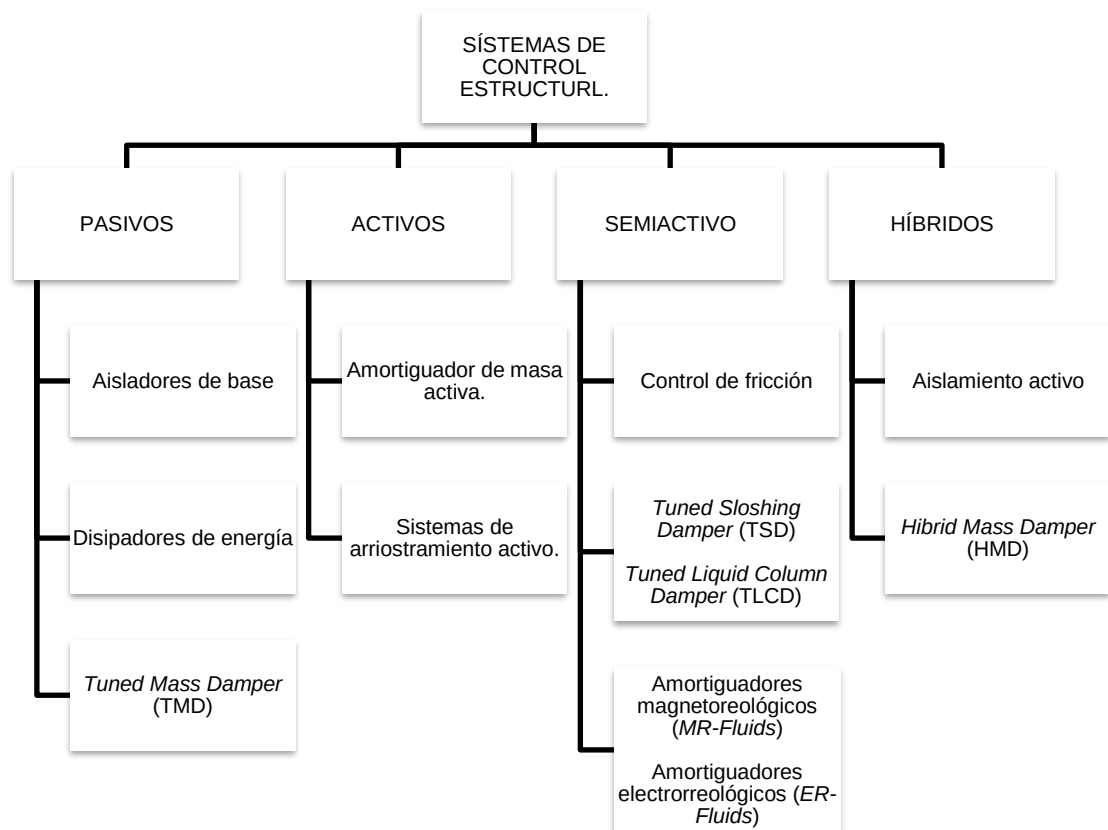


Figura 5 Sistemas de control estructural [37].

En la **Figura 5** se ilustran los diferentes sistemas de control de vibraciones (pasivo, activo, semiactivo e híbrido). En el caso del control pasivo, este solo funciona a través de sus propiedades físico-mecánicas, responde de manera inercial a la acción sísmica; el activo, requiere, además, consumo de energía eléctrica para controlar actuadores de fuerza que contrarresten el movimiento

lateral; el semiactivo, es una combinación entre sistemas de control pasivo y activo, sin necesidad de consumir alta cantidad de energía como el activo y; el sistema híbrido, es una combinación de diferentes sistemas de control.

3.1.1. Sistemas de control pasivo con comportamiento viscoso y viscoelástico.

Los sistemas de protección sísmica viscoelásticos y viscosos se diferencian particularmente por la introducción o no de rigidez adicional a la estructura respectivamente. Las respuestas típicas de fuerza-desplazamiento para estos tipos de dispositivos en condiciones cíclicas de desplazamiento controlado son como las indicadas en la **Figura 6**. En el caso de los dispositivos viscoelásticos se evidencia amortiguamiento y rigidez como se muestra en la **Figura 6a**, en el caso de los puramente viscosos no se posee rigidez adicional proporcionada a la estructura (**Figura 6b**), debido a que la fuerza y el desplazamiento se encuentran 90° fuera de fase.

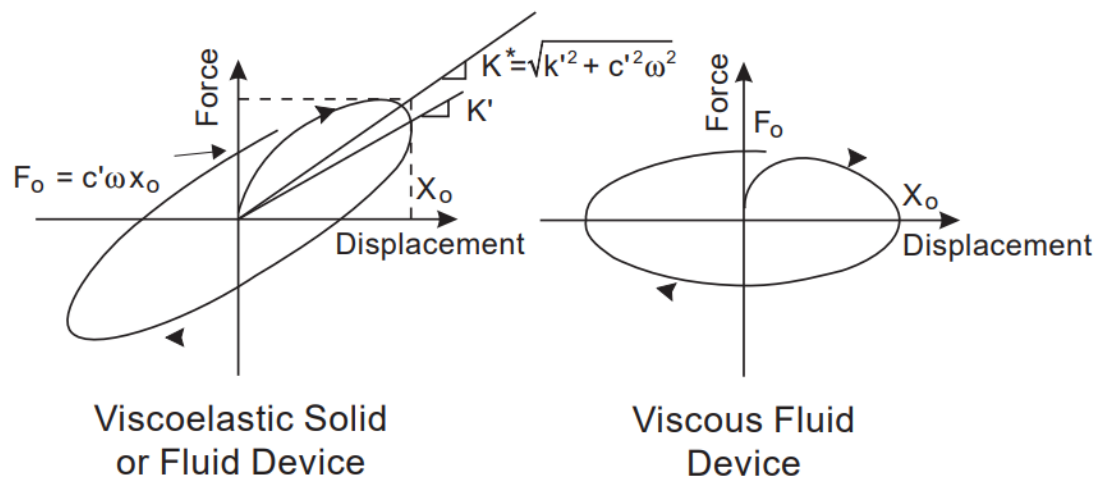


Figura 6 Ciclos de histéresis idealizados de amortiguador viscoelástico (a) y de fluido viscoso (b) [34].

El nivel de amortiguamiento en las estructuras convencionales (sin sistemas de control) es muy bajo, al igual que su capacidad de disipar energía sin producir daño. Cuando suceden eventos sísmicos, las estructuras se deforman más allá de los límites elásticos y no colapsan debido a su capacidad de deformarse inelásticamente, en donde la mayor parte de la energía disipada es absorbida por la propia estructura a través de daño localizado.

El amortiguamiento agregado a una estructura asume que parte de la energía que ingresa debido a un evento transitorio es absorbida, no por la estructura en sí, sino por elementos de amortiguamiento suplementario. Un amortiguador suplementario idealizado, en el caso de los viscosos, produce su fuerza de tal manera que no aumenta las tensiones en la estructura, por lo contrario, cuando es correctamente implementado, es capaz de reducir las tensiones como las deflexiones [35]. Debido a esto, la implementación de amortiguadores puede reducir la cantidad de rigidez que debe tener la estructura para obtener un mismo nivel de resistencia ante eventos sísmicos, lo cual disminuye peso y por ende podría disminuir el costo total.

3.1.1.1. Disipadores Viscoelásticos

Estos dispositivos han sido empleados en edificaciones de gran altura para reducir la respuesta estructural ante cargas sísmicas y de viento. Estos están formados con platinas metálicas únicas con capas finas de material viscoelástico (Figura 7).

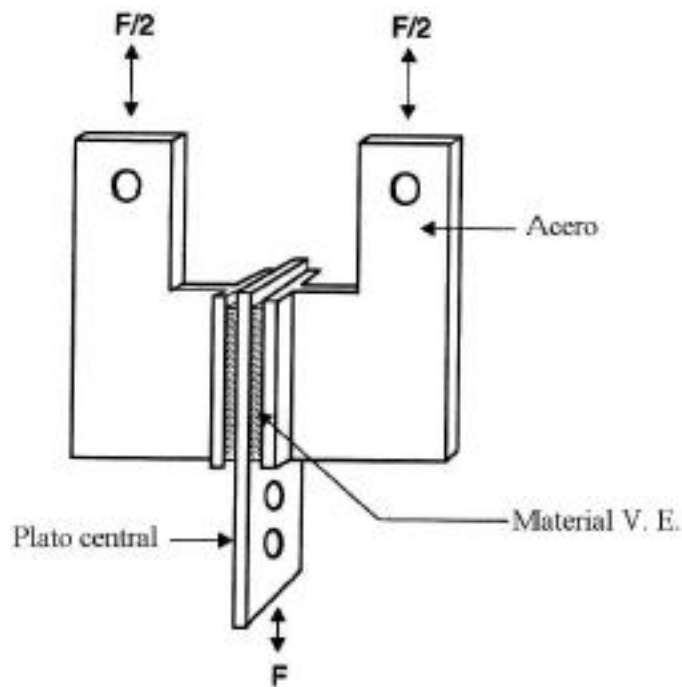


Figura 7 Configuración típica de un disipador viscoelástico [33].

3.1.1.2. Disipadores de Fluido Viscoso

Son dispositivos que disipan energía mediante la aplicación de una fuerza que resiste un desplazamiento. Estos disipadores (**Figura 8**) se comportan de acuerdo a la mecánica de fluidos, por ende, la fuerza resistiva varía respecto a la velocidad traslacional del disipador en determinado instante de tiempo. Esta propiedad permite reducir simultáneamente los esfuerzos y las deflexiones de la estructura.

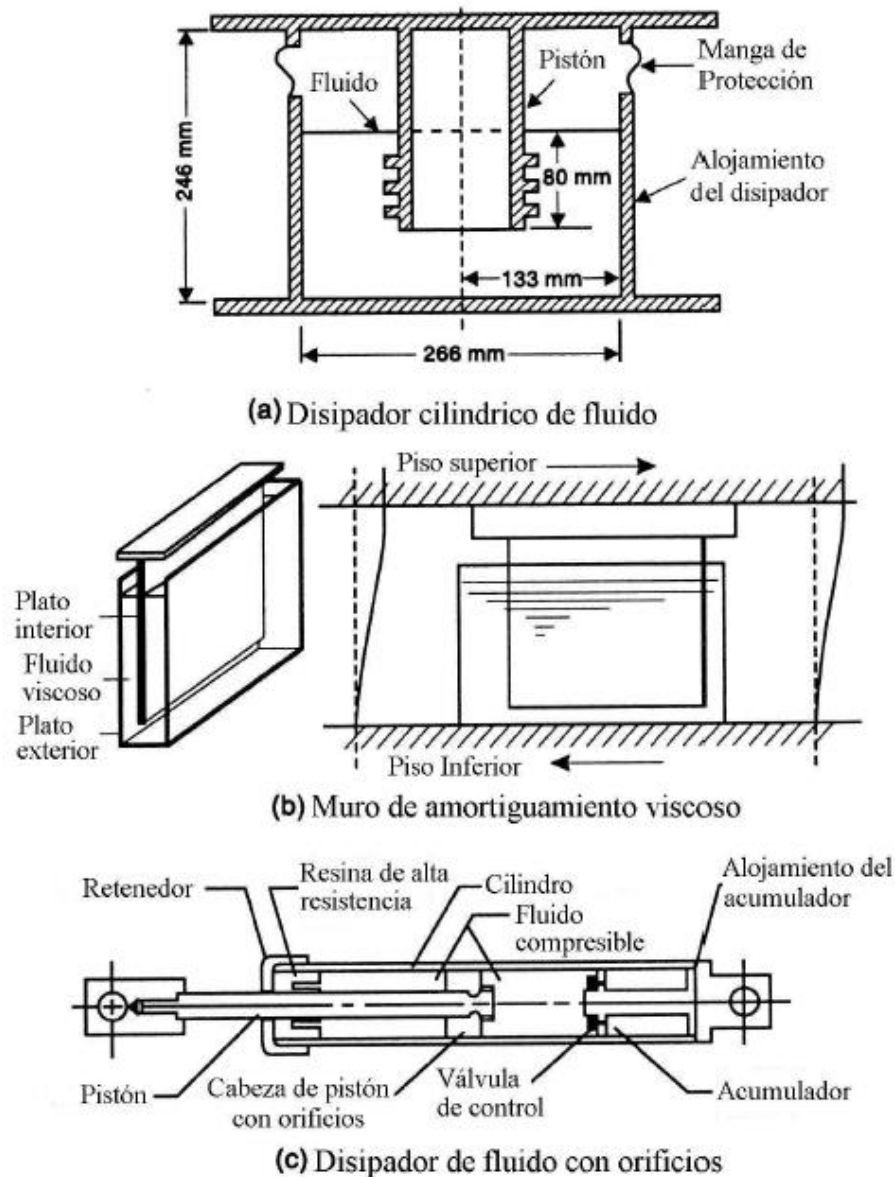


Figura 8 Disipadores de fluido viscoso [33].

Debido a que este tipo de disipador de energía está vinculado a la edificación solamente a través de la velocidad, la respuesta estructural obtenida del dispositivo se encuentra fuera de fase con los esfuerzos de la estructura. Es decir, los esfuerzos de las columnas de una edificación son máximos cuando la deformación lateral está al límite, momento en el cual la fuerza de los amortiguadores de fluido viscoso es cero (velocidad cero). Por otro lado, los disipadores no fluidos, aquellos que aportan rigidez como los viscoelásticos o los de fluencia, aunque disminuyen las deflexiones en la estructura, al mismo tiempo aumentan los esfuerzos en las columnas.

El amortiguador de fluido consta de un pistón que se mueve a través de un fluido viscoso, generando una alta presión que varía dependiendo de la velocidad de manera proporcional. Esa relación se caracteriza por la siguiente ecuación [35]:

$$F_D = C|\dot{u}|^\alpha \quad (1)$$

En donde:

F_D = Fuerza en el amortiguador.

C = Coeficiente de amortiguamiento.

$|\dot{u}|$ = Velocidad relativa entre los extremos del amortiguador.

α = Exponente que varía entre 0,2 y 2 según la aplicación específica.

Para edificios diseñados teniendo en cuenta acciones sísmicas, α generalmente se encuentra en el rango de 0.3 a 0.5, un valor de $\alpha=1$ indica un comportamiento lineal, en la **Figura 9** se muestra la diferencia en el comportamiento entre un amortiguador lineal y no lineal [36]. Debido a que el amortiguador de fluido produce una fuerza resistiva mientras se mueve y no proporciona una fuerza de restauración (resorte), la energía se absorbe en el fluido y se convierte en calor. Esta energía absorbida por los dispositivos disminuye la necesidad de que los elementos estructurales del edificio absorban esa energía.

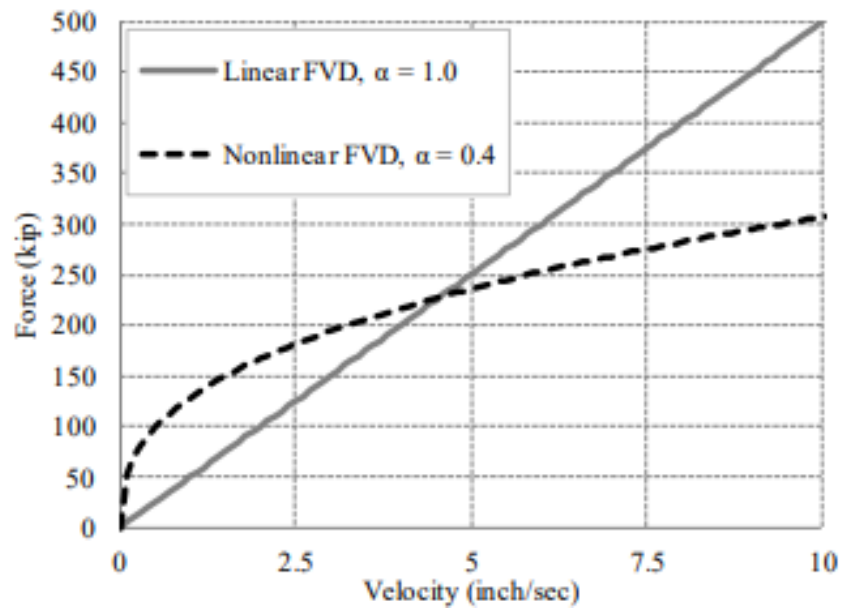


Figura 9 Relación Fuerza-Velocidad de un amortiguador de fluido viscoso de comportamiento lineal y no lineal [36].

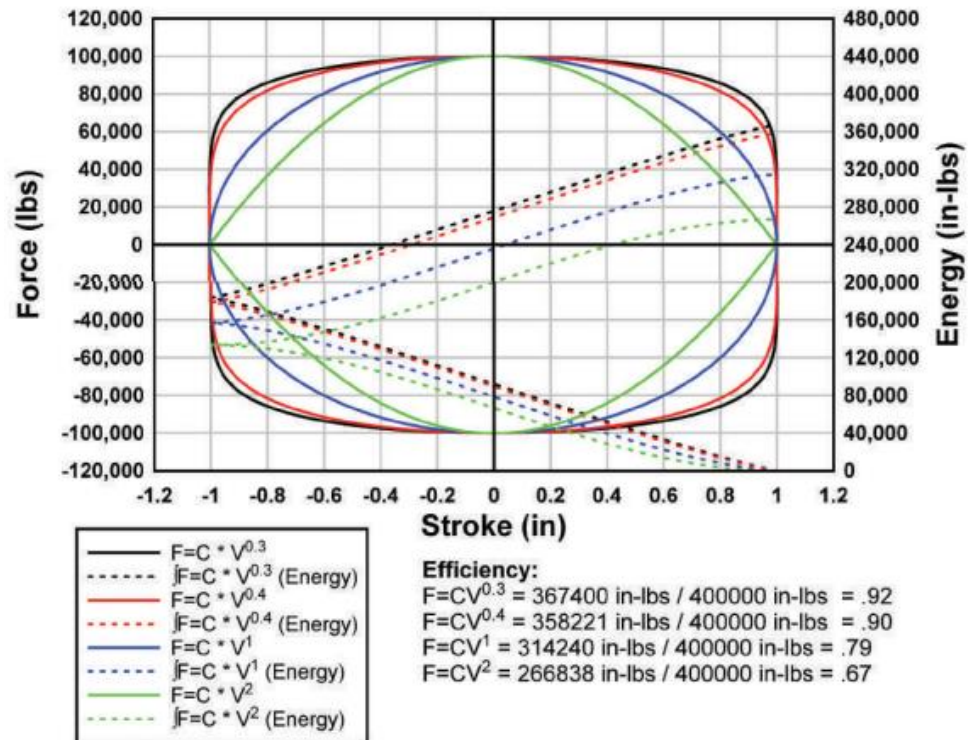


Figura 10 Energía absorbida por amortiguadores con diferente valor de α [35].

En la **Figura 10** se muestra la comparación de la energía absorbida para cada ciclo de un amortiguador con diferentes valores de α ante una entrada sinusoidal, allí se observa que un dispositivo con menor valor de α absorbe más

energía. Como se evidencia, de manera decreciente hasta valores de α igual a 0.4 se aprecia un cambio considerable en el área de la curva de histéresis, por otro lado, dado que la fuerza de amortiguamiento está desfasada con los esfuerzos de deflexión, es importante que este efecto no se vea comprometido por valores de exponente α demasiado bajos [35].

Esos dispositivos, tanto los amortiguadores viscosos como los viscoelásticos, generalmente son modelados de acuerdo con la teoría de Maxwell de un resorte lineal y un amortiguador no lineal en serie como se muestra en la **Figura 11**.

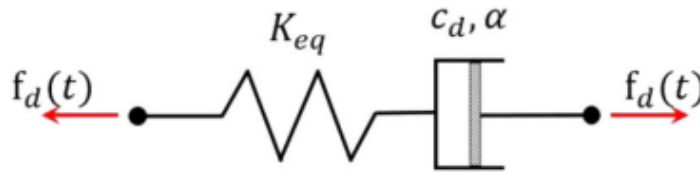


Figura 11 Modelo riostra-amortiguador teoría de Maxwell [37].

La rigidez axial del resorte representa la rigidez elástica de la riostra de soporte y el dispositivo de amortiguamiento. Esta rigidez equivalente (K_{eq}) es obtenida a través de la ecuación 2, considerando las dos rigideces, la de la riostra (K_{br}) y la del amortiguador (K_{dam}) [37].

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{br}} + \frac{1}{K_{dam}}; \quad (2)$$

Sin embargo, cuando se utiliza aceite de silicona, el cual es generalmente empleado en este tipo de dispositivos, la rigidez axial del amortiguador es muy alta, por lo que la rigidez equivalente puede ser determinada basado en las propiedades del elemento de soporte únicamente [38]. Por otro lado, la rigidez del amortiguador también depende de la frecuencia de carga, para cargas con bajas frecuencias ($< 4\text{Hz}$), la rigidez del amortiguador puede ser considerada como infinita [39]. Por lo tanto, debido a lo anterior, la relación entre la rigidez equivalente y el coeficiente de amortiguamiento puede ser determinada como se indica en la ecuación 3.

$$\rho = \frac{K_{eq}}{C_d} \cong \frac{K_{br}}{C_d}; \quad (3)$$

3.1.2. DISPOSICIÓN DE AMORTIGUADORES

La disposición de amortiguadores tiende a realizarse de manera distribuida en toda la altura, en múltiples niveles de la estructura. El concepto típico consiste en vincular todas las masas en movimientos (niveles de piso), de tal manera que los dispositivos reaccionen con fuerzas de tracción o compresión ante el movimiento relativo de cada nivel, esto permite a su vez absorber la energía en todas las frecuencias de vibración de entrada inducidas por los registros sísmicos.

Algunos de formas de disponer los amortiguadores en cada nivel de piso son las indicadas a continuación:

- Amortiguadores dispuestos en marco tipo *Chevron*.
- Amortiguadores en diagonal.
- Amortiguadores dispuestos en marco tipo palanca (*Toggle Brace Frame*)
- Amortiguadores en pórticos de espacio abierto (*Open Space Systems*).
- Amortiguadores en sistema estabilizante (*Outrigger systems*)
- Amortiguadores con sistema de aislamiento de base.

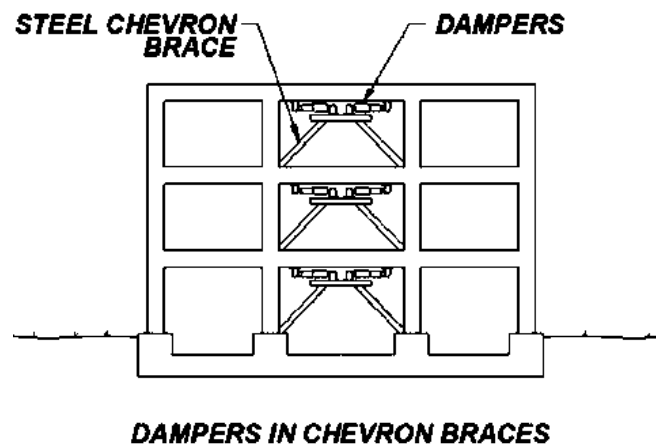
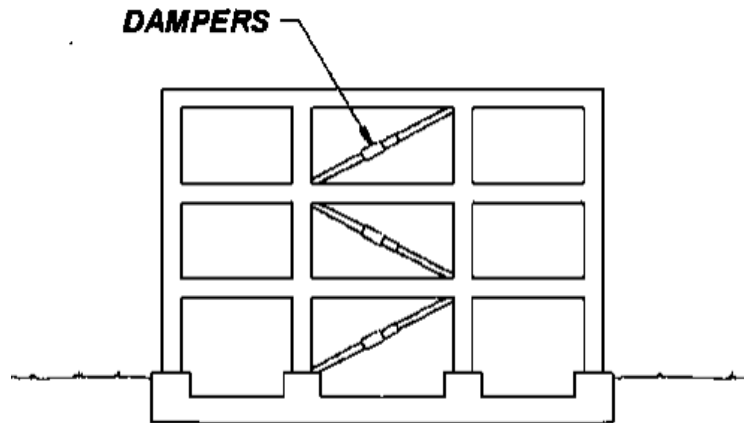


Figura 12 Amortiguadores dispuestos en marco tipo *Chevron* [35].

En la **Figura 12** se muestra la disposición de amortiguadores en marco tipo *Chevron*. La ventaja de esta disposición es que, al estar completamente horizontal, la fuerza inercial de la masa de entrepiso es transmitida directamente al amortiguador, aunque puede perderse algo de movimiento debido a las limitaciones de rigidez alcanzable en un marco *Chevron* económico.

La disposición diagonal de amortiguadores es como la indicada en la **Figura 13**. En este caso, debido a la inclinación del dispositivo solo una componente de la fuerza horizontal del entrepiso es transmitida al amortiguador.



DIAGONAL BRACING WITH DAMPERS

Figura 13 Amortiguadores en diagonal [35].

Los Amortiguadores dispuestos en marco tipo palanca (*Toggle Brace Frame*) son como los indicados en la **Figura 14**. Estos se pueden usar para amplificar las desviaciones en el amortiguador en situaciones de deflexiones pequeñas o marcos rígidos, lo que crea un sistema eficiente de amortiguamiento más eficiente, el cual está patentado y motivo por el cual requieren de un diseño y alto detallamiento por un diseñador/fabricante autorizado [35].

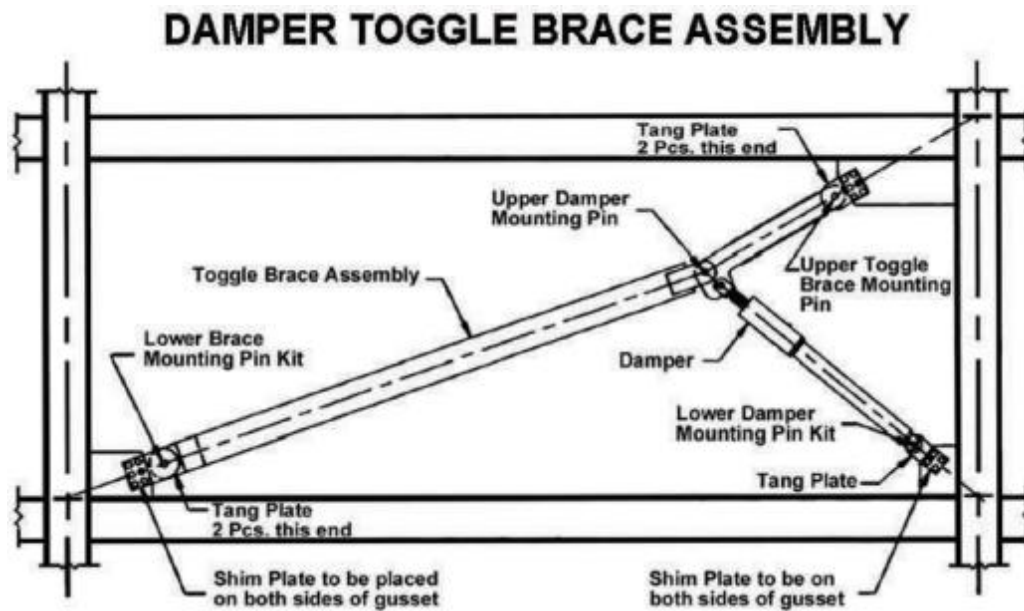


Figura 14 Amortiguadores dispuestos en marco tipo palanca (*Toggle Brace Frame*) [35].

Al igual que los amortiguadores dispuestos en marco tipo palanca, los amortiguadores en pórtico de espacio abierto (**Figura 15**) funcionan de manera similar. A diferencia de los anteriores estos se disponen de tal forma que se pueda dejar el mayor espacio posible en el pórtico que contiene los dispositivos. Al igual que el sistema tipo palanca, este se encuentra patentado y requiere de diseño y alto nivel de detallamiento por parte de un diseñador/fabricante autorizado [35].



Figura 15 Amortiguadores en pórticos de espacio abierto (*Open Space Systems*) [35].

Otra opción de proveer amortiguamiento a la estructura es utilizar los dispositivos en forma estabilizante, como se indica en la **Figura 16**. Este sistema es utilizado en edificaciones altas y esbeltas donde se determina que el movimiento bruto de la estructura no cae en el patrón de corte de piso sino en fuerzas de tensión/compresión en las columnas perimetrales opuestas. Generalmente este tipo de amortiguamiento se consigue creando un nivel rígido cerca de la parte superior de un edificio que se mueve con el núcleo y conectado a través de amortiguadores entre el nivel rígido y las columnas exteriores [35].

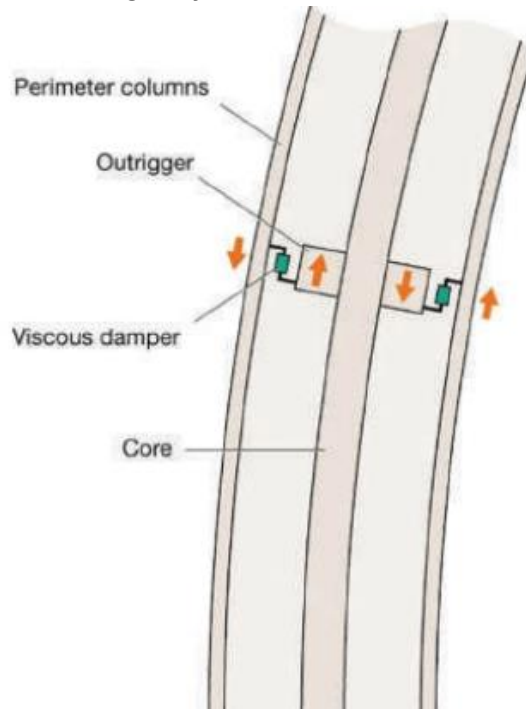


Figura 16 Amortiguadores en sistema estabilizante (*Outrigger Systems*) [35].

A manera de complemento en sistemas de control sísmico, los amortiguadores también son utilizados en edificaciones equipadas con aislamiento de base, como se muestra en la **Figura 17**, ayudando a mejorar el rendimiento y utilidad de los aisladores.

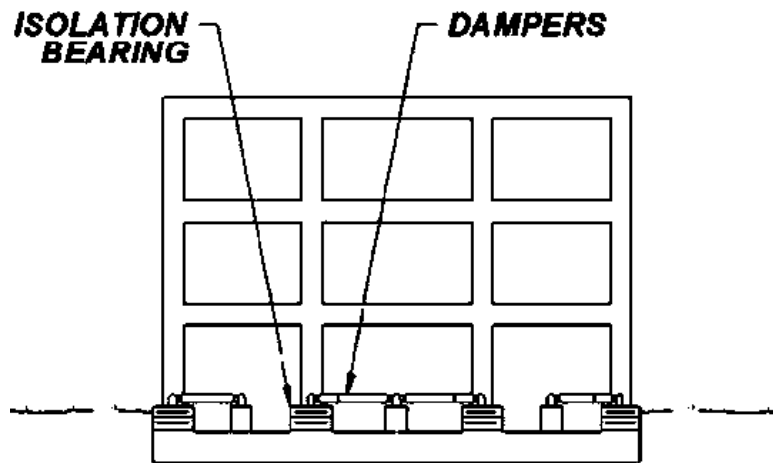


Figura 17 Amortiguadores con sistema de aislamiento de base [35].

3.1.3. DISEÑO DE AMORTIGUADORES SEGÚN NSR-10, ASCE 7-16.

De acuerdo con el reglamento colombiano de construcción sísmo resistente NSR-10, se permite el empleo de disipadores de energía siempre y cuando se cumpla en su totalidad los requisitos al respecto de uno de los documentos siguientes:

- *“NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004.*
- *“Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006.*

Aunque en el numeral A.3.8 de la NSR-10 menciona la versión del 2005 del documento ASCE-7, a la fecha se encuentran versiones más actualizadas, como la del 2010 (ASCE 7-10 [40]) y la del 2016 (ASCE 7-16 [41]).

3.1.3.1. Requisitos Generales.

En la versión del año 2016 (ASCE 7-16) en el capítulo 18 se indican los requerimientos sísmicos para estructuras con sistemas de amortiguamiento. Estas

estructuras deben contener, en cada dirección, un sistema de resistencia sísmica acorde a lo indicado en la tabla 12.2-1 del mismo documento.

El cortante basal mínimo usado para el diseño del sistema de resistencia sísmica debe ser el mayor de las ecuaciones 4 y 5.

$$V_{min} = \frac{V}{\beta_{v+1}}; \quad (4)$$

$$V_{min} = 0.75 * V; \quad (5)$$

Donde V es el cortante basal en la dirección de interés, determinado acorde al método de la fuerza horizontal equivalente descrito en el numeral 12.8 del ASCE-16. β_{v+1} corresponde al coeficiente numérico como se describe en la tabla 18.7-1 del ASCE-16, para un amortiguamiento efectivo igual a la suma del amortiguamiento viscoso en el modo fundamental de vibración de la estructura en la dirección de interés, más el amortiguamiento inherente β_I .

El cortante basal usado para el diseño del sistema sismo resistente no debe ser tomado menor que $1.0V$ si se tienen menos de dos dispositivos de amortiguamiento en cada piso, configurados para resistir la torsión. O el sistema de resistencia sísmica cuenta con irregularidad en planta tipo 1b (Table 12.3-1 ASCE 7-16) o en altura tipo 1b (Table 12.3-2 ASCE 7-16).

3.1.3.2. Sistema de Amortiguamiento.

Como se menciona en el numeral 18.2.1.2 de ACE7-16, los dispositivos de amortiguamiento y todos los componentes necesarios para conectarlo a la estructura deben ser diseñados para permanecer elásticos ante el sismo máximo considerado (MCE_R) el cuál corresponde a una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años. Se permite que otros elementos del sistema de amortiguamiento tengan una respuesta inelástica bajo el sismo MCE_R si se demuestra que no afecta de manera adversa el sistema de amortiguamiento, ya sea mediante análisis o pruebas de respuesta inelástica.

En el caso de elementos controlados por fuerza, como pueden ser los elementos tipo *brace* que unen los dispositivos con la estructura, estos deben diseñarse para fuerzas sísmicas incrementadas en un 20% respecto a las obtenidas por MCE_R promedio (18.4.2 ASCE 7-16).

3.1.3.3. Sismo de diseño y registro sísmico MCE_R .

Para el uso de análisis de historial de respuesta no lineal, los conjuntos de movimientos de suelo tanto para el sismo de diseño (DBE, equivalente a $2/3$ del sismo MCE_R) y para el MCE_R , deben consistir en no menos de siete pares de componentes de aceleración horizontal seleccionados y escalados a partir de eventos registrados que tienen magnitudes, distancias de falla y mecanismo de origen consistentes con los que controlan el sismo de diseño y los eventos MCE_R . Se permite escalar los movimientos sísmicos para obtener coincidencia espectral, igualmente se permite el uso de pares de movimientos de suelo simulado cuando no se disponga de registros reales (18.2.2.2 ASCE 7-16).

3.1.3.4. Procedimiento de Análisis y diseño.

De acuerdo con lo indicado en el numeral 18.2.3 del ASCE 7-16, las estructuras provistas de sistema de amortiguamiento deben analizarse y diseñarse utilizando el procedimiento de historial de respuesta no lineal. Se permite el análisis y diseño usando los procedimientos de espectros de respuesta o fuerza horizontal equivalente pero sujeto a ciertos límites, es decir, estos últimos no pueden ser utilizados para todas las estructuras, estas deben cumplir ciertos requisitos de irregularidades, ubicación de amortiguadores y zonas sísmicas.

3.1.3.5. Sistema de Amortiguamiento.

El diseño, la construcción e instalación de los dispositivos de amortiguamientos se basa en la respuesta de los movimientos sísmicos MCE_R . Adicionalmente se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones (18.2.4. ASCE 7-16): 1) Degradación debido a grandes desplazamientos y ciclos bajos causados por cargas sísmicas; 2) Degradación debido a desplazamientos pequeños y ciclos altos causados por cargas eólicas, térmicas u otras cargas sísmicas; 3) Fuerzas o desplazamientos causados por cargas de gravedad; 4) Adhesión de partes del dispositivo causado por corrosión o abrasión, biodegradación, humedad o exposición química; y 5) Exposición a condiciones ambientales (temperatura, humedad, radiación, entre otras).

3.1.3.6. Inspección y Pruebas Periódicas.

Todos los dispositivos deben contar con los medios para su inspección y remoción. El profesional responsable del diseño de la estructura debe establecer

un programa de inspección, mantenimiento y prueba para cada tipo de dispositivo, para garantizar que los dispositivos respondan de manera confiable a lo largo de la vida útil de diseño (18.2.4.3. ASCE 7-16).

3.1.3.7. Propiedades de los Amortiguadores.

Las propiedades de los dispositivos se establecen a partir de pruebas de prototipos específicos del proyecto o pruebas de prototipos anteriores de tipo y tamaño similar. Estos amortiguadores poseen límites mínimos y máximos de sus propiedades nominales, los cuales son definidos a través de las ecuaciones 6 y 7, y utilizados en análisis y diseño de la estructura, para tener en cuenta la variación de las propiedades nominales.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = (1 + (0.75 * (\lambda_{(ae,m\acute{a}x)} - 1))) * \lambda_{(test,m\acute{a}x)} * \lambda_{(spec,m\acute{a}x)} \geq 1.2 \quad (6)$$

$$\lambda_{m\acute{i}n} = (1 - (0.75 * (1 - \lambda_{(ae,m\acute{i}n)}))) * \lambda_{(test,m\acute{i}n)} * \lambda_{(spec,m\acute{i}n)} \leq 0.85 \quad (7)$$

Donde λ representa los factores permisibles de variación de las propiedades nominales de los amortiguadores causados por los efectos de medio ambiente y envejecimiento ($\lambda_{(ae,m\acute{a}x)}$, $\lambda_{(ae,m\acute{i}n)}$), ensayos de prototipo ($\lambda_{(test,m\acute{a}x)}$, $\lambda_{(test,m\acute{i}n)}$) y los establecidos por el diseñador responsable para representar la variación permisible de los amortiguadores de producción $\lambda_{(spec,m\acute{a}x)}$, $\lambda_{(spec,m\acute{i}n)}$. Las propiedades máximas y mínimas para utilizar en el análisis y diseño de cada dispositivo se determinan como se indica en las ecuaciones 8 y 9 (18.2.4.5. ASCE 7-16).

$$Propiedad\ M\acute{a}xima\ de\ Dise\tilde{n}o = Propiedad\ Nominal\ de\ Dise\tilde{n}o * \lambda_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

$$Propiedad\ M\acute{i}nima\ de\ Dise\tilde{n}o = Propiedad\ Nominal\ de\ Dise\tilde{n}o * \lambda_{m\acute{i}n} \quad (9)$$

3.1.3.8. Redundancia del sistema de Amortiguamiento.

De acuerdo con lo indicado en el numeral 18.2.4.6. ASCE 7-16, se considera que un sistema de amortiguamiento no posee redundancia si se proporcionan menos de cuatro dispositivos en cualquier piso y en cualquier direcci3n principal, o se ubican menos de dos dispositivos a cada lado de la rigidez de cualquier piso en cualquier direcci3n. Si el sistema no posee redundancia, todos los dispositivos deben ser capaces de soportar desplazamientos iguales a 130% del desplazamiento m1ximo calculado bajo MCE_R . En el caso de los dispositivos

dependientes de la velocidad, estos deberán soportar la fuerza y el desplazamiento asociados al 130% de la velocidad obtenida bajo MCE_R .

3.1.3.9. Procedimiento de Historial de Respuesta No Lineal.

Las propiedades de rigidez y amortiguamiento utilizados en los modelos se deben basar o verificar mediante pruebas de los dispositivos como se menciona en el numeral 18.6 del ASCE 7-16. El análisis del historial de respuesta no lineal debe realizarse mediante un modelo matemático que tenga en cuenta directamente el comportamiento histerético no lineal de todos los miembros y conexiones que experimentan un comportamiento inelástico. Como se describe en el numeral 18.3 del ASCE 7-16, si la fuerza calculada en un elemento del sistema de resistencia sísmica o el sistema de amortiguamiento no excede 1.5 veces la fuerza esperada usando un factor de reducción de resistencia de 1, se permite modelar el elemento como lineal.

El amortiguamiento inherente de la estructura no debe tomarse como mayor al 3% del crítico a menos que los datos de prueba consistentes con niveles de deformación por debajo del desplazamiento de fluencia efectivo del sistema de resistencia a la fluencia respalden valores más altos. El análisis de la estructura debe ser tanto para el sismo de diseño como para el MCE_R , utilizados para diseñar el sistema de resistencia sísmica y el sistema de amortiguamiento respectivamente (18.3. ASCE 7-16).

3.1.3.10. Modelado de los Dispositivos de Amortiguamiento.

Los modelos matemáticos de los dispositivos de amortiguamiento dependientes del desplazamiento deben incluir el comportamiento histerético de acuerdo con los datos de prueba, teniendo en cuenta los cambios significativos en la resistencia, la rigidez y la forma de bucle histerético. Los modelos matemáticos dependientes de la velocidad se deben analizar incluyendo el coeficiente de velocidad consistente con los datos de prueba. Los elementos flexibles que conectan los dispositivos a la estructura deben incluirse también en el modelo (18.3.1. ASCE 7-16).

3.1.3.11. Parámetros de Respuesta.

Para cada movimiento de terreno utilizado en el análisis de historial de respuesta se calculan los valores máximos de fuerzas, desplazamientos y

velocidades (en el caso de dispositivos dependientes de la velocidad) en cada uno de los amortiguadores. Se permite utilizar el valor promedio de cada parámetro de respuesta, para los movimientos sísmicos de diseño y MCE_R (18.3.3. ASCE 7-16).

3.1.3.12. Derivas de Piso.

Las derivas de piso se determinan utilizando los movimientos de suelos MCE_R teniendo en cuenta la interacción del sistema de resistencia sísmica con los dispositivos de amortiguamiento, teniendo en cuenta los efectos de excentricidad accidental. La deriva máxima de piso no deberá exceder el 3% ni los límites de deriva especificados en la **Tabla 1** multiplicados por el menor valor entre $1.5 * \frac{R}{C_d}$ y 1.9, según numeral 18.4.1 ASCE 7-16. Los valores de R y C_d corresponden a los dados en la tabla 12.2-1 del ASCE 7-16.

Tabla 1 Límite de derivas según tabla 12.12-1 del ASCE 7-16.

Table 12.12-1 Allowable Story Drift, $\Delta_a^{a,b}$			
Structure	Risk Category		
	I or II	III	IV
Structures, other than masonry shear wall structures, four stories or less above the base as defined in Section 11.2, with interior walls, partitions, ceilings, and exterior wall systems that have been designed to accommodate the story drifts	$0.025h_{xx}^c$	$0.020h_{xx}$	$0.015h_{xx}$
Masonry cantilever shear wall structures ^d	$0.010h_{xx}$	$0.010h_{xx}$	$0.010h_{xx}$
Other masonry shear wall structures	$0.007h_{xx}$	$0.007h_{xx}$	$0.007h_{xx}$
All other structures	$0.020h_{xx}$	$0.015h_{xx}$	$0.010h_{xx}$

^a h_{xx} is the story height below level x .

^bFor seismic force-resisting systems solely comprising moment frames in Seismic Design Categories D, E, and F, the allowable story drift shall comply with the requirements of Section 12.12.1.1.

^cThere shall be no drift limit for single-story structures with interior walls, partitions, ceilings, and exterior wall systems that have been designed to accommodate the story drifts. The structure separation requirement of Section 12.12.3 is not waived.

^dStructures in which the basic structural system consists of masonry shear walls designed as vertical elements cantilevered from their base or foundation support that are so constructed that moment transfer between shear walls (coupling) is negligible.

3.1.3.13. Criterios Estructurales de Diseño.

Los efectos de las cargas sísmicas están definidos en el numeral 12.4.2 del ASCE 7-16 como se indica en la ecuación 10.

$$E = \rho Q_E + 0.2S_{DS}D; \quad (10)$$

Donde:

Q_E = Fuerza sísmica horizontal.

$0.2S_{DS}D$ = Efectos de carga sísmica vertical (12.4.2.2. del ASCE 7-16).

ρ = Factor de redundancia de acuerdo al numeral 12.3.4.2. del ASCE 7-16.

S_{DS} = Aceleración espectral de diseño (DBE) para periodos cortos. Este factor es reemplazado por la aceleración espectral para periodos cortos (S_{MS}) del evento máximo esperado (MCE_R).

Las combinaciones de diseño utilizadas son descritas en el numeral 2.3 del ASCE 7-16, las cuales se mencionan a continuación:

- 1) $1.4D$
- 2) $1.2D + 1.6L + 0.5 L_r$
- 3) $1.2 + L + 1.6L_r$
- 4) $(1.2 + 0.2S_{DS})D + L + \rho Q_E$
- 5) $(0.9 - 0.2S_{DS})D + \rho Q_E$

Se permite que el factor de carga L en la combinación 4 sea igual a 0.5 para todas las ocupaciones en las que L sea menor o igual a 100 psf (4.78 kN/m²), a excepción de garajes o áreas ocupadas como lugares de reunión pública.

3.2. OPTIMIZACIÓN

La optimización busca encontrar la mejor solución a un problema determinado, sometido a diferentes tipos de restricciones. Este tema en ingeniería estructural se considera aun relativamente nuevo, en el cual lo que se busca en la mayoría de los casos es obtener el mejor desempeño estructural al menor costo posible, procurando disminuir a su vez los tiempos de cómputo necesarios para dar con una buena solución.

En la actualidad no existe un método que sea capaz de resolver de manera eficiente todo tipo de problemas y es por ello por lo que se han desarrollado diversos métodos hasta el día de hoy [42]. Si bien en la mayoría de los casos no puede demostrarse que el resultado obtenido sea un óptimo global (la mejor solución de todas las soluciones factibles), el resultado obtenido tiende a ser un buen candidato en cuanto a su valor en la función objetivo y cumplimiento de las restricciones impuestas, teniendo en cuenta que debido a la gran cantidad de variables que posee un problema de ingeniería, se pueden tener muchas soluciones factibles, aunque no necesariamente la mejor.

Por lo tanto, debido a lo anterior, la optimización se puede definir como la selección de la mejor solución de un conjunto de soluciones posibles, de acuerdo con un criterio de selección dado, para lo cual, se emplean métodos de optimización que permitan conocer los mejores valores que puede asumir dicho conjunto de

variables [43]. Los diferentes problemas de optimización pueden clasificarse de acuerdo con lo siguiente [44]:

- i) De acuerdo con la existencia de restricciones:
 - Con restricciones.
 - Sin restricciones.
- ii) De acuerdo con la naturaleza de las variables de decisión:
 - Problemas estáticos o paramétricos.
 - Problemas dinámicos o de trayectorias.
- iii) De acuerdo con el tipo de ecuaciones involucradas:
 - Problemas lineales.
 - Problemas no lineales.
 - Problemas de programación geométrica.
 - Problemas de programación cuadrática.
- iv) De acuerdo con el tipo de valores permitidos en las variables de diseño:
 - Problemas de programación entera.
 - Problemas de programación con valores reales.
 - Cuando se busca un orden óptimo de elementos, se tiene un problema de optimización combinatoria.
- v) De acuerdo con la naturaleza determinista de la variable:
 - Problemas estocásticos.
 - Problemas deterministas.
- vi) De acuerdo con la separabilidad de funciones:
 - Problemas separables.
 - Problemas no separables.
- vii) De acuerdo con el número de funciones objetivo:
 - Mono-objetivo.
 - Multi-objetivo.

El tema de problemas de optimización se encuentra englobado en los siguientes conceptos fundamentales: función objetivo, metaheurística y restricciones, los cuales son descritos a continuación.

3.2.1. Función Objetivo

La función objetivo o de coste, es una formulación matemática (en función de las variables de diseño) que mide cualitativamente el funcionamiento del sistema en un proceso de optimización, de modo que lo que se busca es la maximización o minimización de esta, enmarcado en una gama de posibles soluciones. El problema así descrito puede ser expresado de la siguiente manera [43]:

- Dada: una función $f: A \rightarrow R$ donde A es un conjunto de números reales.
- Buscar: un elemento x_0 en A tal que $f(x_0) \leq f(x)$ para todo x en A ("minimización") o tal que $f(x_0) \geq f(x)$ para todo x en A ("maximización").

La complejidad del problema de optimización dependerá entonces de la cantidad de variables presentes, las cuales definen el espacio de búsqueda de soluciones. Existen diferentes tipos de función objetivo, de acuerdo con el tipo de variable, formulación matemática y operatividad. Entre las más importantes, se tiene:

- Lineal y no lineal.
- Unimodal y multimodal.
- Estática y dinámica.
- Sin ruido y con ruido.
- Un objetivo y multiobjetivo

3.2.2. Metaheurística

El concepto de metaheurística viene de las raíces griegas "meta" y "heurística" que quieren decir "más allá" y "encontrar" respectivamente. Por lo tanto, se considera que un método metaheurístico permite buscar soluciones óptimas o cuasi óptimas en problemas de elevada complejidad, en tiempos de cómputo razonables sin necesidad de evaluar cada una de las soluciones posibles [2].

Estas técnicas se caracterizan por emular fenómenos naturales de manera estocástica. Es decir, realizan el proceso de búsqueda de la solución óptima teniendo en cuenta la aleatoriedad de manera constructiva [45].

3.2.3. Restricciones

Las restricciones son relaciones que las variables deben satisfacer, estas limitan el espacio de búsqueda factible entre los cuales se puede mover cada variable de diseño, expresadas generalmente mediante ecuaciones e inecuaciones. Las restricciones o limitaciones pueden ser impuestas directamente por una o varias variables (restricción explícita), o puede ser impuesta por un fenómeno que no tiene relación directa con las variables de diseño (restricción implícita) [46]. Debido a que éstas son aplicadas en problemas de tipo físico-mecánico, se pueden clasificar en dos grandes grupos [43]:

- Funcionales: Se refieren a comportamiento físico-mecánico del sistema.
- Geométricas: Se refieren a las dimensiones y topología de los elementos.

En el ámbito estructural, las restricciones se refieren al comportamiento de la estructura y su estabilidad, y se imponen generalmente a los esfuerzos y deformaciones en los elementos (funcionales) y por ende a sus dimensiones mínimas y máximas (geométricas).

El imponer restricciones al problema de optimización conlleva a limitar el espacio de soluciones factibles, el cual puede ser muy pequeño en comparación con el espacio de búsqueda total, elevando la dificultad de resolver este tipo de problemas. Cuando el espacio de soluciones factibles se hace muy pequeño, es necesario implementar técnicas de manejo de restricciones que sean capaces de guiar al algoritmo a la zona factible.

Muchas técnicas han sido propuestas hasta el momento [47] [48] [49], las funciones de penalidad han sido las más comunes para el manejo de restricciones. Este método de penalización fue inicialmente sugerido en [50] y seguido por [51] [52]. Las funciones de penalidad consisten básicamente en adicionar (si se trata de minimización) un valor a la función objetivo dependiendo de la cantidad de violaciones de restricciones que tenga cada individuo (solución), de esta manera se castigan resultados con alta cantidad de restricciones y el algoritmo se encamina hacia el espacio con menor cantidad de restricciones violadas hasta llegar a la zona de soluciones factibles.

Entre los diferentes métodos de penalización se encuentran: La penalidad estática [53] [54], dinámica [55] [56], adaptativa, penalidades coevolutivas [57], penalidades de muerte y las técnicas de separación entre función objetivo y

restricciones [58] [59], todas estas detalladas en [60]. En el caso de la penalidad estática, los parámetros de penalización se mantienen estáticos durante el proceso de optimización, siendo necesario calibrar el algoritmo según el tipo de problema a resolver para poder obtener un valor funcional antes de iniciar el proceso de optimización. A diferencia de la penalización estática, la dinámica varía a lo largo del proceso evolutivo del algoritmo y aquellas que aprenden, es decir, que cambian según los resultados obtenidos de las generaciones anteriores, se denominan penalidades adaptativas.

En el presente trabajo, debido a la gran cantidad de restricciones que se pueden tener, se opta por dar manejo a las restricciones de acuerdo con la cantidad de restricciones violadas y el valor normalizado de las restricciones violadas, tal como se propone por Chehouri *et al.* [60] mediante el método denominado VCH (*Violation Constraint-Handling*).

3.3. TRABAJO COMPUTACIONAL EN PARALELO

En problemas de optimización estructural, el tiempo de cómputo necesario para dar solución a las ecuaciones de elementos finitos es de gran relevancia, ya que representa más del 95% del tiempo total necesario para realizar el proceso de optimización [61] [62]. Por lo tanto, debido a la alta cantidad de soluciones que se tienen a lo largo de un proceso de optimización, el trabajo computacional en paralelo suele ser una herramienta adecuada y razonable para disminuir los tiempos de cómputo necesarios para encontrar una solución óptima.

Los algoritmos evolutivos como el AG, en lugar de trabajar con un solo punto de diseño, trabajan simultáneamente con una población de puntos en todo el espacio de variables de diseño, lo que permite que se implemente de manera natural un procedimiento de trabajo en paralelo. Lo anterior se consigue asignando a cada procesador disponible un análisis completo del modelo numérico por elementos finitos sin necesidad de comunicación entre procesadores durante la fase de solución [63]; de esta manera se trabaja en la presente investigación.

Adicionalmente, si hay disponibilidad de un mayor número de procesadores que el tamaño total de la población del AG, es posible asignar a más de un procesador el análisis de elementos finitos de cada solución candidata. Lo anterior hace posible el uso de un método de solución paralela eficiente, como, por ejemplo,

ejecutar de manera paralela cada registro de *Time History* en un mismo modelo matemático.

En los problemas resueltos en el presente trabajo se resuelven las soluciones candidatas de manera paralela en cada generación. La programación se realizó teniendo en cuenta las herramientas de programación en paralelo proporcionadas por Matlab®, como la función *parfor* que permite ejecutar iteraciones independientes en paralelo en computadores multinúcleo. El procesador utilizado para resolver los problemas de optimización de las estructuras equipadas con sistemas de amortiguamiento corresponde a un Intel® Core(TM) i7-12700M, 4.60 GHz y 16 Gb de RAM el cual posee 12 núcleos.

3.4. ALGORITMO GENÉTICO (AG)

El algoritmo genético (AG) es una técnica de optimización que simula el proceso evolutivo basado en los principios de evolución biológica natural, en donde, los individuos más fuertes sobreviven y evolucionan en un ambiente competitivo [32]. El AG, propuesto por Holland [5], ha sido utilizado exitosamente en diferentes aplicaciones ingenieriles.

El AG trabaja con una codificación del conjunto de variables, no con las variables como tal. En el presente trabajo se trabaja con un código binario para representar las variables de diseño. El código binario es generado aleatoriamente según el rango de número reales definido previamente para cada variable, esta decodificación se hace según la ecuación 11.

$$k_j = +(L_{sup} - L_{inf}) * \frac{b_j}{2^n - 1}; \quad (11)$$

Donde L_{sup} y L_{inf} , corresponden a los límites superiores e inferiores de cada variable, b_j y n son el valor entero decimal y el número de bits de cada cadena binaria respectivamente.

Las cadenas binarias trabajan con tres operaciones básicas, selección, cruce y mutación. El proceso de reproducción es un proceso de selección para determinar el potencial de supervivencia de acuerdo con el valor de la función objetivo, en donde, las cadenas binarias (individuos) con valor de función objetivo más alta, tienen más probabilidades de continuar a la operación posterior. En el proceso de selección, después de una generación inicial aleatoria de individuos

(soluciones candidatas), se evalúa cada individuo en la función objetivo y se utiliza el método de la ruleta para realizar la respectiva selección. El método consiste en generar probabilidades de selección aleatorias para cada individuo (expresado en términos binarios), con las cuales se van eligiendo pares según la probabilidad acumulativa calculada para cada individuo, es decir, el valor de la función objetivo de cada individuo sobre la sumatoria de todos los valores de la función objetivo de todos los individuos. De esta manera se forman pares y dan paso a la siguiente fase, el cruce.

El proceso de cruce es un operador de recombinación que produce dos individuos descendientes, con una probabilidad de cruce p_c , mediante el intercambio aleatorio de bits entre dos cadenas principales. Estos nuevos individuos contienen parcialmente información genética de sus padres.

Posteriormente, en el proceso de mutación, se proporcionan cambios aleatorios ocasionales en algunos bits de los individuos descendientes. La mutación consiste en cambiar el bit seleccionado aleatoriamente de 0 a 1 o viceversa, mediante una probabilidad de mutación p_m . Este operador puede evitar que todas las soluciones de la población caigan en un óptimo local.

En el proceso evolutivo, cada cadena binaria de la población se manipula cíclicamente a través de las tres operaciones básicas antes descritas y recombinan los individuos para producir una nueva población que tiende a tener un mayor valor de función objetivo [32].

4. ALGORITMO GENÉTICO MODIFICADO (AGM).

El AGM implementado posee las siguientes características adicionales respecto al GA básico: 1) realiza una base de datos de tamaño igual a toda la población, en la cual se guardan los mejores individuos de cada iteración y se compara su valor de función objetivo con los de la siguiente fase evolutiva, con el objetivo de que no se pierdan buenos candidatos en el proceso de evolución; 2) para los problemas con restricciones de igualdad, se convierten en desigualdades y se maneja una tolerancia variable decreciente en proceso de optimización, terminando en una tolerancia muy pequeña definida previamente por el usuario; 3) Se crea un radio de búsqueda decreciente con el objetivo de enfocar el espacio de búsqueda a medida que se avanza en el proceso de optimización; 4) Se adicionan individuos aleatorios en cada generación dentro del radio de búsqueda con el objetivo de no perder variedad de soluciones y evitar óptimos locales, y 5) se implementan partes de una técnica de manejo de restricciones adaptativa, denominada VCH (*Violation Constraint-Handling*) propuesta por Chehouri *et al.*[60], para mejorar capacidad de encontrar soluciones en espacios de búsqueda factibles muy reducidos, en comparación con el espacio total de búsqueda.

La técnica VCH tiene como propuesta fundamental que no requiere de factores predefinidos que deban ser propuestos por el usuario para mejorar el desempeño, a diferencia de las demás técnicas de manejo de restricciones. Los pasos acogidos de la técnica para el presente trabajo corresponden a los siguientes:

- 1) Para cada individuo x , se evalúa la función objetivo $f(x)$ y los correspondientes valores de restricciones. Como las restricciones de igualdad son transformadas a desigualdades, se tiene en general un vector de valores de restricciones, las cuales son normalizadas.

$$G_i = \text{normalizar}(g_i(x)), \quad i = 1, \dots, n.$$

Donde G_i corresponde al valor normalizado de las restricciones para cada individuo, $g_i(x)$ refiere al valor de la restricción i del número total de restricciones n .

- 2) Seguidamente se calcula el valor de las restricciones violadas (CV) de cada individuo teniendo en cuenta el vector normalizado G_i , como se indica a continuación:

$$CV = \sum_{i=1}^{i=n} \max(0, G_i)$$

- 3) Se define la cantidad de restricciones violadas (NV) en forma de porcentaje teniendo en cuenta el número total de restricciones:

$$NV = \frac{\text{Número de restricciones violadas}}{n};$$

- 4) La población es separada en dos familias, una de soluciones factibles (V_o) y la otra de soluciones no factibles (V_1), las cuales violan al menos una restricción. El primer conjunto (V_o) es organizado respecto al valor de la función objetivo y el segundo conjunto (V_1) es organizado de acuerdo a un conjunto de reglas basado en factibilidad para evolucionar la población de cada generación [60], las reglas son las siguientes:
- El orden de los individuos se realiza de acuerdo con el valor de NV, de menor a mayor.
 - Seguidamente, para individuos con valores iguales de NV, estos se organizan de acuerdo con el valor de CV, de menor a mayor.

4.1. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE AGM

Para evaluar el desempeño del algoritmo propuesto se utilizaron conjuntos de funciones con restricciones conocidas en la literatura de la optimización combinatoria [64]. Se desarrolló un código en el paquete computacional Matlab® y el equipo utilizado fue un Intel® Core(TM) i7-12700M, 4.60 GHz y 16 Gb de RAM el cual posee 12 núcleos.

En cuanto a los criterios de parada definidos para el AGM, fueron considerados los siguientes: i) el número total de iteraciones, en este caso se ha manejado como n veces el número de variables, para los problemas con restricciones se manejó entre 4 y 250 veces el número de variables; ii) se evalúa que la desviación estándar de la función objetivo de las últimas n generaciones sea menor que un límite previamente predefinido, en el caso de los problemas del presente trabajo de investigación se manejó como límite 0.01.

4.1.1. Problemas Con Restricciones

Debido a que el algoritmo propuesto y probado es de carácter estocástico, se utiliza una base estadística para demostrar su desempeño. El mejor valor (**MF**), el peor valor (**PF**), el promedio (**PVF**) y la desviación estándar (**DF**) de la función objetivo se tuvieron en cuenta en este trabajo de investigación, al igual que el tiempo de ejecución promedio (**TP**) después de ejecutar 100 veces el AGM. En este tipo de metodologías heurísticas utilizadas para realizar procesos de optimización, se indica que son estables y precisas cuando poseen una desviación estándar baja y se cataloga como preciso cuando la diferencia entre la media de las pruebas y el valor óptimo (conocido para la función de prueba) es pequeño; adicionalmente, si el algoritmo es preciso y exacto, se considera un algoritmo robusto [2].

En todas las pruebas realizadas se utilizaron los siguientes parámetros: i) se trabajó con una probabilidad de cruce (pc) de 0.85 y de mutación (pm) de 0.1; ii) el número de generaciones varía entre 4 y 250 veces el número de variables de cada problema; y iii) el número de individuos varia desde 5 y 50 veces el número de variables de cada problema.

En la

Tabla 2, se encuentra un resumen de las características de cada función con restricciones utilizada para realizar la evaluación del desempeño del algoritmo [64]. Los problemas están compuestos por funciones de diferentes dimensiones las cuales pueden ser lineales, cuadráticas o no lineales. Además, estos problemas de optimización contienen restricciones con igualdades y desigualdades, tornando a su vez espacios de búsqueda factibles muy pequeños y de difícil convergencia.

Tabla 2: Funciones de prueba con restricciones.

Función	Valor óptimo	Número de dimensiones	Función	p	LI	NI	LE	NE
G1	-15.000	13	Cuadrática	0.00%	9	0	0	0
G2	-0.8036	20	No lineal	100.0%	1	1	0	0
G3	-1.000	10	No lineal	0.00%	0	0	0	1
G4	-30665.539	5	Cuadrática	27.01%	0	6	0	0
G5	5126.498	4	No lineal	0.00%	2	0	0	3

G6	-6961.814	2	No lineal	0.01%	0	2	0	0
G7	24.306	10	Cuadrática	0.00%	3	5	0	0
G8	-0.096	2	No lineal	0.86%	0	2	0	0
G9	680.630	7	No lineal	0.52%	0	4	0	0
G10	7049.331	8	Lineal	0.00%	3	3	0	0
G11	0.750	2	Cuadrática	0.10%	0	0	0	1
G12	-1.000	3	Cuadrática	4.77%	0	9	0	0
G13	0.054	5	No lineal	0.00%	0	0	1	2

En la

Tabla 2 LI indica el número de desigualdades lineales; **NI** el número de desigualdades no lineales; **LE** el número de igualdades lineales y **NE** el número de igualdades no lineales. **p** representa una estimación del espacio factible respecto a todo el espacio de búsqueda, y se obtiene generando un millón de soluciones aleatorias y se evalúa que porcentaje de ellas son factibles.

Estos problemas tienen diferentes niveles de complejidad, con características variables como dimensiones y cantidad de restricciones. En el caso de los problemas G1, G2, G3 y G7 son considerados de elevada dimensionalidad, G4, G9, G10 y G13 de mediana dimensionalidad y G6, G8, G11 y G12 de baja dimensionalidad. Por otro lado, los problemas G1, G3, G5, G7, G10 y G13, se consideran de difícil convergencia debido al espacio de soluciones factibles tan pequeño (0.00%).

La Tabla 3 presenta los resultados alcanzados con *AGM* en los problemas con restricciones. Se observa que el algoritmo llega al valor óptimo de los problemas siendo estable en su proceso de optimización, según el valor de desviación estándar (DF) obtenido. Según los tiempos promedio de cómputo (TP), los problemas son resueltos de manera rápida, aún en los problemas con mayor dificultad que fueron los G5, G10 y G13, debido al espacio factible tan pequeño que poseen ($p=0.00\%$) y la alta cantidad de restricciones de igualdades lineales y no lineales.

Tabla 3 Desempeño del AGM en funciones con restricciones.

Estadística	FUNCIONES DE PRUEBA					
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
MF	-14.912	-0.791	-0.999	-30664.619	5113.984	-6961.814

PF	-12.092	-0.681	-0.944	-30358.563	5496.176	-6729.389	
PVF	-14.477	-0.752	-0.994	-30516.307	5145.153	-6938.334	
DF	7.47E-01	2.40E-02	7.59E-03	7.67E+01	5.09E+01	4.85E+01	
TP (s)	356.167	531.637	38.780	128.268	333.713	90.946	
FUNCIONES DE PRUEBA							
	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
MF	24.367	-0.096	680.633	7049.280	0.750	-1.000	0.011
PF	25.829	-0.090	728.184	7163.717	0.752	-0.984	0.303
PVF	24.728	-0.096	681.728	7073.025	0.751	-0.999	0.032
DF	3.17E-01	1.11E-03	6.18E+00	2.40E+01	3.81E-04	2.80E-03	5.03E-02
TP (s)	290.772	11.679	267.387	651.832	0.935	7.178	367.856

Debido al desempeño mostrado por *AGM* en los problemas con restricciones, se utilizó para resolver problemas de optimización simultanea de estructuras y amortiguadores de fluido viscoso, el cual se muestra en el siguiente capítulo.

5. FORMULACIÓN Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS CON AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO.

Los problemas de optimización resueltos en el presente trabajo de investigación tienen como objetivo disminuir el costo de edificaciones equipadas con sistemas de amortiguamiento de fluido viscoso. Las variables corresponden a las secciones transversales de los elementos estructurales, de las riostras de soporte y las características y posición de los amortiguadores de fluido viscoso. La función objetivo presentada a continuación tiene en cuenta el costo de cada una de las variables; en cuanto a las restricciones, estas corresponden a varios requisitos del código NSR-10 y ASCE 7-16:

$$\text{Minimizar: } J = J_s + J_d + J_b;$$

Donde J_s corresponde al costo total de la estructura, el cual es obtenido al multiplicar el volumen total de acero por el costo por unidad de volumen (β_s), como se indica en la ecuación 12. J_d corresponde al costo de los dispositivos de amortiguamiento, calculado como el número de dispositivos por el costo de cada

amortiguador (β_d), el cual es proporcional a la raíz cuadrada de la capacidad de fuerza ($\frac{costo}{\sqrt{kN}}$) [65], como se indica en la ecuación 13. El costo del elemento de soporte está relacionado con el volumen de acero multiplicado por (β_s), como se muestra en la ecuación 14.

$$J_s = \beta_s * \sum_{el=1}^{N_{ele}} A * L_{el}; \quad (12)$$

$$J_d = \beta_d * N_d * \sqrt{F_d}; \quad (13)$$

$$J_b = \beta_s * \sum_{k=1}^{N_d} L_{b,k} * A_{b,k}; \quad (14)$$

Donde:

N_{ele} = Número de elementos del pórtico sismo resistente.

A = Área de la sección transversal de cada elemento.

L_{el} = Longitud de cada elemento.

N_d = Número de amortiguadores.

F_d = Fuerza máxima desarrollada por cada amortiguador.

$L_{b,k}$ = Longitud del elemento tipo *brace*.

$A_{b,k}$ = Área de la sección transversal del elemento tipo *brace*.

La función objetivo se encuentra sujeta a las siguientes restricciones de configuración estructural, análisis y diseño de acuerdo al ASCE 7-16 y NSR-10.

- Límite de derivas:

Las derivas de la edificación son limitadas como se indica a continuación, bajo la acción del sismo máximo esperado (MCE_R), como se describe en el numeral 3.1.3.12 del presente documento.

$$\Delta_i \leq \min \left(\left[0.03 * h; 1.5 * \frac{R}{Cd} * \Delta_{m\acute{a}x}; 1.9 * \Delta_{m\acute{a}x} \right] \right);$$

Donde:

$\Delta_{m\acute{a}x}$ = Deriva máxima permitida en la tabla 12.12-1 del ASCE 7-16.

R = Coeficiente de modificación de respuesta según tabla 12.2-1 del ASCE 7-16.

Cd = Factor de amplificación de deflexión según tabla 12.2-1 del ASCE 7-16.

h = Altura de entrepiso.

γ = Factor de sobrerresistencia utilizado en el chequeo de columna fuerte – viga débil, tomado como 1 según el numeral F.3 del título F de la NSR-10.

- Columna Fuerte – Viga débil.

Este chequeo busca prever un mecanismo de falla deseado para el sistema de pórtico resistente a momento, el cual se caracteriza por articulaciones plásticas en los extremos de las vigas y no en las columnas. Esta restricción viene de la filosofía de diseño por capacidad [66] [67].

$$\sum M_{y,c} = \gamma * \sum M_{y,b} \quad \forall k = 1, \dots, N_{nodos};$$

Donde $M_{y,c}$ y $M_{y,b}$ corresponden a la suma de momentos de fluencia de todas las columnas y vigas conectadas al mismo nudo, respectivamente. El factor γ corresponde al valor de sobrerresistencia utilizado en el chequeo de columna fuerte – viga débil, tomado como 1 según el numeral F.3 del título F de la NSR-10.

- Restricción de continuidad de columnas.

La restricción de continuidad de columnas es adoptada con el objetivo de que estas no aumenten de tamaño en altura. Esta restricción, aunque no está de manera explícita en los códigos de diseño, si hace parte de la cultura de diseño de edificaciones sismo resistentes. Esta condición puede ser planteada de la siguiente manera:

$$A_{inf}^c \geq A_{sup}^c \quad \forall c = 1, \dots, N_{empalmes}$$

Donde A_{inf}^c y A_{sup}^c corresponden a las áreas de sección transversal de las columnas inferiores y superiores conectadas, respectivamente.

- Diseño de elementos estructurales del sistema sismorresistente.

El diseño de los elementos de los pórticos resistentes a momento viene dado bajo la filosofía de diseño LRFD (*Load and Resistance Factor Design*). Las combinaciones de cargas utilizadas son las expresadas en el numeral 2.3 del ASCE 7-16, las cuales corresponden con las indicadas en el numeral B.2.4 del título B de la NSR-10 y se indican en el numeral 3.1.3.13 del presente documento.

Para cada una de las combinaciones de carga, la resistencia de cada componente debe ser mayor o igual a los momentos, fuerzas axiales y cortantes obtenidos del análisis estructural. Lo anterior se puede traducir bajo la siguiente ecuación:

$$R_u \leq \phi R_n \quad \forall j = 1, \dots, N_{elem}$$

Donde:

R_u = Resistencia requerida según análisis estructural.

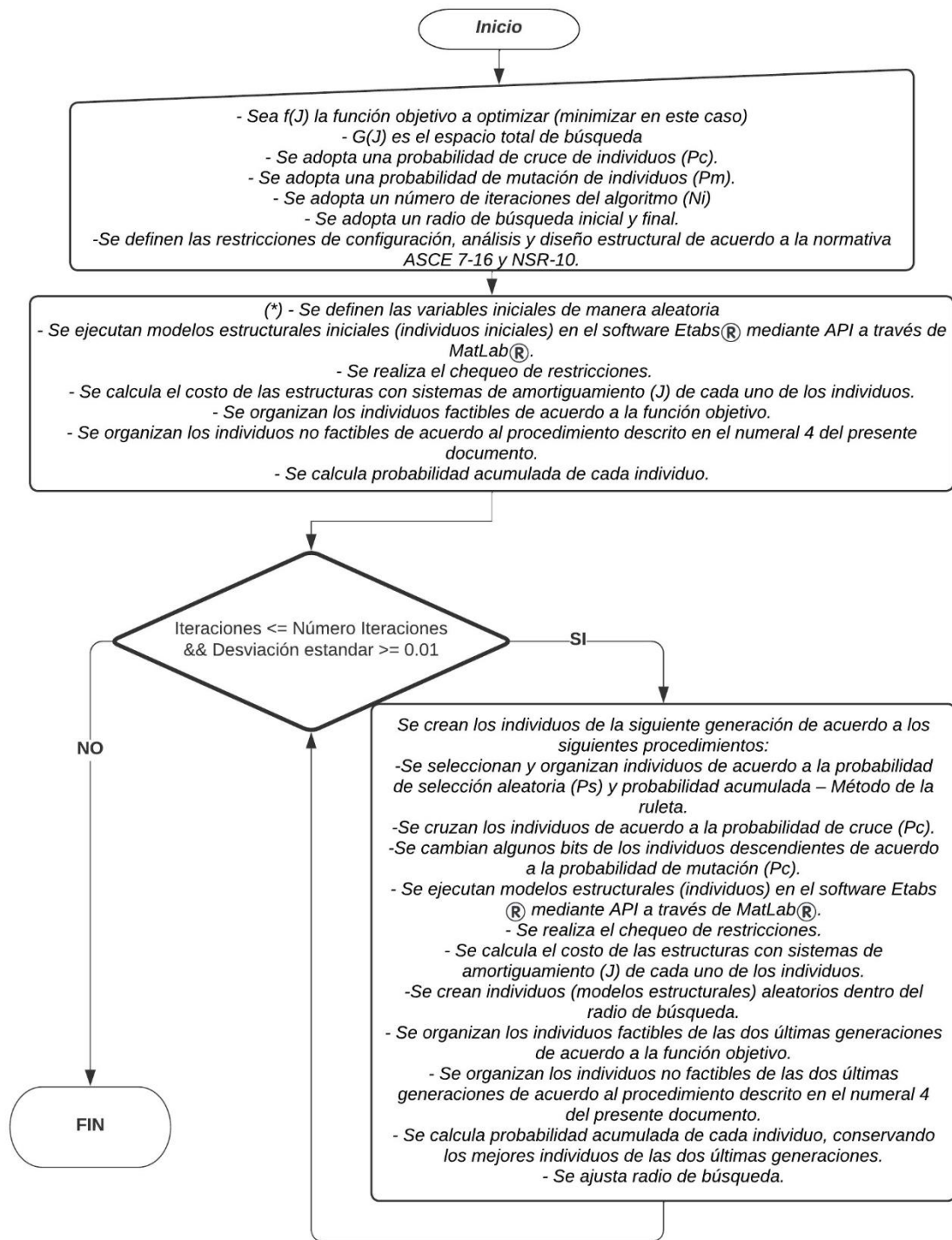
R_n = Resistencia nominal del elemento.

ϕ = Coeficiente de reducción de resistencia.

ϕR_n = Resistencia de diseño.

N_{elem} = Número de elementos.

Cada una de esas restricciones son verificadas para cada individuo (modelo estructural), de acuerdo con las variables que han ido evolucionando en el proceso de optimización. El procedimiento completo para dar solución al problema de optimización estructural indicado anteriormente se describe a través del siguiente pseudocódigo:



Con el procedimiento anteriormente descrito se procede a realizar la optimización de edificaciones equipadas con amortiguadores de fluido viscoso.

5.1. VARIABLES DE DISEÑO.

Las variables de diseño corresponden a las secciones transversales de los elementos, el coeficiente de amortiguamiento (C_d) y la relación entre la rigidez de la riostra de apoyo (ρ) con el coeficiente de amortiguamiento de cada amortiguador (C_d). Las propiedades del acero como el módulo de elasticidad (E) y el esfuerzo de fluencia (f_y) son asumidas como predefinidas, las secciones de los elementos son elegidas de catálogos estándar, como los perfiles IPE, HEA y HEB.

El coeficiente de amortiguamiento C_d corresponde al máximo posible el cual es predefinido por el usuario. La rigidez del elemento de soporte K_{br} del amortiguador también es considerada como variable de diseño, la cual está dada por la ecuación 15.

$$K_{br} = \rho * C_d; \quad (15)$$

5.2. PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS CON AMOTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO.

Tres edificaciones con pórticos de acero resistentes a momentos son utilizadas para demostrar la eficiencia de la metodología propuesta. Dos de ellas se encuentran reportadas en la literatura especializada [37] y la tercera corresponde a un edificio real ubicado en la ciudad de Cali-Colombia.

El primer problema corresponde a una estructura de 5 pisos y el segundo problema corresponde a una edificación de nueve pisos con retroceso en altura. Estos problemas son optimizados para dos conjuntos de registros sísmicos, uno para el nivel de diseño (DBE) y otro correspondiente al sismo máximo esperado (MCE_R). La tercera edificación corresponde a una estructura real de 3 pisos, para uso de hotelería, la cual se diseña de acuerdo con los requisitos de la NSR-10 y el ASCE 7-16 descritos en la sección 3.1.3 del presente documento.

6. INTERFAZ GRÁFICA DE ACOPLAMIENTO CON ETABS®

Para usar el algoritmo de manera práctica se desarrolló una aplicación .exe ejecutable denominada como *OptimaStructure Damper (OSD)*. La interfaz gráfica del ejecutable es la indicada en la Imagen 3, donde se evidencia cada uno de los datos de entrada necesarios para realizar el proceso de optimización.

Cada una de las variables posee un botón de información con ayuda activado con el click derecho que amplía el significado de cada variable, como se muestra en la Imagen 1.

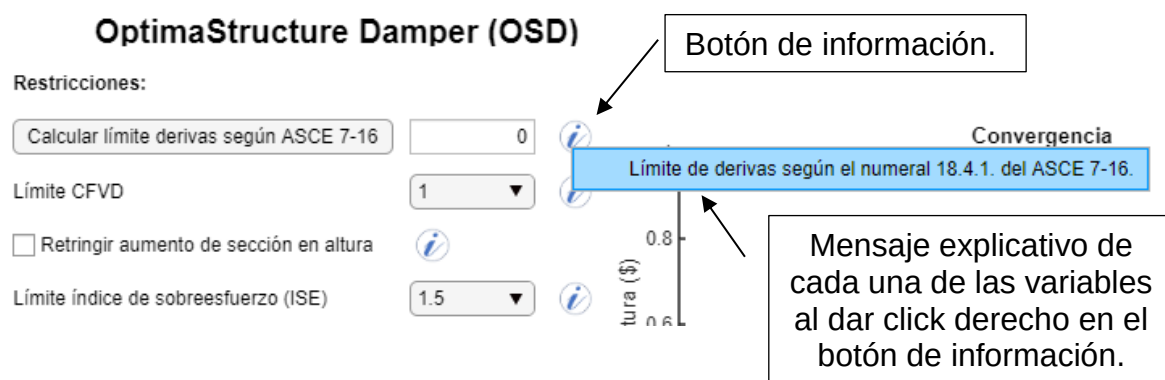


Imagen 1 Ejemplo botón de información de cada una de las variables.

Se debe tener presente que a la hora de cargar los archivos .EDB de ETABS, se debe tener adicionalmente los archivos con las extensiones .ebk, .Set, .ico, .EDB.tlog y .Set.tlog en la misma carpeta (Imagen 2), los cuales aparecen por defecto después de ejecutar manualmente por primera vez el modelo estructural, excepto las extensiones .EDB.tlog y .Set.tlog, estos últimos se encuentran presentes en la carpeta de instalación del software, los cuales se deben copiar a la carpeta donde está el archivo .EDB y colocarles el mismo nombre. Todos los archivos mencionados son copiados por el software OSD a la hora de generar nuevos modelos estructurales (modelos candidatos), lo cual ayuda a evitar posibles errores en el proceso de optimización.



Imagen 2 Archivos adicionales necesarios para empezar el proceso de optimización.

A continuación, se presenta de manera más detallada cada una de las variables indicada en el software OSD:

- Cantidad de grupos de columnas: Corresponde a la cantidad de grupos creados de columnas en el modelo ETABS, columnas que se desea tengan siempre la misma sección, como se indica en la Imagen 4. Los grupos de columnas son los primeros que deben ser creados en el modelo, debido a que ese es el orden lectura de grupos realizado por OSD.

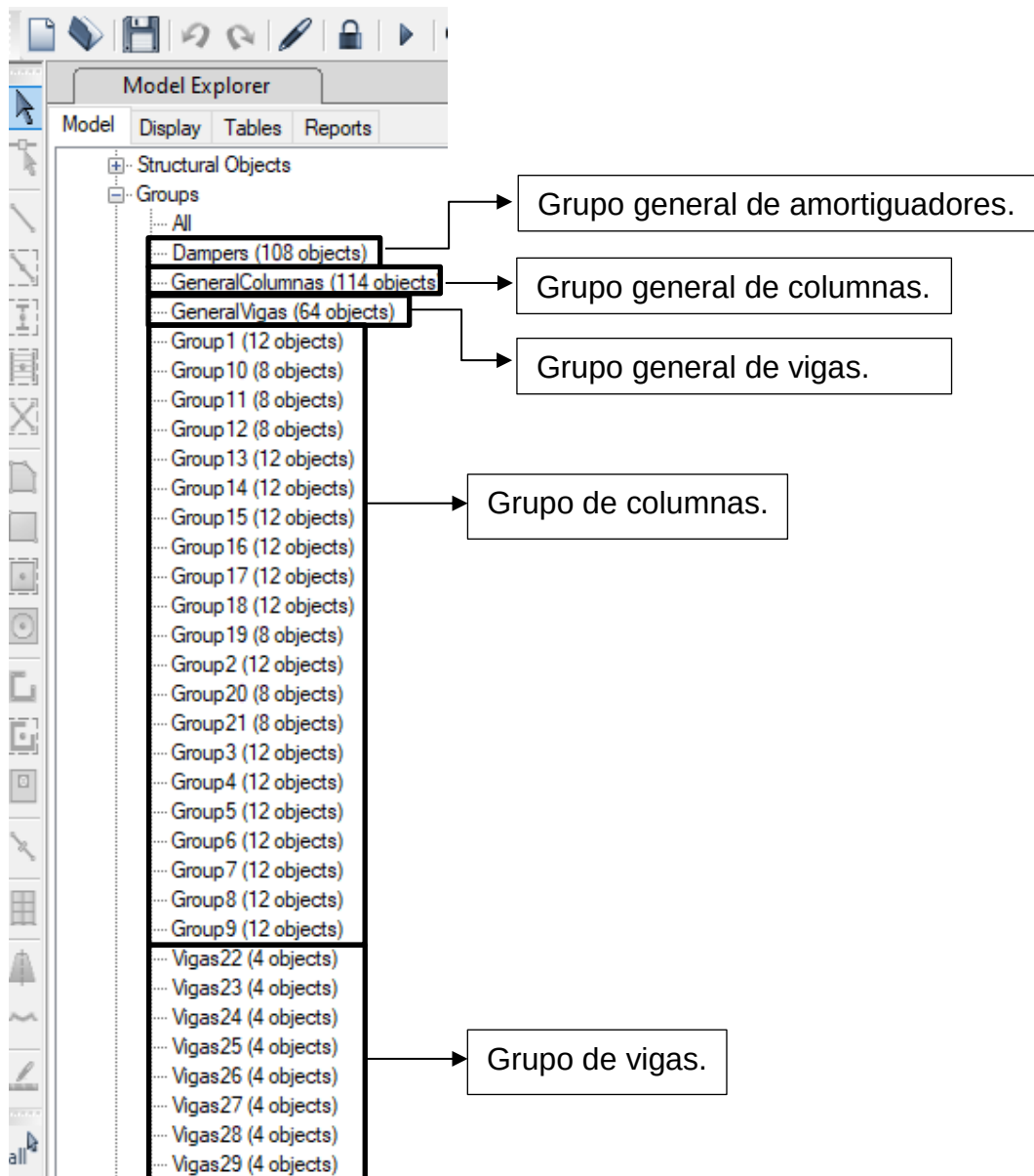


Imagen 4 Grupos definidos en el modelo ETABS.

- Cantidad de grupos de vigas: Corresponde a la cantidad de grupos creados de vigas en el modelo ETABS, vigas que se desea tengan siempre la misma sección, como se indica en la Imagen 4. Los grupos de vigas deben ser creados en el modelo después de crear todos los grupos de columnas, debido a que ese es el orden lectura de grupos realizado por OSD.
- Cantidad posible de amortiguadores: Corresponde a la cantidad de elementos tipo *link* creados en el modelo matemático, los cuales deben llevar el nombre “Damper ID#”, como se observa en la siguiente Imagen 5.

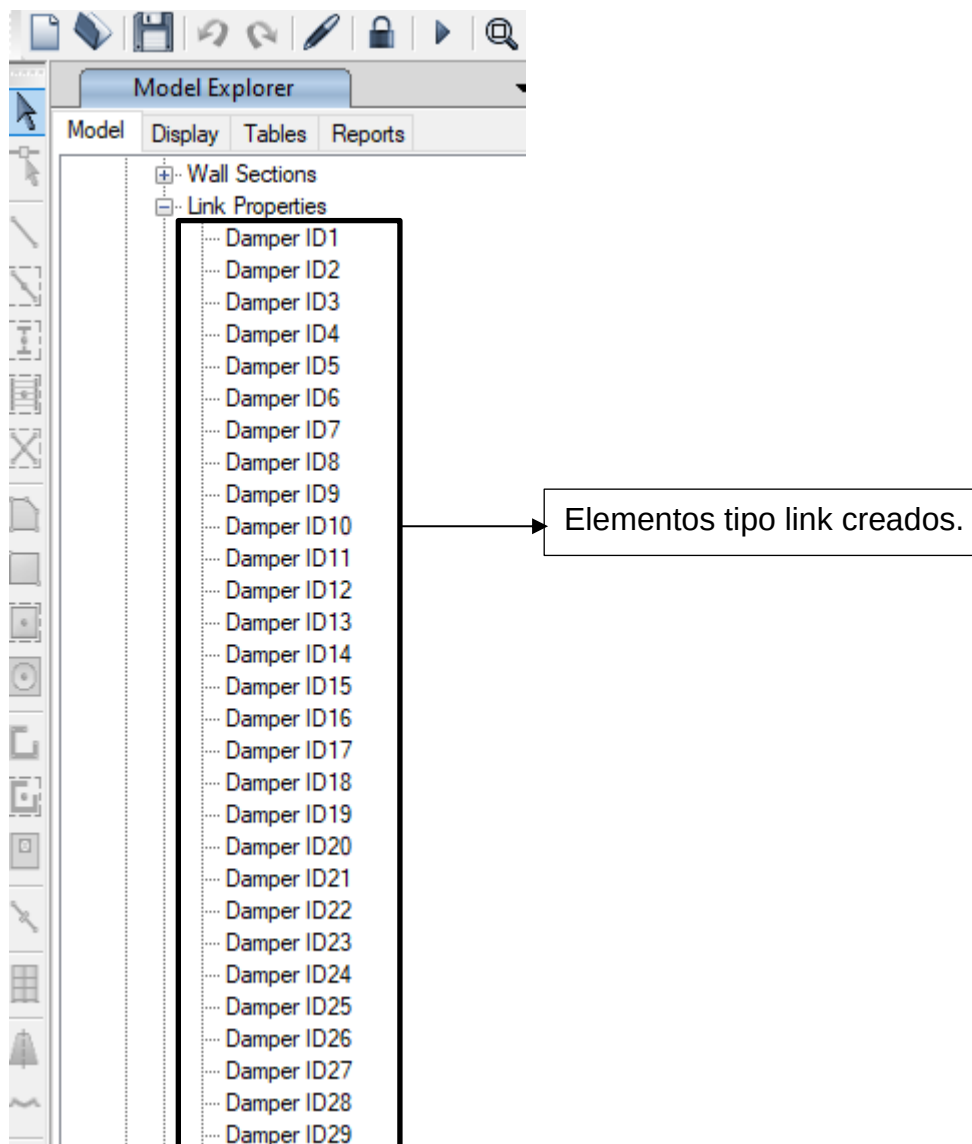


Imagen 5 Elementos tipo link creados en el modelo ETABS.

- Cantidad de grupos de amortiguadores: Corresponde a la cantidad de amortiguadores modelados a los que se le es asignado el mismo elemento *link*. El número total de amortiguadores modelados debe corresponder con la siguiente relación:

$$Cant_{pa} * Cant_{ga} = Núm_{am};$$

Donde:

$Cant_{pa}$ = Cantidad posible de amortiguadores.

$Cant_{ga}$ = Cantidad de grupos de amortiguadores.

$Núm_{am}$ = Número total de amortiguadores modelados.

- El botón de “Cargar propiedades de perfiles HEA-HEB-IPE” carga automáticamente los módulos de sección y áreas transversales de los perfiles comerciales de ductilidad alta tipo HEA, HEB e IPE.
- Cantidad de pisos en la estructura: Corresponde al número de niveles de la estructura sin contar la cimentación ni los pisos enterrados, solo niveles por encima del nivel de suelo.
- Límites de coeficientes de amortiguamiento:

$C_{mín}$ = Coeficiente de amortiguamiento mínimo (Unidades: $kN * \left(\frac{s}{m}\right)^{\alpha}$), Se recomienda “0” para que queden definidos los amortiguadores nulos al final del proceso de optimización.

$C_{máx}$ = Coeficiente de amortiguamiento máximo (Unidades: $kN * \left(\frac{s}{m}\right)^{\alpha}$).

α = Coeficiente no lineal de amortiguamiento (Unidades: *Adimensional*), se recomienda 0.35.

- Coeficientes de diseño sísmico:

R = Coeficiente de disipación de energía según tabla 12.2-1 del ASCE 7-16.

C_d = Factor de amplificación de deflexión según tabla 12.2-1 del ASCE 7-16.

- Factores de precios unitarios:

β_d = Costo del amortiguador. (Unidades: $\frac{\$}{\sqrt{kN}}$).

β_s = Costo del acero. (Unidades: $\frac{\$}{Ton}$).

- Restricciones:

- El botón "Calcula límite de derivas según ASCE 7-16", de acuerdo al numeral 18.4.1.
- Se revisa el cumplimiento de Columna Fuerte - Viga Débil (CFVD) de acuerdo al código de diseño seleccionado en el software ETABS. Para el AISC 360-10 y NSR-10 se toma igual a 1.
- Se restringe el aumento de sección transversal en altura. Aquí se chequea que el área de la columna superior sea menor o igual que el área de la columna inferior.
- Se selecciona el límite del índice de sobreesfuerzo según numeral 18.3 del ASCE 7-16. Este debe corresponder con el indicado en las variables de diseño del software ETABS®.
- Propiedades de diseño de amortiguadores: En esta sección se solicita para los elementos tipo *brace* que unen los amortiguadores a la estructura, los siguientes valores: Módulo de elasticidad (Mpa), esfuerzo de fluencia (Mpa), densidad del acero ($\frac{kgf}{m^3}$), longitud del *brace* (m) y factor de reducción de resistencia para elementos sometidos a carga axial (ϕ_c).
- Parámetros Algoritmo Genético Modificado AGM: Como variables de entrada de calibración del algoritmo se solicita: Número máximo de generaciones, número de individuos por generación (recomendado 10), probabilidad de mutación (recomendado 0.85) y probabilidad de cruce (recomendado 0.05). Para el número máximo de iteraciones se recomienda entre 3 y 4 veces el número total de variables, expresado de la siguiente manera:

$$Num_{TotalVariables} = Cant_{gc} + Cant_{gv} + Cant_{pa} + 1;$$

Donde:

$Num_{TotalVariables}$ = Número total de variables.

$Cant_{gc}$ = Cantidad de grupos de columnas.

$Cant_{gv}$ = Cantidad de grupos de vigas.

$Cant_{pa}$ = Cantidad posible de amortiguadores.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cada uno de los tres problemas a evaluar, los parámetros de la función objetivo se definen de la siguiente manera: $\beta_s = 19625 \text{ \$/m}^3$ y $\beta_d = 237 \text{ \$/}\sqrt{kN}$, estos valores se tomaron de acuerdo a lo expresado en [37] donde se indica que corresponden a valores prácticos de 2500 \\$/ton para el acero construido y 5300\\$ para un amortiguador que proporciona una fuerza de 500 kN, donde esta fuerza se evalúa basado en una velocidad pico incrementada en un 20% para el conjunto de registros sísmicos de nivel MCE_R .

El límite elástico de los elementos tipo columnas y vigas es de 345 MPa y 248 MPa, respectivamente. Las secciones transversales son seleccionadas de catálogos de acero estándar de perfiles tipo IPE para las vigas y, HEA y HEB para las columnas. El factor de sobrerresistencia utilizado para el requisito de columna fuerte viga débil es 1, y el exponente de velocidad (α) que controla la no linealidad de los amortiguadores de fluido viscoso se especifica como 0.35.

7.1. EDIFICIO DE PRUEBA – PÓRTICO DE ACERO DE 5 PISOS.

Las propiedades geométricas y la posible localización de amortiguadores de fluido viscoso son las mostradas en la Figura 18 y Figura 19. Los pórticos resistentes a momentos son sometidos a conjunto de registros sísmicos a nivel de diseño (DBE) y a nivel del sismo máximo esperado (MCE_R). Las cargas vivas y muertas fueron tomadas como 5 y 3 kN/m² respectivamente.

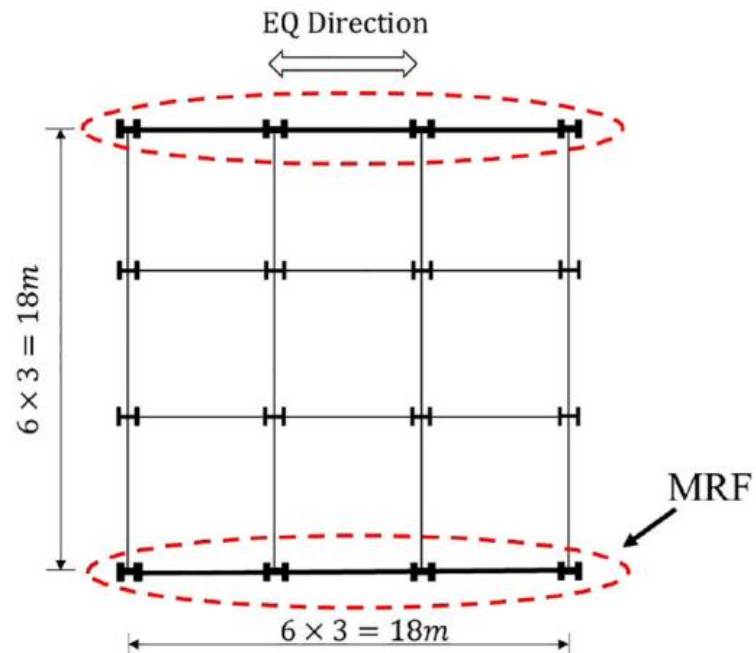


Figura 18 Vista en planta edificio de 5 pisos.

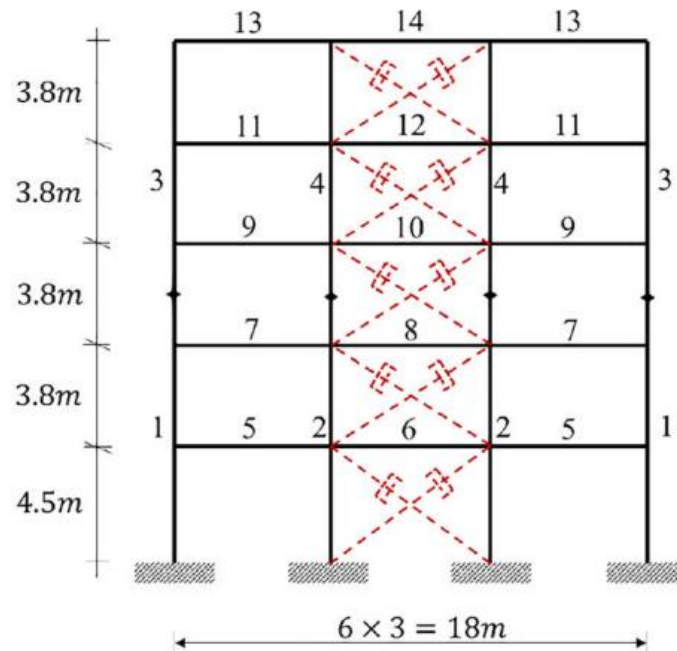
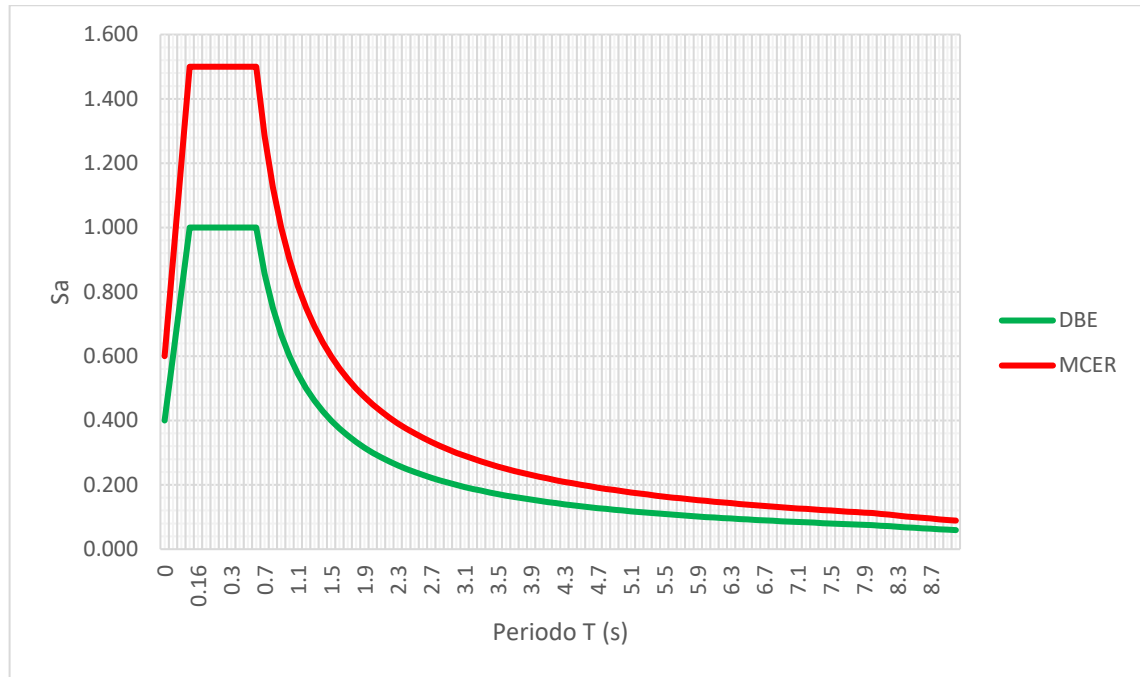


Figura 19 Vista en alzada del pórtico resistente a momento edificio 5 pisos.

Los espectros a nivel de diseño (DBE) y a nivel de sismo máximo esperado (MCE_R) corresponden a los mostrados en la Gráfica 5. Los valores utilizados para

la construcción del cada uno de los espectros se indican en la Tabla 4 de acuerdo a lo descrito en el numeral 11.4 del ASCE 7-16.



Gráfica 5 Espectro de diseño para sismo de diseño (DBE) y sismo máximo esperado (MCE_R).

Tabla 4 Parámetros para creación de espectro de diseño y MCE_R.

Parámetro	Valor	Definición.
S_s	1.5	Parámetro de aceleración de respuesta espectral para periodos cortos. (Mapa MCE _R).
S_1	0.6	Parámetro de aceleración de respuesta espectral para un periodo de 1s. (Mapa MCE _R).
F_a	1	Coeficiente de sitio para periodos cortos.
F_v	1.5	Coeficiente de sitio para periodos largos.
S_{ms}	1.5	Parámetro de aceleración de respuesta espectral para periodos cortos ajustado según los efectos de sitio. (Mapa MCE _R).
S_{m1}	0.9	Parámetro de aceleración de respuesta espectral para un periodo de 1s ajustado según los efectos de sitio. (Mapa MCE _R).
S_{DS}	1	Parámetro de aceleración de respuesta espectral para periodos cortos. (Sismo de diseño).
S_{D1}	0.6	Parámetro de aceleración de respuesta espectral para un periodo de 1s. (Sismo de diseño).
T_0	0.12	$0.2 \cdot S_{D1} / S_{DS}$
T_s	0.6	S_{D1} / S_{DS}

Donde S_{DS} y S_{D1} se determina de la siguiente manera:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} * S_{MS};$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} * S_{M1};$$

Como se describe en el numeral 18.2.2.2. del ASCE 7-16, para utilizar el método de análisis no lineal de historial de respuesta, se debe disponer de mínimo siete registros sísmicos, tanto para el sismo DBE como para el MCE_R . Estos movimientos sísmicos deben tener magnitudes, distancias de falla y mecanismos de origen consistentes con los que controlan el sismo de diseño y los eventos MCE_R , de igual manera se permite escalar los registros sísmicos para obtener coincidencia espectral.

Debido a que del problema guía no se encuentra información de los eventos sísmicos, pero sí del espectro de diseño (DBE) y MCE_R (Gráfica 5), se procede a trabajar con registros del Servicio Geológico Colombiano [68], haciendo uso de registros del sur occidente del país, zonas donde se han presentado los eventos sísmicos más grandes del territorio colombiano. Estos eventos son escalados a los espectros DBE y MCE_R (Gráfica 5) los cuáles se muestran en la Gráfica 20 y Gráfica 21 respectivamente. Los criterios de búsqueda de los movimientos sísmicos corresponden a los indicados en la Tabla 5.

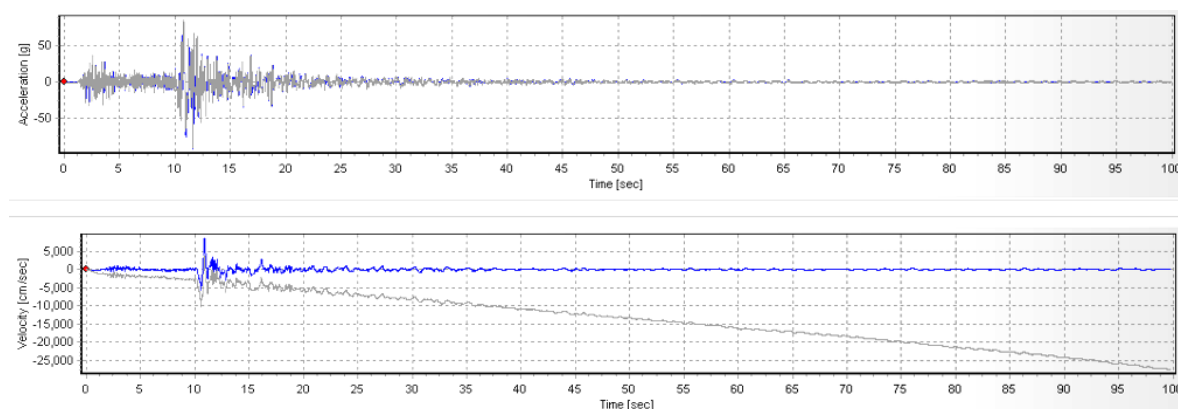
Tabla 5 Criterios de búsqueda de movimientos sísmicos.

Departamento	Valle del Cauca	Municipio	
Fecha Inicial	1/06/1993	Fecha final	31/12/2017
Estación	ESTACIÓN	Geología	GEOLOGÍA
Latitud Mínima	-5	Latitud Máxima	14
Longitud Mínima	-90	Longitud Máxima	-66
Magnitud Mínima	0	Magnitud Máxima	9
Aceleración Mínima	0	Aceleración Máxima	700
Total Eventos		156	

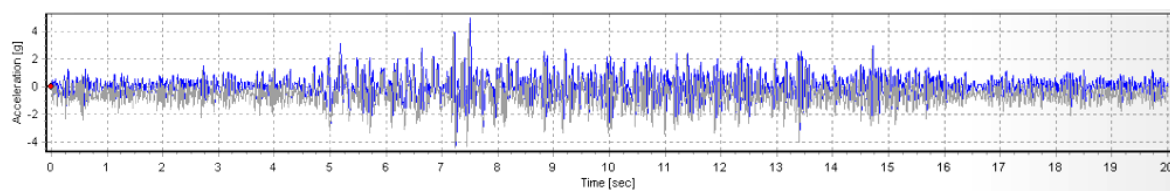
La información de cada registro sísmico se encuentra relacionada en la Tabla 6. Estos registros fueron ajustados a la línea base haciendo uso de software SeismoSignal®, como se observa de la Gráfica 6 a la Gráfica 12.

Tabla 6 Información de registros sísmicos.

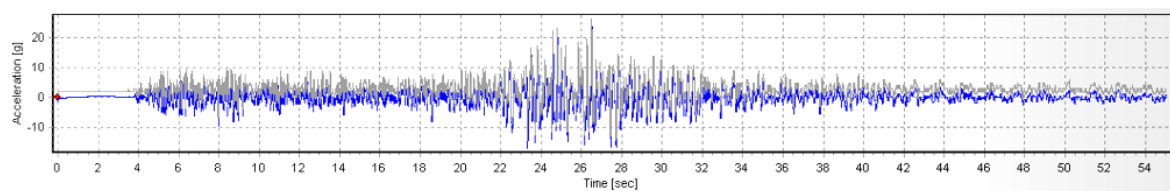
Fecha-Hora (UTC)	Departamento - Municipio	Latitud (°)	Longitud (°)	Topografía	Profundidad (Km)	Magnitud MI
1995-02-08 - 18:40:25	VALLE DEL CAUCA - CALIMA	4.13	-76.74	Ondulada	102	6.6
1997-12-11 - 07:56:29	VALLE DEL CAUCA - TULUA	3.98	-75.943	Ondulada	207.5	6.5
2001-09-22 - 03:23:39	VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO	3.989	-76.085	Ondulada	180	6
1999-07-19 - 16:13:17	VALLE DEL CAUCA - TRUJILLO	4.253	-76.433	Ondulada	130	5.3
2000-04-03 - 09:52:46	VALLE DEL CAUCA - GINEBRA	3.739	-75.941	Ondulada	200	5.3
2004-01-15 - 00:25:05	VALLE DEL CAUCA - BUGALAGRAN DE	4.221	-76.227	Ondulada	152	5.1
1996-11-17 - 18:44:15	VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO	4.501	-76.278	Ondulada	109.1	5



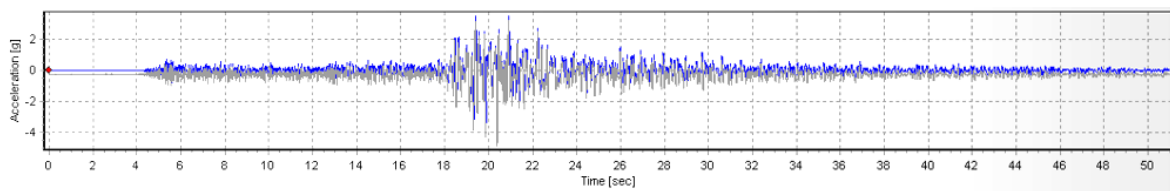
Gráfica 6 Corrección a línea base sismo 1995-02-08 - 18:40:25 - VALLE DEL CAUCA – CALIMA.



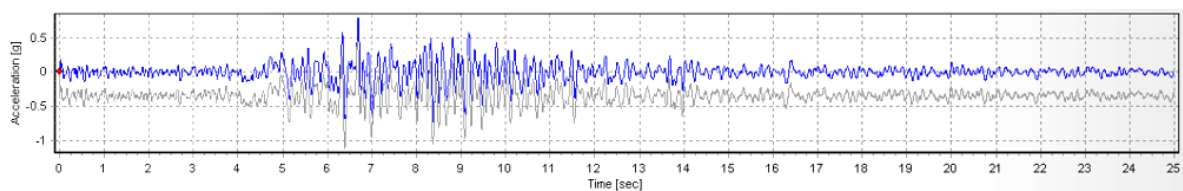
Gráfica 7 Corrección a línea base sismo 1996-11-17 - 18:44:15 - VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO.



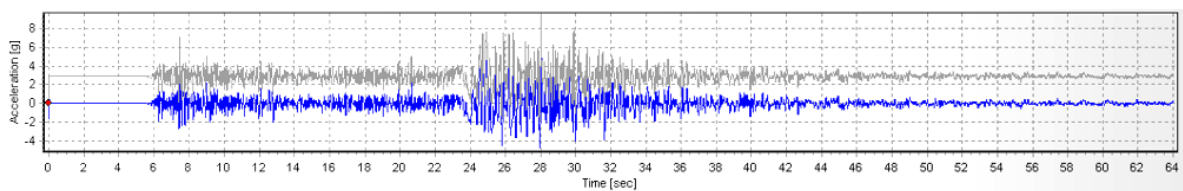
Gráfica 8 Corrección a línea base sismo 1997-12-11 - 07:56:29- VALLE DEL CAUCA - TULUA.



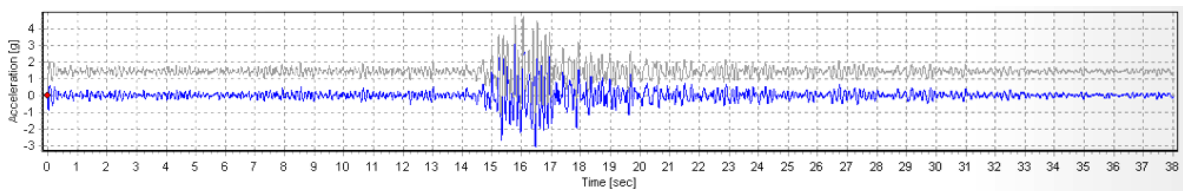
Gráfica 9 Corrección a línea base sismo 1999-07-19 - 16:13:17 - VALLE DEL CAUCA - TRUJILLO.



Gráfica 10 Corrección a línea base sismo 2000-04-03 - 09:52:46 - VALLE DEL CAUCA – GINEBRA.

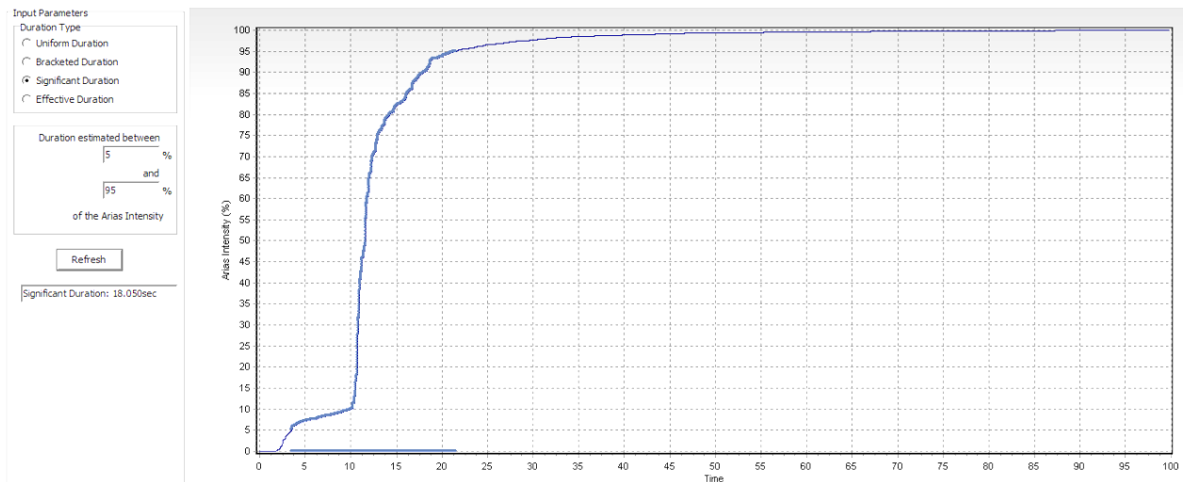


Gráfica 11 Corrección a línea base sismo 2001-09-22 - 03:23:39 - VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO.

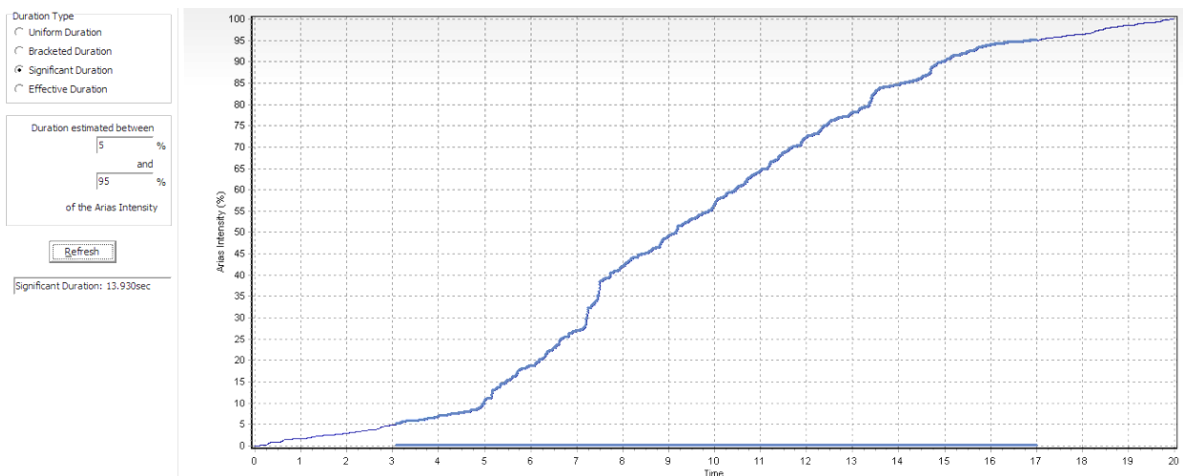


Gráfica 12 Corrección a línea base sismo 2004-01-15 - 00:25:05- VALLE DEL CAUCA – BUGALAGRANDE.

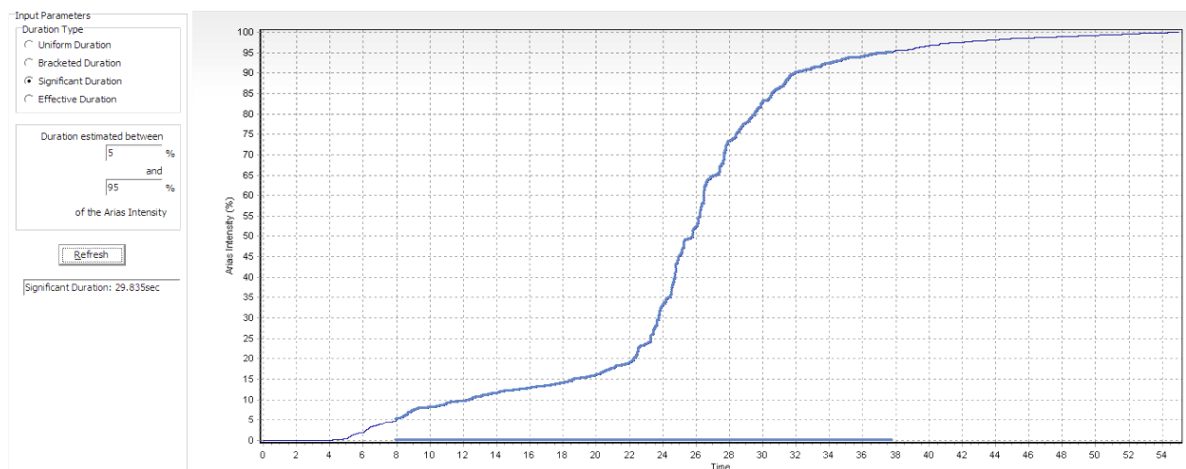
Cada registro sísmico utilizado fue recortado tomando como duración significativa el tiempo correspondiente hasta obtener un valor de 95% de intensidad de área, lo cual se puede observar desde la Gráfica 13 a la Gráfica 19.



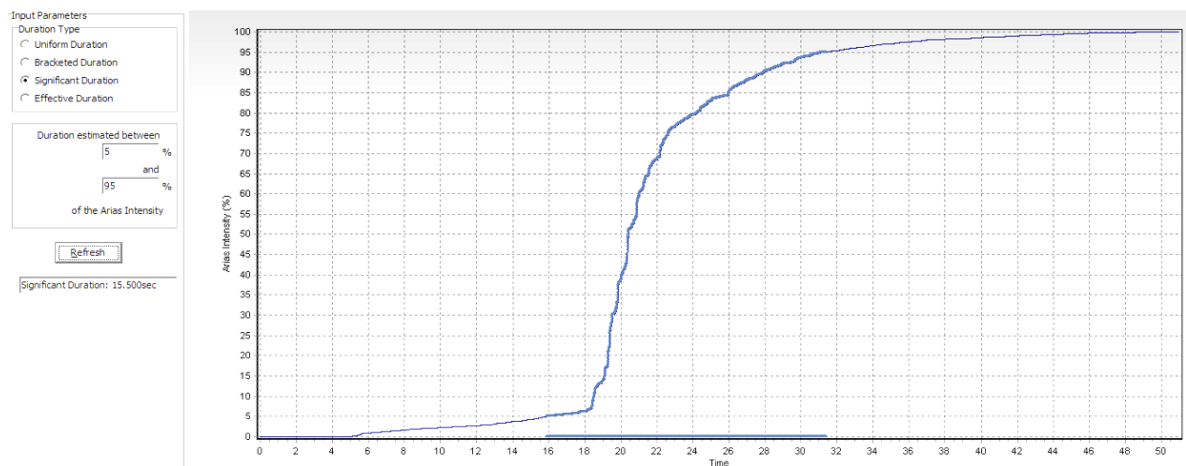
Gráfica 13 Intensidad de área – Sismo 1995-02-08 - 18:40:25 - VALLE DEL CAUCA – CALIMA.



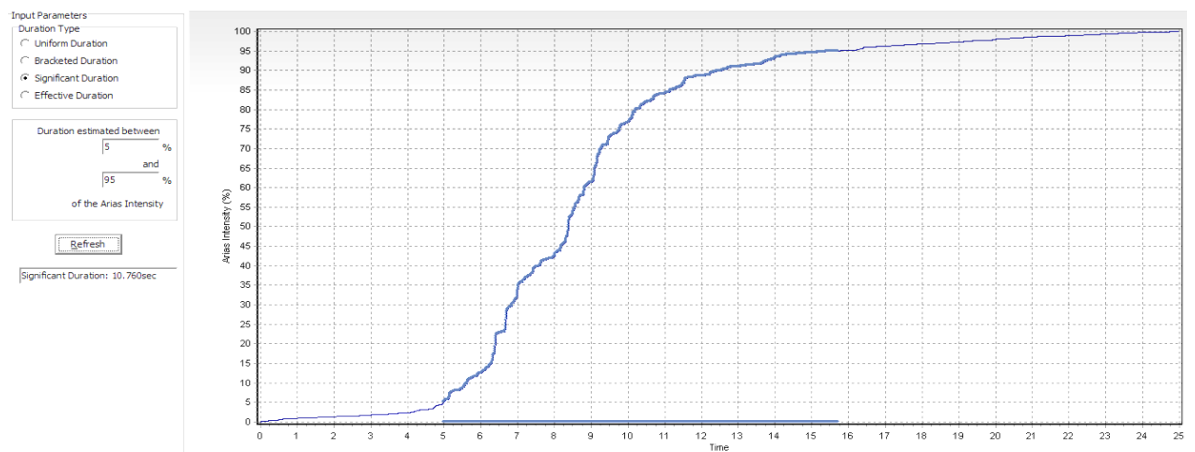
Gráfica 14 Intensidad de área – sismo 1996-11-17 - 18:44:15 - VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO.



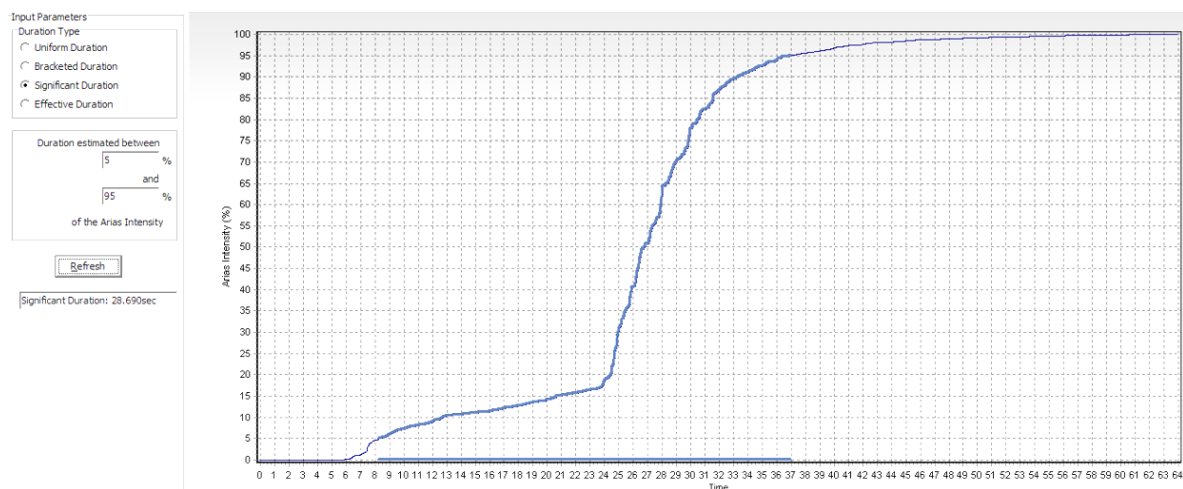
Gráfica 15 Intensidad de área - sismo 1997-12-11 - 07:56:29- VALLE DEL CAUCA – TULUA.



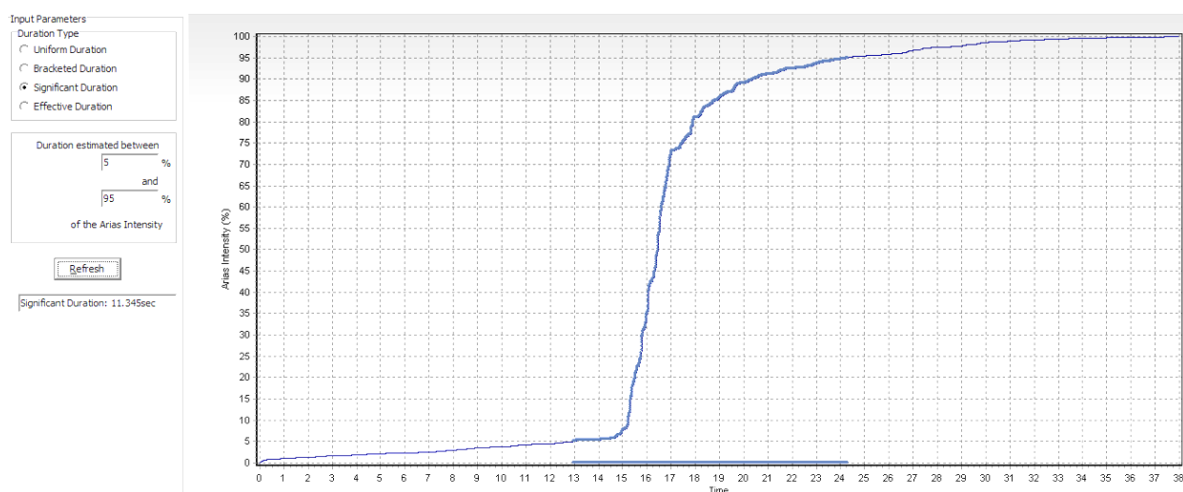
Gráfica 16 Intensidad de área - sismo 1999-07-19 - 16:13:17 - VALLE DEL CAUCA – TRUJILLO.



Gráfica 17 Intensidad de área - sismo 2000-04-03 - 09:52:46 - VALLE DEL CAUCA – GINEBRA.

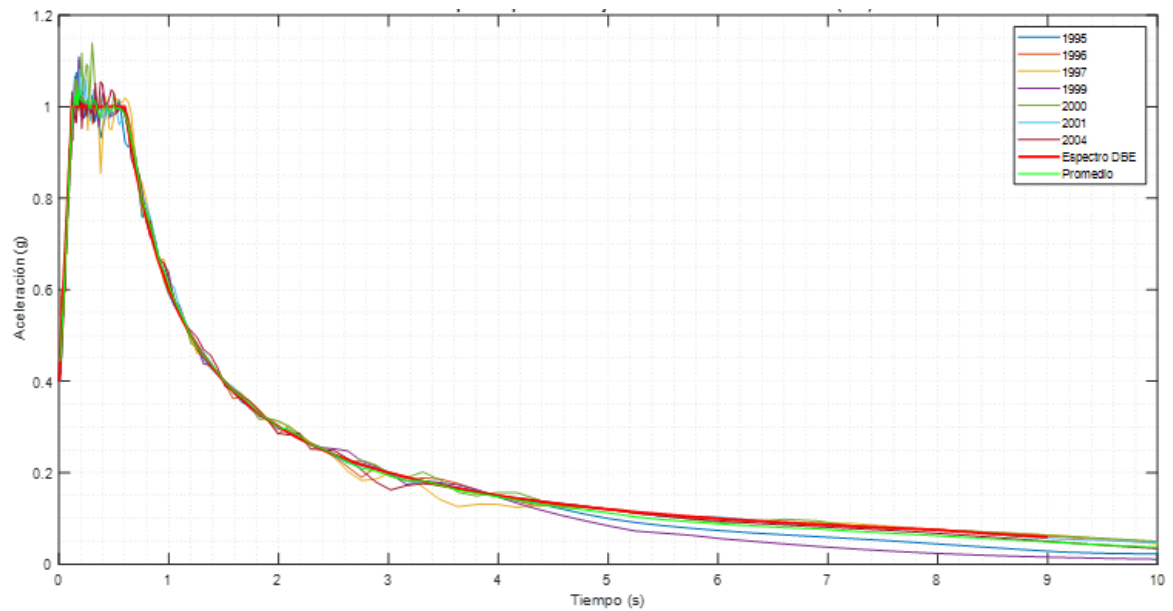


Gráfica 18 Intensidad de área - sismo 2001-09-22 - 03:23:39 - VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO.

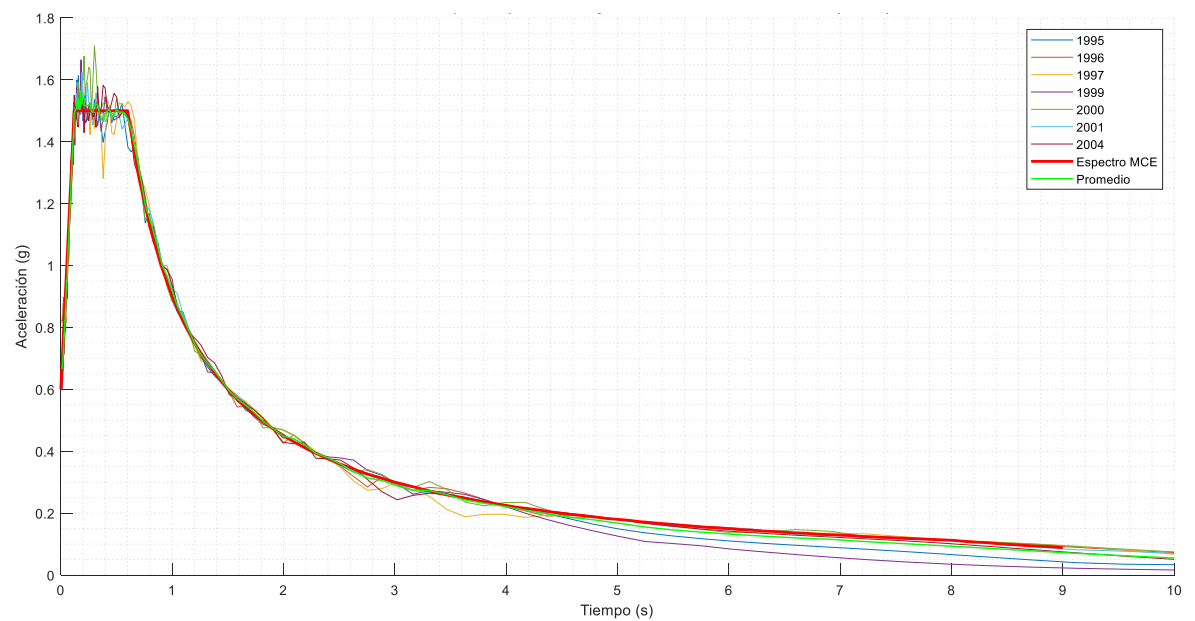


Gráfica 19 Intensidad de área – sismo 2004-01-15 - 00:25:05- VALLE DEL CAUCA – BUGALAGRANDE.

Estos registros sísmicos, de acuerdo con lo descrito en el numeral 3.1.3.3, pueden ser escalados a los espectros DBE y MCE_R . Este proceso se realizó mediante el software Etabs® utilizando la función de “*Matched to Response Spectrum*” como se muestra en la Gráfica 20 y Gráfica 21.



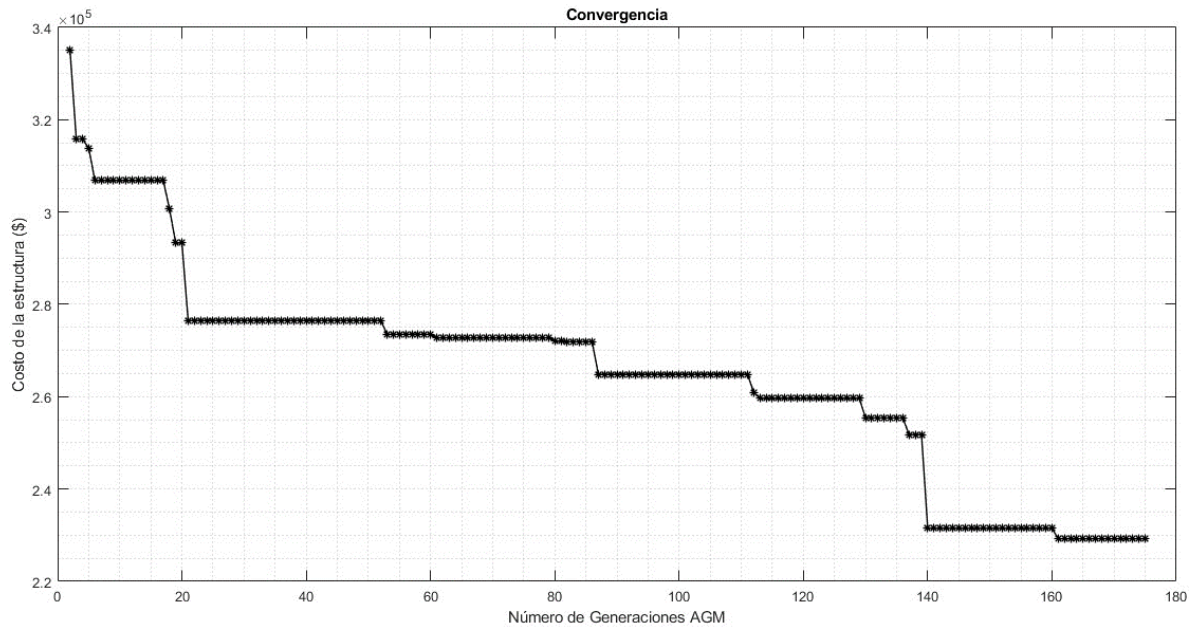
Gráfica 20 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (DBE)



Gráfica 21 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (MCE_R)

El proceso de optimización llevado a cabo por el AGM para este problema es el indicado en la Gráfica **22**. Allí se puede observar que se obtuvo un valor optimizado de \$229.230= de costo total de la edificación en un total de 175

generaciones del AGM. En esta gráfica se evidencia que, aunque se tiene la opción de aceptar soluciones más costosas a medida que se avanza en el proceso evolutivo, el AGM ha sido capaz de encontrar rápidamente soluciones que cumplan todas las restricciones y adicionalmente posean un mejor valor de la función objetivo (costo de la estructura).



Gráfica 22 Convergencia estructura de 5 pisos.

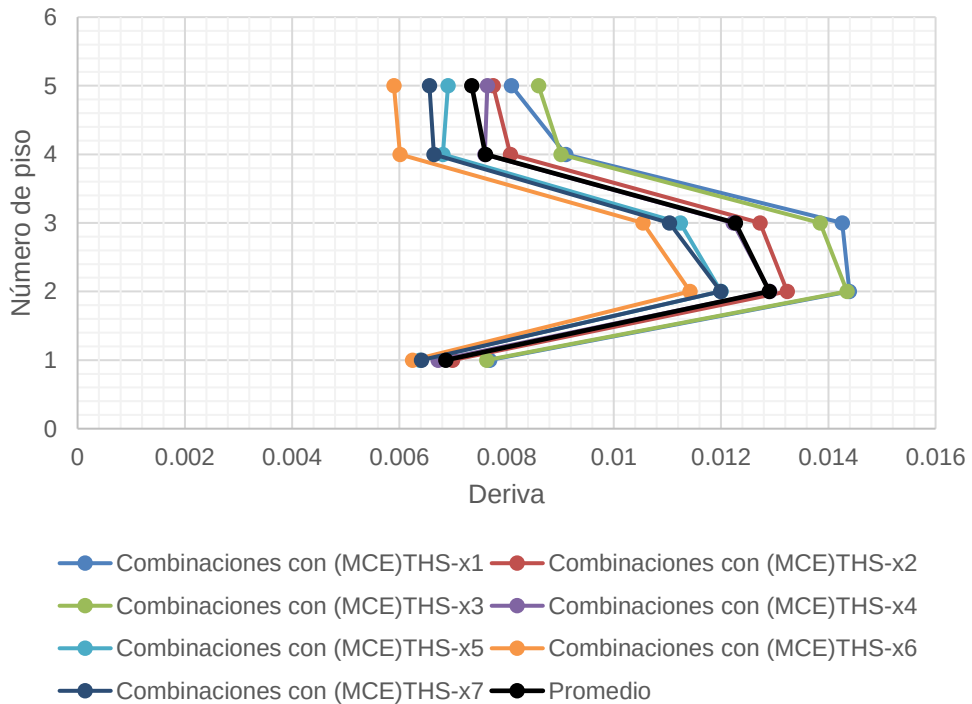
Los perfiles de los elementos obtenidos corresponden a los evidenciados en la Figura 20, al igual que la cantidad y ubicación de los amortiguadores necesarios al final del proceso de optimización.



Figura 20 Resultados de perfiles, ubicación y cantidad de amortiguadores para edificio de 5 pisos.

El promedio de derivas máximas obtenido en la dirección de análisis corresponde a las presentadas en la Gráfica 23.

Derivas de piso



Gráfica 23 Deriva de piso en la dirección de análisis - Edificio de 5 pisos.

El promedio los índices de sobreesfuerzo obtenidos para cada elemento se muestran en la Tabla 7, donde se evidencia que todos los elementos se encuentran por debajo de 1.5, como se describe en el numeral 3.1.3.9 del presente documento.

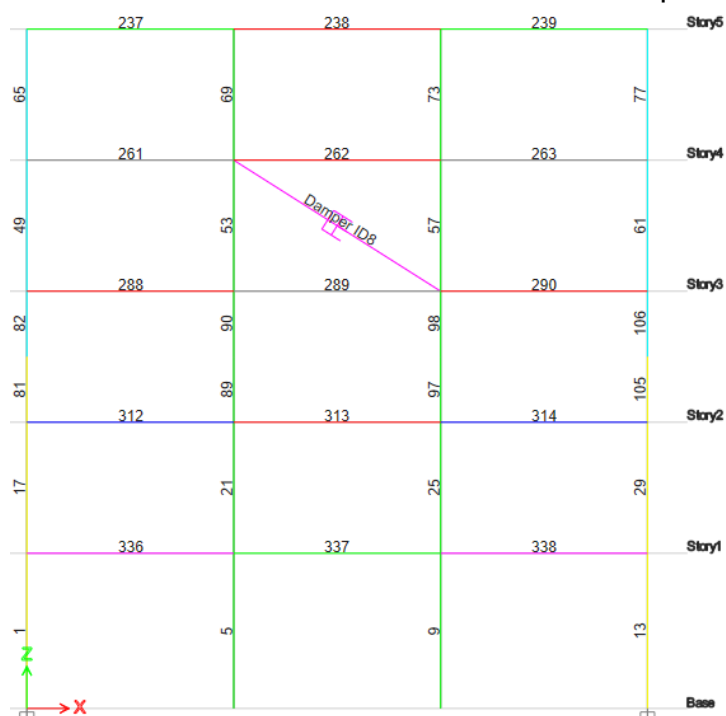


Figura 21 Nombre único de elementos modelo Etabs - Edificio de cinco pisos.

Tabla 7 Promedio índices de sobreesfuerzo elementos estructurales - Edificio de 5 pisos.

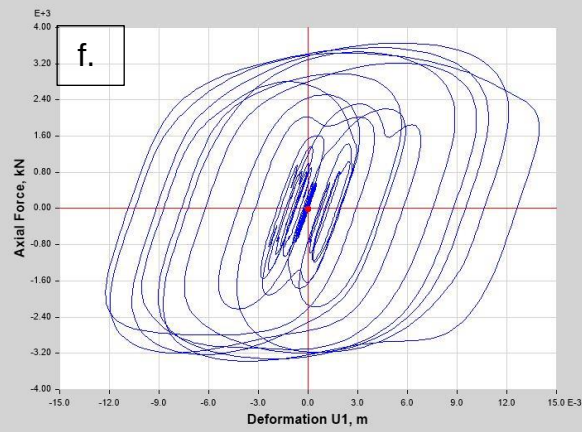
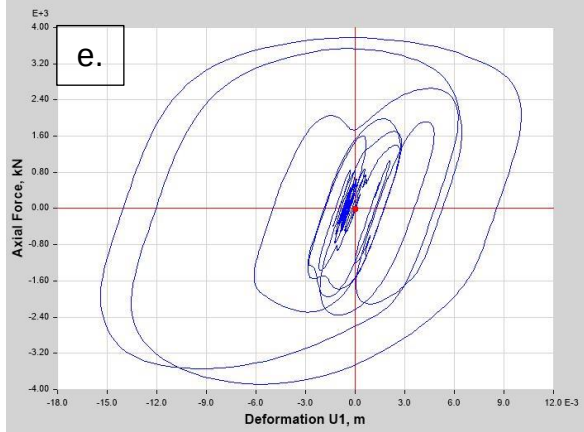
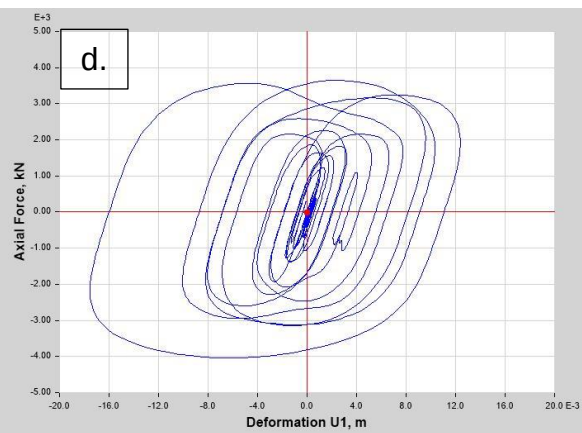
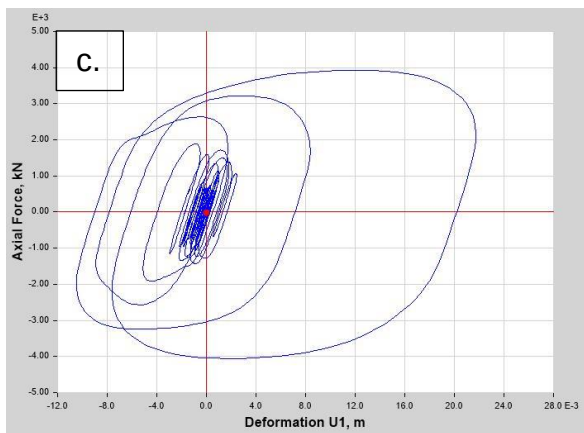
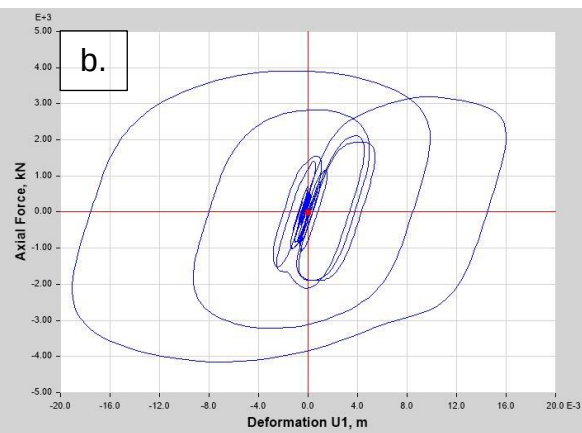
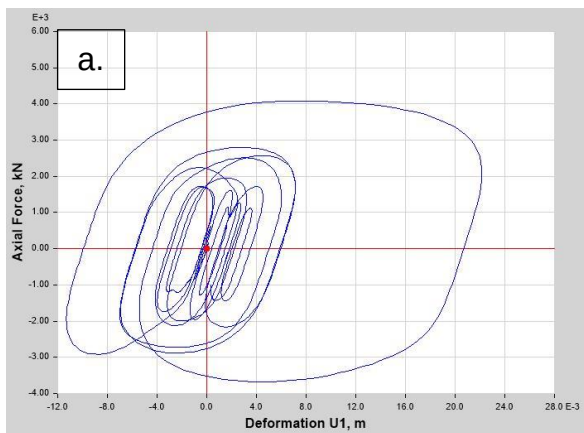
Número de piso	Número Elemento	Sección	Promedio ISE
Story5	65	HE240B	0.352
Story5	69	HE900A	0.211
Story5	73	HE900A	0.199
Story5	77	HE240B	0.336
Story4	49	HE240B	0.223
Story4	53	HE900A	0.647
Story4	57	HE900A	0.475
Story4	61	HE240B	0.235
Story3	81	HE700B	0.078
Story3	82	HE240B	0.298
Story3	89	HE900A	0.484
Story3	90	HE900A	0.638
Story3	97	HE900A	0.501
Story3	98	HE900A	0.653

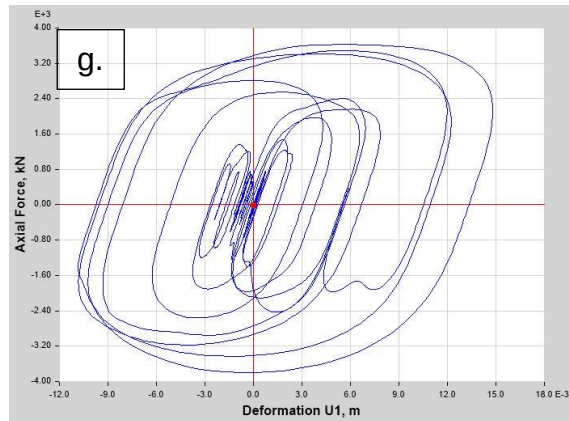
Story3	105	HE700B	0.084
Story3	106	HE240B	0.304
Story2	17	HE700B	0.233
Story2	21	HE900A	0.636
Story2	25	HE900A	0.631
Story2	29	HE700B	0.233
Story1	1	HE700B	0.533
Story1	5	HE900A	0.984
Story1	9	HE900A	0.981
Story1	13	HE700B	0.532
Story5	237	IPE400	0.571
Story5	238	IPE600	0.451
Story5	239	IPE400	0.540
Story4	261	IPE330	0.739
Story4	262	IPE600	0.542
Story4	263	IPE330	0.692
Story3	288	IPE240	1.196
Story3	289	IPE330	0.817
Story3	290	IPE240	1.286
Story2	312	IPE360	1.160
Story2	313	IPE600	1.219
Story2	314	IPE360	1.166
Story1	336	IPE270	1.083
Story1	337	IPE400	0.965
Story1	338	IPE270	1.116

Las propiedades del amortiguador de fluido viscoso se muestran en la Tabla 8. De igual manera en la Gráfica 24 se muestra el ciclo de histéresis del amortiguador diseñado, donde se evidencia su comportamiento viscoso, la fuerza de diseño y el valor del máximo *Stroke* necesario del dispositivo.

Tabla 8 Propiedades amortiguadores - edificio de 5 pisos.

ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID8	<i>C_damper</i>	7000	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	1070131.030	kN/m
	Fuerza máxima	3953.592	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.015	m
	Velocidad Máxima pistón	0.195	m/s



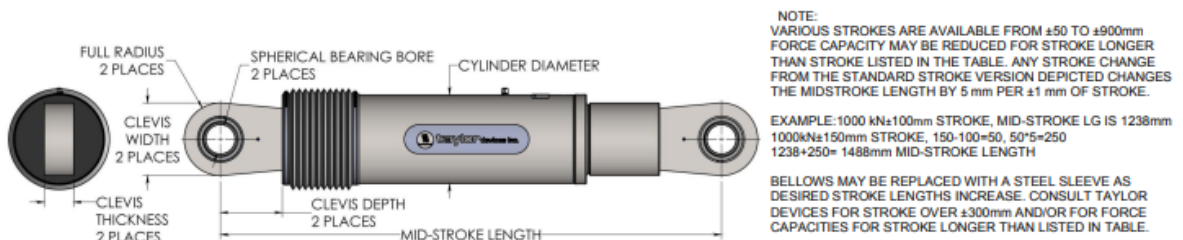


Gráfica 24 Gráficas fuerza axial vs deformación: a) Sismo (MCE)THSx1, b) Sismo (MCE)THSx2, c) Sismo (MCE)THSx3, d) Sismo (MCE)THSx4, e) Sismo (MCE)THSx5, f) Sismo (MCE)THSx6, g) Sismo (MCE)THSx7.

De acuerdo a los datos presentes en la Gráfica 24, se requiere un amortiguador de 4000 kN de fuerza máxima y un máximo *Stroke* de 15mm. El amortiguador de *Taylor Devices Inc.* que cumple con los requisitos anteriores se muestra en la Tabla 9. La velocidad máxima del pistón del amortiguador corresponde a 0.19 m/s.

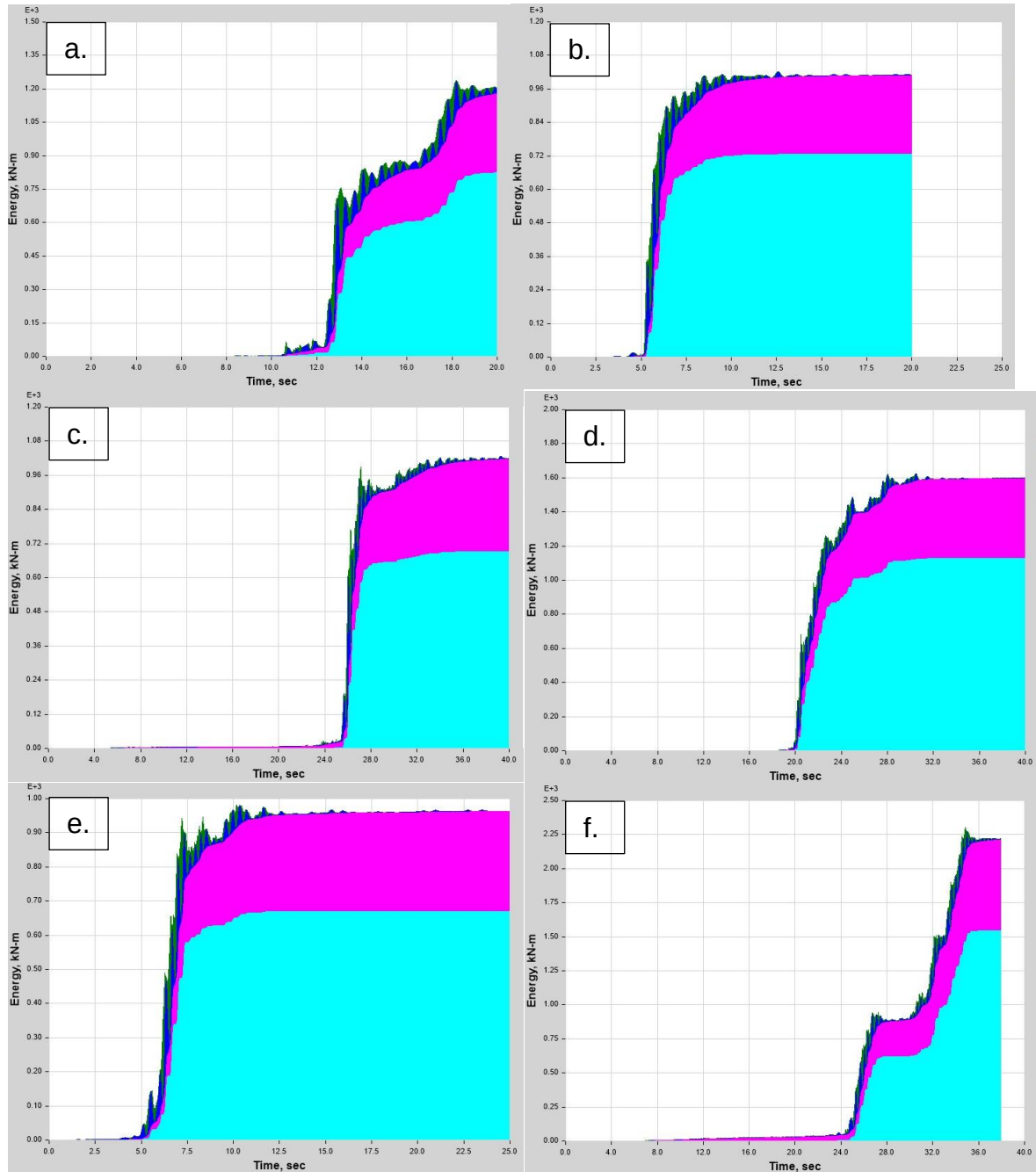
Tabla 9 Dispositivos de amortiguamiento proporcionados por *Taylor Devices Inc.*

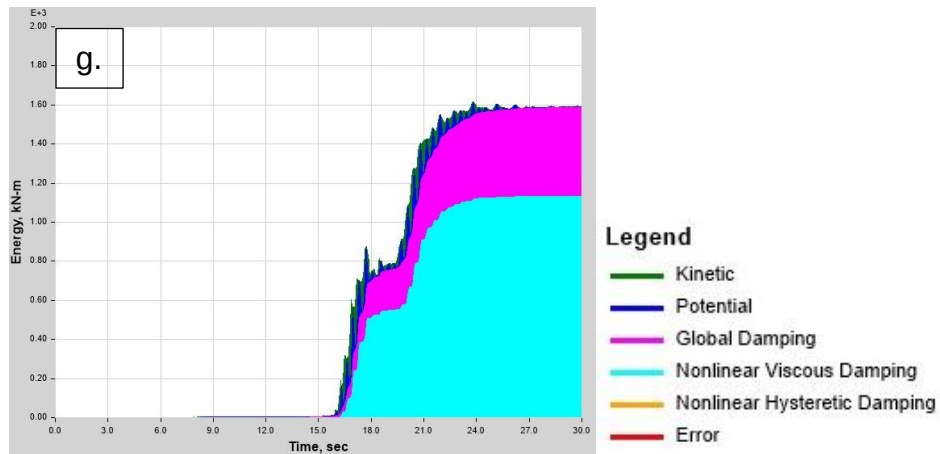
**FLUID VISCOUS DAMPERS & LOCK-UP DEVICES
CLEVIS – CLEVIS CONFIGURATION, METRIC UNITS**



FORCE (kN)	TAYLOR DEVICES MODEL NUMBER	SPHERICAL BEARING BORE DIAMETER (mm)	MID-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)	BEARING THICKNESS (mm)	MAXIMUM CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	MAXIMUM CYLINDER DIAMETER (mm)	WEIGHT (kg)
250	17120	38.10	867	±75	43	33	102	83	114	41
500	17130	50.80	1067	±100	55	44	127	102	150	82
750	17140	57.15	1194	±100	59	50	152	129	184	138
1000	17150	69.85	1238	±100	71	61	184	150	210	193
1500	17160	76.20	1314	±100	77	67	203	162	241	250
2000	17170	88.90	1575	±125	91	78	235	191	285	408
3000	17180	101.60	1575	±125	117/111*	89	286/324*	228/210*	350	701
4000	17190	127.00	1880	±125	142	111	324	210	425	1225
6500	17200	152.40	2134	±125	152	121	350	305	515	1810
8000	17210	177.80	2293	±125	178	135	415	343	565	2495

En la Gráfica 25 se observa la energía disipada por el dispositivo de amortiguamiento para cada uno de los sismos ejecutados. Allí se evidencia que gran parte de la energía entrante es absorbida por el amortiguador, en promedio un 68%.





Gráfica 25 Energía disipada por estructura optimizada equipada con amortiguadores de fluido viscoso.

7.2. EDIFICIO DE PRUEBA – PÓRTICO DE ACERO DE 9 PISOS CON RETROCESO EN ALTURA.

Las propiedades geométricas y la posible localización de amortiguadores de fluido viscosos son las mostradas en la Figura 22 y Figura 23. Los pórticos resistentes a momentos son sometidos a conjunto de registros sísmicos a nivel de diseño (DBE) y a nivel del sismo máximo esperado (MCE_R), los cuales corresponden a los utilizados en el problema del numeral 7.1 del presente documento. Las cargas vivas y muertas fueron tomadas como 5 y 3 kN/m² respectivamente.

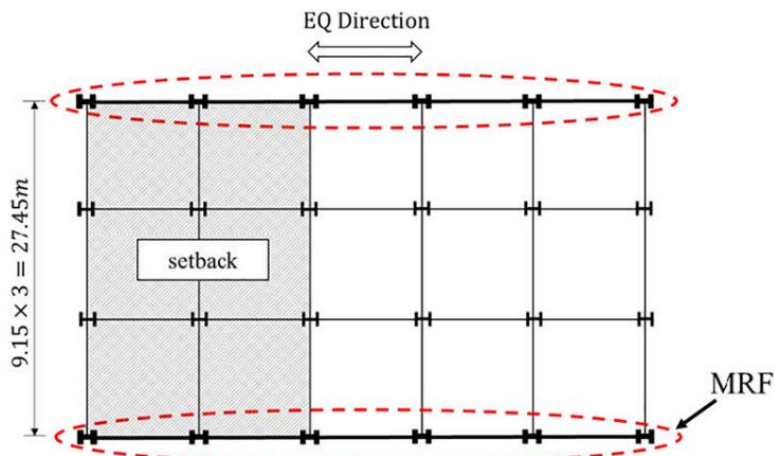


Figura 22 Vista en planta edificio de 9 pisos con retroceso en altura.

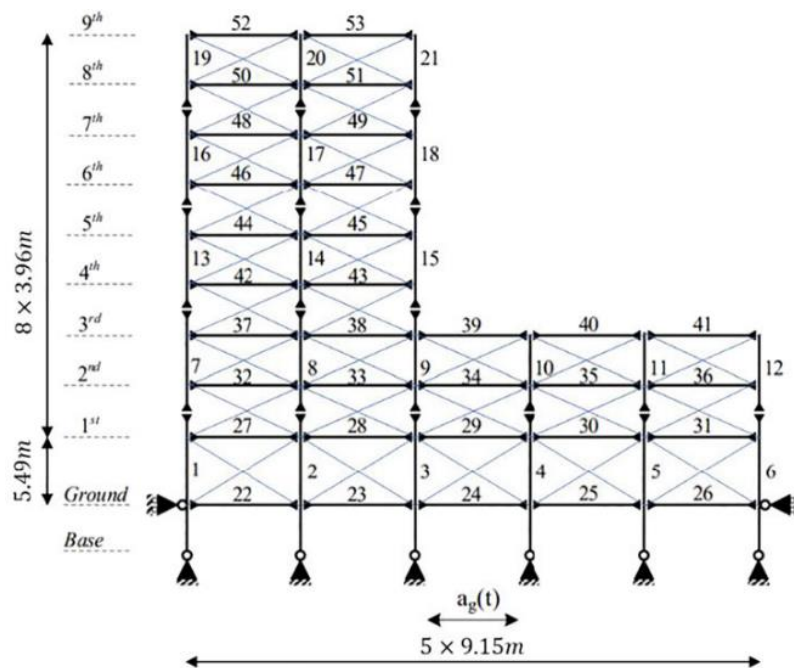
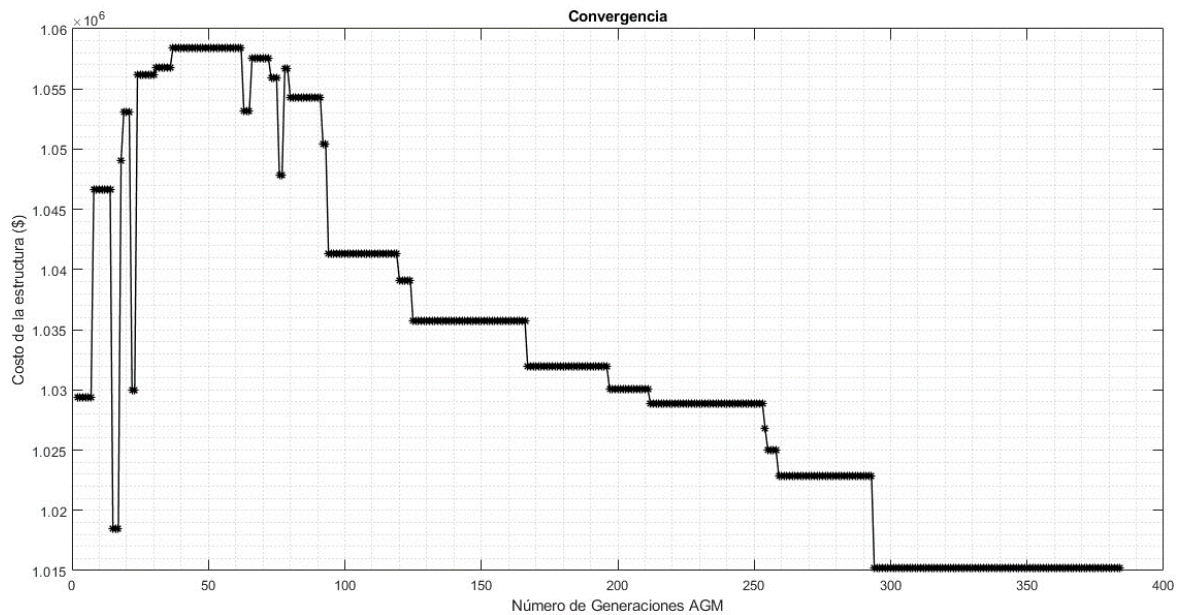


Figura 23 Vista en alzada del pórtico resistente a momento edificio 9 pisos con retroceso en altura.

El proceso de optimización llevado a cabo por el AGM para este problema es el indicado en la Gráfica 26. Allí se puede observar que se obtuvo un valor de \$1'015.210= de costo total de la edificación en un total de 384 generaciones del algoritmo.

En la Gráfica 26 se puede evidenciar que inicialmente se aceptan estructuras más costosas respecto a la generación anterior del proceso de optimización. Lo anterior se da debido al manejo de restricciones utilizado, en donde, aunque las estructuras encontradas son más costosas, se violan menos restricciones a medida que se avanza en el proceso evolutivo. Posteriormente, en la generación 91, se empieza un proceso de decrecimiento del costo de la estructura optimizada, lo anterior se logra cuando se ha encontrado una solución que no viola ni una sola restricción impuesta y por lo tanto, a partir de allí, las mejores soluciones obedecen a estructuras más económicas.



Gráfica 26 Convergencia estructura de 9 pisos con retroceso en altura.

Los perfiles de los elementos obtenidos corresponden a los evidenciados en la Figura 24, al igual que la cantidad y ubicación de los amortiguadores necesarios al final del proceso de optimización.

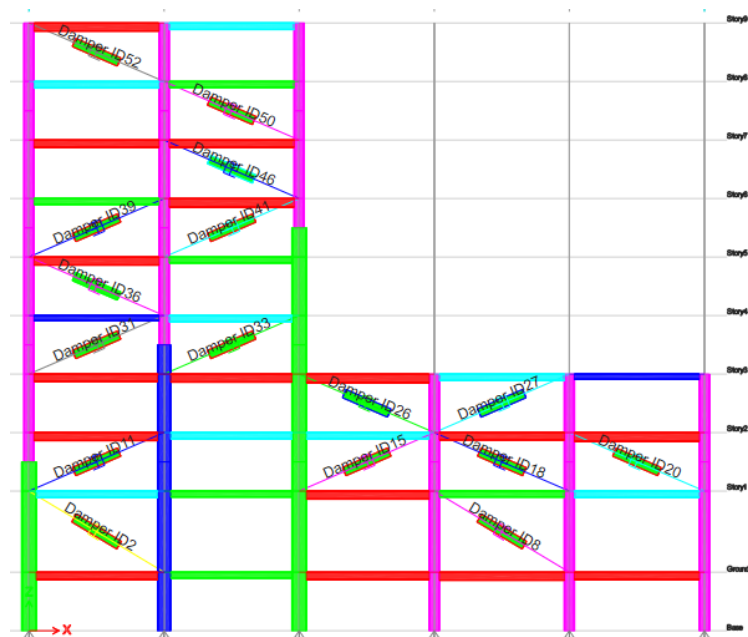
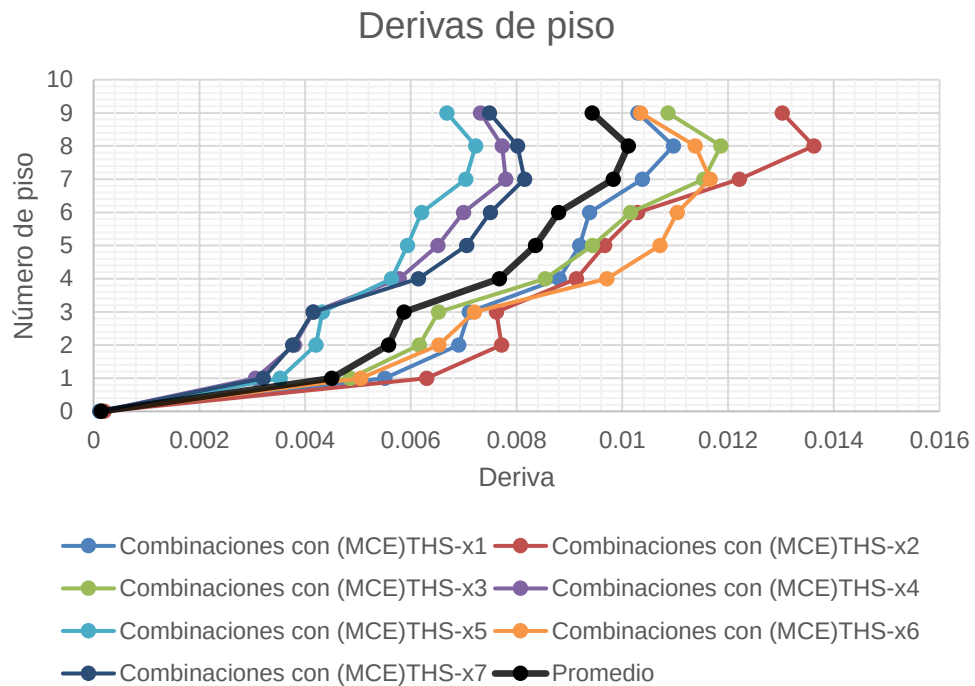


Figura 24 Resultados de perfiles, ubicación y cantidad de amortiguadores para edificio de 9 pisos con retroceso en altura.

El promedio de derivas máximas obtenido en la dirección de análisis corresponde a las presentadas en la Gráfica 27.



Gráfica 27 Deriva de piso en la dirección de análisis - Edificio de 9 pisos con retroceso en altura.

El promedio los índices de sobreesfuerzo obtenidos para cada elemento se muestran en la Tabla 10, donde se evidencia que todos los elementos se encuentran por debajo de 1.5, como se describe en el numeral 3.1.3.9 del presente documento.

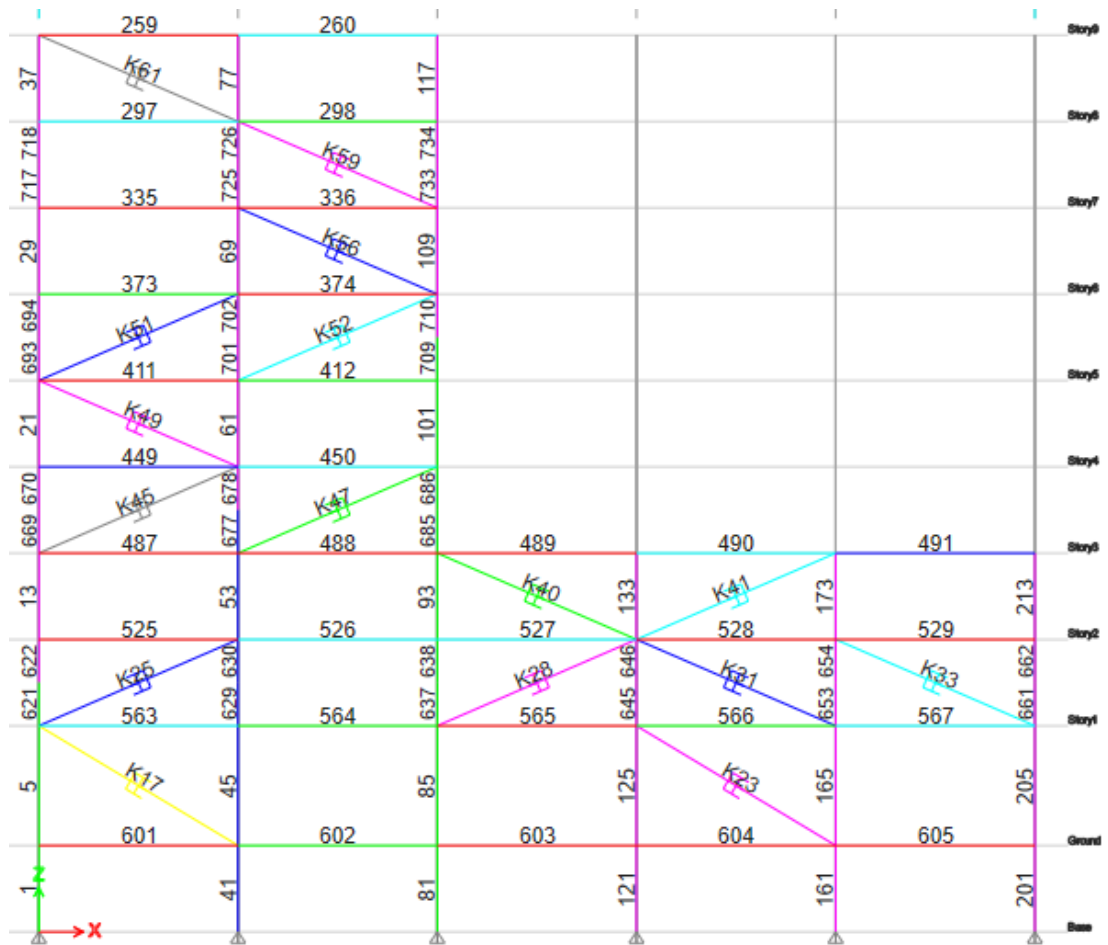


Figura 25 Nombre único de elementos modelo Etabs® - Edificio de 9 pisos con retroceso en altura.

Tabla 10 Promedio índices de sobreesfuerzo elementos estructurales - Edificio de 9 pisos con retroceso en altura.

Número de piso	Número Elemento	Sección	Promedio ISE
Story9	37	HE700B	0.214
Story9	77	HE700B	0.236
Story9	117	HE700B	0.155
Story8	717	HE700B	0.213
Story8	718	HE700B	0.139
Story8	725	HE700B	0.250
Story8	726	HE700B	0.158
Story8	733	HE700B	0.195
Story8	734	HE700B	0.122
Story7	29	HE700B	0.242

Story7	69	HE700B	0.408
Story7	109	HE700B	0.296
Story6	693	HE700B	0.228
Story6	694	HE700B	0.218
Story6	701	HE700B	0.396
Story6	702	HE700B	0.372
Story6	709	HE1000B	0.198
Story6	710	HE700B	0.295
Story5	21	HE700B	0.396
Story5	61	HE700B	0.448
Story5	101	HE1000B	0.240
Story4	669	HE700B	0.434
Story4	670	HE700B	0.397
Story4	677	HE900B	0.484
Story4	678	HE700B	0.484
Story4	685	HE1000B	0.405
Story4	686	HE1000B	0.323
Story3	13	HE700B	0.441
Story3	53	HE900B	0.475
Story3	93	HE1000B	0.340
Story3	133	HE700B	0.184
Story3	173	HE700B	0.168
Story3	213	HE700B	0.124
Story2	621	HE1000B	0.427
Story2	622	HE700B	0.456
Story2	629	HE900B	0.561
Story2	630	HE900B	0.499
Story2	637	HE1000B	0.443
Story2	638	HE1000B	0.387
Story2	645	HE700B	0.197
Story2	646	HE700B	0.141
Story2	653	HE700B	0.206
Story2	654	HE700B	0.174
Story2	661	HE700B	0.177
Story2	662	HE700B	0.126
Story1	5	HE1000B	0.691
Story1	45	HE900B	0.812
Story1	85	HE1000B	0.673
Story1	125	HE700B	0.475
Story1	165	HE700B	0.497

Story1	205	HE700B	0.298
Ground	1	HE1000B	0.585
Ground	41	HE900B	0.739
Ground	81	HE1000B	0.587
Ground	121	HE700B	0.410
Ground	161	HE700B	0.461
Ground	201	HE700B	0.236
Story9	259	IPE550	0.938
Story9	260	IPE450	1.161
Story8	297	IPE450	1.275
Story8	298	IPE400	1.381
Story7	335	IPE500	1.114
Story7	336	IPE500	1.099
Story6	373	IPE400	1.286
Story6	374	IPE600	0.819
Story5	411	IPE550	0.857
Story5	412	IPE400	1.182
Story4	449	IPE360	1.451
Story4	450	IPE450	1.096
Story3	487	IPE500	0.841
Story3	488	IPE550	0.746
Story3	489	IPE600	0.566
Story3	490	IPE450	0.887
Story3	491	IPE360	1.352
Story2	525	IPE550	0.678
Story2	526	IPE450	0.914
Story2	527	IPE450	0.850
Story2	528	IPE500	0.776
Story2	529	IPE600	0.535
Story1	563	IPE450	0.882
Story1	564	IPE400	1.080
Story1	565	IPE550	0.648
Story1	566	IPE400	1.106
Story1	567	IPE450	0.953
Ground	601	IPE500	0.589
Ground	602	IPE400	0.912
Ground	603	IPE500	0.537
Ground	604	IPE550	0.482
Ground	605	IPE500	0.633

Las propiedades del amortiguador de fluido viscoso se muestran en la Tabla 11. De igual manera en la Gráfica 28 se muestra el ciclo de histéresis del amortiguador diseñado, donde se evidencia su comportamiento viscoso, la fuerza de diseño y el valor del máximo *Stroke* necesario del dispositivo.

Tabla 11 Propiedades amortiguadores - edificio de 9 pisos con retroceso en altura.

ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID2	<i>C_damper</i>	2280	$\text{kN}^*(\text{s/m})^{\text{Cexp}}$
	<i>K_brace</i>	697390.462	kN/m
	Fuerza máxima	1163.897	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.015	m
	Velocidad Máxima pistón	0.146	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID8	<i>C_damper</i>	1620	$\text{kN}^*(\text{s/m})^{\text{Cexp}}$
	<i>K_brace</i>	623036.986	kN/m
	Fuerza máxima	836.931	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.016	m
	Velocidad Máxima pistón	0.152	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID11	<i>C_damper</i>	2580	$\text{kN}^*(\text{s/m})^{\text{Cexp}}$
	<i>K_brace</i>	804868.428	kN/m
	Fuerza máxima	1205.679	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.014	m
	Velocidad Máxima pistón	0.114	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID15	<i>C_damper</i>	2520	$\text{kN}^*(\text{s/m})^{\text{Cexp}}$
	<i>K_brace</i>	780045.310	kN/m
	Fuerza máxima	1217.693	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.015	m
	Velocidad Máxima pistón	0.125	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID18	<i>C_damper</i>	1680	$\text{kN}^*(\text{s/m})^{\text{Cexp}}$
	<i>K_brace</i>	511163.130	kN/m

	Fuerza máxima	818.710	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.015	m
	Velocidad Máxima pistón	0.128	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID20	<i>C_damper</i>	480	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	147678.418	kN/m
	Fuerza máxima	231.731	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.015	m
	Velocidad Máxima pistón	0.125	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID26	<i>C_damper</i>	2820	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	226562.478	kN/m
	Fuerza máxima	1253.611	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.016	m
	Velocidad Máxima pistón	0.099	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID27	<i>C_damper</i>	2820	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	860832.689	kN/m
	Fuerza máxima	1301.349	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.015	m
	Velocidad Máxima pistón	0.110	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID31	<i>C_damper</i>	1920	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	2085.216	kN/m
	Fuerza máxima	41.427	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.020	m
	Velocidad Máxima pistón	0.00002	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID33	<i>C_damper</i>	1800	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	658647.757	kN/m
	Fuerza máxima	854.725	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.020	m

	Velocidad Máxima pistón	0.119	m/s
--	-------------------------	-------	-----

ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID36	<i>C_damper</i>	2880	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	890862.479	kN/m
	Fuerza máxima	1454.490	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.021	m
	Velocidad Máxima pistón	0.142	m/s

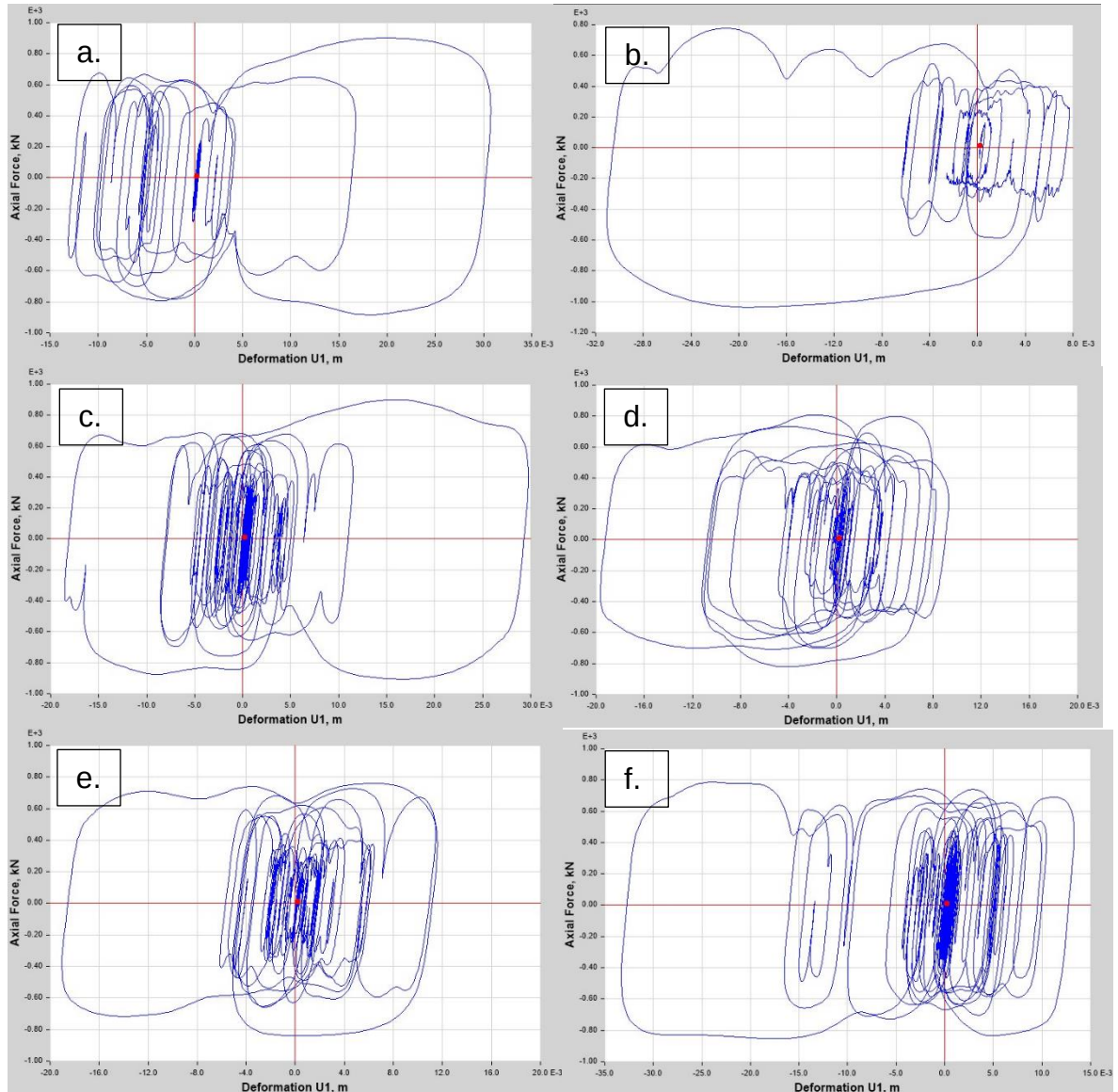
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID39	<i>C_damper</i>	900	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	727042.868	kN/m
	Fuerza máxima	488.166	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.023	m
	Velocidad Máxima pistón	0.174	m/s

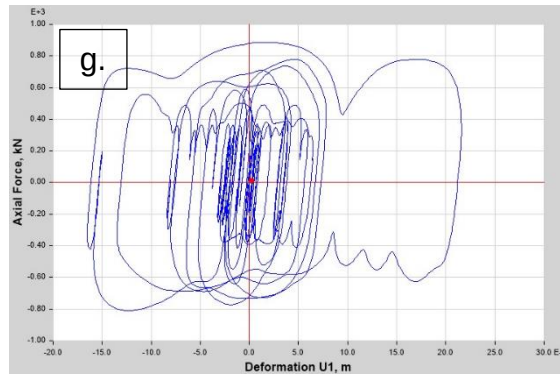
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID41	<i>C_damper</i>	1740	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	752942.191	kN/m
	Fuerza máxima	910.305	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.023	m
	Velocidad Máxima pistón	0.157	m/s

ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID46	<i>C_damper</i>	540	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	167639.108	kN/m
	Fuerza máxima	304.539	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.027	m
	Velocidad Máxima pistón	0.195	m/s

ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID50	<i>C_damper</i>	240	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	300193.877	kN/m
	Fuerza máxima	141.558	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.029	m
	Velocidad Máxima pistón	0.221	m/s

ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID52	<i>C_damper</i>	420	$\text{kN} \cdot (\text{s/m})^{\text{Cexp}}$
	<i>K_brace</i>	91008.613	kN/m
	Fuerza máxima	248.359	kN
	Máximo <i>Stroke</i>	0.027	m
	Velocidad Máxima pistón	0.223	m/s



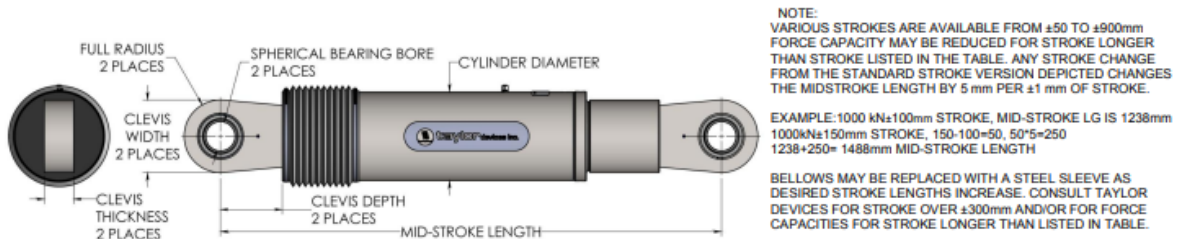


Gráfica 28 Gráficas fuerza axial vs deformación: a) Sismo (MCE)THSx1, b) Sismo (MCE)THSx2, c) Sismo (MCE)THSx3, d) Sismo (MCE)THSx4, e) Sismo (MCE)THSx5, f) Sismo (MCE)THSx6, g) Sismo (MCE)THSx7.

De acuerdo con los datos presentes en la Tabla 11 y la Gráfica 28, se requieren los amortiguadores de *Taylor Devices Inc.* que se muestran en la Tabla 12. Según esos resultados del proceso de optimización, se podría quitar el amortiguador **Damper ID31** debido a que la fuerza que aporte es muy baja.

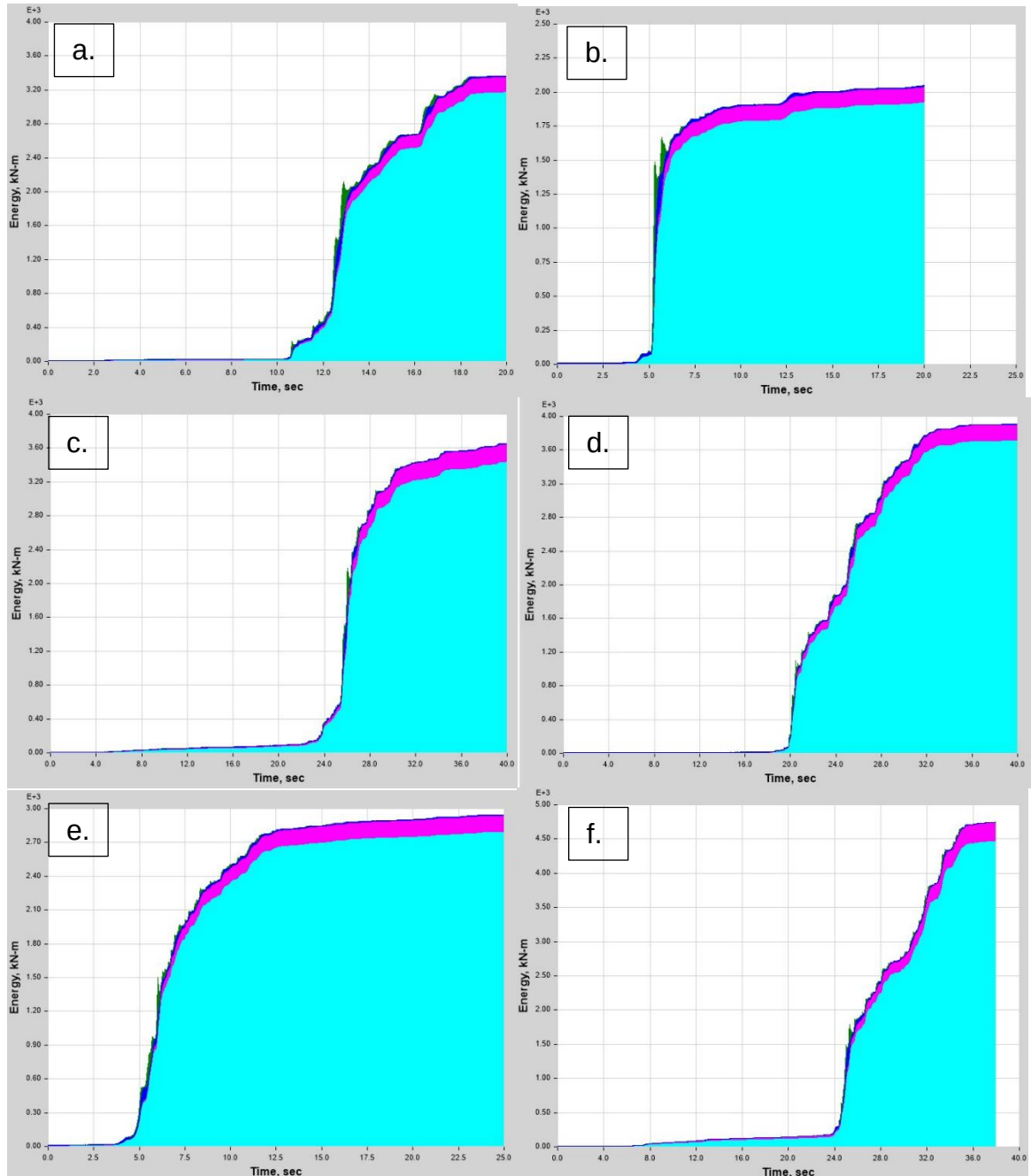
Tabla 12 Dispositivos de amortiguamiento proporcionados por *Taylor Devices Inc.*

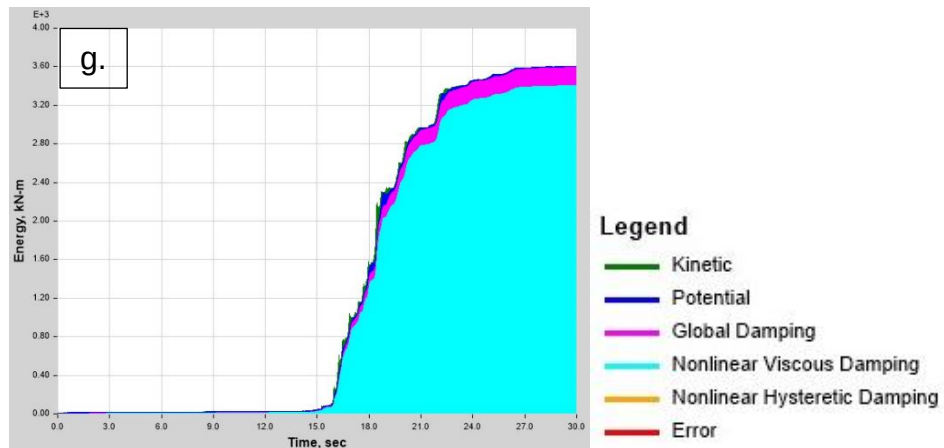
**FLUID VISCOUS DAMPERS & LOCK-UP DEVICES
CLEVIS – CLEVIS CONFIGURATION, METRIC UNITS**



FORCE (kN)	TAYLOR DEVICES MODEL NUMBER	SPHERICAL BEARING BORE DIAMETER (mm)	MID-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)	BEARING THICKNESS (mm)	MAXIMUM CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	MAXIMUM CYLINDER DIAMETER (mm)	WEIGHT (kg)
250	17120	38.10	867	±75	43	33	102	83	114	41
500	17130	50.80	1067	±100	55	44	127	102	150	82
750	17140	57.15	1194	±100	59	50	152	129	184	136
1000	17150	69.85	1238	±100	71	61	184	150	210	193
1500	17160	76.20	1314	±100	77	67	203	162	241	250
2000	17170	88.90	1575	±125	91	78	235	191	285	408
3000	17180	101.60	1575	±125	117/111*	89	286/324*	228/210*	350	701
4000	17190	127.00	1860	±125	142	111	324	210	425	1225
6500	17200	152.40	2134	±125	152	121	350	305	515	1810
8000	17210	177.80	2293	±125	178	135	415	343	565	2495

En la Gráfica 29 se observa la energía disipada por el dispositivo de amortiguamiento para cada uno de los sismos ejecutados. Allí se evidencia que gran parte de la energía entrante es absorbida por el amortiguador, en promedio un 94%.





Gráfica 29 Energía disipada por estructura optimizada equipada con amortiguadores de fluido viscoso.

7.3. EDIFICIO REAL

Las propiedades geométricas y la posible localización de amortiguadores de fluido viscoso son las mostradas en la

Figura 26 y Figura 27. Los pórticos resistentes a momentos son sometidos a conjunto de registros sísmicos a nivel de diseño (DBE) y a nivel del sismo máximo esperado (MCE_R). Las cargas vivas y muertas fueron tomadas como 200 kgf/m² y 570 kgf/m² respectivamente. La estructura se encuentra ubicada en la ciudad de Cali-Colombia, en la microzona sísmica 4B.

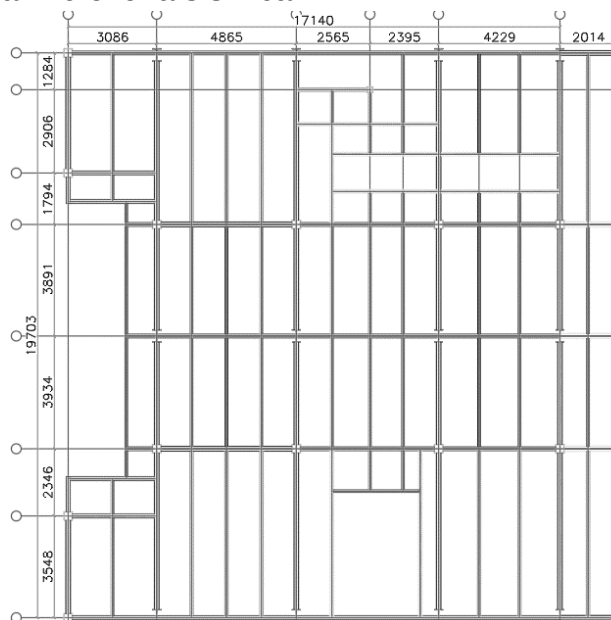


Figura 26 Vista en planta edificio de 3 pisos (piso tipo).

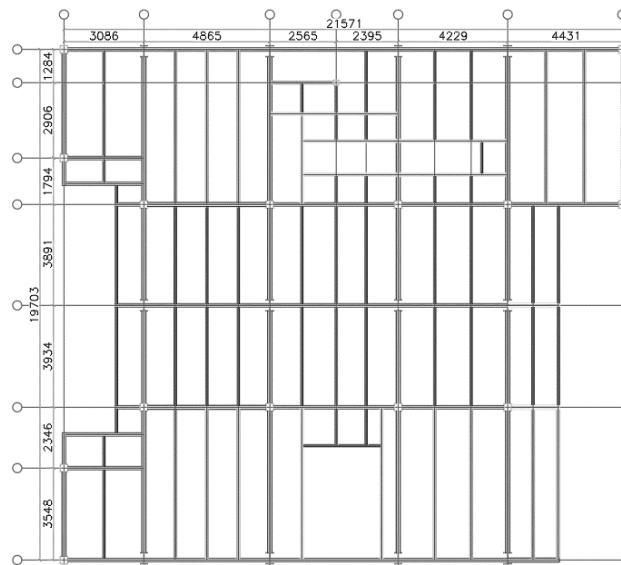


Figura 27 Vista en planta edificio de 3 pisos (piso 1).

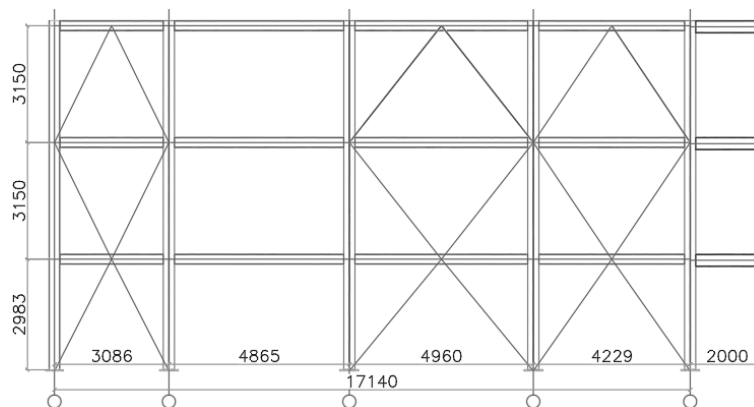


Figura 28 Vista en alzada - Ejes externos dirección X.

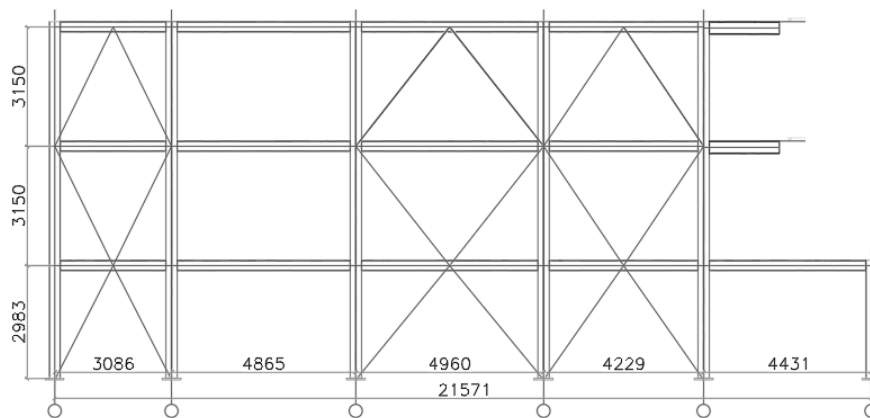
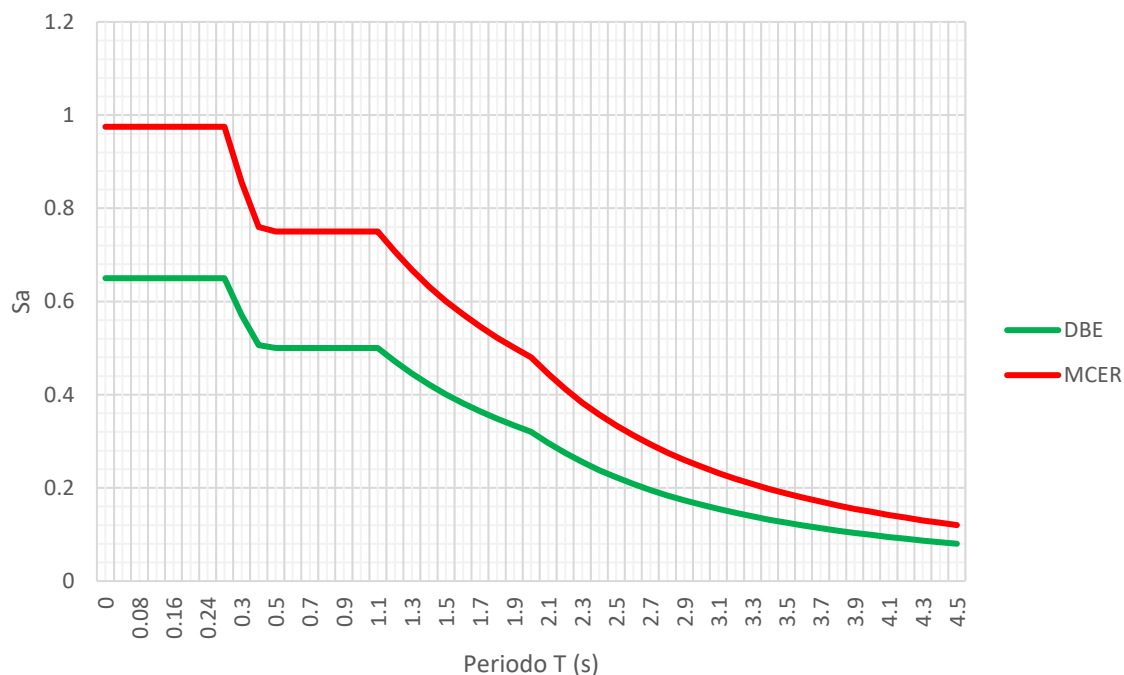


Figura 29 Vista en alzada - Ejes internos dirección X.

Los espectros a nivel de diseño (DBE) y a nivel de sismo máximo esperado (MCE_R) corresponden a los mostrados en la **Gráfica 30**. Los valores utilizados para la construcción del cada uno de los espectros se indican en la Tabla **13** de acuerdo a lo descrito en el título A de la NSR-10.



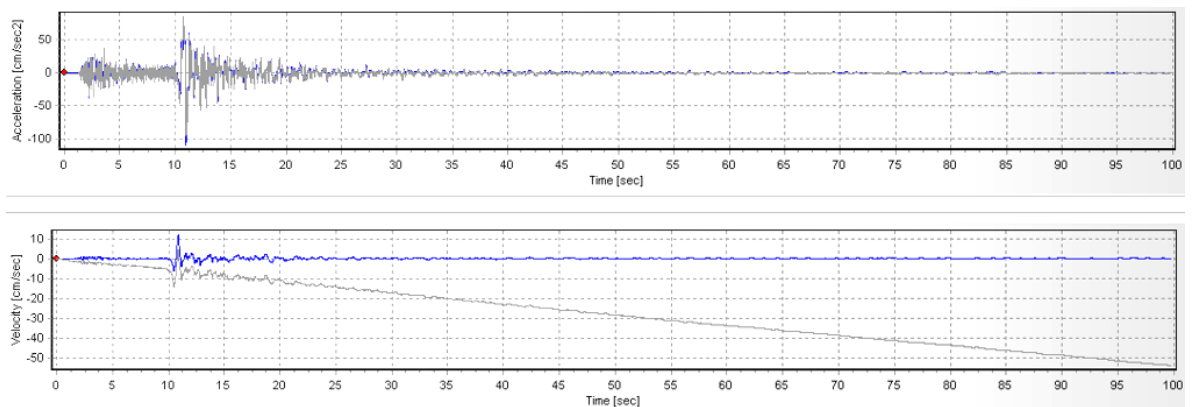
Gráfica 30 Espectro de diseño para sismo de diseño (DBE) y sismo máximo esperado (MCE_R).

Tabla 13 Parámetros para creación de espectro de diseño y MCE_R de acuerdo con el título A de la NSR-10.

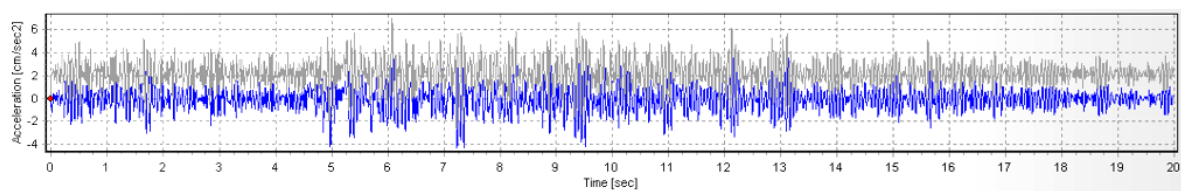
Parámetro	Valor		Definición.
Zona Sísmica	4B		Zona de acuerdo a microzonificación sísmica de la ciudad de Cali – Colombia.
A_a	0.25		Coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva.
A_v	0.25		Coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva.
	T _c	T _L	
F_a	1.04	0.8	Coeficiente de sitio para periodos cortos.
F_v	1.52	2.67	Coeficiente de sitio para periodos largos.
T_c	0.45	1.50	período de vibración, en segundos, correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño para periodos cortos.
T_L	2.00	2.10	Parámetro de aceleración de respuesta espectral para periodos cortos. (Sismo de diseño).

Como se describe en el numeral 18.2.2.2. del ASCE 7-16, para utilizar el método de análisis no lineal de historial de respuesta, se debe disponer de mínimo siete registros sísmicos, tanto para el sismo DBE como para el MCE_R . Los registros utilizados para este problema corresponden a los mismo indicados en el numeral 7.1 para el problema de la edificación de 5 pisos, a diferencia de que adicionalmente en el presente problema se ajustan y escalan los movimientos sísmicos de las dos direcciones (Norte-Sur(NS) y Este-Oeste(EW)), los cuales, debido a la cercanía de los sismos con el lugar de construcción de la edificación, corresponden a los mecanismos de origen de los eventos sísmicos que controlan el diseño y eventos MCE_R .

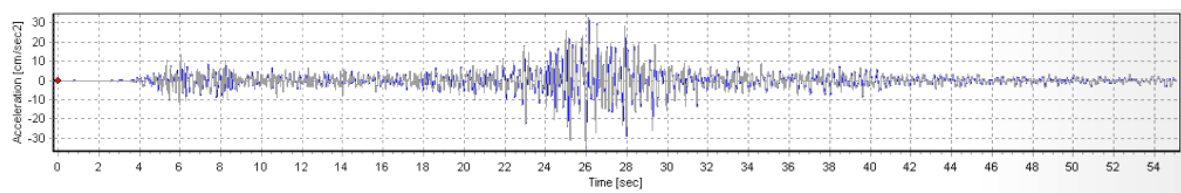
Estos eventos son escalados a los espectros DBE y MCE_R (Gráfica 30) los cuáles se muestran en la Gráfica 31 y Gráfica 37 respectivamente. Estos registros fueron ajustados a la línea base haciendo uso de software SeismoSignal®, como se observa de la Gráfica 6 a la Gráfica 12 para la dirección Norte-Sur y desde la Gráfica 31 hasta la Gráfica 37 para la dirección Este-Oeste.



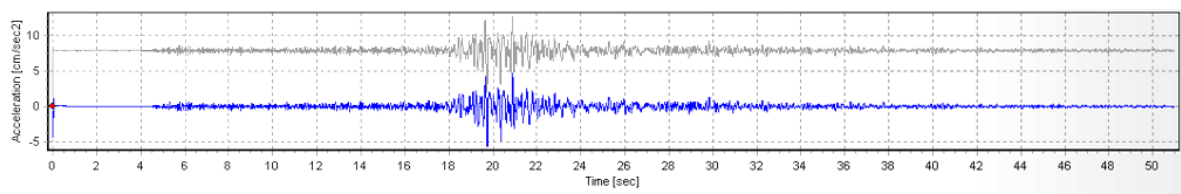
Gráfica 31 Corrección a línea base sismo EW 1995-02-08 - 18:40:25 - VALLE DEL CAUCA – CALIMA.



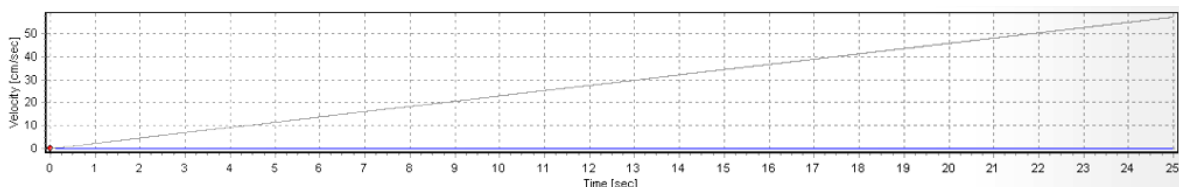
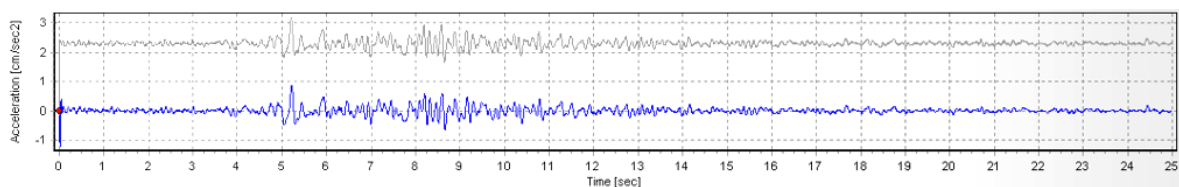
Gráfica 32 Corrección a línea base sismo EW 1996-11-17 - 18:44:15 - VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO.



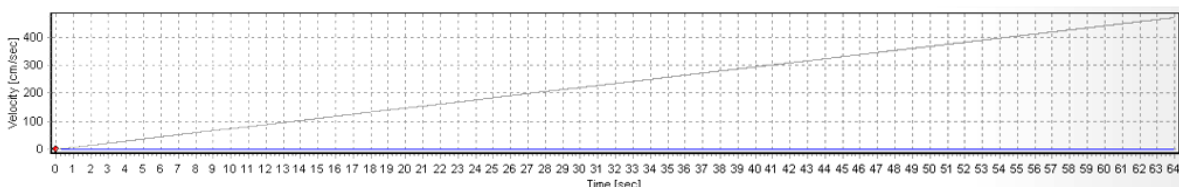
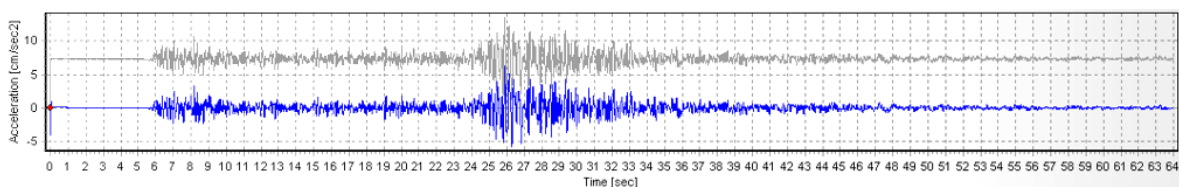
Gráfica 33 Corrección a línea base sismo EW 1997-12-11 - 07:56:29- VALLE DEL CAUCA – TULUA.



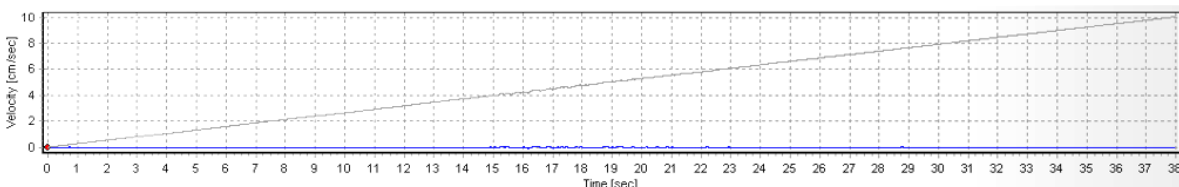
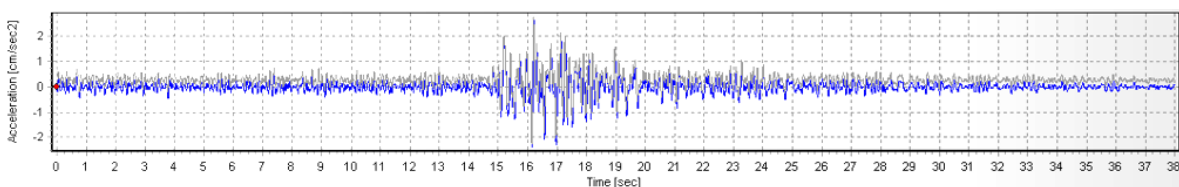
Gráfica 34 Corrección a línea base sismo EW 1999-07-19 - 16:13:17 - VALLE DEL CAUCA – TRUJILLO.



Gráfica 35 Corrección a línea base sismo EW 2000-04-03 - 09:52:46 - VALLE DEL CAUCA – GINEBRA.

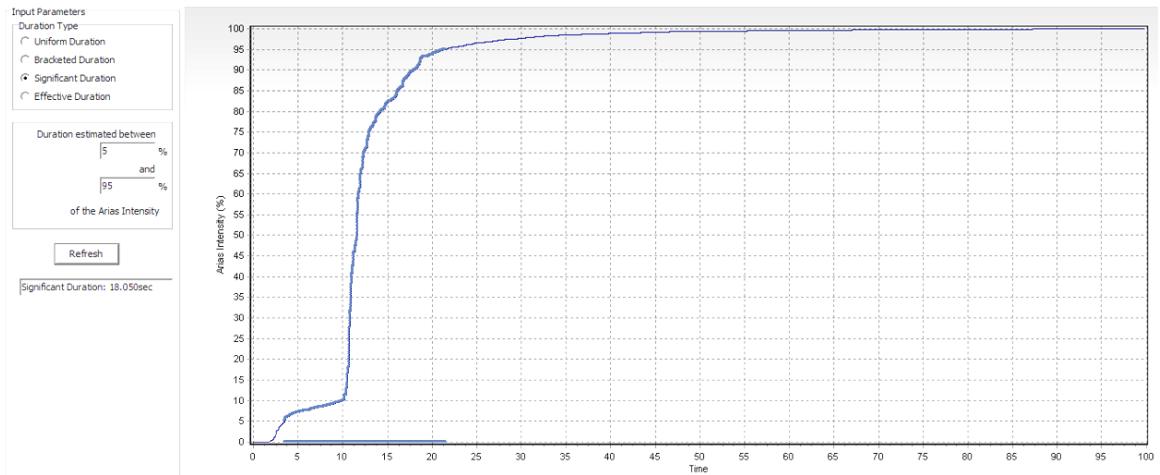


Gráfica 36 Corrección a línea base sismo EW 2001-09-22 - 03:23:39 - VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO.

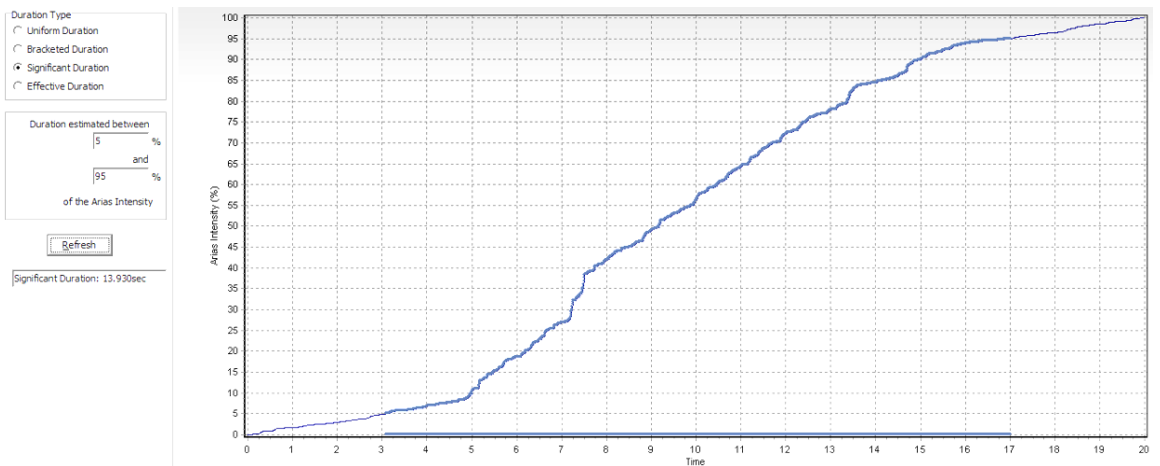


Gráfica 37 Corrección a línea base sismo EW 2004-01-15 - 00:25:05- VALLE DEL CAUCA – BUGALAGRANDE.

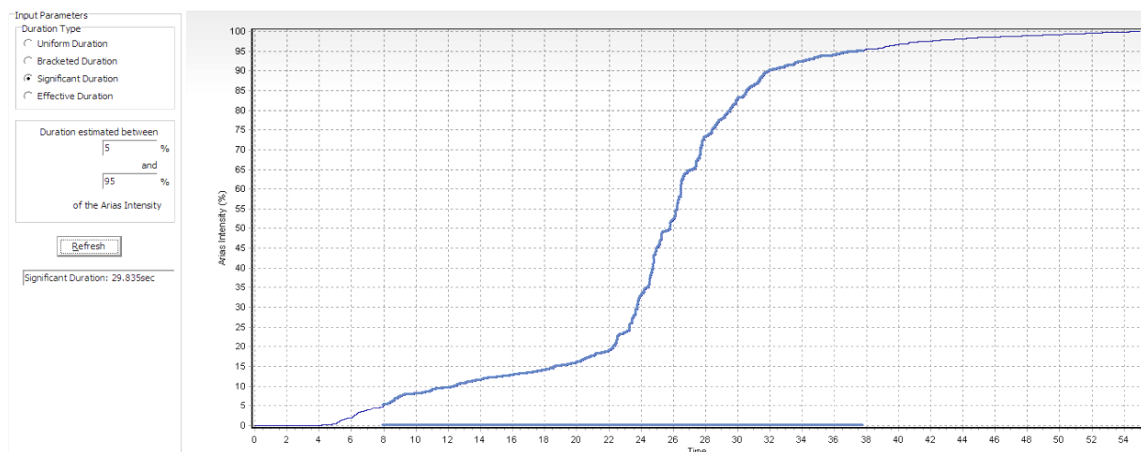
Cada registro sísmico utilizado fue recortado tomando como duración significativa el tiempo correspondiente hasta obtener un valor de 95% de intensidad de área, lo cual se puede observar desde la Gráfica 38 a la Gráfica 44.



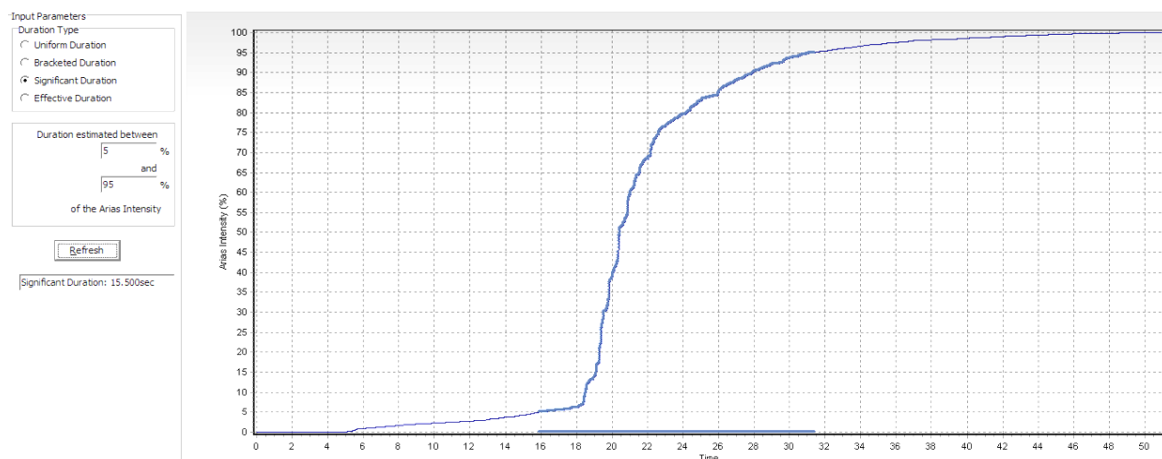
Gráfica 38 Intensidad de área – Sismo EW 1995-02-08 - 18:40:25 - VALLE DEL CAUCA – CALIMA.



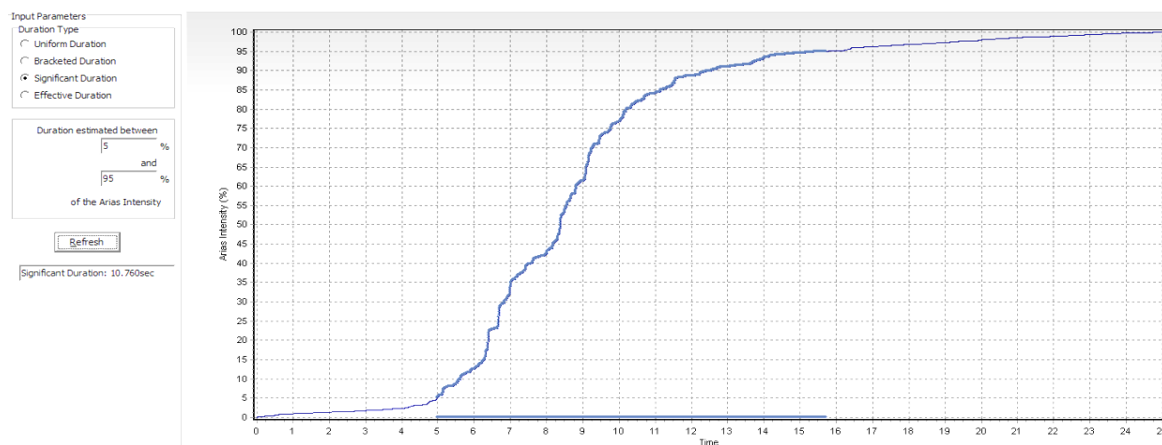
Gráfica 39 Intensidad de área – sismo EW 1996-11-17 - 18:44:15 - VALLE DEL CAUCA - EL DOVIO.



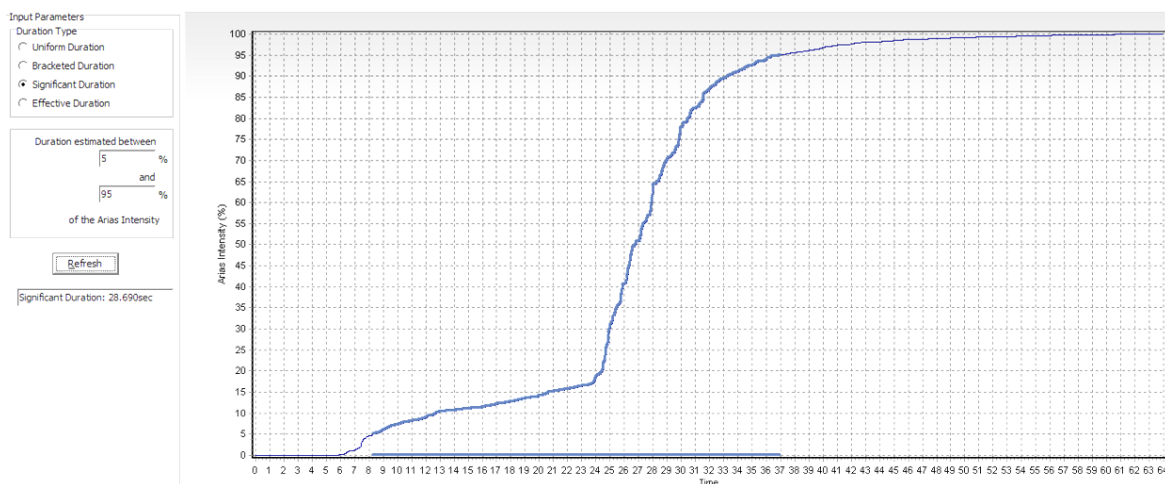
Gráfica 40 Intensidad de área – sismo EW 1997-12-11 - 07:56:29- VALLE DEL CAUCA – TULUA.



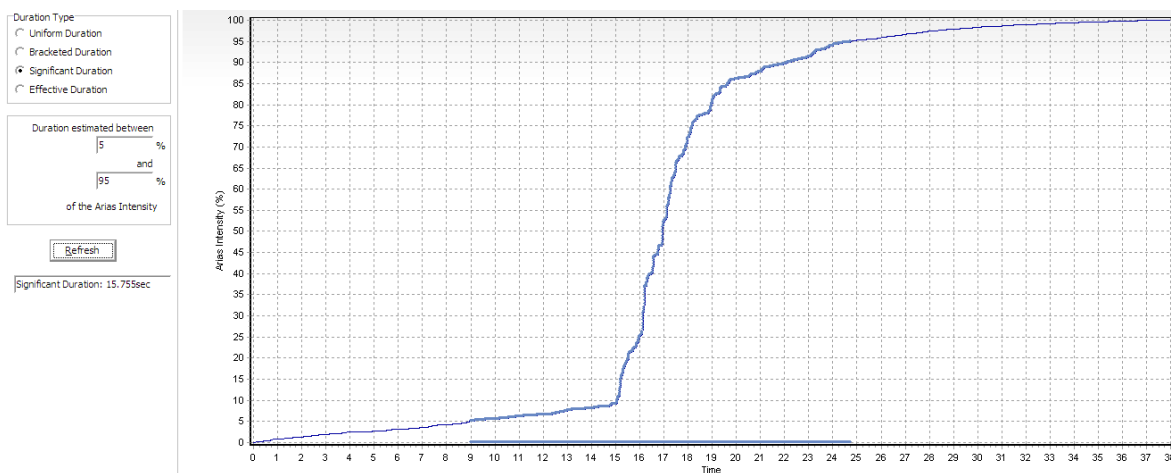
Gráfica 41 Intensidad de área – sismo EW 1999-07-19 - 16:13:17 - VALLE DEL CAUCA – TRUJILLO.



Gráfica 42 Intensidad de área - sismo EW 2000-04-03 - 09:52:46 - VALLE DEL CAUCA – GINEBRA.

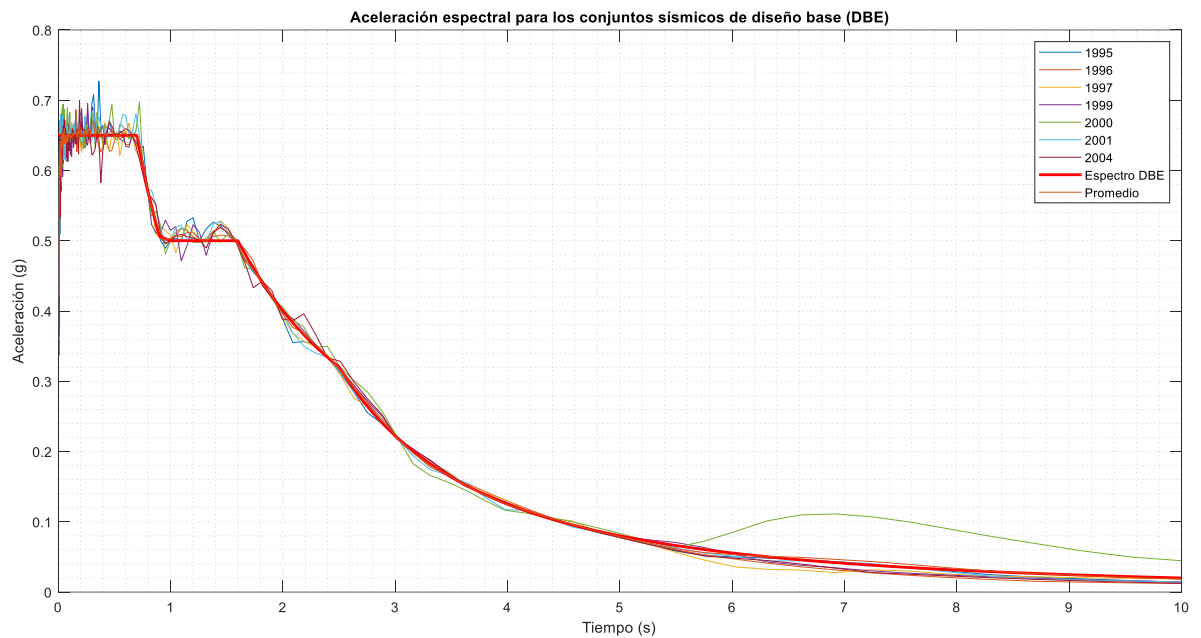


Gráfica 43 Intensidad de área – sismo EW 2001-09-22 - 03:23:39 - VALLE DEL CAUCA - SAN PEDRO.

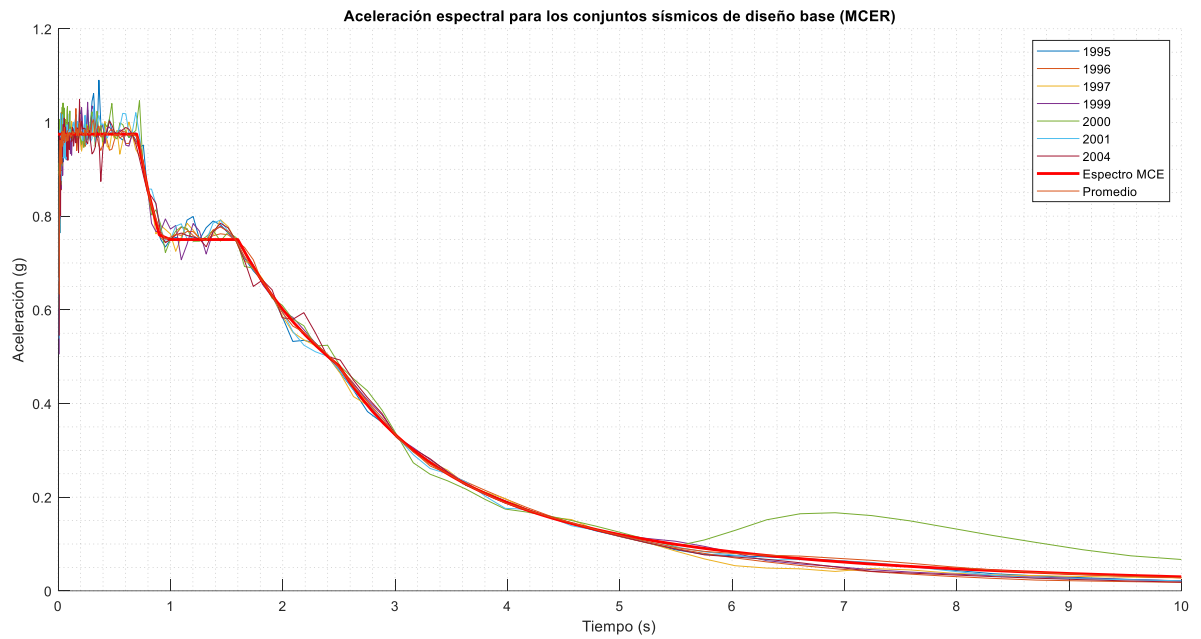


Gráfica 44 Intensidad de área – sismo EW 2004-01-15 - 00:25:05- VALLE DEL CAUCA – BUGALAGRANDE.

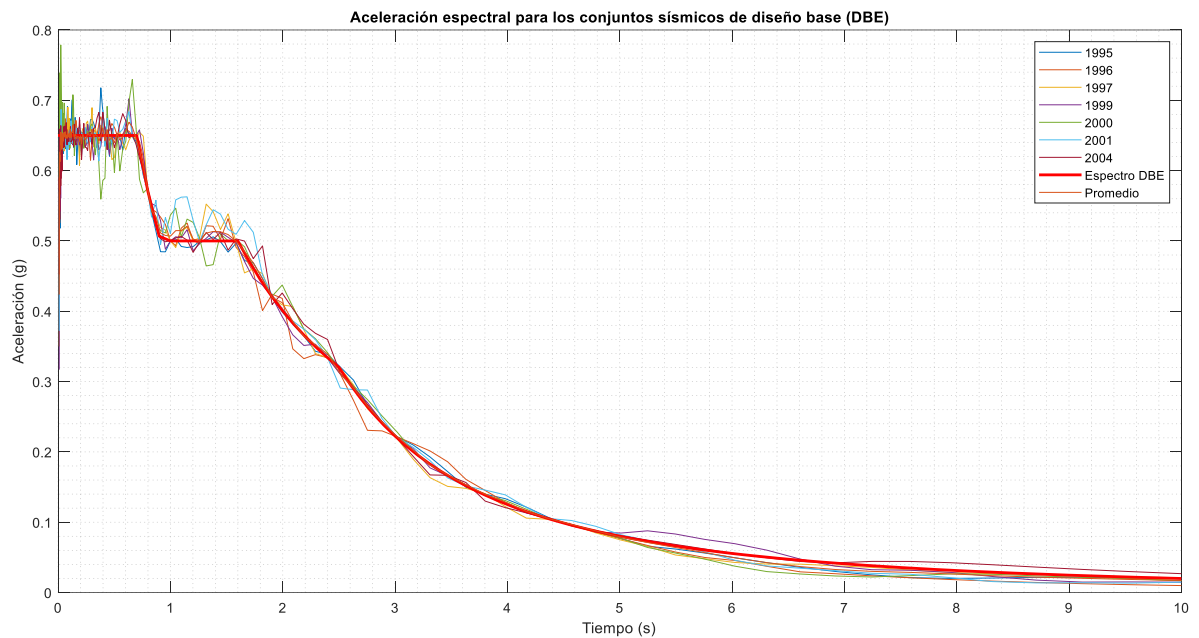
Estos registros sísmicos, de acuerdo con lo descrito en el numeral 3.1.3.3, pueden ser escalados a los espectros DBE y MCE_R . Este proceso se realizó mediante el software Etabs® utilizando la función de “*Matched to Response Spectrum*” como se muestra en la Gráfica 45 y Gráfica 46 para la dirección Norte-Sur y en la Gráfica 47 y Gráfica 48 para la dirección Este-Oeste.



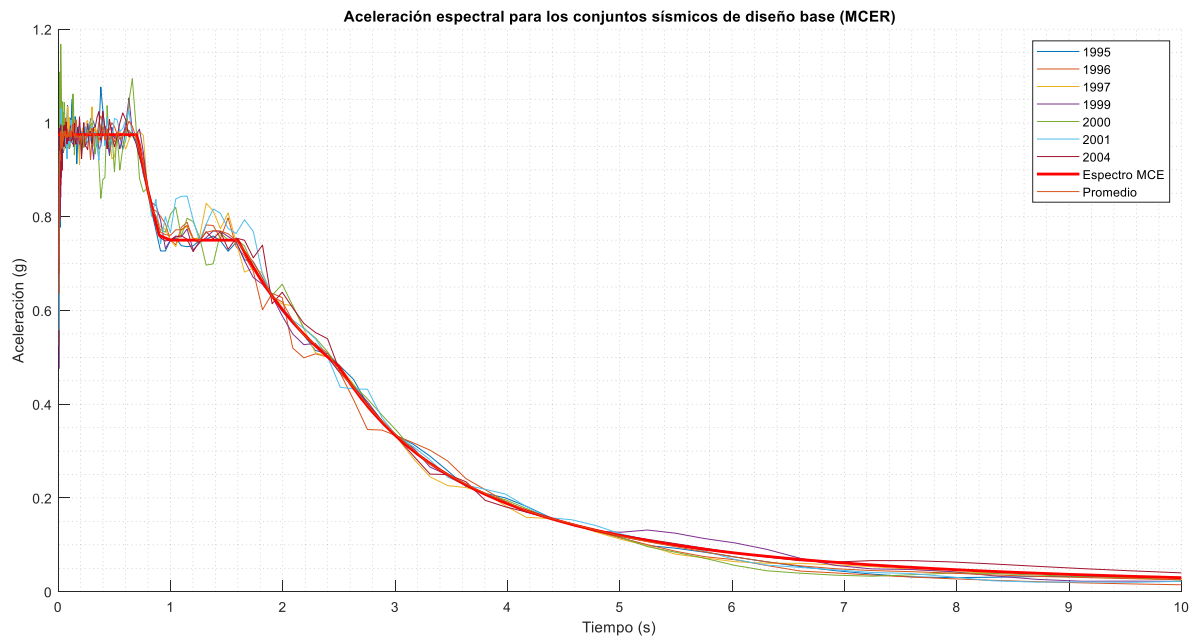
Gráfica 45 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (DBE) – dirección Norte-Sur.



Gráfica 46 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (MCER) – dirección Norte-Sur.



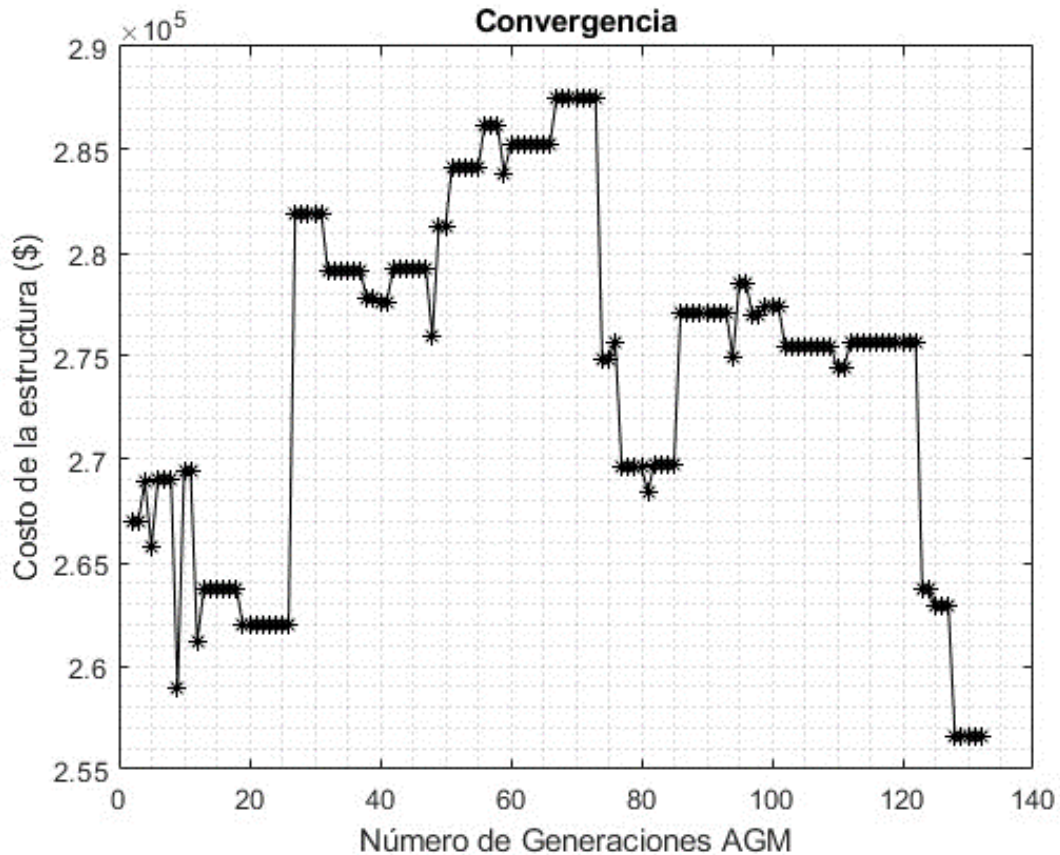
Gráfica 47 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (DBE) – dirección Este-Oeste.



Gráfica 48 Aceleración espectral para los conjuntos sísmicos de diseño base (MCER) – dirección Este-Oeste.

El proceso de optimización llevado a cabo por el AGM para este problema es el indicado en la Gráfica 49. Allí se puede observar que se obtuvo un valor optimizado de \$256.629= de costo total de la edificación en un total de 132

generaciones del AGM. En esta gráfica se evidencia que, en la mayor parte del proceso de optimización se aceptan soluciones más costosas, lo cual es acorde al manejo de restricciones implementado, donde el AGM acepta soluciones con mayor función objetivo pero que tiene menos cantidad de soluciones violadas. Después de que se encuentra una solución que cumple con todas las restricciones, solo se aceptan soluciones que poseen un mejor valor de la función objetivo (costo de la estructura), como se evidencia a partir de la generación 122.



Gráfica 49 Convergencia estructura de 3 pisos.

Los perfiles de los elementos obtenidos corresponden a los evidenciados en la Figura 30, al igual que la cantidad y ubicación de los amortiguadores necesarios al final del proceso de optimización.

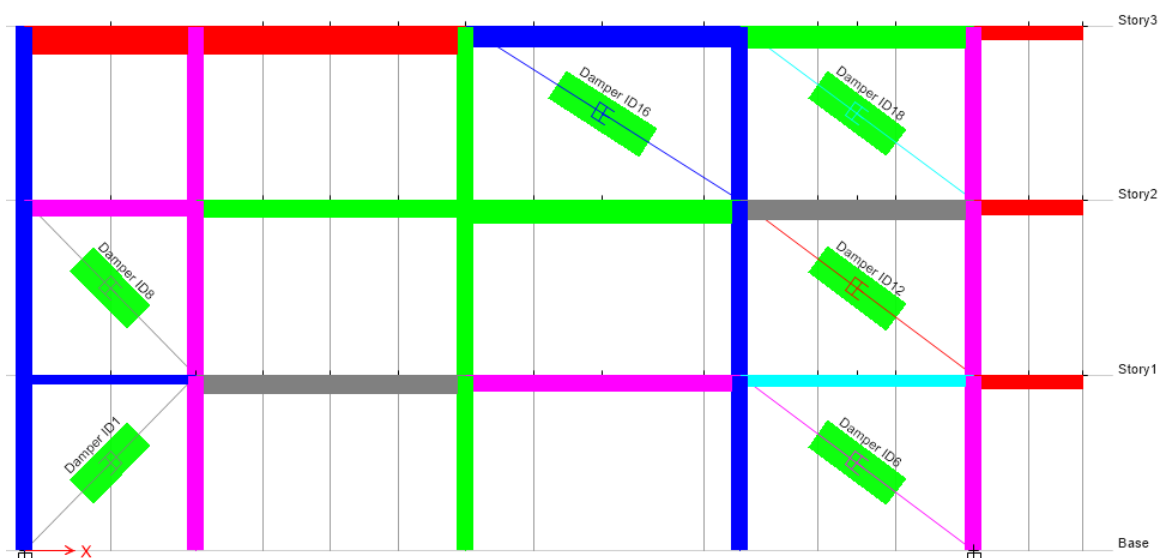


Figura 30 Resultados de perfiles, ubicación y cantidad de amortiguadores para edificio de 3 pisos – ejes extremos dirección X.

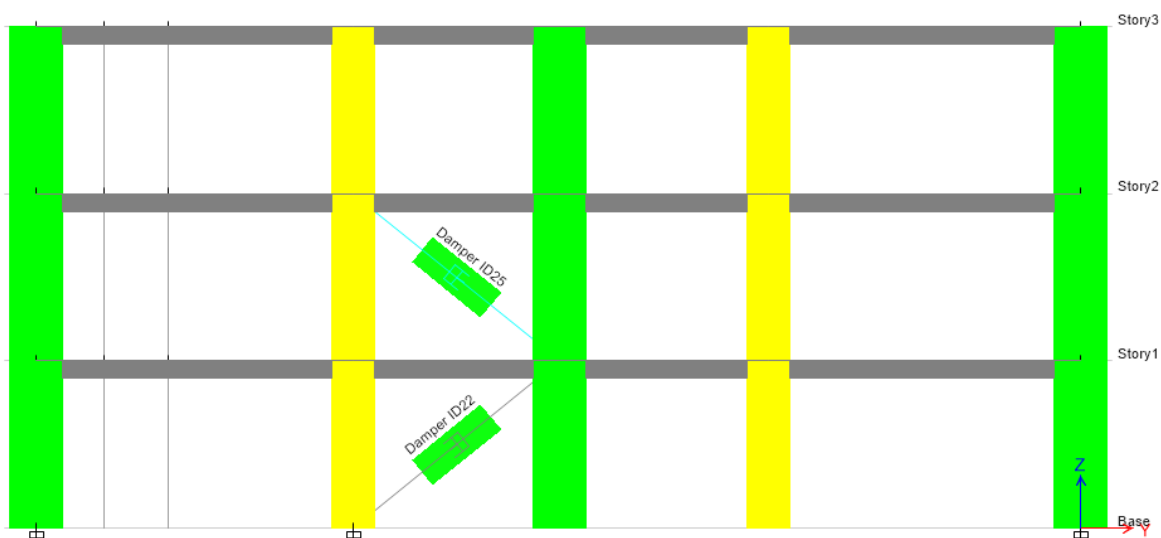
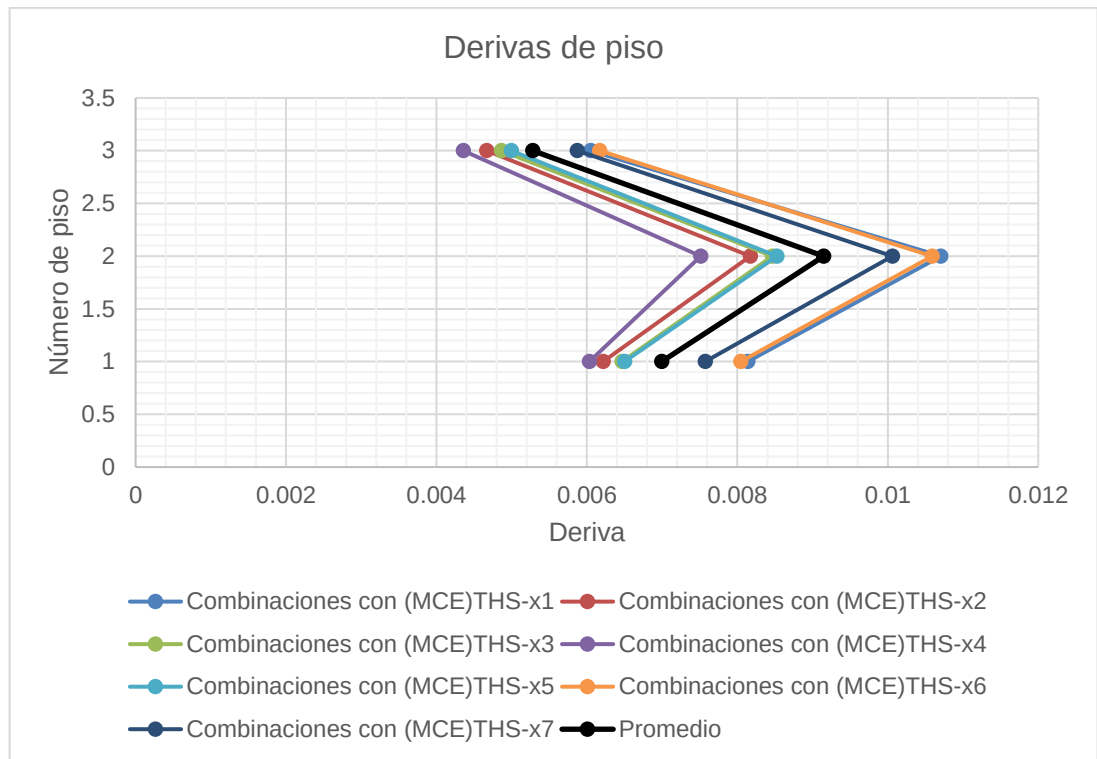


Figura 31 Resultados de perfiles, ubicación y cantidad de amortiguadores para edificio de 3 pisos – ejes internos dirección Y.

El promedio de derivas máximas obtenido en la dirección de análisis corresponde a las presentadas en la Gráfica 50.



Gráfica 50 Deriva de piso en la dirección de análisis - Edificio de 3 pisos.

El promedio los índices de sobreesfuerzo obtenidos para cada elemento se muestran en la Tabla 14, donde se evidencia que todos los elementos se encuentran por debajo de 1.5, como se describe en el numeral 3.1.3.9 del presente documento.

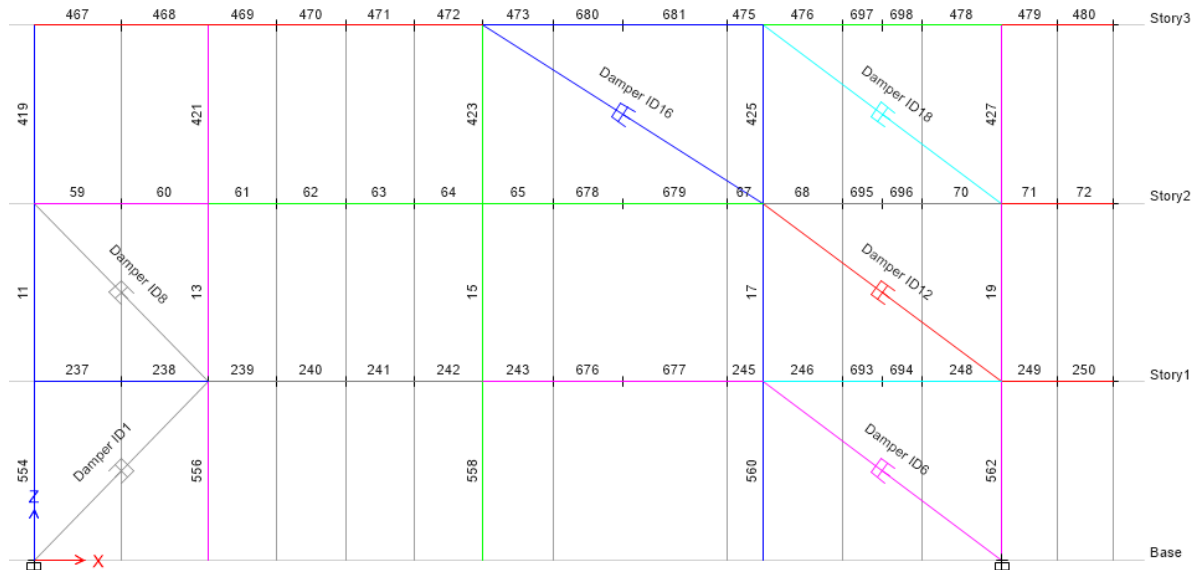


Figura 32 Nombre único de elementos modelo Etabs - Edificio de tres pisos – ejes externos dirección X.

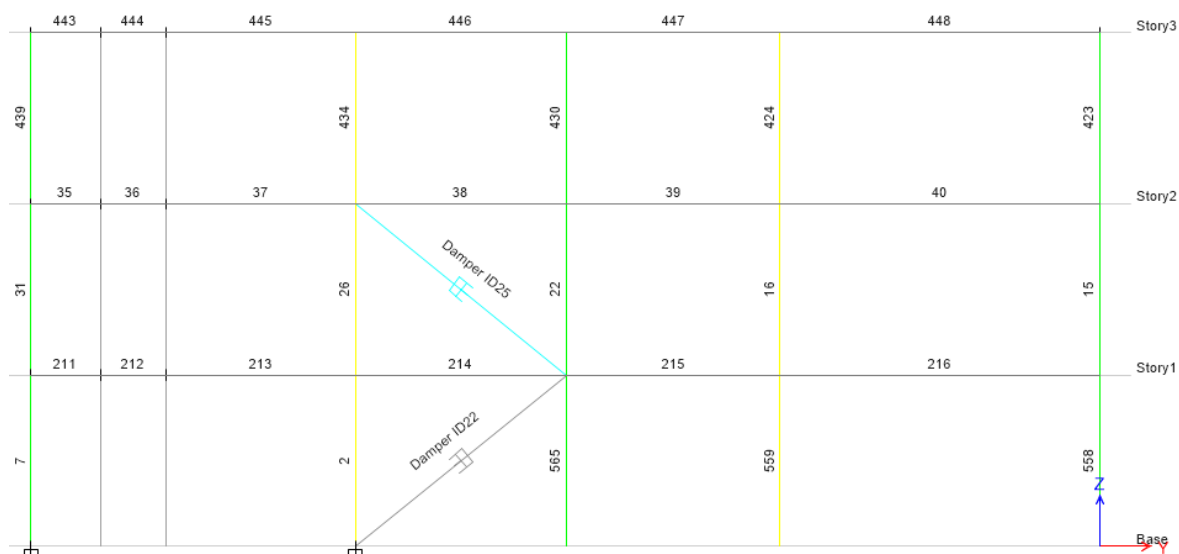


Figura 33 Nombre único de elementos modelo Etabs - Edificio de tres pisos – ejes internos dirección Y.

Tabla 14 Promedio índices de sobreesfuerzo elementos estructurales - Edificio de tres pisos.

Número de piso	Número Elemento	Sección	Promedio ISE
Story3	419	HE900B	0.131
Story3	421	HE700B	0.168
Story3	423	HE1000B	0.158
Story3	424	HE800B	0.082
Story3	425	HE900B	0.174
Story3	427	HE700B	0.121
Story3	430	HE1000B	0.072
Story3	434	HE800B	0.087
Story3	439	HE1000B	0.163
Story2	11	HE900B	0.113
Story2	13	HE700B	0.204
Story2	15	HE1000B	0.219
Story2	16	HE800B	0.120
Story2	17	HE900B	0.208
Story2	19	HE700B	0.143
Story2	22	HE1000B	0.113
Story2	26	HE800B	0.121
Story2	31	HE1000B	0.232
Story1	554	HE900B	0.379

Story1	556	HE700B	0.422
Story1	558	HE1000B	0.408
Story1	559	HE800B	0.315
Story1	560	HE900B	0.388
Story1	562	HE700B	0.378
Story1	565	HE1000B	0.291
Story1	2	HE800B	0.288
Story1	7	HE1000B	0.327
Story3	443	IPE330	0.289
Story3	444	IPE330	0.221
Story3	445	IPE330	0.280
Story3	446	IPE330	0.183
Story3	447	IPE330	0.179
Story3	448	IPE330	0.306
Story3	467	IPE500	0.108
Story3	468	IPE500	0.115
Story3	469	IPE500	0.065
Story3	470	IPE500	0.071
Story3	471	IPE500	0.071
Story3	472	IPE500	0.163
Story3	473	IPE360	0.177
Story3	475	IPE360	0.208
Story3	476	IPE400	0.128
Story3	478	IPE400	0.255
Story3	479	IPE240	0.462
Story3	480	IPE240	0.133
Story3	680	IPE360	0.115
Story3	681	IPE360	0.088
Story3	697	IPE400	0.096
Story3	698	IPE400	0.055
Story2	35	IPE330	0.290
Story2	36	IPE330	0.218
Story2	37	IPE330	0.282
Story2	38	IPE330	0.186
Story2	39	IPE330	0.183
Story2	40	IPE330	0.307
Story2	59	IPE270	0.394
Story2	60	IPE270	0.505
Story2	61	IPE300	0.377
Story2	62	IPE300	0.237

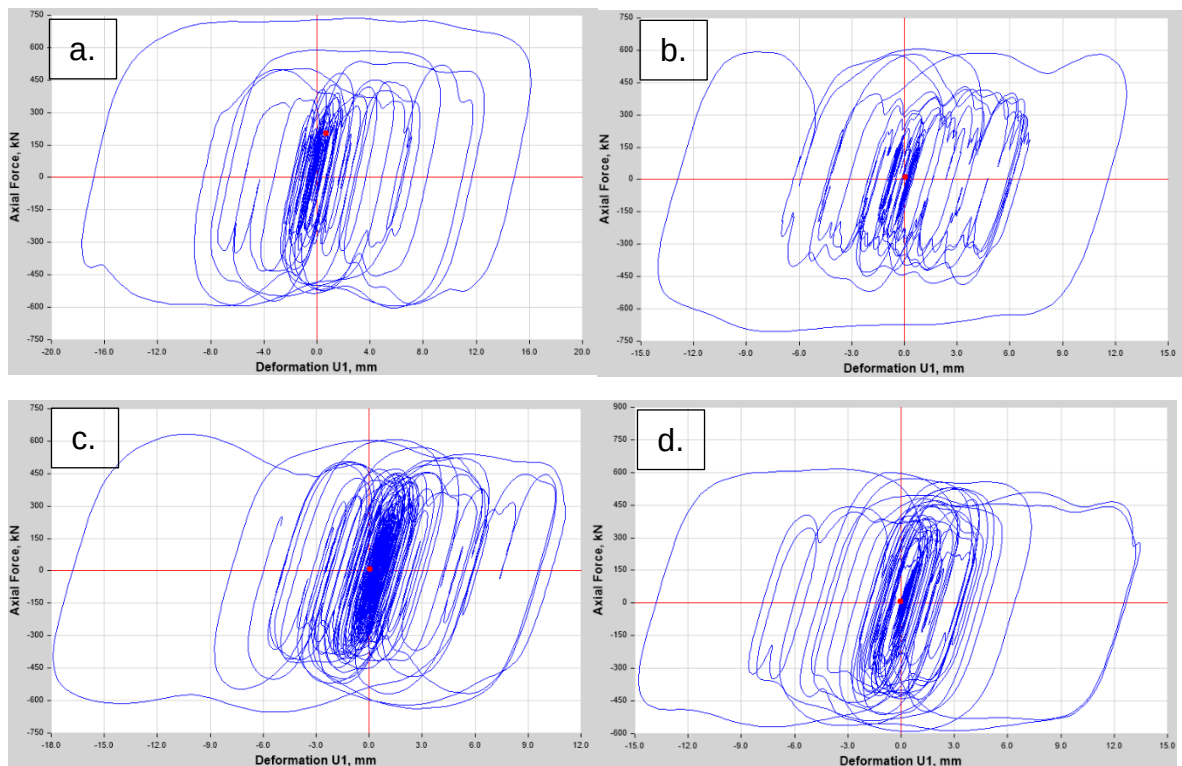
Story2	63	IPE300	0.197
Story2	64	IPE300	0.518
Story2	65	IPE400	0.262
Story2	67	IPE400	0.353
Story2	68	IPE330	0.276
Story2	70	IPE330	0.469
Story2	71	IPE240	0.462
Story2	72	IPE240	0.133
Story2	678	IPE400	0.218
Story2	679	IPE400	0.218
Story2	695	IPE330	0.164
Story2	696	IPE330	0.143
Story1	211	IPE330	0.279
Story1	212	IPE330	0.233
Story1	213	IPE330	0.271
Story1	214	IPE330	0.156
Story1	215	IPE330	0.152
Story1	216	IPE330	0.280
Story1	237	IPE160	0.554
Story1	238	IPE160	0.629
Story1	239	IPE330	0.516
Story1	240	IPE330	0.314
Story1	241	IPE330	0.240
Story1	242	IPE330	0.644
Story1	243	IPE270	0.574
Story1	245	IPE270	0.639
Story1	246	IPE200	0.791
Story1	248	IPE200	0.901
Story1	249	IPE240	0.463
Story1	250	IPE240	0.134
Story1	676	IPE270	0.349
Story1	677	IPE270	0.353
Story1	693	IPE200	0.433
Story1	694	IPE200	0.408

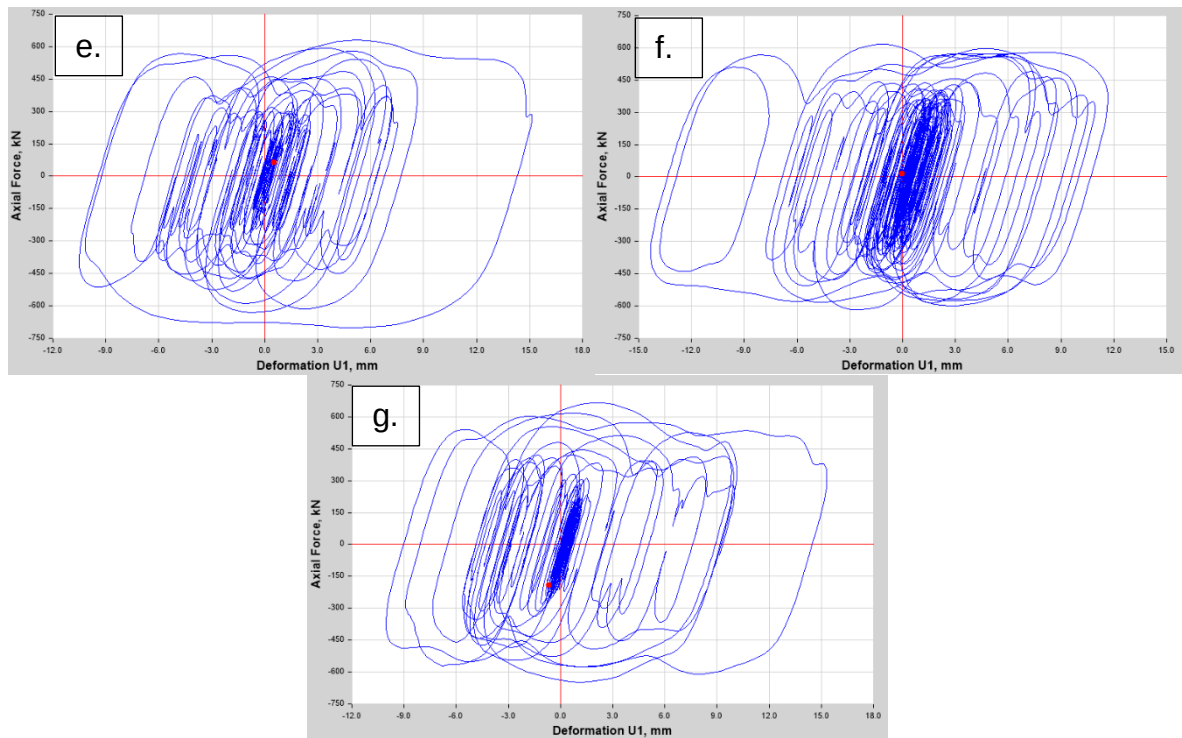
Las propiedades del amortiguador de fluido viscoso se muestran en la Tabla **15**. De igual manera en la Gráfica **51** se muestra el ciclo de histéresis del amortiguador diseñado, donde se evidencia su comportamiento viscoso, la fuerza de diseño y el valor del máximo *Stroke* necesario del dispositivo.

Tabla 15 Propiedades amortiguadores - edificio de tres pisos.

ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID1	<i>C_damper</i>	1380	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	283206.612	kN/m
	Fuerza máxima	651.753	kN
	Máximo Stroke	0.017	m
	Velocidad Máxima pistón	0.117	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID6	<i>C_damper</i>	360	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	149368.436	kN/m
	Fuerza máxima	180.042	kN
	Máximo Stroke	0.018	m
	Velocidad Máxima pistón	0.138	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID8	<i>C_damper</i>	660	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	259685.496	kN/m
	Fuerza máxima	334.400	kN
	Máximo Stroke	0.021	m
	Velocidad Máxima pistón	0.143	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID12	<i>C_damper</i>	420	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	825534.598	kN/m
	Fuerza máxima	217.262	kN
	Máximo Stroke	0.033	m
	Velocidad Máxima pistón	0.152	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID16	<i>C_damper</i>	1500	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	646777.54	kN/m
	Fuerza máxima	623.376	kN
	Máximo Stroke	0.014	m
	Velocidad Máxima pistón	0.081	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID18	<i>C_damper</i>	1740	kN*(s/m) ^{Cexp}

	<i>K_brace</i>	916314.285	kN/m
	Fuerza máxima	709.653	kN
	Máximo Stroke	0.017	m
	Velocidad Máxima pistón	0.077	m/s
			kN*(s/m) ^{Cexp}
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID22	<i>C_damper</i>	2700	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	848120.855	kN/m
	Fuerza máxima	895.169	kN
	Máximo Stroke	0.003	m
	Velocidad Máxima pistón	0.043	m/s
ID	Propiedad	Valor	Unidades
Damper ID25	<i>C_damper</i>	960	kN*(s/m) ^{Cexp}
	<i>K_brace</i>	410814.413	kN/m
	Fuerza máxima	408.569	kN
	Máximo Stroke	0.007	m
	Velocidad Máxima pistón	0.087	m/s



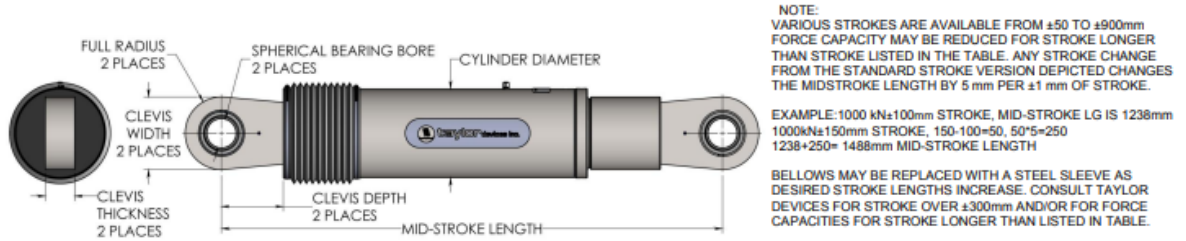


Gráfica 51 Gráficas fuerza axial vs deformación: a) Sismo (MCE)THSx1, b) Sismo (MCE)THSx2, c) Sismo (MCE)THSx3, d) Sismo (MCE)THSx4, e) Sismo (MCE)THSx5, f) Sismo (MCE)THSx6, g) Sismo (MCE)THSx7.

De acuerdo a los datos presentes en la Tabla **15** y la Gráfica **51**, se requieren los amortiguadores de *Taylor Devices Inc.* que se muestran en la **Tabla 16**.

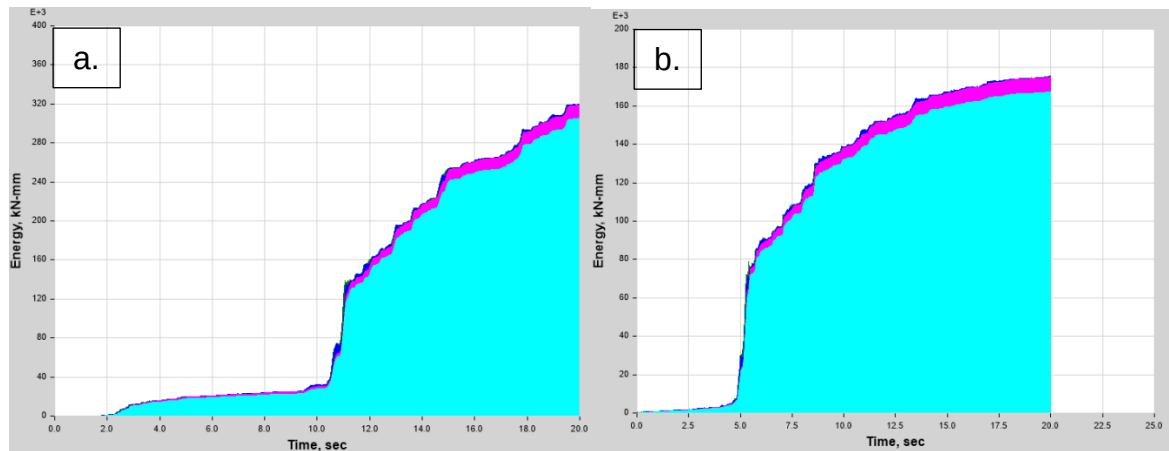
Tabla 16 Dispositivos de amortiguamiento proporcionados por *Taylor Devices Inc.*

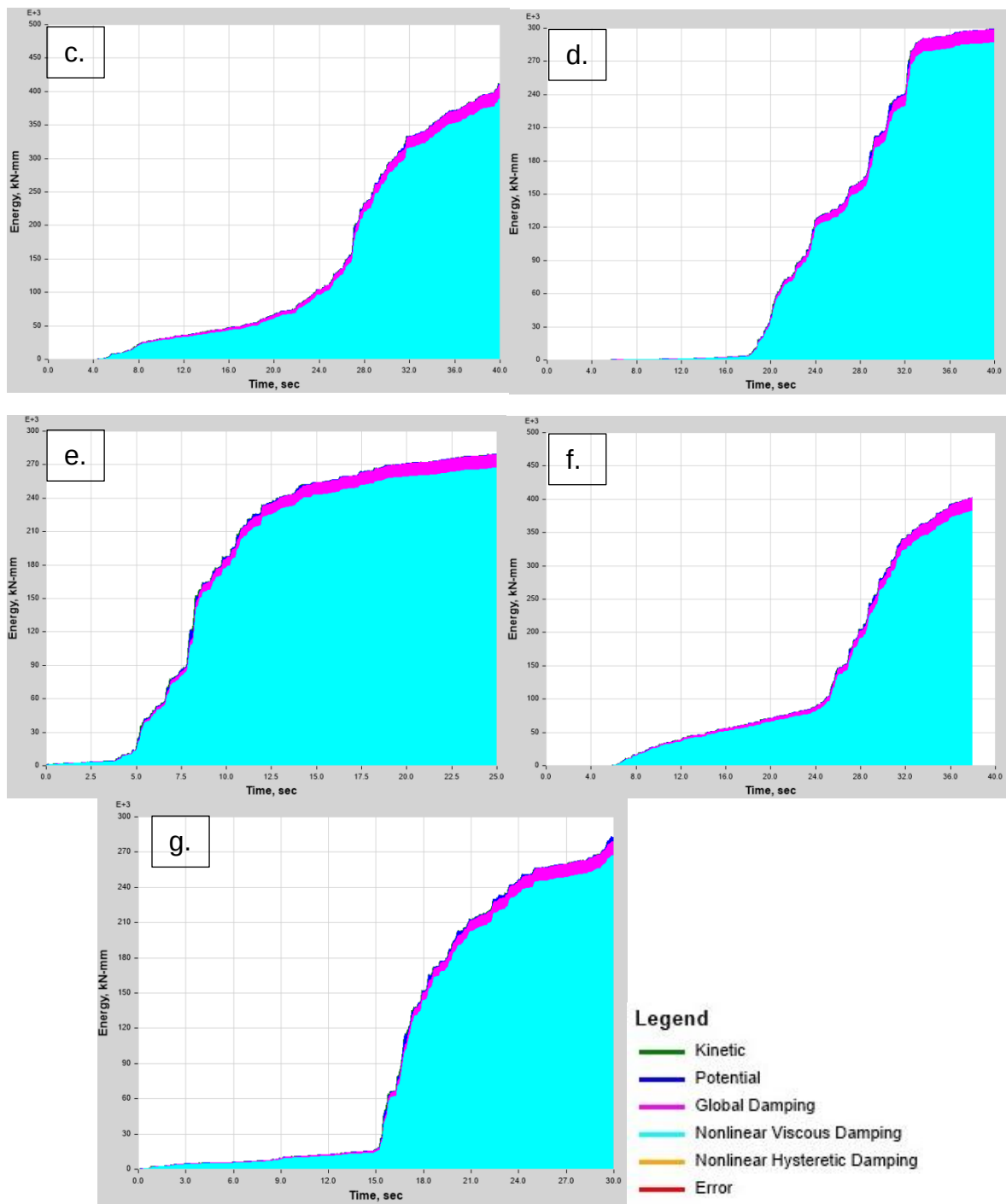
FLUID VISCOUS DAMPERS & LOCK-UP DEVICES
CLEVIS – CLEVIS CONFIGURATION, METRIC UNITS



FORCE (kN)	TAYLOR DEVICES MODEL NUMBER	SPHERICAL BEARING BORE DIAMETER (mm)	MID-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)	BEARING THICKNESS (mm)	MAXIMUM CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	MAXIMUM CYLINDER DIAMETER (mm)	WEIGHT (kg)
250	17120	38.10	867	±75	43	33	102	83	114	41
500	17130	50.80	1067	±100	55	44	127	102	150	82
750	17140	57.15	1194	±100	59	50	152	129	184	136
1000	17150	69.85	1238	±100	71	61	184	150	210	193
1500	17160	76.20	1314	±100	77	67	203	162	241	250
2000	17170	88.90	1575	±125	91	78	235	191	285	408
3000	17180	101.60	1575	±125	117/111*	89	286/324*	228/210*	350	701
4000	17190	127.00	1880	±125	142	111	324	210	425	1225
6500	17200	152.40	2134	±125	152	121	350	305	515	1810
8000	17210	177.80	2293	±125	178	135	415	343	565	2495

En la Gráfica 52 se observa la energía disipada por el dispositivo de amortiguamiento para cada uno de los sismos ejecutados. Allí se evidencia que gran parte de la energía entrante es absorbida por el amortiguador, en promedio un 95%.





Gráfica 52 Energía disipada por estructura optimizada equipada con amortiguadores de fluido viscoso.

8. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se consiguió desarrollar un algoritmo estable y eficiente que trabaja en paralelo para la optimización de estructuras equipadas con amortiguadores de fluido viscoso. El algoritmo es denotado como Algoritmo Genético Modificado (AGM), el cual posee propuestas de manejo de restricciones y valores de función objetivo que mejoran el desempeño respecto al algoritmo base. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos al probar el AGM en problemas de prueba de la literatura especializada y en problemas de edificaciones con sistemas de protección sísmica, se tienen las siguientes conclusiones:

- El AGM presenta un buen desempeño en los problemas de prueba con restricciones indicados en la literatura especializada, mostrando estabilidad, eficiencia y robustez, teniendo en cuenta los valores de desviación estándar, tiempos de cómputo y capacidad de encontrar soluciones en problemas que poseen espacios de búsqueda muy pequeños con restricciones de igualdades lineales y no lineales.
- El AGM es viable para ser utilizado en problemas reales de estructuras equipadas con amortiguadores de fluidos viscosos a través de la interfaz de usuario creada. Lo anterior teniendo en cuenta los tiempos de cómputo razonables y que la interfaz gráfica presenta la opción de colocar los límites de análisis y diseño de los códigos NSR-10 y ASCE 7-16.
- La calidad de los resultados obtenidos depende considerablemente de la cantidad de variables suministradas al algoritmo, es decir, de la cantidad de grupos de columnas, vigas y posible ubicación de amortiguadores. Entre mayor sea la cantidad de variables, se requiere de más tiempo para encontrar una región de soluciones factibles y proceder a encontrar la mejor solución de esa zona.
- El tiempo de cómputo que tardará el algoritmo para encontrar diseños optimizados depende tanto de la cantidad de variables como de la cantidad de núcleos disponibles de la CPU utilizada, lo cual afecta de manera directa y sustancial el tiempo total en encontrar diseños optimizados. Entre mayor cantidad de núcleos y menor cantidad de variables, será más rápido el proceso de convergencia.

- El AGM según las gráficas de convergencia presenta un buen proceso de búsqueda encaminada hacia el valor óptimo, siendo permisivo en las primeras fases de optimización, encaminándose hacia la región de soluciones factibles aceptando soluciones no factibles de acuerdo con las mejoras respecto al algoritmo base implementadas (base de datos de los mejores candidatos y manejo de restricciones de manera adaptativa incluyendo restricciones con igualdades).

9. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación han sido favorables y abren paso a diferentes caminos con el fin de mejorar los tiempos de cómputo al requerir optimizar problemas de alta magnitud y con una gran cantidad de variables. Las líneas de investigación que se abren paso son las siguientes:

- Desarrollo del proceso de optimización teniendo en cuenta las capacidades en conjunto de los procesadores multinúcleo y unidades de procesamiento gráfico (GPU), tanto en computadoras locales como en equipos virtuales de alto rendimiento.
- Implementar el proceso de optimización del AGM en estructuras equipadas con diferentes sistemas de protección sísmica.
- Ejecutar el AGM en estructuras donde se puede realizar el diseño a través del análisis dinámico modal espectral en lugar del análisis no lineal *Time history*.

REFERENCIAS

- [1] D. Gómez, J. Marulanda, and P. Thomson, "Control systems for dynamic loading protection of civil structures," *DYNA (Colombia)*, vol. 75, no. 155, pp. 77–89, 2008.
- [2] J. Suárez, "Optimización estructural de armaduras en 2D mediante un Algoritmo Recocido Simulado Alterado," Universidad de Sucre, 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.unisucra.edu.co/bitstream/001/660/1/T624.17 S939.pdf>
- [3] S. Kirkpatrick, "Optimization by Simulated Annealing Optimization by Simulated Annealing," vol. 220, no. January 1983, 2014.
- [4] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, IEEE, 2011, pp. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [5] D. E. Goldberg and J. H. Holland, "Genetic Algorithms and Machine Learning," *Mach Learn*, vol. 3, no. 2, pp. 95–99, 1988, doi: 10.1023/A:1022602019183.
- [6] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 26, no. 1, pp. 29–41, 1996, doi: 10.1109/3477.484436.
- [7] Zong Woo Geem, Joong Hoon Kim, and G. V. Loganathan, "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search," *Simulation*, vol. 76, no. 2, pp. 60–68, Feb. 2001, doi: 10.1177/003754970107600201.
- [8] A. Kaveh and V. R. Mahdavi, "Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method," *Comput Struct*, vol. 139, pp. 18–27, 2014, doi: 10.1016/j.compstruc.2014.04.005.
- [9] O. K. Erol and I. Eksin, "A new optimization method: Big Bang-Big Crunch," *Advances in Engineering Software*, vol. 37, no. 2, pp. 106–111, 2006, doi: 10.1016/j.advengsoft.2005.04.005.
- [10] C. Millán and C. Celis, "Evaluación del desempeño de algoritmos de evolución paramétrica para optimización," Universidad Industrial de Santander, 2009. doi: 10.18860/ling.v5i1.609.
- [11] G.-S. CHEN, R. J. BRUNO, and M. SALAMA, "Optimal placement of active/passive members in truss structures using simulated annealing," *AIAA Journal*, vol. 29, no. 8, pp. 1327–1334, 1991, doi: 10.2514/3.10739.
- [12] A. Y. T. Leung, H. Zhang, C. C. Cheng, and Y. Y. Lee, "Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake," *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 37, no. 9, pp. 1223–1246, Jul. 2008, doi: 10.1002/eqe.811.
- [13] A. Shayeghi, H. Eimani Kalasar, and H. Shayeghi, "Seismic control of tall building using a new optimum controller based on GA," *World Acad Sci Eng Technol*, vol. 33, pp. 702–709, 2009.
- [14] O. Lavan and G. F. Dargush, "Multi-objective evolutionary seismic design with passive energy dissipation systems," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 13, no. 6, pp. 758–790, 2009, doi: 10.1080/13632460802598545.

- [15] G. Bekdaş and S. M. Nigdeli, "Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search," *Eng Struct*, vol. 33, no. 9, pp. 2716–2723, 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.05.024.
- [16] Y. J. Cha, Y. Kim, A. M. Raich, and A. K. Agrawal, "Multi-objective optimization for actuator and sensor layouts of actively controlled 3D buildings," *JVC/Journal of Vibration and Control*, vol. 19, no. 6, pp. 942–960, 2013, doi: 10.1177/1077546311430105.
- [17] A. Cruz, "Determinación de la posición óptima de sensores para la caracterización del comportamiento dinámico de estructuras mediante el uso de algoritmos genéticos," Universidad del Valle, 2008.
- [18] A. Farshidianfar and S. Soheili, "Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil-structure interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 51, pp. 14–22, 2013, doi: 10.1016/j.soildyn.2013.04.002.
- [19] F. Amini and P. Ghaderi, "Hybridization of harmony search and ant colony optimization for optimal locating of structural dampers," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 13, no. 5, pp. 2272–2280, 2013, doi: 10.1016/j.asoc.2013.02.001.
- [20] M. Abbasi and A. H. D. Markazi, "Optimal assignment of seismic vibration control actuators using genetic algorithm," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 12, no. 1 A, pp. 24–31, 2014.
- [21] T. T. Soong, "Future directions in structural control," *Struct Control Health Monit*, no. August, pp. 1240–1251, 2014, doi: 10.1002/stc.
- [22] S. M. Nigdeli and G. Bekdaş, "Design of Tuned Mass Dampers via Harmony Search for Different Optimization Objectives of Structures," in *Computational Methods in Applied Sciences*, 2015, pp. 249–266. doi: 10.1007/978-3-319-18320-6_14.
- [23] L. F. F. Miguel, L. F. F. Miguel, and R. H. Lopez, "Simultaneous optimization of force and placement of friction dampers under seismic loading," *Engineering Optimization*, vol. 48, no. 4, pp. 582–602, 2016, doi: 10.1080/0305215X.2015.1025774.
- [24] L. F. F. Miguel, L. F. F. Miguel, and R. H. Lopez, "Methodology for the simultaneous optimization of location and parameters of friction dampers in the frequency domain," *Engineering Optimization*, vol. 50, no. 12, pp. 2108–2122, 2018, doi: 10.1080/0305215X.2018.1428318.
- [25] G. Bekdaş, S. M. Nigdeli, and X.-S. Yang, "Metaheuristic Based Optimization for Tuned Mass Dampers Using Frequency Domain Responses," in *Springer Nature Singapore Pte Ltd.*, 2017, pp. 271–279. doi: 10.1007/978-981-10-3728-3_27.
- [26] S. M. Nigdeli and G. Bekdaş, "Tuning and Position Optimization of Mass Dampers for Seismic Structures," in *Springer Nature Singapore Pte Ltd.*, 2017, pp. 232–239. doi: 10.1007/978-981-10-3728-3_23.
- [27] G. Bekdaş and S. M. Nigdeli, "Metaheuristic based optimization of tuned mass dampers under earthquake excitation by considering soil-structure interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 92, no. October 2016, pp. 443–461, 2017, doi: 10.1016/j.soildyn.2016.10.019.

- [28] B. Keshtegar and S. Etedali, "Nonlinear mathematical modeling and optimum design of tuned mass dampers using adaptive dynamic harmony search algorithm," *Struct Control Health Monit*, vol. 25, no. 7, pp. 1–20, 2018, doi: 10.1002/stc.2163.
- [29] G. Bekdaş, S. M. Nigdeli, and X. S. Yang, "A novel bat algorithm based optimum tuning of mass dampers for improving the seismic safety of structures," *Eng Struct*, vol. 159, no. April 2017, pp. 89–98, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.12.037.
- [30] Z. Lu, K. Li, Y. Ouyang, and J. Shan, "Performance-based optimal design of tuned impact damper for seismically excited nonlinear building," *Eng Struct*, vol. 160, no. September 2017, pp. 314–327, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.01.042.
- [31] S. M. Nigdeli and G. Bekdaş, "Optimum design of multiple positioned tuned mass dampers for structures constrained with axial force capacity," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 28, no. 5, p. e1593, Apr. 2019, doi: 10.1002/tal.1593.
- [32] K. S. Park, H. M. Koh, and D. Hahm, "Integrated optimum design of viscoelastically damped structural systems," *Eng Struct*, vol. 26, no. 5, pp. 581–591, 2004, doi: 10.1016/j.engstruct.2003.12.004.
- [33] Dr. G. Villareal Castro and M. Sc. R. Oviedo Sarmiento, "*Edificios con Disipadores de Energia*." 2009.
- [34] M. C. Constantinou, T. T. Soong, and G. F. Dargush, *Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit*. 1998.
- [35] T. Devices Inc., "Fluid Viscous Dampers - General Guidelines for Engineers Including a Brief History," 2019.
- [36] FEMA, "2015 NEHRP Recommended Seismic Provisions : Design Examples," Washington, D.C., 2016.
- [37] I. Ohad and O. Lavan, "Optimization-based seismic design of steel moment-resisting frames with nonlinear viscous dampers," no. July 2020, pp. 1–21, 2021, doi: 10.1002/stc.2655.
- [38] D. De Domenico, G. Ricciardi, and I. Takewaki, "Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures : A review," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 118, no. December 2018, pp. 144–165, 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.12.024.
- [39] A. A. Seleemah and M. C. Constantinou, "Investigation of Seismic Response of Buildings with Linear and Nonlinear Fluid Viscous Dampers," 1997.
- [40] ASCE 7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. 2010. doi: 10.1061/41130(369)203.
- [41] ASCE 7-16, *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. 2017, pp. 1–889. doi: 10.1061/9780784414248.
- [42] A. G. Palomeque Ortiz, "Un Esquema Autoadaptativo para Optimización Evolutiva con restricciones," Laboratorio Nacional de Informática Avanzada A.C., 2007.

- [43] S. Ramírez E, "Metodología basada en Algoritmos Genéticos y Programación en Paralelo para el Diseño Óptimo de Armaduras de Acero," Pontificia Universidad Javeriana, 2014.
- [44] D. Kalyanmoy, *Optimization for Engineering Design*, Primera. New Delhi, 1995.
- [45] D. Fouskakis and D. Draper, "Stochastic Optimization: A Review," *Int Stat Rev*, vol. 70, no. 3, p. 315, 2002, doi: 10.2307/1403861.
- [46] W. Cerrolaza, M.; Annicchiarico, *Algoritmos de optimización estructural basados en simulación genética*. CDCH UCV, 1996.
- [47] C. A. Coello Coello, "Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art," *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 191, no. 11–12, pp. 1245–1287, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0045-7825(01)00323-1.
- [48] M. Gen and R. Cheng, "A survey of penalty techniques in genetic algorithms," in *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE, 1996, pp. 804–809. doi: 10.1109/ICEC.1996.542704.
- [49] Ö. Yeniay, "Penalty Function Methods for Constrained Optimization with Genetic Algorithms," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 10, no. 1, pp. 45–56, Apr. 2005, doi: 10.3390/mca10010045.
- [50] R. Courant, "Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations," *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 49, no. 1, pp. 1–23, 1943, doi: 10.1090/S0002-9904-1943-07818-4.
- [51] C. W. Carroll, "The Created Response Surface Technique for Optimizing Nonlinear, Restrained Systems," *Oper Res*, vol. 9, no. 2, pp. 169–184, Apr. 1961, doi: 10.1287/opre.9.2.169.
- [52] A. V. Fiacco and G. P. McCormick, "Extensions of SUMT for Nonlinear Programming: Equality Constraints and Extrapolation," *Manage Sci*, vol. 12, no. 11, pp. 816–828, Jul. 1966, doi: 10.1287/mnsc.12.11.816.
- [53] A. Homaifar, C. X. Qi, and S. H. Lai, "Constrained optimization via genetic algorithms," *Simulation*, vol. 62, no. 4, pp. 242–254, 1994, doi: 10.1177/003754979406200405.
- [54] A. Kuri, M. Carlos, and V. Quezada, "A universal eclectic genetic algorithm for constrained optimization," in *Proceedings of the 6th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, (TSC' 98)*, 1998, pp. 518–522.
- [55] J. A. Joines and C. R. Houck, "On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GA's," in *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, IEEE, pp. 579–584. doi: 10.1109/ICEC.1994.349995.
- [56] Z. Michalewicz and N. F. Attia, "Evolutionary optimization of constrained problems," in *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming, (CEP' 94)*, 1994, pp. 98–108.
- [57] C. A. C. Coello, "Self-adaptive penalties for GA-based optimization," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, IEEE, 1999, pp. 573–580. doi: 10.1109/CEC.1999.781984.

- [58] D. Powel and M. Skolnick, "Using Genetic Algorithms in Engineering Design Optimization with Non-Linear Constraints," in *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms (CGA' 93)*, 1993, pp. 424–431.
- [59] K. Deb, "An efficient constraint handling method for genetic algorithms," *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 186, no. 2–4, pp. 311–338, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0045-7825(99)00389-8.
- [60] A. Chehouri, R. Younes, J. Perron, and A. Ilinca, "A constraint-handling technique for genetic algorithms using a violation factor," *Journal of Computer Science*, vol. 12, no. 7, pp. 350–362, 2016, doi: 10.3844/jcssp.2016.350.362.
- [61] N. Olhoff, J. Rasmussen, and E. Lund, *A Method of "Exact" Numerical differentiation for error elimination in finite-element-based semi-analytical shape sensitivity analyses**, vol. 21, no. 1. 1993. doi: 10.1080/08905459308905180.
- [62] M. Papadrakakis, Y. Tsompanakis, and N. D. Lagaros, "Structural shape optimization using evolution strategies," *Engineering Optimization*, vol. 31, no. 4, pp. 515–540, 1999, doi: 10.1080/03052159908941385.
- [63] M. Papadrakakis, N. D. Lagaros, and Y. Fragakis, "Parallel computational strategies for structural optimization," *Int J Numer Methods Eng*, vol. 58, no. 9, pp. 1347–1380, 2003, doi: 10.1002/nme.821.
- [64] A. Rahman and A. Hedar A, "Studies on Metaheuristics for Continuous Global Optimization Problems," Kyoto University, 2004.
- [65] N. Pollini, O. Lavan, and O. Amir, "Minimum-cost optimization of nonlinear fluid viscous dampers and their supporting members for seismic retrofitting," *Earthq Eng Struct Dyn*, 2017, doi: 10.1002/eqe.2888.
- [66] J. P. Rollings, "Reinforced concrete seismic design," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 217–250, 1969.
- [67] Park R and Paulay T, *Reinforced Concrete Structures*. New York, N.Y.: John Wiley & Sons, 1975.
- [68] Servicio Geológico Colombiano, "Catálogo de aceleraciones del Servicio Geológico Colombiano," 2022. http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/index_rnac.php (accessed May 24, 2022).