

Optimización topológica de disipadores histeréticos de placas ranuradas con la técnica de
los autómatas celulares híbridos

Angie Paola Mendoza Cuy

Proyecto para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil

Director

Óscar Javier Begambre Carrillo

Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.Sc.

Codirector

Jesús Daniel Villalba Morales

Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.Sc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Tabla de Contenido

Introducción	19
1. Objetivos	23
1.1. Objetivo general	23
1.2. Objetivos específicos	23
2. Alcances	24
2.1. Sobre el modelo de elementos finitos	24
2.2. Sobre el problema de optimización	24
3. Marco teórico	26
3.1. Capacidad de disipación de energía	26
3.1.1. Ecuación de balance de energía	27
3.2. Sistemas de control de respuesta sísmica	28
3.2.1. Sistemas de control activo	28
3.2.2. Disipadores pasivos	29
3.2.2.1. Aisladores de base.	29
3.2.2.2. Disipadores y amortiguadores.	30
3.2.2.2.1. Disipadores metálicos.	32
3.2.2.2.2. Disipador de fricción.	34
3.2.2.2.3. Amortiguador visco elástico.	35

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE DISIPADORES DE PLACAS RANURADAS	3
3.2.2.2.4. Amortiguador de fluido viscoso.	35
3.2.2.2.5. Otros.	35
3.3. Disipadores de energía de placas ranuradas	36
3.4. Optimización estructural	42
3.4.1. Optimización topológica	42
3.4.1.1. Optimización con restricciones	44
3.4.1.1.1. Multiplicadores de Lagrange.	45
3.4.1.1.2. Variables de Holgura o flojas (Slack).	45
3.4.1.1.3. Método del gradiente reducido generalizado.	45
3.4.1.1.4. Condiciones Karush-Kuhn-Tucker / Condiciones KKT.	46
3.4.1.1.5. Método de penalización.	46
3.4.1.2. Optimización multiobjetivo.	46
3.5. Autómatas celulares	48
3.6. Optimización con Autómatas Celulares Híbridos (HCA)	51
3.6.1. Procedimiento básico del algoritmo	51
3.6.2. Aproximación del material en la optimización	52
4. Antecedentes	54
4.1. Generalidades sobre técnicas de diseño y construcción	54
4.1.1. Enfoques de diseño basados en el desempeño	55
4.1.1.1. Métodos basados en fuerza.	55

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE DISIPADORES DE PLACAS RANURADAS	4
4.1.1.2. Métodos basados en desplazamiento.	55
4.1.1.3. Métodos basados en energía.	56
4.1.2. Tipos de edificación según tipo de disipación de la energía de entrada	56
4.2. Dispositivos de control en estructuras	57
4.2.1. Modelación del comportamiento de disipadores histeréticos metálicos	57
4.2.1.1. Programas para análisis estructural a nivel del elemento.	59
4.2.1.2. Programas de análisis estructural a nivel de la estructura.	60
4.2.1.3. Lenguajes y herramientas de programación.	60
4.2.2. Modelos de material	60
4.3. Optimización estructural	63
4.3.1. Optimización de disipadores histeréticos	63
4.3.2. Autómatas celulares aplicados en problemas de optimización topológica	64
5. Metodología	67
5.1. Fase 2: modelo de elementos finitos	69
5.1.1. Modelo de endurecimiento del material	69
5.1.2. Descripción del modelo del disipador	70
5.1.3. Tipo de elemento finito	71
5.1.4. Malla de elementos finitos	72
5.2. Fase 3: formulación del problema de optimización	73
5.2.1. Modelo de material para optimización estructural	73

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE DISIPADORES DE PLACAS RANURADAS	5
5.2.2. Parámetros	75
5.2.3. Variables de diseño	75
5.2.4. Variables de estado	76
5.2.5. Función objetivo	76
5.2.5.1. Problema multiobjetivo.	78
5.2.5.2. Problema con único objetivo y restricción de masa.	80
5.2.6. Regla de evolución local	81
5.2.6.1. Basada en diseño completamente esforzado.	81
5.2.6.2. Estrategias de control.	83
5.2.6.2.1. Control de doble posición.	83
5.2.6.2.2. Control proporcional (P).	83
5.2.6.2.3. Control proporcional integral (PI).	84
5.2.6.2.4. Control proporcional integral derivado (PID).	84
5.2.7. Valor objetivo de las variables de estado y^*	85
5.2.8. Restricciones	86
5.2.9. Variables efectivas	86
5.2.10. Criterio para detención del proceso de optimización	87
5.3. Fase 4: Herramienta de diseño	87
5.3.1. ANSYS APDL	89
5.3.2. MATLAB	92

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE DISIPADORES DE PLACAS RANURADAS	6
5.3.2.1. Descripción funciones creadas.	93
5.3.3. Validación de la herramienta de la herramienta de diseño	95
5.3.3.1. Validación del modelo de elementos finitos.	95
5.3.3.2. Validación del algoritmo de optimización.	98
5.4. Fase V: Aplicación de la herramienta de diseño en un disipador de placas ranuradas	100
5.4.1. Problema multiobjetivo	100
5.4.2. Problema de único objetivo con restricciones	108
5.4.2.1. Regla de evolución.	108
5.4.2.1.1. Regla de Gan.	109
5.4.2.1.2. Regla de Gan complementada con estrategia de Ferrer.	111
5.4.2.1.3. El criterio de paro.	118
5.5. Influencia de la relación Alto/ancho	118
5.5.1. Relación alto/ancho de los orificios	118
5.5.2. Relación alto/ancho disipador	122
5.5.3. Fatiga del disipador	124
6. Resultados	128
6.1. Problema multiobjetivo	128
6.2. Problema único objetivo	139
6.3. Fatiga del disipador	149

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE DISIPADORES DE PLACAS RANURADAS	7
7. Conclusiones	151
Referencias Bibliográficas	156

Listado de Tablas

Tabla 1. Clasificación aisladores de base.	31
Tabla 2. Clasificación disipadores metálicos.	33
Tabla 3. Clasificación disipadores de fricción. Elaboración propia.	34
Tabla 4. Clasificación de otros tipos de disipador pasivo. Elaboración propia.	36
Tabla 5. Disipadores de placas ranuradas.	41
Tabla 6. Herramientas en modelos previos de disipadores de histeréticos metálicos.	62
Tabla 7. Influencia del tamaño de la malla de elementos finitos.	72
Tabla 8. Parámetros del problema de optimización.	75
Tabla 9. Resultados validación FEM para un ciclo de carga.	97
Tabla 10. Resultados validación FEM para veintisiete ciclos de carga.	98
Tabla 11. Porcentaje de participación de la energía de deformación en la regla de evolución del problema multiobjetivo, ranuras rectangulares verticales.	102
Tabla 12. Porcentaje de participación de la energía de deformación en la regla de evolución del problema multiobjetivo, ranuras circulares.	104
Tabla 13. Selección del factor de aproximación problema multiobjetivo.	108
Tabla 14. Simetría del disipador en el proceso de optimización.	114
Tabla 15. Revisión del caso de simetría c)	115
Tabla 16. Chequeo de flotantes disipador ranuras rectangulares verticales.	116
Tabla 17. Chequeo de flotantes disipador una ranura circular.	117
Tabla 18. Chequeo de flotantes disipador 4 ranuras circulares.	118
Tabla 19. Parámetros del estudio (ancho y alto de las ranuras del disipador).	119

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE DISIPADORES DE PLACAS RANURADAS	9
Tabla 20. Disipación de energía dispositivos D50 y Ghabraie.	121
Tabla 21. Resultados optimización multiobjetivo disipador de ranuras verticales.	129
Tabla 22. Resultados previos de optimización disipador ranuras verticales.	130
Tabla 23. Resultados optimización multiobjetivo disipador con una ranura circular centrada radio 25mm.	132
Tabla 24. Resultados optimización multiobjetivo disipador con dos ranuras circulares.	133
Tabla 25. Resultados optimización multiobjetivo disipador con cuatro ranuras circulares.	135
Tabla 27. Resultados optimización multiobjetivo disipador con ranuras horizontales.	137
Tabla 28. Diagramas de convergencia del algoritmo de optimización multiobjetivo.	138
Tabla 29. Comparación cantidad energía disipada por la versión optimizada del disipador de ranuras verticales en el problema de único objetivo con restricción de masa.	139
Tabla 30. Resultados optimización único objetivo disipador con ranuras verticales.	140
Tabla 31. Resultados optimización único objetivo disipador con una ranura circular. Cinco vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.	142
Tabla 32. Resultados optimización único objetivo disipador con dos ranuras circulares. Cinco vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.	142
Tabla 33. Resultados optimización único objetivo disipador con cuatro ranuras circulares. Cinco vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.	143
Tabla 34. Resultados optimización único objetivo disipador una ranura circular. Dos vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.	144
Tabla 35. Resultados optimización único objetivo disipador cuatros ranuras circulares. Dos vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.	147

Tabla 36. Resultados optimización único objetivo disipador ranuras rectangulares

horizontales. Dos vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes. 148

Listado de Figuras

Figura 1. a) Viga Vierendeel b) prototipo de SSD.	37
Figura 2. Autómata Celular Elemental. Regla 30.	48
Figura 3. Procedimiento general de la técnica de los Autómatas Celulares Híbridos.	52
Figura 4. Publicaciones por año autómatas celulares en optimización topológica.	66
Figura 5. Esquema conceptual de la metodología para el desarrollo de la investigación.	69
Figura 6. Modelo de endurecimiento del material – acero.	70
Figura 7. Parametrización de material.	74
Figura 8. Curva esfuerzo-deformación para comportamiento inelástico. Curva esfuerzo-deformación para comportamiento inelástico.	78
Figura 9. Frontera de Pareto compuesta por todas las posibles soluciones del problema de optimización.	80
Figura 10. Curva fuerza-desplazamiento.	81
Figura 11. Diagrama de flujo herramienta de diseño.	95
Figura 12. a) Condiciones de contorno b) Distribución de esfuerzos en ANSYS.	96
Figura 13. Dispositivo SL4.	97
Figura 14. Viga Michell antes de optimización.	98
Figura 15. Viga Michell optimizada a) Tovar 2005 b) Este trabajo.	99
Figura 16. Viga Michell optimizada patrón de unos y ceros.	100
Figura 17. Distribución inicial de energía geometría de 4 ranuras rectangulares verticales a) geometría inicial b) distribución de energía de deformación.	102

Figura 18. Distribución inicial de energía geometría de 4 ranuras circulares a) geometría inicial b) distribución de energía de deformación.	103
Figura 19. Líneas de código en Matlab para cálculo de variable de estado objetivo para el problema multiobjetivo.	105
Figura 20. Cantidad de vecinos para x y y problema multiobjetivo. Caso 1. Cero vecinos para la variable de diseño y cero vecinos para la variable de estado	105
Figura 21. Cantidad de vecinos para x y y problema multiobjetivo. Caso 2. Cero vecinos para la variable de diseño y ocho vecinos para la variable de estado	106
Figura 22. Cantidad de vecinos para x y y problema multiobjetivo. Caso 3. Ocho vecinos para la variable de diseño y cero vecinos para la variable de estado.	106
Figura 23. Cantidad de vecinos para x y y problema multiobjetivo. Caso 3. Ocho vecinos para la variable de diseño y ocho vecinos para la variable de estado.	107
Figura 24. Inestabilidades numéricas por regla de evolución.	110
Figura 25. Efecto algunas técnicas de filtrado en la evolución. Problema único objetivo.	111
Figura 26. Evolución implementando la regla de Gan+Ferrer.	112
Figura 27. Influencia alto/ancho ranuras rectangulares. Dispositivo 50 (D50) de más capacidad de disipación de energía y Dispositivo 101 (D101) de menos capacidad.	120
Figura 28. Ejes de simetría del disipador.	121
Figura 29. Relación alto/ancho disipador D50.	122
Figura 30. Relación alto/ancho disipador D01.	123
Figura 31. Factor de amplificación de carga no constante para análisis de fatiga.	125
Figura 32. Ciclos de vida análisis con amplificación de carga tipo "History Data".	126
Figura 33. Factor de amplificación de carga "Zero-based".	126

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE DISIPADORES DE PLACAS RANURADAS	13
Figura 34. Ciclos de vida análisis con amplificación de carga "Zero-based".	127
Figura 35. Ciclo de histéresis disipador ranuras verticales. Problema multiobjetivo.	131
Figura 36. Resultado optimización único objetivo disipador de ranuras verticales.	141
Figura 37. Resultado optimización único objetivo disipador ranura circular céntrica.	144
Figura 38. Resultado optimización único objetivo disipador cuatro ranuras circulares.	146
Figura 39. Resultado optimización único objetivo disipador ranuras horizontales.	146
Figura 40. Cantidad de ciclos de carga disipador ranuras verticales inicial.	149
Figura 41. Cantidad de ciclos de carga disipador ranuras verticales optimizado con metodología multiobjetivo.	150

Lista de Apéndices

Apéndice 1. Funciones de Matlab	168
Apéndice 2. Algoritmo de Optimización Multiobjetivo	182
Apéndice 3. Algoritmo de Optimización con Restricciones	187

Dedicatoria

*A mi familia, especialmente mis padres
Inés y Ramiro,
por su incondicionalidad.*

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander (UIS) por las experiencias académicas, profesionales y personales que he vivido en su campus desde pregrado.

A la Coral Universitaria UIS.

A mis directores los profesores Óscar Begambre y Jesús Villalba que me enseñaron el camino de la investigación.

A los profesores del grupo INME por su colaboración y enseñanzas durante las clases.

A la Escuela de Ingeniería Civil por promover la excelencia académica y por los apoyos económicos para participación en eventos académicos y capacitaciones.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Financiera Comultrasan por sus respectivos apoyos financieros para el pago de mis semestres.

Resumen

Título: Optimización topológica de disipadores histeréticos de placas ranuradas con la técnica de los autómatas celulares híbridos*

Autor: Angie Paola Mendoza Cuy**

Palabras clave: Optimización topológica

Descripción:

Los disipadores histeréticos metálicos de placas ranuradas son una opción confiable usada como técnica de control de respuesta sísmica; se ha comprobado que disminuyen las derivas y ayudan a mitigar daños a elementos estructurales de las edificaciones, además son dispositivos de bajo costo de fabricación y de fácil mantenimiento. Sin embargo, la cantidad de energía que puede disipar un dispositivo de este tipo está relacionada directamente con la forma, tamaño, cantidad y distribución de ranuras y con el espesor y dimensiones que la placa puede tomar, lo que dificulta el análisis efectivo y selección de opciones óptimas. Este trabajo de investigación desarrolla un procedimiento para su análisis y optimización, el cual consiste en aplicar la técnica de los autómatas celulares híbridos para la optimización topológica de disipadores histeréticos metálicos de placas ranuradas trabajando a cortante. Las fases del proyecto fueron (i) revisión de literatura para extraer información de interés para el modelo de elementos finitos y formulación del problema de optimización y revisión de manuales de uso de los programas de computadora (ii) elaboración y validación del modelo de elementos finitos en ANSYS APDL (iii) formulación del problema de optimización y adaptación del algoritmo al problema de optimizar disipadores de placas ranuradas y escritura de códigos en MATLAB (iv) establecimiento del procedimiento de enlace entre ANSYS APDL y MATLAB y obtención de los dispositivos optimizados v) análisis de resultados.

Los resultados indican que la formulación de los autómatas celulares aplicada en problemas de optimización actúa como técnica de filtrado permitiendo obtener versiones optimizadas de la geometría inicial del disipador con mejoras de disipación de energía de hasta 371%. Esta técnica emplea una cantidad relativamente baja de iteraciones. Exploraciones adicionales muestran limitaciones del algoritmo relacionadas con la distribución de esfuerzos y energía de deformación de la configuración inicial.

* Trabajo de grado de Maestría en Ingeniería Civil

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Óscar Javier Begambre Carrillo, Ph. Sc. Codirector: Jesús Daniel Villalba Morales, Ph. Sc.

Abstract

Title: Topological optimization of steel slit dampers with the technique of hybrid cellular automata*

Author: Angie Paola Mendoza Cuy**

Keywords: Topology optimization

Description:

Steel slit hysteretic dampers are a reliable option used as a seismic response control technique. It has been proven that they reduce drifts and help mitigate damage to structural elements of buildings, they are also low-cost manufacturing devices and easy to maintain. However, the amount of energy that a device of this type can dissipate is directly related to the shape, size, number and distribution of slots and the thickness and dimensions that the plate can take, which makes it difficult to effectively analyze and select optimal options. This research work develops a procedure for its analysis and optimization, which consists of applying the technique of Hybrid Cellular Automata (HCA) for the topological optimization of hysteretic steel slit damper working in shear. The phases of the project were (i) literature review to extract information of interest for the finite element model and formulation of the optimization problem and review of manuals for the use of software (ii) elaboration and validation of the finite element model in ANSYS APDL (iii) formulation of the optimization problem and adaptation of the algorithm to the problem of optimizing hysteretic steel slit dampers and writing of codes in MATLAB (iv) establishment of the link procedure between ANSYS APDL and MATLAB and obtaining the optimized devices v) analysis of results.

The results indicate that the formulation of the cellular automata applied in optimization problems acts as a filtering technique and allows the obtention of optimized versions of the initial geometry in a relatively low number of iterations. Additional explorations show limitations of the algorithm related to the stress and strain energy distribution of the initial configuration.

* Master's degree thesis in Civil Engineering

** Faculty of Physical Mechanical Engineering, School of Civil Engineering. Advisor: Óscar Javier Begambre Carrillo, Ph.Sc. Coadvisor: Jesús Daniel Villalba Morales, Ph.Sc

Introducción

Motivación

Los requerimientos de diseño para edificaciones en Colombia se establecen en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (AIS, 2010). En el Título A, Capítulo A.1.2.2 se describe su Objeto que en primer lugar busca "reducir a un mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas, y defender en lo posible el patrimonio del Estado y de los ciudadanos" y que las estructuras diseñadas siguiendo el reglamento resistan "además de las fuerzas que le impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daños estructurales, pero posibles daños en elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales pero sin colapso.

Siguiendo esta filosofía de diseño tradicional solo se considera un nivel de movimiento del terreno para el cual la estructura no debería colapsar, pero es importante reconocer que la seguridad ante el colapso debido a grandes sismos no implica que la estructura se comporte adecuadamente ante sismos de pequeña o moderada intensidad, como se ha observado en eventos a nivel nacional e internacional donde las edificaciones que no colapsaron requerían reparaciones financieramente inviables (Oviedo y Duque, 2009). Otro de los puntos que contempla el objeto de la norma es que las edificaciones indispensables, Grupo IV Capítulo A.2.5.1.1, y de atención a la comunidad, Grupo III Capítulo A.2.5.1.2, no deben sufrir daños severos para que puedan seguir operando y ser ocupadas inmediatamente después de ocurrido el sismo de diseño. Siguiendo las metodologías de diseño tradicional que se basan en resistencia ante fuerzas o desplazamientos, se obtendrá un diseño de estructura con dimensiones robustas que cumplirá con las exigencias de la normativa pero un

incremento en la rigidez global de la estructura puede no garantizar la seguridad, es decir, no necesariamente reduce el daño porque en estudios más recientes que se discutirán más adelante en este documento, se ha evidenciado que los diseños basados solo en fuerza o solo en desplazamiento pueden ser mejorados al usar metodologías de diseño basadas en energía y que la energía que ingresa a la estructura impuesta por un sismo depende no solo de la rigidez inicial sino de la masa, el periodo fundamental, la ductilidad, el coeficiente de amortiguamiento y la rigidez post fluencia. Adicionalmente, en el diseño tradicional el resultado estará influenciado por la experiencia del diseñador, es decir, dos proyectistas diferentes llegarán a dos soluciones diferentes perfectamente factibles desde el punto de vista de la resistencia estructural y del cumplimiento de normas, pero estas estructuras seguramente tendrán costos y pesos diferentes.

Los problemas detectados en el comportamiento de las estructuras diseñadas tradicionalmente han impulsado la creación de nuevos procedimientos de diseño basados en el desempeño con la filosofía de que los edificios resistan sismos de diferente gravedad dentro de niveles de daño especificados, metodologías de diseño basadas en energía y el uso de dispositivos de control de respuesta sísmica que ayudan a la disipación de energía en zonas específicas de la estructura, lo cual permite disminuir la demanda de ductilidad en la estructura principal al reducir los valores de respuesta dinámica. Los dispositivos de control de respuesta sísmica consisten en dispositivos disipadores, aisladores o amortiguadores que se valen de diferentes mecanismos para convertir la energía que ingresa a la estructura en energía que no implique daño a los elementos del sistema de resistencia principal. Se han desarrollado un gran número de dispositivos de control, pero se pueden clasificar en dos

grandes grupos de acuerdo con su mecanismo de funcionamiento: dispositivos de disipación pasiva y dispositivos de disipación activa.

Oviedo y Duque (2009) presentan una comparación cualitativa de sistemas de disipación de energía pasivos y activos que podrían aplicarse en Colombia, siendo que los autores recomiendan el uso de disipadores hysteréticos metálicos por su bajo costo, métodos de análisis más sencillos y el estado de la industria nacional. Diferentes investigaciones (De la Llera et al., 2004; Chan et al., 2009; Oh et al., 2009; Teruna et al., 2015) han comprobado que los disipadores hysteréticos metálicos tienen comportamiento estable ante carga cíclica y ensayos de mesa vibratoria, reducen derivas en pórticos y disipan efectivamente la energía. Los disipadores hysteréticos metálicos de placas ranuradas destacan dentro del grupo anterior debido a su fácil fabricación comparado con otro tipo de dispositivos. Sin embargo, la cantidad de energía que pueden disipar se ve bastante influenciada por su geometría y distribución de material y aún no se conoce su forma óptima (Ferrer & Villalba, 2017; Kafi, 2019); esta influencia ha sido estudiada en varios trabajos de investigación en las últimas décadas y se ha logrado comprobar que la variación en la cantidad de energía, distribución de esfuerzos y capacidad de deformación pueden ser controladas con técnicas de optimización de forma.

En este trabajo se propone explorar la solución de este problema visto como un problema de optimización topológica que se resolverá con una técnica basada en autómatas celulares híbridos. La teoría sobre optimización con autómatas celulares parte del proceso natural de renovación celular de los huesos del cuerpo humano. Los huesos proporcionan soporte al cuerpo, actúan como palancas para que los músculos transfieran fuerzas y protegen los órganos vitales, para lograrlo adaptan su forma y estructura para hacer uso eficiente de su

masa y, bajo esta consideración, fue desarrollada la técnica de los Autómatas Celulares Híbridos para simular el proceso de adaptación funcional de la estructura trabecular ósea y, se ha comprobado que con algunos ajustes es una herramienta efectiva para resolver problemas de optimización estructural.

Este trabajo implica por primera vez la aplicación de la teoría de autómatas celulares para resolver un problema de optimización relacionado con ingeniería estructural, una comparación con trabajos previos reportados en la literatura en los que se emplearon otros algoritmos y una breve exploración para conocer las limitaciones del algoritmo empleado para la optimización de disipadores de energía.

Pregunta de Investigación

La optimización estructural nació de la necesidad de plantear técnicas rigurosas que busquen mejores soluciones a los problemas estructurales, esta disciplina pretende, por tanto, buscar la mejor solución estructural que cumpla la función para la que ha sido diseñada de acuerdo con las necesidades predefinidas. En ese sentido, se plantea la pregunta de esta investigación: ¿Es posible obtener la topología de disipadores de placas ranuradas que optimice su capacidad de disipación de energía por medio de una metodología de optimización topológica basada en autómatas celulares híbridos?

Hipótesis de investigación

La cantidad de energía disipada por un disipador histerético de placas ranuradas tipo cortante depende de su forma geométrica y la de sus ranuras y es posible obtener la configuración geométrica que lleva a disipar la mayor cantidad de energía con técnicas de optimización topológica basadas en autómatas celulares híbridos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Optimizar la topología de un disipador histerético tipo cortante de placas ranuradas con una metodología basada en la técnica de los autómatas celulares híbridos que maximice su capacidad de disipación de energía.

1.2. Objetivos específicos

- Definir el procedimiento de modelación de un disipador histerético de placas ranuradas bajo carga cíclica en un software basado en elementos finitos.
- Formular el problema de optimización de un disipador metálico tipo cortante de placas ranuradas.
- Adaptar el algoritmo de optimización de los Autómatas celulares híbridos al problema de optimización de un disipador histerético de placas ranuradas.
- Evaluar el desempeño de la metodología determinando la robustez del algoritmo, efectividad, confiabilidad y costo computacional de los resultados de la optimización.
- Determinar la influencia de la relación ancho/alto en la forma y capacidad de disipación de energía del dispositivo optimizado.

2. Alcances

A continuación, se presentan algunas consideraciones para el desarrollo del trabajo debido a su carácter numérico y el foco en la aplicación de los autómatas celulares:

2.1. Sobre el modelo de elementos finitos

Se definió un modelo de elementos finitos bidimensional para el cálculo de cantidad de energía disipada por un disipador histerético metálico de placas ranuradas en el software ANSYS APDL y WORKBENCH (Ansys Inc, 2020). El modelo permite caracterizar el comportamiento histerético del disipador cuando es sometido a carga cíclica. El protocolo de carga cíclica de tres pasos se tomó de Ghabraie et al. (2010) y el protocolo de carga para comparar contra un experimento, se tomó de Ghabraie et al. (2010) y Chan & Albermani (2008). El modelo de endurecimiento para el material se escogió de la revisión de literatura y se presenta en el capítulo 4.2.1.

Las características para la simulación con elementos finitos (el tipo de elemento finito, el tamaño de los elementos en la malla y las características geométricas del disipador) se escogieron por medio de pruebas y se calibraron con resultados obtenidos en trabajos numéricos y experimentales previos.

2.2. Sobre el problema de optimización

Para el problema de optimización topológica, se estudiaron los requerimientos del algoritmo de optimización: modelo de material en la optimización para poder establecer y actualizar la variable de diseño, estímulo mecánico con información representativa sobre el

comportamiento del disipador para usarlo como variable de estado, la regla de evolución de los autómatas, el tipo de vecindario para el problema y las características del diseño inicial con ranuras circulares. Se empleó el algoritmo de los Autómatas celulares híbridos, la regla de evolución se controló con MATLAB (MathWorks, 2021) y para el análisis por elementos finitos y determinación de las variables de estado se utilizó ANSYS (Ansys Inc, 2020). Se obtuvo un procedimiento para el diseño de dispositivos cuya distribución de material permite homogenizar la energía de deformación dentro del dominio de diseño y maximizar el valor energía de deformación total.

3. Marco teórico

3.1. Capacidad de disipación de energía

En los últimos años se ha abordado de diversas maneras el problema de mitigar los efectos de terremotos en estructuras civiles, desde el nivel de planeación y diseño de la estructura, hasta la rehabilitación de estructuras existentes. Para hablar de diseño estructural sísmo resistente y de mitigación del efecto de los terremotos sobre las estructuras, es importante conocer la definición y naturaleza de un terremoto. Una definición básica de terremoto sería “Un terremoto es el movimiento brusco de la Tierra, causado por la brusca liberación de energía acumulada durante un largo tiempo” (Sernageomin, 2003), es decir, un terremoto es energía, por lo que resulta sensato pensar que una estructura sísmo-resistente sería aquella capaz de absorber y disipar la energía que recibe durante un sismo.

Las metodologías tradicionales de análisis y diseño de estructuras están basadas en análisis de fuerza o desplazamiento que se consideran consecuencia o efecto del sismo, lo que no es del todo cierto pues se ha evidenciado que la respuesta estructural no depende solo de los valores máximos de carga sino del historial de carga almacenada en el tiempo de duración del sismo. En cuando al concepto de energía, la idea de usar el balance de energía en el diseño de estructuras fue planteada en 1956 por Hudson que usaba el espectro de pseudo-velocidad o pseudo-aceleración para determinar la energía de entrada que causarían la falla de la estructura (Hudson, 1956) y se consideraba a la masa y periodo natural de la estructura como los únicos parámetros que afectaban el valor de la energía de entrada. Sin embargo, estudios posteriores han demostrado que además de la masa y el periodo natural,

otros factores como la ductilidad, el coeficiente de amortiguamiento y la rigidez post fluencia afectan significativamente la energía de entrada (Jaisee et al., 2021).

3.1.1. Ecuación de balance de energía

La energía de entrada a la estructura se puede calcular integrando la ecuación dinámica de movimiento de la estructura desde el inicio ($t=0$) hasta el final del terremoto ($t=t_f$), que se puede representar con la Ecuación 1 que también se conoce como ecuación de balance de energía de una estructura sometida a excitaciones dinámicas y se ha encontrado que es apropiado desarrollar la ecuación dinámica de movimiento basada en movimiento relativo (Gholami et al., 2022).

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde M es la masa del sistema, C es el coeficiente de amortiguamiento, K es la fuerza de restauración y x es el desplazamiento relativo de masa.

Si se integra la ecuación 1 en términos del desplazamiento relativo x,

$$\int_0^x M\ddot{x}dx + \int_0^x C\dot{x}dx + \int_0^x Kxdx = - \int_0^x M\ddot{x}_g dx \quad \text{Ecuación 2}$$

Y considerando que $x = \dot{x}dt$, se reemplaza:

$$\underbrace{\int_0^t M\ddot{x}\dot{x}dt}_{E_K} + \underbrace{\int_0^t C\dot{x}\dot{x}dt}_{E_D} + \underbrace{\int_0^t Kx\dot{x}dt}_{E_S} = - \underbrace{\int_0^t M\ddot{x}_g\dot{x}dt}_{E_I} \quad \text{Ecuación 3}$$

De aquí se obtiene la ecuación de balance de energía:

$$E_I = E_S + E_K + E_D \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde, para cierto tiempo t , E_S que es la energía de deformación del sistema almacenada por la estructura se puede separar en dos componentes E_{SS} que sería la componente por deformaciones elásticas y E_H la energía histerética acumulada por deformaciones plásticas; E_I es la energía de entrada impuesta por cargas dinámicas; E_K es la energía cinética instantánea del movimiento de masas y E_D es la energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura (Gholami et al., 2022).

En trabajos previos como el de Gholami et al. (2022) y Pimiento et al. (2014), se describe que al final del terremoto, la energía cinética y la energía de deformación elástica son cero y la energía histerética es igual a la energía demandada, es decir, la energía de entrada es casi igual al valor de la energía histerética. Para reducir el daño en la estructura principal, se han implementado técnicas de diseño sismorresistente basado en energía que buscan incrementar la capacidad de energía histerética de la estructura (Ej.: el código de diseño japonés, pionero en incluir recomendaciones sobre esta metodología) o utilizar alternativas que permitan disminuir la demanda de energía sobre el sistema estructural principal como lo son los dispositivos conocidos como dispositivos de control sísmico, disipadores o amortiguadores de energía.

3.2. Sistemas de control de respuesta sísmica

De manera general, estos sistemas pueden ser agrupados en dos grupos según la forma como el sistema disipa la energía: sistemas de control pasivo o sistemas de control activo.

3.2.1. Sistemas de control activo

Los sistemas de control activo incluyen los activos y semiactivos; son dispositivos integrados por 1) sensores localizados en la estructura para medir excitaciones externas o respuesta estructural o ambas 2) dispositivos para procesar la información medida y computar

las fuerzas de control necesarias basadas en un algoritmo de control dado 3) actuadores, usualmente potenciados por algún elemento externo, para producir las fuerzas requeridas (Soong & Spencer, 2002). Al añadirse uno de estos dispositivos a la estructura, la ecuación de movimiento queda:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -Mu(t) - M\ddot{x}_g \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde M es la masa del sistema, C es el coeficiente de amortiguamiento, K es la fuerza de restauración y x es el desplazamiento relativo de masa, u(t) es la fuerza controlada aplicada.

Un punto a favor es que ya han sido implementados en estructuras, validando procedimientos analíticos y simulaciones usados para predecir su desempeño (Soong & Spencer, 2002).. Debido a su costo, la mayoría de las aplicaciones han sido en proyectos de gran escala en países como Japón y para su diseño es necesario considerar que estos sistemas requieren la integración de diversas disciplinas, algunas de las cuales no están en el dominio de la ingeniería civil tradicional: ciencia computacional, procesamiento de datos, teoría de control, ciencias de los materiales, dinámica estructural, ingeniería estructural y de viento, entre otras.

3.2.2. *Disipadores pasivos*

Los sistemas pasivos son los más utilizados en la actualidad; dentro de esta categoría se encuentran los sistemas de aislamiento sísmico en la base y los disipadores de energía.

3.2.2.1. **Aisladores de base.**

Basan su funcionamiento en el principio de introducir una capa flexible en dirección horizontal y muy rígida en dirección vertical. Debido a la flexibilidad horizontal, los dispositivos de aislamiento sísmico introducen un nuevo modo de vibración que no contiene

desviaciones significativas entre pisos de la estructura principal, por lo que se alarga el período fundamental (Oviedo & Duque, 2006; Saaed et al., 2015).

Los dispositivos de aislamiento sísmico se pueden implementar en diferentes ubicaciones dentro de las estructuras, son adecuados para edificios de altura corta a media, con modos de vibración dominantes dentro de un rango específico, son eficientes contra las vibraciones transmitidas a través del suelo, como el tráfico y las vibraciones sísmicas. No se recomiendan para estructuras bajo excitaciones sísmicas que tienen componentes de períodos largos ni para resistir la carga del viento debido a la flexibilidad en la dirección horizontal (Saaed et al., 2015).

En la **Tabla 1** se presenta una clasificación de los sistemas de aislamiento sísmicos estudiados durante los últimos años de manera numérica y/o experimental.

3.2.2.2. Disipadores y amortiguadores.

Estos sistemas incluyen un rango de materiales y dispositivos para mejorar el amortiguamiento, rigidez y resistencia; son usados para el diseño de estructuras nuevas o rehabilitación de estructuras existentes y operan sobre principios como fricción de deslizamiento, fluencia de metales, transformación de fase en metales, deformación de sólidos o fluidos visco elásticos y fluidos saliendo por orificios. Cuando uno de estos dispositivos es añadido a la estructura, la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad SDOF se transforma en:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + \Gamma x = -(M + \bar{M})\ddot{x}_g \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde M es la masa del sistema, C es el coeficiente de amortiguamiento, K es la fuerza de restauración, x es el desplazamiento relativo de masa, \bar{M} es la masa del dispositivo,

Γx es la fuerza correspondiente al dispositivo y Γ es un operador integro diferencial genérico.

El termino Γx es muy dependiente del tipo de dispositivo usado y se debe especificar antes de analizar la ecuación.

Tabla 1.

Clasificación aisladores de base.

Sistemas de Control	Categoría	Tipo	Dispositivos
Control pasivo	Aislamiento Sísmico	Elastómerico	Low Damping Rubber Bearing (LDRB) High Damping Rubber Bearing (HDRB) Lead Rubber Bearings (LRB) Fiber Reinforced Elastomeric Bearings (FREB)
		Basados en deslizamiento	Pure Friction System (P-F System) Teflon Bearings Friction Pendulum System (FPS) Single Friction Pendulum System (SFPS) Double Concave Friction Pendulum (DCFP) Triple Friction Pendulum System (TFPS)
		Basados en balanceo	Variable Frequency Pendulum Isolator (VFPI) Convex Friction System (CFS) Rolling rod Elliptical rolling rods Ball bearing isolator with restoring capability Nonlinear rolling isolation system
		Otros	Core-suspended isolation system Telescopic columns Roll-n-cage isolation bearing (RNC) Spring tube braces

Nota: Elaboración propia.

La mayoría de los dispositivos de disipación pasiva pueden ser incluidos en dos categorías: dependientes de la velocidad (rate-dependent) o independientes de la velocidad (rate-independent). En los dispositivos dependientes de la velocidad la fuerza de salida depende de la tasa de cambio de desplazamiento a través del amortiguador, por ejemplo, los de fluido viscoso o sólido viscoelástico y en los dispositivos independientes la fuerza de salida no depende de la tasa de desplazamiento a través del amortiguador sino de la magnitud del desplazamiento y la dirección del movimiento, por ejemplo, disipadores metálicos y disipadores de fricción.

3.2.2.2.1. Disipadores metálicos.

Disipan energía por deformaciones inelásticas de metales que pueden ser acero, cobre, aluminio, aleaciones con memoria de forma, etc. Muchos de estos dispositivos usan placas con forma triangular o de X, así el esfuerzo se distribuye uniformemente en el material. Su desempeño ha ganado confianza debido a numerosas investigaciones analíticas y experimentales para determinar las características individuales de cada dispositivo. Tienen un comportamiento histerético estable, insensibilidad a la temperatura ambiente, propiedad de fatiga de bajo ciclo y fiabilidad a largo plazo (Javanmardi et al., 2019). Reducen los desplazamientos aportando rigidez. A lo largo de los últimos años se han desarrollado varios disipadores basados en fluencia de metales como el aluminio, el plomo, el cobre y mayormente el acero; dichos dispositivos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.*Clasificación disipadores metálicos.*

Sistemas de Control	Tipo	Material	Dispositivos
Control pasivo	Metálicos	Aluminio	Aluminium Shear Yielding Damper
		Plomo	Constricted-tube Extrusion Energy Absorber
			Clapboard-type Lead Damper
			Ringed-type Lead Damper
			Bulged-shaft Extrusion Energy Absorber
		Cobre	Plate Copper Damper
			Round Hourglass Copper Dampers
		Acero	U- strip damper
			Torsional beam damper
			Flexural beam damper
			Single axis damper
			Buckling-restrained brace (BRB)
			Tapered cantiléver
			Added damping and stiffness (ADAS)
			Triangular-plate (TADAS)
			Taper tube damper
			Shear panel damper (SPD)
			Rhombic ADAS
			Stiffened shear panel damper (SSPD)
			Dual function damper: single round-hole
Dual function damper: X-shaped			
Dual function damper: double X-shaped			
Yielding shear panel device (YSPD)			
Steel Slit Damper (SSD)			
Pre-bent steel strips			
Angle buckling-restrained brace (ABRB)			
H-type steel unbuckling brace (SUB)			
Comb-teeth damper			
Two-stage energy dissipation device			
Parabolic Steel Plate Damper			
Curved Steel Dampers			
hear And Flexural Yeilding Damper (SAFYD)			
Buckling Restrained Shear Panel (BRSP)			
J Damper			
Crawler Damper			
Cushion Damper			
Tube In Tube Damper (TITD)			
Pipe Damper (PD)			
Accordion Metallic Damper (AMD)			

Nota: Elaboración propia.

3.2.2.2.2. *Disipador de fricción.*

Los disipadores de fricción disipan energía vía deslizamiento friccionado entre dos cuerpos sólidos. La forma rectangular del bucle de histéresis producido por estos dispositivos indica que las deformaciones del sistema estructural son fuertemente restringidas hasta que la fuerza de fricción es superada, o sea, aportan rigidez inicial. Requieren un mecanismo de restauración de fuerza para prevenir desplazamientos permanentes, por este motivo se han perfeccionado los dispositivos propuestos inicialmente y se han desarrollado varias alternativas. En la tabla 3 se presenta una clasificación de estos dispositivos.

Tabla 3.

Clasificación disipadores de fricción. Elaboración propia.

Sistemas de Control	Tipo	Dispositivos
Control pasivo	De fricción	Pall Friction Damper (PFD) Improved Pall-Type Damper (IPFD) Slotted Bolted Connection (SBC): Symmetric (SFC) or Asymmetric (AFC) Sumitomo Friction Damper (SFD) Energy Dissipating Restraint (EDR) Rotational Friction Damper (RFD) Cylindrical Friction Damper (CFD) Multiple Friction Damper (MFD) Passive Electromagnetic Eddy Current Friction Damper (PEMECFD) Friction Wall Damper (FWD) Steel Tubular Friction Damper (STFD) Self-Centering Frictional Damper (SCFD) Pre-pressed Spring Self-Centering Energy Dissipation (PS-SCED) Arc Shaped Friction Damper Thermally Sprayed Aluminum Friction Damper

Nota: Elaboración propia.

3.2.2.2.3. Amortiguador visco elástico.

Consiste en un sólido elastómero unido a unas placas de acero. Una de las placas se desplaza respecto a la otra ocasionando que el material visco elástico sufra deformaciones cortantes y se disipe calor al ambiente. Este tipo de dispositivo exhibe tanto elasticidad como viscosidad, por lo que es dependiente del desplazamiento y de la velocidad. Para su implementación es necesario considerar dependencias de temperatura en el diseño, tanto a la temperatura ambiente como el incremento de temperatura debido a los ciclos de carga y descarga, pues puede reducir la rigidez y capacidad de disipación de energía.

3.2.2.2.4. Amortiguador de fluido viscoso.

Consiste en un cilindro hueco lleno con un fluido junto con un pistón cuya cabeza tiene algunos orificios, a medida que el pistón y la cabeza se mueven, el fluido es forzado a pasar a través de la cabeza del pistón produciendo grandes fuerzas que resisten el movimiento relativo del amortiguador; como el fluido puede alcanzar altas velocidades de flujo, se produce cierta fuerza fricción entre las partículas de fluido y la cabeza del pistón y se disipa energía en forma de calor, este calor puede inducir daño en el amortiguador. Gran parte de sus aplicaciones han sido en el campo militar y de la mecánica han sido exitosas, debido a esto su implementación fue rápida en estructuras. Dependen de la velocidad y aportan amortiguamiento.

3.2.2.2.5. Otros.

Otros dispositivos dentro de esta categoría son los amortiguadores de masa sintonizada, tiene la desventaja de que solo pueden ser sintonizados a una frecuencia de vibración y los amortiguadores de líquido sintonizado que resultan más fáciles de sintonizar que los TMD. Estos dispositivos son mayormente usados para control de cargas de viento y su respuesta es

altamente no lineal. También se incluyen en esta categoría los dispositivos desarrollados como híbridos combinando dos tipos de disipador pasivo, por ejemplo, disipadores metálicos con disipadores de fricción. En la tabla 4 se presenta una breve clasificación de los dispositivos mencionados.

Tabla 4.

Clasificación de otros tipos de disipador pasivo. Elaboración propia.

Sistemas de Control	Tipo	Dispositivos
Control pasivo	Viscoelásticos	Fluido Sólido
	Transformación de fase	Shape Memory Alloy
	Híbridos (combinación de dos sistemas pasivos)	Friction damper and strip damper. Steel slit plate and friction pads Multiaction hybrid damper (MHD). CARL.
	Efecto de masa adicional	Masa sintonizada Líquido sintonizado

Nota: Elaboración propia.

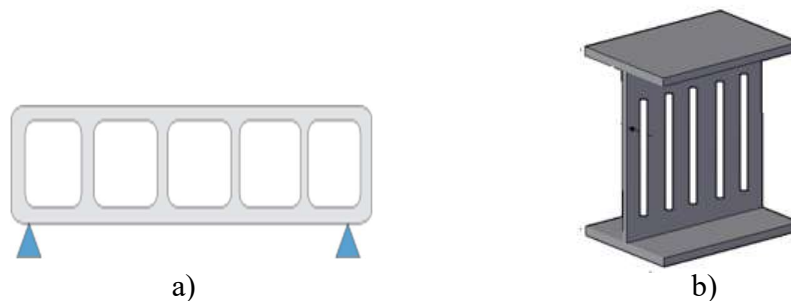
3.3. Disipadores de energía de placas ranuradas

Chan et al. (2008) propusieron un disipador basado en la fluencia de metales conformado por una pieza de acero con orificios en forma de rectángulos ubicados verticalmente. El diseño original se construye a partir de una sección de viga de acero estructural tipo IPE, H o similar y está inspirado en una viga Vierendeel. El dispositivo recibió el nombre de disipados de acero ranurado (Steel Slit Damper – SSD). En su trabajo, Chan et al. Estudiaron experimentalmente tres configuraciones de ranura vertical variando la altura de las ranuras. Encontraron que, al modificar este parámetro de altura, la energía que se disipaba era diferente para cada dispositivo, al igual que las fuerzas máximas desarrolladas y los ciclos de histéresis.

Este tipo de disipador es apto para usarse conectado a través de riostras metálicas o en conexiones viga-columna de estructuras de porticos metálicos. Se deben empotrar al portico de tal manera que disipen energía debido a los desplazamientos relativos entre pisos y garantizar que alcancen el esfuerzo de fluencia debido a cargas de corte, de flexión o axiales.

Figura 1.

a) Viga Vierendeel b) prototipo de SSD.



Como se evidenció en el trabajo de Chan et al. (2008), la geometría de los orificios es un factor influyente en la capacidad del disipador, por lo que Ghabraie et al. (2010) estudiaron numérica y experimentalmente el comportamiento de un disipador inspirado en el SSD pero que se diseñó utilizando una técnica de optimización de forma. Se utilizó el algoritmo del Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) para optimizar la forma de los orificios y se obtuvo un incremento en la capacidad de absorción de energía en un ciclo de carga del 196% y se estableció que el diseño óptimo de estos dispositivos se podía controlar con técnicas de optimización de forma. Años más tarde, Hedayat (2015) estudió la influencia de dos parámetros en la capacidad de disipación de energía, uno de ellos fue la cantidad de filas de ranuras y otro la relación alto/ancho de las ranuras. Adicionalmente, en su trabajo se aportó información sobre el comportamiento del disipador para construir modelos numéricos más apropiados y un procedimiento de 4 pasos para el diseño de

disipadores con orificios verticales. Jie, Aiqun y Tong (2015) estudiaron numérica y experimentalmente cuatro dispositivos con diferentes formas de ranuras verticales, unas más altas que otras y ubicadas en una o dos filas, para revisar su influencia en la capacidad de disipación de energía y resistencia al pandeo. En el modelo numérico encontraron que los dispositivos con dos filas de orificios y con orificios más largos en el centro permitían mejor distribución de esfuerzos y experimentalmente fueron más estables. Por lo que se planteó que los dispositivos con distribución de esfuerzos más uniforme podían ser más estables ante el pandeo. Lee et al. (2015) investigaron el comportamiento de dispositivos con orificios verticales similares a rombos, más anchos en el centro y más delgados en los extremos; variando las dimensiones de la sección transversal de los orificios y encontró que justamente esta forma de ranura ofrece un mejor desempeño sísmico. Además, investigaron sobre el comportamiento de un pórtico de 4 pisos integrando estos disipadores. Teruna, Majid y Budiono (2015) estudiaron un disipador con una única ranura en forma de rombo con las esquinas redondeadas, encontrando que esta forma de ranura convexa evita la fatiga de bajo ciclo y que el comportamiento de los disipadores con este tipo de ranura es estable bajo la acción de cargas sísmicas. Otra conclusión importante de este trabajo es que más del 80% de energía plástica que absorbe el disipador sometido a carga cíclica es por el efecto Baushinger, lo que da una pauta importante para la selección del modelo de material en estudios numéricos.

Posteriormente, Peeri, Faella y Martinelli (2016) estudiaron experimentalmente el comportamiento de los SSD con ranuras verticales como las originales, que fabricaron a partir de un perfil HEA 360 para aportar más información experimental sobre estos dispositivos. Tagawa et al. (2016) también estudiaron experimentalmente el comportamiento

del SSD instalado con riostras en un pórtico bidimensional para concluir que tiene comportamiento histerético estable. Ferrer y Villaba (2017) presentaron en un congreso sus estudios sobre estos dispositivos probando geometrías de ranuras completamente diferentes (triángulos, cuadrados y círculos) y encontraron que la forma de las ranuras es otro parámetro importante y no solo su distribución. Aunque no se presenta información sobre el modelo numérico, concluyen que otras geometrías de ranuras permiten que el dispositivo desarrolle más capacidad de disipación, manteniendo la misma cantidad de material. Además, su instalación en pórticos mejora el comportamiento sísmico de dicho pórtico. Continuando con la idea anterior, Mendoza et al. (2018) realizaron una investigación numérica sobre dispositivos SSD con ranuras verticales, diagonales y circulares encontrando que las circulares permitían mayores cantidades de energía disipada y mejor distribución de esfuerzos, adicionalmente se estudió la relación ancha/alto de la placa y se encontró una relación lineal entre este parámetro y la capacidad de disipación de energía ante carga cíclica.

Un segundo acercamiento al diseño de estos dispositivos usando técnicas de optimización de forma fue hecho por Zhang et al. (2018) y obtuvieron un dispositivo que, comparado con un disipador sin optimizar, tiene una distribución de esfuerzos plásticos más uniforme y se reducen las concentraciones de esfuerzos. Amiri et al. (2018) estudiaron un nuevo dispositivo de placas ranuradas que llamaron Block Slit Damper (BSD) que consiste en una serie de SSD colocados uno sobre otro conformando un disipador esbelto. Concluyeron que el dispositivo propuesto era más económico, que el aumento en el grosor de la placa, disminuye el efecto de pandeo y que es apto para usarse en estructuras sismorresistentes. Nuzzo et al. (2018) proponen un tipo de disipador llamado Shear Link (SL) que no es propiamente un disipador ranurado pues los orificios realizados en la placa no están

completos, sin embargo, al ser tan similar, sus estudios experimentales aportan información para modelos numéricos. En su trabajo, se concluye que estos dispositivos se ven altamente influenciados por la cantidad y forma de las ranuras por lo que son muy versátiles en cuanto a necesidades de diseño. Sobre el estudio de ranuras, Kafi (2019) estudiaron la influencia de las ranuras proponiendo disipadores con una fila de ranuras, dos filas de ranuras o sin ninguna ranura, y concluyeron, de manera similar al trabajo de Zheng (2015) que las configuraciones con dos ranuras tienen ventaja en disipación de energía y mayor estabilidad ante cargas cíclicas.

Finalmente, el diseño de este tipo de disipador usando técnicas de optimización de forma, fue trabajado nuevamente por Ferrer y Villalba (2018) que utilizaron una adaptación del algoritmo Simulated Annealing para diseñar dispositivos que lograron hasta un 370% de mejora en la capacidad de absorción de energía en un ciclo de carga, para el caso de carga cíclica en condiciones cuasi estáticas, respecto a la geometría inicial. En su trabajo presentan cinco (5) geometrías iniciales (Circular, vertical, cuadrada, horizontal y triangular) y cada una evoluciona libremente, restringiendo la cantidad de material para que permanezca igual a lo largo de 50 iteraciones en las que, la geometría cambia completamente hasta lograr un óptimo en el que la distribución de esfuerzos es uniforme. Farzampour et al. (2019) aplicó el algoritmo de Grey Wolf para optimizar la forma de las ranuras en un dispositivo tipo Butterfly, se modelaron 300 dispositivos y se aplicó el algoritmo para maximizar la disipación de energía reduciendo la concentración de esfuerzos plásticos en el dominio de diseño. En la Tabla 5 se presenta de manera resumida la información mencionada en esta sección. La tabla indica el año de publicación del trabajo, tipo de dispositivo, tipo de estudio y país donde se realizó el estudio.

Tabla 5.*Disipadores de placas ranuradas.*

Año	Autor	Tipo de dispositivo	Dispositivo	Tipo estudio	País
2007	Chan et al.	SSD	SL-1 a SL-9	Experimental	Australia
2010	Ghabraie et al.	SSD	SSD-BESO	Numérico y Experimental	Australia
2015	Hedayat	SSD	Single slit damper (SD-type)	Numérico	Irán
			Double slit damper (DD-type)		
			Triple slit damper (TD-type)		
2015	Jie, Aiqun y Tong	NSD	Single row slits D1	Numérico y experimental	China
			Single row slits D2		
			Double row slits D3		
			Double row slits D4		
2015	Lee et al.	Strip Damper	Dumbell-shaped strip (DSD)	Experimental	Corea
			Tapered strip (TSD)		
			Hourglass-shaped strip (HSD)		
2015	Teruna, Majid y Budiono	SSD	DHSD	Experimental	Indonesia
2016	Perri, Faella y Martinelli	SSD	SSS1 a SSS6 (similar al original)	Experimental	Italia
2016	Tagawa et al.	SSD	(similar al original)	Experimental	Japón
2017	Ferrer y Villalba	SSD	Circular, Triangulos, Cuadrados	Numérico	Colombia
2018	Mendoza et al.	SSD	Circular, Diagonales	Numérico	Colombia
2018	Zue, Wang y Zhang	SSD	Assembled Steel Slit damper (ASSD)	Experimental	China
2018	Amiri, Najafabadi y Estekanchi	SSD	Block slit damper (BSD)	Numérico y experimental	Irán
2018	Nuzzo et. Al	SL	Shear link (SL)	Experimental	Italia
2018	Ferrer y Villalba	SSD	SSD-Simulated Annealing	Numérico	Colombia
2019	Farzampour, Khatibinia y Mansouri	SL	Butterfly Shaped- Grey Wolf	Numérico	Estados unidos
2019	Kafi y Nik-Hoosh	SSD	Simple slit with a single row DSSH)	Numérico y experimental	Irán
			Simple slit whit two rows (DSDH)		
			No-slit (DFF)		

Nota: Elaboración propia.

3.4. Optimización estructural

En el campo de la optimización estructural se pueden identificar los siguientes problemas:

- Optimización del tamaño: trata de determinar las medidas óptimas de los elementos que constituyen una estructura de forma predefinida. Es el enfoque más sencillo ya que el número de variables del problema es bastante limitado.
- Optimización de la forma: buscar la forma óptima de una estructura de topología fija. En este enfoque, partiendo de una forma predefinida, se busca optimizar dicha forma mediante la modificación de la conectividad entre elementos o mediante la eliminación de los elementos menos esforzados.
- Optimización de la topología: trata de buscar la distribución óptima del material en una estructura, mediante la supresión de elementos, la modificación de la conectividad y/o de las coordenadas nodales. Este enfoque, empleado en este trabajo, es el más complicado porque aborda una cantidad elevada de variables.

3.4.1. Optimización topológica

En general, es posible escribir la mayoría de los problemas de optimización matemáticamente como se representa en la Ecuación 7.

$$\begin{array}{ll} \text{Máx o mín} & f(x) \\ x \in R & \end{array} \quad \text{sujeto a} \quad \begin{array}{l} \phi(x) = 0 \\ \psi(x) \geq 0 \text{ para minimizar} \\ \psi(x) \leq 0 \text{ para maximizar} \end{array} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde x es un vector cuyas componentes son variables de diseño y pueden ser continuas, discretas o una mezcla de ambas, $f(x)$ se conoce como función de costo, función objetivo o función de energía, $\phi(x)$ son funciones de restricción de igualdad y $\psi(x)$ son funciones de restricción de desigualdad. El espacio que abarcan las variables de decisión se

denomina espacio de diseño o espacio de búsqueda, mientras que el espacio formado por los valores de la función objetivo es llamado espacio de respuesta (Yang, 2018).

Tres factores que aumentan la complejidad del problema son: 1) no linealidad de la función objetivo, 2) alta dimensionalidad del problema y 3) forma compleja del dominio de búsqueda (restricciones). Cuando la función objetivo tiene una no linealidad muy alta, generalmente significa que tiene muchos óptimos locales, incluso infinitos, por lo que los algoritmos quedan atrapados en máximos o mínimos locales; la alta dimensionalidad se relaciona con la maldición de la dimensión, también conocida como efecto Hughes, que se refiere a los fenómenos que surgen al analizar y organizar datos de espacios en múltiples dimensiones que no suceden en el espacio físico descrito generalmente con solo tres dimensiones. Aquí la distancia se hace grande, mientras que el volumen de cualquier algoritmo se vuelve insignificante en comparación con el vasto espacio factible; finalmente, múltiples restricciones complejas pueden ocasionar que la región factible resulte con geometría o formas irregulares, lo que dificulta que los algoritmos hagan la búsqueda de los valores óptimos de forma correcta en toda la región o regiones (Yang, 2018). Por lo anterior existen varias formas de abordar la solución de un problema de optimización donde en lugar de buscar una solución analítica, se busca una solución aproximada por medio de algoritmos que resuelven diferentes tipos de problemas.

Un algoritmo es un procedimiento iterativo computacional que puede llegar a requerir cientos, miles o hasta millones de evaluaciones, tienen diferentes requerimientos y su efectividad depende del problema de optimización en que se aplica. Los métodos tradicionales son algoritmos de búsqueda local mientras que los heurísticos y metaheurísticos combinan búsqueda local con aleatorización y pretenden ser adecuados para optimización

global. La mayoría de los algoritmos metaheurísticos han sido desarrollados inspirados en algún proceso natural, es decir, algunos de ellos se basaron en la teoría de la evolución de Darwin; dos componentes principales de cualquiera de estos algoritmos son: selección de las mejores soluciones locales para garantizar que las soluciones converjan en la óptima y aleatorización para evitar que las soluciones queden atrapadas en óptimos locales (Yang, 2018). Los algoritmos pueden ser clasificados de acuerdo con como encuentran la solución al problema en deterministas, estocásticos o de aprendizaje estocástico (Yang, 2018).

Sobre qué algoritmo usar, la respuesta no es exacta. Un algoritmo puede funcionar muy bien para determinado tipo de problema y para otro no tanto. Sin embargo, para seleccionar el algoritmo adecuado, puede ser útil determinar la complejidad del problema a resolver. Para medir que tan fácil o difícil puede ser resolver un problema de optimización es necesario determinar su complejidad computacional que se relaciona directamente con el algoritmo usado y cuya medida debe ser independiente del hardware y software usados, en ese sentido, la complejidad del algoritmo se puede entender como estimar su complejidad aritmética (Yang, 2018).

3.4.1.1. Optimización con restricciones

Generalmente para cualquier problema del mundo real es posible generar un problema de optimización con restricciones:

$$\begin{array}{ll} \text{Máx o mín} & f(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x} \in R & \end{array} \quad \text{sujeto a} \quad \begin{array}{l} h_i(\mathbf{x}) = 0 \\ g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \text{ para minimizar} \\ g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ para maximizar} \end{array} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde x es el vector de variables de diseño, $h(x)$ son las restricciones de igualdad y $g(x)$ son las restricciones de desigualdad (Ishii et al, 2017). A continuación, se presentan diversas formas de tratar las restricciones.

3.4.1.1.1. Multiplicadores de Lagrange.

Para manejar las restricciones igualdad $h_i(x)$, se puede emplear el método de multiplicadores de Lagrange. Por ejemplo, si se quiere minimizar una función $f(x)$ sujeta a la restricción de igualdad no lineal $h(x) = 0$ es posible formar una nueva función \mathcal{L} llamada el Lagrangiano. Habrá tantos multiplicadores de Lagrange como restricciones de igualdad. Con el uso de los multiplicadores el problema se convierte en un problema sin restricciones (Yang, 2018).

3.4.1.1.2. Variables de Holgura o flojas (Slack).

Para convertir restricciones de desigualdad $g_j(x)$ en restricciones de igualdad se puede usar el método de variables de holgura (Slack variables). Por ejemplo, se tiene la desigualdad $g(x) \leq 0 \rightarrow g(x) + S = 0$; para garantizar que S no tome valores negativos se puede decir que $S = t^2$, para todo $t \in R$; habrá tantas holguras como restricciones de desigualdad. Una vez se hayan convertido todas las desigualdades a igualdades, se procede con el método de multiplicadores de Lagrange (Yang, 2018).

3.4.1.1.3. Método del gradiente reducido generalizado.

Para una restricción de igualdad simple, si una de las variables se puede resolver analíticamente, entonces un enfoque mejor y más preciso es resolverla y reducir la dimensionalidad del problema. Sin embargo, en muchas aplicaciones, las restricciones de igualdad son altamente no lineales y, por lo tanto, no se pueden resolver fácilmente (Yang, 2018).

3.4.1.1.4. Condiciones Karush-Kuhn-Tucker / Condiciones KKT.

Para problemas con restricciones de igualdad o desigualdad. Forman las bases para el análisis matemático de problemas de optimización no lineales, pero su implementación numérica no es fácil (Yang, 2018). Estas condiciones son usadas para chequear la posible optimalidad de un punto dado y determinar candidatos de punto mínimo, su sentido matemático aborda el hecho de que, en un punto estacionarios, la dirección negativa del gradiente de la función objetivo es combinación lineal de los gradientes de las restricciones con los multiplicadores de Lagrange como escalares de la ecuación lineal (Arora, 2004).

3.4.1.1.5. Método de penalización.

Para problemas de optimización no lineales con restricciones de igualdad y desigualdad. Convierte el problema con restricciones a uno sin ellas por medio de una penalización a cualquier violación de dichas restricciones, es decir, todas las restricciones se incorporan en la nueva función objetivo (Yang, 2018).

3.4.1.2. Optimización multiobjetivo.

En la realidad, a menudo se tiene que optimizar múltiples objetivos simultáneamente. En este trabajo se busca maximizar la energía de deformación mientras se intenta minimizar la cantidad de material al mismo tiempo, por lo que se está lidiando con problemas de optimización multiobjetivo. Además, los objetivos están en conflicto y, por lo tanto, se necesitan algunas compensaciones. Como resultado, se debe encontrar un conjunto de soluciones óptimas de Pareto, en lugar de una sola solución (Yang, 2018).

Para optimización multiobjetivo, los múltiples objetivos forman un vector llamado vector de optimización; cualquier problema de optimización multiobjetivo puede ser escrito como:

$$\begin{array}{l} \text{Máx o mín} \\ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^D \end{array} \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)] \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\begin{array}{l} \text{Sujeto a} \\ h_k(x) = 0 \\ g_j(x) \geq 0 \text{ para minimizar} \\ g_j(x) \leq 0 \text{ para maximizar} \end{array} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde \mathbf{x} es el vector de variables de decisión, $h(\mathbf{x})$ las restricciones de igualdad, $g(\mathbf{x})$ las restricciones de desigualdad y \mathbb{R}^D , es el espacio de búsqueda abarcado por los vectores de las variables de decisión \mathbf{x} .

Encontrar soluciones a un problema de optimización multiobjetivo suele ser difícil, incluso usando el método de suma ponderada (The Weighted Sum) y la función de utilidad (Utility Function) que son métodos que permiten representar un problema multiobjetivo como un problema de único objetivo con restricciones. Sin embargo, hay otros métodos que funcionan bien para problemas de optimización multiobjetivo, especialmente los métodos metaheurísticos como: Algoritmos Genéticos (GAs), Simulated Annealing (SA), Particle Swarm Optimization (PSO), Cuckoo Search (CS) y Firefly Algorithm (FA). Las tendencias modernas, aceptan que la aleatoriedad está en todas partes y no hay una razón sólida para no usar la aleatoriedad en el desarrollo de algoritmos. Los métodos heurísticos utilizan un enfoque de prueba y error para encontrar las soluciones a muchos problemas difíciles y los más modernos son a menudo algoritmos evolutivos, o más recientemente llamados "metaheurísticos". Aquí "meta" significa "más allá" o "nivel superior", mientras que heurístico significa "encontrar" o "descubrir por ensayo y error" (Yang, 2018)..

Dentro del marco teórico descrito anteriormente, es posible entonces formular el problema de optimización topológica cuyo objetivo principal es encontrar la mejor distribución de material dentro de un dominio dado; conociendo únicamente las condiciones

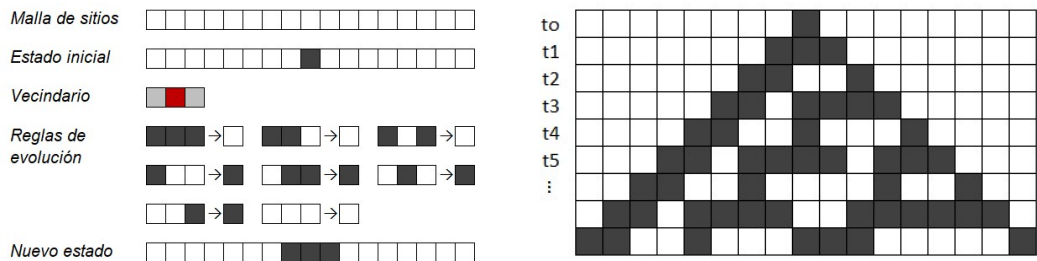
de apoyo, las cargas y otras condiciones como orificios prescritos o áreas solidas fijas. Con este fin, en las secciones 2.5 y 2.6 se aborda la técnica de los autómatas celulares híbridos como herramienta para solucionar el problema de optimización topológica de disipadores metálicos de placas ranuradas. Allí también se define la aproximación usada para modelar el material. A continuación, en la sección 3, se presentan recomendaciones de diseño y la modelación numérica de los disipadores, incluyendo las herramientas computacionales, entre otros aspectos relevantes. Seguidamente, en la sección 4.2 se hace la presentación detallada del procedimiento para solucionar el problema central de este trabajo.

3.5. Autómatas celulares

Los autómatas celulares son una malla de células o sitios, cada sitio está definido por un estado y un vecindario, es decir, el estado de una célula en cierto tiempo es función del estado de su vecindario en el tiempo anterior. Los Autómatas Celulares proveen modelos matemáticos simples, discretos y deterministas para sistemas físicos, biológicos y computacionales. A pesar de su construcción simples son capaces de tener comportamientos complejos (Wolfram, 1982).

Figura 2.

Autómata Celular Elemental. Regla 30.



Nota: Elaboración propia.

Un Automata Celular (AC) elemental consiste en una secuencia de sitios que llevan valores de cero o uno y el valor de cada sitio evoluciona de acuerdo con un conjunto de reglas que involucran los valores de sus vecinos. Pero en general, los sitios de un automata se pueden organizar en cualquier red rectangular y cada sitio puede adoptar cualquier conjunto de valores discretos (Wolfram, 1982).

Para el caso de automatas deterministas, al permitir que el valor de un sitio sea función de los valores del sitio en sí y de sus vecinos más cercanos en el paso anterior de tiempo, se obtienen familias de reglas y dado que evolucionan de manera determinista con un conjunto finito de estados, llegará el momento en que se encuentren en un ciclo en el que visiten una secuencia de estados repetidamente. Sin embargo, se ha mostrado que todos los patrones obtenidos caen en solo cuatro categorías cualitativas (Wolfram, 1982).

- *Clase I:* La evolución lleva a un estado homogéneo donde todos los sitios tienen el mismo valor. Para esta clase la predicción del comportamiento es trivial, es independiente del estado inicial.
- *Clase II:* la evolución lleva a un conjunto de estructuras periódicas. Los efectos de valores de sitios particulares se propagan a un número finito de vecinos, por lo tanto, un cambio en el valor inicial de un sitio solo afectará una región finita de sitios a su alrededor, así que la predicción del sitio final solo requiere conocimiento de un conjunto finito de valores de sitio iniciales.
- *Clase III:* la evolución lleva a un patrón caótico, pero no completamente aleatorio. Los efectos de los valores de sitios se propagan a una velocidad finita por lo que afectaran sitios cada vez más lejanos a medida que pasa el tiempo. La predicción del valor de un sitio cuando el tiempo tienda a infinito requeriría conocimiento de un número infinito de valores iniciales del sitio.

- *Clase IV*: la evolución lleva a obtener estructuras complejas.

Adicionalmente, la modelación de algunos sistemas o procesos requiere “ruido” en las reglas locales de evolución, lo que lleva a Autómatas No Deterministas (Wolfram, 1983).

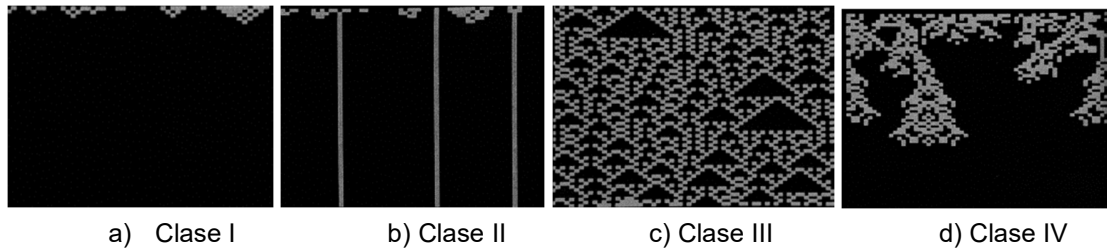


Imagen 1. Clases cualitativas de Autómata Celular. Fuente: [33].

En cuanto al vecindario de un autómata celular, la forma no tiene ninguna restricción excepto que debe ser el mismo vecindario para todos los autómatas del sistema. Los vecindarios más comunes son el de Von Neumann donde cada autómata tiene 4 vecinos, el de Moore con 8 vecinos y como el vecindario puede ser extendido o reducido tanto como se requiera, también se usan el vecindario vacío y el extendido.

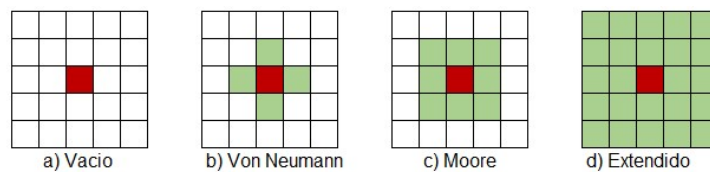


Imagen 2. Vecindarios de los autómatas celulares. Fuente: elaboración propia.

Para los autómatas en la frontera, el dominio de diseño se puede extender mediante distintas condiciones. Una condición de frontera fija se define con autómatas cuyo valor está predeterminado, frontera adiabática duplica el valor del autómata en un vecino adicional, en la frontera reflectora el estado del vecino opuesto se replica en el autómata adicional y la

condición de frontera periódica se utiliza cuando se asume que el dominio de diseño está conectado en forma de toroide (Tovar, 2005).

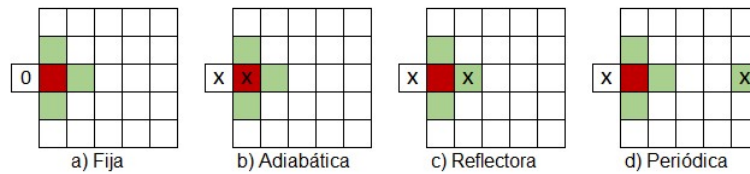


Imagen 3. Condiciones de frontera de autómatas celulares. Fuente: elaboración propia.

3.6. Optimización con Autómatas Celulares Híbridos (HCA)

El algoritmo de los autómatas celulares Híbridos - HCA por su sigla en inglés (Hybrid Cellular Automata) - discretiza el dominio de diseño en un arreglo regular de autómatas; el estado del i -ésimo autómata está asociado a una variable de diseño x_i , que representa la masa del autómata celular, y a una variable de estado S_i , que representa el estímulo mecánico del CA. La evaluación de las variables de estado se realiza con un análisis por elementos finitos, lo cual permite reducir a cero el residuo entre el trabajo externo y la energía interna en cada iteración. Cada autómata modifica localmente las variables de diseño de acuerdo con una regla de diseño hasta que la variable de estado alcance un valor óptimo, es decir, por medio de esta regla se pretende reducir el error absoluto entre la densidad energía de deformación local y una energía de deformación objetivo (Tovar, 2005).

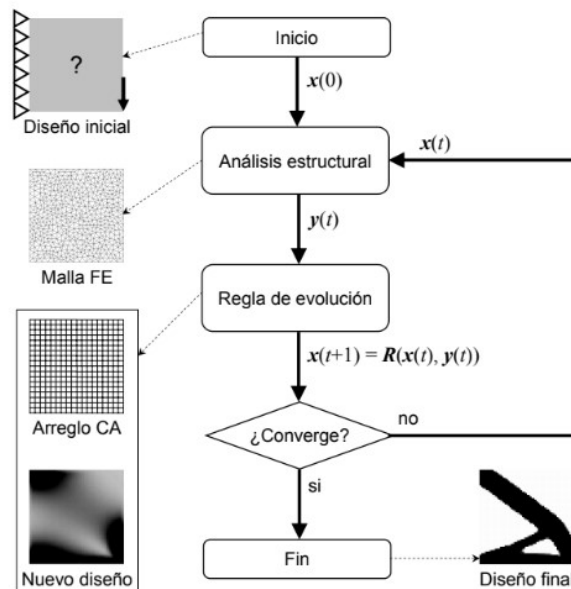
3.6.1. Procedimiento básico del algoritmo

Como se muestra en la **Figura 3**, el algoritmo empieza con 1) la definición del dominio de diseño, material, condiciones de carga, condiciones de contorno, valor inicial de las variables de diseño x_0 , 2) luego se calcula del valor inicial de las variables de estado y por medio de un análisis por elementos finitos de la estructura sólida o de la estructura inicial;

3) hecho esto, se aplica la regla de evolución que modifica las variables de diseño y 4) finalmente, se verifica la convergencia. Se considera que hay convergencia cuando no hay mejora en el diseño de la estructura, verificando que el cambio de masa en dos iteraciones consecutivas sea inferior a un mínimo porcentaje de la masa total de la estructura inicial. El método HCA es una técnica computacional que se puede utilizar para sintetizar topologías óptimas. Si bien este método no es explícitamente una técnica de optimización, las reglas locales producen este comportamiento (Bendsoe, 2003).

Figura 3.

Procedimiento general de la técnica de los Autómatas Celulares Híbridos.



Nota: tomado de Tovar (2005)

3.6.2. Aproximación del material en la optimización

El método con el que se aproxime el material es la base del proceso de optimización y, como métodos diferentes llevarán a soluciones diferentes, se debe seleccionar un modelo de material razonable para garantizar la validez de los resultados (Bendsoe, 2003). Para estructuras continuas, se reconocen dos alternativas de aproximación: homogenización y

densidad. En el caso más general, la técnica de homogenización en optimización topológica consiste en asignar una microestructura equivalente a cada elemento del dominio de diseño, esta microestructura está formada por agujeros periódicamente distribuidos en el material base y el problema de optimización topológica será el de encontrar la distribución óptima de dichos agujeros; donde a nivel micro las variables de diseño del problema serán parámetros geométricos de los orificios y, a nivel macro las variables serán la densidad de cada elemento (Tovar, 2005). En resumen, la técnica se basa en usar materiales compuestos como base para describir las propiedades variables del material en el espacio. La técnica de la densidad artificial o técnica del material sólido isotrópico con penalización – SIMP por su sigla en inglés (Solid Isotropic Material with Penalization) es una forma propuesta para resolver el problema de optimización de cumplimiento mínimo en la que se reemplazan variables enteras por continuas y luego se introduce una forma que dirija la solución a valores discretos cercanos a cero o uno (Bendsoe, 2003); dicho de otra manera, con esta técnica la propiedades de cada elemento se suponen constantes y la variable de diseño del problema de optimización será una densidad artificial o relativa que tomará valores entre cero y uno. El módulo de elasticidad de cada elemento del dominio de diseño será función de dicha densidad (Tovar, 2005).

En problemas no lineales más complejos, las técnicas mencionadas no son eficientes y no deberían usarse directamente, entonces se usan como modelo de material. Para el caso de SIMP, se puede considerar como modelo de material siempre y cuando el valor de la penalización sea (Bendsoe, 2003):

$$\text{En 2D} \quad p \geq \max \left\{ \frac{2}{1 - \nu_0}, \frac{4}{1 + \nu_0} \right\} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\text{En 3D} \quad p \geq \max \left\{ 15 \frac{(1 - \nu_0)}{(7 - 5\nu_0)}, \frac{3(1 - \nu_0)}{2(1 - 2\nu_0)} \right\} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde ν_0 es el módulo de Poisson del material base.

El enfoque de aproximación del material para un problema específico dependerá de las propiedades del material. Para materiales compuestos con propiedades anisotrópicas se utiliza con mayor frecuencia la teoría de homogenización mientras que para materiales isotrópicos se recurre al método de la densidad artificial (SIMP, por su sigla en inglés Solid Isotropic Material with Penalization).

4. Antecedentes

4.1. Generalidades sobre técnicas de diseño y construcción

Un breve resumen de la evolución de las técnicas de construcción se presenta en el código FEMA 454 de 2006 (FEMA, 2006): los diseños sísmicos iniciales para edificios se basaron en resistir cargas de viento y en su concepción se utilizaban conceptos de fuerzas estáticas. Este enfoque de diseño se mantuvo desde finales de 1800 y hasta mediados del siglo veinte.

Después del terremoto de San Francisco en 1906, la respuesta de las edificaciones ante la acción de cargas dinámicas, que era un tema poco tratado antes, ganó interés, y a principios de la década de 1930, en la Universidad de Stanford, se iniciaron los estudios sobre dinámica estructural. Este enfoque condujo a reconocer la importancia de los períodos y demás conceptos de diseño dinámicos en lugar de estáticos. Los conceptos de diseño

dinámico fueron mejorados por el método de aceleración espectral desarrollado por el profesor Housner en el Instituto de Tecnología de California. A medida que se desarrollaban los métodos de análisis, los ingenieros necesitaban conocimientos adicionales sobre el comportamiento no lineal de los elementos estructurales y sus conexiones. Por este motivo, desde 1950 hasta 1990 en numerosas universidades en Estados Unidos se realizaron pruebas de materiales y conexiones para investigar su comportamiento real y poder predecir y construir ecuaciones y modelos (FEMA, 2006).

4.1.1. Enfoques de diseño basados en el desempeño

Hay varios enfoques de diseño basados en el desempeño, entre los que destacan el diseño basado en fuerza, diseño basado en desplazamiento y el diseño basado en energía.

4.1.1.1. Métodos basados en fuerza.

Los métodos basados en fuerza utilizan fuerzas laterales distribuidas sobre la altura de la edificación, cuyos valores son determinados por una resistencia mínima al cortante basal. Dependiendo de cómo se calculan las fuerzas laterales hay dos métodos: fuerza lateral estática equivalente o fuerza horizontal equivalente y análisis modal espectral.

4.1.1.2. Métodos basados en desplazamiento.

Utilizan desplazamientos en lugar de fuerzas como parámetro de diseño; se han desarrollado tres metodologías basadas en análisis Pushover que se han incluido en códigos de diseño: el método del coeficiente de desplazamiento (DCM) en el FEMA 356, el método N2 en el Eurocode 8 y en el método del espectro de capacidad (CSM) presentado en el ATC-40.

4.1.1.3. Métodos basados en energía.

A diferencia de los métodos mencionados anteriormente que solo consideran fuerza o desplazamiento, los métodos basados en energía consideran su combinación. Las bases para el diseño sísmico basado en energía se establecieron a mediados del siglo pasado por Housner en 1956 y Akiyama en 1985 (Akiyama, 1985); como cualquier otro método, se parte de que la capacidad de la estructura (en términos de disipación de energía) debe exceder la demanda del terremoto (en términos de energía sísmica de entrada). Por medio de alguna metodología, se debe encontrar la energía ejercida por el sismo en la estructura y cómo se distribuye entre los pisos y elementos estructurales.

Housner declaró que la energía de entrada es disipada en parte a través del amortiguamiento, y el resto se disipa como energía cinética por el movimiento de masa y energía por deformaciones elásticas e inelásticas; años después Akiyama encontró que la energía de entrada ejercida por un terremoto es una cantidad estable que depende principalmente de la masa total del sistema y del periodo fundamental de vibración de la estructura (Margarit, 2013). Sin embargo, estudios posteriores afirman que además de la masa total y el periodo fundamental, otros factores como la ductilidad, el coeficiente de amortiguamiento y la rigidez post fluencia también influyen en la estimación del valor de energía de entrada.

4.1.2. Tipos de edificación según tipo de disipación de la energía de entrada

En 1994 la Structural Engineers Association of California (SEAOC) (SEAOCE, 2020) desarrolló un informe con recomendaciones para el diseño usando la metodología PBSE: Performance Based Seismic Design (diseño sísmico basado en desempeño) con la filosofía de que los edificios resistieran terremotos de diferente gravedad dentro de niveles

de daño específico. En general, las estructuras de resistencia sísmica pueden ser clasificadas en dos grandes grupos según como distribuyen la energía que entra al sistema:

- *Estructuras de disipación de energía distribuida*: la energía es distribuida sobre todos los elementos estructurales de toda la edificación (vigas, columnas, muros de carga...). Esta estrategia es considerada como la solución tradicional o convencional.
- *Estructuras con disipación de energía concentrada*: la energía es intencionalmente disipada y concentrada en elementos especialmente diseñados para ese fin. En esta categoría se han propuesto técnicas que pueden clasificarse dentro de dos categorías dependiendo de cómo se disipa la energía: estructuras con sistemas de control activo y estructuras con dispositivos sistemas de control pasivos.

4.2. Dispositivos de control en estructuras

En el capítulo anterior, sección 3.2 Sistemas de control de respuesta sísmica, se mencionaron los diferentes tipos de disipadores y amortiguadores pasivos y activos. Esta sección se enfocará en la optimización de disipadores histeréticos metálicos y la información pertinente al problema de investigación.

4.2.1. Modelación del comportamiento de disipadores histeréticos metálicos

En cuanto a la construcción de modelos de disipadores basados en fluencia de metales, se han hecho varios estudios. Para simular el comportamiento de los disipadores bajo condiciones de carga cíclica, en el trabajo de Chan y Albermani [11] proponen un análisis estático no lineal y, material con endurecimiento isotrópico. Los resultados se comparan con los de un ensayo bajo carga monotónica. Ghabraie et al. [10] hacen un análisis estático no lineal, asumen esfuerzo plano y utilizan un modelo de material multilineal con

endurecimiento isotrópico para simular el comportamiento de un disipador de placas ranuras sometido a un protocolo de desplazamientos cíclicos de tres pasos. Los resultados fueron validados con los de un experimento. Ferrer y Villalba (Ferrer & Villalba, 2017) utilizan ABAQUS (Dassault Systems, 2023) para simular el comportamiento disipador de placas ranuras sometido a un protocolo de desplazamientos de 3 pasos (un ciclo) y con modelo de material similar al de Ghabraie et al. (2010). Hoon Oh et al. (2009) estudian el comportamiento de disipadores de placas ranuradas usados como conexión viga columna, el modelo de material que usan para el análisis por elementos finitos en ABAQUS (Dassault Systems, 2023) es trilineal con endurecimiento isotrópico. Los resultados son comparados con los de un experimento con carga monotónica.

Hosseini, Ashraf y Albermani (2011) utilizan ANSYS para estudiar el comportamiento de un disipador tipo panel de corte sometido a protocolos de carga monotónica y cíclica con un análisis estático no lineal y modelo de material bilineal con endurecimiento cinemático. Karavasilis et al. (2012) utilizan OpenSees para simular el comportamiento de un disipador de placas ranuradas sometido a carga cíclica con modelo de material combinado. Zhengying et al. [58] utilizan un modelo con endurecimiento combinado para simular el comportamiento de paneles de corte en la herramienta Simulink de Matlab. Hedayat (2015) utiliza OpenSees para simular el comportamiento de un disipador de placas ranuradas bajo condiciones de carga monotónica y cíclica. Para la carga monotónica usa un modelo trilineal con endurecimiento isotrópico y para la carga cíclica utiliza un modelo con endurecimiento cinemático. Amiri et al. (2018) estudian el comportamiento de disipadores del tipo placas ranuradas sometidas a carga cíclica, utilizan ABAQUS para el análisis estático no lineal de elementos finitos y modelo de material bilineal con endurecimiento cinemático. Además, a

diferencia de los modelos anteriores, el modelo presentado por Amiri es capaz de predecir el inicio de la falla pues se incorporó un criterio de daño por ductilidad. Los resultados del modelo fueron comparados con los de un experimento.

Considerando lo anterior, es apropiado mencionar que los métodos computacionales reducen significativamente el tiempo y costo de los trabajos de investigación, pero para construir modelos se necesita de información experimental previa y de conocimientos sobre el comportamiento del problema para tratar de imitarlo con cierto nivel de confiabilidad desde un ordenador. En términos generales, los métodos computacionales utilizados en el análisis de disipadores metálicos se clasifican en tres categorías según su uso: programas para análisis estructural a nivel de cada elemento (para análisis de un disipador, para el análisis de una viga, para el análisis de una conexión, para el análisis de un componente de un vehículo como una defensa o parachoques, etc.), programas de análisis estructural a nivel de la estructura (análisis de un edificio, análisis de un puente, análisis de una cercha, etc.) y lenguajes de programación (diseño de estructuras y elementos con técnicas de optimización, análisis estructural sin interfaz gráfica, etc.) (Javanmardi et al., 2019).

4.2.1.1. Programas para análisis estructural a nivel del elemento.

Son herramientas computacionales avanzadas de elementos finitos como ABAQUS (Dassault Systems, 2023), ANSYS (Ansys Inc, 2020), LS-DYNA (Ansys Inc, 2023), Solidworks (Dassault Systems, 2023), Opensees (Universidad de Berkeley, 2023), entre otros. Estos programas se utilizan generalmente para el diseño preliminar y el análisis de disipadores metálicos o para extender desde algún punto de vista la investigación experimental y contienen diferentes modelos de materiales con diferentes criterios de daño disponibles para simular el comportamiento de histéresis de los disipadores metálicos y el

comportamiento no lineal de diferentes elementos. Adicionalmente, en estos programas es posible modelar la estructura completa equipándola con los disipadores, sin embargo, se requiere un profundo conocimiento de modelado y computación de alto rendimiento para lograrlo; por esto no es tan común su uso con este fin.

4.2.1.2. Programas de análisis estructural a nivel de la estructura.

En general, los ingenieros diseñadores estructurales que utilizan disipadores metálicos en sus diseños, lo hacen a través de programas más comerciales basados en elementos finitos como SAP2000 (Computers ans Structures, 2023) , Perform 3D (Computers ans Structures, 2023), Etabs (Computers ans Structures, 2023), CSiBridge (Computers ans Structures, 2023), Opensees (Universidad de Berkle, 2023), y otros. Estos programas se emplean cuando se debe probar la aplicación de los disipadores en mega estructuras. Las características de los disipadores son modeladas por los diferentes elementos en estos programas y, para evaluar su efectividad, la práctica más común es el análisis no lineal tiempo-historia.

4.2.1.3. Lenguajes y herramientas de programación.

Los lenguajes de programación como Matlab (MathWorks, 2023), FORTRAN (Fortran Community, 2023), Python (Python Software Foundation, 2023), entre otros, son otras herramientas utilizadas para el diseño e investigación de la efectividad de los disipadores metálicos. Estos códigos de programación necesitan un conocimiento profundo de programación para el modelado y análisis y conocimiento sobre teoría de control.

4.2.2. Modelos de material

Un modelo de material adecuado es un requisito primordial para obtener predicciones adecuadas de un modelo de elementos finitos. Hay varios factores que pueden influir en el comportamiento de un material ante diferentes agentes mecánicos, ambientales, estéticos etc.

Sin embargo, cuando se habla de comportamiento mecánico y resistencia a cargas de tensión y compresión, se suelen utilizar curvas esfuerzo vs. Deformación o Fuerza vs. Desplazamiento. El gráfico se compone de un sistema de coordenadas cartesianas en el cual se relaciona la carga recibida por el material con la deformación de este. La curva esfuerzo-deformación del acero ordinario muestra tres regiones diferentes i) una respuesta elástica inicial, ii) una región intermedia con endurecimiento por deformación hasta alcanzar el esfuerzo último y iii) decaimiento en el esfuerzo al incrementar la deformación y, considerando lo reportado en la revisión de literatura, el modelo de endurecimiento de material seleccionado debe ser uno que considere el efecto Baushinger. Como se resume en la **Tabla 6**, para los disipadores de acero de placas ranuradas, Chan y Albermani (2008) usaron un modelo elástico perfectamente plástico que fue calibrado con información de un ensayo experimental de una sección del acero del que estaba hecho el disipador bajo carga monotónica de tensión. El mismo modelo fue implementado por Ghabraie et al. (2010) para calcular el valor de la energía de deformación del disipador sujeto a carga cíclica simétrica; en ambos trabajos se reportó que el modelo no es capaz de predecir la falla del dispositivo. Oh et al. (2009) usaron el modelo trilineal propuesto por Benavent et al. (1998) donde la pendiente de la segunda línea es el 4% del módulo de elasticidad y la pendiente de la tercera línea es el 0.8% del módulo de elasticidad, para modelar la resistencia a la flexión o módulo de ruptura del disipador de placas ranuradas en una conexión viga columna. Hossain et al. (2011) usaron un modelo bilineal con endurecimiento cinemático en el cual la pendiente de la segunda línea era el 1% del módulo de elasticidad para el modelamiento con elementos finitos de un disipador tipo panel de cortante, el modelo se hizo para condiciones de carga monotónica y cíclica. Karavalisis et al. (2012) utilizaron el modelo de Bouc–Wen modificado para capturar los efectos combinados del endurecimiento isotrópico y cinemático observado

en los ciclos de histéresis de los dispositivos disipadores de acero. En Hedayat (2015) se utilizó un modelo trilineal con endurecimiento isotrópico para carga monotónica y con endurecimiento cinemático para carga cíclica y Amiri et al. (2018) utilizaron un modelo bilineal con endurecimiento cinemático para simular el comportamiento de un bloque de disipadores de placas ranuradas bajo carga cíclica.

Tabla 6.

Herramientas en modelos previos de disipadores de histeréticos metálicos.

Año	Autor	Modelo de endurecimiento	Software	Tipo de elemento
2007	Chan y Albermani	Elástico perfectamente plástico	Ninguno.	Ninguno.
2009	Oh sang	Trilineal isotrópico	ABAQUS	Solid.
2010	Ghabraie et al.	Elástico perfectamente plástico	No se reporta.	No se reporta.
2011	Hossain	Bilineal cinemático	ANSYS	Shell 181
2011	Karavasilis	Bilineal combinado Bouc-wen	OPENSEES	No se reporta.
2015	Hedayat	Trilineal isotrópico para carga monotónica y cinemático para carga cíclica	ANSYS	Shell 181
2018	Amiri	Bilineal cinemático	ABAQUS	C3D8R (solid tridimensional con 8 nodos)
2018	Mendoza et al.	Bilineal isotrópico	ANSYS	Shell 181
2019	Ferrer y Villalba	Multilineal isotrópico	ABAQUS	S4R

Nota: elaboración propia.

4.3. Optimización estructural

En cuanto a optimización estructural, el primer trabajo destacable sobre optimización ya estaba relacionado con la optimización de estructuras y fue realizado por Galileo Galilei (1564-1642) en su obra: *Discorsi e dimonstrazioni matematiche, intorno, a due nuove scienze attenenti alla meccanica et i movimenti locali* publicada en 1638, que trataba sobre la forma óptima de una viga en voladizo, con una carga puntual en su extremo libre (Sanchez, 2012). Sin embargo, el desarrollo de las técnicas de optimización aplicadas al diseño de estructuras tuvo una evolución lenta y no fue sino hasta el siglo XX que los problemas de optimización empezaron a trabajarse de forma paralela a la evolución de las técnicas y algoritmos de resolución existentes y de la capacidad de cálculo de las herramientas de computación.

En cuanto al diseño óptimo de disipadores de energía de placas ranuradas, la revisión de literatura existente muestra que se ha prestado particular atención a la forma de las ranuras y la influencia que tiene en la capacidad de disipación y se han hecho estudios numéricos y experimentales usando geometrías arbitrarias o establecidas de acuerdo con la experiencia de los autores y su conocimiento sobre la mecánica de materiales.

4.3.1. Optimización de disipadores histeréticos

Liu y Shimoda (2013) mostraron que la optimización de forma basada en superficie de respuesta RSM y diseño de experimentos DOE se puede aplicar al problema de optimizar paneles de corte SPDs obteniendo formas dominadas por rectas más sencillas que las formas de arco obtenidas en otras investigaciones. Ghabraie et al. (2010) utilizaron el algoritmo BESO con restricciones en el dominio de diseño para optimizar la forma de las ranuras del disipador de manera que además de optimizar, se obtuvieran formas sencillas y reducir así costos de fabricación, en su trabajo también consideraron la influencia de la dirección de

aplicación de la carga en la respuesta mecánica y se obtuvieron orificios con forma de diamante que permiten mejorar la distribución de esfuerzos y la capacidad de disipación de energía. Ferrer y Villalba (2018) utilizaron el algoritmo Simulated Annealing SA con algunas variaciones para la optimización de forma de estos dispositivos pero con menos restricciones en el dominio de diseño para permitir formas más libres, se observa la influencia del diseño inicial en los resultados de la optimización, es decir, dependiendo de la forma inicial de los orificios se obtienen formas optimizadas diferentes; lograron incrementar la capacidad de disipación y proponer una metodología para la optimización de placas de diferentes características. Farzampour, Khatibinia y Mansoury (2019) usaron el algoritmo Grey Wolf Optimizer para la optimización de forma de dispositivos butterfly-shape mostrando que los parámetros de forma del modelo influyen en el comportamiento mecánico del disipador en un proceso un tanto manual de definición de parámetros con 300 iteraciones. Estos trabajos tienen en común que usaron algoritmos que son por naturaleza de optimización topológica y fueron restringidos para hacer optimización de forma, en ese sentido es posible afirmar que por sus características la optimización de forma puede ser considerada como optimización topológica con restricciones en el dominio de diseño.

4.3.2. Autómatas celulares aplicados en problemas de optimización topológica

Como se reportó en la sección 3.5, los autómatas celulares – CA – son una red de sitios discretos idénticos, donde cada sitio está definido por un conjunto de estados (por ejemplo, blanco o negro) y un vecindario y, evoluciona de acuerdo con un conjunto de reglas locales, su estado actual y el estado actual de sus vecinos y de esta manera, con un procedimiento relativamente simple son capaces de desarrollar comportamientos complejos.

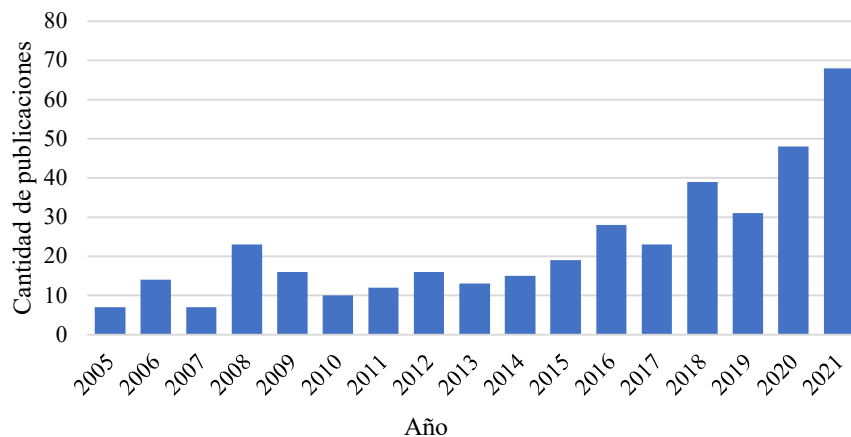
Los autómatas celulares proveen modelos matemáticos simples, discretos y deterministas para problemas de la física, la biología y la computación, por ejemplo, modelos para el flujo de fluidos, estudiar la propagación de incendios, el tráfico de vehículos, etc. La teoría de los autómatas celulares inició en 1940 con Konrad Suze quién hablaba de “espacios de cómputo” como modelos discretos de sistemas físicos, sin embargo, fue Jhon Von Neumann quien formalizó la teoría de los autómatas celulares en su libro “Theory of self-reproducing Automata” donde se hablaba de un autómata en el espacio bidimensional, que podía tomar 29 estados en un vecindario de Von Neumann. En 1970, Jhon Horton Conway, dio a conocer uno de los autómatas celulares más conocidos llamado “Life”, en español conocido como “El juego de la vida”. Este autómata consiste en un espacio bidimensional, donde cada espacio puede tener dos estados: vivo o muero. Se utiliza el vecindario de Moore y se aplican 3 reglas para la evolución; una de las reglas es la pauta para el nacimiento de una célula, otra para su muerte y la otra para su supervivencia. Otro impulso importante en la teoría de los autómatas celulares fue hecho por Stephen Wolfram, quien clasificó el comportamiento de los autómatas en 4 clases según la complejidad de su evolución y ha hecho amplia investigación en el campo que documenta en su libro “A New Kind of Science” donde además enuncia que “los autómatas celulares son un nuevo tipo de ciencia” y que tienen importancia en las distintas áreas del conocimiento.

La primera aplicación de la teoría de los autómatas celulares en un problema podría ser la realizada por los científicos Norbert Wiener y Arturo Rosenblueth y data de los años 40. Utilizaron la teoría de los CA para describir o simular el funcionamiento del musculo cardiaco (corazón); debido a que Roseblueth trabajaba haciendo experimentación en la escuela de medicina de Harvard. En el campo de la optimización topológica, la primera

aplicación pudo ser la presentada por Kita y Toyoda (2000) donde se daban algunas pautas para la aplicación del algoritmo en problemas de optimización de forma y topología de estructuras elásticas, bajo condiciones de carga estáticas, por ejemplo, viga en voladizo o sección simplemente apoyada. Posteriormente, el interés en la aplicación de este algoritmo en problemas de optimización en los campos de la ingeniería ha ido ganando popularidad, como se muestra en la **Figura 4**.

Figura 4.

Publicaciones por año autómatas celulares en optimización topológica. Fuente: elaboración propia.



Dentro de estas publicaciones, es importante destacar que la gran mayoría de aplicaciones han sido para la optimización de estructuras resistentes a impactos. Destacan autores como Andrés Tovar, Neal Patel, John Renaud [Tovar, 2005; Tovar et al., 2004; Tovar et al., 2004; Tovar et al., 2007; Tovar et al., 2006]; Tovar propuso una técnica denominada Autómatas Celulares Híbridos que ha sido aplicada en problemas estructurales elásticos y estáticos y adaptada para problemas de optimización de “Crashworthiness” elementos que

resistirán impactos como los parachoques o defensas de los automóviles. Renaud también ha dado pautas para la optimización topológica de estructuras para choques usando autómatas celulares y junto a Tovar, presentaron un trabajo con recomendaciones para la aplicación de esta técnica en optimización estructural [Tovar et al., 2004; Tovar et al., 2007]. Patel ha dado pautas para la optimización en casos donde las cargas son dinámicas y hay no linealidad en el diseño y también se ha enfocado en la optimización de parachoques (Patel, 2007; Patel et al., 2006; Patel et al., 2009). Otro autor destacado en la búsqueda es Bochenek que se ha enfocado en la optimización estructural con autómatas celulares, ha propuesto varias modificaciones al algoritmo de los autómatas celulares híbridos en cuanto reglas de evolución y también usando un vecindario irregular para geometrías que lo requieran (Bochenek & TaisZielinska, 2012). Sin embargo, no existe una aplicación directa en el campo de la ingeniería estructural y mucho menos considerando la plasticidad, no linealidad de las estructuras y cargas dinámicas comúnmente utilizadas en el análisis y diseño de construcciones civiles.

5. Metodología

Para responder a la pregunta de investigación, en este proyecto de investigación se pretendió obtener la optimización topológica de disipadores de placas ranuradas integrando la herramienta de optimización en MATLAB (MathWorks, 2020) y la herramienta de análisis estructural ANSYS (Ansys Inc, 2020). La metodología que se siguió estaba dividida en cinco (5) fases, cada una con sus respectivas actividades como se muestra en la Figura 5.

En primer lugar, se hizo la revisión bibliográfica y técnica necesaria para la comprensión del problema y como se iba a simular, también se revisaron documentos y manuales sobre uso de los programas de computador.

Continuando, la segunda fase consistió en determinar la respuesta carga-desplazamiento con un modelo numérico. Para el análisis estructural se seleccionó el modelo constitutivo de material, tipo de elemento finito para la modelación, condiciones de carga y de contorno y características geométricas de los disipadores y se simuló la respuesta carga-desplazamiento. Para el análisis se utilizó el software basado en elementos finitos ANSYS (Ansys Inc, 2020), la calibración del modelo se hizo con datos experimentales de trabajos previos encontrados en la revisión de literatura.

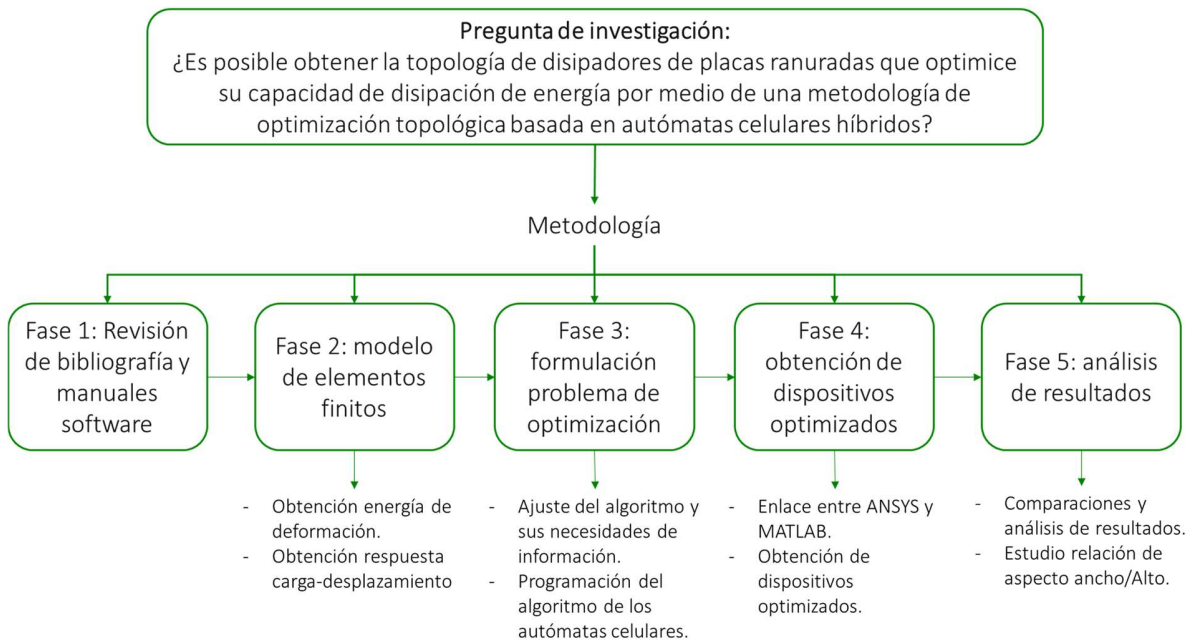
En tercer lugar, se trabajó la formulación del problema de optimización en la que se tomaron los elementos principales de la optimización topológica con autómatas celulares y se adaptaron para la optimización de disipadores. Inicialmente, se abordó el problema de optimización con la técnica de los autómatas celulares híbridos como se describe en la literatura como un problema multiobjetivo donde las funciones en conflicto son la masa y la energía de deformación. Una vez se obtuvieron los resultados, se decidió hacer exploraciones adicionales de la técnica planteando el problema como uno de único objetivo con restricción de masa. El algoritmo de optimización se programó en MATLAB (MathWorks, 2020).

Con las pautas para el análisis estructural en ANSYS APDL (Ansys Inc, 2020) y el algoritmo de optimización en MATLAB (MathWorks, 2020) y, considerando que para esta técnica el análisis de elementos finitos debe hacerse en cada iteración, se procedió a establecer una manera de comunicar estos dos programas para la obtención de los dispositivos optimizados.

Finalmente, en la quinta fase, se hicieron comparaciones entre las cantidades de energía finales e iniciales y se analizaron resultados. También se estudió la relación de aspecto del disipador cambiando su relación ancho-alto.

Figura 5.

Esquema conceptual de la metodología para el desarrollo de la investigación.



5.1. Fase 2: modelo de elementos finitos

En este trabajo de investigación, se replicaron las condiciones de Ghabraie et al. (2010) de apoyo fijo en la base y carga cíclica simétrica en el otro extremo. A continuación, se describe el modelo y elementos utilizados.

5.1.1. Modelo de endurecimiento del material

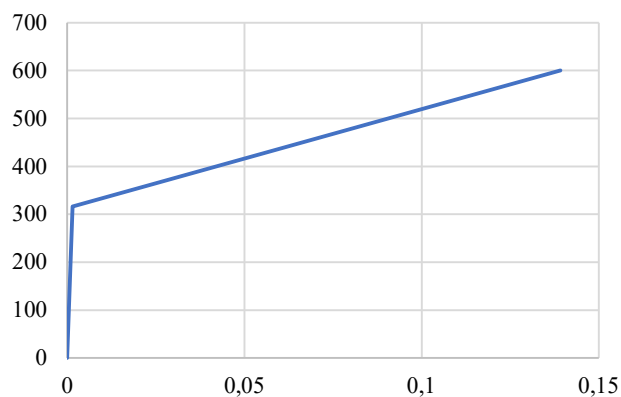
Aunque la discusión sobre modelos de material aún sigue abierta, de acuerdo con la revisión de información hecha en la fase 1 y a la discusión presentada en la sección de antecedentes capítulo 2.2.2., es apropiado decir que un modelo de endurecimiento isotrópico

puede ser usado para simular el comportamiento del material solo para condiciones de carga monotónica o en casos de carga cíclica para un solo ciclo, mientras que para condiciones de carga cíclica se requiere un modelo con endurecimiento cinemático para que la superficie pueda trasladarse la dirección de la carga.

Como modelo de endurecimiento del material se utilizó el mostrado en la **Figura 6** que es similar al descrito en el trabajo de Hossain (2011). En cuanto a las propiedades el material, Chan y Albermani (2008) y Ghabraie et al. (2010) reportan dos ensayos de tensión estándar (coupon test) que arrojan como esfuerzo de tensión de fluencia promedio 316.5 N/mm^2 y módulo de elasticidad de 206.1 kN/mm^2 , estos valores fueron usados en este trabajo.

Figura 6.

Modelo de endurecimiento del material – acero.



5.1.2. Descripción del modelo del disipador

En este trabajo de investigación se hizo un análisis estático no lineal para simular la respuesta fuerza-desplazamiento del disipador de placas ranuras sometido a desplazamientos cíclicos. Para resolver el sistema de ecuaciones lineales generadas por el procedimiento de

elementos finitos, ANSYS (MathWorks, 2020) tiene técnicas de solución directas o iterativas. El método de solución directa disponible es el Sparse Direct Solver que hace uso del hecho de que las matrices de elementos finitos normalmente están escasamente pobladas. Esta escasez permite que el sistema de ecuaciones simultáneas se resuelva de manera eficiente minimizando los recuentos de operaciones. Los solucionadores iterativos se basan en el método del gradiente conjugado e incluyen el gradiente conjugado de Jacobi (JCG), que es adecuado para problemas bien condicionados, el gradiente conjugado preconditionado (PCG), que es eficiente y confiable para todo tipo de análisis, incluido el mal acondicionado y, el gradiente conjugado de Cholesky incompleto (ICCG) que es más robusto que el solucionador de JCG para manejar matrices mal acondicionadas (Ansys Help, 2020). Considerando las dimensiones del problema, se utilizó el método directo, que es el predeterminado.

Para la convergencia del problema no lineal, el programa utiliza Newton Raphson y se activó la opción de búsqueda de línea porque puede mejorar aún más el rendimiento de la técnica de solución.

5.1.3. Tipo de elemento finito

Para estudiar el comportamiento cíclico, no se consideraron los efectos térmicos, se utilizó el elemento finito de uso general "SHELL181" disponible en ANSYS (Ansys Inc, 2020). "SHELL181" es un elemento tridimensional (3D) cuadrilátero tipo placa de integración completa con cuatro nodos y seis grados de libertad en cada nodo que se usa para estructuras delgadas o moderadamente gruesas. Se activó la opción de solo con esfuerzos de membrana KEYOPTION (1) =1, entonces solo quedan activos 3 grados de libertad por nodo

(solo las translaciones) (Ansys Help, 2020). Para considerar las deformaciones por cortante usa la teoría de Mindlin-Reissner.

5.1.4. Malla de elementos finitos

Acercas de la malla, una adecuada debe considerar el tipo de estructura y el análisis correspondiente involucrado, una malla más fina generalmente proporciona mejores predicciones, pero requiere un mayor tiempo de cálculo y mayor costo computacional. Para la validación se probaron mallas con elementos de tamaño máximo de 1mm, 1.5mm, 2mm y 5mm para el disipador V84 descrito en Ghabraie et al. (2010). La energía en el trabajo de Ghabraie et al (2010) fue de 1124 J y en el trabajo de Ferrer (2018) fue de 1085 J, como la discrepancia de los resultados en ningún caso fue superior al 5% a estos valores, como se muestra en la **Tabla 7**, el tamaño de cada elemento se fijó a 2.5mm con lo que se podía capturar bien la trayectoria de los esfuerzos y energía.

Tabla 7.

Influencia del tamaño de la malla de elementos finitos.

Tamaño de malla	Energía de deformación (J)	Tiempo de computación (computador 16GB RAM)	Diferencia
1mm	1097 J	15 minutos	2%
1.5mm	1100 J	7 minutos	2%
2.5mm	1109 J	2 minutos	1%
5mm	1125 J	30 segundos	0.1%

5.2. Fase 3: formulación del problema de optimización

5.2.1. Modelo de material para optimización estructural

En este trabajo se utiliza acero, que se considera un material isotrópico y se utiliza SIMP.

$$E_i(x_i) = x_i^p E_0 \quad (p > 1) \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\rho_i(x_i) = x_i \rho_0 \quad (0 \leq x_i \leq 1) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde E_i es el módulo de elasticidad del elemento i , x_i es la densidad relativa del elemento i , ρ_i es la densidad del elemento i y ρ_0 es la densidad del material base (Patel, 2009).

Las propiedades de las ecuaciones 13 y 14 son efectivas para análisis lineales, pero no dan resultados realistas en sistemas cuyo análisis involucra grandes deformaciones y la relación entre esfuerzo y deformación no es lineal. Para considerar el comportamiento plástico del material, se utiliza un modelo de endurecimiento bilineal, entonces se integran otras propiedades del material al esquema de interpolación; estas propiedades incluyen además de la densidad y el módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia y el módulo tangente o módulo de endurecimiento (Patel, 2009).

El esquema de interpolación para el material con endurecimiento bilineal descrito es:

$$E_i(x_i) = x_i^p E_0 \quad (p > 1) \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\rho_i(x_i) = x_i \rho_0 \quad (0 \leq x_i \leq 1) \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\sigma_y(x_i) = x_i^q \sigma_{y0} \quad (q > 1) \quad \text{Ecuación 17}$$

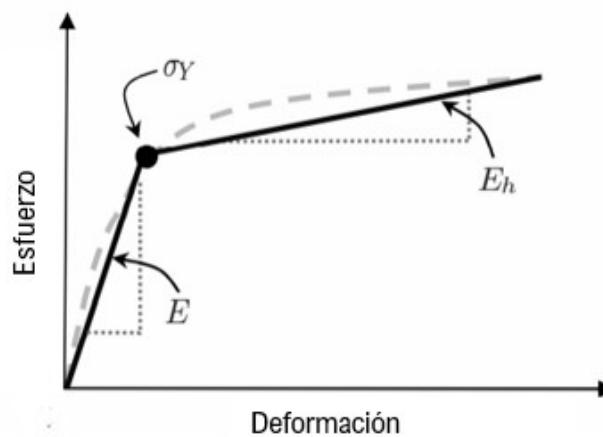
$$E_h(x_i) = x_i^q E_{h0} \quad (q > 1) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde E_i es el módulo de elasticidad del elemento i , E_0 es el módulo de elasticidad del material base, ρ_i es la densidad del elemento, ρ_0 es la densidad del material base, σ_y es

el esfuerzo de fluencia de cada elemento, σ_{y0} es el esfuerzo de fluencia del material base, E_t es el modulo de endurecimiento del elemento y E_{t0} es el modulo de endurecimiento del material base y ρ y q son parámetros de penalización.

Figura 7.

Parametrización de material. Modelo de endurecimiento bilineal.



La densidad se relaciona con la matriz de masa y el módulo de elasticidad (E), esfuerzo de fluencia (σ_y) y módulo de endurecimiento (E_h) se relacionan con la matriz de rigidez (Patel, 2009). Las propiedades de cada elemento son diferentes, dependen de la densidad artificial de dicho elemento y son actualizadas en cada iteración.

En contraste con la metodología tradicional de la técnica de los autómatas celulares descrita en capítulos anteriores, la variable de diseño no es continua, es decir, en este trabajo no se obtendrán variables en el rango de 0-1. Para la conexión del algoritmo de optimización y análisis estructural solo se considera una variable de diseño binaria; esto significa que solo

hay dos tipos de material dentro del dominio de diseño: sólido y hueco con valores de densidad iguales a uno (1) y cero (0) respectivamente.

5.2.2. *Parámetros*

Los valores que no se alteran durante la optimización serán las dimensiones externas de la placa: alto y el ancho; las propiedades del material: módulo de elasticidad del acero A-36, esfuerzo de fluencia, coeficiente de Poisson, densidad del acero, esfuerzo último y módulo de endurecimiento; las condiciones de apoyo y las cargas.

Tabla 8.

Parámetros del problema de optimización.

Parámetro	Valor
Ancho placa	100 [mm]
Alto placa	139 [mm]
Módulo de elasticidad	206100 [Mpa]
Esfuerzo de fluencia	316.5 [Mpa]
Módulo de endurecimiento	2061 [Mpa] (1% del módulo de elasticidad)
Esfuerzo último	600 [Mpa]

5.2.3. *Variables de diseño*

Las variables de diseño dependen de cómo se modele el material. En este trabajo la variable de diseño es la densidad artificial x_i . La placa del disipador se representa con un patrón de ceros y unos, donde cero significa que no hay material y uno quiere decir que sí hay material.

5.2.4. Variables de estado

Para evaluar la capacidad de disipación de energía de un disipador hysterético de acero de placas ranuradas, así como de cualquier otra estructura que absorberá energía, es necesario seleccionar un indicador apropiado que será el objetivo que se busca alcanzar al aplicar algún método de optimización. En este trabajo uno de los indicadores es la capacidad de disipación de energía del disipador por unidad de masa, que equivale a la densidad de energía de deformación total (SENE) que es la suma de la energía de deformación elástica (U_e) y la energía de deformación plástica (U_p). Este valor se usa como variable de estado.

5.2.5. Función objetivo

El propósito de un disipador de energía es absorber la máxima cantidad de energía por medio de deformaciones inelásticas de su material, entonces maximizar el área bajo la curva fuerza-desplazamiento maximiza la absorción de energía, sin embargo, el uso del valor de energía de deformación asociada a deformaciones plásticas como único medio para distribuir material da como resultado una evolución de topología inestable, ya que no se proporciona información para elementos que no se deforman plásticamente pero que están cerca de ceder. Por lo anterior, se utiliza la información de la deformación elástica para asignar material a los elementos que está cerca de entrar a la zona de deformaciones permanentes. La energía absorbida por cada elemento del dominio se puede medir integrando la carga transmitida al elemento sobre el desplazamiento resultante. La deformación plástica se produce una vez que se supera el límite elástico y la deformación total se expresa como:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde ε es la deformación total, ε_e es la deformación elástica y ε_p es la deformación plástica.

La energía total absorbida por el dispositivo, incluyendo la energía que se disipa y la que se recupera, se puede ver en la **Figura 8** y se puede escribir como:

$$U = U_e + U_p = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde σ es el campo de esfuerzos desde el estado no deformado hasta el estado de deformación final debido a las cargas aplicadas (sin deformación recuperable en la descarga) y ε es el campo de deformaciones.

Para comportamiento puramente elástico, la energía que se absorbe debido a deformaciones elásticas del material se mide por la densidad de energía de deformación elástica U_e .

$$U_e = \int_{\varepsilon_{e-i}}^{\varepsilon_{e-f}} \sigma * \varepsilon d\varepsilon_e \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde ε_{e-i} y ε_{e-f} son las deformaciones elásticas iniciales y finales debidas a la carga aplicada.

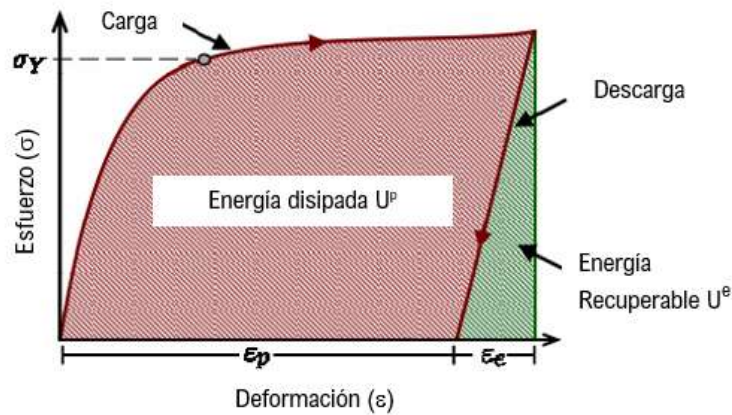
Y la energía absorbida durante las deformaciones inelásticas se mide por la energía de deformación inelástica U_p .

$$U_p = \int_{\varepsilon_{p-i}}^{\varepsilon_{p-f}} \sigma * \varepsilon d\varepsilon_p \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde ε_{p-i} y ε_{p-f} son las deformaciones plásticas iniciales y finales debidas a la carga aplicada.

Figura 8.

Curva esfuerzo-deformación para comportamiento inelástico.



5.2.5.1. Problema multiobjetivo.

Al utilizar la técnica de los Autómatas Celulares Híbridos tradicionales, el problema de optimización es multiobjetivo. La rigidez y el peso son funciones en conflicto, se busca minimizar la masa y simultáneamente maximizar la rigidez que es equivalente a minimizar la energía de deformación (Tovar, 2005).

Siguiendo una formulación similar a la encontrada en la revisión de literatura (Tovar, 2005; Tovar et al., 2006; Gan et al., 2018) el problema se puede plantear como la minimización de la función de coste $c(x)$

$$\underset{x}{\text{minimizar}} \quad c(x) = f(U) + g(M)$$

Ecuación 23

$$\text{sujeto a: } 0 \leq x \leq 1$$

Donde $f(U)$ es una función de la energía de deformación y $g(M)$ una función de la masa.

Existen varios métodos para convertir un problema multiobjetivo en uno sustituto que se pueda resolver con técnicas para problemas con un solo objetivo. Uno de los más usados

es el método de la suma de pesos WSM (Weighted Sum Method) en el que, después de normalizar los objetivos, se puede formar una función compuesta por la suma de los pesos (ω) de los objetivos normalizados:

$$F(x) = \sum_{i=1}^M \omega_i * f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde ω es un vector positivo, no cero en el que $\sum_{i=1}^M \omega_i = 1$

De acuerdo con lo anterior, se define a las funciones $f(U)$ y $g(M)$ como:

$$f(U) = \omega \frac{U}{U_0} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$g(M) = (1 - \omega) \frac{M}{M_0} \quad \text{Ecuación 26}$$

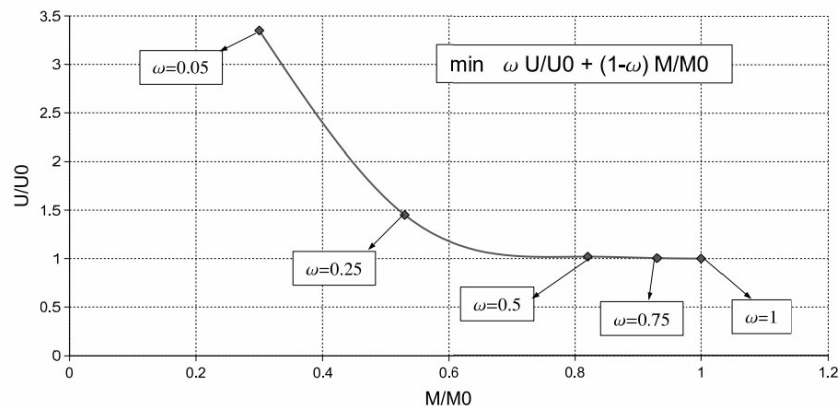
Donde U_0 y M_0 representan la energía de deformación y masa del dominio sólido inicial, respectivamente. El coeficiente ω balancea la participación de los coeficientes normalizados de energía y masa. Entonces el problema de optimización multiobjetivo será:

$$\begin{aligned} \underset{x}{\text{mínimizar}} \quad & c(x) = \omega \frac{U(x)}{U_0} + (1 - \omega) \frac{M(x)}{M_0} \\ \text{sujeto a:} \quad & 0 \leq x \leq 1 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 27}$$

Como todos los pesos (ω) son positivos, el mínimo de la función será un Pareto óptimo, es decir, el conjunto de todas las soluciones obtenidas para los diferentes valores de ω tales que $0 \leq \omega \leq 1$, se conoce como la frontera de Pareto y, como se muestra en la figura, un aumento en dicho coeficiente se traduce en un incremento en la masa de la estructura final (Patel et al., 2008).

Figura 9.

Frontera de Pareto compuesta por todas las posibles soluciones del problema de optimización.



Nota: tomado de Algarra et al. (2009).

5.2.5.2. Problema con único objetivo y restricción de masa.

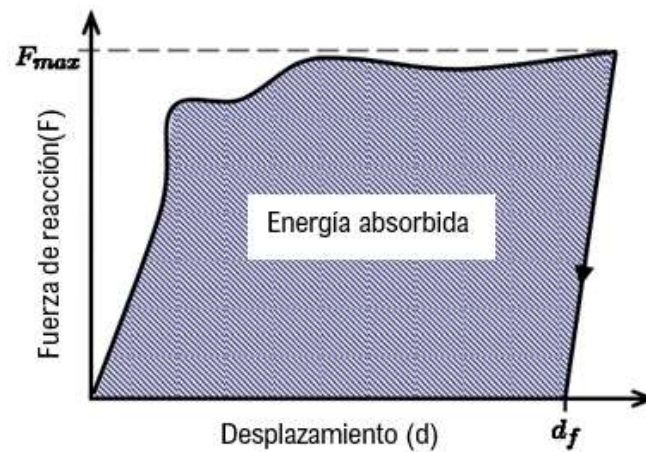
En este trabajo, la energía se calcula solo relacionada con las cargas aplicadas, entonces no se considera la energía recuperada por la respuesta elástica una vez descargado el dispositivo. El área bajo la curva de la **Figura 10** representa el trabajo hecho durante un desplazamiento medido en un punto específico de la estructura. Para un cuerpo inicialmente no deformado, el trabajo realizado por la fuerza externa por medio de un desplazamiento se puede escribir como:

$$W = \int_0^{df} F * dd \quad (28)$$

Donde W es el trabajo hecho por fuerzas externas, F es la fuerza de reacción, d es el desplazamiento causado por la fuerza externa.

Figura 10.

Curva fuerza-desplazamiento.



Utilizando Autómatas Celulares Híbridos (HCA) el objetivo es absorber energía localmente en cada elemento para producir absorción de energía global. Al maximizar el área bajo la curva de la **Figura 10** usando una restricción en la máxima carga impuesta se maximiza la absorción de energía, también se podría usar una restricción de volumen o cantidad de material. Entonces el objetivo en este trabajo es maximizar la absorción de energía restringiendo la masa a permanecer constante a lo largo del proceso de optimización:

$$\text{Máx} \quad W = \int_0^{d_f} F * dd \quad \text{Ecuación 29}$$

5.2.6. Regla de evolución local

5.2.6.1. Basada en diseño completamente esforzado.

Adoptando los fundamentos del diseño completamente esforzado, todos los elementos en la estructura deberían contribuir a la absorción de energía por deformaciones plásticas. Para uniformar la participación de todos los elementos en el diseño, la variable de estado y_i de un

elemento es llevada hacia una variable objetivo y^* . De esta manera surge el siguiente problema de optimización que se modela con la técnica de los HCA:

$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{minimizar}} && \sum_{i=0}^N |\bar{y}_i(x_i) - y^*| \\ & \text{Sujeto a} && \sum_{i=1}^N x_i m_i = Mf \\ & && x_{\min} \leq x \leq 1 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde \bar{y}_i es la variable de estado efectiva que se describe más adelante, N es el número total de elementos dentro del dominio de diseño, V es el volumen fijo.

Para solucionar el problema anterior y considerando lo descrito en la sección de definición de la función objetivo 5.2.5.1, la regla de evolución basada en diseño completamente esforzado es (Tovar, 2005).

$$x_i(t+1) = x_i(t) \left(\frac{y_i^*}{y_i(t)} \right)^{\frac{1}{p-1}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Otras reglas de evolución y distribución del material se basan en estrategias de control entre las que destacan: control de la doble posición, control proporcional, control proporcional integral y control proporcional derivado integral. En general, la regla de evolución tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= x_i(t) + \Delta x_i(t) \\ \text{donde} \quad & -0.1 \leq \Delta x_i \leq 0.1 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde Δx_i es el cambio en la masa del elemento i en la iteración t y depende del error entre la variable de estado efectiva (\bar{y}_i) y su valor objetivo (y^*).

El error entre la variable de estado efectiva (\bar{S}_i) y su valor objetivo (S^*), se define como:

$$\bar{e}_i = \bar{y}_i(t) - y^*(t) \quad \text{Ecuación 33}$$

La variable de estado objetivo se define como un promedio de los valores de energía de deformación de todos los autómatas dentro del dominio de diseño.

5.2.6.2. Estrategias de control.

5.2.6.2.1. Control de doble posición.

El material se distribuye de acuerdo con el signo del error entre la variable de estado efectiva (\bar{S}_i) y su valor objetivo (S^*).

$$\Delta x_i(t) = c_t * \text{signo}(\bar{e}_i) \quad \text{Ecuación 34}$$

$$\text{signo}(\bar{e}_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } \bar{e}_i > 0 \\ -1 & \text{si } \bar{e}_i < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 35}$$

c_t es la constante de proporcionalidad, su elección afecta la convergencia, es recomendable un entre $0.05 > c_t > 0.25$. Valores muy bajos de c_t demoran la convergencia del algoritmo y valores muy altos pueden producir inestabilidad del algoritmo (Tovar et al., 2006).

5.2.6.2.2. Control proporcional (P).

El material se distribuye de acuerdo con el error proporcional entre la variable de estado efectiva (\bar{S}_i) y su valor objetivo (S^*).

$$\Delta x_i(t) = c_p * \bar{e}_i \quad \text{Ecuación 36}$$

c_p es la constante de proporcionalidad, su elección afecta la convergencia, es recomendable un entre $0.05 > c_p > 0.25$ (Tovar et al., 2006).

5.2.6.2.3. Control proporcional integral (PI).

$$\Delta x_i(t) = c_p * \bar{e}_i(t) + c_I * \sum_{\tau=0}^t \bar{e}_i(t - \tau) \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde c_p es la constante de proporcionalidad, c_I es la constante de integralidad, τ es un tiempo o iteración pasada (Tovar et al., 2006).

5.2.6.2.4. Control proporcional integral derivado (PID).

$$\Delta x_i(t) = c_p * \bar{e}_i(t) + c_I * \sum_{\tau=0}^t \bar{e}_i(t - \tau) + c_D * [\bar{e}_i(t) - \bar{e}_i(t - 1)] \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde c_p es la constante de proporcionalidad, c_I es la constante de integralidad, c_D es la constante de derivación y τ es un tiempo o iteración pasada (Tovar et al., 2006).

Finalmente, como se mostrará más adelante, las reglas basadas en estrategias de control se utilizaron basados en la revisión de literatura para el método de Autómatas Celulares Híbridos, sin embargo, dichas reglas no fueron apropiadas para el problema de único objetivo con restricción de masa debido a que el cambio obtenido con las estrategias de control, Δx , no resultaba significativo al momento de hacer las aproximaciones de la variable de diseño a valores de cero o uno y mucho menos al momento de aplicar la restricción de masa que reubicaba algunos elementos.

Por lo anterior y debido a que se necesitan variables discretas, se omitió el uso de las reglas de evolución basadas en estrategias de control (incrementales) para el problema de único objetivo y se tomó como estrategia de evolución la presentada en el capítulo 5.4.2, usando como criterio si \bar{e}_i es mayor o menor que cero.

5.2.7. Valor objetivo de las variables de estado y^*

El valor de energía de deformación objetivo es uno de los parámetros más importantes, pues define el resultado del proceso en cuanto a fracción de masa y cantidad de energía de deformación. En las referencias [Tovar, 2005; Tovar et al., 2006, Gan et al., 2018] se detalla el procedimiento para obtener el valor de la variable de estado y^* que satisface las condiciones de optimalidad del problema de optimización para un cuerpo elástico. Debido a la forma en que se calcula el valor objetivo, cuando el problema tiene no linealidades o grandes deformaciones, no se puede afirmar que el resultado sea un óptimo, pero sí será una opción con mejor comportamiento debido a la uniformidad de la energía en los elementos del dominio.

$$y_i^* = \frac{(1 - \omega) m_o U_o}{\omega p M_o} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde y^* es el valor de energía de deformación objetivo; m_o es la masa de un elemento sólido, p es la penalización, en este caso $p=3$; U_o y M_o son la energía de deformación y la masa del diseño inicial, respectivamente.

La formulación del problema multiobjetivo con reglas basadas en diseño completamente esforzado solo garantiza optimalidad para problemas donde el material se mantiene en el rango elástico y cumple la Ley de Hooke y, considerando que el problema que se está estudiando es la optimización de un disipador de energía por deformaciones histeréticas, el problema es altamente no lineal.

Considerando lo anterior, se puede afirmar que la opción para cálculo de la variable objetivo-presentada en la Ecuación 39 al derivarse de criterios de optimalidad y diferenciación donde una de las asunciones es que se cumple la ley de Hooke por lo que la

relación entre las fuerzas y desplazamientos es lineal, no se garantiza la obtención de un óptimo para el problema. Así, para el problema multiobjetivo que se resolverá con estrategias de control y para el problema de único objetivo se utilizará la Ecuación 40 que calcula la variable objetivo como un promedio de la energía de deformación de todo el dominio.

$$y_i^* = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \quad \text{Ecuación 40}$$

5.2.8. Restricciones

Para el problema de único objetivo con restricción de masa, la masa se controla con una restricción de igualdad:

$$\sum_{i=1}^N x_i m_i = M_f^* \quad \mathbf{0} \leq x_i \leq \mathbf{1} \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde M_f^* es la fracción de masa objetivo.

5.2.9. Variables efectivas

El conjunto de reglas de evolución locales opera de acuerdo con la información del vecindario de cada célula dentro del arreglo de autómatas celulares. La variable de estado efectiva \bar{S}_i permite medir el desempeño estructural promedio de una célula y sus células vecinas y su uso puede verse como una técnica de filtrado que previene o reduce las inestabilidades numéricas como el tablero de ajedrez o dependencia de malla (Patel et al., 2009; Algarra et al., 2009).

$$\bar{S}_i(t) = \frac{S_i(t) + \sum_{k=1}^{\hat{N}} S_k(t)}{\hat{N} + 1} \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde \bar{S}_i es la variable de estado efectiva del elemento i en la iteración t , S_i es el valor de la variable de estado del elemento i en el tiempo t , \hat{N} es el número de células vecinas y depende del tipo de vecindario utilizado y S_k es la variable de estado de cada una de las células vecinas en la iteración t .

También es posible usar una variable de diseño efectiva \bar{x}_i , pero en aplicaciones previas se ha evidenciado que su uso no es tan beneficioso en términos de optimalidad y convergencia (Tovar, 2005). Por lo anterior, en este trabajo se usarán variables efectivas únicamente para la variable de estado.

5.2.10. Criterio para detención del proceso de optimización

Aunque la técnica de los HCA se basa en distribuir material siguiendo reglas locales, el criterio de parada usa información global. Para reducir los efectos de la convergencia temprana, se utiliza el cambio de masa de la iteración previa y de la iteración actual. El cambio de masa en la iteración t se puede calcular como:

$$\Delta M(t) = \sum_{i=1}^N |x_i(t) - x_i(t-1)| \quad \text{Ecuación 43}$$

Entonces el criterio de parada se puede expresar como:

$$\frac{\Delta M(t) + \Delta M(t-1)}{2} < 0.0001 * N \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde N es el número de elementos en el dominio.

5.3. Fase 4: Herramienta de diseño

En este trabajo se utiliza MATLAB (MathWorks, 2020) para controlar el flujo del algoritmo de optimización y la regla de actualización de las variables de diseño (densidades

relativas de cada elemento). El análisis por elementos finitos y determinación de las variables de estado (energía de deformación) se hizo en ANSYS APDL (Ansys Inc, 2020). A diferencia del método de HCA tradicional, aquí se obtendrá un patrón de unos y ceros, lo que significa que se tendrán solo dos estados posibles dentro del dominio de diseño (sólido o hueco). El procedimiento empleado es el que se muestra en la Figura 11.

Inicialmente, se establecieron seis (6) configuraciones iniciales de ranuras del disipador cuya geometría fue representada por una matriz de ceros y unos en el programa MATLAB (MathWorks, 2020), donde cero eran los espacios vacíos y uno eran los espacios que tenían material. Luego, a cada uno de los elementos de la matriz se le asignó un número o nombre que se mantiene fijo durante todo el proceso de optimización. La malla para los autómatas celulares se hizo coincidir con la malla del análisis por elementos finitos para facilitar el proceso de actualización de las variables de estado y de diseño del proceso de optimización, entonces cada elemento de la matriz también puede ser descrito por 4 nodos correspondientes a los 4 nodos del elemento shell 181 utilizado en el análisis estructural. Así, la geometría de los disipadores quedaba finalmente representada por una matriz de ceros y unos, una matriz con el nombre de cada elemento y los nodos que lo conforman y una matriz con las coordenadas geométricas de cada uno de los nodos.

Una vez definida la geometría, se elaboraron las instrucciones para el análisis estructural en un bloc de notas (documento tipo .txt) que contienen: el tipo de análisis= estático; condiciones de contorno= empotrado en la base, desplazamiento horizontal en la parte superior y restricción de desplazamientos y rotaciones fuera del plano en la parte superior; protocolo de carga= protocolo de carga cíclica de uno o más ciclos de desplazamiento; tipo de elemento finito = shell 181; propiedades del material = propiedades

elásticas e inelásticas del acero; impresión de resultados de energía de deformación y se verificó que las instrucciones escritas funcionaran adecuadamente para ANSYS APDL (Ansys Inc, 2020).

5.3.1. ANSYS APDL

Como se mencionó en la sección anterior, el software ANSYS APDL (Ansys Inc, 2020) fue utilizado para el análisis estructural. Su función dentro del proceso de optimización es la de obtener los valores de la variable de estado (energía de deformación). Las instrucciones para el análisis estructural se escribieron en un archivo .txt

```

/BATH
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural
/PREP7
! Definición del tipo de elemento y espesor
!* Tipo de elemento
ET,1,SHELL181
!*Espesor de la placa
R,1,0.008
!*
!----Material-----

! Definición del módulo de Young, relación de Poisson y densidad
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.061e11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

```

```

MPDATA,DENS,1,,7850
TB,MISO,1,1,2,
TBPT,DEFI,0.001535,316.5E6
TBPT,DEFI,0.13909,6E8

```

Para formar la geometría del disipador, se importan archivos .txt guardados desde Matlab (MathWorks, 2020) que contienen la cantidad de nodos, cantidad de elementos, coordenadas de los nodos, cantidad de nodos por elemento e información de que nodos conforman un elemento.

```

!-----Nodos-----
*DIM,Nn,,1,1
*VREAD,Nn,'Nnode','txt',' ',IJK,1,1,1,0,
(E16.7)
*DIM,Xnode,,Nn(1),1
*VREAD,Xnode,'XN','txt',' ',IJK,Nn(1),1,1,0,
(E16.7)
*DIM,Ynode,,Nn(1),1
*VREAD,Ynode,'YN','txt',' ',IJK,Nn(1),1,1,0,
(E16.7)
*DIM,Znode,,Nn(1),1
*VREAD,Znode,'ZN','txt',' ',IJK,Nn(1),1,1,0,
(E16.7)
*DO,I,1,Nn(1),1
N,I,Xnode(I),Ynode(I),Znode(I)
*ENDDO
!NLIST,ALL

!-----elementos-----
*DIM,NL,,1,1

```

```

*VREAD,NL,'Nel','txt',' ',IJK,1,1,1,0,
(E16.7)
*DIM,II,,NL(1),1
*VREAD,II,'I1','txt',' ',IJK,NL(1),1,1,0,
(E16.7)
*DIM,JJ,,NL(1),1
*VREAD,JJ,'I2','txt',' ',IJK,NL(1),1,1,0,
(E16.7)
*DIM,KK,,NL(1),1
*VREAD,KK,'I3','txt',' ',IJK,NL(1),1,1,0,
(E16.7)
*DIM,LL,,NL(1),1
*VREAD,LL,'I4','txt',' ',IJK,NL(1),1,1,0,
(E16.7)
*DO,I,1,NL(1),1
E,II(I),JJ(I),KK(I),LL(I)
*ENDDO
!ELIST,ALL

!----Cantidad de elementos-----
*GET,NEL,ELEM,,NUM,MAX

!----Cantidad de nodos-----
*GET,NNO,NODE,,NUM,MAX

```

Para crear y asignar la carga cíclica:

```

!----Carga-ciclica-----
*DIM,CargaCiclica,TABLE,5,1,1,Time, ,
*SET,CARGACICLICA(1,0,1) , 0
*SET,CARGACICLICA(2,0,1) , 1
*SET,CARGACICLICA(2,1,1) , 0.01

```

```
*SET,CARGACICLICA(3,0,1) , 2
*SET,CARGACICLICA(4,0,1) , 3
*SET,CARGACICLICA(4,1,1) , -0.01
*SET,CARGACICLICA(5,0,1) , 4
!*
save,file,db
```

5.3.2. *MATLAB*

Antes de iniciar el proceso iterativo:

- I. Calibrar el modelo de elementos finitos y exportar los datos de la malla, esto con el fin de hacer coincidir la malla del análisis estructural con la malla de autómatas celulares.
- II. Ajustar la malla para eliminar las diferencias insignificantes en las coordenadas X y Y de los puntos que deberían estar sobre el mismo eje, esto para poder armar matrices idénticas al dominio (Ej.: un punto con coordenadas $X=0.05\text{m}$, $Y=0.1\text{m}$ y otro punto con coordenadas $X=0.049$, $Y=0.15$ se ajustan para quedar sobre la misma coordenada X).
- III. Establecer dominio inicial como una malla de espacios con identificación fija durante el proceso de optimización (incluye nombre de nodos, nombre de elementos, nodos por elemento).

Durante el procedimiento iterativo:

- IV. Cargar los datos de identificación de nodos, identificación de elementos, nodos por elemento, energía de deformación por elemento.

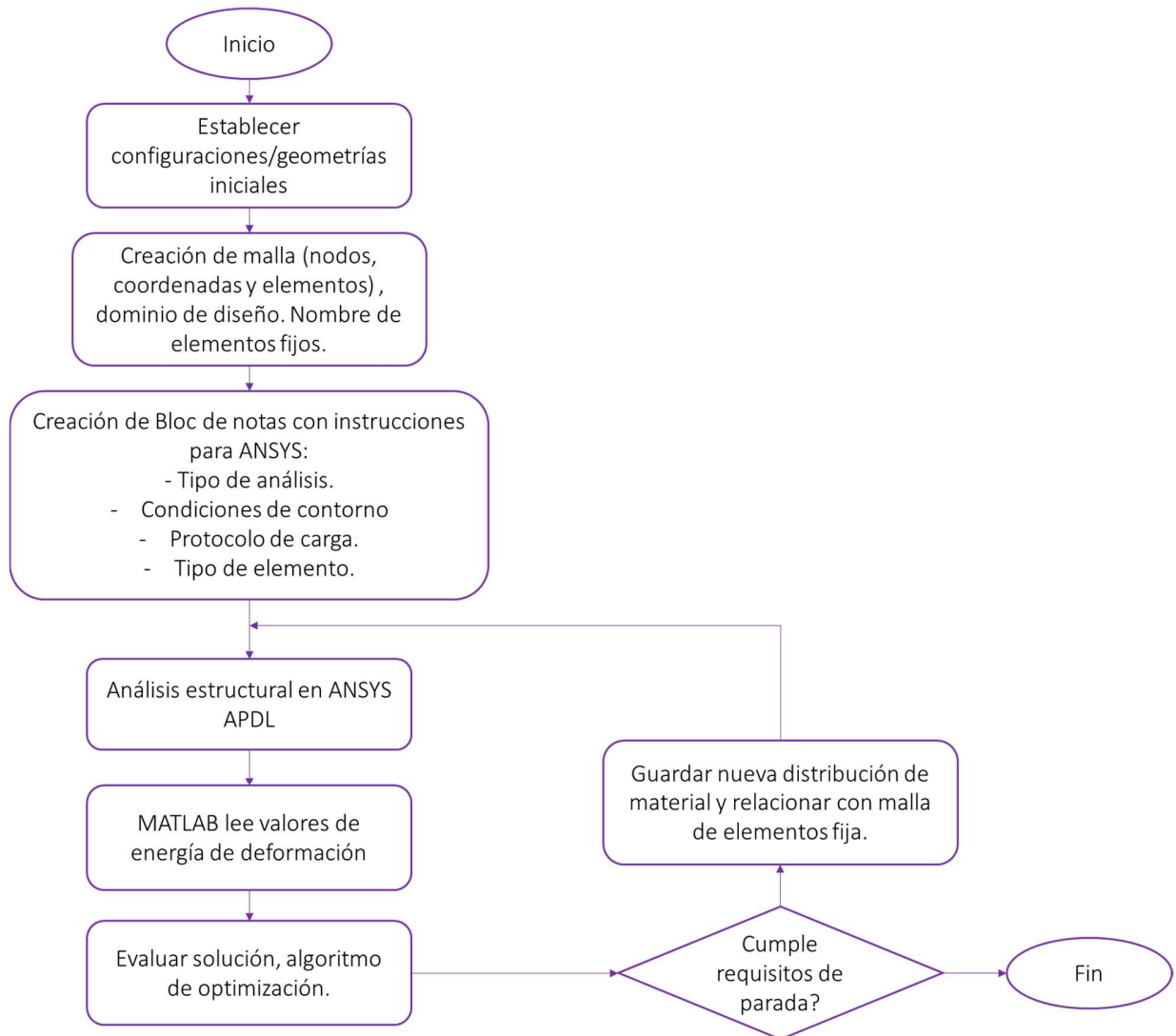
- V. Calcular la cantidad de nodos (N), cantidad de elementos (Nel) y nodos por elemento (NNpe).
- VI. Crear las matrices de nodos, elementos y energía de deformación. Para esto se utilizan las funciones descritas más adelante en la sección 4.5.2.1.
- VII. Crear y calcular las matrices de estímulos efectivos que dependen del tipo de vecindario y tipo de frontera en MATLAB.
- VIII. Aplicar la regla de evolución en MATLAB.
- IX. Aplicar las restricciones en MATLAB.
- X. Exportar los datos de la nueva ubicación de los elementos hacia archivos .txt
- XI. Ejecutar ANSYS APDL en batch. El programa de análisis estructural se alimenta de líneas con instrucciones escritas en un archivo .txt
- XII. Exportar la información de energía de deformación desde ANSYS APDL hacia un documento tipo texto.
- XIII. Lectura de los valores de energía de deformación en MATLAB y repetición de todo el proceso si es necesario.

5.3.2.1. Descripción funciones creadas.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se crearon las funciones descritas a continuación y que se presentan en el Anexo 1.

- `malla(N,Nel,NNpe,XY,elementos)`: con esta función se obtiene una vista en MATLAB, netamente gráfica, de la distribución de material.
- `sed(Nel,NNpe,XY,elementos,SEDe)`: con esta función se obtiene una vista en MATLAB, netamente gráfica, de la distribución de energía de deformación.

- `masanodos(XY_ID)`: esta función se utiliza para poder convertir el listado de nodos y sus coordenadas en una matriz organizada; la función utiliza las coordenadas de cada nodo para organizar sus nombres en una matriz.
- `matrizelementos(matriz_nodos,elementos_ID,SEDe)`: utilizando la matriz de nodos, esta función crea la matriz de elementos organizados de manera idéntica al programa de elementos finitos usando la información de nodos por elementos. Una vez creada la matriz de elementos, se crea la matriz de energía asignando la energía de deformación a cada elemento identificado con su respectivo nombre y posición.
- `datosparaansys(matriz_elementos,Xnew1,Nel,NNpe,elementos_ID,XY_ID)`
: al finalizar cada iteración, esta función se encarga de identificar los elementos que siguen existiendo y los que antes existían y ahora son cero, les asigna un nombre nuevo buscando que todos los elementos dentro del dominio tengan números consecutivos para que ANSYS los pueda leer. Finalmente, crea un documento que relaciona el nombre nuevo del elemento con su nombre original e invariable en Matlab; de esta manera cuando salga la información de energía de deformación por elemento en ANSYS, Matlab sabrá a qué elemento corresponde dentro del dominio de diseño.

Figura 11.*Diagrama de flujo herramienta de diseño.*

5.3.3. Validación de la herramienta de la herramienta de diseño

5.3.3.1. Validación del modelo de elementos finitos.

a. Un ciclo de carga

El modelo numérico del disipador se validó comparando los resultados obtenidos del análisis estructural contra los obtenidos en Ghabraie et al. (2010) y Ferrer (2018).

Para construir el modelo en ANSYS (Ansys Inc, 2020), se siguió lo explicado en capítulos anteriores sobre análisis por elementos finitos con una malla de 1.5mm para que la cantidad de elementos del análisis fuera similar a la de los otros autores y al tratarse de un solo ciclo de carga se usó el modelo de endurecimiento isotrópico.

El ciclo de desplazamiento se compone de tres movimientos aplicados a la parte superior de la placa en dirección X, uno de 10 mm a la derecha, un segundo movimiento de 20 mm a la izquierda y finalmente otro de 10 mm a la derecha para volver a su posición original.

Masa=0.747 kg

Volumen=9.52E-05 m³

Cantidad de elementos = 5374 (malla de 1.5mm)

Figura 12.

a) Condiciones de contorno b) Distribución de esfuerzos en ANSYS.

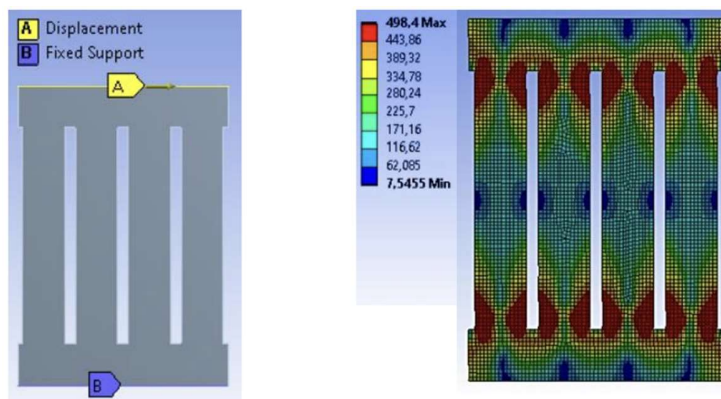


Tabla 9.*Resultados validación FEM para un ciclo de carga.*

Autor	Cantidad de energía disipada (J)	Diferencia (%)
Ghabraie et al. (2010)	1124 J	Base
Ferrer y Villalba (2018)	1085 J	3,50%
Este trabajo	1100 J	2,13%

b. Protocolo de carga con 27 pasos

Se usó el modelo para calcular la capacidad de absorción de energía del dispositivo SL4 presentado en Chan y Albermani (2008). Para el modelo se siguió lo descrito en secciones anteriores utilizando el modelo de endurecimiento cinemático, elementos con tamaño de 2.5mm y como el modelo no predice la falla, se tomó información de los experimentos realizados en el trabajo Chan y Albermani (2008) para determinar cuántos ciclos de carga aplicar.

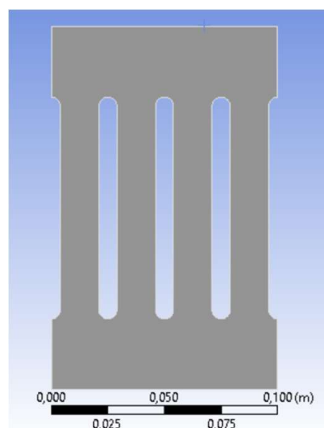
Figura 13.*Dispositivo SL4.**Nota:* Adaptado de Chan & Albermani (2008).

Tabla 10.

Resultados validación FEM para veintisiete ciclos de carga.

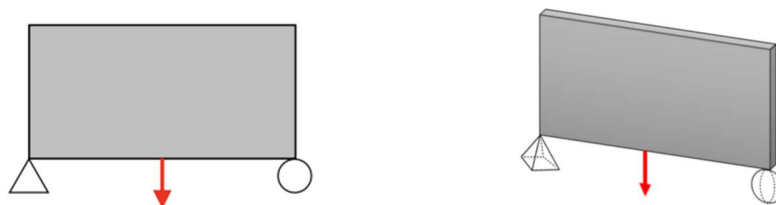
Autor	Cantidad de energía disipada (J)
Chan y Albermani [11]	10300 J
Este trabajo	10700 J

5.3.3.2. Validación del algoritmo de optimización.

Para la validación del algoritmo de optimización de los autómatas celulares híbridos, se replicó el problema de optimización de la viga bidimensional tipo Michelle presentada en el trabajo de Tovar (2005). Como se describe en la referencia, el dominio de diseño se define como un área de $50 \times 25 \text{ mm}^2$ con 1mm de espesor, la viga se encuentra simplemente apoyada, en su esquina inferior izquierda tiene un apoyo de segundo grado que restringe completamente los desplazamientos y en la esquina inferior derecha se restringen los desplazamientos en la dirección vertical con un apoyo de primer grado. En la mitad del borde inferior se aplica una carga puntual de 100 N.

Figura 14.

Viga Michell antes de optimización.



El dominio se discretizó con una malla de elementos cuadrados de 1mm. Las propiedades del material fueron las mismas de la referencia. Densidad= 2000 kg/m^3 , módulo

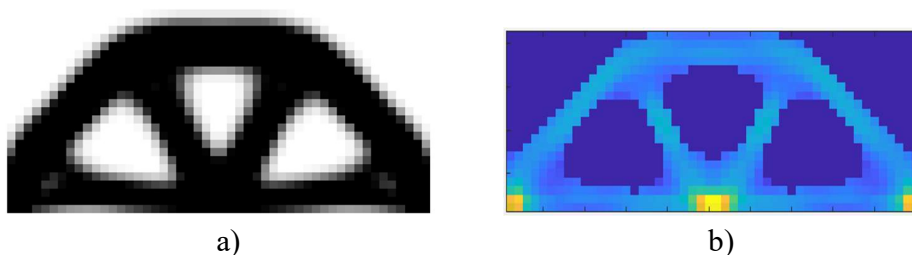
de elasticidad de 20 GPa y módulo de Poisson de 0.3. La información faltante necesaria para el análisis por elementos finitos se complementó con valores acordes a lo descrito para el problema.

El valor óptimo calculado para la variable de estado fue de $y^* = 1,886 \text{ Mpa}$ y en el artículo de referencia era de $y^* = 1,808 \text{ Mpa}$, considerando que parte de la información fue completada y que algunas decisiones tomadas para el análisis estructural no se especifican en el trabajo de referencia, se considera que la diferencia es aceptable.

Para efectos de la comparación, se trabajó con el caso 4 donde se usa un vecindario de Moore tanto para el cálculo de las variables efectivas de diseño \bar{x} como para las variables efectivas de estado \bar{y} . De acuerdo con la referencia, “una pequeña oscilación en la variación de la masa impide la convergencia del algoritmo antes de 60 iteraciones” (Tovar, 2005), por lo que en este trabajo se hizo una modificación en la regla de convergencia para que el proceso se detuviera cuando no hubiera un cambio significativo en la cantidad de masa durante 2 iteraciones y no 3 como en la referencia y de esta manera bastaron 35 iteraciones.

Figura 15.

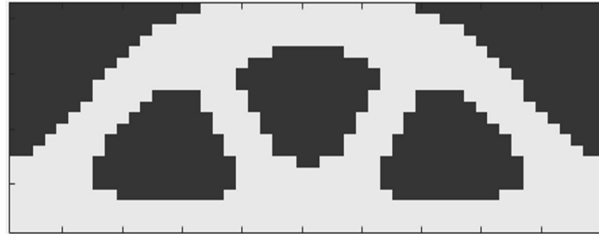
Viga Michell optimizada a) Tovar 2005 b) Este trabajo.



Finalmente, el patrón con densidades intermedias se convirtió a un patrón de unos y ceros (blanco y negro, con material y sin material) haciendo uso de la técnica de filtrado propuesta en Andreassen et al. (2011).

Figura 16.

Viga Michell optimizada patrón de unos y ceros.



5.4. Fase V: Aplicación de la herramienta de diseño en un disipador de placas ranuradas

A partir de una placa con dimensiones 100mm x 139mm se trabajaron seis (6) geometrías iniciales para el proceso de optimización:

- i) Ranuras rectangulares verticales de 5mmx100mm
- ii) Una ranura circular de radio 25mm
- iii) Dos ranuras circulares de radio 18mm
- iv) Cuatro ranuras circulares de radio 12.5mm
- v) Cuatro ranuras cuadradas de 22.5mm
- vi) Ocho ranuras rectangulares de 12.5mmx20mm
- vii) Cuatro ranuras rectangulares horizontales.

Se trabajaron dos tamaños de malla rectangular para discretización del dominio:

- a) Elementos con tamaño máximo de 2.5mm
- b) Elementos con tamaño máximo de 1mm

5.4.1. Problema multiobjetivo

De acuerdo con la metodología de los autómatas celulares híbridos descrita en el capítulo 0 sección 5.2.5.1, se abordó el problema como uno multiobjetivo donde las funciones en conflicto eran la cantidad de masa y la cantidad de energía de deformación almacenada.

Para ajustar el algoritmo al problema de optimización de un disipador, fue necesario ajustar algunos factores como: el porcentaje de participación del valor de la energía de deformación en el cálculo del valor de energía objetivo (ω), el tamaño del vecindario para el cálculo de las variables efectivas de diseño (\bar{x}) y de estado (\bar{y}) y el criterio de aproximación del dominio con densidades intermedias a un dominio de ceros y unos.

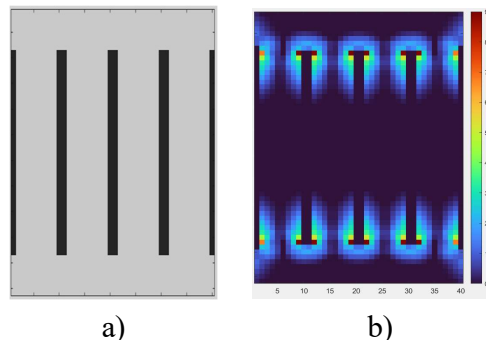
Porcentaje de participación del valor de la energía de deformación en el cálculo del valor de energía target u objetivo (ω)

Se asignaron varios valores a este porcentaje para ver como influía en la evolución. Los valores de la muestran que el valor del objetivo y^* disminuye a medida que se incrementa ω , por lo que entre más grande sea ω más masa abra, es decir, se conservaran más elementos o aparecerán más elementos nuevos.

Para ver el efecto de manera gráfica, se ejecutó la evolución con la regla basada en diseño completamente esforzado y el resultado se convirtió a un patrón de ceros y unos con una estrategia bastante sencilla para propósitos del ejercicio se selección de ω . Esta estrategia consiste en comparar los nuevos valores de la variable de diseño contra 1; si el valor es menor que uno el elemento vale cero (negro) y si es mayor que uno ele elemento vale uno (gris).

Figura 17.

Distribución inicial de energía geometría de 4 ranuras rectangulares verticales a) geometría inicial b) distribución de energía de deformación.



Como se puede observar, para valores de 10% y 20% la participación de la masa es muy baja y la posibilidad de que se pierda el sentido físico del problema al separarse el dominio de diseño es bastante alta y para valores de más del 50% se conserva demasiada masa lo que podría retardar la convergencia del algoritmo y obtención de dispositivos óptimos desde el punto de vista de reducción del material. Antes de tomar una decisión respecto al valor de ω se hizo el mismo ejercicio para una geometría inicial con menos concentración de esfuerzos, como se puede ver en la Tabla 12.

Tabla 11.

Porcentaje de participación de la energía de deformación en la regla de evolución del problema multiobjetivo, ranuras rectangulares verticales.

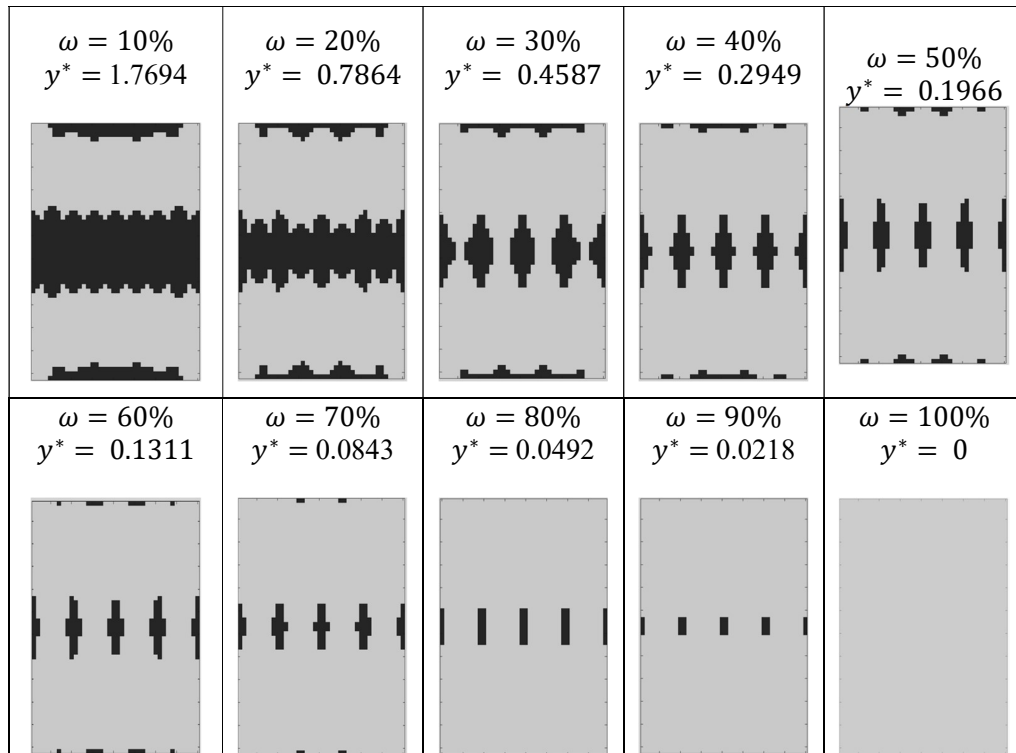


Figura 18.

Distribución inicial de energía geometría de 4 ranuras circulares a) geometría inicial b) distribución de energía de deformación

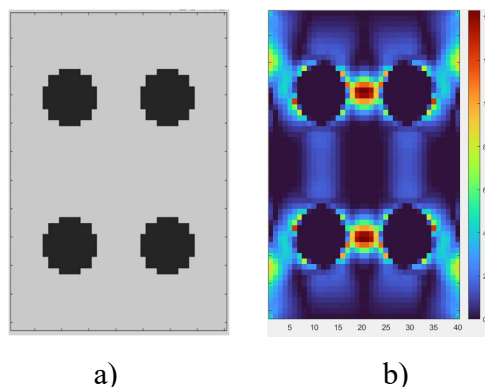
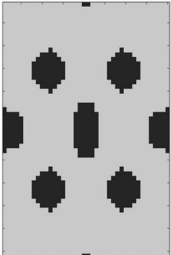
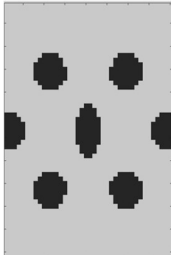
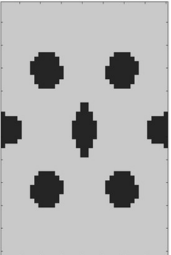
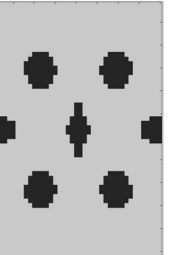
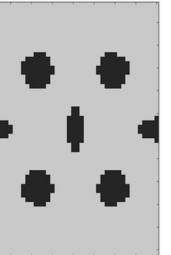
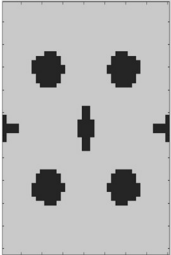

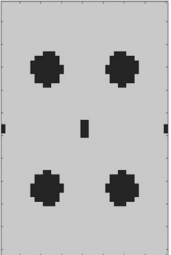
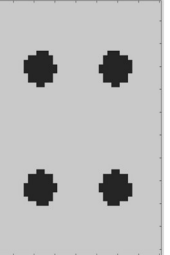
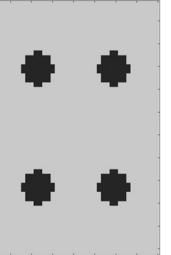


Tabla 12.

Porcentaje de participación de la energía de deformación en la regla de evolución del problema multiobjetivo, ranuras circulares.

$\omega = 10\%$ $y^* = 4.8505$ 	$\omega = 20\%$ $y^* = 2.1558$ 	$\omega = 30\%$ $y^* = 1.2575$ 	$\omega = 40\%$ $y^* = 0.8084$ 	$\omega = 50\%$ $y^* = 0.5389$ 
$\omega = 60\%$ $y^* = 0.3593$ 	$\omega = 70\%$ $y^* = 0.2310$ 	$\omega = 80\%$ $y^* = 0.1347$ 	$\omega = 90\%$ $y^* = 0.0599$ 	$\omega = 100\%$ $y^* = 0$ 

Fuente: elaboración propia.

Se observó que, para geometrías iniciales con buena distribución de valores de energía, es decir, sin zonas con altas concentraciones, conviene usar porcentajes de participación de energía bajos para que sea la masa la que tenga mayor participación y pueda haber cambios significativos en la evolución.

En este trabajo se optó por $\omega=30\%$ ya que se evidencia que es conveniente para varios tipos de geometría inicial.

Figura 19.

Líneas de código en Matlab para cálculo de variable de estado objetivo para el problema multiobjetivo

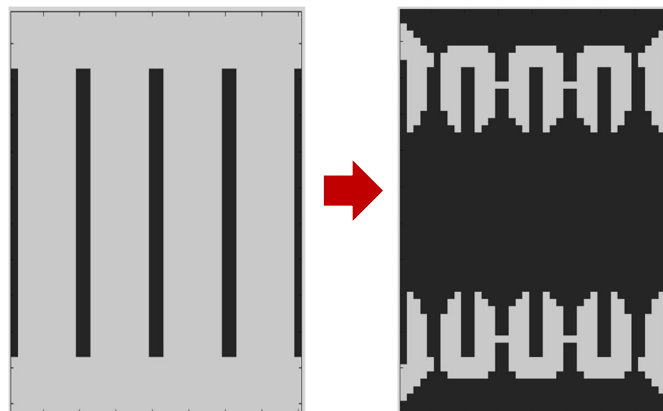
```
w=0.3;
do=7850; %densidad del material en kg/m3
p=3;%penalización
Uo=sum(sum(Se)); %energía de deformación total en J
vo=0.0025*0.0025*0.008; %volumen de un solo elemento en m3
mo=do*vo; %masa de un elemento solido
Mo=do*sum(sum(X))*vo; % masa total
y_target=((1-w)/w)*(mo/p)*(Uo/Mo);
```

Tamaño del vecindario para cálculo de las variables efectivas de diseño (\bar{x}) y estado (\bar{y})

Caso 1. Cero vecinos para la variable de diseño y cero vecinos para la variable de estado.

Figura 20.

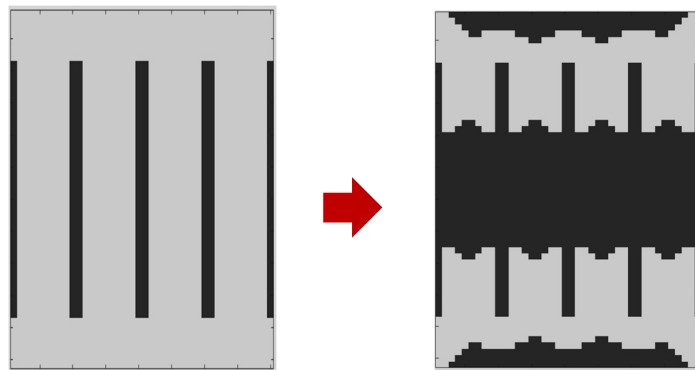
Cantidad de vecinos para \bar{x} y \bar{y} problema multiobjetivo. Caso 1. Cero vecinos para la variable de diseño y cero vecinos para la variable de estado.



Caso 2. Cero vecinos para la variable de diseño y ocho vecinos para la variable de estado.

Figura 21.

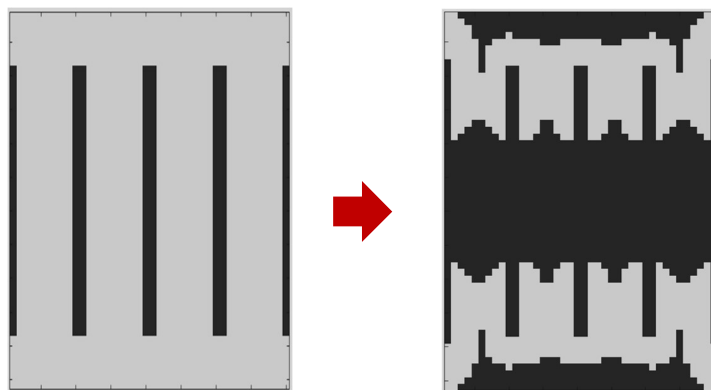
Cantidad de vecinos para \bar{x} y \bar{y} problema multiobjetivo. Caso 2. Cero vecinos para la variable de diseño y ocho vecinos para la variable de estado.



Caso 3. Ocho vecinos para la variable de diseño y cero vecinos para la variable de estado.

Figura 22.

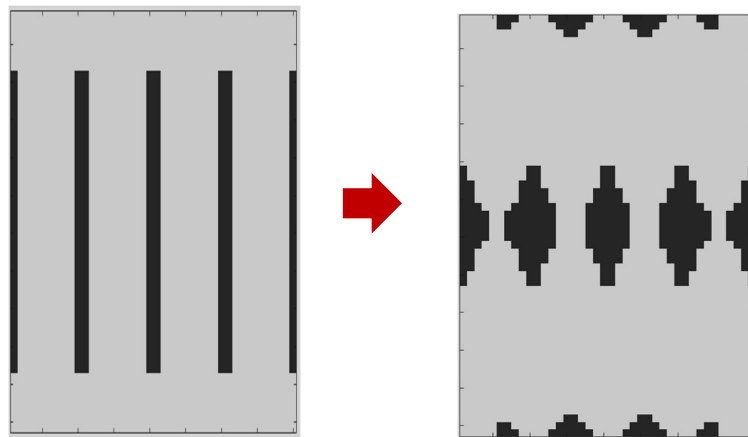
Cantidad de vecinos para \bar{x} y \bar{y} problema multiobjetivo. Caso 3. Ocho vecinos para la variable de diseño y cero vecinos para la variable de estado.



Caso 4. Ocho vecinos para la variable de diseño y ocho vecinos para la variable de estado.

Figura 23.

Cantidad de vecinos para \bar{x} y \bar{y} problema multiobjetivo. Caso 3. Ocho vecinos para la variable de diseño y ocho vecinos para la variable de estado. Fuente: elaboración propia.



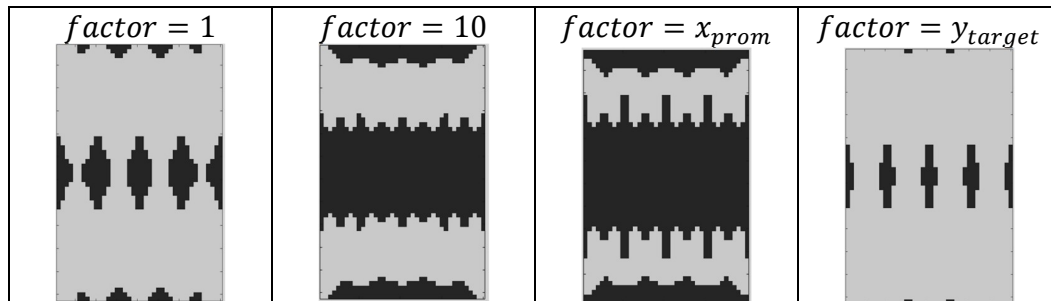
Del análisis anterior se concluye que es necesario usar el vecindario de Moore completo tanto para la variable de diseño como para la variable de estado para prevenir que se separe el dominio de diseño, adicionalmente se observa que para cualquiera de los otros casos al algoritmo le resulta difícil modificar los orificios de la geometría inicial y estos permanecen en la evolución. En este trabajo se usó el caso 4.

Criterio de aproximación del dominio con densidades intermedias a un dominio de ceros y unos.

Para seleccionar el factor de aproximación primero se revisaron los valores que tomaba la nueva variable de diseño luego de aplicar la regla de evolución. Para el caso con geometría inicial de ranuras verticales y la regla de evolución de la Ecuación 31, los valores iban desde 0.0475 hasta 149.82 por lo que se probó con algunos valores al azar dentro de ese rango.

Tabla 13.

Selección del factor de aproximación problema multiobjetivo.



Lo anterior dejó en evidencia que para que el dominio se mantuviera unido el valor del factor de aproximación debía ser un número menor que 1. Para no dejar este valor tan desligado del problema, se optó por asignarle el mismo valor que a la variable de estado objetivo o target.

5.4.2. Problema de único objetivo con restricciones

Para el problema con único objetivo también fue necesario hacer ajustes para poder aplicar el algoritmo al problema de optimización de un disipador histerético de placas ranuradas: regla de evolución de los autómatas celulares y valor de la variable de estado objetivo y^*

5.4.2.1. Regla de evolución.

Durante la planeación de este trabajo de investigación se había acordado aplicar el método de los autómatas celulares híbridos tal cual se mostraba en las revisiones de bibliografía, sin embargo, al requerir una variable de diseño discreta y no continua y también mantener el mismo valor de masa a lo largo de las iteraciones, las reglas de evolución basadas en estrategias de control no representaban un cambio lo suficientemente grande como para permitir la evolución o para reflejar un cambio de una iteración a otra.

De acuerdo con la discusión anterior, se optó por no probar más estrategias de la teoría de control y se buscaron reglas de evolución consideradas más agresivas que permitieran ver cambios en la geometría del disipador, se seleccionó de la revisión de bibliografía una regla que se utilizó para la optimización topológica basada en autómatas celulares híbridos de parachoques delanteros en automóviles.

5.4.2.1.1. Regla de Gan.

La regla a la que hace referencia este numeral es la utilizada por Gan et al. En su trabajo titulado “A hybrid cellular automaton–bi-directional evolutionary optimization algorithm for topological optimization of crashworthiness” en el que el esquema de interpolación del material es similar al utilizado en este trabajo: la densidad, el módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia y el módulo tangente se relacionan con la variable de diseño x_i . A diferencia del algoritmo de los autómatas celulares híbridos en el que se usan variables continuas, en el trabajo de Gan et al. Se utiliza una variable de diseño discreta, es decir, solo hay dos estados posibles (sólido o vacío) (Gan et al., 2018).

Cuando la información efectiva (variable de estado efectiva \bar{y}) es mayor que el valor de referencia o target, el elemento tendrá preferencia para ser conservado y los elementos que contribuyan poco serán removidos. Actualizar la variable de diseño depende de la información de estado efectivo en lugar de información de gradiente así:

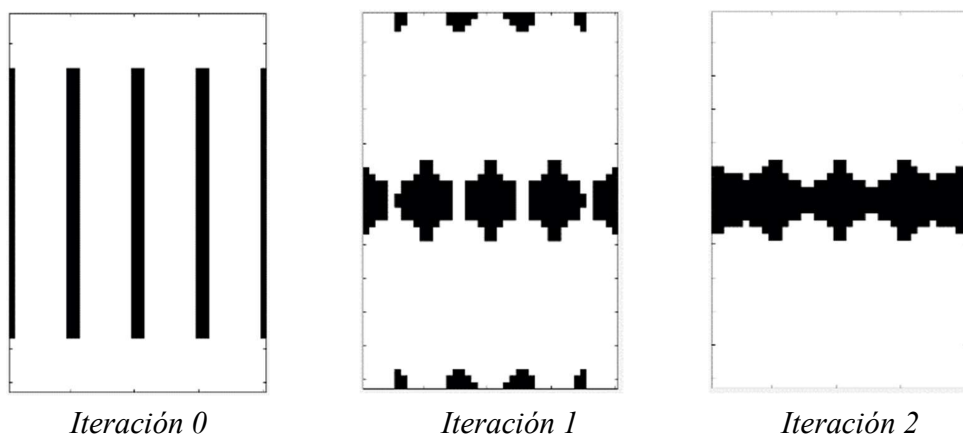
$$x_i = \begin{cases} 0 & \text{si } \bar{y}_i - y^* < 0 \\ 1 & \text{si } \bar{y}_i - y^* \geq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde x_i es la densidad relativa que puede valer 1 (elemento lleno) o 0 (elemento vacío), \bar{y} es la variable de diseño efectiva y y^* es la variable target u objetivo con la que se busca uniformar la distribución de energía de deformación dentro del dominio de diseño.

Al implementar la regla de la Ecuación 45 como criterio para la evolución de los autómatas, se evidenció que varios elementos del dominio tenían energías de deformación efectivas inferiores a la energía objetivo (energía promedio) debido a la concentración de esfuerzos en algunas regiones de la geometría inicial, por este motivo el proceso de eliminación resultaba muy agresivo pues la única instrucción que recibía el algoritmo era eliminar los elementos cuya energía efectiva fuera menor que la energía objetivo y el algoritmo no tenía herramientas o capacidad de arrojar un resultado con sentido físico. Como se puede ver en la figura n. el dominio se separaba, eliminando por completo el material con energías de deformación más bajas sin considerar que su ubicación daba sentido físico al problema.

Figura 24.

Inestabilidades numéricas por regla de evolución.

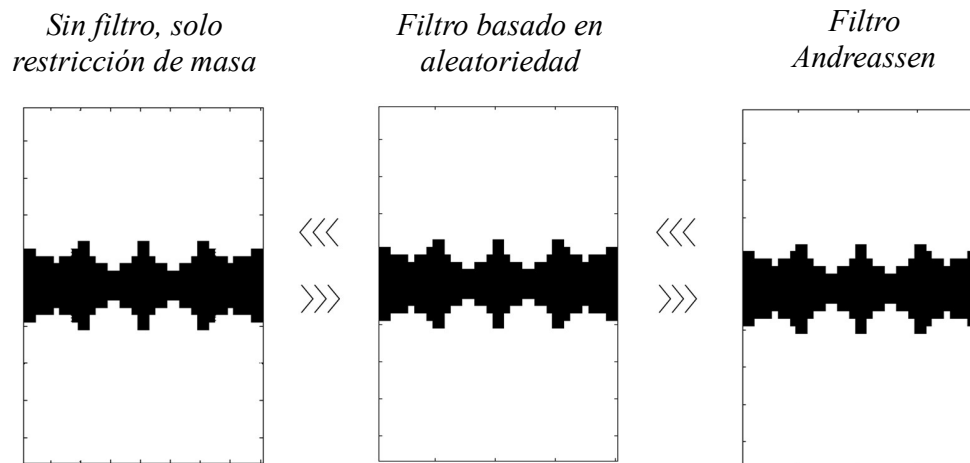


Para evitar el problema de inestabilidad numérica que se presentó, se optó por utilizar técnicas de filtrado como la propuesta en Andreassen et al. (2011) y otra estrategia basada en comparar los nuevos valores obtenidos contra un valor aleatorio para que ciertos elementos no se pudieran eliminar, sin embargo, no funcionó. Como se esperaba, la técnica de los autómatas celulares híbridos, al utilizar los valores del vecindario en la regla de evolución,

actua de manera similar a una tecnica de filtrado; por lo que añadir una tecnica de filtrado adicional solo volvió el proceso más largo para llegar al mismo resultado.

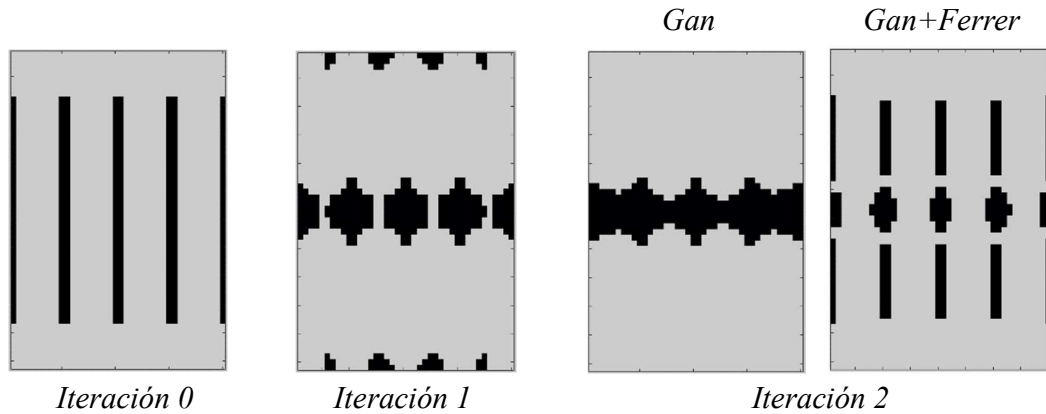
Figura 25.

Efecto algunas técnicas de filtrado en la evolución. Problema único objetivo.



5.4.2.1.2. Regla de Gan complementada con estrategia de Ferrer.

Como se discutió en la sección anterior, el uso de la regla descrita en la Ecuación 45 resultó no ser efectiva para el problema de optimización abordado en este trabajo y las técnicas de filtrado probadas no fueron útiles, así que la evolución perdía sentido físico al dividir el dominio de diseño por completo. Para dar solución a los inconvenientes mencionados, se aplicó la regla descrita por la Ecuación 45 y se complementó con la estrategia implementada en Ferrer (2018) que asigna niveles de importancia a cada uno de los elementos del dominio de diseño de acuerdo con su valor de variable de estado y a la cantidad de vecinos o elementos cercanos.

Figura 26.*Evolución implementando la regla de Gan+Ferrer*

La estrategia descrita por Ferrer (2018) crea una matriz que contiene la información de número de elemento, el error o diferencia entre la variable de estado (energía de deformación) del elemento y la variable de estado objetivo y valor de la variable de diseño efectiva (cantidad de vecinos con masa dentro del vecindario). Esta matriz se ordena de manera descendente desde el elemento con mayores posibilidades de quedarse porque tiene menor “error” hasta el elemento con menos posibilidades de quedarse. En primer lugar, se aplica la regla de Gan y se cuentan cuantos elementos de los que inicialmente tenían masa, se convirtieron en ceros. Luego usando la matriz mencionada se vuelve a asignar valores de 1 a los elementos de mayor importancia hasta completar el valor de masa fijo dentro del dominio. Finalmente, se hace el chequeo de elementos flotantes para reubicar los elementos que hayan quedado sin vecinos pues general inestabilidades numéricas.

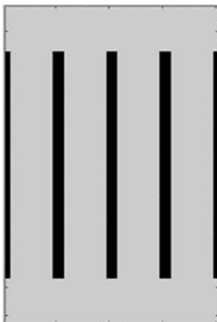
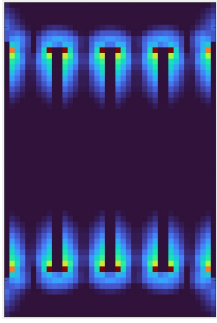

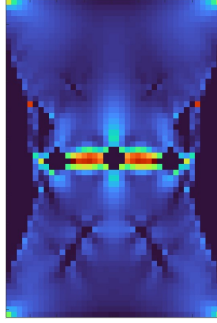
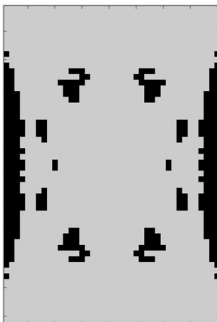
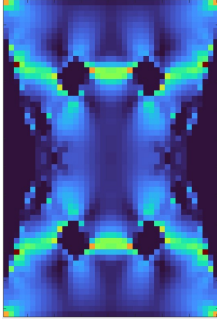
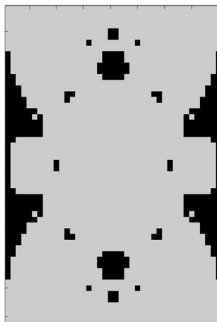
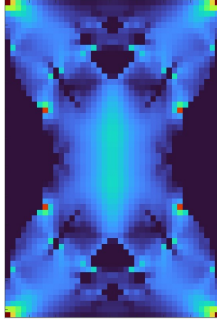
Aunque la estrategia utilizada funcionó para el problema de separación del dominio de diseño, se evidenció que, en el segundo paso de su aplicación, es decir, cuando los elementos pasan de cero a uno de acuerdo con su importancia dentro de la matriz, se pierde la simetría. Esta pérdida de simetría se debe a que por la simetría de la distribución de valores

de energía de deformación que llegan del análisis por elementos finitos, varios elementos tienen los mismos valores para las variables de estado y de diseño y algunos no alcanzan a cambiar de cero a 1 por su ubicación dentro de la matriz de importancia. Por ejemplo, el elemento 100 y 101 tienen el mismo valor de “error”, pero el contador para cambio de cero a 1 solo llega hasta 100, es decir, el elemento 100, que antes era un cero, va a convertirse en 1 mientras que el elemento 101 seguirá siendo cero.

Para verificar la influencia de esta pérdida de simetría en los resultados finales, se optó por: a) optimizar usando como dominio de diseño toda el área del disipador hasta su convergencia para ver a que resultado llegaba en geometría y valor de energía de deformación b) Una vez converja el algoritmo de optimización, aplicar una técnica para volver simétrico el resultado final del proceso y c) desde el inicio utilizar como dominio de diseño un cuarto del área del disipador y replicar su evolución al resto de área, es decir, asegurar la simetría en cada iteración.

Como se puede observar en la tabla 14, al comparar los resultados de los casos a) y b) se puede decir que la simetría del disipador favorece su capacidad de disipación de energía para las condiciones de este estudio.


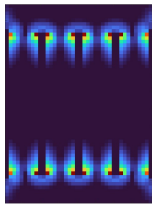
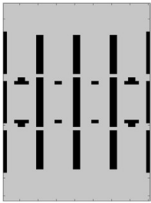
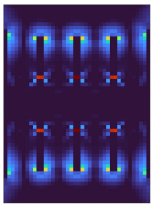
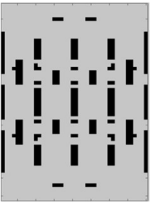
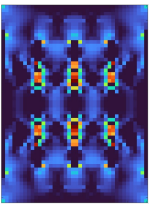
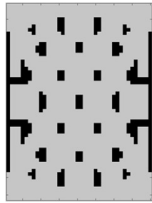
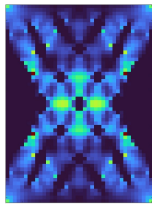

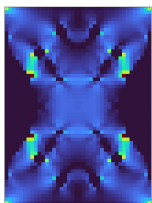

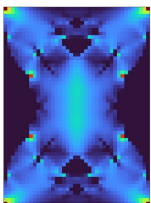
Tabla 14.*Simetría del disipador en el proceso de optimización.*

Geometría inicial	Caso a)	Caso b)	Caso c)
 	 	 	 
Energía=1100 J Iteración 0	Energía = 4086 J Iteración 16	Energía= 4180 J Simetría caso a)	Energía= N/D Iteración 5 – Inestabilidad numérica

Posteriormente, se revisó la evolución del disipador para el caso c) mostrado en la Tabla 14 y se encontró que, en las primeras cinco iteraciones, el valor de energía de deformación se incrementó en un 368% aumentando desde 1132J en la primera iteración hasta 4173J y, como se puede observar en la **Tabla 15**, la forma final no es la X esperada. Sin embargo, al ver las gráficas de distribución de energía de deformación, se observa que el material acumulado en los laterales no se está deformando; esto puede deberse a la parada prematura del proceso de optimización debido a inestabilidades numéricas no toleradas para el análisis por elementos finitos o a la regla de evolución seleccionada.

Tabla 15.

Revisión del caso de simetría c)

  <p>It. 0 E=1132 J</p>	  <p>It. 1 E=1494.99 J</p>	  <p>It. 2 E= 3087.85 J</p>	  <p>It. 3 E= 3591.12 J</p>
  <p>It. 4 E= 4017.65 J</p>	  <p>It. 5 E= 4173.69 J</p>	<p>It. 6</p> <p>Terminación del proceso sin converger por inestabilidad numérica.</p>	

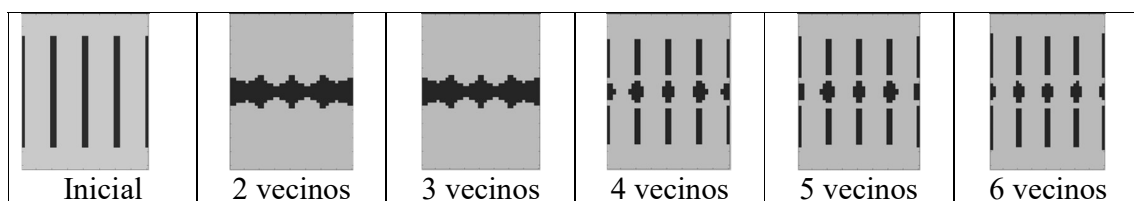
Por lo anterior, en este trabajo los resultados para la optimización con único objetivo serán obtenidos como en el caso b), que garantiza que la geometría final sea simétrica y previene inestabilidades numéricas al no subdividir el dominio de diseño, para la metodología implementada en este trabajo.

Otro criterio que fue necesario ajustar fue el criterio para la aproximación de elementos denominados flotantes. En este trabajo, los elementos flotantes hacen referencia a los elementos que se convierten en uno durante la evolución, pero no tienen suficientes vecinos, por lo que son elementos que potencialmente causarán inestabilidades numéricas al estar ocupando un lugar en el dominio de diseño sin tener otros elementos alrededor. El proceso de evolución inicia convirtiendo de uno a cero los elementos con mayor posibilidad de cambio debido al valor de la diferencia entre su energía de deformación y la energía de deformación objetivo, luego se convierten algunos elementos de cero y finalmente se chequean y reubican los elementos flotantes. Para este último paso, se debe determinar cuál es la cantidad mínima de vecinos que debe tener un elemento para considerar que no es un flotante.

En la Tabla 16 se muestra la primera evolución del disipador de ranuras verticales para diferentes cantidades de vecinos en el chequeo de flotantes. Se observa que usar una baja cantidad de vecinos (2 y 3 autómatas) ocasiona inestabilidad numérica pues se separa el dominio de diseño. Para 4, 5 y 6 vecinos el comportamiento parece estable. Entonces, para el disipador de ranuras verticales se optó por la cantidad intermedia de 5 vecinos para reducir la posibilidad de una convergencia acelerada del algoritmo de optimización o un mayor gasto computacional.

Tabla 16.

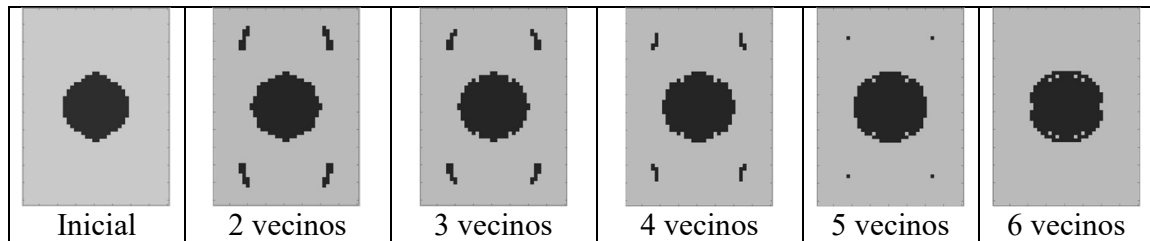
Chequeo de flotantes disipador ranuras rectangulares verticales.



Debido a que la regla de evolución depende fundamentalmente de la distribución de energía de deformación dentro del dominio, se revisó para otras configuraciones iniciales que tuvieran una distribución de energía de deformación inicial más homogénea. Como se puede observar en la Tabla 18, utilizar 5 vecinos para el disipador con una sola ranura circular en el centro no es efectivo, se evidencia que la evolución no representa un cambio significativo en la variable de diseño y, además, para el caso de 5 y 6 vecinos, se observan algunos elementos flotantes que no pudieron eliminarse con la estrategia utilizada. De acuerdo con lo obtenido en la Tabla 17, se podría decir que, para el caso de geometrías iniciales con distribuciones homogéneas de la variable de estado, se recomienda usar una cantidad menor a 4 vecinos en el chequeo de flotantes.

Tabla 17.

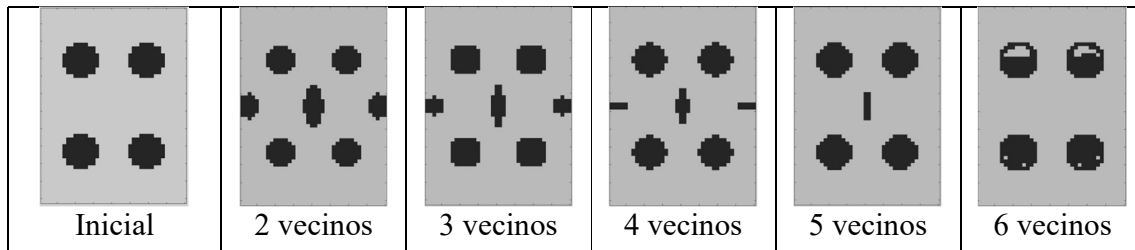
Chequeo de flotantes disipador una ranura circular.



Para verificar la anterior afirmación, se hizo el mismo ejercicio para otra geometría inicial. En la Tabla 18 se muestra el resultado de la primera iteración del algoritmo para el disipador con cuatro ranuras circulares y, se observa que observa un comportamiento similar al descrito antes para la geometría inicial con un solo círculos. Por lo anterior, en este trabajo se utilizarán dos vecinos para el chequeo de flotantes de las geometrías diferentes a la de 4 ranuras verticales.

Tabla 18.

Chequeo de flotantes disipador 4 ranuras circulares.



5.4.2.1.3. El criterio de paro.

Que no haya un cambio mayor a 1% en el valor de energía de la función objetivo (energía de deformación) durante tres iteraciones seguidas; la actual y las dos iteraciones anteriores.

5.5. Influencia de la relación Alto/ancho

5.5.1. Relación alto/ancho de los orificios

Para identificar patrones de comportamiento relacionados con la influencia de la relación ancho/alto en la geometría del disipador de placas ranuradas, en primer lugar, se modeló un grupo de 120 dispositivos con una, dos, tres o cuatro ranuras rectangulares siguiendo la metodología presentada en 4.4.3.1. Para efectuar comparaciones, a todos los dispositivos se les asignó la misma cantidad de material. Durante esta primera etapa se varió el ancho y alto de las ranuras y la cantidad de ranuras de acuerdo con la **Tabla 19**.

Como se muestra en la tabla, se estudiaron dispositivos con ranuras verticales en los que el valor del ancho se fue incrementando, respetando los límites de geometría de la placa. En esta primera etapa se encontró que, en términos de la relación altura/ancho de las ranuras, valores muy pequeños reducen la capacidad de disipación porque la porción o de material entre orificios se vuelve muy delgada lo que causa una zona de concentración de esfuerzos.

En general, un incremento en la relación alto/ancho de los orificios o ranuras incrementa el valor de fuerza máxima.

Tabla 19.

Parámetros del estudio (ancho y alto de las ranuras del disipador).

Una ranura		Dos ranuras		Tres ranuras		Cuatro ranuras	
Ancho	Alto	Ancho	Alto	Ancho	Alto	Ancho	Alto
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
20	100	10	100	7	100	5	100
22	90	14	70	9	75	7	71
25	80	17	60	15	45	11	45
29	70	20	50	27	25	20	25
33	60	25	40	44	15	33	15
40	50	50	20				
50	40						
67	30						

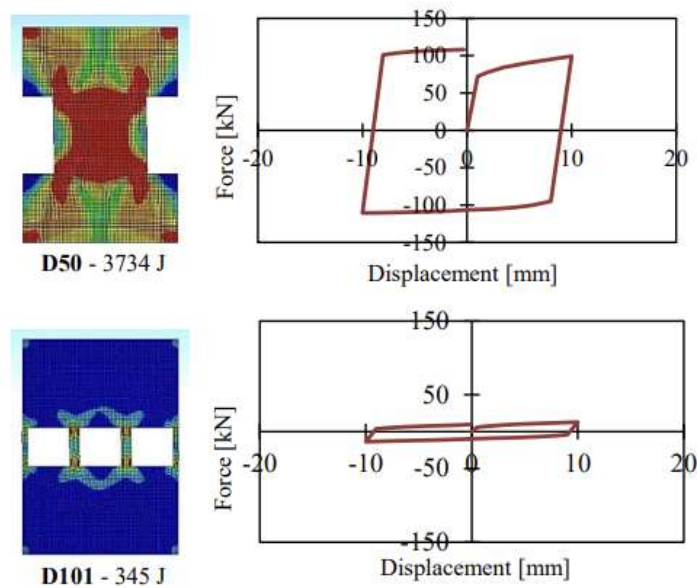
Posteriormente, en una segunda etapa, se trabajaron las mismas ranuras, pero se cambiaron de lugar, poniendo todas a la izquierda o derecha, parte superior o inferior del disipador. De los modelos anteriores se obtuvieron valores de energía en el rango desde 345 J hasta 3734 J. Considerando que todos los dispositivos tienen la misma cantidad de material, se resalta la importancia de revisar las posibles causas.

El dispositivo D50, que dentro del grupo de disipadores modelados fue el que obtuvo un mayor valor de energía de deformación (3734 J), tiene dos ranuras de 20x50mm ubicadas en los laterales de la placa y, como se observa en la figura, permite que los esfuerzos se distribuyan de manera más uniforme si se compara con el dispositivo D101 (345J) donde los esfuerzos se concentran en solo un pequeño espacio. Adicionalmente, se observó que, para disipadores con ranuras rectangulares, los dispositivos con una sola fila alineada de orificios

eran los que menor capacidad tenían comparados con los que tenían varias filas de ranuras o ranuras ubicadas a diferentes alturas.

Figura 27.

Influencia alto/ancho ranuras rectangulares. Dispositivo 50 (D50) de más capacidad de disipación de energía y Dispositivo 101 (D101) de menos capacidad.

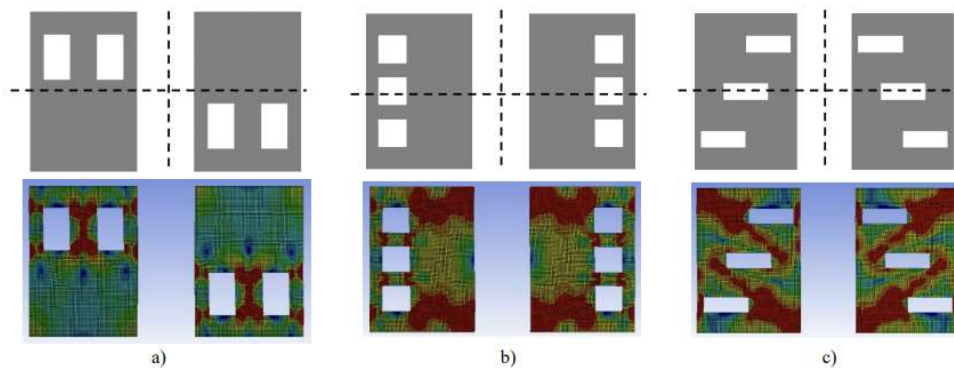


De este estudio paramétrico sobre ranuras rectangulares es importante destacar que el dispositivo D50 supera la capacidad de disipación de energía para un solo ciclo que el dispositivo de ranuras rectangulares verticales optimizado con el algoritmo BESO en el trabajo de Ghabraie et al. (2010). Lo anterior refuerza la idea de que otras técnicas de optimización pueden ser utilizadas para mejorar el diseño de los disipadores de placas ranuradas.

Tabla 20.*Disipación de energía dispositivos D50 y Ghabraie.*

Dispositivo	Cantidad de energía
Dispositivo D50 (este trabajo)	3734 J
Ghabraie et al. [10]	2203 J

Sin embargo, también es importante aclarar que no se puede garantizar que el dispositivo D50 va a seguir siendo mejor para ciclos de carga acumulada, es algo que se debe estudiar en estudios experimentales o modelos avanzados.

Figura 28.*Ejes de simetría del disipador.*

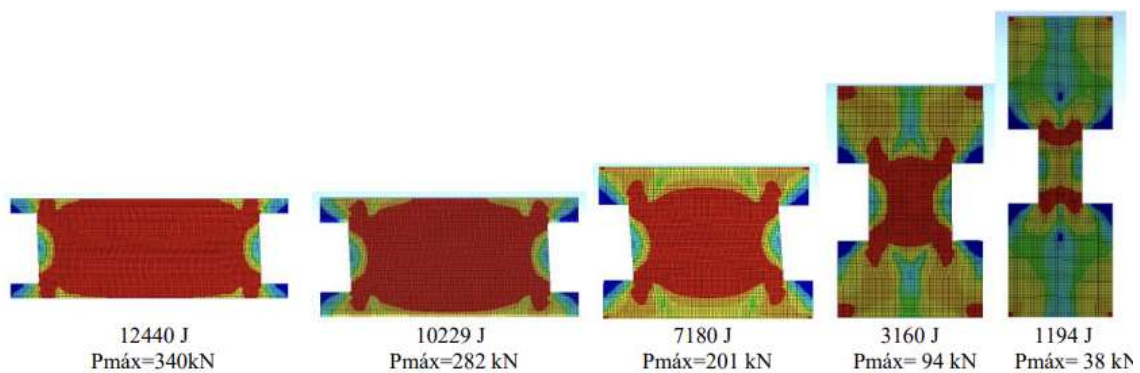
Otro aspecto importante, que se evidenció en esta etapa de estudio paramétrico, fue que debido a que la carga se aplica de manera simétrica, es decir, el mismo valor de desplazamiento se aplica tanto a la derecha como a la izquierda se general ejes de simetría. Como se muestra en la **Figura 28**, si la carga es simétrica, el valor de energía de deformación de un disipador comparada con la de su versión reflejada respecto a un eje vertical u horizontal ubicados en el centro de la placa, es la misma porque la distribución de esfuerzos y energía de deformación es la misma.

5.5.2. Relación alto/ancho disipador

Para esta sección se trabajó con el dispositivo que obtuvo un mayor valor de capacidad de disipación de energía en la sección anterior, es decir, es dispositivo D50. Las dimensiones alto y ancho seleccionadas fueron las siguientes: 70x199, 80x174, 100x139, 149x93, 202x69mm y, de manera similar al estudio anterior, se mantuvo la misma cantidad de material para efectos de comparación. Parte de los resultados obtenidos en esta sección se presentaron en el congreso XLI CILAMCE 2020 (Mendoza et al., 2020).

Figura 29.

Relación alto/ancho disipador D50.

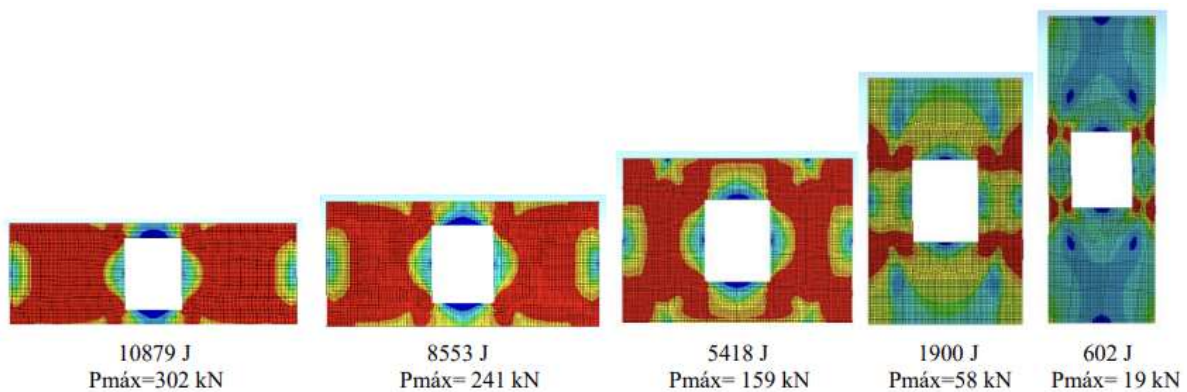


Los resultados muestran que las placas más anchas permiten una mejor distribución de esfuerzos que las más altas, por lo que las cantidades de energía de deformación de dichas placas son considerablemente mayores como se observa en la **Figura 29**. Sin embargo, debido a la naturaleza no lineal del problema, el protocolo de carga afectará las respuestas mecánicas, por lo que estos resultados son parciales ya que solo se aplicó un ciclo de desplazamiento. Si se estudia el comportamiento de cada amortiguador bajo un protocolo de desplazamiento completo con varios ciclos, los resultados pueden cambiar ya que algunos dispositivos resistirán más ciclos de carga acumulada que otros.

El mismo ejercicio se hizo para otro dispositivo con una ranura interna y sucede algo similar. Los dispositivos más anchos alcanzan fuerzas más altas. Lo anterior se debe a que cuando la placa es ancha, los bordes en contacto con el soporte fijo (empotramiento modelado en la base) y la carga son más largos, lo que influye en las capacidades del dispositivo ya que aumenta el valor de la fuerza de reacción. Es decir, cuando la superficie de contacto entre las condiciones de contorno y el amortiguador es grande, el dispositivo experimenta esfuerzos mayores y más uniformes como se muestra en la **Figura 30**.

Figura 30.

Relación alto/ancho disipador D01.



De los modelos anteriores, se puede decir que es posible que exista un límite al valor de la relación entre ancho y alto: para placas muy altas, la cantidad de energía se reduce porque el dispositivo puede resistir grandes desplazamientos, pero desarrolla fuerzas muy bajas. Para dispositivos muy anchos se desarrollan grandes fuerzas, pero desplazamientos cortos, por lo que existe una relación óptima alto/ancho o ancho/alto que favorece la capacidad de disipación de energía manteniendo un comportamiento estable del disipador.

Considerando lo anterior, si se piensa a cada una de las placas como si fuese una columna, es posible afirmar que las placas más altas podrían verse afectadas por los efectos

de pandeo. Es necesario estudiar este comportamiento de manera experimental para un protocolo de carga cíclico y también bajo carga monotónica para determinar la fuerza máxima que puede soportar cada dispositivo.

5.5.3. Fatiga del disipador

El modelo de elementos finitos descrito en capítulos anteriores y que se utilizó en este trabajo durante el proceso de optimización no predice la falla del disipador; por este motivo en esta sección se revisará el efecto de fatiga de bajo ciclo para el disipador original por medio de un modelo en el programa ANSYS Workbench (Ansys Inc, 2020). El procedimiento aplicado aquí para el disipador original se replicará para el disipador optimizado que más incremento de cantidad de energía de deformación haya tenido respecto a su versión original. Los resultados del modelo de fatiga del disipador de ranuras verticales se compararán con los resultados experimentales reportados por Chan y Albermani (2008).

La herramienta para estudio de la fatiga disponible en ANSYS Workbench versión 2021 tiene disponibles dos tipos de análisis: análisis de vida por esfuerzos (Stress-Life) que es útil cuando la pieza, material o elemento se va a someter a un gran número de ciclos de carga que ocasiona esfuerzos intermedios a bajos y deformaciones mayormente elásticas; y análisis de vida por deformaciones (Strain-Life) que se recomienda para fatiga de bajo ciclo, es decir, cuando la cantidad de ciclos de carga no es tan alta pero inducen en el material grandes deformaciones. En ambos casos, el software hace uso de las curvas de capacidad del material y las curvas de degradación o curvas SN (esfuerzo vs. cantidad de ciclos), por lo que conocer la curva de capacidad es fundamental para el análisis. En este trabajo se hace un análisis por deformación (Strain-Life) y se utilizan los parámetros de deformación y curva de degradación para el acero estructural disponible por defecto en las librerías del software;

que corresponde a un acero A-36 de bajo contenido de carbón, similar al utilizado empleado en este estudio.

Partiendo del modelo descrito en el capítulo 5.3.3.1, se utilizó el protocolo de carga completo que consta de 27 ciclos con los cuales Chan y Albermani (2008) reportan la falla experimental del disipador SL-4 mostrado en la Figura 13 para calibrar los parámetros de la herramienta de fatiga; como resultado el valor del coeficiente de resistencia a la fatiga se debió tomar como el mínimo posible $K_f=0,01$ debido a la alta concentración de esfuerzos. En primer lugar, se aplicó una carga de 1mm que luego se amplificó como se muestra en la Figura 31. donde cada punto sobre el eje X indica una aplicación de la carga aplicada de 1mm amplificada por el factor indicado por el eje Y para ese punto con la opción de History Data.

De acuerdo con los resultados experimentales, el disipador solo resiste un bloque de esta carga, por lo que en el software se ajustó K_f para obtener una vida de 0 bloques, resultando $K_f=0,01$.

Figura 31.

Factor de amplificación de carga no constante para análisis de fatiga.

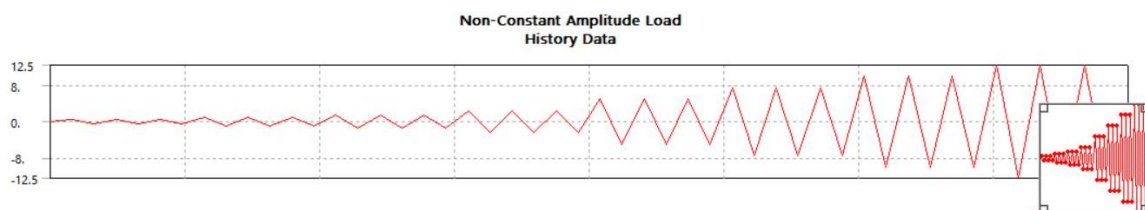
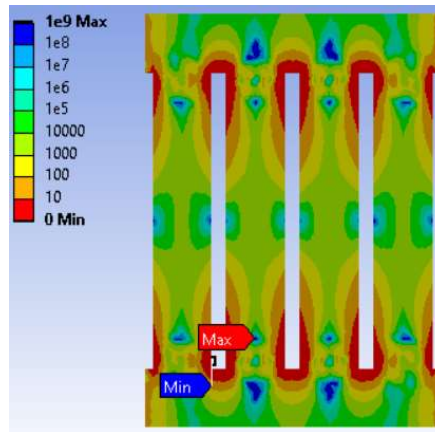


Figura 32.

Ciclos de vida análisis con amplificación de carga tipo "History Data".



Posteriormente, se optó por aplicar el protocolo de carga completo desde el análisis estructural y utilizar la opción de amplificación de carga “Zero-based” que usa un factor de amplificación de 1, es decir, se aplica la misma carga del análisis estructural, en este caso también se debía obtener que la cantidad de ciclos que resiste el disipador es menor que 1. Al hacer el ajuste respectivo, la mínima cantidad de ciclos que se lograron obtener fue de 18 al usar nuevamente $K_f=0,01$ como se muestra en la Figura 34.

Figura 33.

Factor de amplificación de carga "Zero-based".

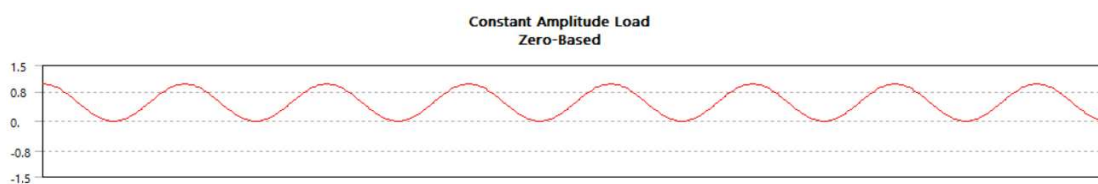
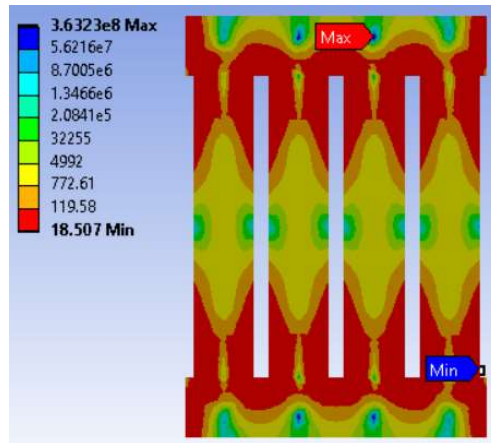


Figura 34.

Ciclos de vida análisis con amplificación de carga "Zero-based".



Para los resultados de este trabajo se utilizó: análisis por deformación (strain-life), coeficiente de resistencia a la fatiga $K_f=0,01$ y amplificación de carga tipo "Zero-based". La carga aplicada para comparación es la descrita en 5.3.3.1, es decir un ciclo de carga completo con amplitud de 10mm.

6. Resultados

Este capítulo presenta, en primer lugar, los resultados para el problema multiobjetivo, luego los resultados para el problema de único objetivo, posteriormente se presentan exploraciones adicionales del algoritmo para el mismo problema y finalmente el análisis de la relación alto/ancho.

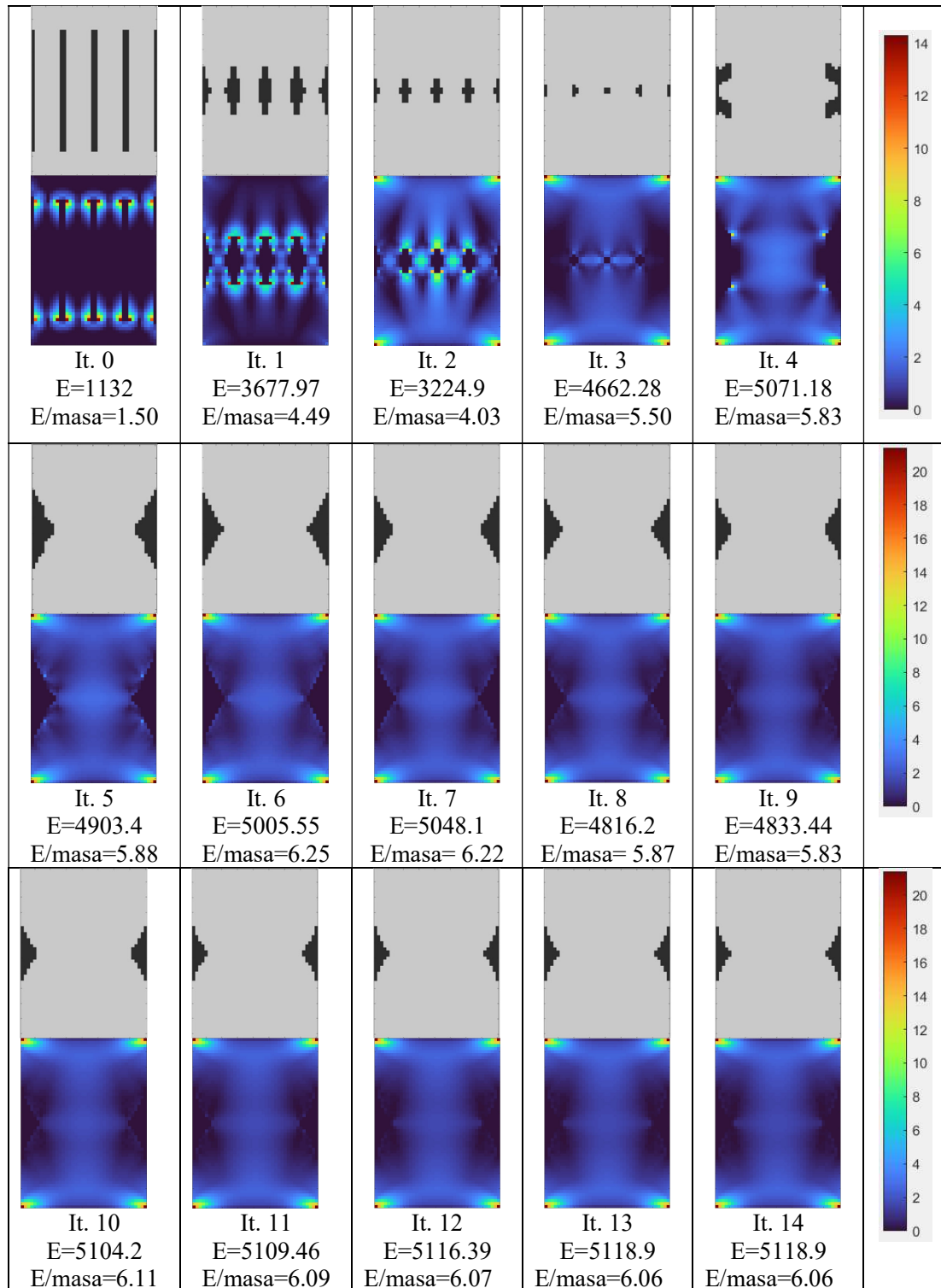
6.1. Problema multiobjetivo

En primer lugar, se presentan los resultados del disipador con 4 ranuras verticales de 100mmx5mm que fue estudiado por Ferrer y Villalba (2017) usando el algoritmo Simulated Annealing como un problema de optimización de forma en el que se mantenía fijo el dominio y cantidad de material y los elementos se reubicaban dependiendo de los niveles de esfuerzo y por Ghabraie et al. (2010). Que abordó su optimización como una optimización de forma usando el algoritmo BESO aplicando restricciones en el dominio de diseño limitando su acción solo a los elementos existentes en los bordes de los orificios existentes en el diseño original.

Con la metodología propuesta, el estado de cada autómatas celular podía cambiar de cero a uno o de uno a cero en cada iteración, es decir, los orificios iniciales podían convertirse en áreas llenas de material en iteraciones posteriores. Los resultados muestran que, para el problema multiobjetivo, la solución converge en una forma similar a las de los dispositivos X-shaped. En la **Tabla 21** se muestra la evolución del dispositivo en cada una de las iteraciones y como se distribuye el material a lo largo del proceso hasta que todo el dominio se llena y finalmente evoluciona hasta eliminar el material de los costados creando una especie de cintura.

Tabla 21.

Resultados optimización multiobjetivo dissipador de ranuras verticales.



Nota: Las unidades de las barras de color son de energía Jules (J) para cada elemento.

Luego de 14 iteraciones el algoritmo converge para un valor de energía 5118.9J y una relación de energía sobre masa de 6.06 lo que representa un incremento en el valor de energía de 452% y un incremento en la masa de 113%. Debido a que en trabajos previos se trabajó el problema de optimización manteniendo la masa constante, para efectuar comparaciones se utiliza el cambio en el valor de la relación energía/masa y se compara con la obtenida en trabajos previos. Como se puede ver en la Tabla 22, Ghabraie et al. (2010) reporta un valor de energía final de 2203 J para una masa de 747 gramos lo que representa un incremento del 169% en la relación energía sobre masa y Ferrer y Villalba reportan un incremento del 369% de incremento en dicha relación. En este trabajo se obtuvo un incremento de 400% en la relación por lo que se puede concluir que la metodología implementada para la optimización multiobjetivo funciona adecuadamente logrando un mayor porcentaje de incremento en menos iteraciones que las reportadas previamente en la literatura.

Tabla 22.

Resultados previos de optimización disipador ranuras verticales.

Autor	Masa (gr)	Energía inicial (J)	Relación energía/masa	Energía Final (J)	Relación energía/masa	Porcentaje (%)
Ghabraie et al.	747	1124 J	1.50	2203 J	2.94	96%
Ferrer y Villalba	747	1085 J	1.45	4007 J	5.36	257%
Este trabajo	844.7*	1132 J	1.51	5118.9 J	6.06	300%

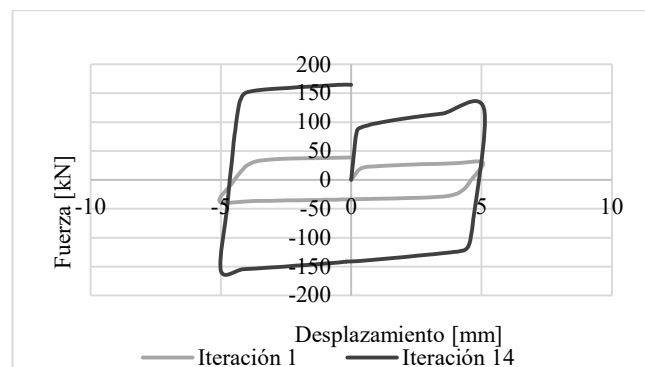
Nota: Masa en gramos al final del proceso de optimización.

Para visualizar el incremento en el valor de energía de forma gráfica se presenta la **Figura 35**. Las curvas representan bucles de histéresis que en el eje horizontal van desde el mínimo desplazamiento hasta el máximo desplazamiento aplicado y el eje vertical representa

los valores de fuerza de reacción total en, en los apoyos la dirección de aplicación de la carga. Como se puede observar, el área bajo cada curva es ampliamente diferente, por lo que es posible afirmar que el dispositivo optimizado logra almacenar mayos cantidad de energía de deformación que su versión inicial.

Figura 35.

Ciclo de histéresis disipador ranuras verticales. Problema multiobjetivo.

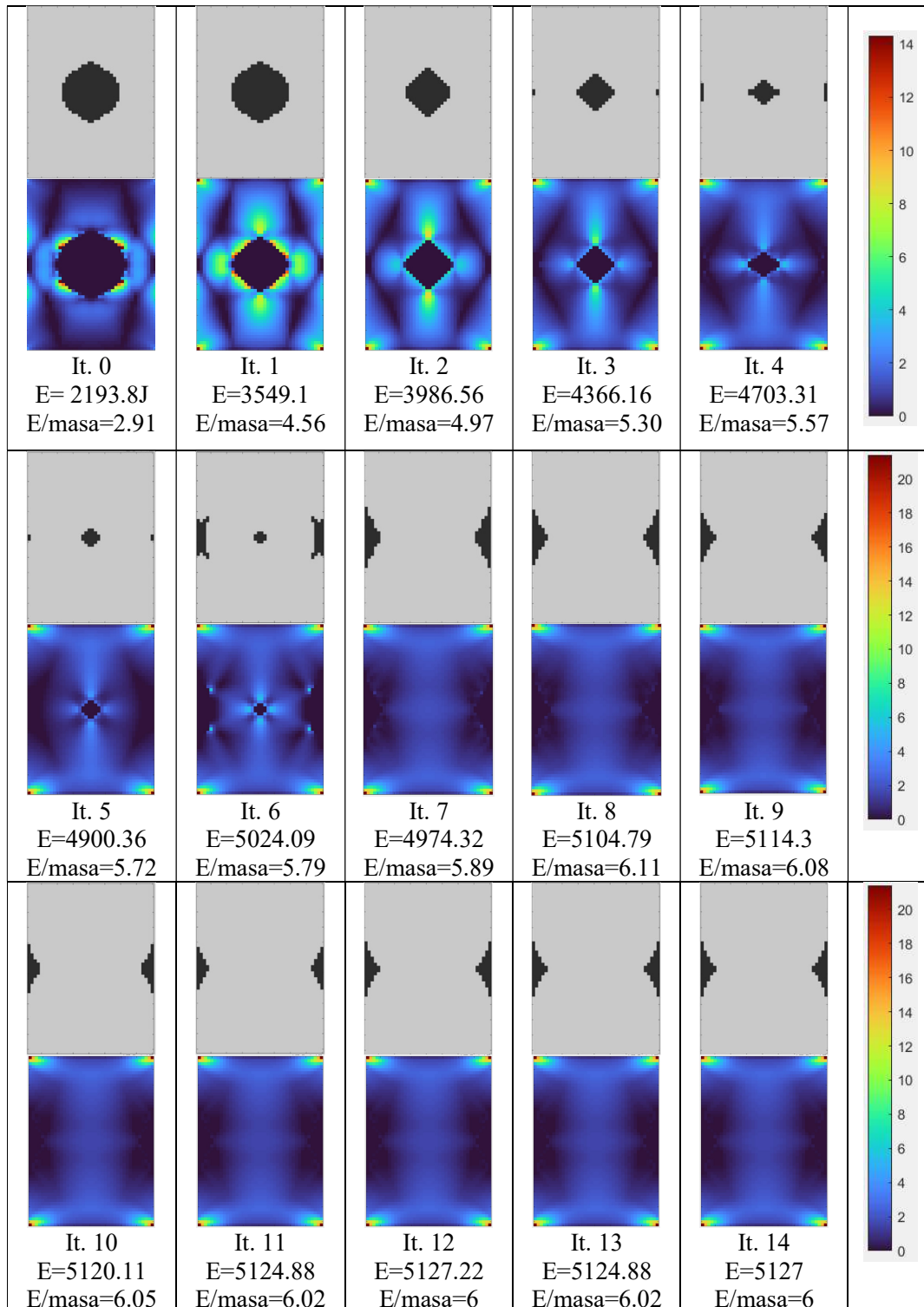


A continuación, en la **Tabla 23** se presentan los resultados para el disipador con una ranura circular de radio 25mm; concluido el proceso iterativo de optimización fue evidente que evolucionó hacia la misma forma de X que la obtenida para el disipador de ranuras verticales. Recordando que todas las geometrías iniciales tienen el mismo valor de masa, es importante destacar que esta propuesta de disipador con un círculo central disipa inicialmente 2193 J en un ciclo de carga, esto es 94% más que el disipador de ranuras verticales sin haber aplicado ningún método de optimización.

De acuerdo con los resultados de la **Tabla 23**, luego de 14 iteraciones el algoritmo converge para un valor de energía 5127 J y una relación de energía sobre masa de 6.00 lo que representa un incremento en el valor de energía de 133% y un incremento en la masa de 14%. En cuanto a la relación energía sobre masa, el incremento porcentual fue de 106%.

Tabla 23.

Resultados optimización multiobjetivo disipador una ranura circular radio 25mm.

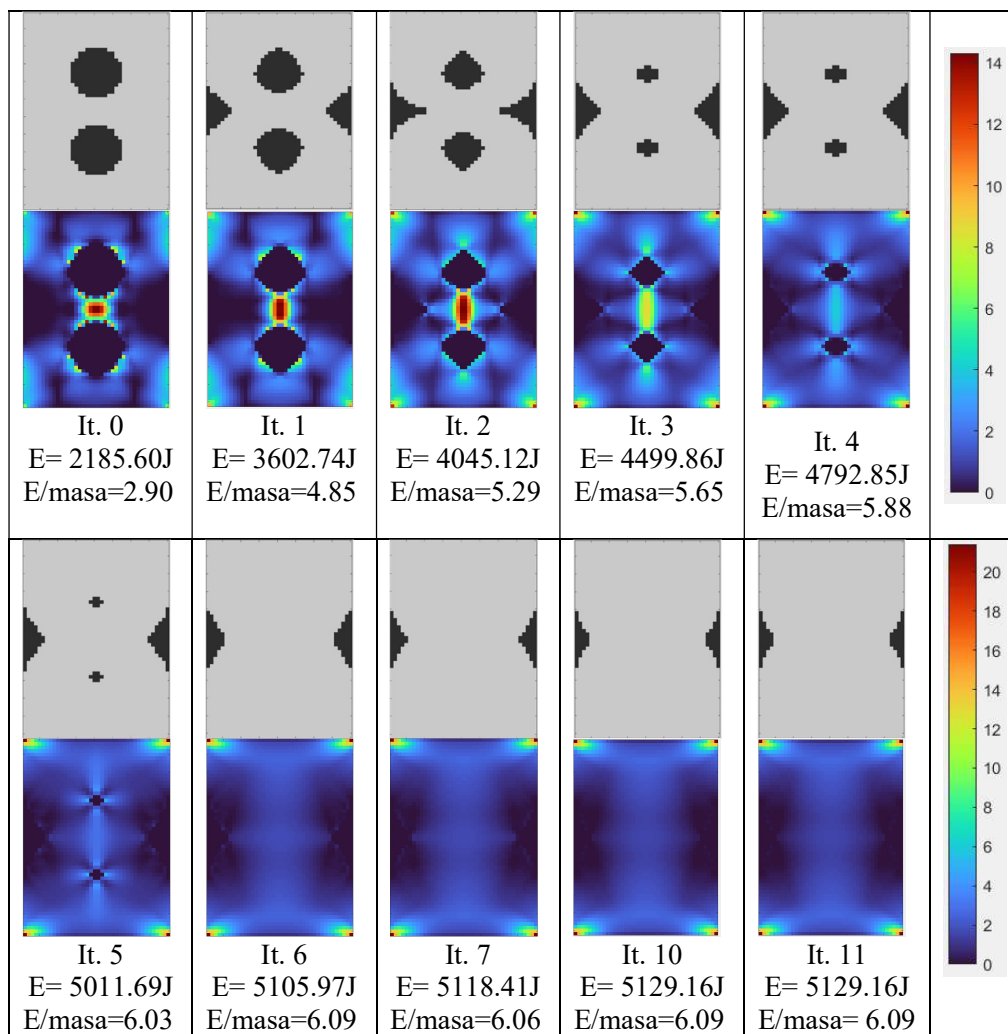


Nota: Las unidades de las barras de color son de energía Jules (J) para cada elemento.

Continuando con los disipadores con orificios circulares, en la **Tabla 24** se presentan los resultados del disipador con dos ranuras circulares y se observa que, de manera similar que, para los casos anteriores, la geometría inicial evolucionó hacia una geometría en forma de X.

Tabla 24.

Resultados optimización multiobjetivo disipador con dos ranuras circulares.



Nota: Las unidades de las barras de color son de energía Jules (J) para cada elemento.

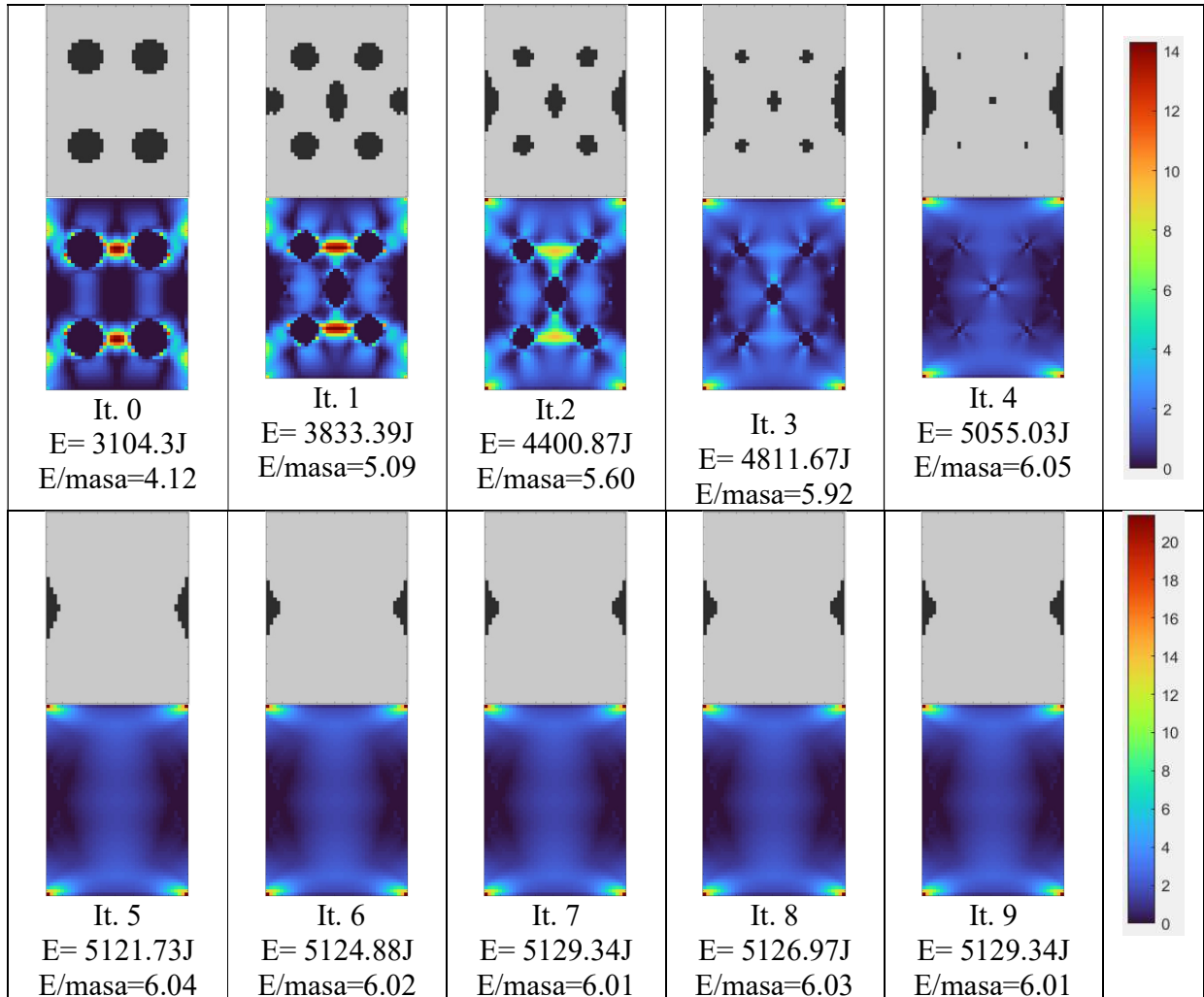
Como se aprecia en la **Tabla 24**, el incremento en el valor de energía fue del 134% y el valor de la masa aumento un 12.7%; en cuanto a la relación energía sobre masa el valor

incremento un 110%, es importante destacar que nuevamente la geometría inicial planteada con dos orificios circulares tiene mayor capacidad de disipación de energía en un solo ciclo que la versión con ranuras verticales y, en relación con el algoritmo de optimización y la metodología implementada, se evidenció que acercándose al final del proceso el algoritmo se queda iterando varias veces alrededor de dos valores densidad relativa 2176 (5129 J) y 2168 (5126 J).

Continuando, se presentan los resultados para el disipador con 4 ranuras circulares. En la **Tabla 25** se presenta la evolución del proceso de optimización que tuvo 9 iteraciones con las cuales el incremento en la capacidad de disipación de energía fue de 65% y de la masa del 14.2%.

Tabla 25.

Resultados optimización multiobjetivo disipador con cuatro ranuras circulares.



Nota: Las unidades de las barras de color son de energía Jules (J) para cada elemento.

Como se evidencia en la Tabla 25, el incremento en el valor de la relación energía sobre masa para el disipador con cuatro ranuras circulares fue de 31.4% y de manera similar que, para el disipador con solo dos ranuras, el proceso de optimización finalizó en una cantidad baja de iteraciones y se puede ver que el algoritmo se queda iterando alrededor de dos valores de variable de diseño.

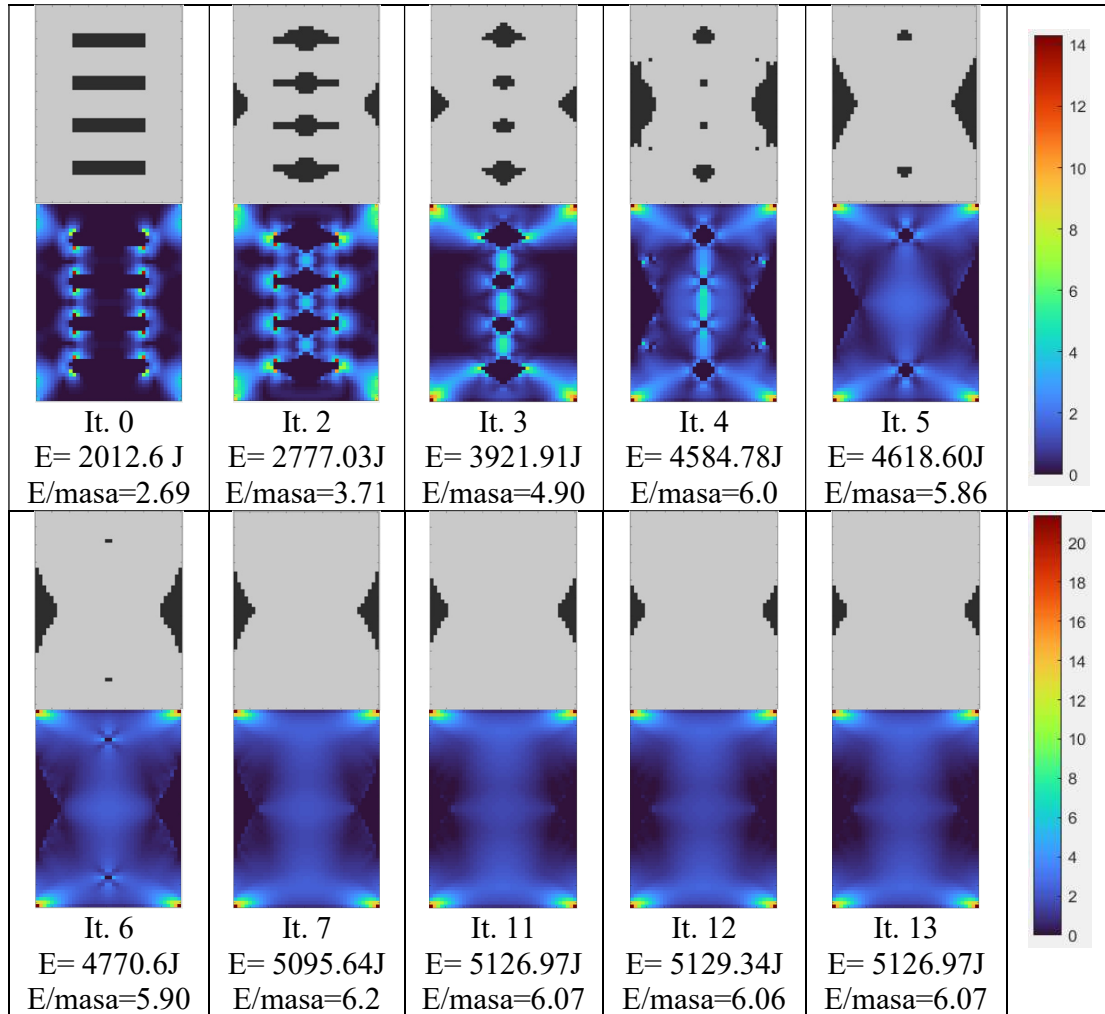
Los resultados anteriores muestran que una buena distribución de energía de deformación o de la variable de estado por todo el dominio de diseño favorece la capacidad de disipación. Se observa que las geometrías iniciales con orificios circulares disipan mayor cantidad de energía que la versión del disipador con ranuras rectangulares verticales pues reducen los puntos de concentración de esfuerzos y deformaciones. Como es conocido, la existencia de esquinas muy angulosas ocasiona concentraciones de esfuerzos, por lo que a continuación se revisan los resultados obtenidos para las geometrías iniciales con ranuras rectangulares pero distribuidas de favorable.

En la Tabla 25 se presentan los resultados para el disipador con cuatro ranuras rectangulares ubicadas de manera similar que las del disipador presentado en la Tabla 23. Como se puede observar, sin cambiar la ubicación de los orificios, solo el cambio de forma de la geometría inicial (círculos con 3104.3J por rectángulos con 2876.33J) ocasiona una reducción de 220J en el valor de capacidad de disipación de energía por ciclo. Finalmente, los resultados del proceso de optimización fueron similares, el proceso culminó luego de las mismas 9 iteraciones, el incremento en la cantidad de energía fue de 78% y de cantidad de masa del 14%. En cuanto a la relación energía sobre masa, el incremento fue del 57.6%.

Continuando, en la **Tabla 26** se exponen los resultados obtenidos para el disipador con cuatro ranuras rectangulares alargadas ubicadas de manera horizontal. En este caso la energía inicial fue de 2012.6 J, la segunda más baja luego de la original con ranuras verticales; esto se debe a la presencia de zonas de concentración de esfuerzos. Finalizado el proceso de optimización, el incremento en el valor de energía de deformación fue de 154% y el incremento en el valor de masa fue de 13%; en cuanto a la relación energía sobre masa, el incremento fue de 125%.

Tabla 26.

Resultados optimización multiobjetivo disipador con ranuras horizontales.



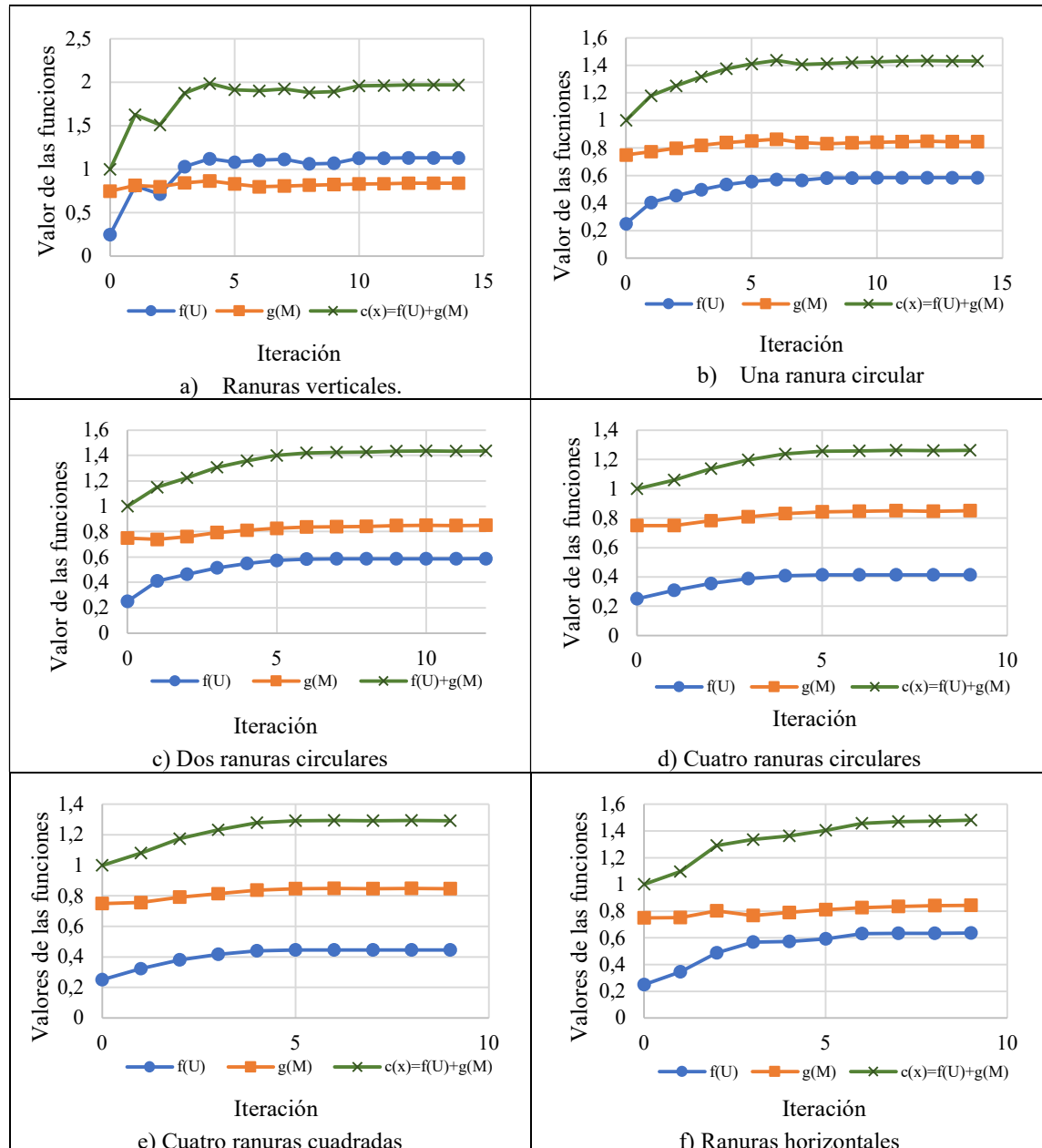
Nota: Las unidades de las barras de color son de energía Jules (J) para cada elemento.

En la **Tabla 27** se muestran las curvas de convergencia del algoritmo de optimización. La línea color azul que conecta marcadores circulares (\rightarrow) es la función de energía de deformación $f(U)$, la línea naranja que conecta marcadores cuadrados (\rightarrow) es la función de masa $g(M)$, y la línea verde que conecta marcadores en forma de X (\rightarrow) es la función de costo $c = f(U) + g(M)$. Como se puede observar el incremento en los valores de la función de masa es bajo, la línea se mantiene estable. En cuando a la línea que representa los valores

de energía se puede ver mayor incremento en las primeras iteraciones y luego un incremento bajo y estabilidad a lo largo de las iteraciones finales.

Tabla 27.

Diagramas de convergencia del algoritmo de optimización multiobjetivo.



6.2. Problema único objetivo

Las mismas geometrías iniciales tratadas en el problema multiobjetivo se trabajaron en el problema con único objetivo buscando configuraciones óptimas en capacidad de absorción de energía pero que conservaran la misma cantidad de material. De manera similar que en la sección anterior, el disipador de 4 ranuras verticales de 100mmx5mm fue estudiado por Ferrer y Villalba (2018) usando el algoritmo Simulated Annealing como un problema de optimización de forma en el que se mantenía fijo el dominio y cantidad de material y los elementos se reubicaban dependiendo de los niveles de esfuerzo y por Ghabraie et al. (2010) que abordó su optimización como una optimización de forma usando el algoritmo BESO aplicando restricciones en el dominio de diseño limitando su acción solo a los elementos existentes en los bordes de los orificios existentes en el diseño original. En este capítulo es preciso hacer una comparación entre los resultados obtenidos en las investigaciones mencionadas y el presente trabajo pues en todos se abordó el problema como uno de único objetivo. En la **Tabla 28** se presenta la comparación entre los resultados del problema de optimización de único objetivo, se puede observar que el incremento en el valor de la función de diseño es similar entre los resultados de este trabajo y los de Ferrer y Villalba. Sin embargo, es importante destacar que con esta técnica el resultado se obtuvo en 16 iteraciones y con la técnica del precocido simulado se necesitaron 50 iteraciones.

Tabla 28.

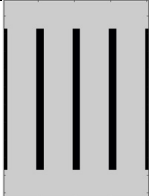
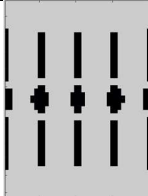
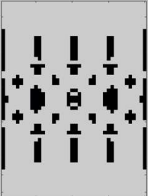
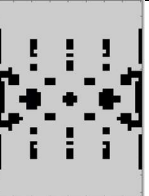












Comparación cantidad energía disipada problema mono objetivo con restricción de masa.

Autor	Energía inicial (J)	Energía Final (J)	Porcentaje (%)
Ghabraie et al. [10]	1124 J	2203 J	195%
Ferrer y Villalba [30]	1085 J	4007 J	369%
Este trabajo	1100 J	4180 J	371%

A continuación, se presenta la evolución del disipador hasta la convergencia del algoritmo; como se puede apreciar en la **Tabla 29**, se perdió la simetría del disipador debido a la forma en que se aplica la restricción de masa (ordenando la matriz de mayor a menor energía, lo que ocasiona que algunos elementos con valores iguales o similares no sean tenidos en cuenta una se llega al tope del contador de elementos a restaurar).

Tabla 29.

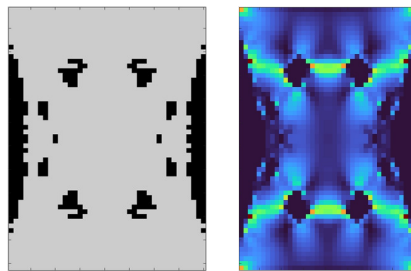
Resultados optimización único objetivo disipador con ranuras verticales.

			
It. 0 E= 1100 J	It. 1 E= 2340 J	It. 2 E= 2992 J	It. 3 E= 3210 J
			
It. 4 E= 3678,53 J	It. 5 E= 3820,42 J	It. 6 E= 3980,37 J	It. 7 E= 4144,32 J
			
It. 8 E= 4161.58 J	It. 9 E= 4094.13 J	It. 10 E= 4130.34 J	It. 11 E=4138.89 J
			
It. 12 E= 4152.35 J	It. 13 E= 4162.57 J	It. 14 E=4139.70 J	It. 16 E= 4086.24 J

Como se analizó en el capítulo 4.4.2.1.2. es conveniente que el resultado final sea simétrico, por lo que, una vez finalizado el proceso de optimización, se ejecutó una iteración más en la que se forzó la simetría. En la figura 36 se muestra el resultado.

Figura 36.

Resultado optimización único objetivo disipador de ranuras verticales.

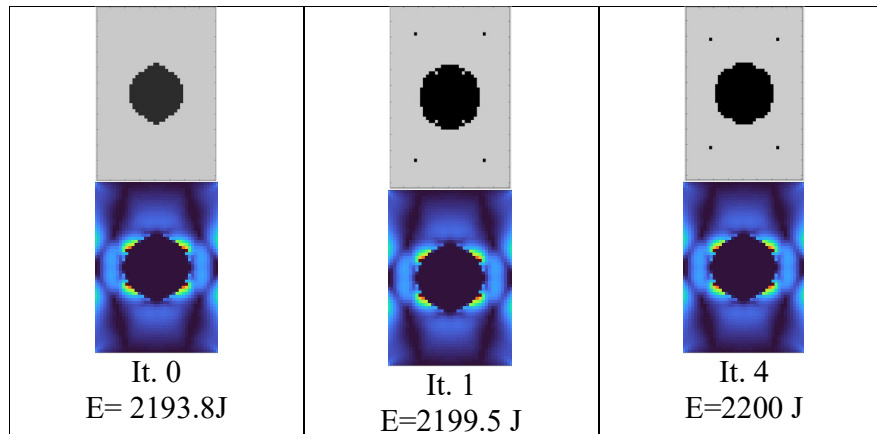


Energía= 4180 J

La misma metodología se aplicó para la optimización de las otras geometrías iniciales, sin embargo, como se puede observar en las tablas 31-33 el algoritmo no logra evolucionar como se espera para geometrías de orificios como la de un círculo, dos círculos, cuatro círculos, cuatro cuadrados debido a que estas geometrías tienen una distribución más homogénea en los valores de la variable de estado.

Tabla 30.

Resultados optimización único objetivo disipador con una ranura circular. Cinco vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.



Para los disipadores con dos y cuatro ranuras circulares, se puede observar que el algoritmo hace un leve intento por eliminar material en los costados del disipador y en el centro, respectivamente. Sin embargo, debido a que el cambio en la variable de diseño es muy bajo, no logra ser significativo para que haya un cambio en la variable de estado por lo que el algoritmo converge obedeciendo el criterio de paro.

Tabla 31.

Resultados optimización único objetivo disipador con dos ranuras circulares. Cinco vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.

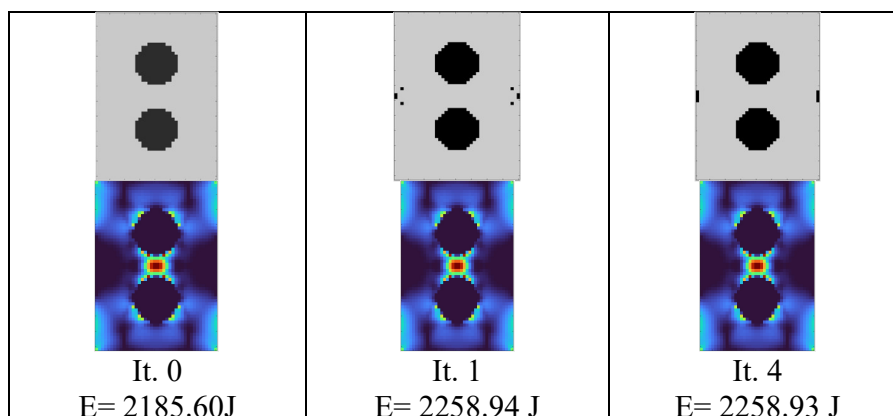
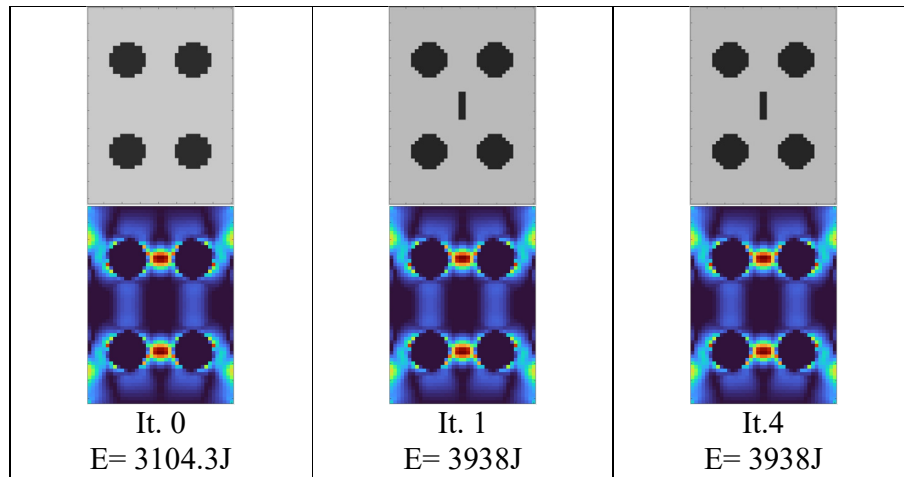


Tabla 32.

Resultados optimización único objetivo disipador con cuatro ranuras circulares. Cinco vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.



Considerando los resultados anteriores y a modo de exploración adicional del algoritmo de optimización, se revisaron nuevamente los parámetros las características de la regla de evolución y aproximación de la variable de diseño para encontrar una alternativa sencilla que permitiera una evolución significativa. Como se describe en el capítulo 5.4.2.1.2, se decidió modificar el vecindario en el chequeo de flotantes pues se evidenció que era un factor bastante influyente en el comportamiento de la variable de diseño. A continuación, se presentan los resultados de dicha modificación.

La Figura 37 muestra el resultado para la optimización de único objetivo para el disipador de una ranura circular céntrica. Como se puede observar, es nuevamente una geometría en equis o geometría tipo “X-shaped” similar a las obtenidas para el problema multiobjetivo. Este resultado es indicador de un comportamiento estable en la técnica de los autómatas celulares, pues para el problema multiobjetivo se utilizó una regla de evolución

determinista derivada de criterios de optimalidad y leyes físicas (Ley de Hooke), mientras que para el problema de único objetivo se hizo uso de la heurística al comparar el estado de cada autómatas contra un valor aleatorio. El proceso de evolución paso por paso se muestra en la Tabla 34, luego de dieciséis iteraciones el algoritmo logra la convergencia y el valor la energía de deformación incrementó desde 2193.8 J hasta 4758.53 J, es decir un 116%.

Figura 37.

Resultado optimización único objetivo disipador ranura circular céntrica.

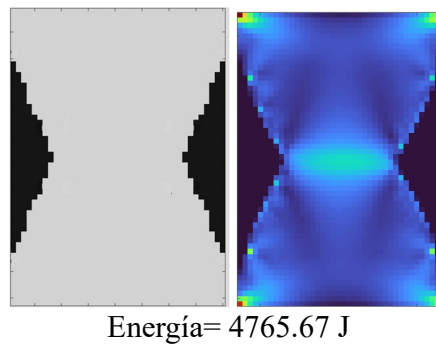
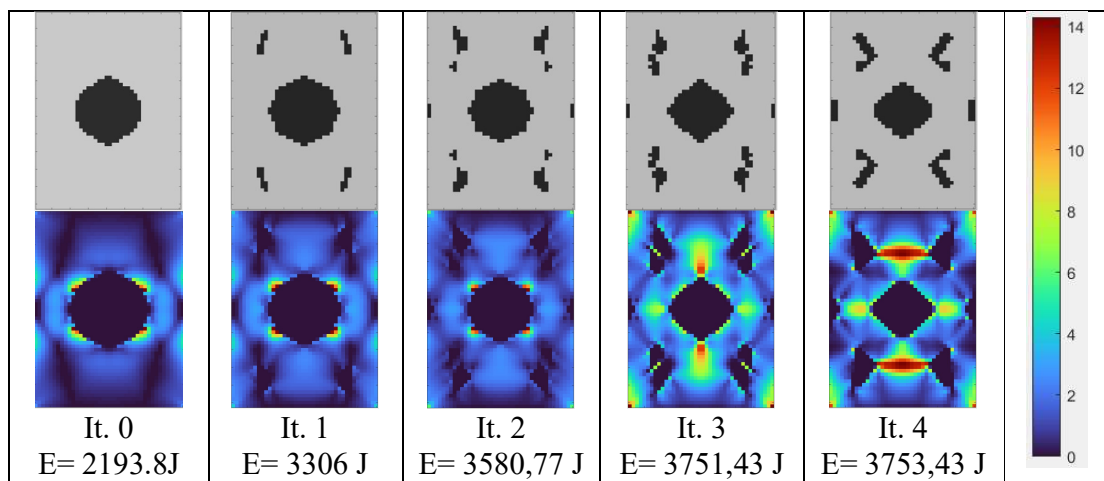
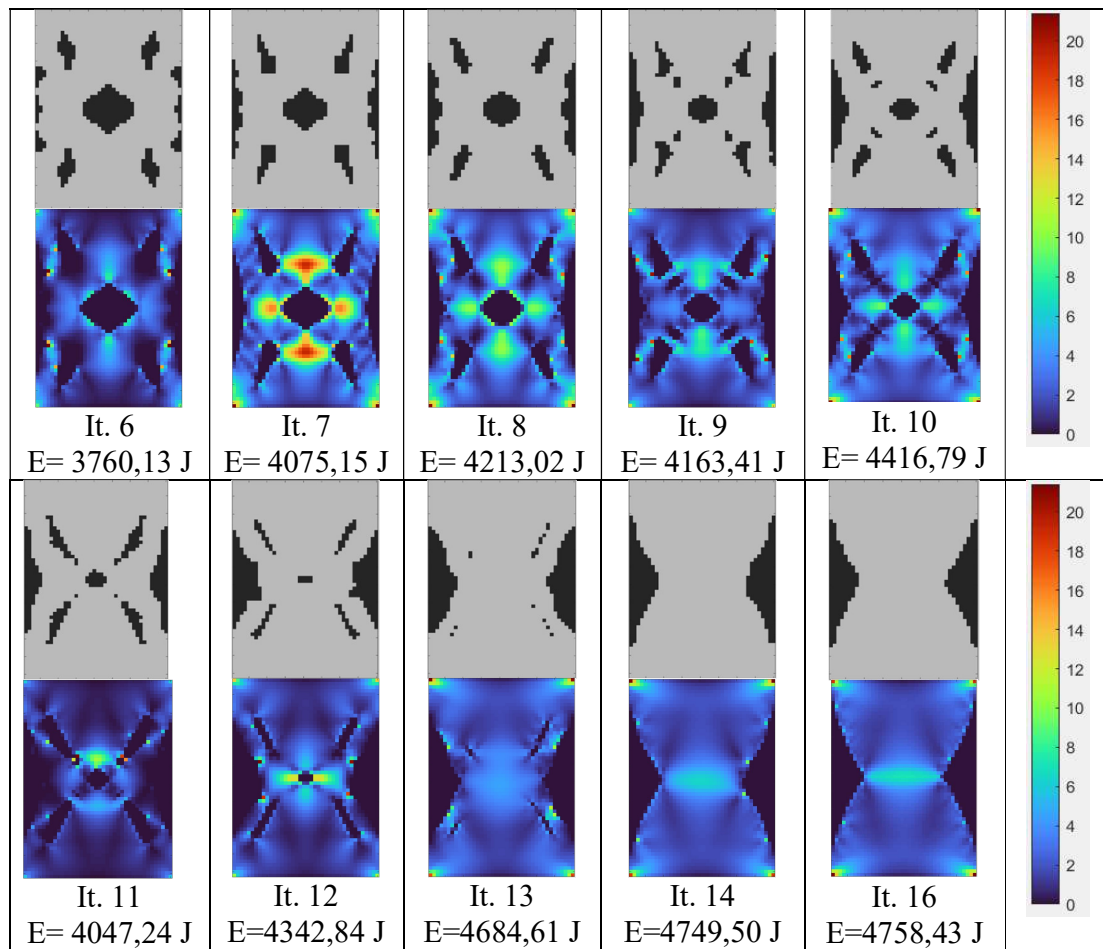


Tabla 33.

Resultados optimización único objetivo disipador una ranura circular. Dos vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.



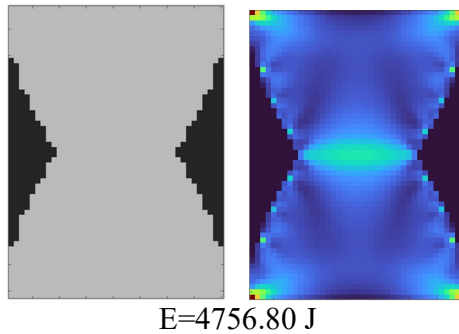


* Las unidades de las barras de color son de energía Jules (J) para cada elemento.

De manera similar, para las geometrías iniciales con cuatro ranuras circulares y ranuras horizontales, el resultado de la optimización fue un disipador con forma de equis. En la Figura 38 se muestra el resultado de la optimización para el disipador cuya geometría inicial tenía cuatro ranuras circulares, el algoritmo converge luego de 12. El valor inicial de energía de deformación era de 3104.3 J y al finalizar el proceso se obtuvieron 4756.80 J, esto es un incremento del 53.2%.

Figura 38.

Resultado optimización único objetivo disipador cuatro ranuras circulares.



En la Figura 39 se muestra la geometría obtenida al optimizar el disipador con ranuras horizontales. En un total de 11 iteraciones, el valor de energía de deformación incrementó desde 2012.6 J hasta 4761.51 J, es decir, un incremento del 136%. En las Tablas 35 y 36, se puede ver la evolución paso a paso del disipador cuya geometría inicial tenía cuatro orificios circulares y del disipador cuya geometría inicial tenía ranuras horizontales, respectivamente.

Figura 39.

Resultado optimización único objetivo disipador ranuras horizontales.

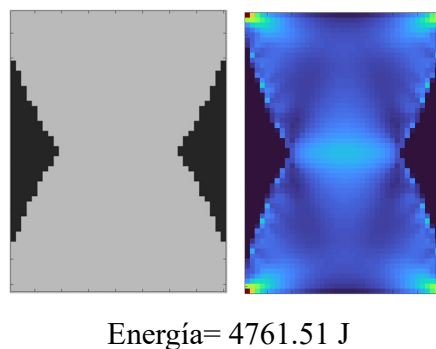
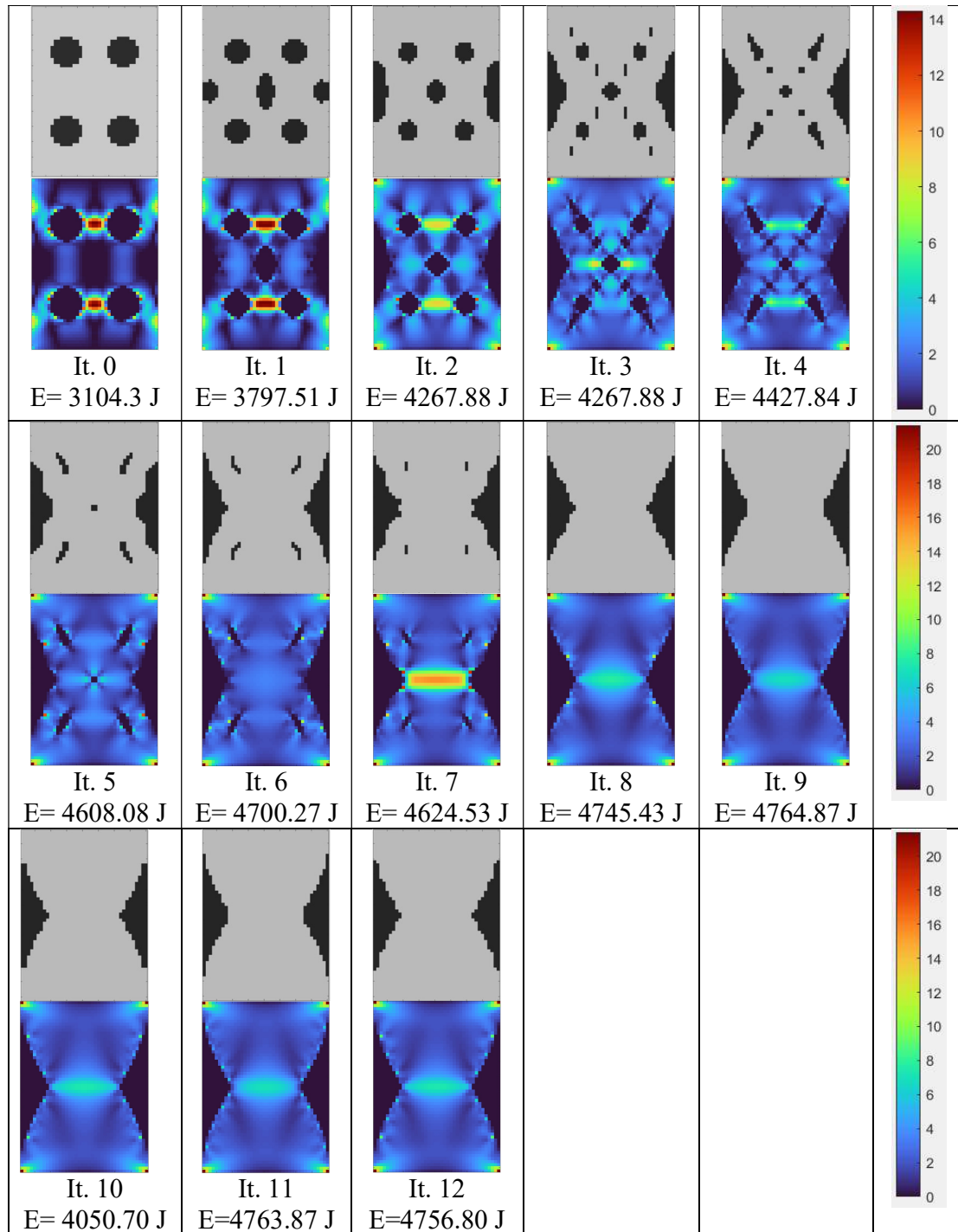


Tabla 34.

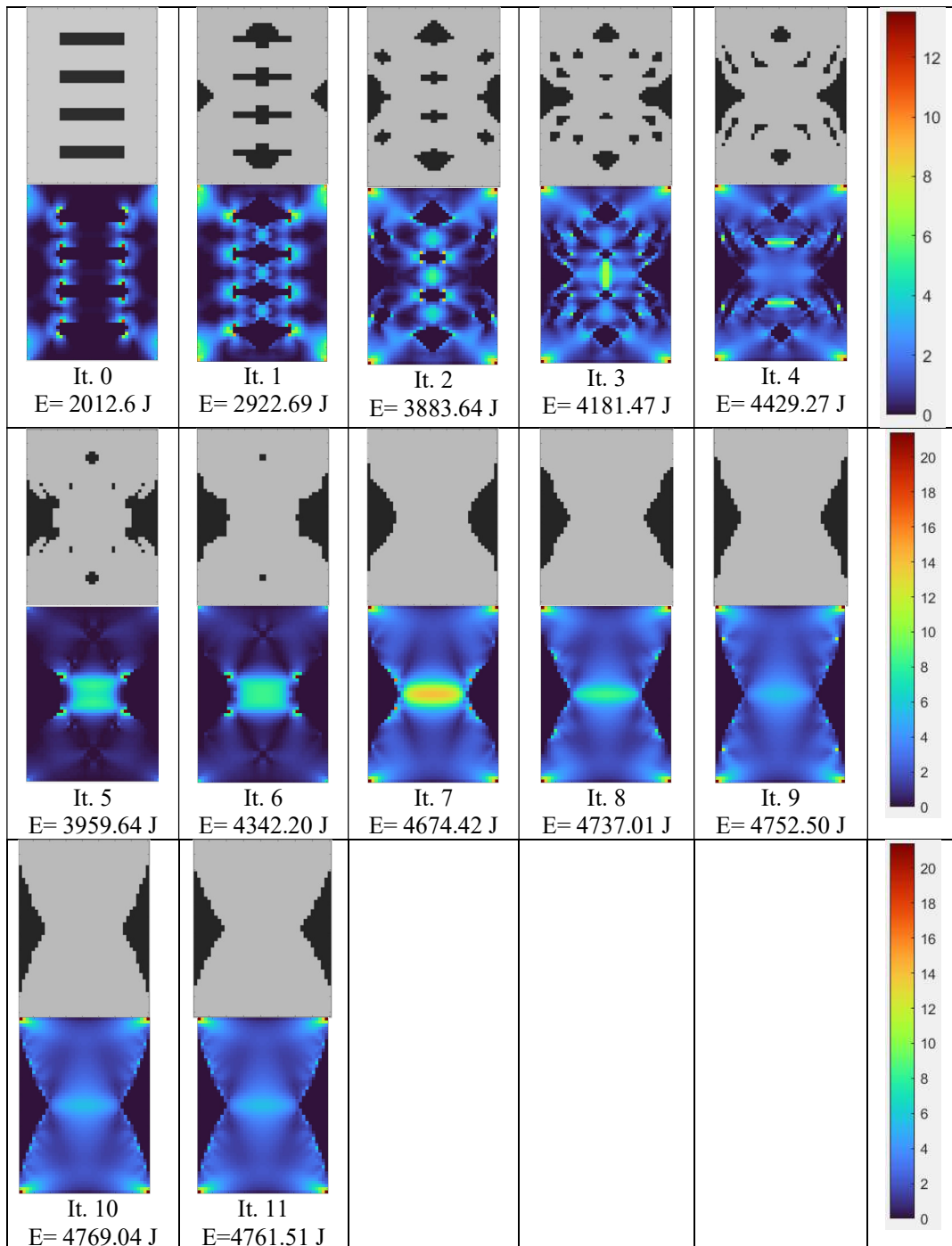
Resultados optimización único objetivo disipador cuatros ranuras circulares. Dos vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.



Nota: Las unidades de las barras de color son de energía Jules (J) para cada elemento.

Tabla 35.

Resultados optimización único objetivo disipador ranuras rectangulares horizontales. Dos vecinos en el vecindario del chequeo de flotantes.

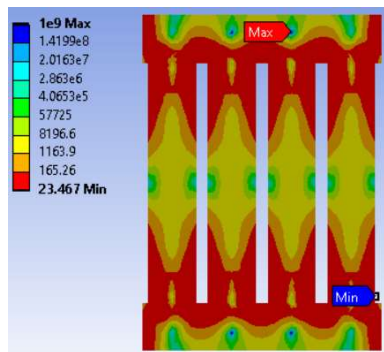


6.3. Fatiga del disipador

Al aplicar un ciclo de carga de 10 mm para el disipador de ranuras verticales que se ha trabajado en las referencias mencionadas previamente (Ghabraie, Ferrer) y aplicar el análisis por fatiga descrito en el capítulo 5.5.3 se obtiene que el disipador resiste 23 ciclos de carga completos antes de fallar como se muestra en la **Figura 40**, en los que logra acumular una cantidad de energía de 19357 J.

Figura 40.

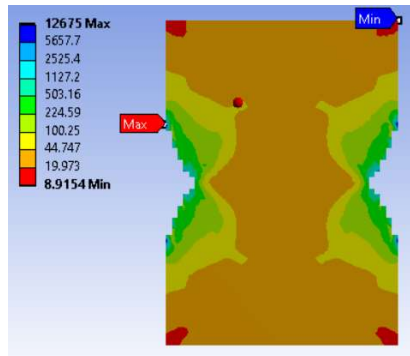
Cantidad de ciclos de carga disipador ranuras verticales inicial.



Para la versión optimizada con la metodología multiobjetivo se tiene que el disipador resiste 9 ciclos de carga **Figura 41** en los que logra acumular una energía de 31841 J y, en el caso de la versión optimizada con la metodología de único objetivo, el disipador resiste 12 ciclos en los que podría disipar una energía total de 49032 J.

Figura 41.

Cantidad de ciclos de carga disipador ranuras verticales optimizado con metodología multiobjetivo.



7. Conclusiones

- 7.1. En cumplimiento del primer objetivo específico, se modeló el disipador histerético de placas ranuradas bajo carga cíclica en el software ANSYS (APDL y Workbench) con protocolos de carga completos de 23 ciclos y reducidos con 1 solo ciclo para validar el modelo. Encontrando concordancia entre los resultados de los modelos numéricos y ensayos experimentales reportados en la literatura como se muestra en las secciones 5.1 y 5.3.3.
- 7.2. Se determinó que, para la malla de elementos finitos rectangulares, en un rango de tamaños máximos de lado de entre 1mm y 5mm no hay diferencia significativa en el valor global de energía de deformación, pero sí hay diferencias considerables en los tiempos de cómputo. Para una malla con tamaños de 1mm el análisis estructural toma hasta 15 minutos por ciclo de carga mientras que para una malla con elementos de 5mm el tiempo se reduce a 30 segundos por ciclo de carga para las características del computador utilizado en este trabajo.
- 7.3. Sobre el segundo objetivo específico, se formuló el problema de optimización de un disipador de placas ranuradas como un problema multiobjetivo de acuerdo con la teoría de los autómatas celulares híbridos donde las funciones en conflicto son la masa y la energía de deformación como se presenta en el capítulo 0 y sección 5.2.5.1. Adicionalmente, se formuló el problema de optimización como un problema de único objetivo donde el objetivo es maximizar el valor de energía de deformación manteniendo la masa constante como se describe en la sección 5.2.5.2.
- 7.4. En relación con el tercer objetivo específico, se adaptó la técnica de los autómatas celulares híbridos para el problema optimización de un disipador metálico tipo cortante

de placas ranuradas, de manera tradicional, como un problema multiobjetivo donde las funciones en conflicto son la masa y la energía de deformación y, para las características del autómeta propuestas en este trabajo, se encontró que la geometría inicial no tiene influencia en el resultado del proceso de evolución. Al final, existe solo una geometría óptima para el problema y es el tipo X-Shaped como se muestra en la sección 6.1. Adicionalmente, el algoritmo de optimización fue validado de forma cuantitativa comparando con los resultados de otros trabajos en la literatura como se muestra en la sección 0.

- 7.5. De acuerdo con la metodología y resultados, para el problema multiobjetivo no influye la geometría inicial pero otros factores sí. Los porcentajes de participación de la masa y energía de deformación dentro de la función objetivo influyen en la convergencia del algoritmo. Gran participación de la masa ocasiona una evolución lenta, mientras que una baja participación acelera el proceso de optimización, pero puede ocasionar una pérdida de sentido físico del problema como separación del dominio.
- 7.6. Los resultados de la optimización multiobjetivo muestran que, para protocolos de carga simétricos, la evolución de las variables de diseño que sigue una regla local conserva la simetría del disipador a nivel global, se determinó que las geometrías simétricas son convenientes en términos de capacidad de disipación de energía.
- 7.7. Como aporte adicional al trabajo, se adaptó la técnica de los autómetas celulares híbridos para atender el problema de optimización como un problema de único objetivo. En este caso las técnicas basadas en la teoría de control y gradiente no fueron eficaces al generar cambios en la variable de diseño. Al tener un dominio discreto y no continuo, el cambio producido no es significativo para ser tenido en cuenta en la aproximación a cero o uno. En este trabajo se propuso una regla de evolución que combina y adapta dos estrategias

presentadas en trabajos previos como se describe en la sección 5.2.5.2. La regla propuesta permite una evolución estable y convergencia en una cantidad baja de iteraciones.

- 7.8. Los resultados del problema multiobjetivo cuya regla de evolución se basaba en teorías deterministas, criterios de optimalidad y leyes de la física (Ley de Hooke) son similares a los obtenidos en el problema de único objetivo cuya regla de evolución se basaba en heurísticas. Lo anterior permite afirmar que la forma óptima para un disipador de placas ranuradas, con las dimensiones y condiciones de carga descritas, es la forma de equis (X-shaped).
- 7.9. Se aplicó por primera vez, de acuerdo la revisión realizada por la autora, una técnica basada en autómatas celulares para resolver un problema de ingeniería estructural que involucra la optimización topológica de disipadores histeréticos de placas ranuradas.
- 7.10. Con la metodología propuesta en este estudio se consiguió un diseño optimizado de hasta 371% en el valor de energía de deformación del disipador de placas ranuradas partiendo de un diseño con menor capacidad de disipación de energía.
- 7.11. De acuerdo con el cuarto objetivo específico, se midió la robustez del algoritmo a través del tiempo de cálculo presentado en la Tabla 7 y cantidad de iteraciones de los diferentes procesos de optimización. Se encontró que esta técnica permite obtener topologías optimizadas en una cantidad baja de iteraciones; para los dispositivos reportados en este trabajo la máxima cantidad de iteraciones fue de 16.
- 7.12. La complejidad en la aplicación del algoritmo es apropiada para la complejidad del problema desde el punto de vista de la aplicación como modelo computacional. El análisis estructural por elementos finitos del disipador, al ser un elemento con dimensiones físicas pequeñas 100x139mm, no implica un alto costo computacional lo

que es fundamental para aplicar la técnica de los autómatas celulares híbridos en tiempos de cálculo relativamente bajos, pues esta técnica requiere un análisis estructural en cada iteración para la actualización de las variables de estado.

- 7.13. Los resultados de la optimización indican que la técnica de optimización no es sensible a la geometría inicial, la evolución depende completamente de la configuración de la regla de evolución y una única regla no es efectiva para todos los problemas iniciales. Como se describe en los capítulos 6.2 y 5.2.5.2, la regla de evolución propuesta para la geometría inicial con ranuras rectangulares verticales no es efectiva para otras geometrías iniciales, por lo que es necesario ajustar los factores que actúan en la evolución del algoritmo para cada caso particular o realizar un estudio futuro enfocado en la determinación de la regla de evolución local.
- 7.14. Debido a que el modelo de análisis estructural no predecía la falla, se hizo un breve estudio sobre la fatiga de los disipadores que se presentó en las secciones 5.5.3 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Con esta revisión del comportamiento del disipador para fatiga de bajo ciclo, se evidencia que algunas geometrías de disipador absorben baja cantidad de energía de deformación en un ciclo, pero pueden trabajar durante mayor cantidad de ciclos y otras geometrías permiten valores mucho mayores de absorción de energía en cada ciclo, pero resisten una baja cantidad de ciclos.
- 7.15. En relación con el quinto objetivo específico, se revisó la influencia de la relación ancho sobre alto en el comportamiento del disipador como se muestra en la sección 5.5. Los resultados revelan que las placas más anchas y bajas permiten una mejor distribución de esfuerzos que las más altas y esbeltas, por lo que las cantidades de energía de deformación de dichas placas son considerablemente mayores.

7.16. Se estima que puede existir una relación optima entre el ancho y la altura de las placas.

Para placas muy altas, el dispositivo puede resistir grandes desplazamientos, pero desarrolla fuerzas muy bajas, mientras que para dispositivos muy anchos se desarrollan grandes fuerzas, pero desplazamientos cortos. Las dos situaciones anteriores indican que hay un límite para la relación a partir del cual, incrementar la altura o incrementar el ancho de la placa puede reducir la capacidad de disipación del disipador.

7.17. Los resultados obtenidos en este trabajo para el análisis de la relación ancho/alto del disipador son parciales ya que, debido a la naturaleza no lineal del problema, el protocolo de carga afectará las respuestas mecánicas. En este trabajo se aplicó un solo ciclo de carga; si se estudia el comportamiento de cada amortiguador bajo un protocolo de desplazamiento completo con varios ciclos, los resultados pueden cambiar ya que algunos dispositivos resistirán más ciclos de carga acumulada que otros.

Referencias Bibliográficas

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *NSR-10 Título A - Requisitos generales de diseño y construcción sísmo resistente*, vol. Título A. 2010, p. 186.
- Oviedo, J., & Duque, M del P. (2009). “Disipadores Histeréticos Metálicos como Técnica de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones Colombianas,” *Rev. EIA*, vol. 11, pp. 51–63.
- J. C. De la Llera, C. Esguerra, and J. L. Almazán. (2004). “Earthquake behavior of structures with copper energy dissipators,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 33, no. 3, pp. 329–358, doi: 10.1002/eqe.354.
- Chan, R., Albermani, F. & Williams, M. (2009). “Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 2, pp. 260–268, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.03.017.
- Oh, S., Kim, Y., & Ryu, H. (2009). “Seismic performance of steel structures with slit dampers,” *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 9, pp. 1997–2008, doi: 10.1016/j.engstruct.2009.03.003.
- Teruna, D., Majid, T., & Budiono, B. (2015). “Experimental study of hysteretic steel damper for energy dissipation capacity,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2015, doi: 10.1155/2015/631726.
- Ferrer, S. & Villalba, D. (2017). “Influence of the Shape of Perforated Shear Metallic Dampers Over Their Energy Dissipation Capacity,” VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Barranquilla. Colomb., pp. 1–7.

Kafi, M. (2019). “Magazine of Civil Engineering The geometric shape effect of steel slit dampers in their behavior,” vol. 87, no. 3, pp. 3–17, doi: 10.18720/MCE.87.1.

Ansys Inc., “ANSYS: Engineering Simulation & 3D Design Software.” (2020). [Online]. Available: <https://www.ansys.com/>

Ghabraie, K., Chan, R., Huang, X. & Xie, Y. (2010). “Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 2258–2267, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.03.028.

Chan, R., & Albermani, F. (2008). “Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation,” *Eng. Struct.*, vol. 30, no. 4, pp. 1058–1066, doi: 10.1016/j.engstruct.2007.07.005.

MathWorks, “MATLAB & Simulink.” 1994. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Hudson, D. (1956). “Hudson_1956.pdf,” Earthquake Ground. Motions, p. 12.

Jaisee, S., Yue, F. & Ooi, Y. (2021). “A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications,” *Eng. Struct.*, vol. 235, no. January, p. 112022, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112022.

Gholami, N., Garivani, S., and Askariani, S. (2022). “State-of-the-Art Review of Energy-Based Seismic Design Methods”, vol. 29, no. 4. Springer Netherlands, doi: 10.1007/s11831-021-09645-z.

- Pimiento, J., Salas, A., & Ruiz, D. (2014). “Desempeño Sísmico de un Pórtico con Disipadores de Energía Pasivos de Placas Ranuradas de Acero,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 29, no. 3, pp. 283–298.
- Soong, T. & Spencer, B. (2002). “Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice,” *Eng. Struct.*, vol. 24, no. 3, pp. 243–259, doi: 10.1016/S0141-0296(01)00092-X.
- Oviedo, J. & Duque, M del P. (2006). “Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones,” *Rev. EIA*, no. 11, p. 16, [Online]. Available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=45266819&lang=es&site=ehost-live>
- Saaed, T., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J. & Hedlund, H. (2015). “A state-of-the-art review of structural control systems,” *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 21, no. 5, pp. 919–937, doi: 10.1177/1077546313478294.
- Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Ghaedi, K., Benisi, H. & Hanif, M. (2019). “State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, no. 0123456789, doi: 10.1007/s11831-019-09329-9.
- Kim, J., Kim, M., & Eldin, M. (2017). “Optimal distribution of steel plate slit dampers for seismic retrofit of structures,” *Steel Compos. Struct.*, vol. 25, no. 4, pp. 473–484, doi: 10.12989/scs.2017.25.4.473.
- Karavasilis, T., Krawala, S. & Hale, E. (2012). “Hysteretic model for steel energy dissipation devices and evaluation of a minimal-damage seismic design approach for

steel buildings,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 70, pp. 358–367, doi: 10.1016/j.jcsr.2011.10.010.

Hedayat, A. (2015). “Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 114, pp. 30–50, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.07.003.

Zheng, J., Li, A., & Guo, T. (2015). “Analytical and experimental study on mild steel dampers with non-uniform vertical slits,” *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, vol. 14, no. 1, pp. 111–123, doi: 10.1007/s11803-015-0010-9.

Lee, C., Ju, Y., Min, J., Lho, S. & Kim, S. (2015). “Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings,” *Eng. Struct.*, vol. 99, pp. 192–204, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.04.052.

Perri, F., Faella, C. & Martinelli, E. (2016). “Cost-competitive hysteretic devices for seismic energy dissipation in steel bracings: Experimental tests and low-cycle fatigue characterisation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 57–67, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.021.

Tagawa, H., Yamanishi, T., Takaki, A. & Chan, R. (2016). “Cyclic behavior of seesaw energy dissipation system with steel slit dampers,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 117, pp. 24–34, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.09.014.

Mendoza, A. & Tirado, K. (2018). “Determinación Numérica del Comportamiento Histerético de Disipadores de Placas Ranuradas.” [Trabajo de grado de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.

- H. Ahmadi Amiri, E. P. Najafabadi, and H. E. Estekanchi. (2018). “Experimental and Analytical Study of Block Slit Damper,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 141, pp. 167–178, doi: 10.1016/j.jcsr.2017.11.006.
- S. N. Ferrer and J. D. Villalba. (2018). “Optimización de Forma para Disipadores de Placas Metálicas Histeréticos por Medio del Algoritmo Simulated Annealing,” [Trabajo de grado de maestría]. Pontificia Universidad Javeriana.
- A. Farzampour, M. Khatibinia, and I. Mansouri. (2019). “Shape optimization of butterfly-shaped shear links using Grey Wolf algorithm,” *Ing. Sismica*, vol. 36, no. 1, pp. 27–41.
- S. Wolfram, “Cellular automata as simple self-organizing systems,” 1982. <https://www.stephenwolfram.com/publications/academic/?cat=cellular-automata>
- S. Wolfram, “Cellular Automata,” 1983. <https://www.stephenwolfram.com/publications/academic/?cat=cellular-automata>
- A. Tovar. (2005). “Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería Optimización topológica con la técnica de los autómatas celulares híbridos,” *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.*, vol. 21, no. 4, pp. 365–383.
- M. P. Bendsoe and O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, vol. 53, no. 9. 2003. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- FEMA, *Designing for earthquakes*, vol. 454. 2006, pp. 7–1, 7–51.
- H. Akiyama. (1985). “Earthquake-resistant limit-state design for buildings,” University of Tokyo.

D. E. Margarit. (2013) “Seismic response of new reinforced concrete structures: conventional versus innovative systems using hysteretic dampers”. [Tesis doctoral]. Universidad de Granada.

Sernageomin, Museo Geologico Gobierno de Chile (2003). ¿Cómo se originan los Terremotos?. En *Servicio Nacional de Geología y Minería* [en línea]. [Consulta: 2022]. Recuperado de: https://www.sernageomin.cl/Museo_Geologico/terremotos/losTerremotos.html#:~:text=Un%20terremoto%20es%20el%20movimiento,acumulada%20durante%20un%20largo%20tiempo.

Constantinou, M. C., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., Warn, G. P. (2007). “Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading”. Technical Report, MCEER-07- 0012, August.

Koh, C., Kelly, M. (1988). “A simple mechanical model for elastomeric bearings used in base isolation”. *International journal of mechanical sciences*, Vol. 30(12), pp. 933-943

Abe, M., Yoshida, J., & Fujino, Y. (2004). “Multiaxial behaviors of laminated rubber bearings and their modeling. I: Experimental study”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130(8), pp. 1119-1132.

Abe, M., Yoshida, J., Fujino, Y. (2004). “Multiaxial behaviors of laminated rubber bearings and their modeling. II: Modeling”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130(8), pp. 1133-1144.

- Kumar, M., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C. (2015). "Experimental investigation of cavitation in elastomeric seismic isolation bearings". *Engineering Structures*, Vol. 101, pp. 290-305.
- Maureira, N., de la Llera, J., Oyarzo, C., Miranda, S. (2017). "A nonlinear model for multilayered rubber isolators based on a co-rotational formulation". *Engineering Structures*, Vol. 131, pp. 1-13
- Ishii, K., Kikuchi, M., Nishimura, T., Black, C. J. (2017). "Coupling behavior of shear deformation and end rotation of elastomeric seismic isolation bearings". *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 46(4), pp. 677-694
- Crowder, A. & Becker, T. (2017). "Experimental investigation of elastomeric isolation bearings with flexible supporting columns". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143(7), pp. 04017057-1- 12.
- Hwang, J., & Ku, S. (1997). "Analytical modeling of high damping rubber bearings". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123(8), pp. 1029-1036
- Hwang, J., Wu, J., Pan, T. C., Yang, G. (2002). "A mathematical hysteretic model for elastomeric isolation bearings". *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 31(4), pp. 771-789.
- Dall'Asta, A. & Ragni, L. (2006). "Experimental tests and analytical model of high damping rubber dissipating devices" *Engineering Structures*, Vol. 28(13), pp. 1874-1884.
- Tubaldi, E., Mitoulis, S. & Ahmadi, H. (2018). "Comparison of different models for high damping rubber bearings in seismically isolated bridges". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 104, pp. 329- 345

Robinson, W. & Tucker, A. (1976). "A lead- rubber shear damper". Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol 4, pp. 151-153

Zhang, C., Wang, L., Sun, C., Wu, M. (2018) "Feasibility of the evaluation of the deformation capacity of the shear panel damper by FEM". Journal of Constructional Steel Research Feasibility pp 433–443.

Nuzzo, L., Lossano, D., Cateruno, N., Serino, G., Bozzo, R. (2018). "Experimental and analytical characterization of steel shear links for seismic energy dissipation". Engineering Structures. Volume 172, Pages 405 – 418.

Yang, X. (2018) "Optimization Techniques and Applications with Examples."

Arora, J. (2004). "Introduction to Optimum Design", Second Edition, London.

Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC) <https://www.seaoc.org>

Hossain, R. & Ashraf, M. (2011). "Finite element modelling and analysis of yielding steel shear panel device for passive energy dissipation". III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering

Zhengying, L., Albermani, F., Chan, R.W.K. & Kitipornchai, S. (2011) "Pinching hysteretic response of yielding shear panel device". Engineering Structures journal. Vol. 33, pp. 993-1000.

Dassault Systems, "ABAQUS SIMULIA" 2023. [Online]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>

Ansys Inc., (2023) “LS – DYNA”. Disponible en:
<https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna>

Dassault Systems, “Solidworks” 2023. [Online]. Disponible en:
<https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/solidworks/>

Universidad de Berkle. (2023). “Opensees”. Disponible en: <https://opensees.berkeley.edu/>

Computers ans Structures (2023). “SAP2000”. Disponible en:
<https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>

Computers ans Structures (2023). “PERMORM 3D”. Disponible en:
<https://www.csiespana.com/software/6/perform-3d>

Computers ans Structures (2023). “ETABS”. Disponible en:
<https://www.csiespana.com/software/5/etabs>

Computers ans Structures (2023). “CSi Bridge”. Disponible en:
<https://www.csiespana.com/software/4/csi-bridge>

Fortran Community (2023). “FORTRAN”. Disponible en: <https://fortran-lang.org/es/index>

Python Software Foundation (2023). “PYTHON”. Disponible en: <https://www.python.org/>

Benavent, C. & Akiyama, H. (1998). “Ultimate Enerfy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plates Subject to Shear Deformations”. Structural Construction Engineering. No. 503, 139-147.

Sanchez, S. (2012). “Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos”. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Valencia.

- Y. Liu & M. Shimoda (2013). “Shape optimization of shear panel damper for improving the deformation ability under cyclic loading,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 48, no. 2, pp. 427–435, doi: 10.1007/s00158-013-0909-6.
- Kita, E. & Toyoda, E. (2000) “Structural design using cellular automata”. *Struct. Multidisc. Optim.*, (19):64–73.
- Tovar, A., Niebur, G., Sen, M., Renaud, J. & Sanders, B. (2004a). “Bone structure adaptation as a cellular automaton optimization process,” *Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf.*, vol. 6, no. April, pp. 4242–4255, doi: 10.2514/6.2004-1914.
- Tovar, A., Patel, N., Kaushik, A., Letona, G., Renaud, J. & Sanders, B. (2004b). “Hybrid cellular automata: A biologically-inspired structural optimization technique,” *Collect. Tech. Pap. - 10th AIAA/ISSMO Multidiscip. Anal. Optim. Conf.*, vol. 5, no. September, pp. 2844–2858, doi: 10.2514/6.2004-4558.
- A. Tovar, N. M. Patel, A. K. Kaushik, and J. E. Renaud. (2007). “Optimality conditions of the hybrid cellular automata for structural optimization,” *AIAA J.*, vol. 45, no. 3, pp. 673–683, doi: 10.2514/1.20184.
- A. Tovar, N. M. Patel, G. L. Niebur, M. Sen, and J. E. Renaud. (2006). “Topology optimization using a hybrid cellular automation method with local control rules,” *J. Mech. Des. Trans. ASME*, vol. 128, no. 6, pp. 1205–1216, doi: 10.1115/1.2336251.
- Bochenek, B., & K. TajsZielinska. (2012). “Novel Local Rules of Cellular Automata Applied to Topology and Size Optimization.” *Engineering Optimization* 44 (1): 23–35

Patel, N. M. (2007). “Crashworthiness Design Using Topology Optimization.” Ph.D. thesis, University of Notre Dame, South Bend, IN.

Patel, N.M., Kang, B. & Renaud, J. (2006). “Topology Synthesis of Structures Under Impact Loading Using a Hybrid Cellular Automaton Algorithm.” Paper presented at the 11th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Portsmouth, VA, September 6–8.

Patel, N.M., Kang, B., Renaud, J.E., and Tovar, A. (2009). “Crashworthiness Design Using Topology Optimization.” *Journal of Mechanical Design* 131: 1–12.

Ansys Inc., “ANSYS Help,” 2020. <https://ansyshelp.ansys.com/>

N. Gan, S. Yao, Y. Xiong, and X. Hong. (2018). “A hybrid cellular automaton–bi-directional evolutionary optimization algorithm for topological optimization of crashworthiness,” *Engineering Optimization*, vol. 50, no. 12, pp. 2054–2070, doi: 10.1080/0305215X.2018.1435645.

G. Andrés, M. Algarra, and A. Tovar Pérez. (2009). “Desarrollo de algoritmo para la integración de la optimización topológica y la optimización de forma en estructuras”.

Patel, N. M., D. Tillotson, and J. E. Renaud. (2008). “Comparative Study of Topology Optimization Techniques.” *AIAA Journal* 46 (8): 1963–1975.

E. Andreassen, A. Clausen, M. Schevenels, B. S. Lazarov, and O. Sigmund. (2011). “Efficient Topology Optimization in MATLAB Using 88 Lines of Code,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 43, no. 1, pp. 1–16, doi: 10.1007/s00158-010-0594-7.

Mendoza-Cuy, A., Begambre, O., Villalba-Morales, J. (2020) “Hysteretical Behavior of Steel Slit Dampers Subject to Geometric Changes.”. XLI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering.

Apéndice 1. Funciones de Matlab

a) Función para ver la malla y variables de forma únicamente gráfica.

```
function malla(N,Nel,NNpe,XY,elementos)

%DESCRIPCIÓN con esta función se carga la malla de elementos finitos

    colormap(jet)

    clf

    axis equal

% Obtención de escalas de dibujo

    Xmin=min(XY(:,1:1));

    Xmax=max(XY(:,1:1));

    Ymin=min(XY(:,2:2));

    Ymax=max(XY(:,2:2));

    Xplot=[(Xmin-(Xmax-Xmin)/100) (Xmax+(Xmax-Xmin)/100)];

    Yplot=[(Ymin-(Ymax-Ymin)/100) (Ymax+(Ymax-Ymin)/100)];

% Dibujo de la malla

    hold on

    for i= 1:Nel

        xc=0;

        yc=0;
```

```
for j= 1:NNpe
    Xe(j)= XY(elementos(i,j),1);
    Ye(j)= XY(elementos(i,j),2);
end

fill(Xe,Ye, 'g');

end

hold off
end
```

b) Función para ver la malla con la variable de estado (energía de deformación) solo grafica.

```
function sed(Nel,NNpe,XY,elementos,SEDe)

%DESCRIPCIÓN Esta función asigna gráficamente el valor de energía de
deformación a cada elemento.

colormap(jet)

axis equal

%%DIBUJO
% Escala de dibujo de la malla
Xmin=min(XY(:,1:1)); %limite inferior x
Xmax=max(XY(:,1:1)); %limite superiro x
Ymin=min(XY(:,2:2)); %limite inferior y
Ymax=max(XY(:,2:2)); %limite superior y
Xplot=[(Xmin-(Xmax-Xmin)/8) (Xmax+(Xmax-Xmin)/8)]; %limites escalados x
Yplot=[(Ymin-(Ymax-Ymin)/8) (Ymax+(Ymax-Ymin)/8)];

% Dibujo de resultados en elemento
axis([Xplot Yplot]);
Zmin= min(SEDe(:,2)); %limite inferior energia
Zmax= max(SEDe(:,2)); %limite superior energía
caxis([Zmin,Zmax]) %rango de colores de la grafica
```

```
hold on

for i= 1:Ne1
    for j= 1:NNpe
        Xe(j)= XY(elementos(i,j),1);
        Ye(j)= XY(elementos(i,j),2);
    end
    fill(Xe,Ye,SEDe(i,2));
end
hold off
end
```

c) masanodos(XY_ID)

```
function [matriz_nodos]= masanodos(A)
%UNTITLED4 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

c1 = A(:,2);
c2 = A(:,3);
c1 = unique(c1);
c2 = unique(c2);
matriz = zeros(length(c2)+1,length(c1)+1);
matriz(2:end,1) = c2;
matriz(1,2:end) = c1;

ancho=size(matriz,2);
alto= size(matriz,1);

for i = 2:size(matriz,1)
    for j = 2:size(matriz,2)
        [val,idx] = ismember([matriz(1,j) matriz(i,1)],A(:,2:3),'rows') ;

        if idx==0
            matriz(i,j)=0;
        else
            matriz(i,j)=A(idx,1);
        end
    end
end

matriz_nodos= matriz(2:alto,2:ancho);
end
```

d) `matrizelementos(matriz_nodos,elementos_ID,SEDe)`

```
function [matriz_elementos,Se,X] =
matrizelementos(matriz_nodos,elementos_ID,SEDe)

%load matriz_nodos.mat %Matriz de nodos
%load('elementos.txt'); %tabla de nodos por elemento

B=elementos_ID(:,2:5); %la primera columna es el ID del elemento, las demas
son los nodos por elemento

Ne= size(B,1); %No. de elementos
Nn=size(B,2);
NNx=size(matriz_nodos,2); %Cantidad de nodos en x
NNy=size(matriz_nodos,1); %Cantidad de nodos en y

%MATRIZ DE POSIBLES COMBINACIONES DE NODOS
M=zeros(Ne,Nn); %Matriz para los posibles elementos segun matriz de nodos
k=1;
for i=1:NNy-1
    for j=1:NNx-1
        M(k,:) = [matriz_nodos(i,j) matriz_nodos(i+1,j) matriz_nodos(i,j+1)
matriz_nodos(i+1,j+1)];
        k=k+1;
    end
end
Bs = sort(B,2); %Elementos solidos existentes, ordenar cada fila para poder
comparar
Ms=sort(M,2); %Todos los elementos, incluidos los vacios

Nespacios=size(Ms,1);
R=zeros(Nespacios,1);

%MATRIZ DE ELEMENTOS
for j=1:Nespacios
    [val,idx]=ismember(Ms(j,:),Bs(:,:),'Rows');
    if idx==0
        R(j)=0; %si no pertenece el elemento está vacío y vale cero
    else
        R(j)=elementos_ID(idx,1); %si pertenece el elemento está lleno y
tiene nombre
    end
end
end
```

```

elem=reshape(R,[NNx-1,NNy-1]); %convertir el vector a matriz
matriz_elementos=elem'; %ordenar la matriz

%% Energía
L=zeros(size(R,1),1);

for k=1:size(R,1)
[val2,idx2]=ismember(R(k),SEDe(:,1),'Rows');
    if idx2==0
        L(k)=0; %si no pertenece el elemento está vacío y vale cero
    else
        L(k)=SEDe(idx2,2); %si pertenece el elemento está lleno y tiene
nombre
    end
end
end

SED=reshape(L,[NNx-1,NNy-1]); %convertir el vector a matriz
Se=SED'; %ordenar la matriz

%% Masa
X=zeros(size(matriz_elementos));

for i=1:size(matriz_elementos,1)
    for j=1:size(matriz_elementos,2)

        if Se(i,j)==0
            X(i,j)=0;
        else
            X(i,j)=1;
        end
    end
end
end
end

```

e) `datosparaansys(matriz_elementos,Xnew1,Nel,NNpe,elementos_ID,XY_ID)`

```
function [datosparaansys] =
datosparaansys(matriz_elementos,Xnew1,Nel,NNpe,elementos_ID,XY_ID)

%ELEMENTOS

%1. Identificar los elementos que siguen existiendo y los que se eliminaron
for i=1:size(matriz_elementos,1)
    for j=1:size(matriz_elementos,2)
        if Xnew1(i,j)==1
            elemento_new(i,j)=matriz_elementos(i,j);
        else
            elemento_new(i,j)=0;
        end
    end
end
Nel_new=size(matriz_elementos,1)*size(matriz_elementos,2);
newID_elementos=zeros(Nel_new,NNpe+1);
newID_elementos(:,1)=reshape(elemento_new,[],1);

for j = 1:Nel
    [val,idx] = ismember(newID_elementos(j,1),elementos_ID(:,1),'rows');

    if idx==0
        newID_elementos(j,2:NNpe+1)=0;
    else
        newID_elementos(j,2:NNpe+1)=elementos_ID(idx,2:NNpe+1);
    end
end

ind = find(sum(newID_elementos,2)==0) ; % Remover los ceros
newID_elementos(ind,:) = [];

%2. Hay que asignar a cada nodo de cada elemento sus coordenadas (casillas
%tipo cell)
for i = 1:size(newID_elementos,1)
    [val2,idx2] = ismember(newID_elementos(i,2),XY_ID(:,1),'rows');

    if idx2==0
        ele1(i,:)=0;
    else
        ele1(i,:)=XY_ID(idx2,2:3);
    end
end
```

```

for i = 1:size(newID_elementos,1)
    [val3,idx3] = ismember(newID_elementos(i,3),XY_ID(:,1),'rows');

    if idx3==0
        ele2(i,:)=0;
    else
        ele2(i,:)=XY_ID(idx3,2:3);
    end
end
for i = 1:size(newID_elementos,1)
    [val4,idx4] = ismember(newID_elementos(i,4),XY_ID(:,1),'rows');

    if idx4==0
        ele3(i,:)=0;
    else
        ele3(i,:)=XY_ID(idx4,2:3);
    end
end
for i = 1:size(newID_elementos,1)
    [val5,idx5] = ismember(newID_elementos(i,5),XY_ID(:,1),'rows');

    if idx5==0
        ele4(i,:)=0;
    else
        ele4(i,:)=XY_ID(idx5,2:3);
    end
end

% COORDENADAS DE LOS NODOS
%Identificar nodos que siguen existiendo a partir de los nodos por elemento
F1=intersect(XY_ID(:,1),newID_elementos(:,2));
F2=intersect(XY_ID(:,1),newID_elementos(:,3));
F3=intersect(XY_ID(:,1),newID_elementos(:,4));
F4=intersect(XY_ID(:,1),newID_elementos(:,5));
F=[F1;F2;F3;F4];

new_nodos=unique(F);
Nnew=length(new_nodos);
new_coordenadas=zeros(Nnew,4);

new_coordenadas(:,1)=new_nodos;
    e_old(i)=elementos_ID(idx19,1);
end
end

```

```

for j = 1:Nnew
    [val6,idx6] = ismember(new_coordenadas(j,1),XY_ID(:,1),'rows');

    if idx6==0
        new_coordenadas(j,2:3)=0;
    else
        new_coordenadas(j,2:3)=XY_ID(idx6,2:3);
    end
end

%Hay que renombrar los nodos para que sean numeros consecutivos
coordenadas=zeros(size(new_coordenadas));
coordenadas(:,1)=(1:Nnew)';
coordenadas(:,2:4)=new_coordenadas(:,2:4);

% Ahora hay que renombrar los nodos de cada elemento de acuerdo a las
% coordenadas almacenadas como elei
ID_ele1=zeros(size(newID_elementos,1),1);
ID_ele2=zeros(size(newID_elementos,1),1);
ID_ele3=zeros(size(newID_elementos,1),1);
ID_ele4=zeros(size(newID_elementos,1),1);

for j = 1:size(newID_elementos,1)
    [val7,idx7] = ismember(ele1(j,:),coordenadas(:,2:3),'rows');

    if idx7==0
        ID_ele1(j,1)=0;
    else
        ID_ele1(j,1)=coordenadas(idx7,1);
    end
end
for j = 1:size(newID_elementos,1)
    [val8,idx8] = ismember(ele2(j,:),coordenadas(:,2:3),'rows');

    if idx8==0
        ID_ele2(j,1)=0;
    else
        ID_ele2(j,1)=coordenadas(idx8,1);
    end
end
for j = 1:size(newID_elementos,1)

```

```

for j = 1:size(newID_elementos,1)
    [val9,idx9] = ismember(ele3(j,:),coordenadas(:,2:3),'rows');

    if idx9==0
        ID_ele3(j,1)=0;
    else
        ID_ele3(j,1)=coordenadas(idx9,1);
    end
end
for j = 1:size(newID_elementos,1)
    [val10,idx10] = ismember(ele4(j,:),coordenadas(:,2:3),'rows');

    if idx10==0
        ID_ele4(j,1)=0;
    else
        ID_ele4(j,1)=coordenadas(idx10,1);
    end
end

ELEMENTOS=(1:size(newID_elementos,1))' ID_ele1 ID_ele2 ID_ele3 ID_ele4];
save('elementos2.mat','ELEMENTOS')
save('XY2.mat','coordenadas')
%% GUARDAR
%Nodos por elemento

Nel= size(newID_elementos, 1);

I=ELEMENTOS(:,2);
J=ELEMENTOS(:,3);
K=ELEMENTOS(:,4);
L=ELEMENTOS(:,5);

save('I1.txt','I','-ASCII');
save('I2.txt','J','-ASCII');
save('I3.txt','K','-ASCII');
save('I4.txt','L','-ASCII');
save('Nel.txt','Nel','-ASCII');

% Guardar las coordenadas de los nodos
CX=coordenadas(:,2);
CY=coordenadas(:,3);
CZ=coordenadas(:,4);
N= size(coordenadas, 1);

```

```

save('XN.txt','CX','-ASCII');
save('YN.txt','CY','-ASCII');
save('ZN.txt','CZ','-ASCII');
save('Nnode.txt','N','-ASCII');

%%%%%%%%%%%% PARA REINICIAR
%Asignar a cada nodo de cada elemento sus coordenadas (todo nuevo)
for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val11,idx11] = ismember(ELEMENTOS(i,2),coordenadas(:,1),'rows');

    if idx11==0
        par1(i,:)=0;
    else
        par1(i,:)=coordenadas(idx11,2:3);
    end
end

for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val12,idx12] = ismember(ELEMENTOS(i,3),coordenadas(:,1),'rows');

    if idx12==0
        par2(i,:)=0;
    else
        par2(i,:)=coordenadas(idx12,2:3);
    end
end

for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val13,idx13] = ismember(ELEMENTOS(i,4),coordenadas(:,1),'rows');

    if idx13==0
        par3(i,:)=0;
    else
        par3(i,:)=coordenadas(idx13,2:3);
    end
end

for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val14,idx14] = ismember(ELEMENTOS(i,5),coordenadas(:,1),'rows');

    if idx14==0
        par4(i,:)=0;
    else
        par4(i,:)=coordenadas(idx14,2:3);
    end
end

```

```

%volver a poner nombre original a los nodos para tener nombre de elemento
nuevo con
%nodos viejos

for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val15,idx15] = ismember(par1(i,:),XY_ID(:,2:3),'rows');

    if idx15==0
        nodo1(i,:)=0;
    else
        nodo1(i,:)=XY_ID(idx15,1);
    end
end

for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val16,idx16] = ismember(par2(i,:),XY_ID(:,2:3),'rows');

    if idx16==0
        nodo2(i,:)=0;
    else
        nodo2(i,:)=XY_ID(idx16,1);
    end
end

for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val17,idx17] = ismember(par3(i,:),XY_ID(:,2:3),'rows');

    if idx17==0
        nodo3(i,:)=0;
    else
        nodo3(i,:)=XY_ID(idx17,1);
    end
end

for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val18,idx18] = ismember(par4(i,:),XY_ID(:,2:3),'rows');

    if idx18==0
        nodo4(i,:)=0;
    else
        nodo4(i,:)=XY_ID(idx18,1);
    end
end

```

```
%Ahora con los nodos determinar que elemento era originalmente
n_old=[nodo1 nodo2 nodo3 nodo4]

for i = 1:size(ELEMENTOS,1)
    [val19,idx19] = ismember(n_old(i,:),elementos_ID(:,2:5),'rows');

    if idx19==0
        e_old(i)=0;
    else
        e_old(i)=elementos_ID(idx19,1);
    end
end

e_old=e_old'; %I got you

reinicio=[ELEMENTOS(:,1) e_old]; save('reinicio.mat','reinicio');
end
```

Apéndice 2. Algoritmo de Optimización Multiobjetivo

```

%TOPOLOGY OPTIMIZATION WITH CELLULAR AUTOMATA
%Created by: Angie Paola Mendoza
%From september 2020 to January 2021
clc
clear all

C=load('XY.txt') %coordenadas de los nodos
XY=C(:,2:3);
XY_ID=C(:,1:3);
F=load('elementos.txt') %nodos de cada elemento
elementos=F(:,2:5);
SEDe=load('SEDe.txt'); SEDe(:,2)=0; %energía de deformación original

elementos_ID=[F(:,1) F(:,2:5)];
load('reinicio.mat');
SEDe_new=load('SEDe2');
N = size(XY,1) %cantidad de nodos
Nel= size(elementos,1) %cantidad de elementos
NNpe = size(elementos,2) %nodos por elemento

%%CAMBIAR EL NOMBRE DE LOS ELEMENTOS DE SEDe2 por los originales
%(normalmente salen en orden de ANSYS pero por si acaso)
for i=1:size(reinicio,1)
    [val,idx] = ismember(SEDe_new(i,1),reinicio(:,1),'rows');
    if idx==0
        SEDe_new(i,1)=0;
    else
        SEDe_new(i,1)=reinicio(idx,2);
    end
end
%%ASIGNAR LOS VALORES DE SEDe en los espacios originales
for i=1:Nel
    [val2,idx2] = ismember(SEDe(i,1),SEDe_new(:,1),'rows');
    if idx2==0
        SEDe(i,2)=0;
    else
        SEDe(i,2)=SEDe_new(idx2,2);
    end
end

%EMPEZAMOS
% Dibujo de la malla de Elementos Finitos (solo gráfico, no es información
trabajable para el algoritmo)
%malla(N,Nel,NNpe,XY,elementos); pause;
%sed(Nel,NNpe,XY,elementos,SEDe); pause;

```

```

%% Matriz de nodos (creación de matriz de nodos para con esto crear la
matriz de elementos necesaria)
matriz_nodos= masanodos(XY_ID);
%figure; title('Matriz de nodos'); imagesc(matriz_nodos); pause;

%% Matriz de elementos y Energía de deformación
%Se= VARIABLES DE ESTADO = matriz con estímulo mecánico = energía de
deformación del elemento
%X= VARIABLE DE DISEÑO = matriz densidad relativa de cada elemento (uno o
cero)

[matriz_elementos,Se,X]= matricelementos(matriz_nodos,elementos_ID,SEDe);
%figure; imagesc(matriz_elementos); figure; imagesc(Se); figure;
imagesc(X);pause;

% Identificación de elementos pasivos y activos
passive0 = (X==0);
passive1 = (X==1);
X(passive0) = 0;
X(passive1) = 1.000;

vacio = (Se==0);
Se(vacio) = 0;

%% Estimulos efectivos (dependen del vecindario y tipo de frontera)
%FRONTERA FIJA==0 ; VECINDARIO DE MOORE (9 CELULAS POR VECINDARIO)

%Estimulo MECÁNICO EFECTIVO (yi_trazo)
y_trazo=zeros(size(Se));
alto=size(Se,1);
ancho=size(Se,2);
%Llenar las 4 esquinas
y_trazo(1,1)=Se(1,1)+Se(1,2)+Se(2,2)+Se(2,1);
y_trazo(1,ancho)=Se(1,ancho)+Se(1,ancho-1)+Se(2,ancho-1)+Se(2,ancho);
y_trazo(alto,1)=Se(alto,1)+Se(alto-1,1)+Se(alto-1,2)+Se(alto,2);
y_trazo(alto,ancho)=Se(alto,ancho)+Se(alto-1,ancho)+Se(alto-1,ancho-
1)+Se(alto,ancho-1);
%Llenar los elementos en los bordes
for i=2:size(Se,1)-1
    k=1
    y_trazo(i,k)= Se(i,k)+Se(i+1,k)+Se(i+1,k+1)+Se(i,k+1)+Se(i-1,k)+Se(i-
1,k+1);
end

```

```

for j=2:size(Se,2)-1
    k=1
    y_trazo(k,j)= Se(k,j)+Se(k,j-1)+Se(k,j+1)+Se(k+1,j-
1)+Se(k+1,j)+Se(k+1,j+1);
end
for i=2:size(Se,1)-1
    k=ancho
    y_trazo(i,k)= Se(i,k)+Se(i+1,k)+Se(i+1,k-1)+Se(i,k-1)+Se(i-1,k)+Se(i-
1,k-1);
end
for j=2:size(Se,2)-1
    k=alto
    y_trazo(k,j)= Se(k,j)+Se(k,j-1)+Se(k,j+1)+Se(k-1,j-1)+Se(k-1,j)+Se(k-
1,j+1);
end
%Llenar el resto de elementos
for i=2:size(Se,1)-1
    for j=2:size(Se,2)-1
        y_trazo(i,j)= Se(i,j)+Se(i+1,j)+Se(i+1,j+1)+Se(i+1,j-
1)+Se(i,j+1)+Se(i,j-1)+Se(i-1,j)+Se(i-1,j+1)+Se(i-1,j-1);
    end
end
%Variable de DISEÑO (xi_trazo)
X_trazo=zeros(size(X));

%Llenar elementos en los bordes
for m=2:size(X,1)-1
    n=1
    X_trazo(m,n)= X(m,n)+X(m+1,n)+X(m+1,n+1)+X(m,n+1)+X(m-1,n)+X(m-1,n+1);
end
for p=2:size(X,2)-1
    n=1
    X_trazo(n,p)= X(n,p)+X(n,p-1)+X(n,p+1)+X(n+1,p-
1)+X(n+1,p)+X(n+1,p+1);
end
for m=2:size(X,1)-1
    n=ancho
    X_trazo(m,n)= X(m,n)+X(m+1,n)+X(m+1,n-1)+X(m,n-1)+X(m-1,n)+X(m-1,n-1);
end
for p=2:size(X,2)-1
    n=alto
    X_trazo(n,p)= X(n,p)+X(n,p-1)+X(n,p+1)+X(n-1,p-1)+X(n-1,p)+X(n-1,p+1);
End

```

```

%Llenar los demas elementos
for m=2:size(X,1)-1
    for p=2:size(X,2)-1
        X_trazo(m,p)= X(m,p)+X(m+1,p)+X(m+1,p+1)+X(m+1,p-
1)+X(m,p+1)+X(m,p-1)+X(m-1,p)+X(m-1,p+1)+X(m-1,p-1);
    end
end
% Limitar el dominio de diseño, las 4 ileras (10mm) superior el inferior
siempre tienen material
X_trazo(1:4,:)=9;
X_trazo(53:56,:)=9;

%% Evolución (depende de la regla)

w=0.3; %w es la participación de la energía, HACER CON VARIOS VALORES PARA
VER CUAL SIRVE MÁS AL PROBLEMA (Conviene grande)

do=7850; %densidad del material en kg/m3
p=3;%penalización
Uo=sum(sum(Se)); %energía de deformación total en J
vo=0.0025*0.0025*0.008; %volumen de un solo elemento en m3
mo=do*vo; %masa de un elemento solido
Mo=do*sum(sum(X))*vo; % masa total
y_target=((1-w)/w)*(mo/p)*(Uo/Mo);

%%-%% FULLY STRESS -%%-%%
%%REGLA 1.1: Fully Stress (Vecindario vacio para X y Y)

for i=1:alto
    for j=1:ancho
        Xnew1(i,j)=X_trazo(i,j).*((y_target./y_trazo(i,j)).^(1/p-1)); %si
X=0 un elemento cero se queda cero siempre :c
    end
end
min(min(Xnew1))
Xm=Xnew1;
rmin=2;
nelx= size(Xnew1,2)
nely= size (Xnew1,1)

prueba=rdivide(Xnew1,X_trazo)
factor=y_target;

```

```
for i=1:nely
    for j=1:nelx
        if Xnew1(i,j)>=factor;
            Xnew1(i,j)=1;
        else
            Xnew1(i,j)=0;
        end
    end
end
end
Xnew1(1:4,:)=1;
Xnew1(53:56,:)=1;

figure
imagesc(Xnew1)

%% ELEMENTOS Y NODOS PARA ENVIAR A ANSYS

datosparaansys(matriz_elementos,Xnew1,Nel,NNpe,elementos_ID,XY_ID);

!"C:\Program Files\ANSYS Inc\v201\ansys\bin\winx64\ANSYS201" -b -i
FEAinR.txt -o FEAout.txt

sum(sum(X))
sum(sum(Se))
sum(sum(Xnew1))

figure
imagesc(Se)
colormap("turbo")
```

Apéndice 3. Algoritmo de Optimización con Restricciones

```

%TOPOLOGY OPTIMIZATION WITH CELLULAR AUTOMATA
%Created by: Angie Paola Mendoza
%From september 2020 to January 2021
clc
clear all

%% DATOS INICIALES NECESARIOS PARA MANTENER EL NOMBRE DE NODOS Y ELEMENTOS
C=load('XY.txt');XY=C(:,2:3); XY_ID=C(:,1:3); %coordenadas de los nodos
F=load('elementos.txt'); elementos=F(:,2:5); elementos_ID=[F(:,1)
F(:,2:5)]; %nodos de cada elemento
SEDe=load('SEDe.txt'); SEDe(:,2)=0; %espacios para energía de deformación
N = size(XY,1) %cantidad de nodos
Nel= size(elementos,1) %cantidad de elementos
NNpe = size(elementos,2) %nodos por elemento

%% PREPARACIÓN DE DATOS
%DATOS PARA INICIAR CADA ITERACIÓN
load('reinicio.mat'); %relación de nombre original y nombre que llega de
ansys
SEDe_new=load('SEDe2'); %Energía de deformación de la iteración actual
%CAMBIAR EL NOMBRE DE LOS ELEMENTOS DE SEDe2 por los originales(normalmente
salen en orden de ANSYS pero por si acaso)
for i=1:size(reinicio,1)
    [val,idx] = ismember(SEDe_new(i,1),reinicio(:,1),'rows');
    if idx==0
        SEDe_new(i,1)=0;
    else
        SEDe_new(i,1)=reinicio(idx,2);
    end
end
end
%%%ASIGNAR LOS VALORES DE SEDe en los espacios originales
for i=1:Nel
    [val2,idx2] = ismember(SEDe(i,1),SEDe_new(:,1),'rows');
    if idx2==0
        SEDe(i,2)=0;
    else
        SEDe(i,2)=SEDe_new(idx2,2);
    end
end
end

```

```

%% PREPARACIÓN DEL ALGORITMO
%---Matriz de nodos (creación de matriz de nodos para con esto crear la
matriz de elementos necesaria)
matriz_nodos= masanodos(XY_ID);%figure; title('Matriz de nodos');
imagesc(matriz_nodos); pause;

%Matriz de elementos y Energía de deformación
%---Se= VARIABLES DE ESTADO = matriz con estímulo mecánico = energía de
deformación del elemento
%---X= VARIABLE DE DISEÑO = matriz densidad relativa de cada elemento (uno
o cero)
[matriz_elementos,Se,X]= matricelementos(matriz_nodos,elementos_ID,SEDe);

%Dominio de diseño
%---Las 4 primeras líneas de arriba y abajo están restringidas a contener
material siempre para conservar las condiciones de apoyo y carga.
%---Estímulo MECÁNICO EFECTIVO (yi_trazo)
%Se=Se(5:52,1:40);
%X=X(5:52,1:40);
Nel_dd=numel(Se);
passive0 = (X==0);
passive1 = (X==1);
X(passive0) = 0;
X(passive1) = 1.000;

%% Estímulos efectivos (dependen del vecindario y tipo de frontera)
%---FRONTERA FIJA==0 ; VECINDARIO DE MOORE (9 CELULAS POR VECINDARIO)
y_trazo=zeros(size(Se)); alto=size(Se,1); ancho=size(Se,2);
%Llenar las 4 esquinas
y_trazo(1,1)=(Se(1,1)+Se(1,2)+Se(2,2)+Se(2,1))/4;
y_trazo(1,ancho)=(Se(1,ancho)+Se(1,ancho-1)+Se(2,ancho-1)+Se(2,ancho))/4;
y_trazo(alto,1)=(Se(alto,1)+Se(alto-1,1)+Se(alto-1,2)+Se(alto,2))/4;
y_trazo(alto,ancho)=(Se(alto,ancho)+Se(alto-1,ancho)+Se(alto-1,ancho-
1)+Se(alto,ancho-1))/4;
%Llenar los elementos en los bordes
for i=2:size(Se,1)-1
    k=1
    y_trazo(i,k)= (Se(i,k)+Se(i+1,k)+Se(i+1,k+1)+Se(i,k+1)+Se(i-1,k)+Se(i-
1,k+1))/6;
end
for j=2:size(Se,2)-1
    k=1
    y_trazo(k,j)= (Se(k,j)+Se(k,j-1)+Se(k,j+1)+Se(k+1,j-
1)+Se(k+1,j)+Se(k+1,j+1))/6;
end

```

```

for i=2:size(Se,1)-1
    k=ancho
    y_trazo(i,k)= (Se(i,k)+Se(i+1,k)+Se(i+1,k-1)+Se(i,k-1)+Se(i-1,k)+Se(i-1,k-1))/6;
end
for j=2:size(Se,2)-1
    k=alto
    y_trazo(k,j)= (Se(k,j)+Se(k,j-1)+Se(k,j+1)+Se(k-1,j-1)+Se(k-1,j)+Se(k-1,j+1))/6;
end
%Llenar el resto de elementos
for i=2:size(Se,1)-1
    for j=2:size(Se,2)-1
        y_trazo(i,j)= (Se(i,j)+Se(i+1,j)+Se(i+1,j+1)+Se(i+1,j-1)+Se(i,j+1)+Se(i,j-1)+Se(i-1,j)+Se(i-1,j+1)+Se(i-1,j-1))/9;
    end
end

%Variable de DISEÑO EFECTIVA
X_trazo=zeros(size(X));
%Llenar las 4 esquinas
X_trazo(1,1)=(X(1,1)+X(1,2)+X(2,2)+X(2,1));
X_trazo(1,ancho)=(X(1,ancho)+X(1,ancho-1)+X(2,ancho-1)+X(2,ancho));
X_trazo(alto,1)=(X(alto,1)+X(alto-1,1)+X(alto-1,2)+X(alto,2));
X_trazo(alto,ancho)=(X(alto,ancho)+X(alto-1,ancho)+X(alto-1,ancho-1)+X(alto,ancho-1));

%Llenar elementos en los bordes
for m=2:size(X,1)-1
    n=1
    X_trazo(m,n)= (X(m,n)+X(m+1,n)+X(m+1,n+1)+X(m,n+1)+X(m-1,n)+X(m-1,n+1));
end
for p=2:size(X,2)-1
    n=1
    X_trazo(n,p)= (X(n,p)+X(n,p-1)+X(n,p+1)+X(n+1,p-1)+X(n+1,p)+X(n+1,p+1));
end
for m=2:size(X,1)-1
    n=ancho
    X_trazo(m,n)= (X(m,n)+X(m+1,n)+X(m+1,n-1)+X(m,n-1)+X(m-1,n)+X(m-1,n-1));
End

```

```

for p=2:size(X,2)-1
    n=alto
    X_trazo(n,p)= (X(n,p)+X(n,p-1)+X(n,p+1)+X(n-1,p-1)+X(n-1,p)+X(n-
1,p+1));
end
%Llenar los demas elementos
for m=2:size(X,1)-1
    for p=2:size(X,2)-1
        X_trazo(m,p)= (X(m,p)+X(m+1,p)+X(m+1,p+1)+X(m+1,p-
1)+X(m,p+1)+X(m,p-1)+X(m-1,p)+X(m-1,p+1)+X(m-1,p-1));
    end
end

%% EVOLUCIÓN
Mf_target=sum(sum(X))/Nel_dd; %Restricción de masa
%%%------REGLA GAN + METODO FERRER
yo3_target=(sum(sum(Se)))/Nel_dd; %target inicial
n3=10000;
%Error efectivo
error_2=zeros(size(y_trazo));
for i=1:size(y_trazo,1)
    for j=1:size(y_trazo,2)
        error_2(i,j)=y_trazo(i,j)-yo3_target;
    end
end

xPhys_2=X;
minimo=min(min(error_2));
maximo=max(max(error_2));
Prob_cam=minimo+(maximo)*rand;
%%-% CAMBIO DE UNO A CERO %%%-%
contador1_02=0;

for i=5:round(size(xPhys_2,1)-5) %%fkhjsfb
    for j=1:round(size(xPhys_2,2))
        if xPhys_2(i,j)==1
            if Prob_cam>=error_2(i,j);
                xPhys_2(i,j)=0;
                contador1_02=contador1_02+1;
            end
        end
    end
end
end
end

```

```

    %%% CAMBIO DE CERO A UNO %%%
    f=round(sum(sum(xPhys_2)));
    ceros_2=Ne1_dd-f;
    Matriz0_12=zeros(ceros_2,3); k=1;
    for i=1:size(xPhys_2,1)
        for j=1:size(xPhys_2,2)
            if xPhys_2(i,j)==0;
                Matriz0_12(k,:)=[error_2(i,j),i,j];
                k=k+1;
            end
        end
    end
    [Matriz0_1_order2,rr2] = sort(Matriz0_12(:,1),'descend');
    Matriz0_1_order2 = [Matriz0_12(rr2,1) Matriz0_12(rr2,2)
    Matriz0_12(rr2,3)];

    for i=1:contador1_02;
        xPhys_2(Matriz0_1_order2(i,2),Matriz0_1_order2(i,3))=1;
    end

    %%flotantes
    cambio=0;
    for i=4:size(xPhys_2,1)-4
        for j=1:size(xPhys_2,2)
            if (xPhys_2(i,j)==1) && (X_trazo(i,j)<2) %sensibilidad del
algoritmo
                xPhys_2(i,j)=0;
                cambio=cambio+1;
            end
        end
    end

    if cambio>0
        for i=contador1_02:contador1_02+cambio
            xPhys_2(Matriz0_1_order2(i,2),Matriz0_1_order2(i,3))=1;
        end
    end

    mf_new=sum(sum(xPhys_2))/Ne1_dd;
    if mf_new==Mf_target
        n3=0
    else
        yo3_target=yo3_target*(mf_new/Mf_target);
        n3=n3-1
    end
end

```

```
% ELEMENTOS Y NODOS PARA ENVIAR A ANSYS  
datosparaansys(matriz_elementos,xPhys_2,Nel,NNpe,elementos_ID,XY_ID);  
!"C:\Program Files\ANSYS Inc\v201\ansys\bin\winx64\ANSYS201" -b -i  
FEAinR.txt -o FEAout.txt
```