



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Optimización de la respuesta sísmica de estructuras tipo diagrid mediante  
análisis de sus parámetros geométricos con redes neuronales

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. José Luis Pérez Martínez

---

Dirigido por:

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

---

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Presidente

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno  
Secretario

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim  
Vocal

M. en C. Joaquín Noriega Jiménez  
Suplente

Dr. Enrique Rico García  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Junio de 2026  
México

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

## Resumen

El desconocimiento en el comportamiento de un sistema como el diagrid (DG) ante cargas laterales conlleva al desperdicio de recursos debido a la implementación de una geometría arbitraria. La presente investigación propone determinar el ángulo de la rejilla perimetral DG que permita tener el menor peso y desplazamientos a partir de una arquitectura conocida a través de un modelo de red neuronal. Para lograr esto, se desarrolló un modelo paramétrico para edificios DG que permitió determinar un análisis gravitacional y sísmico, así como el diseño estructural del DG, a partir de este modelo se llevó a cabo un análisis profundo en el que se consideraron 108 edificios entre 5 y 7 niveles en donde se varió tanto la densidad de diagonales como el tamaño de los triángulos que se forman entre los niveles de cada solución. Con los resultados del análisis de los 108 casos de estudio se elaboró una base de datos en donde se crearon relaciones de los datos obtenidos y se desarrolló una red neuronal que utilizó dicho análisis para ser entrenada y validada. Los resultados muestran una tendencia en el comportamiento de las DG que permite conocer y entender su comportamiento estructural a partir del tamaño de módulo o de la densidad de diagonales. Además, la comparativa con el estado del arte confirma que no se han usado los arreglos geométricos óptimos que disminuyan el peso del edificio, obteniendo optimizaciones en el rango de 7.9% a 36.8%. Se concluye que no todas las estructuras DG existentes de altura media pueden mejorar un 10% o más, sin embargo, la disminución de peso lograda confirma una ventana de oportunidad para favorecer la viabilidad de futuros proyectos DG por construir.

(Palabras clave: altura media, comportamiento estructural, inteligencia artificial, análisis modal-espectral).

## Abstract

The lack of understanding of how a system such as the diagrid (DG) behaves under lateral loads leads to a waste of resources due to the use of arbitrary geometry. This research aims to determine the angle of the DG perimeter grid that results in the lowest weight and displacement based on a known architectural design, using a neural network model. To achieve this, a parametric model for DG buildings was developed to perform gravitational and seismic analyses, as well as the structural design of the DG. Based on this model, an in-depth analysis was conducted involving 108 buildings ranging from 5 to 7 stories, in which both the density of diagonals, and the size of the triangles formed between the levels of each solution were varied. Using the results of the analysis of the 108 case studies, a database was created in which relationships were established among the obtained data, and a neural network was developed that utilized this analysis from the database to be trained and validated. The results reveal a trend in the behavior of DG structures that allows us to identify and understand their structural behavior based on the module size or diagonal density. Furthermore, a comparison with the state of the art confirms that optimal geometric arrangements capable of reducing the building's weight have not been utilized, reaching optimizations in the range of 7.9% to 36.8%. It is concluded that not all existing mid-rise DG structures can be improved by 10% or more; however, the weight reduction achieved confirms a window of opportunity to enhance the viability of future DG projects yet to be built.

(keywords: Medium-height Buildings, Structural performance, artificial intelligence, modal-spectral analysis).

A mi Lucy, por todo el amor y apoyo incondicional.

A mi familia, mis padres José Luis y María Eugenia, mi hermana Abril y mis sobrinos Paula, Gonzalo y Carlos, por guiarme, amarme, cuidarme y apoyarme en todos los momentos.

A mis hermanos de otros padres, Henry Torres, Cecy Molinar, Gabriel Rojo, Brisio Álvarez, y Karol Mandujano, por todo el apoyo y confianza.

A mis amigos que forman parte de mí.

## Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, antes CONAHCYT) por el apoyo económico de estos dos años en mis estudios de posgrado.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por mi formación tanto en la licenciatura como en la maestría.

Al Dr. Jaime Moises Horta Rangel, por sus consejos, apoyo y dirección a lo largo de mi trabajo de tesis.

Al Dr. Iván Fermin Arjona Catzim por su amistad, su ayuda y guía en todo momento en este y muchos proyectos más.

Al M. en C. Joaquín Noriega Jiménez por su confianza ciega en mí, su enseñanza desde el San Javier hasta la UAQ, procurando siempre alimentar mi lado humano e ingenieril.

Al Dr. Luis Francisco Pérez Moreno por el apoyo como coordinador de la maestría, por las observaciones y recomendaciones valiosas para esta investigación, así como su lectura y revisión a fondo.

Al Dr. Enrique Rico García por sus observaciones y recomendaciones que enriquecen este trabajo.

A mis compañeros y amigos de mi generación, los máquinas, Emiliano , Rafael, Juan Manuel y Alejandro, porque a pesar de las diferencias siempre estuvimos para apoyar el uno al otro y poder crecer juntos.

A mis compañeros y amigos de la maestría en ciencias con línea terminal en estructuras, por todo el tiempo de calidad, todo el conocimiento compartido, y todo el apoyo.

A Oscar de los Santos y León Valtierra por su amistad y apoyo, siempre estaré agradecido por la confianza que me permitió crecer profesionalmente.

A Ivette Aguirre Ramos, por todo el apoyo y cariño que siempre me brindó.

A mis tios de otros abuelos Edith Ulloa y Luis Molinar por todo el apoyo y confianza siempre.

A Liz Cardoso, por la ayuda y acompañamiento invaluable a lo largo de todo el primer año de maestría.

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>17</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	21
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	23
<b>2 ANTECEDENTES</b> .....	<b>24</b>
2.1 DIAGRID .....	24
2.2 RETRASO DE CORTANTE.....	32
2.3 CLASIFICACIÓN DE EDIFICIOS POR ALTURA.....	32
2.4 INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	33
2.4.1 <i>Redes Neuronales</i> .....	34
<b>3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b> .....	<b>37</b>
3.1 RESPUESTA DINÁMICA DE SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD .....	37
3.1.1 <i>Análisis No Lineal</i> .....	41
3.2 DIAGRID .....	44
3.3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	46
3.3.1 <i>Redes Neuronales</i> .....	47
<b>4 HIPÓTESIS</b> .....	<b>51</b>
4.1 HIPÓTESIS .....	51
<b>5 OBJETIVOS</b> .....	<b>52</b>
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	52
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	52
<b>6 METODOLOGÍA</b> .....	<b>53</b>
6.1 ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DIAGRID DE ALTURA MEDIA PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA. ....	53
6.1.1 <i>Selección del espectro de diseño a utilizar para el análisis</i> .....	54
6.1.2 <i>Selección de los casos de estudio</i> .....	55

6.1.3	<i>Programación de geometría paramétrica para análisis gravitacional y análisis no lineal.</i>	59
6.1.4	<i>Programación de diseño estructural.</i>	61
6.2	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE DIFERENTES CONFIGURACIONES GEOMÉTRICAS.	62
6.2.1	<i>Elaboración de base de datos con diferentes configuraciones de diagonales.</i>	62
6.2.2	<i>Crear relaciones en desplazamientos, derivas, y peso de la estructura.</i>	63
6.3	DESARROLLO DE UNA RED NEURONAL	63
6.3.1	<i>Construir arquitectura de la red neuronal de perceptrón multicapa.</i>	63
6.3.2	<i>Determinar la variable de salida que diga qué geometría es la más adecuada para la estructura.</i>	65
6.3.3	<i>Entrenar red neuronal con la base de datos hecha y las relaciones obtenidas entre diferentes configuraciones.</i>	65
6.4	EVALUAR Y COMPARAR LA RED NEURONAL CON EL ESTADO DEL ARTE.	66
6.4.1	<i>Determinar el error cuadrático medio de la red neuronal.</i>	66
6.4.2	<i>Comparar resultados con estado del arte.</i>	66
<b>7</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>67</b>
7.1	ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DIAGRID DE ALTURA MEDIA PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA.	67
7.1.1	<i>Selección del espectro de diseño a utilizar para el análisis.</i>	67
7.1.2	<i>Selección de los casos de estudio.</i>	71
7.2	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS CASOS DE ESTUDIO.	74
7.2.1	<i>Distribución de carga axial.</i>	74
7.2.2	<i>Comparación entre desplazamientos máximos normalizados y modo fundamental de vibración.</i>	95
7.2.3	<i>Comparativa de comportamiento estructural.</i>	115
7.2.4	<i>Evaluación del comportamiento estructural.</i>	124
7.3	DESARROLLO DE UNA RED NEURONAL	127
7.3.1	<i>Determinar las variable de entrada y salida de la red neuronal</i>	127
7.3.2	<i>Construir arquitectura de la red neuronal de perceptrón multicapa.</i>	128
7.3.3	<i>Entrenar red neuronal con la base de datos hecha y las relaciones obtenidas entre diferentes configuraciones.</i>	129

7.4 EVALUAR Y COMPARAR LA RED NEURONAL ..... 129

    7.4.1 *Determinar el error cuadrático medio de la red neuronal.* ..... 130

    7.4.2 *Comparar resultados con estado del arte.* ..... 132

**8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 140**

**9 REFERENCIAS ..... 142**

## Índice de figuras

Figura 1. Estructura diagrid en Ciudad de México. Fuente: Google (2026) .....	17
Figura 2. Variación de ángulo de inclinación de estructuras diagrid. ....	19
Figura 3. Torre Shukhov del año 1919.....	25
Figura 4. Diagrid John Hancock Center de núcleo diagonalizado.....	26
Figura 5. Diagrid Arcelormittal Orbit Tower de configuración AESS. ....	27
Figura 6. Diagrid O-14. ....	28
Figura 7 Clasificación IA, ML, DL.....	34
Figura 8. Crecimiento anual de las cinco principales fuentes de investigaciones de IA en ingeniería estructural. Adaptado de: (Saini, 2025).....	36
Figura 9 Curva Carga-Deformación .....	41
Figura 10 Rigidez global a flexión y corte en DG.....	46
Figura 11 Arquitectura de Red neuronal. ....	49
Figura 12. Diagrama de la metodología .....	53
Figura 13 Configuraciones de retícula DG.....	56
Figura 14 Configuración del sistema gravitacional DG. ....	59
Figura 15 Modelo paramétrico en el software Rhino-Grasshopper.....	60
Figura 16 Parámetros topológicos DG.....	61
Figura 17 Arquitectura de red neuronal. ....	64
Figura 18 Casos de estudio DG 5 pisos 10m x 10m.....	72

Figura 19 Casos de estudio DG 5 pisos 15m x 15m.....	73
Figura 20 Casos de estudio DG 5 pisos 30m x 30m.....	73
Figura 21 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X_10Y_5P_4X4. .....	75
Figura 22 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X_10Y_5P_6X6. .....	76
Figura 23 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X_15Y_5P_4X4. .....	77
Figura 24 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X_15Y_5P_6X6. .....	78
Figura 25 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X_30Y_5P_6X6. .....	79
Figura 26 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X_30Y_5P_8X8. .....	80
Figura 27 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X_10Y_6P_4X4. .....	81
Figura 28 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X_10Y_6P_6X6. .....	82
Figura 29 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X_15Y_6P_4X4. .....	83
Figura 30 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X_15Y_6P_6X6. .....	84
Figura 31 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X_30Y_6P_6X6. .....	85

Figura 32 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X_30Y_6P_8X8. .....	86
Figura 33 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X_10Y_7P_4X4. .....	88
Figura 34 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X_10Y_7P_6X6. .....	89
Figura 35 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X_15Y_7P_4X4. .....	90
Figura 36 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X_15Y_7P_6X6. .....	91
Figura 37 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X_30Y_7P_6X6. .....	92
Figura 38 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X_30Y_7P_8X8. .....	93
Figura 39 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X_10Y_5P_4X4 .....	96
Figura 40 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X_10Y_5P_6X6 .....	97
Figura 41 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X_15Y_5P_4X4 .....	98
Figura 42 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X_15Y_5P_6X6 .....	99
Figura 43 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X_30Y_5P_6X6 .....	100

Figura 44 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X_30Y_5P_8X8 .....	101
Figura 45 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X_10Y_6P_4X4 .....	102
Figura 46 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X_10Y_6P_6X6 .....	103
Figura 47 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X_15Y_6P_4X4 .....	104
Figura 48 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X_15Y_6P_6X6 .....	105
Figura 49 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X_30Y_6P_6X6 .....	106
Figura 50 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X_30Y_6P_8X8 .....	107
Figura 51 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X_10Y_7P_4X4 .....	109
Figura 52 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X_10Y_7P_6X6 .....	110
Figura 53 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X_15Y_7P_4X4 .....	111
Figura 54 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X_15Y_7P_6X6 .....	112
Figura 55 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X_30Y_7P_6X6 .....	113

Figura 56 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X_30Y_7P_8X8 .....	114
Figura 57 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 10X_10Y_5P .....	116
Figura 58 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 15X_15Y_5P .....	117
Figura 59 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 30X_30Y_5P .....	118
Figura 60 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 10X_10Y_6P .....	119
Figura 61 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 15X_15Y_6P .....	120
Figura 62 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 30X_30Y_6P .....	121
Figura 63 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 10X_10Y_7P .....	122
Figura 64 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 15X_15Y_7P .....	123
Figura 65 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 30X_30Y_7P .....	124
Figura 66 Parámetro G para 5 niveles .....	125
Figura 67 Parámetro G para 6 niveles .....	126
Figura 68 Parámetro G para 7 niveles .....	126
Figura 69 Arquitectura de red neuronal artificial .....	129
Figura 70 Dispersión de valores de predicción de salida 1 .....	130
Figura 71 Dispersión de valores de predicción de salida 2 .....	131
Figura 72 Geometría original Manukau Institute of Technology .....	133
Figura 73 Geometría de red neuronal Manukau Institute of Technology .....	133
Figura 74 Geometría original 1 The Avenue .....	134
Figura 75 Geometría de red neuronal 1 The Avenue .....	135

Figura 76 Geometría original Pabellón de Chile Expo Milán.....	136
Figura 77 Geometría de red neuronal Pabellón de Chile Expo Milán .....	136
Figura 78 Mejoras de peso de los modelos de la red neuronal .....	137
Figura 79 Geometría Contraventeada Manukau Institute of Technology .....	137
Figura 80 Geometría Contraventeada 1 The Avenue .....	138
Figura 81 Geometría Contraventeada Pabellón de Chile Expo Milán.....	138
Figura 82 Comparativa de peso de estructuras contraventeadas vs soluciones DG de red neuronal.....	139

## Índice de tablas

Tabla 2-1 Proyectos Diagrid alrededor del mundo.....	29
Tabla 2-2 Configuraciones DG en edificios de diferentes alturas. ....	32
Tabla 3-1: Tipos de análisis estructurales.....	42
Tabla 7-1 Espectro de colapso .....	68
Tabla 7-2 Espectro de servicio.....	70
Tabla 7-3 Casos de estudio .....	71

## 1 Introducción

Las estructuras diagrid (DG) se definen como aquellas estructuras que eliminan las tradicionales columnas verticales en sus fachadas, y estas son reemplazadas por columnas inclinadas que se cruzan entre sí (Wang & Liu, 2025) ([Figura 1](#)).

La elección de la geometría de la rejilla perimetral de una DG es de suma importancia, ya que a partir de la consideración de sus parámetros geométricos se desarrollará un comportamiento que impacta directamente sobre diferentes aspectos como: la seguridad estructural, vida útil de la estructura, número de elementos a montar, longitud de elementos a montar, constructibilidad, peso, costo de la estructura, entre otros (Vhanmane & M Bhanuse, 2020).

Las DG presentan una configuración específica en la que los sistemas resistentes a cargas laterales y gravitacionales se integran. Este sistema estructural soporta tanto las cargas gravitacionales como las laterales (Asadi, 2017).



Figura 1. Estructura diagrid en Ciudad de México. Fuente: Google (2026)

La demanda estructural que tiene que soportar las DG son: las cargas gravitacionales, tales como las cargas debidas al peso propio de los elementos estructura, los acabados y elementos que están adheridos a columnas, vigas, losas o muros, cargas debido a la ocupación de la estructura, empujes de fluidos; y las cargas ambientales o accidentales, estas se refieren a viento, sismo, granizo, lluvia, nieve o alguna otra carga que aparezca de forma esporádica en la vida útil de la estructura (Patel, 2023).

Actualmente la normativa mexicana recomienda tener una inclinación cercana a los  $70^\circ$  con respecto a una línea horizontal (CDMX, 2023), sin embargo, esto se vuelve ambiguo debido a que algunos de los parámetros geométricos como: dimensión del terreno, saturación de diagonales, número de pisos, entre otras, no han sido enunciados con claridad.

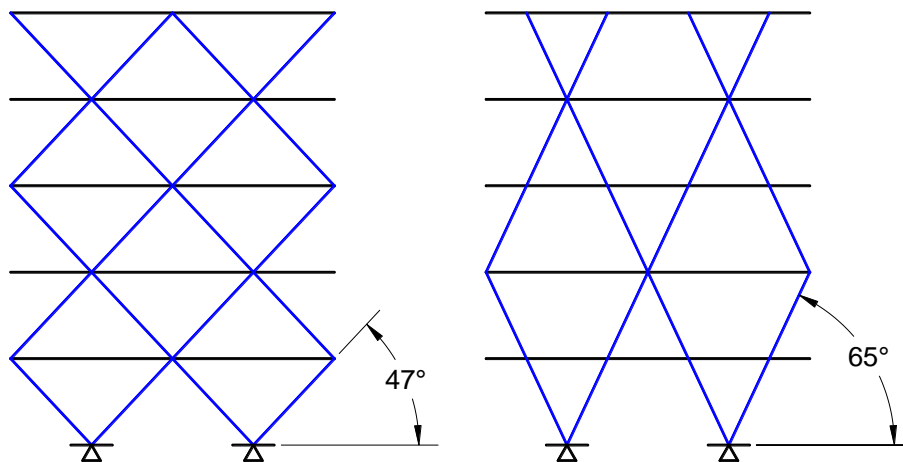
El peso de una DG varia de forma importante según la inclinación que tenga, pudiendo llegar a tener hasta un 48% de diferencia en la masa de la rejilla perimetral (Zhang, et al., 2012).

Uno de los objetivos principales que tiene la agenda 2030 es el asegurar que todas las personas cuenten con viviendas y servicios seguros y asequibles (ONU, 2015), por lo que se requiere estudiar diferentes formas de obtener estructuras con la menor cantidad de material posible, disminuyendo las emisiones de carbono y el costo de la edificación al impactar directamente en las 7 etapas del ciclo de vida de una construcción: estudios previos, anteproyecto, proyecto conceptual, proyecto ejecutivo, construcción, mantenimiento, y demolición (Wang & Chen, 2023).

Además de ajustar la inclinación de la rejilla perimetral, se debe elegir la sección transversal que permita soportar las cargas sísmicas en el DG según el comportamiento sísmico que se desarrolle, el cual depende en gran medida de la forma geométrica, la relación entre su largo y ancho, la altura con respecto a estas dos dimensiones y la configuración interna del sistema ante cargas laterales como lo es el sismo (Perez-Martinez, et al., 2025).

Una de las herramientas esenciales para las tareas de optimización en el área de la ingeniería son las redes neuronales artificiales (Seo, 2024), las cuales consisten en imitar el conjunto de soluciones posibles en un escenario. El uso de redes neuronales artificiales tales como el perceptrón multicapa es adecuado para aproximar funciones no lineales y por lo tanto resolver este tipo de problemas (Villarrubia, et al., 2018).

En la presente investigación, se abordó el análisis de las DG de altura media, con el objetivo de entender su comportamiento ante un evento sísmico a través de la variación de la inclinación en la rejilla perimetral ([Figura 2](#)), utilizando una red neuronal que permitió conocer el grado de inclinación que minimice el peso, así como la eficiencia de la propuesta estructural que el usuario desea utilizar.



**Figura 2. Variación de ángulo de inclinación de estructuras diagrid.**

Se empleó el API del software ETABS mediante la herramienta gráfica Rhino para analizar las propiedades mecánicas, incluyendo esfuerzos internos, reacciones y propiedades dinámicas como modos de vibración, períodos y frecuencias, así como para diseñar la rejilla DG utilizando diferentes parámetros geométricos tales como grados de inclinación y diferentes niveles, posteriormente se evaluaron las diferentes opciones de inclinaciones y saturaciones de diagonales, eligiendo las que presentan un menor peso y desplazamiento. Una vez analizadas las DG se

construyó un modelo de red neuronal que permite conocer la eficiencia de la solución estructural ingresada por el usuario y también muestra el grado de inclinación recomendado.

A continuación, se presenta la justificación y la descripción del problema del presente trabajo situándose en la actualidad de los edificios de mediana altura y la necesidad de tener estructuras seguras y económicas para las ciudades que presentan una continua demanda sísmica.

En el capítulo 2 se enlistan los antecedentes de aquellas investigaciones que permitieron desarrollar diferentes análisis para las DG, así como diferentes aplicaciones de las ramas de inteligencia artificial en la ingeniería estructural, mientras que en el capítulo 3 se menciona la fundamentación teórica que soporta la investigación. En el capítulo 4 y 5 se mencionan la hipótesis y objetivos de este trabajo respectivamente. En el capítulo 6 se describe la metodología que se siguió y finalmente en el capítulo 7 y 8 se muestran los resultados y conclusiones de este trabajo respectivamente.

## 1.1 Justificación

El aumento poblacional en México ha sido importante, aumentando más de 100 millones de personas en los últimos 70 años (INEGI, 2020), lo que provoca una demanda de infraestructura nueva, creciendo de forma rápida tanto horizontal como verticalmente (Milton, et al., 2020), creando la necesidad de tener estructuras que puedan albergar al mayor número de personas aprovechando la mayor parte del terreno en cada uno de los edificios, con el menor costo posible.

La estructuración tradicional actual de edificios con arriostramientos requiere una gran cantidad de acero, teniendo entre el 20 al 50% más de material que un DG según las características y solicitaciones de cargas (Shah, 2016), lo que representa un aumento en las emisiones de carbono y costo de la estructura de forma significativa volviendo inviable económicamente este tipo de soluciones.

Los desplazamientos y distorsiones en los edificios representan un riesgo, no solo de servicio sino de colapso, por lo que es necesario el control de éstos a lo largo de la vida útil de la estructura. Este tipo de estructuras por su configuración y altura son clasificadas como de alto riesgo, por lo que un colapso significa una pérdida grande no solo del inmueble, sino de los cientos de personas que estén dentro y de los edificios aledaños donde pueda ocurrir una reacción en cadena de derrumbes al tener diferentes modos de colapso de este tipo de estructuras (Lu, 2011).

México es un país donde se han registrado sismos de magnitudes especialmente altas, como el sismo de la Ciudad de México en 1985 y 2017, así como en el norte del estado de Baja California y Sonora donde se encuentra una parte de la “Falla de San Andrés”, esta actividad sísmica ha estado provocando daños en la infraestructura (Jaimes & Suárez, 2025).

Por lo tanto, es necesario desarrollar herramientas que permitan construir estructuras, a pesar de las diferentes condiciones de cargas a las que sean sometidas, como, por ejemplo, los sismos en un país como México para que sean seguras para los usuarios, económicamente viables y que tengan un menor impacto

ambiental que las edificaciones tradicionales. Los resultados obtenidos en esta investigación permitirán sentar las bases para la comprensión y desarrollo de estas estructuras alrededor del mundo, logrando tener diseños eficientes ante diferentes topologías arquitectónicas.

## 1.2 Descripción del problema

Actualmente no existe un procedimiento que conduzca a la elección de la inclinación de las diagonales DG que se apegue a las necesidades de cada proyecto estructural, y por lo tanto los procedimientos se basan en recomendaciones hechas en las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México (NTC-2023) (CDMX, 2023), en donde se generaliza el uso de una inclinación de  $70^\circ$  cuando se han encontrado diferentes ángulos de inclinación al variar la geometría del edificio (Zhang, et al., 2012).

Las investigaciones de las DG se han enfocado en los edificios de gran altura desarrollando investigaciones para edificios de 30 hasta 60 niveles (Moon, et al., 2007) (Kazemi, et al., 2026), debido a su alta eficiencia en este tipo de configuraciones, sin embargo, no se han explorado de forma profunda las configuraciones de niveles inferiores.

La alta variabilidad de las propuestas arquitectónicas provoca que realizar un análisis para cada una de las opciones se vuelva inviable, requiriéndose mucho tiempo para poder analizar la viabilidad de cada una de las soluciones, adicionalmente, en la realidad no es posible usar cualquier configuración posible debido a restricciones diversas como políticas, culturales o simplemente estéticas por lo que es necesario desarrollar herramientas que consideren la no linealidad de las soluciones, se ajuste a todas las posibles configuraciones arquitectónicas y que mida la eficiencia de soluciones fuera de la mejor solución.

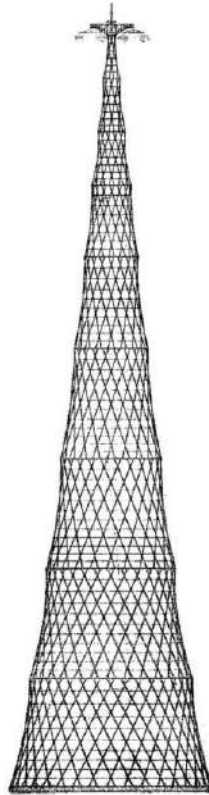
Por lo que en este trabajo se planteó desarrollar una herramienta, a partir del conocimiento generado, que dé como respuesta el ángulo de inclinación de la rejilla perimetral que minimice el peso de la estructura DG, y a su vez mida la eficiencia de la solución estructural para que el usuario ingrese la arquitectura deseada sin tener que seguir la solución más ligera.

## 2 Antecedentes

En el siglo XXI se han desarrollado diferentes tipos de estructuras atendiendo a las necesidades de las ciudades por crecer en infraestructura sin ocupar grandes extensiones de terreno. El uso de edificios cada vez más altos ha ganado popularidad y se han generado estructuraciones como: marcos rígidos, marcos de armadura resistente a cortante, armaduras de cinturón, marcos de forma tubular, marcos de forma tubular arriostrados con diagonales, muros de concreto a cortante, edificios tubulares de concreto, sistemas outrigger, estructuras tipo diagrid (DG) (Ali & Moon, 2007).

### 2.1 Diagrid

Las estructuras DG se originan en los inicios del siglo XX con la construcción de la Torre de Radio Shukhov (Figura 3) por el ingeniero Vladimir Shukhov en Rusia con una altura aproximada de 350m, la cual se compone de una rejilla perimetral de forma cónica de acero estructural (Mamin, et al., 2020), siendo este el primer registro de un DG en la historia (López-Téllez, 2020).



**Figura 3. Torre Shukhov del año 1919.**

A partir de la Torre Shukhov se tiene un registro de más de 30 estructuras DG alrededor del mundo, en las cuales se encuentran diferentes tipos diferentes de DG.

Una de las configuraciones DG que se han utilizado es la del núcleo diagonalizado, esta configuración permite tener diagonales de varios niveles. Las diagonales complementan al sistema principal soportando una porción de las cargas verticales, lo que provoca que la sección transversal de la rejilla perimetral sea de un tamaño significativo en comparación con los demás elementos. Algunas de las estructuras DG con núcleo diagonalizado son los edificios “John Hancock Center” ([Figura 4](#)), “Bank of China Tower” y “Puerta de Europa” tal como se observan en la [Tabla 2.1](#).



**Figura 4. Diagrid John Hancock Center de núcleo diagonalizado.**

Posteriormente las DG se fueron adaptando a un estilo diferente con la rejilla integrada y con el acero estructural expuesto (AESS), por sus siglas en inglés, en donde la rejilla integrada sigue la forma que tiene la DG adaptándose a la fachada, pero ocultándose, mientras que las DG con configuración AESS muestran de forma notoria la estructuración de tipo rejilla. Además, la configuración AESS tiene como particularidad un estilo más irregular y disruptivo como la “Arcelormittal Orbit Tower”, mostrada en la [Figura 5](#).



**Figura 5. Diagrid Arcelormittal Orbit Tower de configuración AESS.**

Otro tipo de estructuraciones DG han surgido como las estructuras *hexagrid*, en donde la forma de la rejilla perimetral adopta una forma de hexágonos emulando a un panal de abeja e incluso existen DG hechas de concreto como la DG “O-14” ([Figura 6](#)) la cual surge de una optimización topológica con fines arquitectónicos, emulando el comportamiento de un DG ante cargas laterales (Sharma, et al., 2026).



**Figura 6. Diagrid O-14.**

Algunos de los edificios DG que se han registrado alrededor del mundo se enlistan en la [Tabla 2.1](#).

**Tabla 2-1 Proyectos Diagrid alrededor del mundo.**

Nombre	Año de construcción	Ciudad	Número de niveles	Tipo
Ibm Building	1963	Pittsburgh, EE UU.	13	Rejilla integrada
John Hancock Center	1969	Chicago, EE UU.	100	Núcleo diagonalizado
Bank Of China Tower	1990	Hong Kong, China.	72	Núcleo diagonalizado
Puerta De Europa	1996	Madrid, España.	26	Núcleo diagonalizado
London City Hall	2002	Londres, Inglaterra.	10	AESS
Swiss Re	2004	Londres, Inglaterra.	40	Rejilla integrada
Hearst Magazine Tower	2006	Nueva York, EE UU.	46	Rejilla integrada
Royal Ontario Museum Addition	2006	Toronto, Canada.	6	AESS
Canton Tower	2008	Guangzhou, China.	37	AESS
Tornado Tower	2008	Doha, Qatar.	51	AESS
Capital Gate	2011	Abu Dhabi, EAU.	36	AESS
Kk100	2011	Shenzhen, China.	100	Núcleo diagonalizado
Al Bahar Towers	2012	Abu Dhabi, EAU.	29	Panal de abeja
Cctv	2012	Beijing, China.	54	Rejilla integrada
One Shelley Street	2012	Sydney, Australia.	11	Rejilla integrada
Manukau Institute Of Technology	2014	Auckland, Nueva Zelanda.	5	AESS
Guangzhou IFC	2010	Guangzhou, China.	103	AESS

Nombre	Año de construcción	Ciudad	Número de niveles	Tipo
O-14	2010	Dubai, EAU.	24	Concreto AESS
Aldar Headquarters	2011	Abu Dhabi, EAU.	25	Rejilla integrada
Arcelormittal Orbit Tower	2012	Londres, Inglaterra.	115 m	AESS
Bow Encana Tower	2012	Calgary, Canada.	57	AESS
Doha Tower	2012	Doha, Qatar.	46	AESS
The Leadenhall Building	2014	Londres, Inglaterra.	50	AESS
Pabellón De Chile Expo Milán	2017	Temuco, Chile.	3	Rejilla integrada
Lotte Super Tower	2017	Seoul, Corea del Sur.	123	Rejilla integrada
Zhongguo Zun Tower	2018	Beijing, China	109	ZHONGGUO ZUN TOWER
53w53	2020	Nueva York, EE UU.	73	Núcleo diagonalizado
1 The Avenue	2018	Manchester, Reino Unido.	3	Rejilla Integrada
Patriotismo TSJ	2019	Ciudad de México, México	23	Rejilla Integrada
Insurgentes Sur 2021	2018-Cancelado	Ciudad de México, México	24	Rejilla Integrada

Las estructuras DG se componen de dos sistemas estructurales, el primero se encarga de las cargas gravitacionales, y el segundo se encarga de las cargas laterales y una parte de las cargas gravitacionales (Terán-Gilmore, et al., 2020).

DG ha sido reconocida como una solución altamente eficiente en su aplicación en edificios altos (Sthapit, et al., 2026), lo que ha provocado un importante aumento en este tipo de estructuras en los últimos 18 años. Dentro de las investigaciones más

importantes de estructuras DG, Moon estableció mediante análisis elásticos lineales, que para estructuras de 60 pisos el rango de ángulos donde se tiene un mejor comportamiento es entre 65 y 75 grados, mientras que para 42 pisos se reduce en 10 grados el rango de los ángulos (Moon, et al., 2007).

Adicionalmente se realizó una comparativa entre análisis estáticos y dinámicos no lineales evaluando la respuesta sísmica de las estructuras analizadas, tomando como base una estructura de 36 niveles haciendo variaciones entre 50.2, 61, 67.4, 71.6, 74.5 y 79.5 grados (Kim & Lee, 2010). Durante esta investigación se observó que al reemplazar los miembros diagonales tubulares por soportes restringidos al pandeo el comportamiento ante cargas sísmicas mejoró considerablemente.

La [Tabla 2-2](#) indica que los datos de 2007 a 2010 muestran una evolución en el diseño estructural de edificios, con Moon, Connor y Fernández (2007) utilizando ángulos de 55°-75° en estructuras de 42-60 niveles, mientras que Kim y Lee (2010) aplican rangos similares (60°-70°) en un edificio de 36 niveles, y Zhang (2010) introduce variaciones significativas en ángulos (e.g., de 78° a 35°) en edificios de 30 a 60 niveles, reflejando un diseño adaptativo para optimizar la respuesta a cargas laterales. Sin embargo, las limitaciones de los sistemas de arriostramiento (Mazloom, 2019), junto con la no linealidad de los materiales y la complejidad en las conexiones (Wang, et al., 2026), sugieren que estas variaciones podrían comprometer la rigidez y estabilidad, destacando la necesidad de análisis estructurales más avanzados para garantizar la seguridad y eficiencia en edificios altos.

Tabla 2-2 Configuraciones DG en edificios de diferentes alturas.

Autor	Año	Número de niveles	Mejor Ángulo encontrado
Moon, Connor, Fernandez	2007	60	65°-75°
Moon, Connor, Fernandez	2007	42	55°-65°
Kim and lee	2010	36	60°-70°
Zhang	2010	30	Variando de 70° (inicio) a 70° (fin)
Zhang	2010	37	Variando de 72° (inicio) a 65° (fin)
Zhang	2010	45	Variando de 74° (inicio) a 35° (fin)
Zhang	2010	60	Variando de 78° (inicio) a 35° (fin)

## 2.2 Retraso de cortante

El fenómeno del retraso de cortante o “shear lag” en inglés, se observa en elementos cerrados de tipo caja (Johan, 2007), donde se aprecia una distribución asimétrica entre las fibras centrales con respecto a las de los extremos, a esto se le conoce como “retraso” (Perez-Martinez, et al., 2025). Este efecto provoca un decremento en la eficiencia estructural debido a que, bajo diferentes solicitaciones de cargas, se utiliza la misma sección transversal, esto debido a la homologación que se realiza para evitar que la mano de obra aumente su costo.

## 2.3 Clasificación de edificios por altura

El comportamiento dinámico de la estructura está dominado por su altura, los edificios de altura baja están principalmente gobernados por su modo fundamental de vibración, en donde se tiene una participación de más del 90% de su masa, mientras que las estructuras de gran altura presentan una influencia de los modos de vibrar superiores (Zhoong & Christopoulos, 2022) .

La clasificación de estructuras según su altura difiere según la región que se estudie. En China se clasifican las estructuras de altura media entre 10m y 30m de alto (Zhang, et al., 2022), mientras que en Pakistán consideran edificios entre 5 y 19 pisos o entre 15.24m y 57.91m de alto (Zaidi, et al., 2020). Estos edificios emplean

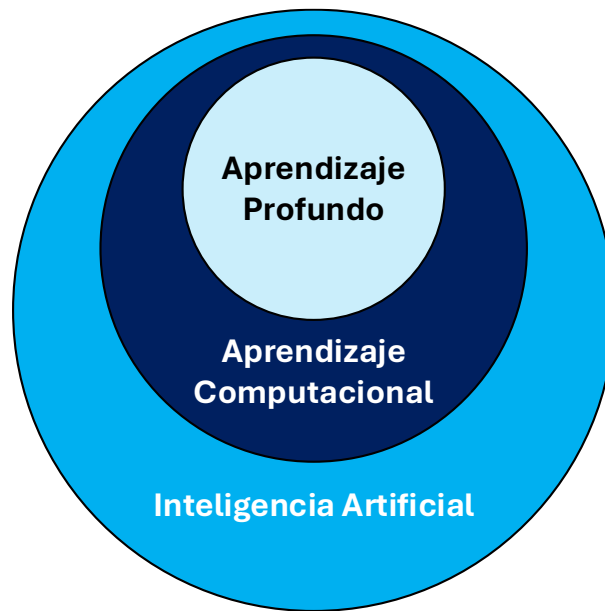
sistemas estructurales con arriostramientos, comúnmente utilizados tanto en edificaciones de baja como de media altura (Mazloom, 2019).

En la presente investigación se abarcarán estructuras entre 5 y 7 pisos, considerando 20m y 28m de alto respectivamente por lo que se busca mostrar el comportamiento del sistema DG para edificios de acero de media altura.

#### 2.4 Inteligencia Artificial

El aprendizaje profundo o *Deep Learning* es una categoría del *Machine Learning* o Aprendizaje Computacional donde los algoritmos modelados aprenden una gran cantidad de datos producto de la base de datos que se ofrece, en este caso de las variaciones geométricas de las estructuras DG.

La [Figura 7](#) muestra la relación entre Inteligencia artificial (IA), Aprendizaje Computacional o Machine Learning (ML) y Aprendizaje Profundo o Deep Learning (DL), esta relación permite entender el funcionamiento de los 3 tipos, la IA permite imitar funciones cognitivas humanas para resolver problemas complejos, el ML habla sobre el aprendizaje que tiene para aprender de una base de datos y poder inferir los resultados mejorándolos según los datos que se le dan, y el DL se especializa en el uso de redes neuronales que siguen un proceso iterativo en capas que ayuda a resolver problemas bajo comparación de datos.



**Figura 7 Clasificación IA, ML, DL.**

#### **2.4.1 Redes Neuronales**

El uso de las redes neuronales ha tenido muchas aplicaciones en la ingeniería estructural en los últimos años, algunos de los usos se presentan a continuación.

Vafaei et al., (Vafaei, et al., 2018) construyeron un marco de concreto reforzado a escala 1 a 1 el cual fue cargado de manera gradual hasta llegar a su capacidad última, midiendo los desplazamientos verticales, rotaciones en los extremos de las vigas y los valores de deformación en 3 diferentes zonas tanto en el concreto como en el armado. En este proyecto se utilizaron 110 conjuntos de datos, considerando dos redes neuronales supervisadas con propagación hacia adelante, la arquitectura de la red se compuso de: 1 capa de entrada con 4 neuronas, 1 capa oculta de 20 neuronas, y 1 capa de salida con 3 neuronas. A partir de esta configuración se obtuvo rango de error entre 3.31% y 9.48%.

Bojórquez et al., (Bojórquez, et al., 2016) utilizaron redes neuronales artificiales para el prediseño de edificios de concreto reforzado de 8 a 12 niveles y de 4 a 7 niveles, utilizando un perceptrón multicapa para predecir las dimensiones geométricas, el acero de refuerzo longitudinal y la separación de los estribos en vigas y columnas.

Las diferencias que se encontraron entre el modelo real y el predicho fue del 15%, la arquitectura de la red se compuso de: 1 capa de entrada de 5 neuronas, 1 capa oculta de 21 neuronas, y 1 capa de salida con 25 neuronas.

Abd-Elhamed et al., (Abd-Elhamed, et al., 2018) utilizaron un análisis lógico de datos (LAD) el cual es una metodología del aprendizaje automática supervisado, el cual se centra en la resolución de patrones lógicos. El LAD se utilizó para predecir la respuesta sísmica de estructuras empujando las respuestas dinámicas capturadas, identificando patrones que permiten pronosticar la respuesta sísmica en edificios logrando una exactitud del 74% en el aprendizaje de estas señales.

Nadith et al., (Nadith, et al., 2018) utilizaron redes neuronales artificiales de tipo “autoencoders” los cuales son entrenados de forma no supervisada orientados al monitoreo de salud estructural, teniendo como entradas: la frecuencia natural, formas modales, y como salidas el daño estructural, obteniendo un error de aproximadamente el 3%.

Desde 1992 hasta 2024 se han registrado un total de 160 investigaciones relacionando a la ingeniería estructural con inteligencia artificial ([Figura 8](#)) (Saini, 2025), lo que representa una base sólida para continuar con el uso de esta herramienta en el ámbito estructural como una alternativa en la comprensión de procesos que conllevan a una predicción y optimización de las estructuras.

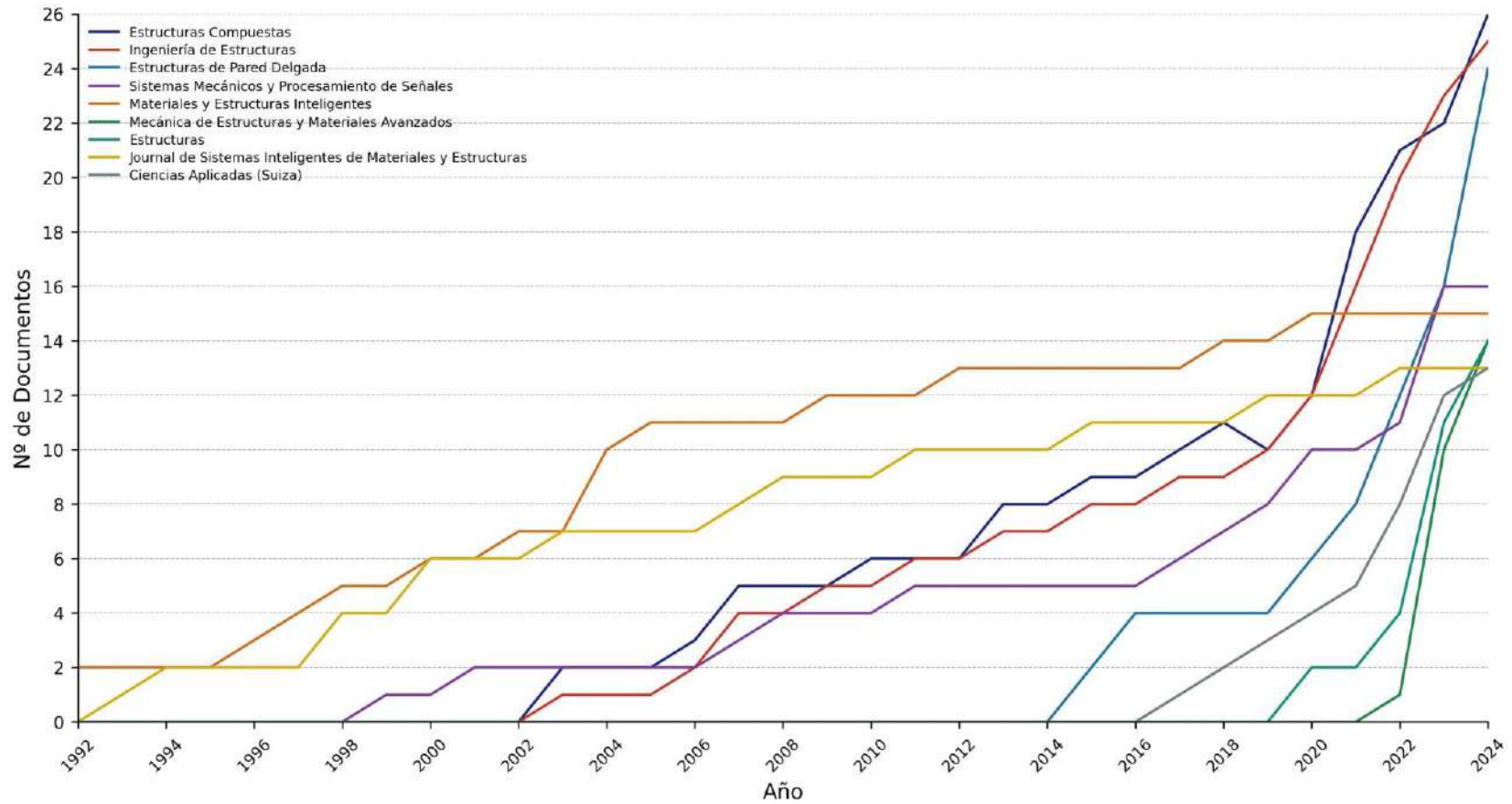


Figura 8. Crecimiento anual de las cinco principales fuentes de investigaciones de IA en ingeniería estructural. Adaptado de: (Saini, 2025).

### 3 Fundamentación teórica

#### 3.1 Respuesta dinámica de sistemas de varios grados de libertad

La respuesta sísmica de las estructuras diagrid (DG) se representa como un sistema de varios grados de libertad sometido a fuerzas externas. Para el desarrollo de las ecuaciones de un sistema de varios grados de libertad (Chopra, 2014), se considera el caso más sencillo, el cual es un sistema idealizado de dos niveles sometido a fuerzas externas, considerando que los pisos son infinitamente rigidez dentro de su plano (a flexión) y se desprecian las deformaciones axiales en vigas y columnas, así como el efecto de la fuerza axial sobre la rigidez de las columnas.

Se parte de la ecuación del movimiento, la cual se compone de:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (1)$$

En donde:

$m$ : es la masa del sistema.

$\ddot{u}$ : la aceleración de la masa.

$c$ : es el amortiguamiento viscoso del sistema.

$\dot{u}$ : es la velocidad a través del amortiguador viscoso.

$k$ : es la rigidez del sistema.

$u$ : representan los desplazamientos del sistema.

$p(t)$ : es la fuerza externa aplicada.

La ecuación [\(1\)](#) representa un sistema matricial de dos ecuaciones diferenciales ordinarias que controlan los desplazamientos (cada uno representa un nivel) del marco supuesto, en donde cada ecuación contiene las dos incógnitas de los

desplazamientos  $u_1$  y  $u_2$ , por lo que las dos ecuaciones están acopladas y se deben resolver al mismo tiempo.

Ahora se debe visualizar el sistema como la combinación de tres componentes linealmente independientes: Componente de rigidez, Componente de amortiguamiento y, Componente de masa.

Las fuerzas externas  $f_{Sj}$  en el componente de rigidez se relacionan con los desplazamientos mediante la ecuación (2).

$$\begin{Bmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \rightarrow f_S = ku \quad (2)$$

En donde:

$f_{Sj}$ : son las fuerzas restauradoras elásticas.

Las fuerzas externas  $f_{Dj}$  en la componente de amortiguamiento se relacionan con las velocidades mediante la ecuación (3).

$$\begin{Bmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} \rightarrow f_D = c\dot{u} \quad (3)$$

Finalmente, las fuerzas externas  $f_{Ij}$  en la componente de masa se relacionan con las aceleraciones por medio de la ecuación (4).

$$f_I = m\ddot{u} \quad (4)$$

Por lo tanto, las fuerzas externas  $p(t)$  se visualizan distribuidas entre las tres componentes de la estructura, lo cual reescribiéndolas se llega a la ecuación (5).

$$f_S + f_D + f_I = p(t) \quad (5)$$

La ecuación (5) es un sistema de N ecuaciones diferenciales ordinarias que controlan los desplazamientos  $u(t)$  debido a la aplicación de fuerzas  $p(t)$ . Para cada escalar de 1 grado de libertad de la ecuación (1) se ha convertido en un vector o matriz de orden N en la ecuación (5) la cual es posible desarrollar para un sistema de varios grados de libertad.

La vibración libre se entiende como el movimiento de una estructura sin ninguna excitación dinámica (Chopra, 2014), en donde la vibración comienza después de una interacción con el sistema al inducir un cambio en su posición mediante alguna fuerza externa.

La vibración que tienen los sistemas lineales de varios grados de libertad se rige por la ecuación (6).

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (6)$$

En donde la ecuación (6) representa N ecuaciones diferenciales homogéneas que se acoplan a través de la matriz de masa, la matriz de rigidez o ambas matrices.

Se desea encontrar la solución  $u(t)$  de la ecuación (6) que tenga las condiciones iniciales:  $u = u(0)$  y  $\dot{u} = \dot{u}(0)$ , para  $t = 0$ .

Para un sistema de dos grados de libertad, su vibración natural se describe matemáticamente según la ecuación (7).

$$u(t) = q_n(t) * \phi_n \quad (7)$$

En donde:

$q_n(t)$ : Variación de los desplazamientos modales.

$\phi_n$ : los modos naturales de vibración.

La variación de los desplazamientos se describe mediante la función armónica simple mostrada en la ecuación (8).

$$q_n(t) = A_n \cos \omega_n t + B_n \text{sen } \omega_n t \quad (8)$$

En donde  $\omega_n$  son las frecuencias naturales,  $A_n$  y  $B_n$  son constantes que se determinan a partir de las condiciones iniciales que inician el movimiento, al colocar (8) en se desarrolla la ecuación (9).

$$u(t) = \phi_n (A_n \cos \omega_n t + B_n \text{sen } \omega_n t) \quad (9)$$

Donde,  $\omega_n$  y  $\phi_n$  son incógnitas. Al sustituir (9) en (6) se obtiene la ecuación (10).

$$[-\omega_n^2 m \phi_n + k \phi_n] q_n(t) = 0 \quad (10)$$

La ecuación (10) se satisface de dos formas, la primera considerando la solución trivial donde  $q_n(t)$  tiene el valor de 0, lo que implica que  $u(t)$  vale 0 y por lo tanto no hay movimiento o la segunda solución es que las frecuencias y modos naturales satisfagan la ecuación (11), la cual proporciona una condición en donde existe el movimiento.

$$k \phi_n = \omega_n^2 m \phi_n \quad (11)$$

El vector de desplazamiento  $u$  de un sistema de varios grados de libertad se amplía en términos de las contribuciones modales, al hacer esto la respuesta dinámica de un sistema se expresa como la ecuación (12).

$$u(t) = \sum_{r=1}^N \phi_r * q_r(t) = \Phi q(t) \quad (12)$$

Al sustituir (12) en (1) y multiplicando por  $\phi_n^T$ , sin considerar amortiguamiento se tiene la ecuación (13).

$$\sum_{r=1}^N \phi_n^T * m * \phi_r * \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \phi_n^T * k * \phi_r * q_r(t) = \phi_n^T * p(t) \quad (13)$$

Debido a las relaciones de ortogonalidad, todos los términos en cada sumatoria se anulan, por lo que al reducir se obtiene la ecuación (14).

$$(\phi_n^T * m * \phi_n) * \ddot{q}_n(t) + (\phi_n^T * k * \phi_n) * q_n(t) = \phi_n^T * p(t) \quad (14)$$

Reescribiendo la ecuación (14) se obtiene la ecuación (15).

$$M \ddot{q} + K q = P(t) \quad (15)$$

En donde:

$M$ : Es la matriz diagonal de las masas modales generalizadas.

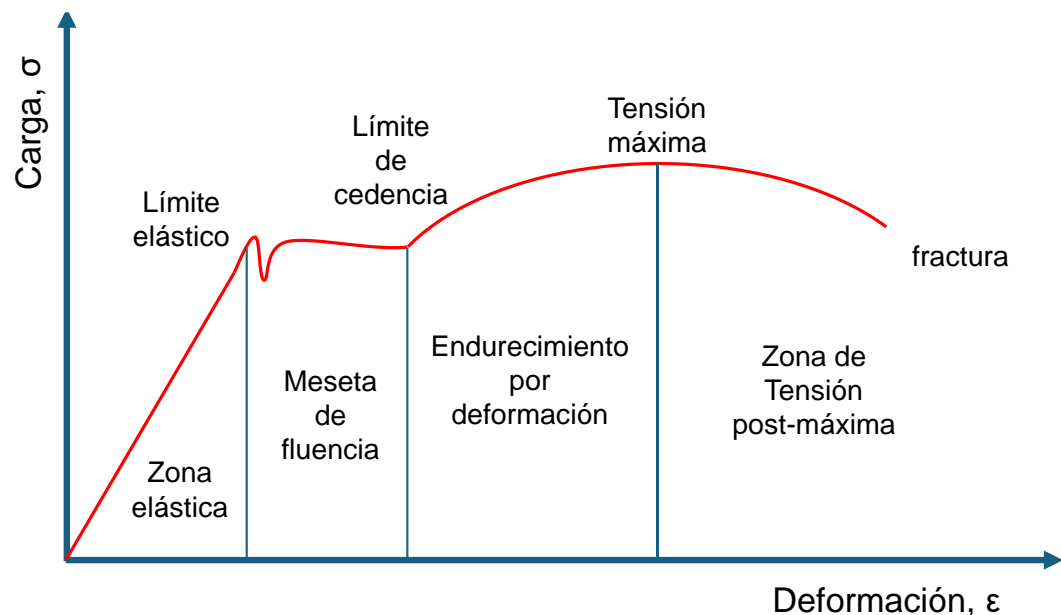
$K$ : Es la matriz diagonal de las rigideces modales generalizadas.

$P(t)$ : Es un vector columna de las fuerzas modales generalizadas.

### 3.1.1 Análisis No Lineal

El análisis estructural tiene el punto de partida que las deformaciones son finitas, pero suficientemente pequeñas para tener un equilibrio de la estructura con la forma no deformada. Este punto es adecuado para el estado de servicio de las estructuras y por lo tanto el análisis lineal se acomoda bien a estas solicitaciones.

Cuando se busca determinar la capacidad de la estructura, nuestros elementos deben estar cerca del límite de la relación esfuerzo con capacidad, por lo tanto, más cerca estará de pasar la región elástica del material para pasar a un comportamiento plástico, esta relación del material se observa en la [Figura 9](#).



**Figura 9 Curva Carga-Deformación**

La respuesta de cualquier sistema estructural se ve influenciada por diferentes tipos de cargas variables en el tiempo, lo que genera un comportamiento dinámico no constante a lo largo de su vida útil. Asimismo, parámetros como la configuración geométrica del sistema estructural, las propiedades del material con comportamiento no lineal, la flexibilidad en las uniones y los desplazamientos relativos de la estructura impactan significativamente su desempeño (Tiway, et al., 2026).

El análisis de las edificaciones ha evolucionado, el efecto de las cargas laterales se plasmaba con fuerzas laterales proporcionales a la masa que debe resistir la estructura (Sifón-Miralles, 2016), posteriormente se incorporó al diseño la influencia del periodo de vibración dentro del tipo de cargas que se aplican, sin embargo, el análisis seguía basándose en una forma lineal. En la década de los 80's y 90's se consideró que la fuerza es importante solo en la medida que ayudaba a reducir los desplazamientos o el daño potencial y que una definición adecuada de la vulnerabilidad estructural debía someterse a una relación de desplazamientos en vez de fuerzas (Graham, 2008). En el análisis sísmico intervienen fundamentalmente aspectos como el suelo, la aceleración del sitio, la estructuración y su respuesta estructural. Para su análisis se podrán tener diferentes opciones, en la forma estática o dinámica puede ser lineal o no lineal ([Tabla 3-1](#)).

Tabla 3-1: Tipos de análisis estructurales.

Método	Estático	Dinámico
Lineal	Fuerza Equivalente	Análisis paso a paso
No-Lineal	Método del espectro de capacidad Pushover Adaptive Pushover Non-Adaptive Pushover	Tiempo Historia

Existen diferentes métodos para la realizar el análisis estructural de estructuras y materiales, según lo que se esté resolviendo, algunos métodos para realizarlo son:

- Método incremental de la secante
- Método de la fuerza incremental
- Método de Newton-Raphson modificado
- Método completo de Newton-Raphson
- Método de longitud de arco.

Estos métodos permiten resolver los sistemas de ecuaciones no lineales empleados. Considerando el sistema de ecuaciones presentado en [\(16\)](#).

$$P(u) = f \quad (16)$$

Donde  $u$  es el vector de desplazamientos,  $f$  el vector de fuerzas y  $P$  es el vector de fuerzas internas, todos de dimensión  $n$ . La fórmula 4 es el equilibrio entre las fuerzas internas y las aplicadas a la estructura. Partiendo de la ecuación (16), la cual se puede reescribir en términos de la rigidez estructural como se observa en (17).

$$P(u) = K * u \quad (17)$$

Ahora la función  $P(u)$  en vez de ser lineal, es una función no lineal que toma los valores del desplazamiento  $u$ . Enfocando el análisis en resolver la ecuación (17) de forma efectiva y precisa, comenzando con un desplazamiento  $u$  con valor de 0, incrementando un  $\Delta u$ , después de obtener este incremento, la solución es actualizada iterativamente hasta cumplir un criterio de convergencia específico.

El método de Newton-Raphson es un análisis numérico popular donde se busca encontrar las raíces de las ecuaciones no lineales, siendo aproximadas por las lineales. Se considera una solución aproximada en la  $i$ -ésima iteración siendo designada por  $u^i$ , la siguiente iteración puede ser aproximada usando la serie de Taylor indicada en la ecuación (18).

$$P(u^{i+1}) \approx P(u^i) + K_T^i(u^i) \cdot \Delta u^i = f \quad (18)$$

Donde  $K_T^i(u^i) \equiv \left(\frac{\partial P}{\partial u}\right)^i$  es la matriz Jacobiana en la  $i$ -ésima iteración, comúnmente conocida como la matriz tangente de rigidez en aplicaciones estructurales y donde  $\Delta u^i$  es el incremento solución. El objetivo es calcular  $\Delta u^i$  y actualizar iterativamente la solución  $u^{i+1}$ , reescribiendo los términos se obtiene el sistema de ecuaciones linealizadas de la ecuación (19):

$$K_T^i \Delta u^i = f - P(u^i) \quad (19)$$

En esta fórmula el término  $K_T^i(u^i)$  no es constante, está en función de  $u^i$ , y la ecuación resuelve para el incremento  $\Delta u^i$  no para el total de solución  $u$ . Estas diferencias se conocen como residuo, después de resolver el incremento de desplazamiento  $\Delta u^i$  una solución aproximada se obtiene en la ecuación (20).

$$u^{i+1} = u^i + \Delta u^i \quad (20)$$

En términos generales, esta solución no va a satisfacer el sistema de ecuaciones lineales exactamente, y existirá un residuo desbalanceado de la fuerza el cual se define en la ecuación [\(21\)](#).

$$R^{i+1} = f - P(u^{i+1}) \quad (21)$$

Cuando se tiene un desbalance de la fuerza con un valor tan pequeño como la tolerancia establecida, la solución  $u^{i+1}$  se acepta como una solución precisa y el proceso se detiene, de otra forma el proceso se repite hasta que esta condición se cumpla (Kim, 2015).

### 3.2 Diagrid

El sistema DG se diseña inicialmente como una retícula simétrica y uniforme que envuelve la estructura. Sin embargo, se ha observado que la distribución de esfuerzos a lo largo de la estructura no es uniforme (Zhang, et al., 2012) , lo que permite optimizar ciertas zonas mediante un arreglo alternativo. En su estudio, propusieron utilizar dos ángulos de inclinación en lugar de uno solo, de modo que las barras intermedias presenten un ángulo que varía progresivamente desde el ángulo superior hasta el inferior. La investigación tuvo como objetivo optimizar la eficiencia estructural, específicamente la resistencia a cargas laterales y verticales, así como la distribución de momentos a lo largo de la altura del edificio, considerando un comportamiento elástico y un análisis lineal. (Zhang, et al., 2012).

Dentro de las propiedades dinámicas de las estructuras, en particular las estructuras DG, se plantea una base de diseño basada en desplazamientos establecida por Terán-Gilmore (Terán-Gilmore, et al., 2020) donde se menciona que el sistema DG tiene una componente a cortante y a flexión, con la fórmula mostrada en la ecuación [\(22\)](#).

$$T_T^2 = T_S^2 + T_B^2 \quad (22)$$

Donde  $T_T^2$  es el periodo fundamental de la estructura,  $T_S^2$  es el periodo fundamental asociado al cortante y  $T_B^2$  es el periodo fundamental a flexión.

Para la rigidez a cortante se establece la aportación de las diagonales de la rejilla perimetral mediante sus propiedades a carga axial, las cuales se indican en la ecuación (23).

$$K_{Si} = \sum_{j=1}^{N_i} \frac{E * A_j}{L_j} * \cos^2 \theta_j * \cos^2 \Phi_j \quad (23)$$

Donde E es el módulo de elasticidad,  $N_i$  es el número de diagonales localizada en el i-ésimo entrepiso,  $A_j$  es el área de la sección transversal de cada diagonal,  $\theta_j$  el ángulo de la j-ésima diagonal con respecto al plano horizontal,  $\Phi_j$  el ángulo del plano de la j-esima diagonal que se forma con la dirección del análisis, y  $L_j$  es la longitud de la j-ésima diagonal en el i-ésimo entrepiso.

El comportamiento global a flexión del edificio puede simplificarse en la ecuación (24) considerando una viga en cantiléver con el momento de inercia de cada i-ésimo nivel.

$$I_{Bi} = \sum_{j=1}^{N_i} A_j * \sin^2 \theta_j * d_j^2 \quad (24)$$

Donde  $d_j^2$  es la distancia que separa, en la dirección de análisis, el eje centroidal con el eje de la j-ésima diagonal en el plano del i-ésimo entrepiso.

De esta forma se encuentra el periodo fundamental de la estructura y se comprueba el desplazamiento con un modelo de un grado de libertad por sus siglas en inglés SDOF, considerando la estructura como una viga en cantiléver, por lo tanto, se determina que el sistema se comporta según la [Figura 10](#), desarrollándose las ecuaciones (25) (26) y (27) donde se explica el comportamiento del DG usando la analogía de la viga en cantiléver.

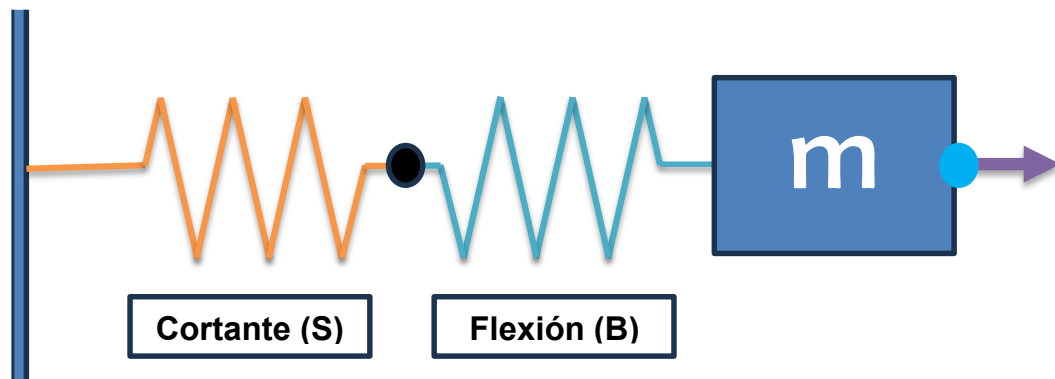


Figura 10 Rigidez global a flexión y corte en DG.

$$S_{aS} = \frac{m * S_a}{K_S} \quad (25)$$

$$S_{aB} = \frac{m * S_a}{K_B} \quad (26)$$

$$\kappa = \frac{S_{aS}}{S_{aB}} = \frac{K_B}{K_S} \quad (27)$$

Siendo  $S_a$  la pseudo aceleración espectral correspondiente al periodo de vibración calculado  $T_T$  de la estructura DG,  $K_S$  la rigidez lateral relacionada al cortante,  $K_B$  la rigidez lateral relacionada a la flexión,  $m$  la masa,  $\kappa$  la relación entre la demanda de desplazamiento entre corte y flexión,  $S_{aS}$  los desplazamientos globales debido al cortante, y  $S_{aB}$  los desplazamientos globales debido a la flexión.

### 3.3 Inteligencia Artificial

El campo de la inteligencia artificial ha crecido de forma acelerada en los últimos años con el avance que ha tenido el ML y DL (Saini, 2025). El ML usa métodos estadísticos para aprender a través del uso de los datos, mientras que el DL usa redes neuronales para aprender de grandes conjuntos de datos.

El DL utiliza redes neuronales emulando la composición y función del cerebro humano, aprendiendo de datos no estructurados, siendo muy eficientes en la resolución de problemas complejos de clasificación o regresión. El desarrollo de ML y DL permite su aplicación en diversos campos fomentando su investigación y crecimiento tecnológico. Actualmente ya se tienen aplicaciones importantes en

campos como la ingeniería, reconocimiento de patrones no lineales, manejo autónomo, entre otros (Jahangiri, et al., 2025).

Las redes neuronales son un método de DL, utilizando la red para lograr optimizaciones de datos, donde se puede introducir una serie de vectores de entrada para procesarlos y determinar una salida con el entrenamiento que se estableció anteriormente, resolviendo una variedad de problemas no lineales. Estos sistemas están interconectados de diferentes formas, según el tipo de red neuronal, entre nodos de las diferentes etapas del proceso simulando el comportamiento de un sistema cerebral, siendo esta la razón del nombre “Red neuronal” (Sharifani & Amini, 2023).

Dentro del DL se tienen diferentes clasificaciones como el aprendizaje supervisado y el aprendizaje no supervisado. En el aprendizaje supervisado se tiene una revisión de las variables de entrada y de salida que se asigna para entrenar a nuestra red para posteriormente introducir entradas de valores que la red no ha visto durante el entrenamiento y estimar la salida que más se acerque a lo que se espera (Cord & Cunningham, 2008).

El perceptrón multicapa (PMC), reconocido como el tipo de red neuronal artificial (RNA) más utilizado y conocido, tiene la capacidad de resolver problemas no linealmente separables. Este modelo consta de tres capas principales: la capa de entrada, donde se introduce la información obtenida del análisis; las capas ocultas, encargadas de procesar y comparar los patrones de entrada, pudiendo variar en número según la cantidad de patrones proporcionados; y la capa de salida, que genera uno o varios resultados a partir de la comparación de dichos patrones (Popescu, 2009).

### **3.3.1 Redes Neuronales**

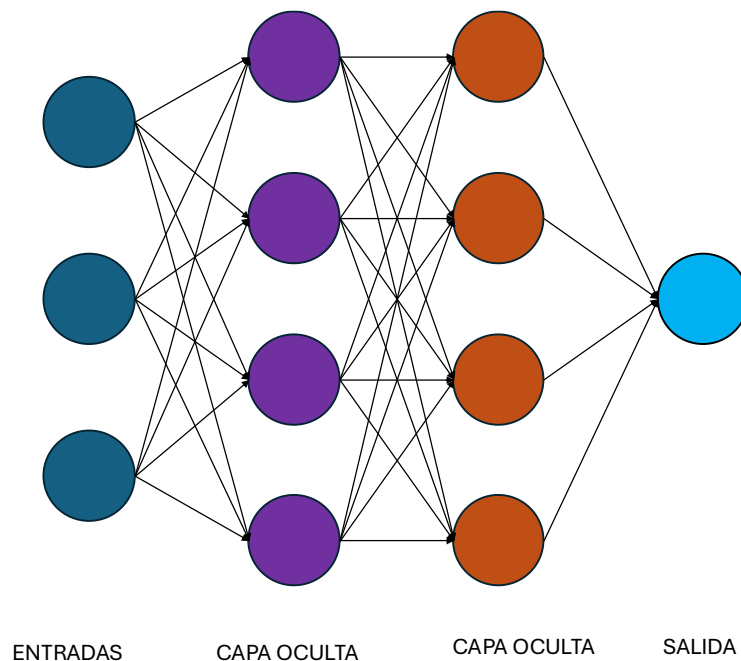
Una red neuronal es un sistema de procesamiento de información inspirado en el cerebro humano y sus proceso biológicos neuronales (Gupta, 2020).

Existen dos tipos de aprendizajes enfocados en redes neuronales, el supervisado y el no supervisado, en el aprendizaje no supervisado no se tiene ninguna categorización o etiquetado de los datos. El tratamiento que reciben los resultados es una agrupación según sus características y diferencias que reconozca la red (LeCun, et al., 2015).

El aprendizaje profundo supervisado requiere datos de entrada y salida con una etiqueta durante la fase de entrenamiento de la red, los cuales son etiquetados según las necesidades o características del proyecto, esto para poder clasificar conjuntos de datos nuevos no identificados por el usuario y poder interpolar y extrapolar resultados. Un modelo de aprendizaje supervisado aprenderá a reconocer patrones y objetos que los clasifican (Schmidhuber, 2015).

El perceptrón multicapa es un tipo de red neuronal con una gran capacidad de generalización, la cual consiste en una capa de entrada con una o más capas ocultas y una capa de salida [Figura 11](#), en términos reales es una función que va de una dimensión  $n$  a  $m$ , siendo  $n$  las entradas y  $m$  las salidas que se tendran.

Las redes neuronales utilizan datos de entrada, los cuales son procesados en capas ocultas para producir una salida que optimiza a la regla que le asigna el usuario, estas redes neuronales pueden procesar grandes cantidades de datos de manera rápida y eficiente, lo que es útil en nuestro proyecto al tener toda la información sobre las diferentes variaciones de ángulos de las columnas, las cuales serán procesadas dentro de la red neuronal artificial y se tendrá la minimización del peso de la estructura tomando en cuenta el tipo de perfiles y la distribución utilizada.



**Figura 11 Arquitectura de Red neuronal.**

Las entradas de una red neuronal pueden ser de tipo booleano o con valores continuos, los cuales pueden ser normalizados o con su valor real.

Los pesos son los valores que se colocan a las entradas y asignan la importancia o “peso” de esa entrada en la interpolación o extrapolación del resultado final, estos pesos permiten que la red neuronal tenga más o menos conexiones entre las neuronas (Shahhosseini, et al., 2022).

Las capas ocultas son las capas intermedias entre las neuronas de entradas y salidas, estas capas son las encargadas de tomar e interpretar los patrones complejos de los datos de entrada o de una capa oculta anterior. El número de capas ocultas es un parámetro importante, debido a que un número bajo de neuronas puede resultar en un subajuste de la red, mientras que un número elevado provoca el efecto opuesto, limitando el aprendizaje de la red a simplemente una lectura de tus valores (Yang & Shami, 2020).

Las métricas de error miden y evalúan la calidad de nuestros modelos dentro de IA, ML y DL, por lo que es necesario que se usen para determinar la veracidad de nuestra red. Dentro de esta categoría se encuentran diferentes métricas del error, por ejemplo: Error Cuadrático Medio (MSE), Error Absoluto Medio (MAE) y Error de Mediana Absoluta (MAD).

En el MSE se mide la media o promedio de los errores al cuadrado entre las predicciones que realice nuestra red y los valores reales que se obtengan de nuestros modelos computacionales como se aprecia en la ecuación (28). A esta métrica se obtiene la raíz cuadrada y la magnitud del error que tiene nuestra red utilizando los valores de la variable objetivo de nuestra capa de salida (Hodson, 2022).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (28)$$

Para el MAE se mide en valores absolutos la diferencia entre las predicciones y los valores reales como la ecuación (29), este valor da una orientación sobre la dispersión que tienen nuestros valores absolutos para determinar en la magnitud que se está midiendo. En caso de que se tenga una concentración de datos altos con respecto a los bajos en alguna magnitud, estos no afectarán a este valor y se determinan los picos en ambos sentidos. (Aswin Jeba Mahir, et al., 2026).

$$MAE = n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (29)$$

## 4 HIPÓTESIS

### 4.1 Hipótesis

La utilización de un modelo de red neuronal permite la optimización de la rejilla perimetral en una estructura diagrid de altura media minimizando su peso, y mejorando su respuesta ante un evento sísmico un 10% en comparación con el estado del arte.

## 5 OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

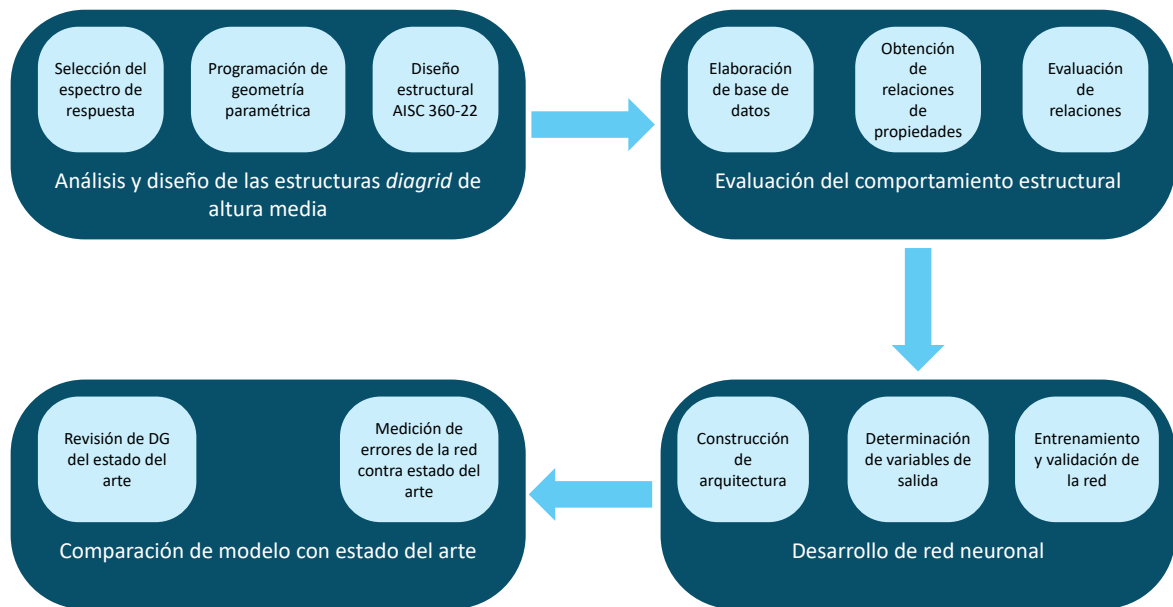
Diseñar un modelo de red neuronal que estime la inclinación de las diagonales principales para minimizar su peso y desplazamientos en una estructura de tipo diagrid de acero de altura media.

### 5.2 Objetivos específicos

- Analizar y diseñar las estructuras diagrid (DG) de altura media mediante el API de ETABS para la obtención de propiedades mecánicas como esfuerzos internos, reacciones y propiedades dinámicas de la estructura como modos de vibrar, periodos y frecuencias, mediante las dimensiones geométricas del edificio.
- Evaluar el comportamiento sísmico de diferentes configuraciones geométricas utilizando el análisis realizado.
- Desarrollar una red neuronal que permita optimizar y determinar la mejor configuración geométrica de las diagonales de la rejilla perimetral de acuerdo con las necesidades del entorno de la estructura.
- Evaluar y comparar la red neuronal con el estado del arte.

## 6 METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se organizó en cuatro etapas, las cuales se desarrollaron a partir de los objetivos específicos mencionados en el capítulo anterior. En este capítulo, se describe cada una de estas etapas, explicando los procedimientos, herramientas y enfoques empleados para alcanzar los objetivos planteados para la investigación sobre las estructuras diagrid (DG). En la [Figura 12](#) se presenta un diagrama de la metodología.



**Figura 12. Diagrama de la metodología**

### 6.1 Análisis de estructuras diagrid de altura media para la obtención de la respuesta.

Se llevó a cabo la programación paramétrica, para el análisis y diseño estructural de las DG, en donde las variables que se modificaron en cada modelo son:

- Dimensión en planta, en ambas direcciones.
- Inclinación de diagonales en la rejilla perimetral.
- Secciones transversales de elementos barra y elementos área.

Y los parámetros que fueron constantes durante el análisis son:

- Aceleración espectral.
- Altura de entrepiso.
- Relación de aspecto cuadrada en planta.
- Material acero estructural ASTM A500 grado B.
- Perfiles tubulares para la rejilla perimetral.

De esta forma se obtuvieron los esfuerzos internos de los elementos, tales como: fuerzas axiales, y cortantes, además de mediciones a la estructura general, los cuales fueron: desplazamientos por planta y totales, así como el peso de la rejilla perimetral.

#### **6.1.1 Selección del espectro de diseño a utilizar para el análisis.**

La ciudad que se eligió para la obtención del espectro de diseño fue la ciudad de Santa María Huatulco, Oaxaca, ubicada en el sur de México. Esta ciudad se encuentra clasificada como “D” por la Comisión Federal de Electricidad en el Manual de Diseño de Obras Civiles “MDOC” en su versión 2015 (CFE, 2015), siendo una de las ciudades con mayor actividad sísmica en el país.

Los parámetros sísmicos para la obtención del espectro sísmico de Santa María Huatulco son los siguientes:

Aceleración máxima en roca: 490.00 cm/s<sup>2</sup>.

Aceleración máxima espectral: 1225 cm/s<sup>2</sup>.

Tipo de Suelo: Roca (1).

Amortiguamiento 5%.

Se determinaron dos tipos de espectros de diseño: el primero fue el espectro de colapso, el cual se empleó para verificar la resistencia última y el segundo fue el espectro de servicio, el cual se utilizó para evaluar el estado límite de servicio.

Para obtener el espectro de colapso de la estructura se debe seguir la ecuación (30).

$$MSa(T_e, \beta) = \begin{cases} a_0 + [c \cdot \beta(T_e, \xi_e) - a_0] \cdot \frac{T_e}{T_a} & \text{if } T_e < T_a \\ c \cdot \beta(T_e, \xi_e) & \text{if } T_a \leq T_e < T_b \\ c \cdot \beta(T_e, \xi_e) \cdot \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r & \text{if } T_b \leq T_e < T_c \\ c \cdot \beta(T_e, \xi_e) \cdot \left(\frac{T_b}{T_c}\right)^r \cdot p_c(T_e) \cdot \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 & \text{if } T_e \geq T_c \end{cases} \quad (30)$$

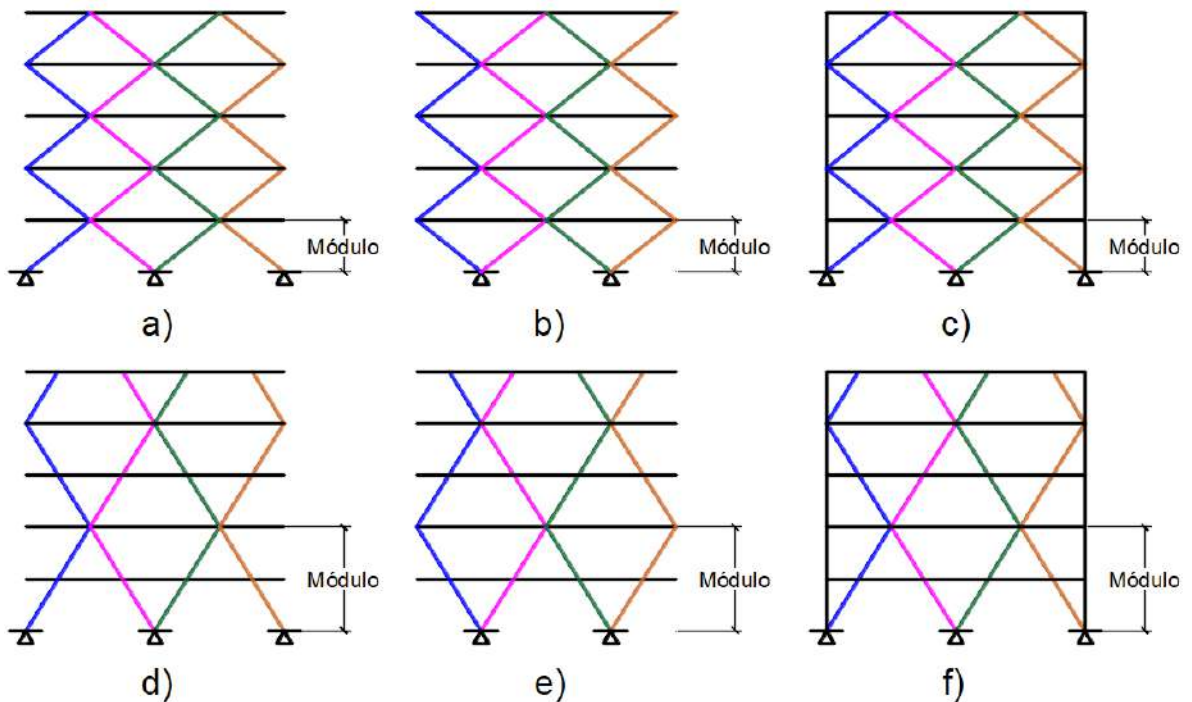
Donde  $T_e$  es el periodo fundamental de la estructura,  $a_0$  es la máxima aceleración del terreno,  $c$  es la máxima aceleración espectral,  $T_a$  es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño con valor de 0.1 s,  $T_b$  es el límite superior de la meseta del espectro de diseño con valor de 0.6 s,  $T_c$  es el periodo de inicio de la rama descendente en que los desplazamientos espectrales tienden correctamente al desplazamiento del terreno, el valor es de 2.0 s,  $\beta(T_e, \xi_e)$  es el factor de amortiguamiento, el cual para un amortiguamiento del 5% el valor de  $\beta(T_e, 0.05)$  es igual a 1.  $r$  es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para  $T_b \leq T_e < T_c$  y tiene un valor de 0.5,  $k$  es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para  $T_e \geq T_c$  con valor de 1.5 y  $p_c(T_e)$  es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente calculado acorde a la Ecuación (31).

$$\langle T_e \rangle = k + (1 - k) \cdot \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 \quad (31)$$

### 6.1.2 Selección de los casos de estudio.

La elección de parámetros geométricos de la rejilla perimetral definen la dirección e inclinación de las diagonales se encargan de las cargas laterales, en donde se exploraron 3 configuraciones de retícula integrada que se encuentran en el estado del arte, la [Figura 13a](#)) y [Figura 13d](#)) muestran una configuración de tipo “A”, la

primera considerando un módulo de 1 solo nivel, mientras que la segunda muestra un módulo de 2 niveles. Los módulos en un DG pueden ir desde 1 nivel hasta n niveles, siendo n la cantidad de pisos que se tienen, esto permite que las diagonales inclinadas mostradas en la [Figura 13](#), a las cuales se les referirá como “grid” se conecten en al menos un punto. La [Figura 13b\)](#) y [Figura 13e\)](#) presentan una configuración de tipo “V” en donde se tiene un menor número de elementos de cimentación manteniendo el mismo número de grids. Finalmente, la [Figura 13c\)](#) y [Figura 13f\)](#) presentan una variación de la configuración de tipo “A” agregando columnas en las esquinas de la estructura. La presente investigación se centró en la configuración de tipo “V”.



**Figura 13 Configuraciones de retícula DG.**

El INEGI llevó a cabo un censo en México en donde se encontró que el 53.9% de los terrenos de los edificios usados para vivienda se encuentran entre 90m<sup>2</sup> y 300m<sup>2</sup> (INEGI, 2020), lo que equivale a tener superficies cuadradas de 9.5m y 17.3m de lado correspondientemente, por lo que se decidió tener dos configuraciones cuadradas que estén dentro de este rango: 10m y 15m. En el estado del arte se

encuentran también configuraciones más grandes (Jahangiri, et al., 2025), por lo que se decidió incluir una superficie cuadrada adicional de 30m por lado.

Una vez elegidas las 3 opciones de superficies cuadradas se variaron las densidades de diagonales de la rejilla perimetral, lo cual se definen como “grids”, teniendo las siguientes 6 tipologías para cada nivel de análisis:

- 10m de lado con módulos de 4 grids.
- 10m de lado con módulos de 6 grids.
- 15m de lado con módulos de 4 grids.
- 15m de lado con módulos de 6 grids.
- 30m de lado con módulos de 6 grids.
- 30m de lado con módulos de 8 grids.

Para cada una de las tipologías se varió la inclinación de las diagonales en la rejilla perimetral, las cuales pueden ser de 1 módulo, hasta  $n$  módulos, siendo  $n$  la cantidad de pisos que tenga el edificio.

La nomenclatura utilizada para definir los parámetros geométricos de cada uno de los modelos fue la siguiente:

**AX\_BY\_CP\_DXD\_EM**

Donde:

**A** es la longitud de ancho del edificio.

**B** es la longitud de profundidad del edificio.

**C** es la cantidad de niveles que tiene el edificio.

**D** es la cantidad de grids, es decir de diagonales, que tiene la rejilla perimetral en cada nivel.

**E** es el tamaño del módulo.

La configuración del sistema gravitacional se compone de los siguientes elementos: Vigas perimetrales, vigas secundarias, vigas internas y columnas gravitacionales, tal como se indica en la [Figura 14](#).

Las vigas secundarias son las encargadas de soportar y formar el sistema de piso de losacero, repartiendo la carga recibida a la vigas internas. Las Vigas Internas conectan a las vigas perimetrales con las columnas gravitacionales, absorbiendo la carga gravitacional y transmitiendo una parte al sistema DG y otra parte a las columnas gravitacionales. Las vigas perimetrales se encuentran en el borde de la estructura, estas forman un anillo que confina el sistema estructural gravitacional, recibiendo la rejilla perimetral DG.

Todos los elementos del sistema gravitacional están liberados a momento en sus extremos, con excepción de la viga perimetral, la cual se considera como un anillo continuo. La elección de estos elementos obedece únicamente a las cargas gravitacionales aplicadas sobre cada nivel, no hay diferencias de carga entre los entresijos y la azotea. Los parámetros geométricos se modificarán en las 4 fachadas de forma simétrica.

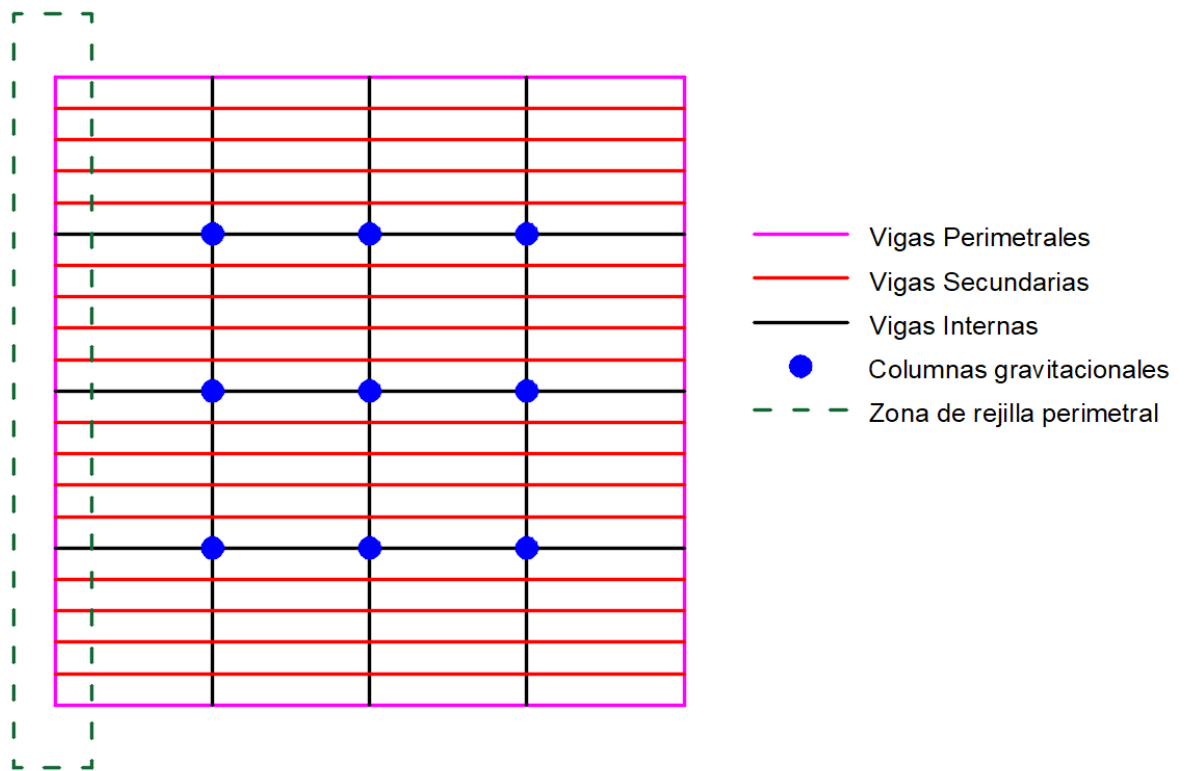
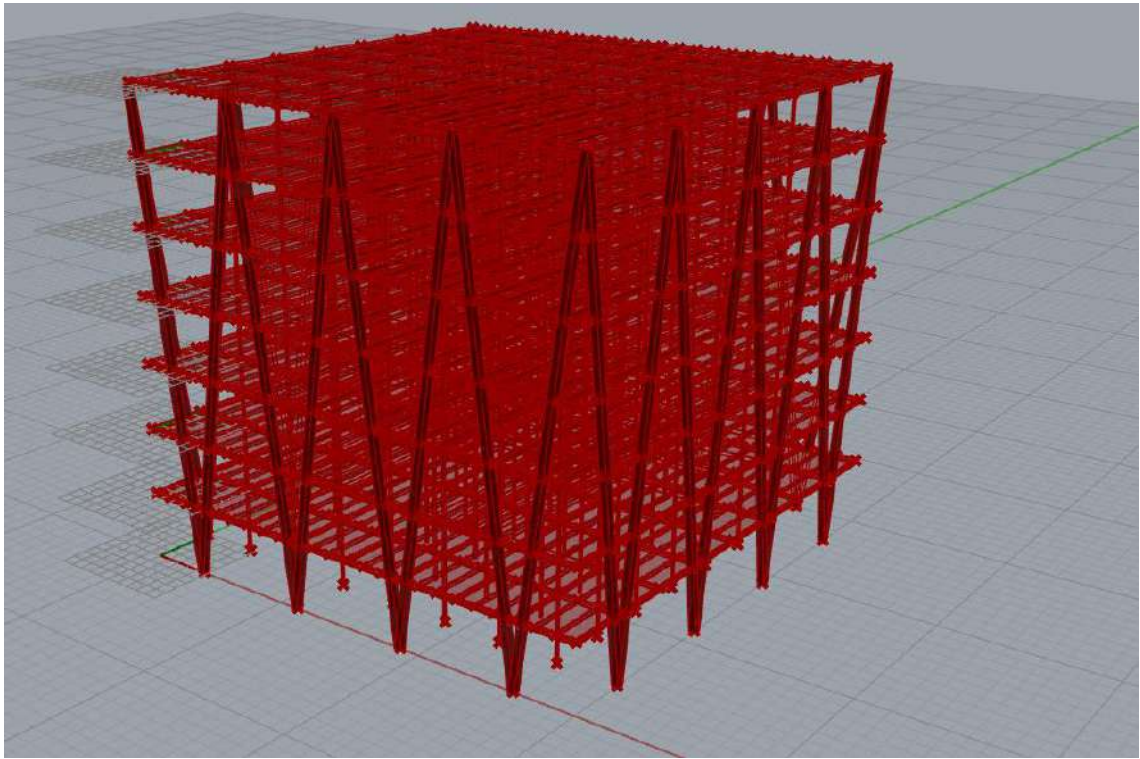


Figura 14 Configuración del sistema gravitacional DG.

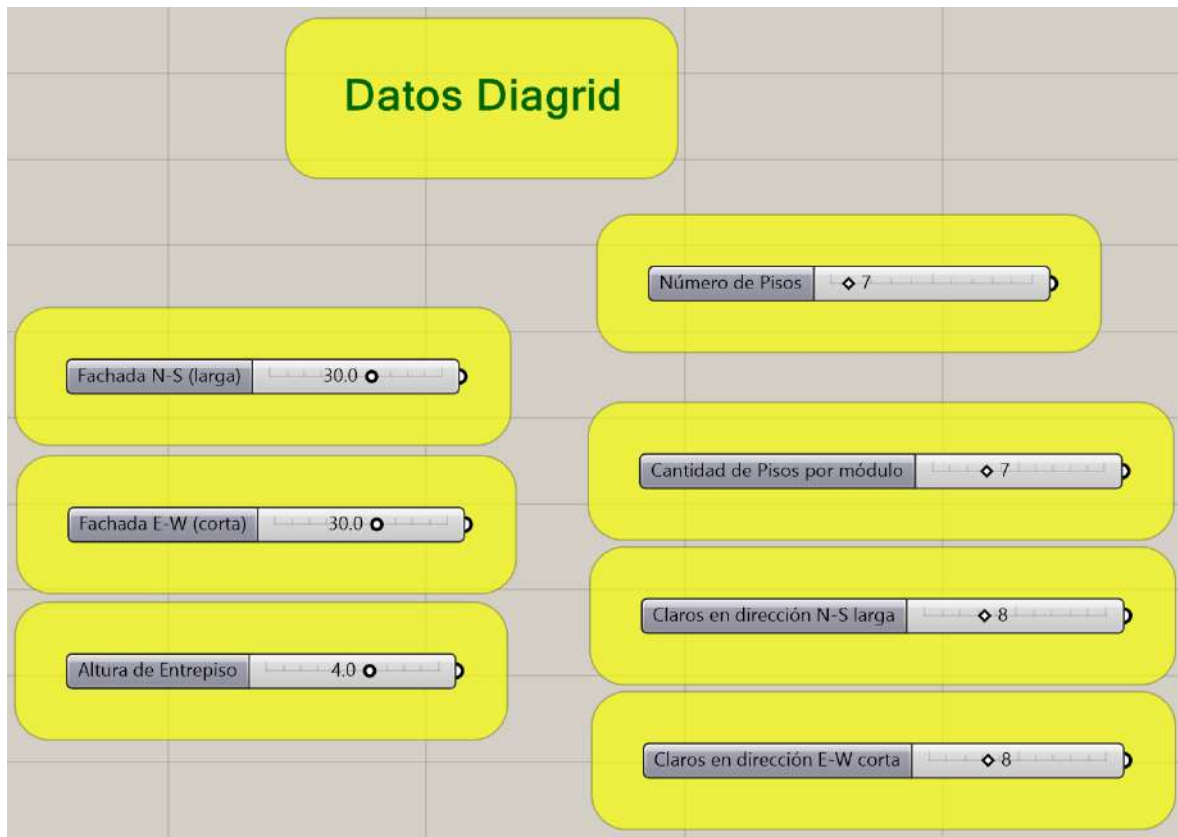
### 6.1.3 Programación de geometría paramétrica para análisis gravitacional y análisis no lineal.

Para generar el modelo geométrico, se utilizó el software Rhino-Grasshopper (Robert McNeel & Associates, 2023), este programa se enfoca en la geometría espacial y tiene un vínculo con el programa ETABS (Computers and Structures, Inc. (CSI), 2023), lo que permitió un desarrollo completo desde la modelación ([Figura 15](#)) hasta el análisis y diseño estructural.



**Figura 15 Modelo paramétrico en el software Rhino-Grasshopper.**

El modelo paramétrico fue la herramienta principal que permitió generar todos los modelos mediante la elección de los parámetros topológicos ([Figura 16](#)) que variaron alrededor de todos los casos de estudio de la presente investigación.



**Figura 16** Parámetros topológicos DG.

#### **6.1.4 Programación de diseño estructural.**

Como se mencionó anteriormente, a partir del programa Grasshopper fue posible ingresar al API de ETABS, en esta interfaz se programó mediante nodos el diseño estructural conforme al Instituto Americano de la Construcción en Acero, AISC por sus siglas en inglés (AISC, 2022) .

Las consideraciones de diseño fueron las siguientes:

- Tipos de marcos estructurales: SMF.
- Filosofía de diseño: LRFD.
- Método de análisis: Método de Análisis Directo.
- Método de segundo orden: General segundo orden.
- Método de reducción de rigidez: Tau-b Fixed.
- Factor Phi a flexión: 0.9.

- Factor Phi a compresión: 0.9.
- Factor Phi a tensión (fluencia): 0.9.
- Factor Phi a tensión (fractura): 0.75.
- Factor Phi a cortante: 0.9.
- Factor Phi a flexión: 0.9.
- Factor Phi a torsión: 0.9.

Las combinaciones de carga utilizadas fueron las recomendadas por el MDOC, las cuales son:

- $1.2*PP + 1.2*CM + 1.6*CVm$
- $1.25*(PP + CM + CVins + SC)$
- $1.0*(PP + CM + CVins + SS)$

Donde:

- PP es el peso propio de los elementos
- CM es la carga muerta
- CVm es la carga viva máxima
- CVins es la carga viva instantánea
- SC es la carga sísmica de colapso en la dirección de análisis.
- SS es la carga sísmica de servicio en la dirección de análisis.

## **6.2 Evaluación del comportamiento sísmico de diferentes configuraciones geométricas.**

La segunda etapa de la investigación se centró en el análisis de los resultados obtenidos a partir de los modelos generados en la primer etapa.

### **6.2.1 Elaboración de base de datos con diferentes configuraciones de diagonales.**

Se generó una base de datos de los modelos generados con los siguientes datos obtenidos de cada caso:

- Fuerza axial de la diagonal externa de cada piso

- Fuerza axial de la diagonal interna de cada piso
- Altura de entrepiso
- Desplazamiento de cada nivel
- Derivas de cada piso
- Sección transversal usada en el modelo
- Volumen de acero de la rejilla perimetral
- Inclinación de las diagonales de la rejilla perimetral
- Periodo fundamental de vibración.

### 6.2.2 Crear relaciones en desplazamientos, derivas, y peso de la estructura.

Para el análisis de los modelos se definieron las siguientes relaciones numéricas que permitieron la interpretación de los valores:

- Máxima deriva de todos los pisos.
- Derivas normalizadas de 0 a 1 para cada tipología.
- Derivas normalizadas de 0 a 1 para cada tamaño de terreno.
- Volumen normalizado de 0 a 1 para cada tamaño de terreno.
- Relación altura entre longitud de análisis.

## 6.3 Desarrollo de una red neuronal

Para el desarrollo de la red neuronal, se tomaron los valores de la base de datos hecha en la segunda etapa del presente trabajo.

### 6.3.1 Construir arquitectura de la red neuronal de perceptrón multicapa.

La red neuronal artificial es de tipo Perceptrón Multicapa (MLP) en donde se tienen cuatro capas en total. Se eligió un MLP debido a su capacidad para modelar relaciones no lineales y su constante uso en el estado del arte (Du, et al., 2022). La arquitectura de la red fue diseñada considerando el tamaño de la base de datos hecha en el presente trabajo, con el objetivo de evitar el sobreajuste de la red hacia la base de datos, y dejando la arquitectura de la red lista para seguir aumentando la base de datos en trabajos posteriores ([Figura 17](#)).

La primer capa de la Red neuronal pertenece a la capa de entrada compuesta por cuatro neuronas, las cuales describen las características geométricas y paramétricas de los casos de estudio. Las entradas de la red neuronal son:

- Número de pisos (número entero).
- Relación “Módulo DG” entre la longitud de análisis (número decimal).
- Relación “grid” entre la longitud de análisis (número decimal).
- Inclinación de las diagonales DG (número decimal).

Posteriormente se tienen dos capas ocultas, la primera está compuesta por 16 neuronas y la segunda por 8 neuronas, ambas usan la función de activación ReLU, la cual fue seleccionada debido a su eficiencia computacional y a su capacidad para introducir no linealidad (Maurya, et al., 2023)

La última capa de la Red neuronal es la de salida, la cual tiene dos neuronas asociadas a la eficiencia del modelo y al mejor ángulo encontrado para cada tipología. En esta capa se tiene una activación lineal, esto para que el modelo prediga valores continuos sin algún tipo de restricción en su rango.

Entrada 4 neuronas

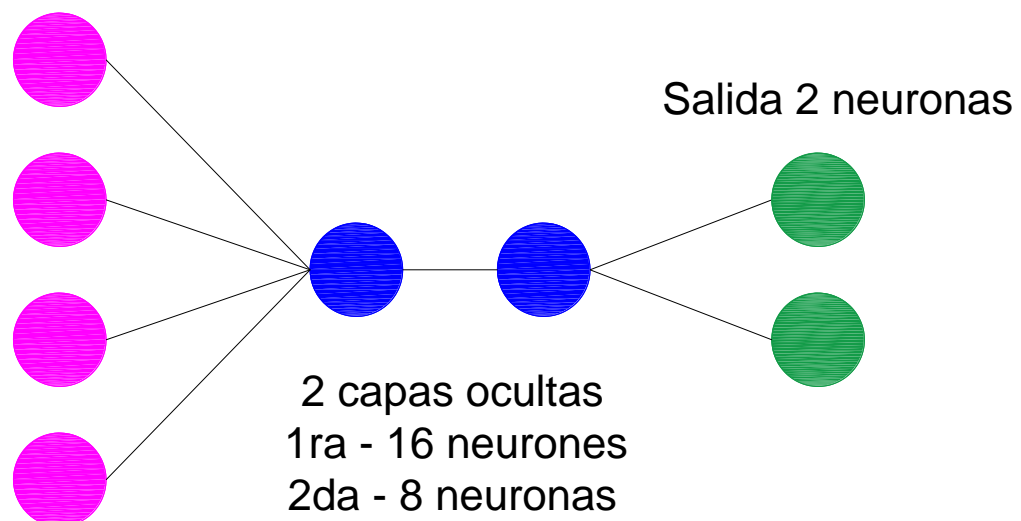


Figura 17 Arquitectura de red neuronal.

### 6.3.2 Determinar la variable de salida que diga qué geometría es la más adecuada para la estructura.

Las salidas de la red neuronal representan la información con la cual el usuario entiende el comportamiento del DG para lo cual se eligieron dos parámetros: Mejor ángulo de inclinación según la tipología usada, en donde se le dice al usuario cual es la inclinación que minimiza el peso de la rejilla perimetral; y la segunda es el parámetro de eficiencia “G”, el cual se obtuvo a partir de la ecuación (32).

$$G = 1 - \frac{\text{Peso normalizado} + \text{Deriva máxima normalizada}}{2} \quad (32)$$

Este valor “G” tiene un rango matemático entre 0 y 1, siendo 1 el DG con la mejor inclinación posible tanto en peso como en desplazamientos laterales de su tipología, y 0 con la peor inclinación posible.

### 6.3.3 Entrenar red neuronal con la base de datos hecha y las relaciones obtenidas entre diferentes configuraciones.

Para el entrenamiento de la red neuronal, se utilizó la base de datos compuesta por 108 muestras, cada muestra tiene las cuatro neuronas de entrada y dos neuronas de salida mencionadas anteriormente.

Los datos fueron divididos en dos conjuntos aleatoriamente hechos, el primero del 75% de la base de datos, y el 2do del 25%, con el propósito de entrenar y validar la red.

Para mejorar la estabilidad del proceso de entrenamiento y asegurar una contribución equilibrada de todas las variables, independientemente de si son números enteros, decimales o si su magnitud es cercana o no a la unidad, tanto las entradas como las salidas fueron normalizadas mediante el uso de un escalado de tipo “StandardScaler”.

Para el entrenamiento se empleó el optimizador Adam, con una tasa de aprendizaje inicial de 0.001, seleccionado por su buen desempeño en redes neuronales profundas y su capacidad para adaptarse a la geometría del espacio de parámetros.

El proceso de entrenamiento se llevó a cabo durante un número máximo elevado de épocas, incorporando una estrategia de detención temprana, basado en el error de validación. Esta técnica permitió finalizar el entrenamiento de forma automática cuando el desempeño del modelo ya no tuvo mejora, evitando tener sobreajustes de la red.

#### **6.4 Evaluar y comparar la red neuronal con el estado del arte.**

Finalmente, los resultados mostrados por la red neuronal fueron comparados contra los valores recabados en la base de datos para observar el comportamiento predicho por la red.

##### **6.4.1 Determinar el error cuadrático medio de la red neuronal.**

Para la validación del modelo se empleó el MAE para los valores predichos por la red y los valores reales de la base de datos. Adicionalmente se usó el coeficiente de determinación para medir la proporción de la varianza en las predicciones.

##### **6.4.2 Comparar resultados con estado del arte.**

Con la red neuronal entrenada con los valores de la base de datos, se procedió a compararla con las diferentes estructuras del estado del arte para poder analizar la variación de los resultados de la red contra los usados en las estructuras hechas.

## 7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan cada uno de los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita en el capítulo 6, en donde se detalla el comportamiento de todos los casos de estudio profundizando la distribución de carga axial, el comportamiento dinámico relacionado con los desplazamientos totales, el peso de la rejilla perimetral y la eficiencia de cada modelo. Se presenta el modelo de red neuronal construido para la predicción de la geometría de la rejilla perimetral, así como una comparación entre las estructuras diagrid (DG) existentes en el estado del arte y los resultados de la red neuronal, comparando la geometría y eficiencia de estas.

### 7.1 Análisis de estructuras diagrid de altura media para la obtención de la respuesta.

Se desarrolló un programa en Grasshopper que automatiza la modelación, análisis y diseño estructural mediante el API de ETABS, en el cual se realizó un diseño gravitacional y posteriormente se aplicó un análisis modal espectral, permitiendo realizar el diseño estructural tanto del sistema gravitacional, como de la rejilla perimetral diagrid.

#### 7.1.1 Selección del espectro de diseño a utilizar para el análisis.

El espectro de colapso ([Tabla 7-1](#)) fue construido según el capítulo [6.1.1](#) perteneciente a la metodología, en donde se tuvo una aceleración máxima de 12.25 m/s<sup>2</sup>.

**Tabla 7-1 Espectro de colapso**

Periodo (s)	Aceleración espectral (1/g)	Aceleración espectral (m/s <sup>2</sup> )
0	0.50	4.90
0.02	0.65	6.37
0.04	0.80	7.84
0.06	0.95	9.31
0.08	1.10	10.78
0.1	1.25	12.25
0.6	1.25	12.25
0.7	1.16	11.35
0.8	1.08	10.61
0.9	1.02	10.01
1	0.97	9.49
1.2	0.88	8.67
1.4	0.82	8.02
1.6	0.76	7.50
1.8	0.72	7.07
2	0.68	6.71
2.2	0.61	6.03
2.4	0.55	5.37
2.6	0.49	4.78
2.8	0.43	4.26
3	0.39	3.81
3.2	0.35	3.42
3.4	0.31	3.08
3.6	0.28	2.79
3.8	0.26	2.53
4	0.24	2.31
4.5	0.19	1.86
5	0.16	1.52
5.5	0.13	1.27
6	0.11	1.08
7	0.08	0.80
8	0.06	0.62
9	0.05	0.49
10	0.04	0.40

Para el espectro de servicio, se tomaron los valores del espectro de colapso y se dividieron entre 5.5, tal como lo sugiere el MDOC en su sección 3.3 para estructuras tipo 1, como se muestra en la [Tabla 7-2](#). Los valores máximos de aceleración del espectro de servicio fueron de 2.23 m/s<sup>2</sup>.

**Tabla 7-2 Espectro de servicio.**

Periodo (s)	Aceleración espectral (1/g)	Aceleración espectral (m/s <sup>2</sup> )
0.00	0.09	0.89
0.02	0.12	1.16
0.04	0.15	1.43
0.06	0.17	1.69
0.08	0.20	1.96
0.10	0.23	2.23
0.60	0.23	2.23
0.70	0.21	2.06
0.80	0.20	1.93
0.90	0.19	1.82
1.00	0.18	1.73
1.20	0.16	1.58
1.40	0.15	1.46
1.60	0.14	1.36
1.80	0.13	1.29
2.00	0.12	1.22
2.20	0.11	1.10
2.40	0.10	0.98
2.60	0.09	0.87
2.80	0.08	0.78
3.00	0.07	0.69
3.20	0.06	0.62
3.40	0.06	0.56
3.60	0.05	0.51
3.80	0.05	0.46
4.00	0.04	0.42
4.50	0.03	0.34
5.00	0.03	0.28
5.50	0.02	0.23
6.00	0.02	0.20
7.00	0.01	0.15
8.00	0.01	0.11
9.00	0.01	0.09
10.00	0.01	0.07

### 7.1.2 Selección de los casos de estudio.

Mediante el código de programación visual de Grasshopper, se permitió el desarrollo de 108 casos de estudios ([Tabla 7-3](#)), los cuales siguen la nomenclatura establecida en el capítulo [6.1.2](#).

**Tabla 7-3 Casos de estudio**

	ID	
	5 pisos	6 pisos
10X_10Y_5P_4X4_1M	10X_10Y_6P_4X4_1M	10X_10Y_7P_4X4_1M
10X_10Y_5P_4X4_2M	10X_10Y_6P_4X4_2M	10X_10Y_7P_4X4_2M
10X_10Y_5P_4X4_3M	10X_10Y_6P_4X4_3M	10X_10Y_7P_4X4_3M
10X_10Y_5P_4X4_4M	10X_10Y_6P_4X4_4M	10X_10Y_7P_4X4_4M
10X_10Y_5P_4X4_5M	10X_10Y_6P_4X4_5M	10X_10Y_7P_4X4_5M
10X_10Y_5P_6X6_1M	10X_10Y_6P_4X4_6M	10X_10Y_7P_4X4_6M
10X_10Y_5P_6X6_2M	10X_10Y_6P_6X6_1M	10X_10Y_7P_4X4_7M
10X_10Y_5P_6X6_3M	10X_10Y_6P_6X6_2M	10X_10Y_7P_6X6_1M
10X_10Y_5P_6X6_4M	10X_10Y_6P_6X6_3M	10X_10Y_7P_6X6_2M
10X_10Y_5P_6X6_5M	10X_10Y_6P_6X6_4M	10X_10Y_7P_6X6_3M
15X_15Y_5P_4X4_1M	10X_10Y_6P_6X6_5M	10X_10Y_7P_6X6_4M
15X_15Y_5P_4X4_2M	10X_10Y_6P_6X6_6M	10X_10Y_7P_6X6_5M
15X_15Y_5P_4X4_3M	15X_15Y_6P_4X4_1M	10X_10Y_7P_6X6_6M
15X_15Y_5P_4X4_4M	15X_15Y_6P_4X4_2M	10X_10Y_7P_6X6_7M
15X_15Y_5P_4X4_5M	15X_15Y_6P_4X4_3M	15X_15Y_7P_4X4_1M
15X_15Y_5P_6X6_1M	15X_15Y_6P_4X4_4M	15X_15Y_7P_4X4_2M
15X_15Y_5P_6X6_2M	15X_15Y_6P_4X4_5M	15X_15Y_7P_4X4_3M
15X_15Y_5P_6X6_3M	15X_15Y_6P_4X4_6M	15X_15Y_7P_4X4_4M
15X_15Y_5P_6X6_4M	15X_15Y_6P_6X6_1M	15X_15Y_7P_4X4_5M
15X_15Y_5P_6X6_5M	15X_15Y_6P_6X6_2M	15X_15Y_7P_4X4_6M
30X_30Y_5P_6X6_1M	15X_15Y_6P_6X6_3M	15X_15Y_7P_4X4_7M
30X_30Y_5P_6X6_2M	15X_15Y_6P_6X6_4M	15X_15Y_7P_6X6_1M
30X_30Y_5P_6X6_3M	15X_15Y_6P_6X6_5M	15X_15Y_7P_6X6_2M
30X_30Y_5P_6X6_4M	15X_15Y_6P_6X6_6M	15X_15Y_7P_6X6_3M
30X_30Y_5P_6X6_5M	30X_30Y_6P_6X6_1M	15X_15Y_7P_6X6_4M
30X_30Y_5P_8X8_1M	30X_30Y_6P_6X6_2M	15X_15Y_7P_6X6_5M
30X_30Y_5P_8X8_2M	30X_30Y_6P_6X6_3M	15X_15Y_7P_6X6_6M
30X_30Y_5P_8X8_3M	30X_30Y_6P_6X6_4M	15X_15Y_7P_6X6_7M
30X_30Y_5P_8X8_4M	30X_30Y_6P_6X6_5M	30X_30Y_7P_6X6_1M
30X_30Y_5P_8X8_5M	30X_30Y_6P_6X6_6M	30X_30Y_7P_6X6_2M
	30X_30Y_6P_8X8_1M	30X_30Y_7P_6X6_3M
	30X_30Y_6P_8X8_2M	30X_30Y_7P_6X6_4M
	30X_30Y_6P_8X8_3M	30X_30Y_7P_6X6_5M

5 pisos	ID	
	6 pisos	7 pisos
	30X_30Y_6P_8X8_4M	30X_30Y_7P_6X6_6M
	30X_30Y_6P_8X8_5M	30X_30Y_7P_6X6_7M
	30X_30Y_6P_8X8_6M	30X_30Y_7P_8X8_1M
		30X_30Y_7P_8X8_2M
		30X_30Y_7P_8X8_3M
		30X_30Y_7P_8X8_4M
		30X_30Y_7P_8X8_5M
		30X_30Y_7P_8X8_6M
		30X_30Y_7P_8X8_7M

De forma visual se aprecian a continuación los casos de estudio de 5 niveles para la configuración de 10m (Figura 18), de 15m (Figura 19) y de 30m (Figura 20).

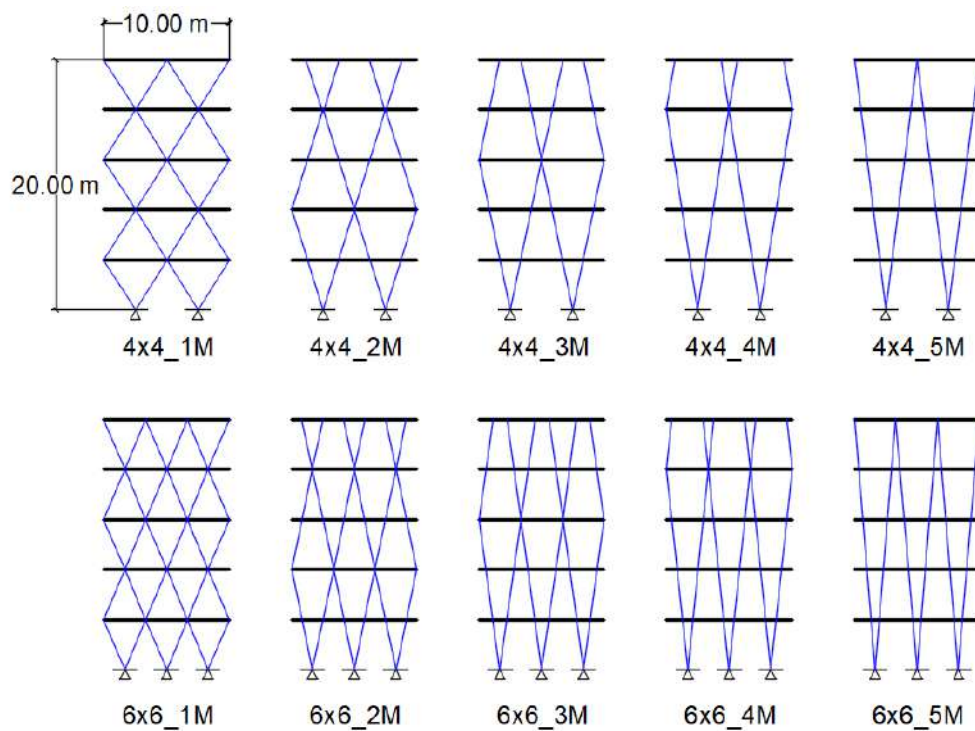
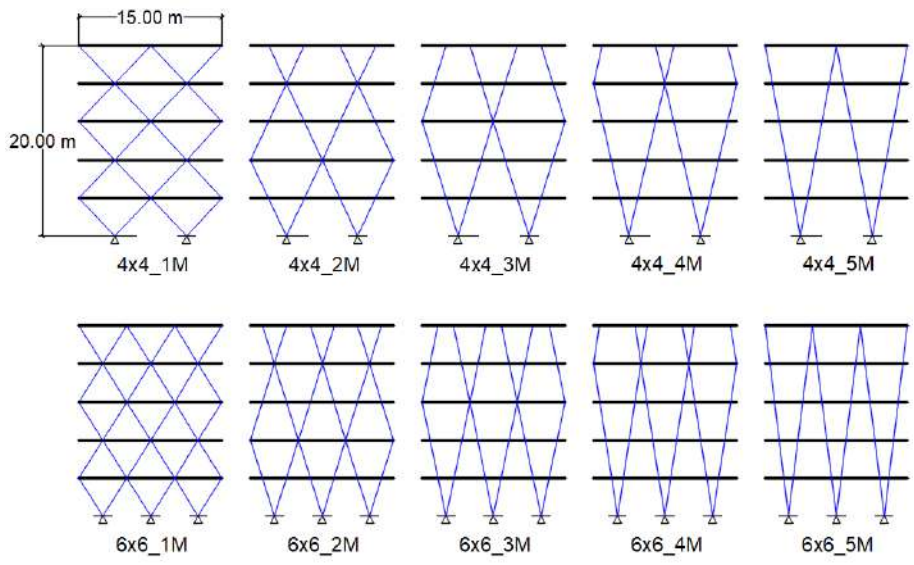
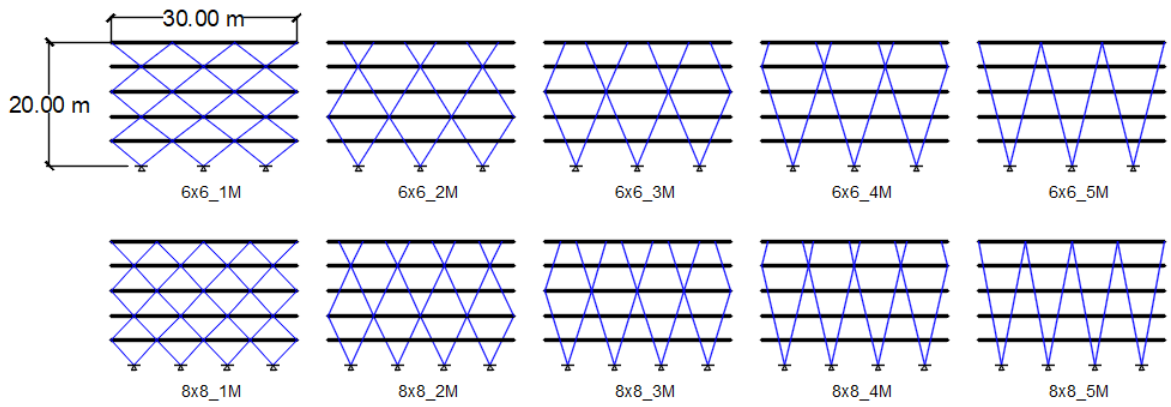


Figura 18 Casos de estudio DG 5 pisos 10m x 10m



**Figura 19 Casos de estudio DG 5 pisos 15m x 15m**



**Figura 20 Casos de estudio DG 5 pisos 30m x 30m**

## 7.2 Evaluación del comportamiento estructural de los casos de estudio

### 7.2.1 Distribución de carga axial

La distribución de la carga axial en todos los casos de estudio de las estructuras DG presentan un retraso de cortante, esto obedece al comportamiento reportado en el estado del arte actual (Perez-Martinez, et al., 2025), y a continuación se presenta la distribución para los casos de estudio analizados.

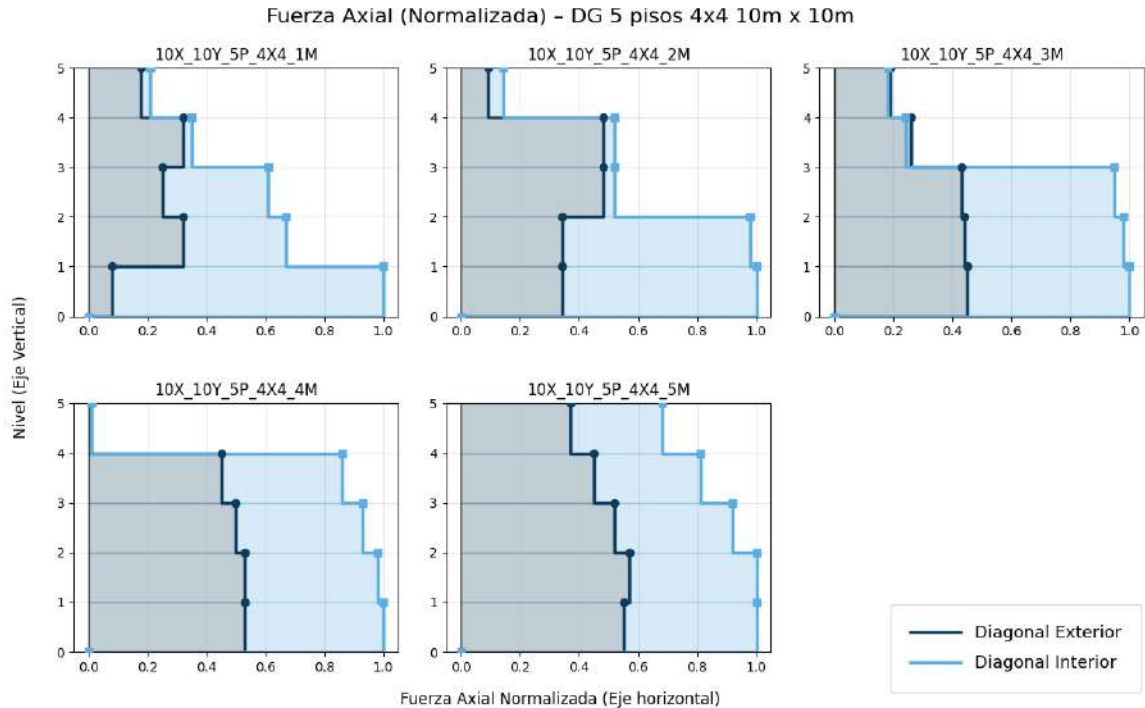
#### 7.2.1.1 5 niveles

En la [Figura 21](#) se aprecian los 5 modelos diferentes que se pueden formar con la rejilla perimetral DG. El modelo 10X\_10Y\_5P\_4X4\_1M presenta el mayor valor de retraso de cortante de todos los modelos, teniendo una diferencia de más del 90% en la distribución del primer nivel, siendo las diagonales interiores los elementos que absorben la mayor cantidad de carga, además se observa que la carga axial de las diagonales interiores decrece conforme aumenta la altura de la estructura, sin embargo las diagonales externas presentan un incremento del nivel 1 al 2 y del 3 al 4, este comportamiento está presente justo cuando la diagonal externa apunta hacia el centro del edificio.

El modelo 10X\_10Y\_5P\_4X4\_2M de la [Figura 21](#) presenta una distribución de la carga axial diferente que en el primer modelo. Se observa que el cambio en la magnitud de la carga axial se tiene cuando el módulo DG termina y por lo tanto las diagonales externas cambian de dirección, por lo que hay un cambio en la rigidez del edificio en el nivel 2 al 3 y del 4 al 5. Se presenta al igual que en el modelo "1M" un incremento en la distribución axial cuando se pasa del nivel 2 al 3, posteriormente solo decrece esta distribución en la diagonal exterior.

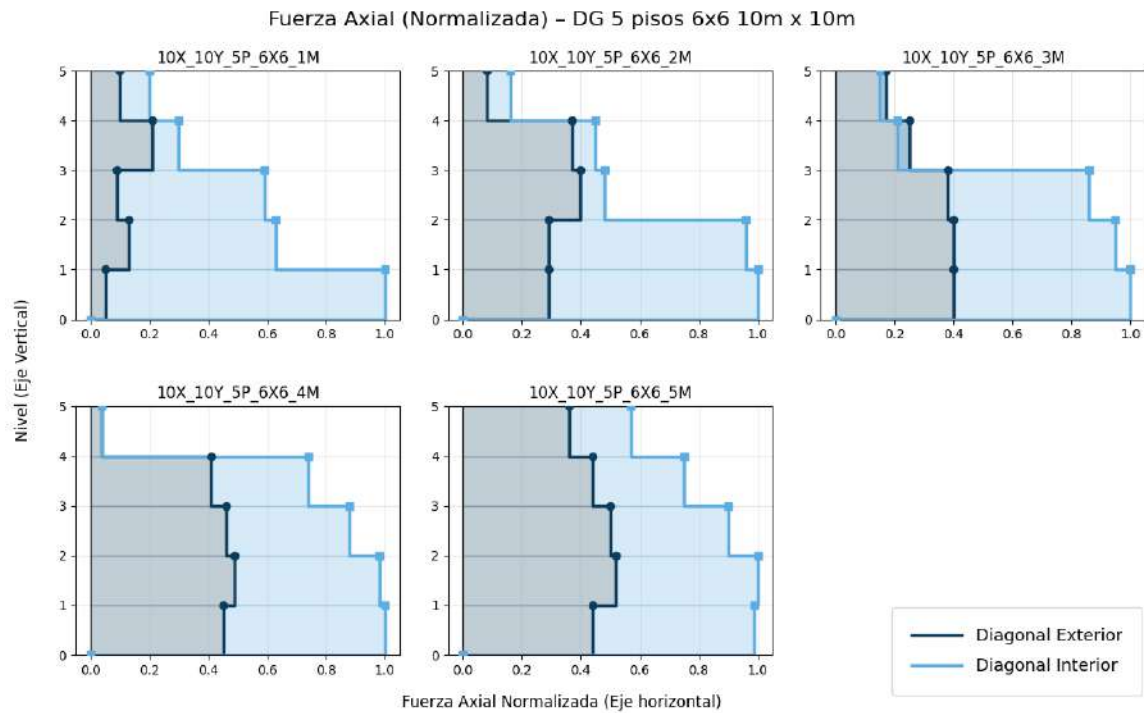
Los siguientes modelos: 10X\_10Y\_5P\_4X4\_3M, 10X\_10Y\_5P\_4X4\_4M y 10X\_10Y\_5P\_4X4\_5M de la Figura 21 presentan un comportamiento más estable, todos los niveles tienen un decrecimiento progresivo de la distribución axial, con excepción de un incremento mínimo en el modelo 5M en la diagonal exterior, sin embargo se aprecia el decrecimiento de forma menos brusca que en los primeros

dos modelos, aun así se tienen diferencias considerables en el primer módulo de cada estructura.



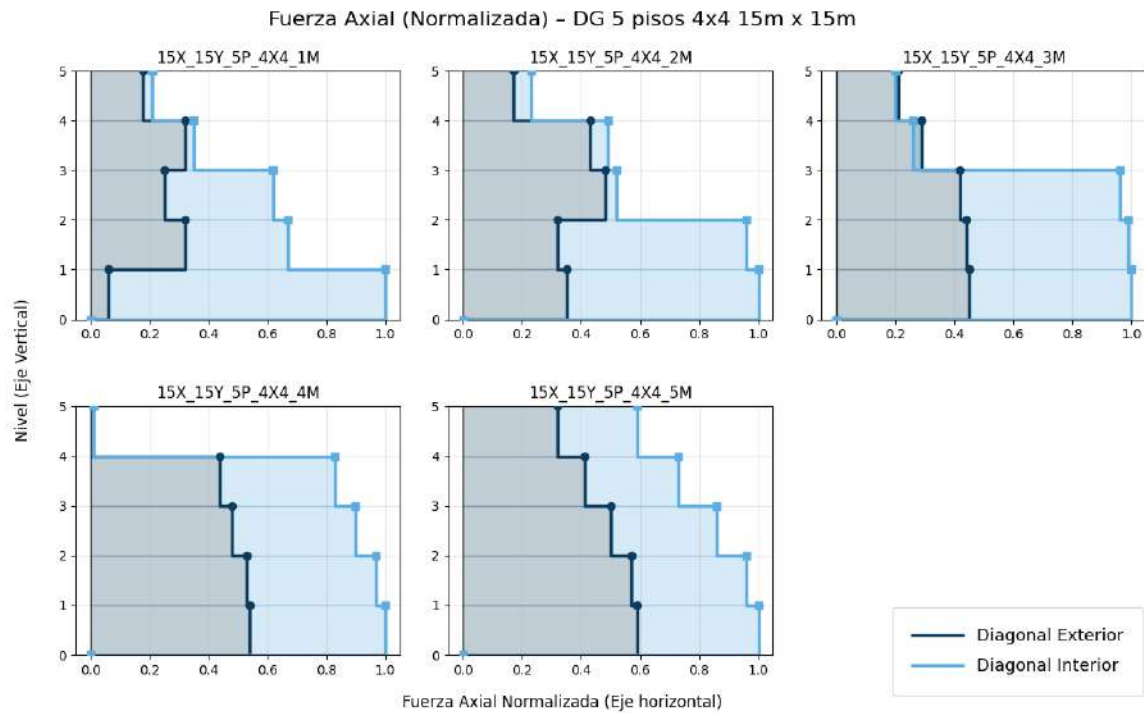
**Figura 21 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X\_10Y\_5P\_4X4.**

La [Figura 22](#) presenta la misma geometría que la [Figura 21](#) solo modificando el arreglo de 4 grids a 6 grids, esto repercute directamente en la distribución axial de los diferentes arreglos. El modelo 10X\_10Y\_5P\_6X6\_1M muestra una distribución similar en la diagonal interior del DG, pero la diagonal exterior sufre cambios, a partir del nivel 2 se muestra una reducción en su distribución axial respetando los aumentos de carga mostrados anteriormente en la [Figura 21](#). Los modelos 10X\_10Y\_5P\_6X6\_2M, 10X\_10Y\_5P\_6X6\_3M, 10X\_10Y\_5P\_6X6\_4M, y 10X\_10Y\_5P\_6X6\_5M muestran la misma distribución con ligeros aumentos en la diagonal interior.



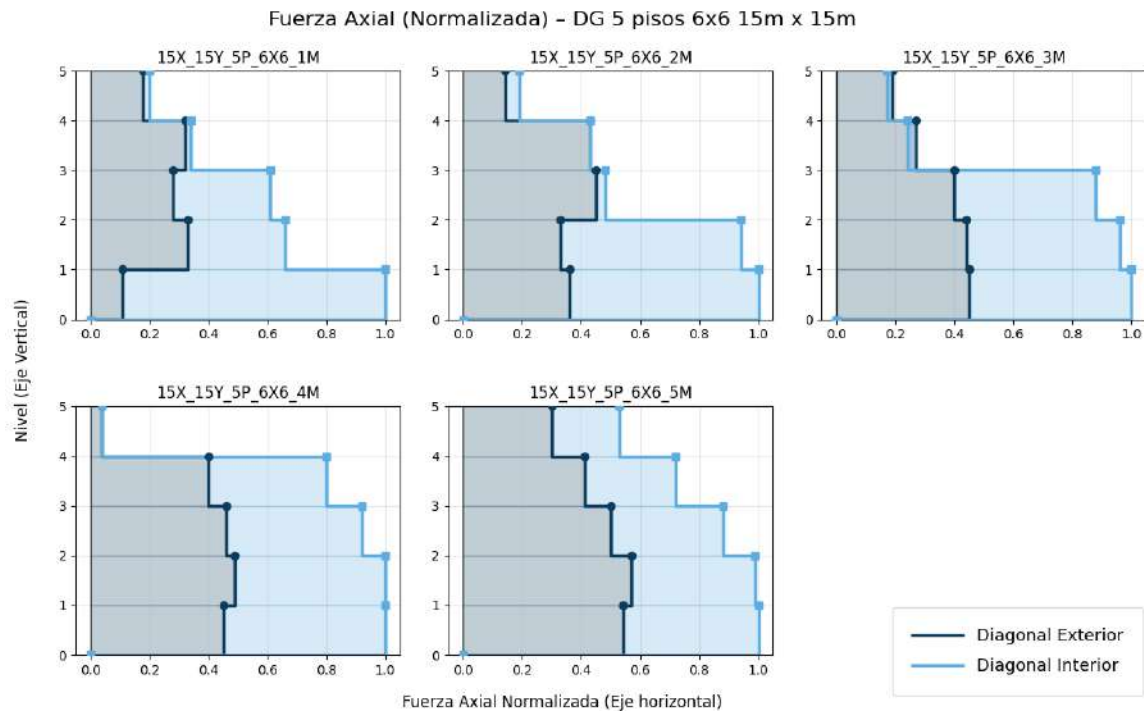
**Figura 22 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X\_10Y\_5P\_6X6.**

La [Figura 23](#) y Figura 24 aumentan su sección en planta a 15m, respetando la misma altura, por lo que los modelos tienen una relación de aspecto más robusta con respecto a su altura. El caso 15X\_15Y\_5P\_4X4\_2M es el modelo que más diferencias tiene con respecto de la configuración de 10m, específicamente en los niveles 3 y 4, debido a una disminución la carga axial de la diagonal exterior. Los demás modelos presentan una distribución similar.



**Figura 23 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X\_15Y\_5P\_4X4.**

Para los modelos con 6 grids mostrados en la [Figura 22](#) y [Figura 24](#), se observan cambios más significativos que con los de 4 grids. El retraso de cortante en los niveles 4 y 5, del caso 15X\_15Y\_5P\_6X6\_1M disminuyen casi a 0 mientras que el resto de niveles se mantiene la distribución. El caso 15X\_15Y\_5P\_6X6\_2M cuenta con valores menores de retraso de cortante a partir de su nivel 3, significando un aumento en la carga axial que soporta la diagonal externa. Los modelos subsiguientes 15X\_15Y\_5P\_6X6\_3M, 15X\_15Y\_5P\_6X6\_4M, y 5X\_15Y\_5P\_6X6\_5M presentan la misma distribución axial que los casos con 10X\_10Y.



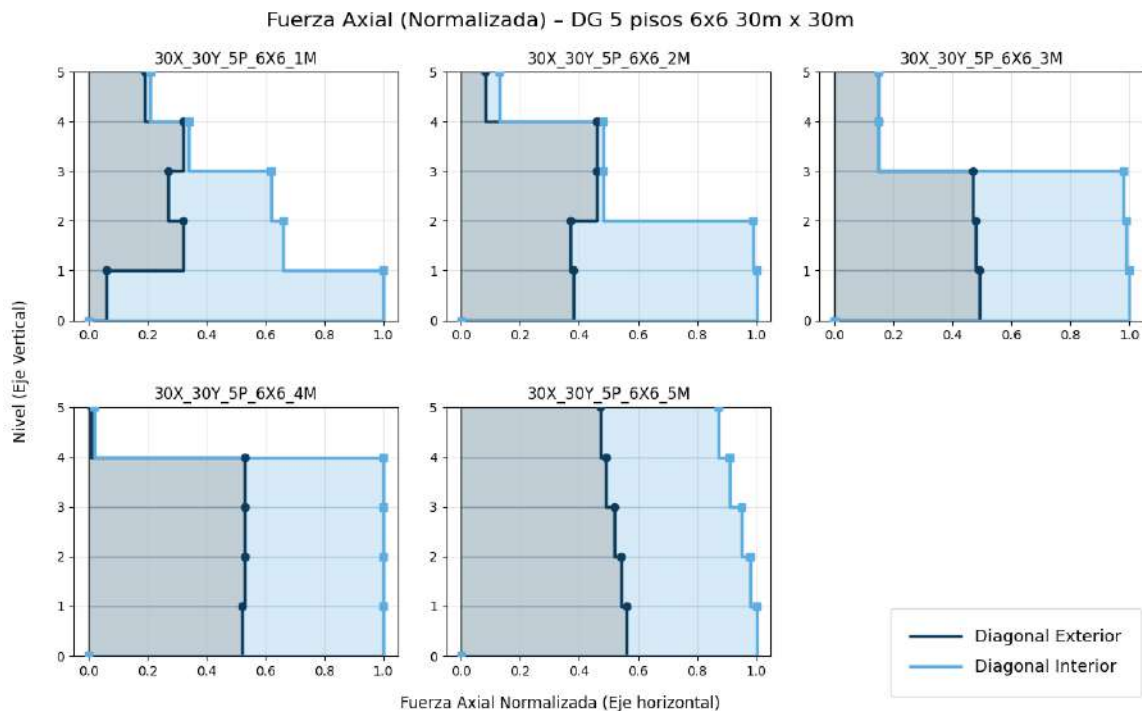
**Figura 24 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X\_15Y\_5P\_6X6.**

En la [Figura 25](#) y [Figura 26](#) se presentan los modelos con dimensiones en planta 30X\_30Y, en donde se tiene un edificio más ancho que alto, lo que aleja al sistema estructural de su aplicación deseada, debido a que el estado del arte lo recomienda para edificios de gran altura (Moon, et al., 2007).

En la [Figura 25](#) se observa que los cambios en la distribución de cargas axiales son más bruscos que en la [Figura 24](#), el tamaño de módulo de cada caso de estudio se aprecia simplemente al observar cada una de las gráficas. Para el caso 30X\_30Y\_5P\_6X6\_1M de la [Figura 25](#) se tiene el mismo comportamiento que el caso 15X\_15Y\_5P\_6X6\_1M de la [Figura 24](#), esto debido a que a pesar de tener una configuración menos esbelta, el tener un arreglo de 1 módulo permite aproximar el mismo comportamiento axial siguiendo los mismos incrementos de carga del nivel 1 al 2, y del 3 al 4 en la diagonal exterior mientras que la diagonal interior mantiene una concentración máxima y esta se disipa con el paso a los niveles superiores. En el caso 30X\_30Y\_5P\_6X6\_2M la distribución axial adopta y define la distribución

según los módulos que tiene, disminuyendo el retraso de cortante a partir del nivel 2 casi por completo.

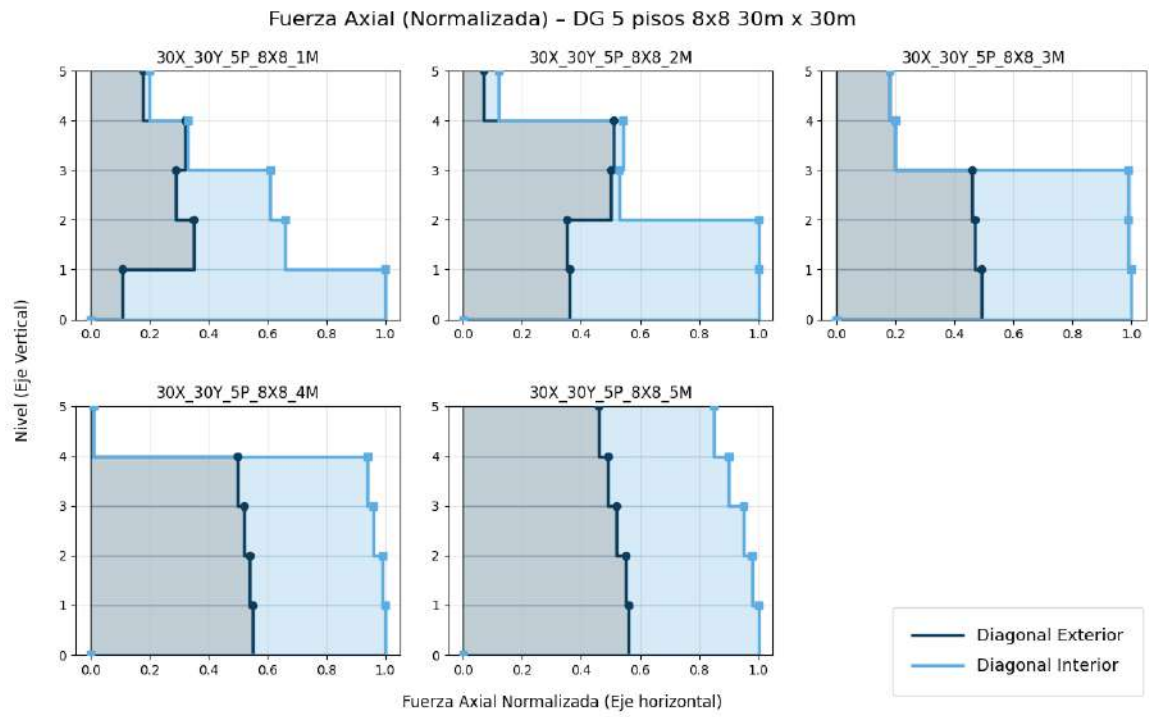
En el resto de casos de la [Figura 25](#), se observa perfectamente cuando ocurre el cambio de módulo dentro de la estructura, el retraso de cortante tiene un valor de aproximadamente 0.5 en el primer módulo y posteriormente se disipa a valores cercanos a 0 para el resto del edificio en todos los casos.



**Figura 25 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X\_30Y\_5P\_6X6.**

La [Figura 26](#) presenta una saturación mayor, pasando de modelos de 6 grids en la [Figura 25](#) a 8 grids en esta presentación. La distribución de carga axial no varía de forma substancial, sino que se mantiene para ambas configuraciones con diferentes concentraciones de grids.

El valor del retraso de cortante se mantiene en los mismos valores para ambas figuras ([Figura 25 y Figura 26](#)) remarcando que a partir de las estructuras de arreglo 3M y superior, el primer módulo presenta retrasos de cortante de 0.5 mientras que el resto de niveles tienen valores cercanos a 0.



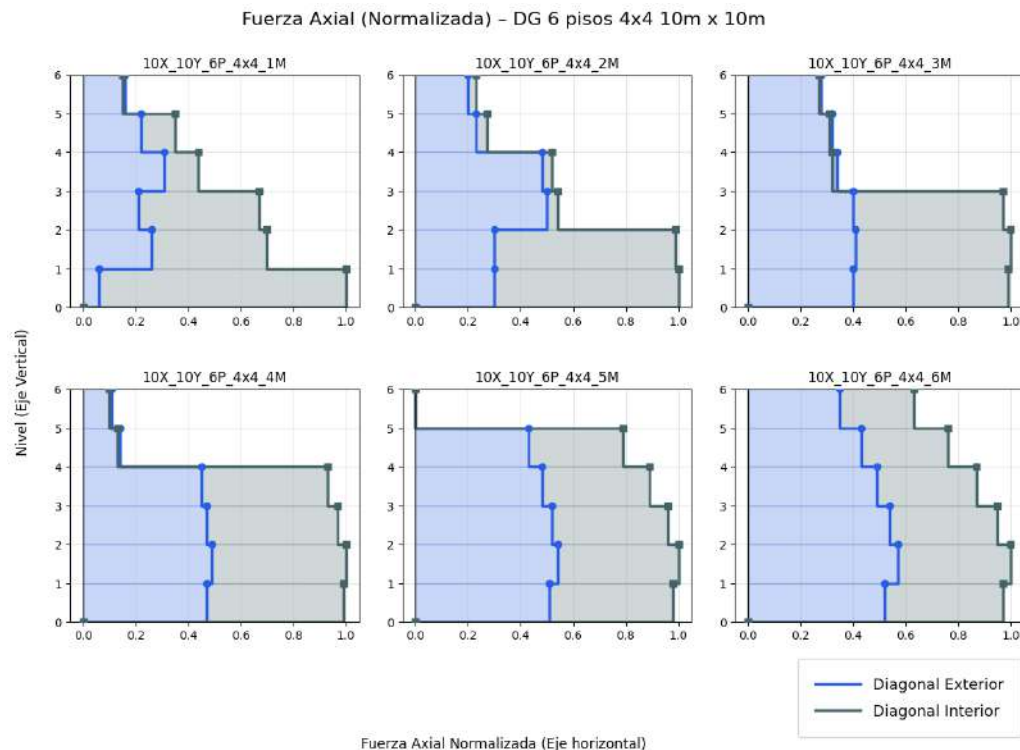
**Figura 26 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X\_30Y\_5P\_8X8.**

### 7.2.1.2 6 niveles

A continuación, se presentan los modelos de 6 pisos de altura, todos los modelos siguen el mismo análisis del capítulo [7.2.1](#).

En la [Figura 27](#) se muestran los modelos cuya configuración es de 10m x10m en ambas fachadas laterales, 5 pisos, grid de 4x4 y con módulos de 1 hasta 6 niveles.

La distribución que presentan todos los modelos mantiene la misma línea que lo mostrado en su configuración de 5 niveles en la [Figura 21](#), solo con la diferencia de agregar un nivel más. Las gráficas muestran un dentado siempre que se asciende o desciende un nivel en la diagonal interior, comportamiento que no se observó cuando las dimensiones en plantas eran de 30m x 30m como se aprecia en la [Figura 25](#) y [Figura 26](#).

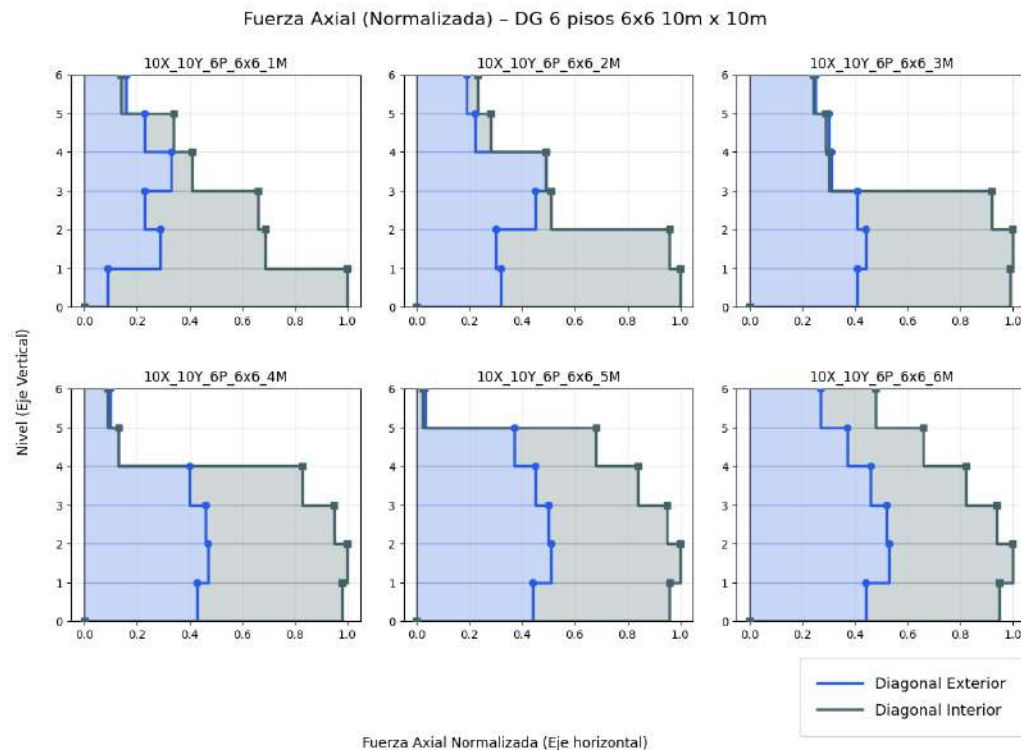


**Figura 27** Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X\_10Y\_6P\_4X4.

En la [Figura 28](#) se muestran los casos de estudio 10X\_10Y\_5P\_6X6 del 1M al 6M la cual comienza a variar con respecto de la variante de 5 pisos de la [Figura 22](#). El

modelo 10X\_10Y\_5P\_6X6 del 1M tiene mayor carga axial en la diagonal exterior que la estructura de 5 pisos. El modelo 2M de 6 pisos tiene una distribución diferente que, en su configuración de 5 pisos, esto debido a que del nivel 3 al 4 el valor de retraso de cortante es de 0 mientras que la configuración de 5 pisos se tiene un valor cercano a 0.1. El modelo 2M de 6 pisos presenta esta distribución de esfuerzo debido a que no se interrumpe ningún módulo, se forman 3 módulos exactamente, mientras que en el caso de 5 pisos quedan 2 módulos completos y uno a la mitad, lo que modifica la distribución axial.

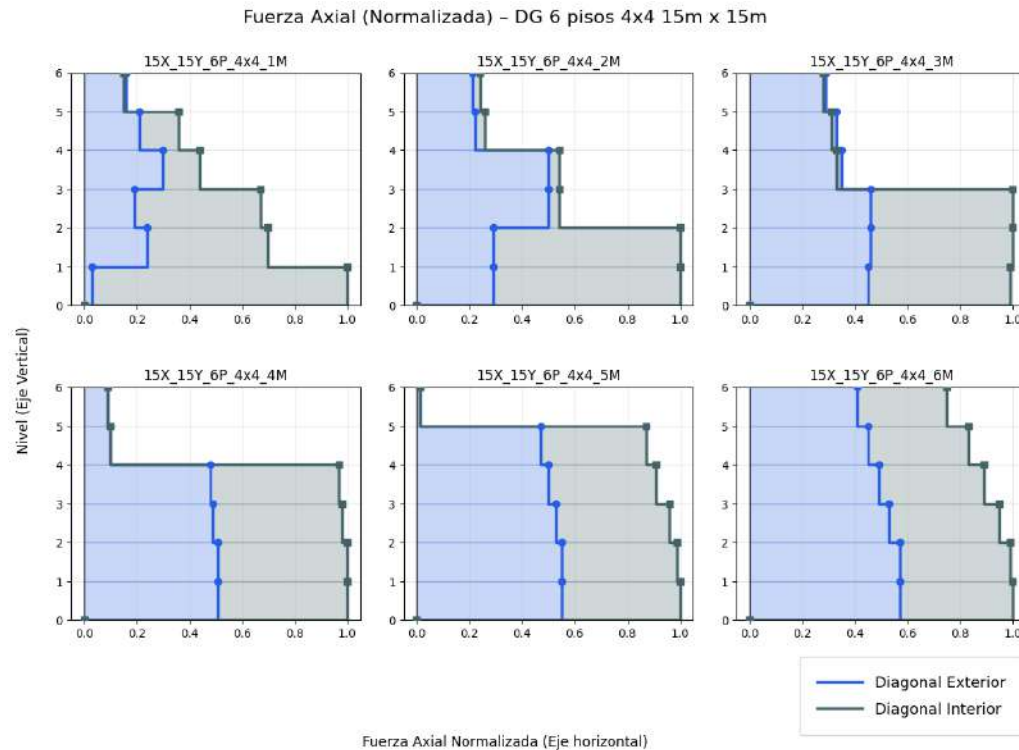
La variación en la densidad de grid entre los modelos 10X\_10Y\_6P\_4X4 y 10X\_10Y\_6P\_6X6 afecta poco la distribución axial en las diagonales.



**Figura 28 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X\_10Y\_6P\_6X6.**

La [Figura 29](#) muestra los modelos de dimensiones de 15m x 15m de 6 pisos en donde se observan cambios en los modelos 15X\_15Y\_6P\_4X4\_1M y 15X\_15Y\_6P\_4X4\_2M con respecto a su configuración de 5 pisos, donde en el

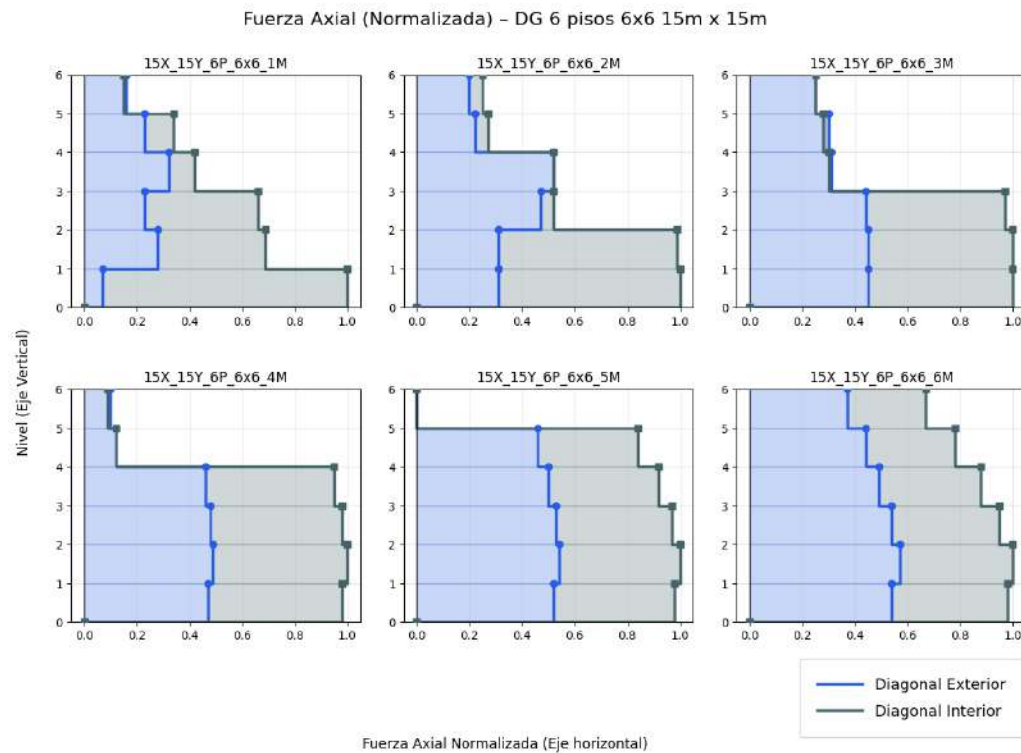
modelo 1M la diagonal exterior tiene un valor máximo en el nivel 3 al 4 y la diagonal interior en su base, este patrón se repite en el caso 2M en donde los pisos de cada módulo tiene la misma distribución axial con un máximo en los niveles 2 al 4 en la diagonal exterior y en su base para las diagonales interiores. Para los modelos 4M, 5M y 6M se mantiene el decrecimiento axial suavizado.



**Figura 29** Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X\_15Y\_6P\_4X4.

La [Figura 30](#) presenta la configuración de 15m x 15m con un grid más saturado de 4 a 6. Este cambio redistribuyó los esfuerzos y disminuyó la carga axial en la diagonal exterior, sin embargo, la diagonal interior se mantuvo igual.

La distribución axial entre el modelo de 5 y 6 pisos de 15m x 15m con 6 grids fue similar, se observa que independientemente de la geometría en planta o en la variación de 1 nivel, es posible observar la distribución de cargas en la rejilla perimetral.

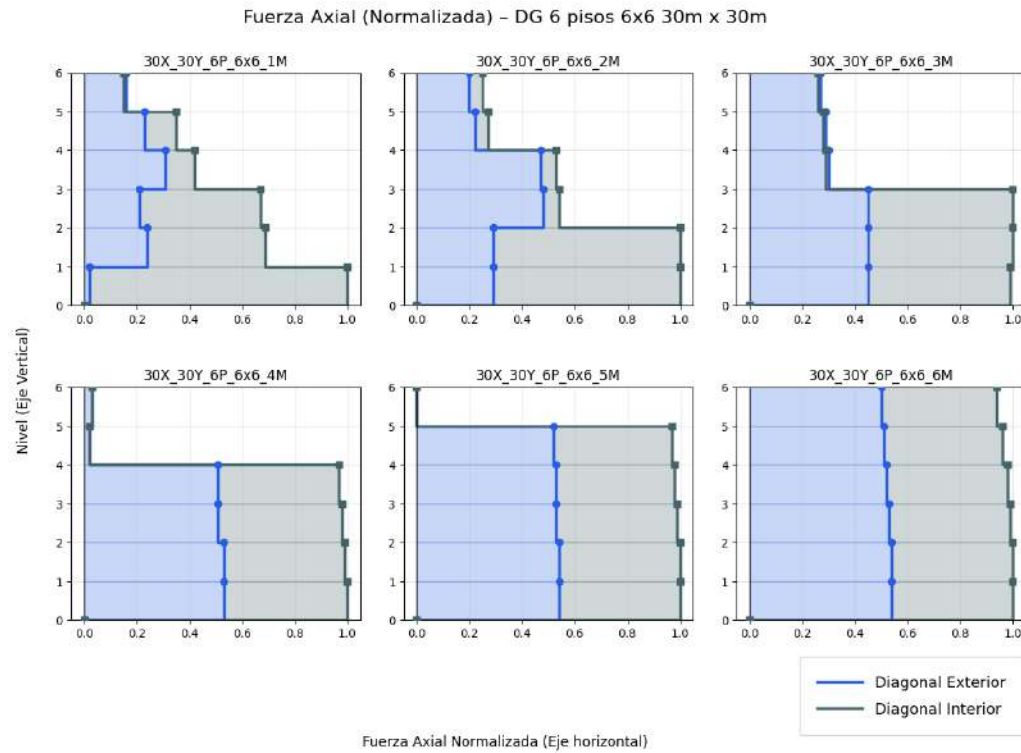


**Figura 30 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X\_15Y\_6P\_6X6.**

La [Figura 31](#) y [Figura 32](#) se muestran la configuración de los casos de estudio de 30m x 30m, de 6 y 8 grids respectivamente. El caso 30X\_30Y\_6P\_6X6\_1M y el caso 30X\_30Y\_6P\_8X8\_1M tienen la misma distribución en la diagonal interior, sin embargo, la diagonal exterior tiene una menor concentración en el modelo con 6 grids. En estos modelos el retraso de cortante es crítico en el primer nivel, absorbiendo alrededor del 90% de las cargas solo con la diagonal interior.

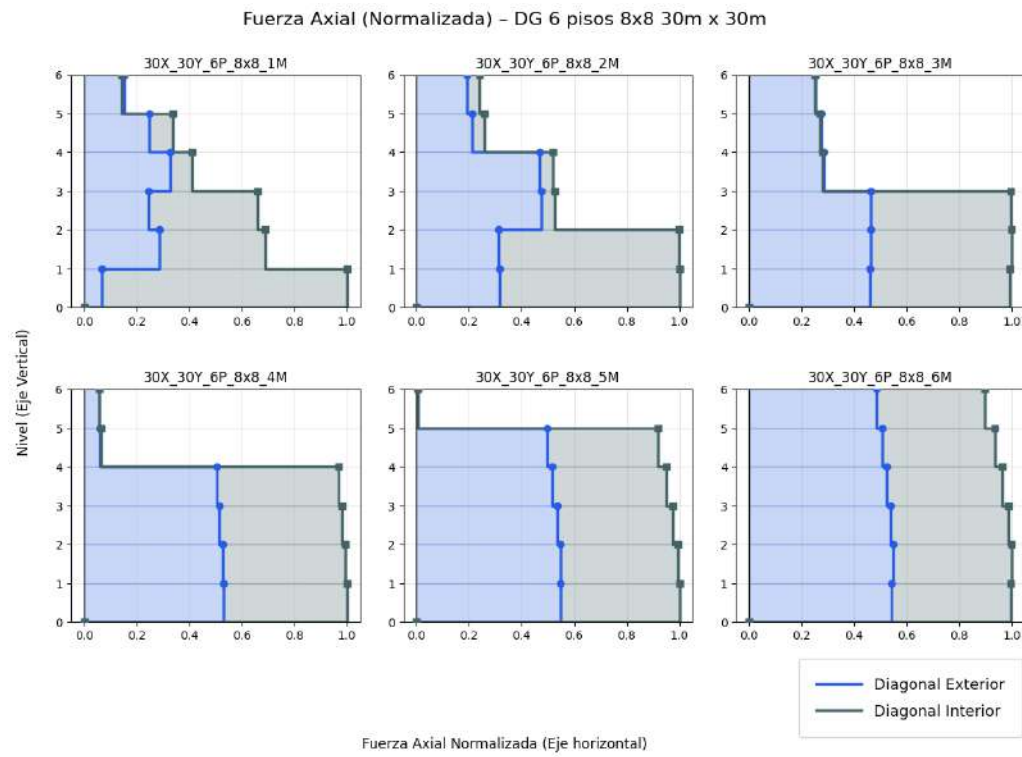
El modelo 2M de 6 grids y de 8 grids tanto de 5 como 6 pisos presentan la misma distribución, observando un valor alto de retraso de cortante en su primer módulo, es decir del nivel 0 al 2, y a partir de ahí el retraso de cortante se disipa a valores más bajos en los módulos superiores.

El modelo 3M, 4M, y 5M mantienen esta distribución de carga axial, teniendo un retraso de cortante grande en el primer módulo, y en el resto de niveles un valor menor cercano al 0.



**Figura 31 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X\_30Y\_6P\_6X6.**

El modelo 6M tanto de 6 grids mostrado en la [Figura 31](#) como el de 8 grids mostrado en la [Figura 32](#) no tienen el cambio brusco en la redistribución de carga axial, esto debido a que es un solo módulo y no hay un cambio de rigidez importante.



**Figura 32 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X\_30Y\_6P\_8X8.**

### 7.2.1.3 7 niveles

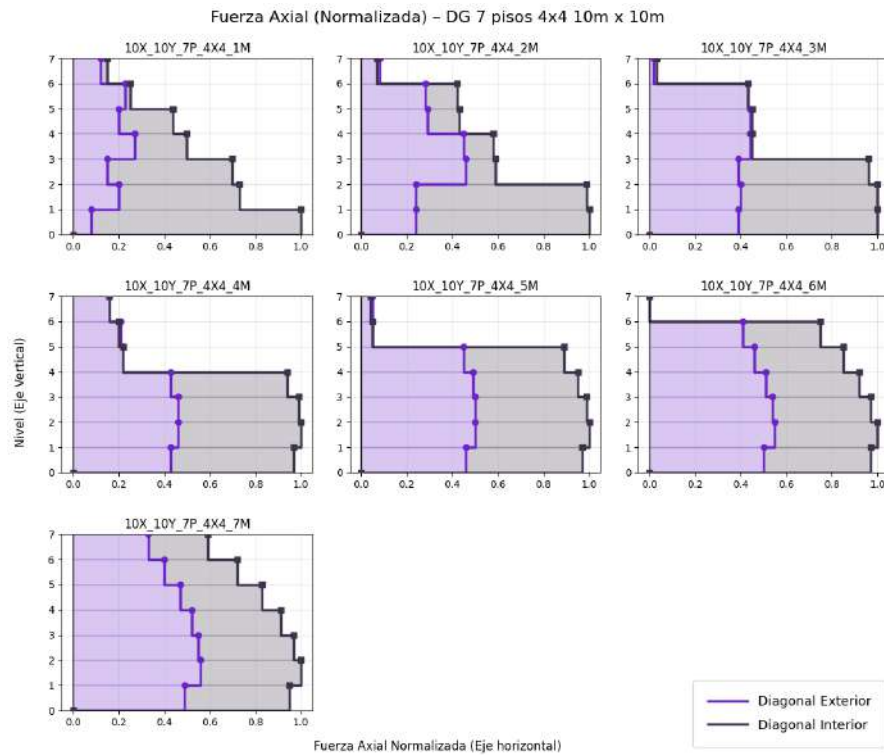
A continuación, se presentan los modelos de 7 pisos de altura, todos los modelos siguen el mismo análisis del capítulo [7.2.1](#) y [7.2.1.2](#).

En la [Figura 33](#) se presenta el caso de estudio de un DG con dimensiones 10m x 10m con un grid de 4 de 7 pisos.

El modelo 10X\_10Y\_7P\_4x4\_1M muestra una distribución de carga axial en la diagonal exterior que oscila entre 0.1 y 0.3, variando en cada cambio de módulo, es decir en cada nivel, mientras que la diagonal interior tiene una distribución decreciente teniendo un valor máximo en su base y mínimo en el nivel 7.

Al aumentar el módulo de 1 a 2, el caso 10X\_10Y\_7P\_4x4\_2M muestra un cambio de esfuerzo axial cuando hay un cambio de módulo, presentando un aumento en la carga axial del piso 2 al piso 4 en la diagonal exterior mientras en los siguientes niveles decrece de forma escalonada, la diagonal interior mantiene su comportamiento decreciente del nivel 1 al 7.

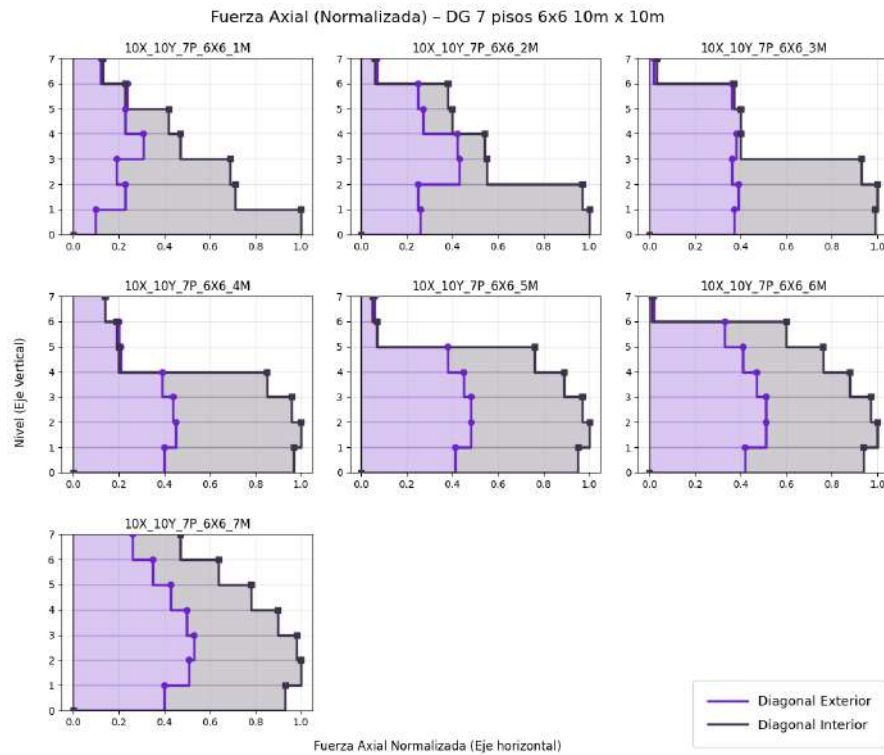
Los modelos 3M, 4M, 5M, y 6M muestran una distribución similar, teniendo un valor de retraso de cortante de aproximadamente 0.6 en su primer módulo y posteriormente bajando hasta casi 0 el valor en el resto de sus módulos. El caso 7M muestra un valor de aproximadamente 0.4 de retraso de cortante, manteniéndose constante a lo largo de los niveles, aunque estos van decreciendo en su distribución axial.



**Figura 33 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X\_10Y\_7P\_4X4.**

Al incrementar de 4 grids a 6 ni la distribución axial ni los valores de retraso de cortante presentaron un cambio significativo, como se aprecia en la Figura 34.

Al contrastar la [Figura 33](#) y [Figura 34](#) con la [Figura 27](#) y [Figura 28](#) se observa que el comportamiento de los DG cuando el número de módulos no es divisible entre el número de pisos exactamente presenta un cambio abrupto en los niveles sin módulo completo, para 6 pisos no hay pisos con valor de 0.2 o menos hasta el caso 3M, sin embargo para 7 pisos, todos los casos tienen problemas en el último nivel con muy poca participación en la distribución de cargas, esto debido a que no se pueden tener módulos completos más que el caso 1M que es la solución con módulos sencillos.

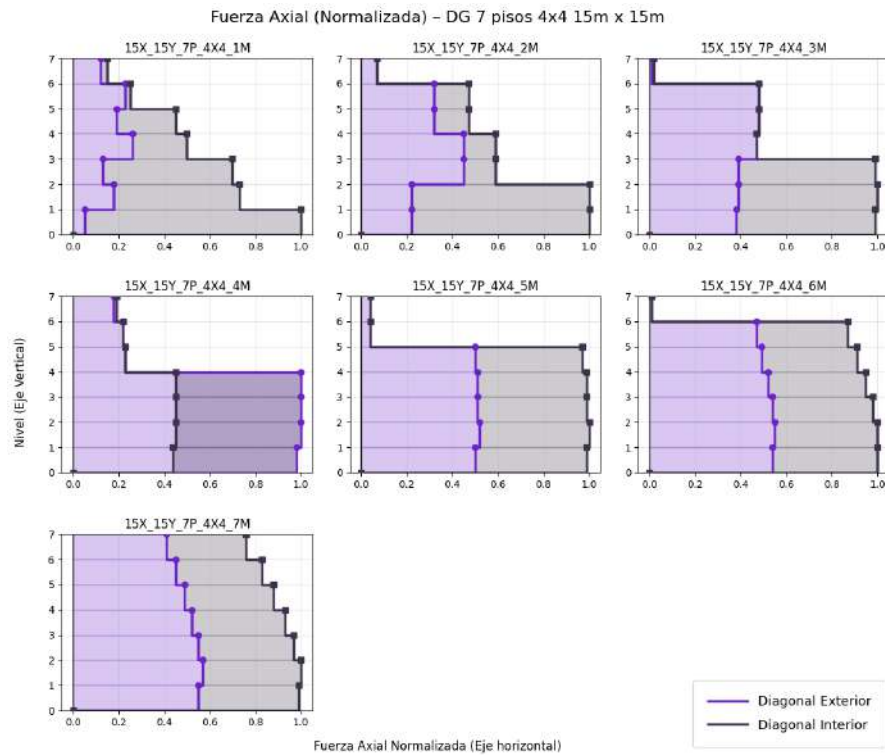


**Figura 34 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 10X\_10Y\_7P\_6X6.**

Para los casos de 5 pisos ocurre lo mismo que para 7 pisos, en la Figura 21 y Figura 22 se observa el cambio de rigidez en todos los casos del 1M al 5M, esto debido a que el número impar de pisos impide tener módulos completos, con excepción del primero y el último, en estos casos el retraso de cortante es importante.

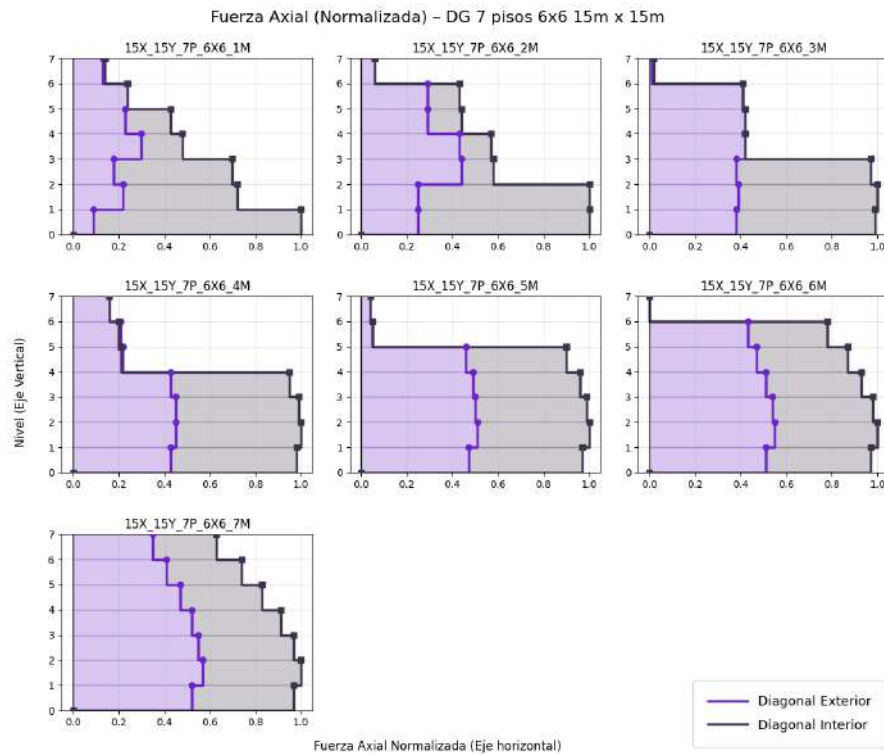
La configuración de 15m x 15m es mostrada en la [Figura 35](#) y [Figura 36](#), en donde los modelos tienen 4 y 6 grids respectivamente. Todos los modelos de 1M a 6M con ambos arreglos de grid, presentan un cambio repentino en su distribución axial en el último nivel, aunque en menor proporción los casos 1M y 4M.

Las diagonales exteriores presentan su mayor axial en los niveles centrales, mientras que la diagonal exterior siempre tiene una concentración máxima en el primer módulo de cada caso, y esta decrece con el paso de los niveles.



**Figura 35 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X\_15Y\_7P\_4X4.**

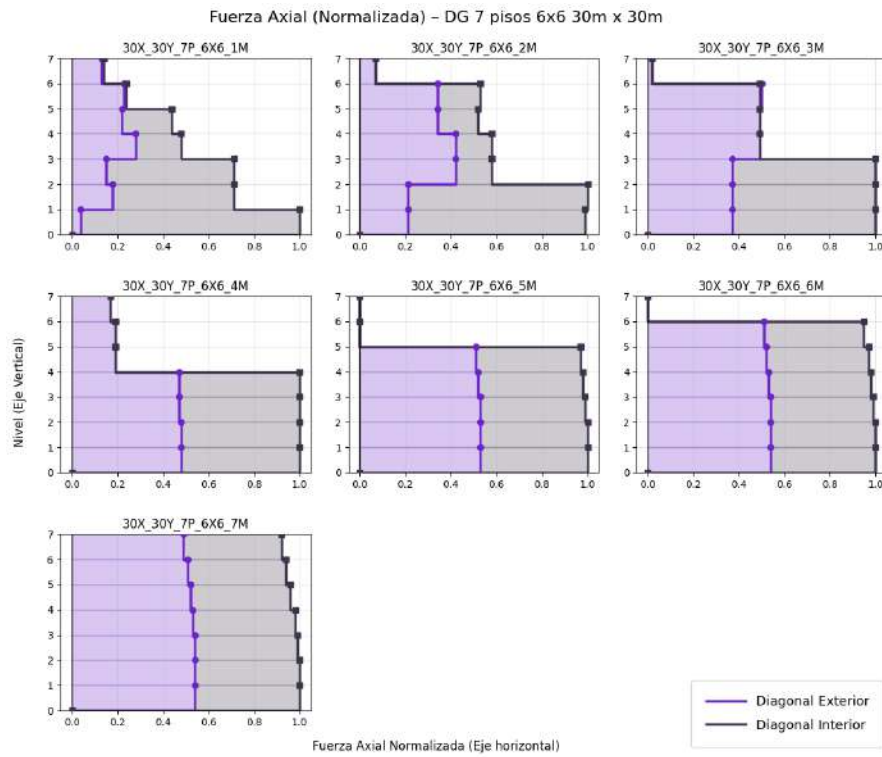
Se observa que la distribución de esfuerzos entre los DG de 15m x 15m de 5, 6 y 7 niveles respetan el mismo patrón el cual indica que para la diagonal interior se tendrá un valor máximo en el primer módulo y decrecerá en los módulos subsecuentes, y la diagonal exterior presenta en los primeros casos un incremento del primer al segundo módulo, y a partir del modelo 4M solo hay un cambio abrupto en la distribución axial y la parte superior contribuye poco en las cargas de la estructura.



**Figura 36 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 15X\_15Y\_7P\_6X6.**

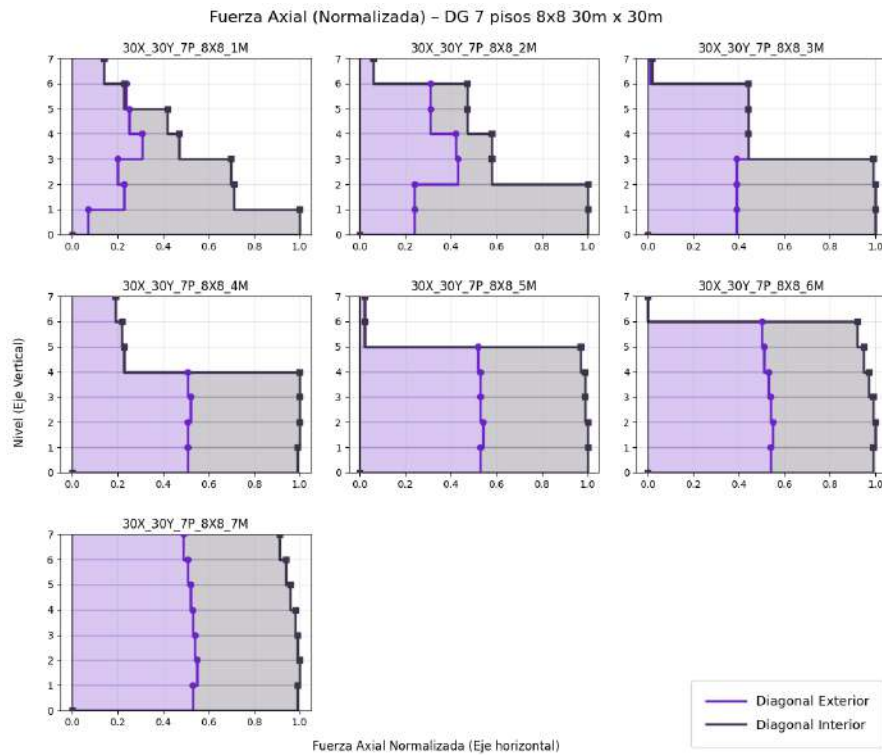
El cambio de grid de 4 a 6 no representa un impacto importante en la distribución axial, aun cuando se tienen más elementos que forman parte del sistema ante cargas laterales, la relación de esfuerzos entre diagonales exteriores e interiores para los casos 15m x 15m, se mantiene.

En la [Figura 37](#) y [Figura 38](#) se muestra el análisis hecho para los casos de 30m x 30m mostrando de igual forma una distribución similar, manteniendo el mismo patrón observado en los casos de 5 y 6 pisos.



**Figura 37 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X\_30Y\_7P\_6X6.**

El retraso de cortante se mantiene como factor importante en los casos de 30m x 30m, observando los mayores valores en el primer módulo de todos los casos, reduciéndose conforme se avanza en el análisis de los niveles subsecuentes.



**Figura 38 Comparación de la fuerza axial normalizada en DG 30X\_30Y\_7P\_8X8.**

Al contrastar todos los casos de estudio, se observa que se sigue el mismo patrón para cada tipo de módulo, todos los casos de 1 módulo tienen un incremento de la carga axial en los niveles pares y un descenso en los niveles nones, esto se observa exclusivamente en la diagonal exterior en mayor o menor medida.

El incremento en la carga axial de la diagonal exterior también se observa en todos los casos con 2 módulos, independientemente de su geometría en planta o cantidad de niveles, este incremento ocurre en el cambio del primer al segundo módulo, y para el 3er módulo decrece y no vuelve a aumentar.

En los DG de 3 módulos de 5 y 6 pisos no se observa el incremento de la carga axial en el segundo módulo, pero en los casos de 7 pisos sí se observa este incremento, esto obedece a la cantidad de módulos que tienen la estructuras, que entre más niveles se tengan más se repite el patrón observado en los casos de módulos pequeños.

A partir de 4 módulos, debido a que solo se tienen casos de 5 a 7 niveles, el cambio de rigidez es abrupto y provoca que la distribución de esfuerzos no sea progresiva sino se concentre en la parte baja de los DG, esto debe considerarse ya que, al tener una sola sección transversal, esta se regirá por los esfuerzos que tiene la estructura en su base, desperdiciando acero en los niveles superiores.

La diagonal interior siempre tiene la mayor concentración de carga de todo el sistema en su primer nivel y este va decreciendo de forma progresiva. Este comportamiento de la diagonal interior se repite en todos los casos, no solo los de 1 módulos.

El retraso de cortante es un factor que debe tomarse en cuenta, debido a que no hubo algún caso de estudio que no tuviera este problema, si bien cuando se tienen cambios de rigidez abruptos, el retraso de cortante es casi 0 en los niveles superiores, la razón de esto es que estas secciones están contribuyendo con menos del 30% de toda la carga que recibe la estructura.

## 7.2.2 Comparación entre desplazamientos máximos normalizados y modo fundamental de vibración.

A continuación, se presenta un análisis del desplazamiento que tuvieron los casos de estudio en el análisis modal espectral, los cuales están normalizados con respecto al desplazamiento máximo que ocurrió tomando el valor de 1, y estos se compararán con el modo fundamental de vibración, también normalizado de 0 a 1.

### 7.2.2.1 5 niveles

En la [Figura 39](#) se muestran los casos de estudio de 5 pisos con un grid de 4 y una dimensión en planta de 10m x 10m, en donde se aprecia que casi todos los modelos obedecen a un desplazamiento máximo según el periodo fundamental de vibración, sin embargo, este comportamiento no ocurre en el caso 3M, en donde tenemos variaciones de 5.9% y 4.6% en los niveles 1 y 2 respectivamente.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 5 pisos 4x4 10x10

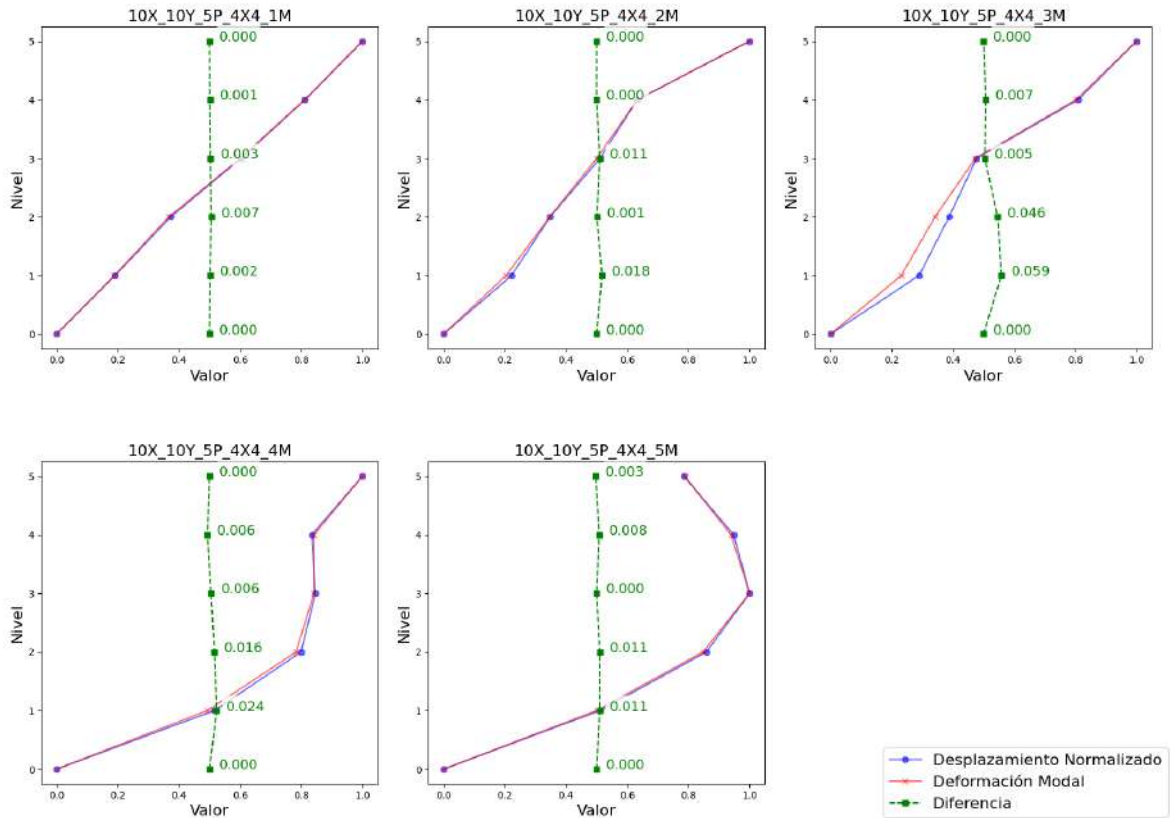
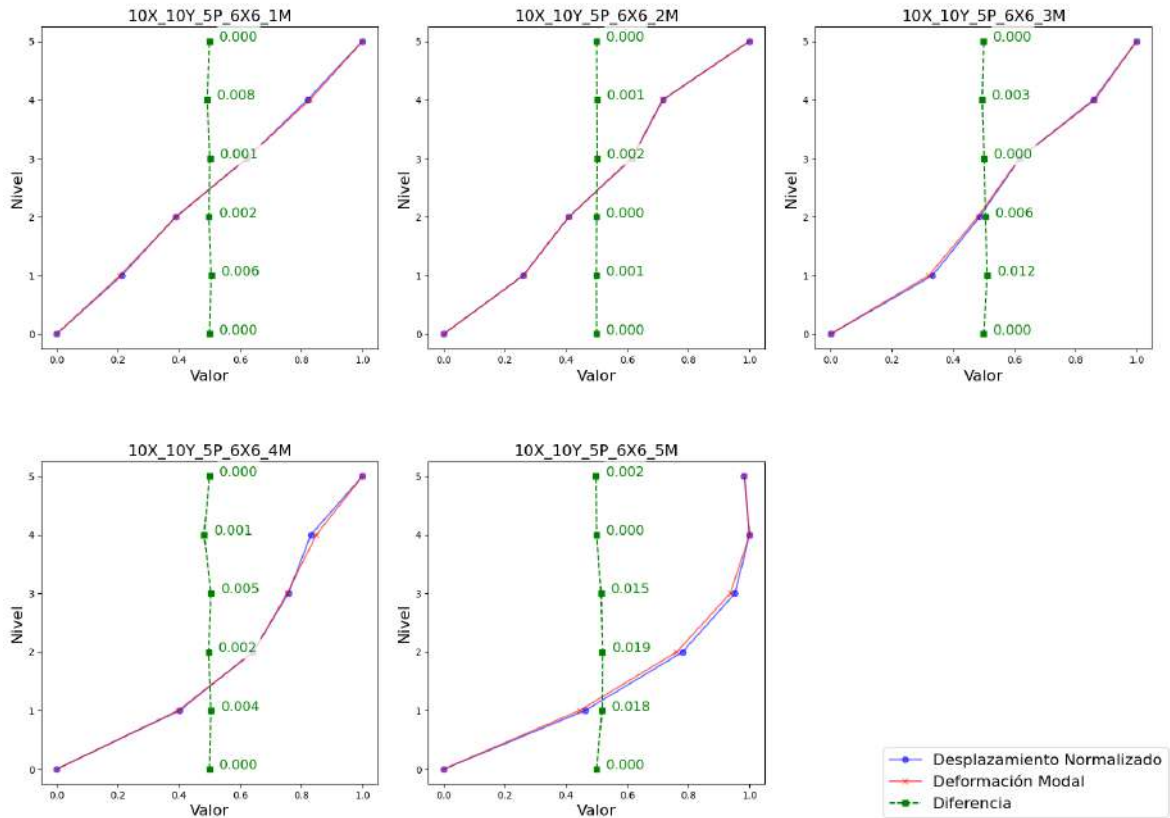


Figura 39 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X\_10Y\_5P\_4X4

En la [Figura 40](#) se describen casos similares que los mostrados en la [Figura 39](#), con el único cambio de tener una saturación mayor de diagonales, cambiando de 4 a 6 grids. En la [Figura 40](#) se observa que este aumento de grids provoca un aumento en la similitud de desplazamientos pasando de un valor máximo de 5.9% en la [Figura 39](#) a 1.9% en la [Figura 40](#).

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 5 pisos 6x6 10x10



**Figura 40 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X\_10Y\_5P\_6X6**

Para la [Figura 41](#) la dimensión en planta aumenta de 10m x 10m a 15m x 15m considerando un grid de 4, este cambio provoca variaciones en los desplazamientos en los casos donde tenemos módulos incompletos como lo son 15X\_15Y\_5P\_4X4\_2M, 15X\_15Y\_5P\_4X4\_3M y 15X\_15Y\_5P\_4X4\_4M, mientras que los casos 1M y 5M mantienen su desplazamiento con la misma distribución de los periodos fundamentales de vibración de cada caso. La variación máxima de la [Figura 41](#) es de 9.2%.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 5 pisos 4x4 15x15

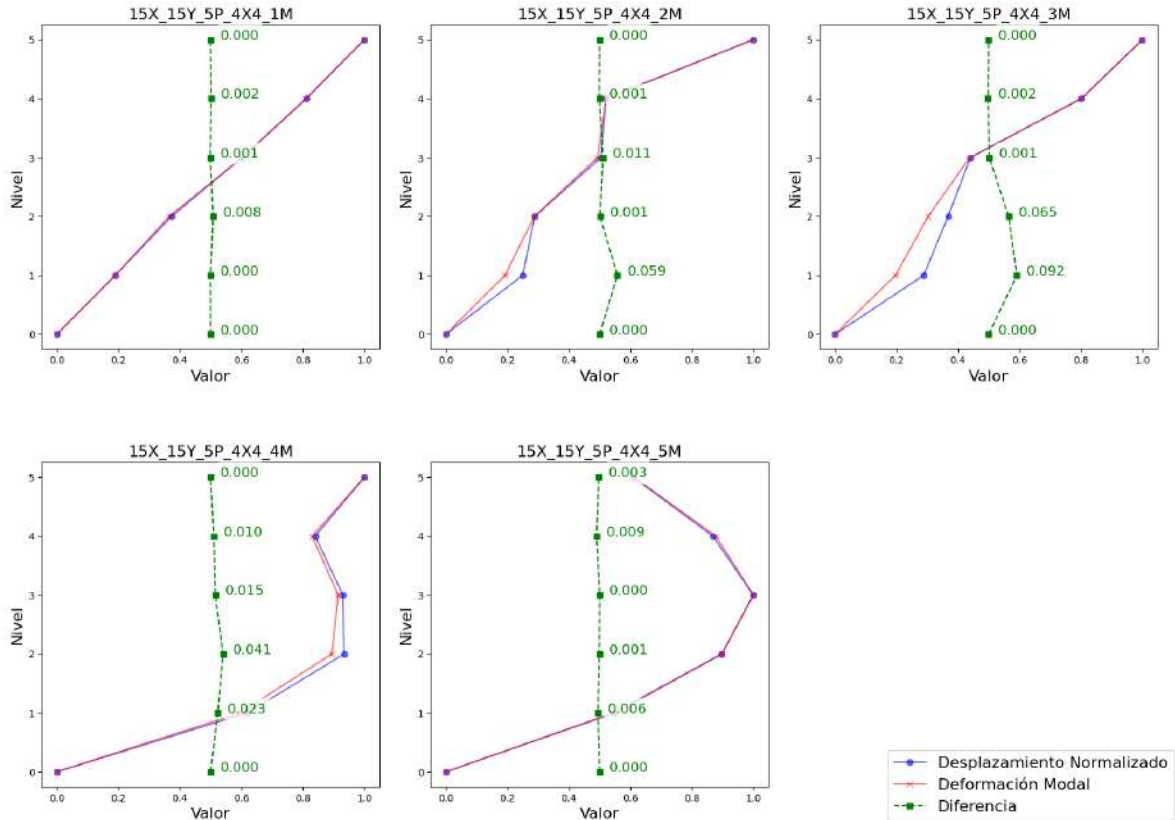


Figura 41 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X\_15Y\_5P\_4X4

La [Figura 42](#) muestra los casos en donde se aumenta la cantidad de grids de 4 a 6 para la tipología de 15m x 15m en planta. Se observa un comportamiento con variaciones de hasta 2.2% contra los 9.2% reportados en la [Figura 41](#), ocurriendo lo mismo que en la [Figura 39](#) y [Figura 40](#) en donde el aumento de la saturación de grids de 4 a 6 ajusta el desplazamiento al modo fundamental de vibración.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 5 pisos 6x6 15x15

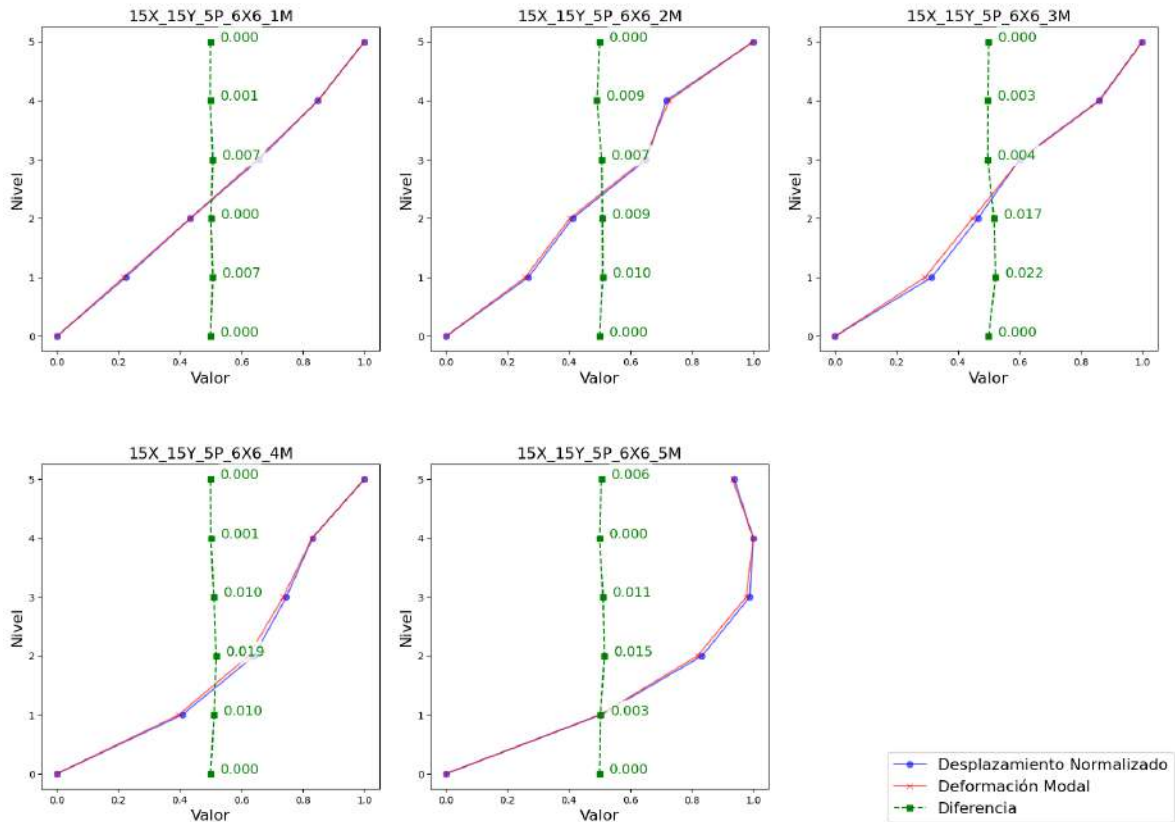


Figura 42 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X\_15Y\_5P\_6X6

La [Figura 43](#) muestra los casos de estudio de 6 grids para una dimensión en planta de 30m x 30m, mientras que la [Figura 44](#) muestra los casos de estudio de 8 grids para una dimensión en planta de 30m x 30m. Estos casos de estudio presentan variaciones superiores a las mostradas anteriormente con valores máximos de 41.9% y 81.4% para 6 y 8 grids respectivamente.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 5 pisos 6x6 30x30

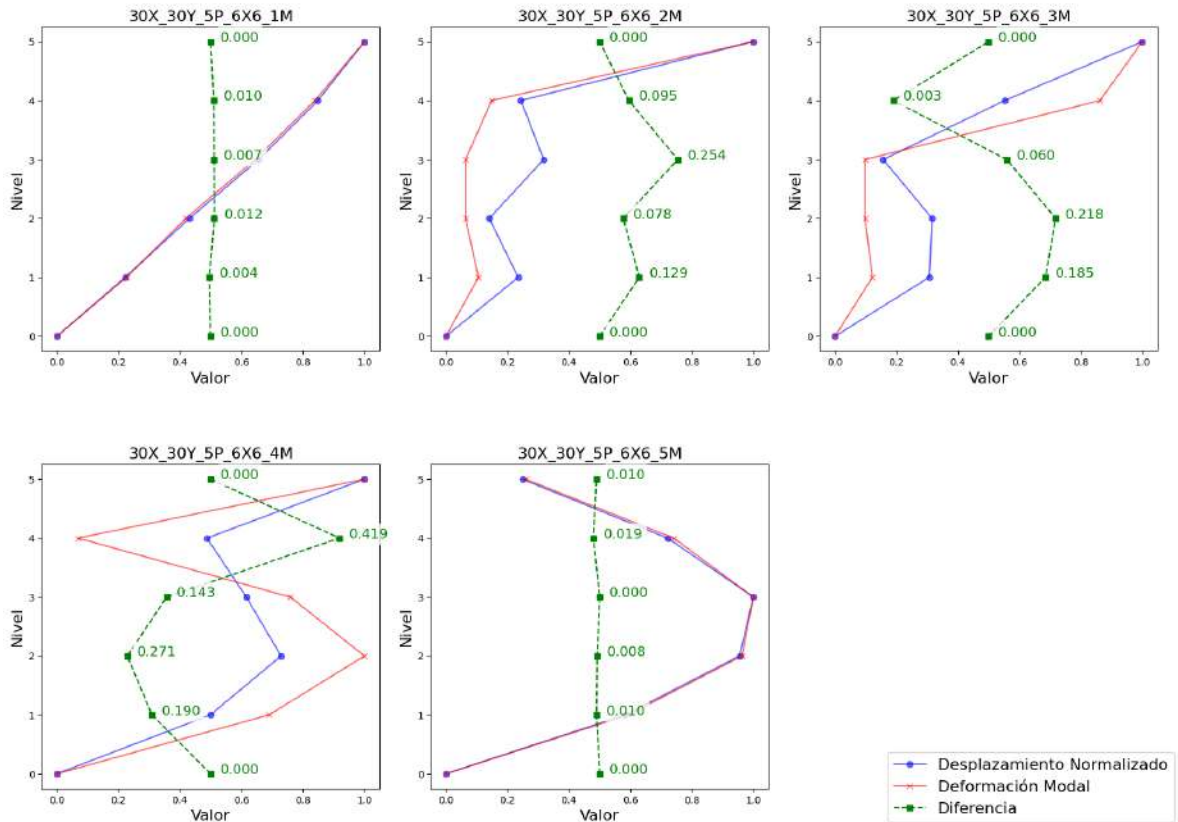


Figura 43 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X\_30Y\_5P\_6X6

En las configuraciones de 30m no se tuvieron los efectos que tuvieron los demás casos de estudio al aumentar la saturación de grids, esto pasa debido a la relación altura total entre ancho que es menor a la unidad. Se observa que para 5 pisos entre menor sea la relación altura total entre ancho más variaciones se encuentran entre los desplazamientos máximos y el periodo fundamental de vibración.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 5 pisos 8x8 30x30

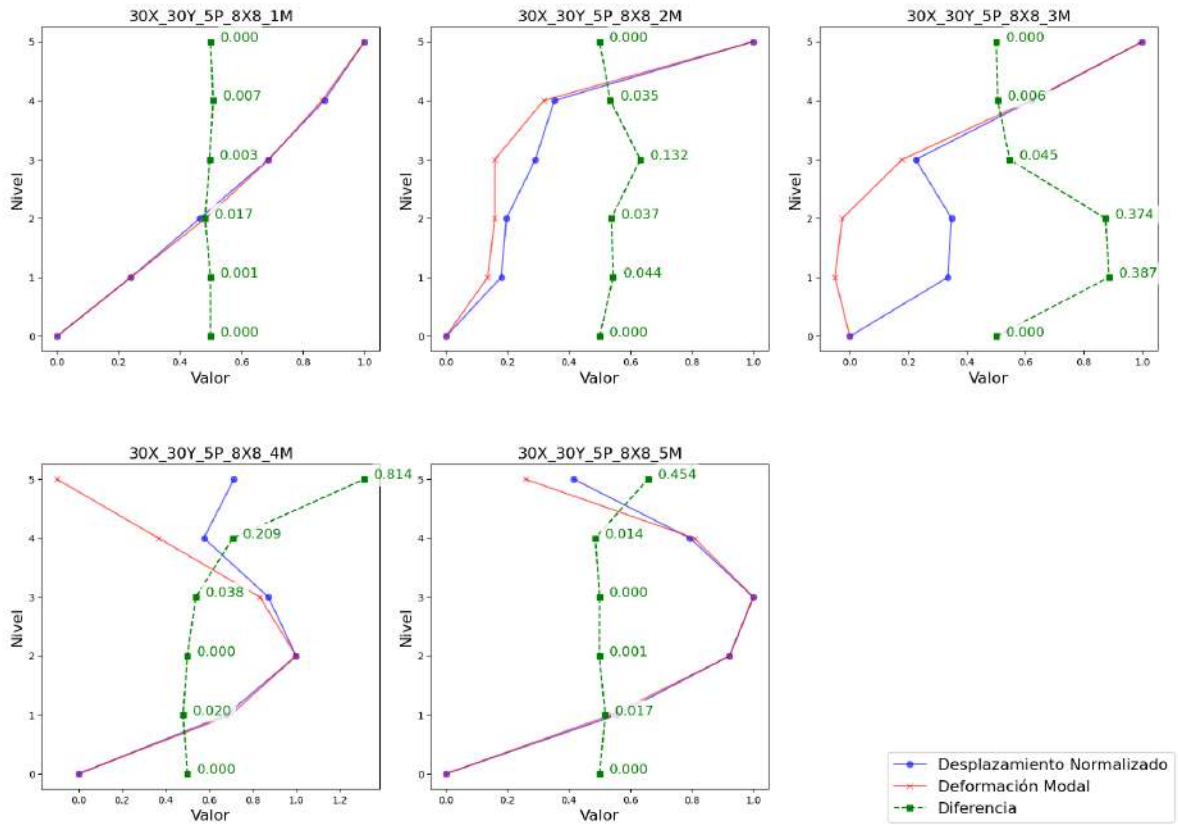
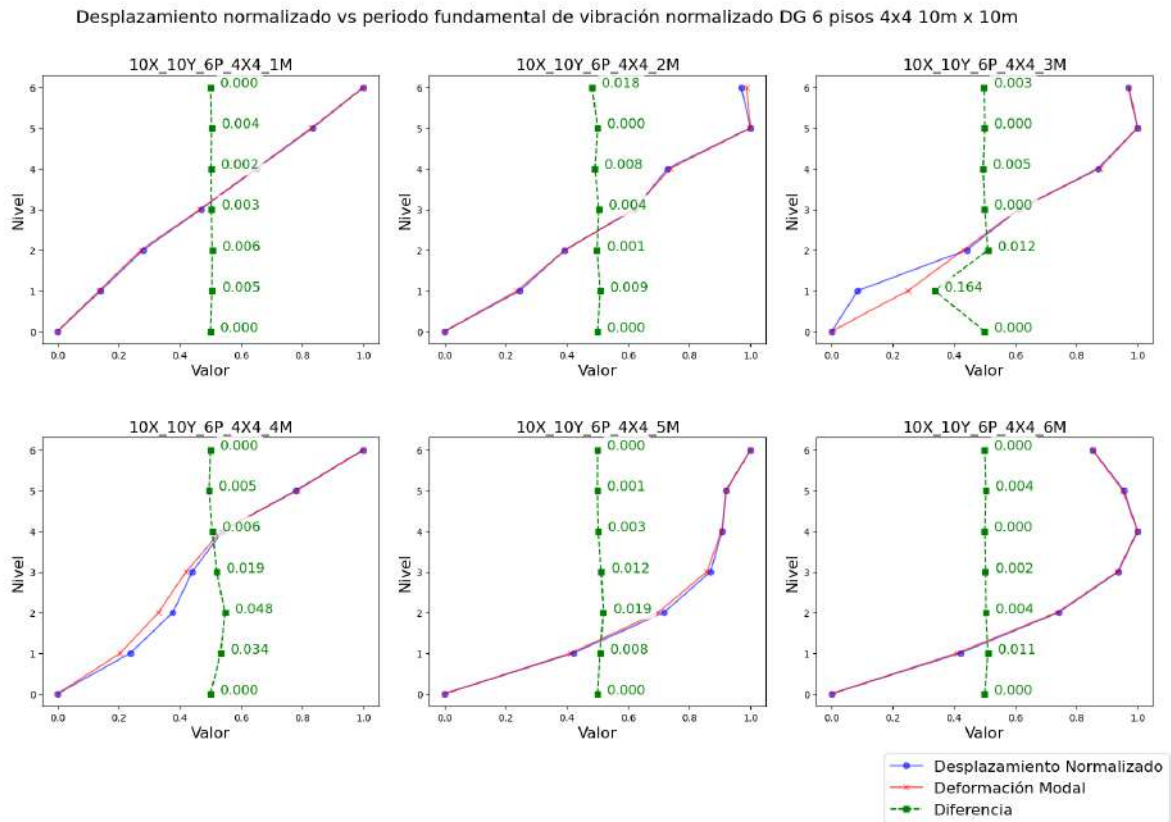


Figura 44 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X\_30Y\_5P\_8X8

### 7.2.2.2 6 niveles

A continuación, se presenta el análisis del desplazamiento que tuvieron los casos de estudio de 6 niveles realizando el mismo procedimiento que se describió en el capítulo [7.2.1.17.2.2.1](#).

La [Figura 45](#) presenta los casos de estudio de 6 pisos con un grid de 4 y una dimensión en planta de 10m x 10m, en donde se aprecia que 4 de los 6 casos obedecen a un desplazamiento máximo en cada nivel según la forma del periodo fundamental de vibración.

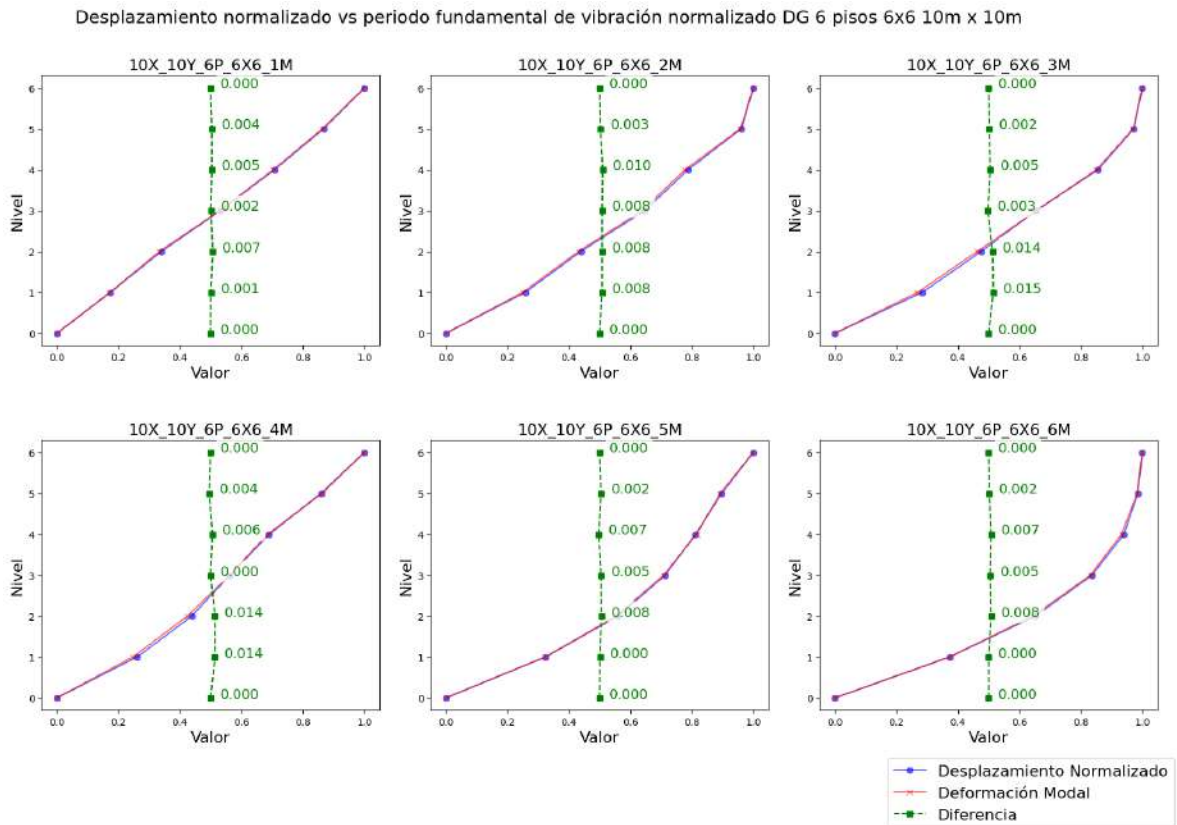


**Figura 45 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X\_10Y\_6P\_4X4**

Los casos 10X\_10Y\_6P\_4X4\_3M y 10X\_10Y\_6P\_4X4\_4M presentan ligeras variaciones del orden de 16.4% y 4.8% respectivamente, lo cual es un poco mayor

que las diferencias mostradas en los casos de 5 pisos con la misma topología en planta y cantidad de módulos ([Figura 39](#)).

Estas diferencias disminuyen significativamente cuando se aumenta la densidad de grids de 4 a 6 como lo muestra la [Figura 46](#), teniendo variaciones máximas de 1.5%.

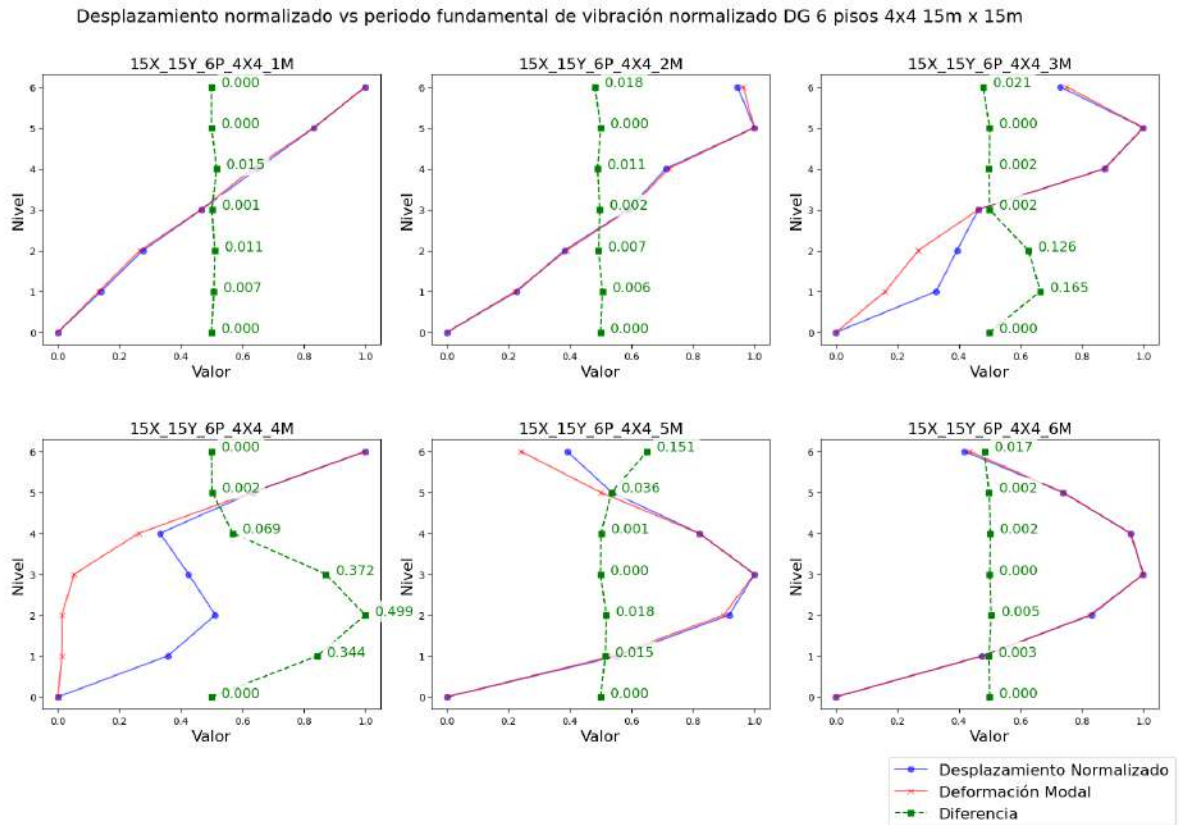


**Figura 46 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X\_10Y\_6P\_6X6**

En comparación con los casos de 5 pisos de 10m x 10m, si existen variaciones en la distribución de desplazamientos y la forma del modo fundamental, aunque las diferencias mayores si se presentan en los mismos casos 3M y 4M tanto para los casos de 4 grids como para los de 6 grids.

La [Figura 47](#) presenta los casos de 6 pisos con dimensiones en planta de 15m x 15m con una densidad de grids de 4, en donde se presentan diferencias mayores que los de dimensiones de 10m x 10m. Para los casos 15X\_15Y\_6P\_4X4\_3M,

15X\_15Y\_6P\_4X4\_4M, se observan cambios en la relación analizada para el primer módulo, teniendo variaciones de hasta 50%, mientras que en el caso 15X\_15Y\_6P\_4X4\_5M las variaciones se presentan en la parte superior en donde comienza el segundo módulo.



**Figura 47 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X\_15Y\_6P\_4X4**

La [Figura 48](#) muestra una configuración más densa que la mostrada en la [Figura 47](#) siendo ahora de 6 grids, sin embargo, el comportamiento que se observó en los DG de 10m x 10m no se repite en este caso, ahora se tienen variaciones mayores desde el caso 15X\_15Y\_6P\_6X6\_2M y mantienen esta tendencia variable hasta la configuración de 6M con valores máximos desde 4.1% hasta 24%.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 6 pisos 6X6 15m x 15m

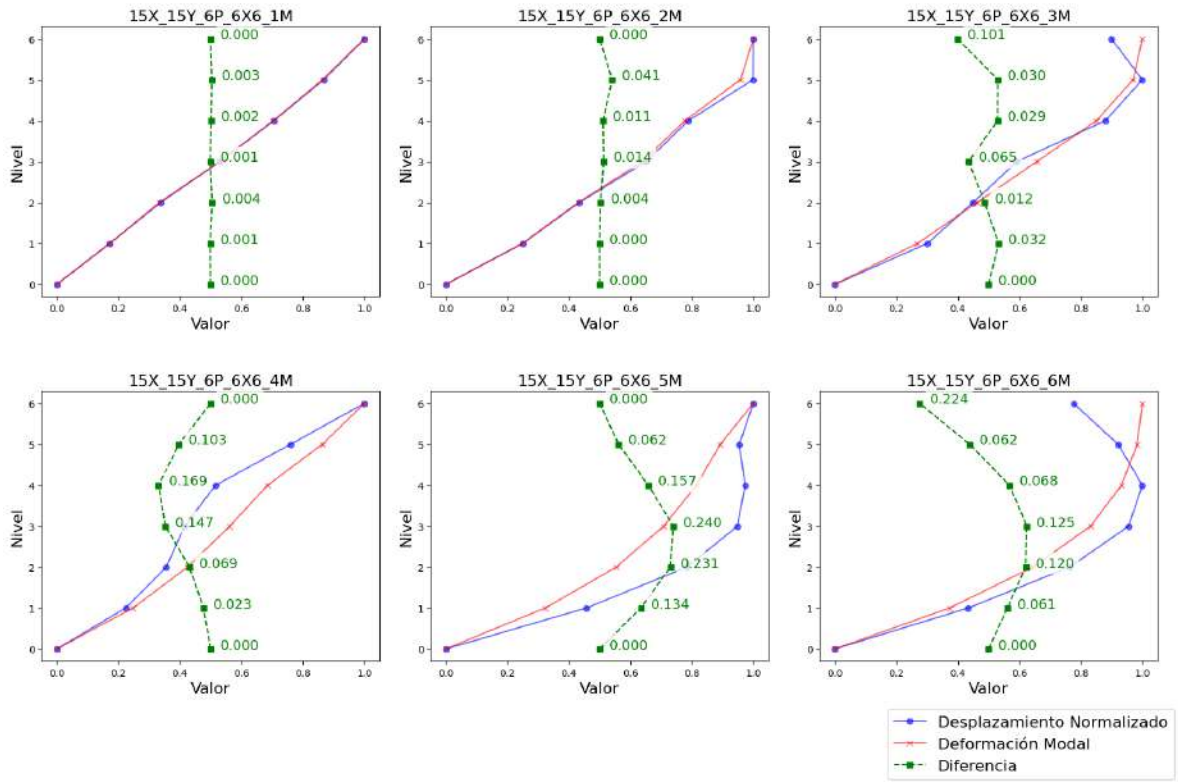
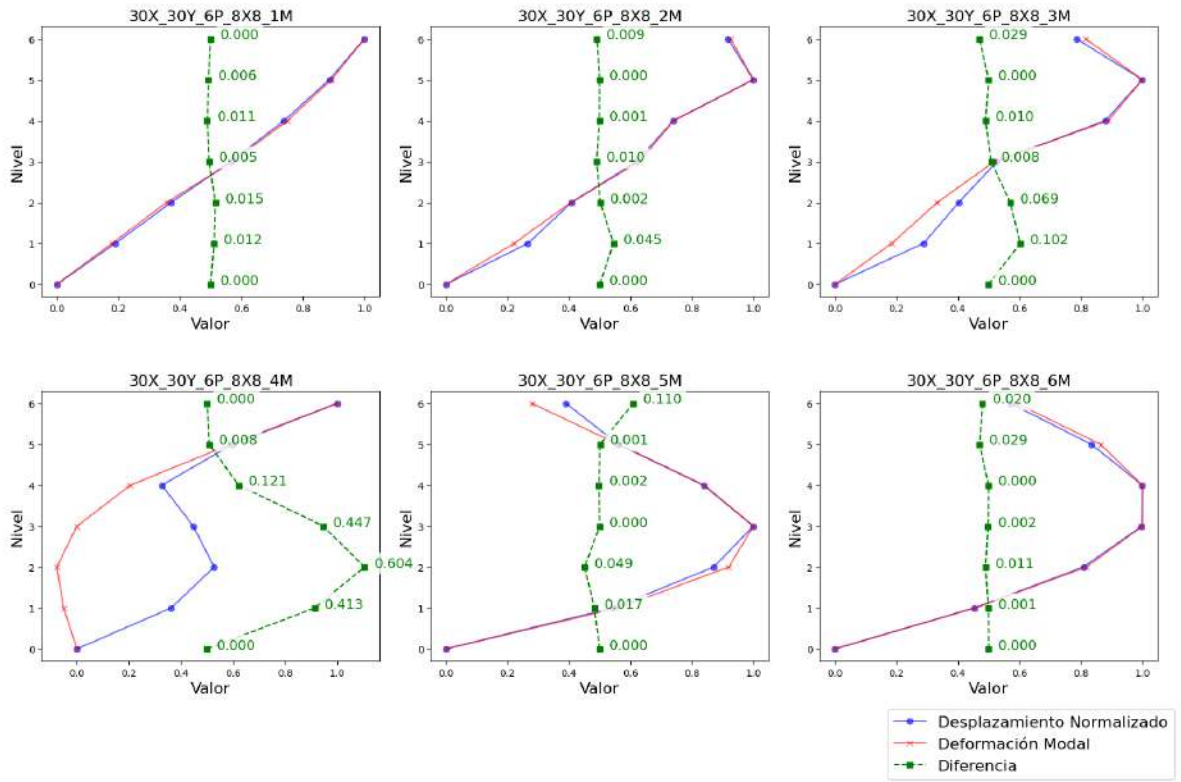


Figura 48 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X\_15Y\_6P\_6X6

La [Figura 49](#) y [Figura 50](#) presentan la configuración de 6 pisos con una dimensión en planta de 30m x 30m con grids de 6 y 8 respectivamente. Los modelos de la Figura 49 presentan un comportamiento diferente entre los desplazamientos máximos de la estructura y la forma modal de su periodo fundamental, estas diferencias están desde el caso 1M con valores máximos de 2.5%, el 2M con 4.8%, 3M con 36.5%, 4M con 81.3%, 5M con 54.6% y 6M con 1.5%.



Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 6 pisos 8x8 30m x 30m



**Figura 50 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X\_30Y\_6P\_8X8**

Se observa que, para 6 pisos, cuando se incrementa la densidad de grid, el comportamiento dinámico que afecta a los desplazamientos máximos de la estructura se acerca o busca ajustarse a la forma del modo fundamental de vibración.

### **7.2.2.3 7 niveles**

A continuación, se presenta el análisis del desplazamiento que tuvieron los casos de estudio de 7 niveles realizando el mismo procedimiento que se describió en el capítulo [7.2.2.1](#) y en el capítulo [7.2.2.2](#).

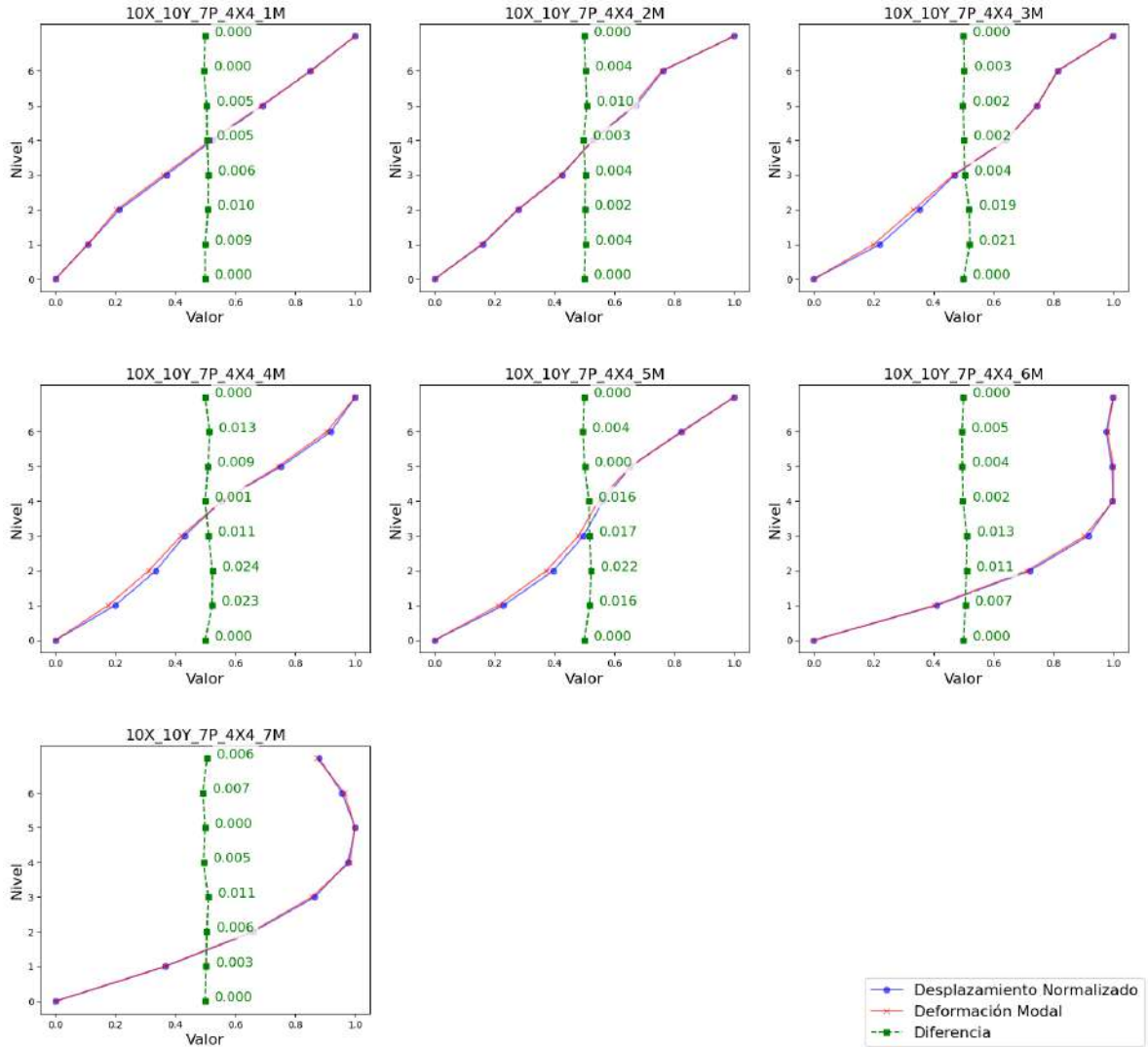
Los casos de estudio de 7 pisos representan las estructuraciones más altas, siendo DG de 28 metros.

La [Figura 51](#) muestra que todos los casos de estudio siguen el mismo comportamiento en los desplazamientos máximos según el modo fundamental de vibración para cada caso. El valor máximo de diferencia es de 2.4%.

Este valor de 2.4% que se presenta para el caso 10X\_10Y\_7P\_4X4\_4M es menor que la máxima variación de la Figura 39 que es de 5.9% para el caso 10X\_10Y\_5P\_4X4\_3M , y también menor que 16.4% correspondiente al caso 10X\_10Y\_6P\_4X4\_3M lo cual se aprecia en la [Figura 45](#).

A pesar de las diferencia que se aprecian, los cambios siguen la misma tendencia, solo siendo desplazados y no con direcciones opuestas como se presenta en los casos de 5 pisos y 6 pisos ([Figura 39, Figura 41, Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50](#)).

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 7 pisos 4x4 10m x 10m



**Figura 51 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X\_10Y\_7P\_4X4**

La [Figura 52](#) muestra los casos de estudio de 7 pisos con un grid de 6 y una dimensión en planta de 10m x 10m. La forma modal entre lo mostrado en la [Figura 48](#) con 4 grids, y lo mostrado en la [Figura 52](#) sigue la misma distribución, simplemente con una diferencia mayor con respecto de los desplazamientos máximos.

El valor de diferencia máximo es de 1.4% correspondiente al caso 10X\_10Y\_7P\_6X6\_4M, el resto de los casos tienen diferencias menores.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 7 pisos 6x6 10m x 10m

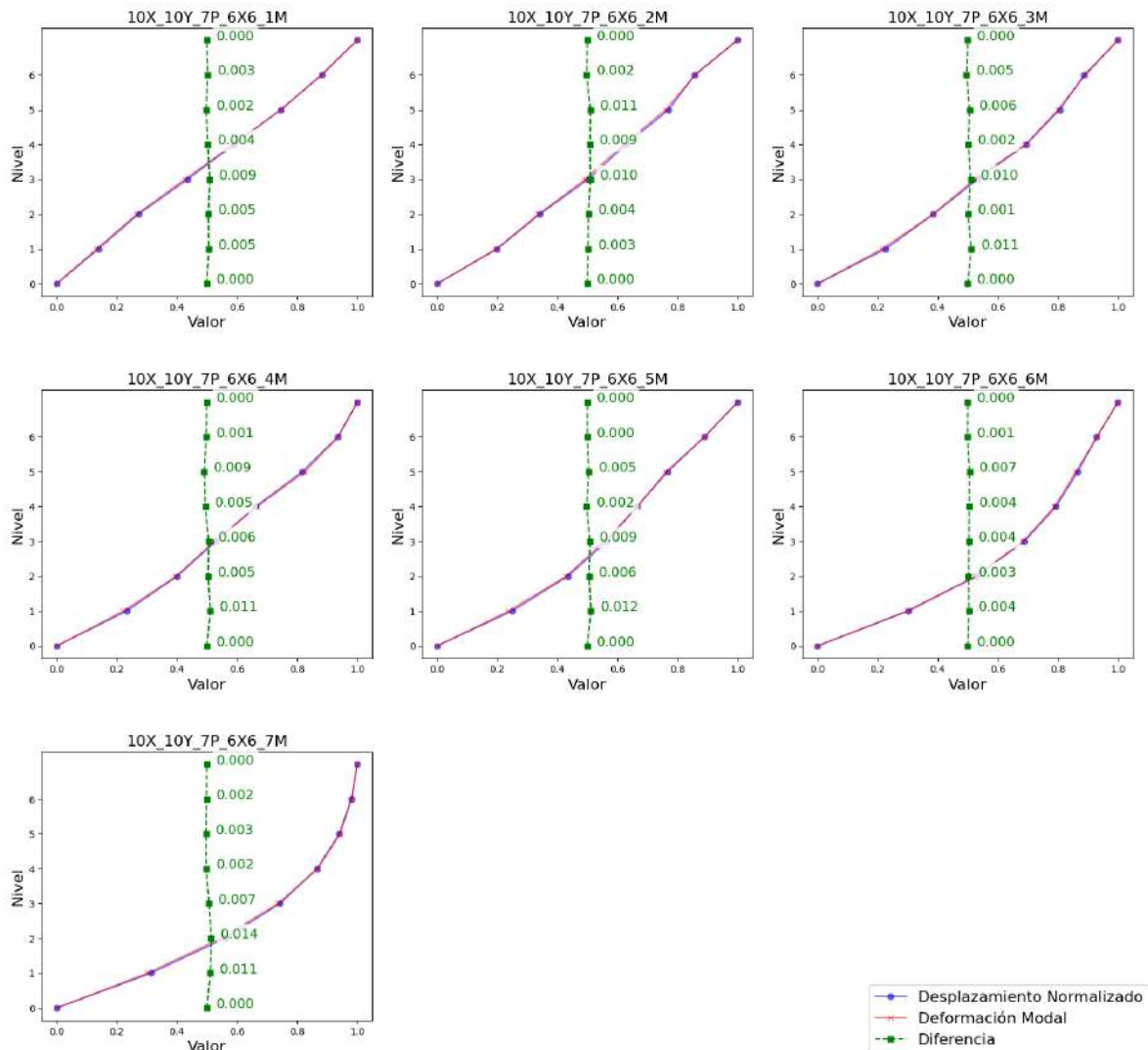


Figura 52 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 10X\_10Y\_7P\_6X6

La [Figura 53](#) muestra los casos de estudio de 7 pisos con un grid de 4 y una dimensión en planta de 15m x 15m, en donde se aprecian cambios considerables para los casos de estudio 15X\_15Y\_7P\_4X4\_4M y 15X\_15Y\_7P\_4X4\_5M, esto justo a la mitad del primer módulo de cada caso, lo cual significa que para estas

configuraciones se tiene un desplazamiento influenciado por modos de vibrar superiores.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 7 pisos 4x4 15m x 15m

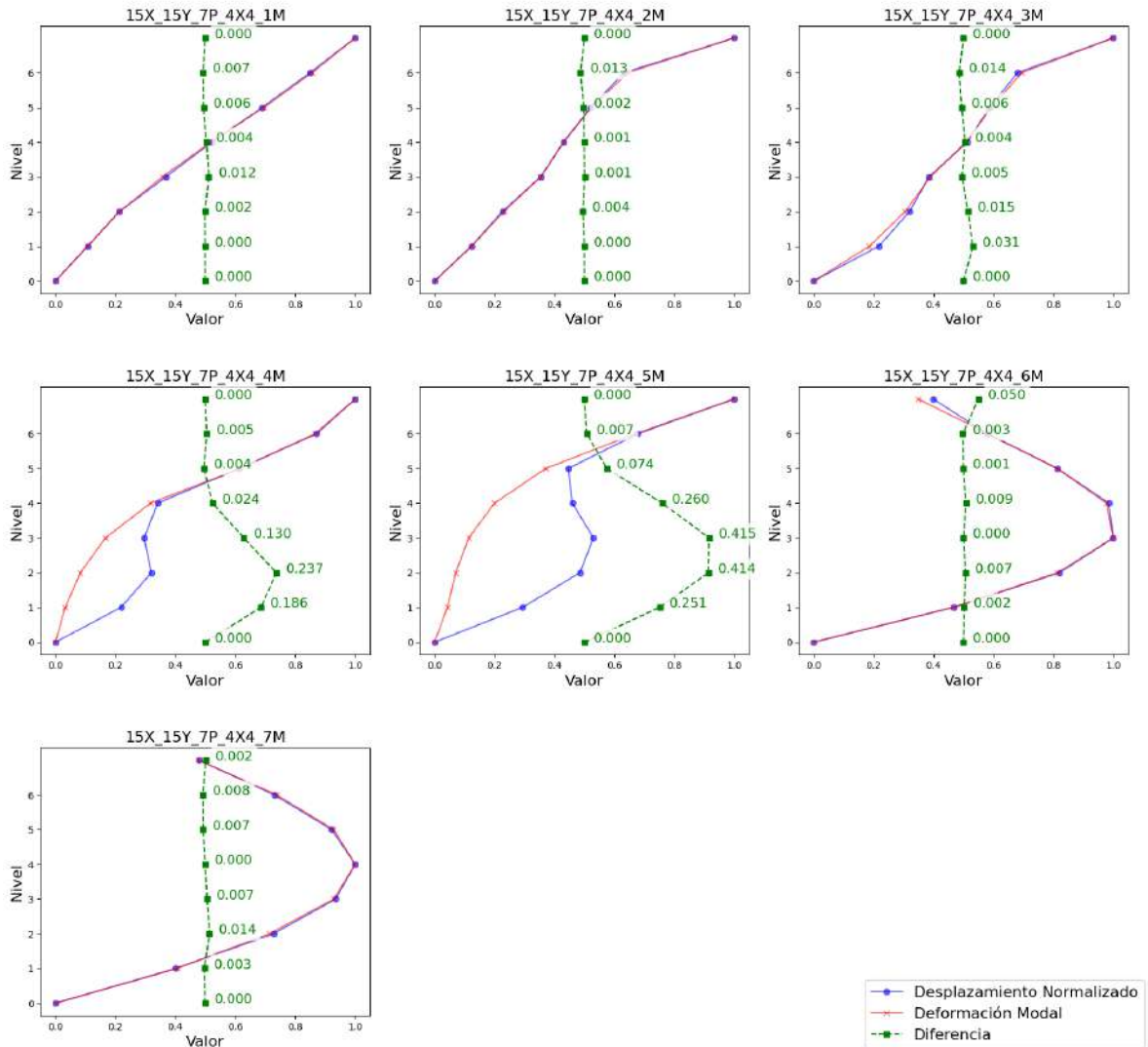


Figura 53 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X\_15Y\_7P\_4X4

La [Figura 54](#) muestra los casos de estudio de 7 pisos con un grid de 6 y una dimensión en planta de 15m x 15m. Se observa que la diferencia del modelo 5M de 6 grids con respecto de la configuración 5M de 4 grids, disminuye de forma considerable, pasando de un valor máximo de 41.5% a un 3.7%, sin embargo, para

la configuración de 4M la cual tiene un valor de 23.7% con 4 grids no se ve afectada para la configuración de 6 grids cuyo valor sigue siendo de 23.7%.

El resto de los casos entre la [Figura 53](#) y [Figura 54](#), tienen una diferencia baja por lo que se aprecia la misma tendencia entre el desplazamiento máximo de la estructura, con respecto al periodo fundamental de vibración.

Desplazamiento normalizado vs periodo fundamental de vibración normalizado DG 7 pisos 6x6 15m x 15m

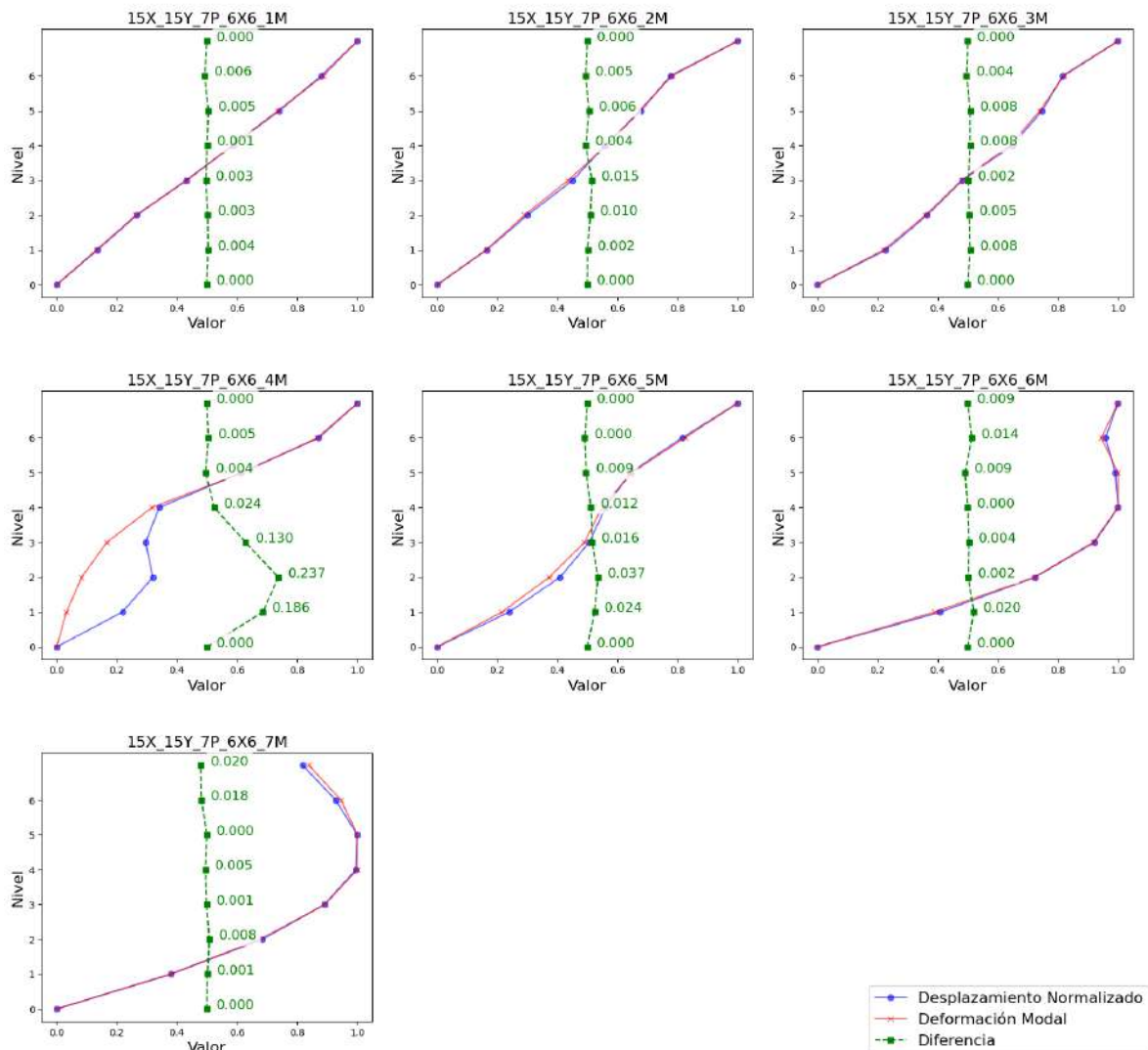
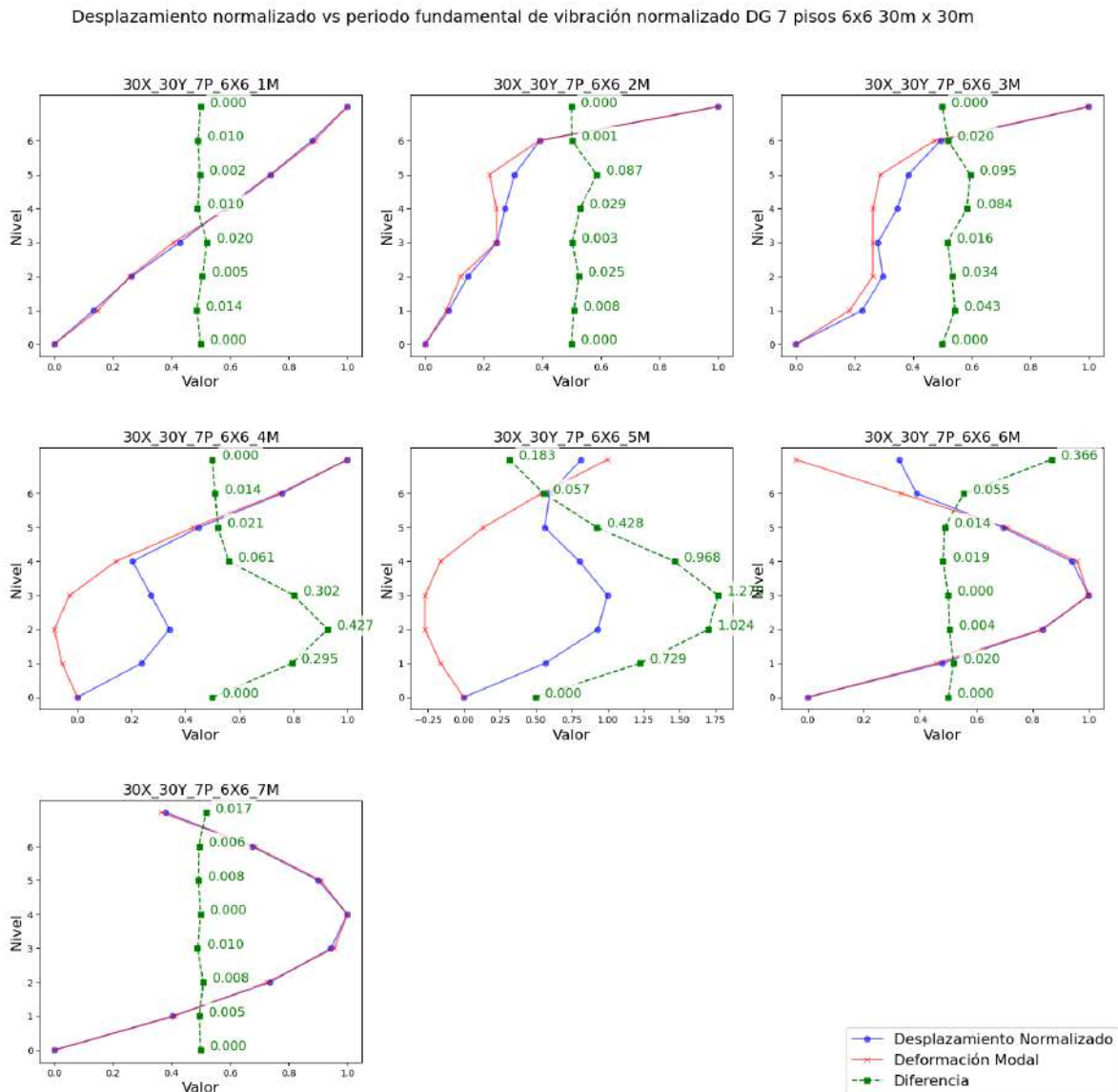


Figura 54 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 15X\_15Y\_7P\_6X6

La [Figura 55](#) muestra la configuración de 30m x 30m con 6 grids, en donde a partir del caso 2M hasta el 6M se mantienen diferencias mayores del orden de 8.7% hasta 127% dependiendo del caso.

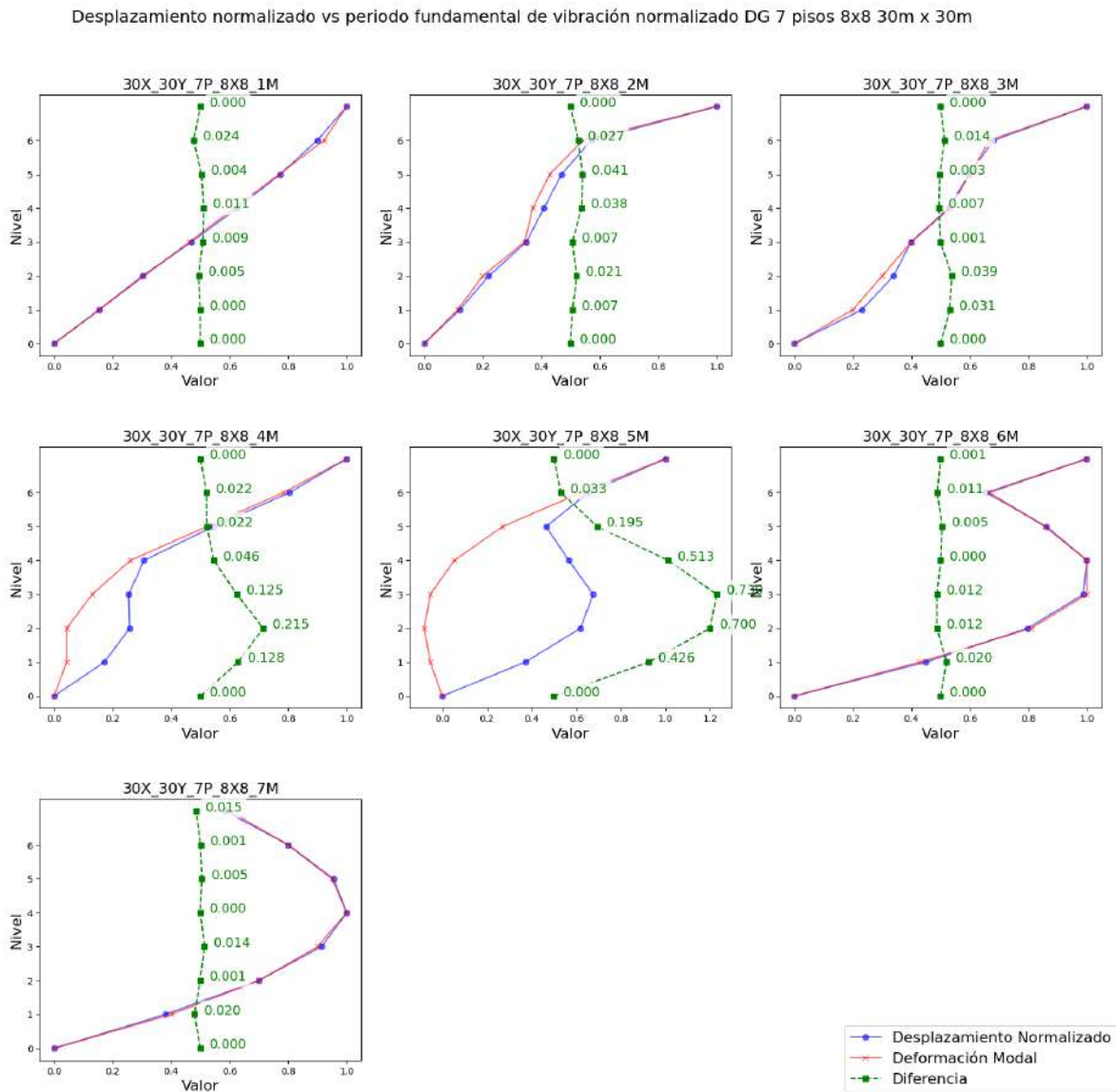
Estos valores de diferencia son grandes debido a que están influenciados por modos de vibrar superiores debido a la rigidez del sistema, el cual no es gradual a lo largo de su altura.



**Figura 55 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X\_30Y\_7P\_6X6**

La [Figura 56](#) muestra la configuración de 30m x 30m, pero con una saturación mayor de grids, pasando de 6 en la Figura 55, a 8 grids.

Esta configuración provoca una diferencia menor entre los desplazamientos máximos con respecto al modo fundamental de vibración, este aumento de rigidez debido a la saturación de diagonales provoca que los modos de vibrar superiores tengan menor efecto.



**Figura 56 Comparación de desplazamiento normalizado contra periodo fundamental en DG 30X\_30Y\_7P\_8X8**

Se observa que un aumento en el número de grids provoca que el modo fundamental de vibración tenga una influencia mayor sobre la DG, esto para edificios de 5 a 7 niveles, en donde es posible variar este parámetro de grids, sin embargo, en edificaciones de gran altura esto provocaría un problema tanto visual como de acomodo en donde no es posible saturar la fachada de diagonales.

Debido a las relaciones significativamente menores de altura con respecto a su ancho analizadas en esta investigación que las vistas en el estado del arte (Kim & Lee, 2010), el comportamiento no es similar, y por lo tanto es necesario aplicar nuevas recomendaciones a las existentes en la normativa mexicana (CDMX, 2023).

### **7.2.3 Comparativa de comportamiento estructural.**

En el presente apartado se mostrarán las comparativas de volumen y derivas máximas entre los diferentes casos de estudio que tienen la misma sección en planta y cantidad de niveles, por lo que se agruparán las variaciones cuando solo se modifique la cantidad de grids de las DG.

#### **7.2.3.1 10m x 10m con 5 niveles**

En la [Figura 57](#) se muestra la comparativa para los casos de estudio con planta de 10m x 10m para DG de 5 niveles. En la [Figura 54](#) se confirma el fenómeno observado en el capítulo [7.2.2](#) en donde al aumentar la densidad de los grids, aumenta la rigidez de la DG, se disminuyen los cambios de rigidez abruptos debido a la geometría, y por lo tanto el desplazamiento debido al sismo está gobernado por el modo fundamental de vibración en un mayor porcentaje que por modos de vibración superiores.

Uno de los aspectos más importantes que se aprecia en la [Figura 54](#) es que el aumentar el grado de inclinación no representa un aumento o decremento del desplazamiento de una DG, esto debido a que al aumentar la densidad de grids de la DG se obtienen ángulos más grandes que hacen variar la deriva máxima.

Sin embargo, el peso de la estructura si muestra una tendencia ascendente al aumentar el ángulo de inclinación de las DG, aunque existan algunos decrementos del peso como en el caso 4X4\_4M que tiene un DG con ángulo de inclinación de 81.12° el cual es mayor que el siguiente caso que es el 6X6\_3M el cual tiene un ángulo de 82.09°.

El caso más ligero de la estructuras de 5 pisos con una sección en planta de 10m x 10m es el caso 4X4\_1M, la cual tiene 57.99° de inclinación en los elementos grids, mientras que el caso que tiene una menor deriva máxima es el 6X6\_1M, la cual tiene 67.38° de inclinación en los elementos grids.

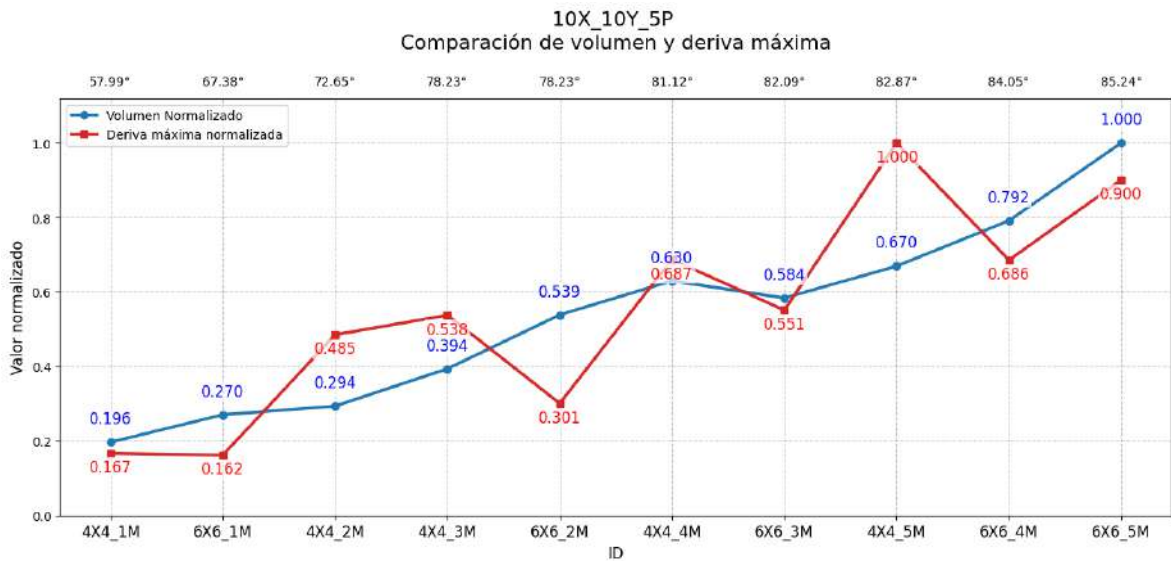


Figura 57 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 10X\_10Y\_5P

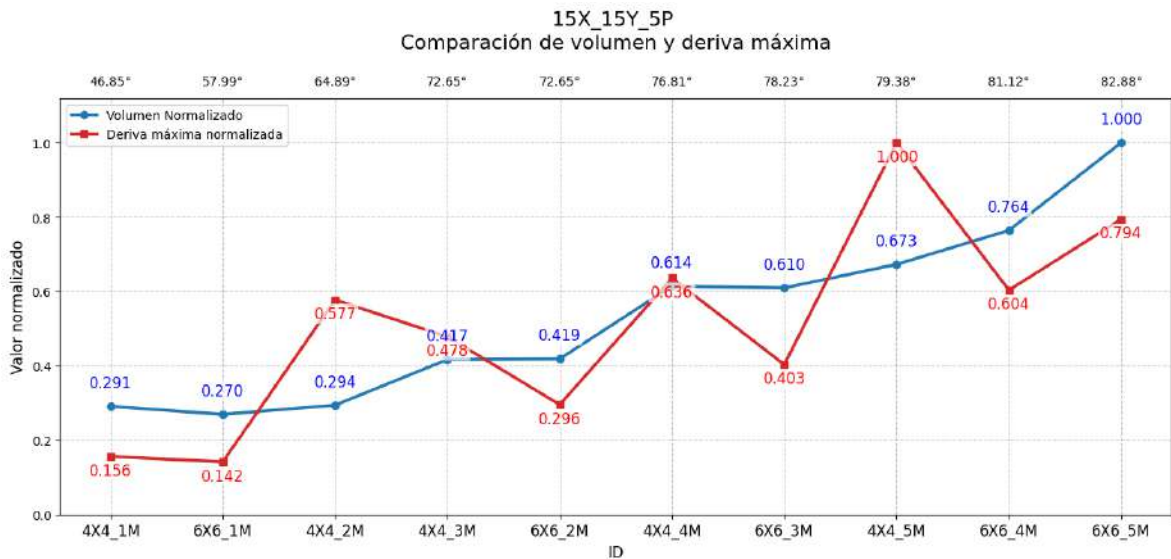
### 7.2.3.2 15m x 15m con 5 niveles

En la [Figura 58](#) se muestran los casos de estudio de 5 niveles que tienen una dimensión en planta de 15m x 15m. Se observa al igual que en la [Figura 57](#) que el aumentar la densidad del grid, aumenta la rigidez y por lo tanto disminuye la deriva máxima de la DG.

La tendencia que se observa en la con respecto al aumento del peso del DG al aumentar el ángulo de inclinación, es menor que en el caso de la configuración de

10m x 10m ([Figura 57](#)), esto se puede validar al observar que el valor más pequeño en la configuración es de 0.196, mientras que en la de 15m x 15m es de 0.291, la diferencia entre el más pesado y el más ligero disminuye.

El caso más ligero de la estructuras de 5 pisos con una sección en planta de 15m x 15m es el caso 6X6\_1M, la cual tiene 57.99° de inclinación en los elementos grids, a su vez este también es el caso que tiene una menor deriva máxima.



**Figura 58 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 15X\_15Y\_5P**

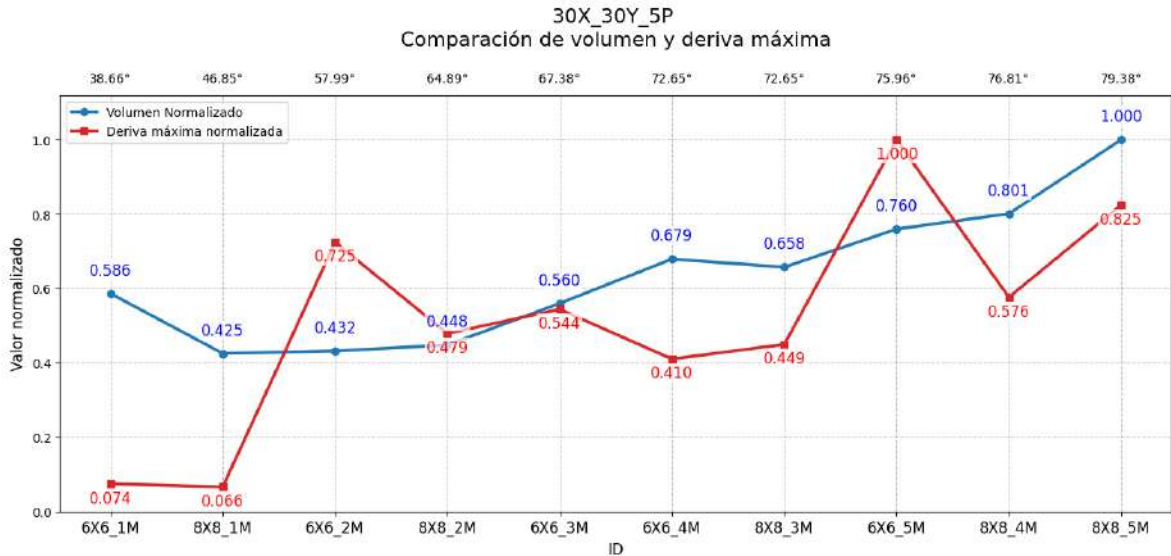
### 7.2.3.3 30m x 30m con 5 niveles

En la [Figura 59](#) se muestran los casos de estudio de 5 niveles que tienen una dimensión en planta de 30m x 30m. En esta configuración se aprecia que la línea del volumen cambia su tendencia con respecto a la [Figura 57](#) y [Figura 58](#). Ya no se tiene una línea que sube, sino que se observa una línea más estable, sin embargo, el rango de este volumen vuelve a disminuir, siendo el valor de 0.425 el más ligero contra los 0.196 y 0.291 de las opciones de 10m y de 15m respectivamente.

Bajo la configuración de 30m x 30m se observa una inestabilidad notoria debido a los cambios de rigidez y a la poca altura de los casos DG. La configuración de

6X6\_4M es más rígida que la de 8X8\_4M, esto debido al efecto de látigo observado en la [Figura 43](#) y la [Figura 44](#).

El caso más ligero de la estructuras de 5 pisos con una sección en planta de 30m x 30m es el caso 8X8\_1M, la cual tiene 46.85° de inclinación en los elementos grids, a su vez este también es el caso que tiene una menor deriva máxima.



**Figura 59 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 30X\_30Y\_5P**

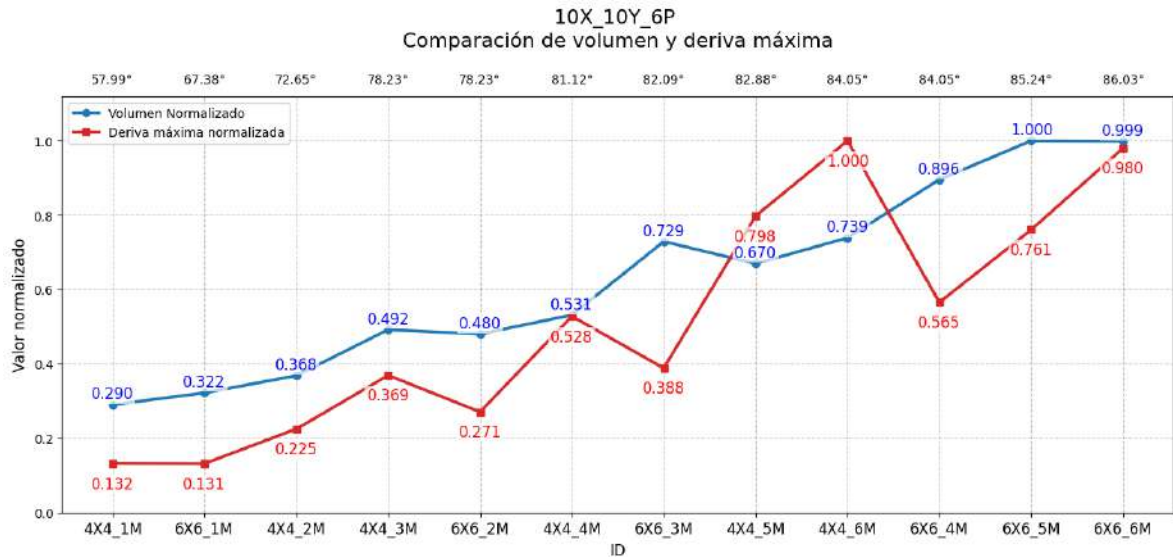
#### 7.2.3.4 10m x 10m con 6 niveles

A continuación, se presenta en la [Figura 60](#) la comparativa para los casos de estudio con planta de 10m x 10m para DG de 6 niveles. Se mantiene el fenómeno mencionado anteriormente en donde en el capítulo [7.2.2](#) se veía una mayor rigidez cuando se aumentaba la densidad de los grids para caso de estudio.

La línea de tendencia del volumen presenta una tendencia ascendente, con menor diferencia que los casos de estudio de 10m x 10m de 5 pisos, debido a que el valor mínimo que muestra la [Figura 60](#) es de 0.290 contra los 0.196.

El caso más ligero de la estructuras de 6 pisos con una sección en planta de 10m x 10m es el caso 4X4\_1M, la cual tiene 57.99° de inclinación en los elementos grids, mientras que el caso que tiene una menor deriva máxima es el 6X6\_1M, la cual

tiene 67.38° de inclinación en los elementos grids. La diferencia entre la deriva máxima reportada para el caso 4X4\_1M y 6X6\_1M es de apenas 0.001, por lo que es posible asumir que tienen el mismo comportamiento.



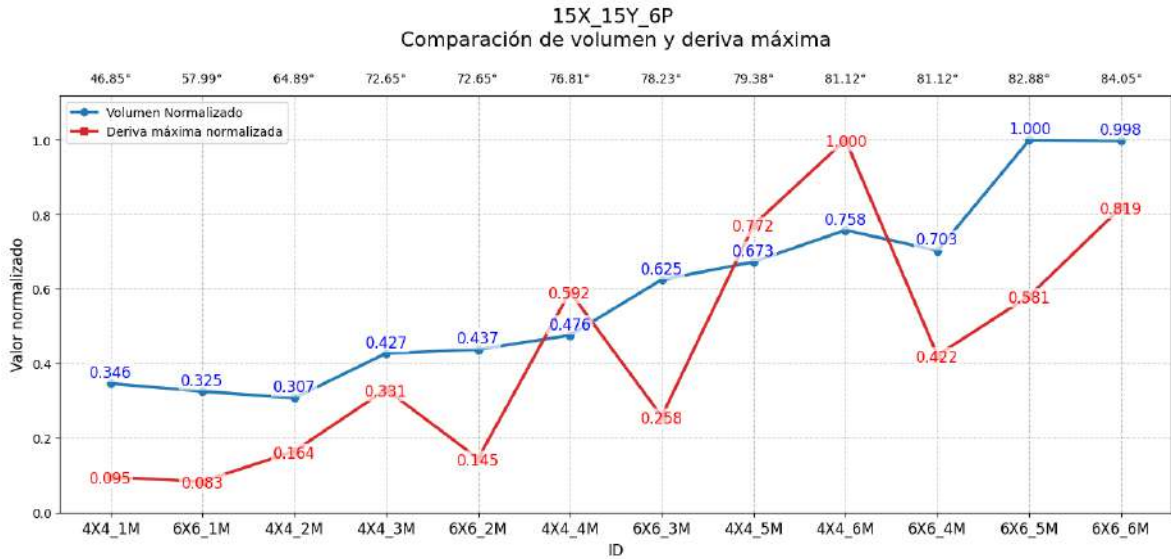
**Figura 60 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 10X\_10Y\_6P**

### 7.2.3.5 15m x 15m con 6 niveles

En la [Figura 61](#) se muestran los casos de estudio de 6 niveles que tienen una dimensión en planta de 15m x 15m. Se observa en la [Figura 61](#) el mismo patrón que el aumentar la densidad del grid, aumenta la rigidez y por lo tanto disminuye la deriva máxima de la DG.

El caso más ligero de la estructuras de 6 pisos con una sección en planta de 15m x 15m es el caso 4X4\_2M, la cual tiene 64.89° de inclinación en los elementos grids, mientras que el caso que tiene una menor deriva máxima es el 6X6\_1M, la cual tiene 57.99° de inclinación en los elementos grids.

El comportamiento del volumen para esta configuración muestra que el valor más ligero es cuando la rejilla perimetral tiene 64.89° algo que se acerca a la recomendación del estado del arte en donde se pide que se predimensione cercano a los 70° (Terán-Gilmore, et al., 2020) (CDMX, 2023).

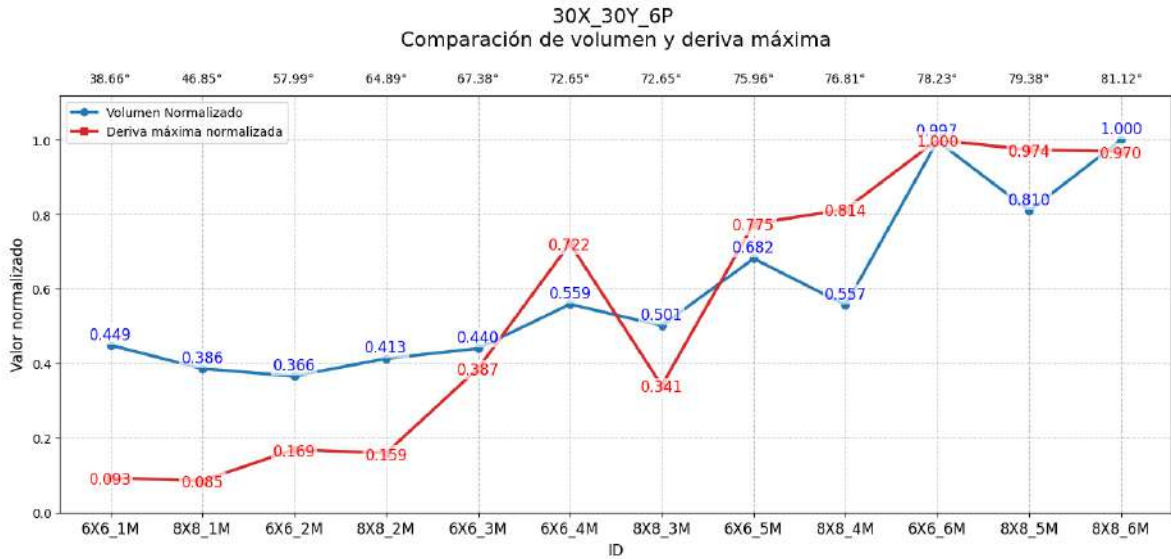


**Figura 61 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 15X\_15Y\_6P**

### 7.2.3.6 30m x 30m con 6 niveles

En la [Figura 62](#) se muestran los casos de estudio de 6 niveles que tienen una dimensión en planta de 30m x 30m. En esta configuración se aprecia que la línea del volumen cambia su tendencia con respecto a la configuración de 5 niveles ([Figura 59](#)). Debido a los cambios de rigidez del modelo, se presentan decrementos del peso del DG, éstos se observan cuando se usan las configuraciones de 8 grids, lo que indica un comportamiento influenciado por la distribución de esfuerzos axiales en donde al tener mayor rigidez global, la distribución de esfuerzos también es mejor.

El caso más ligero de las estructuras de 6 pisos con una sección en planta de 30m x 30m es el caso 6X6\_2M, la cual tiene 57.99° de inclinación en los elementos grids, mientras que el caso que tiene una menor deriva máxima es el 8X8\_1M, la cual tiene 46.85° de inclinación en los elementos grids.



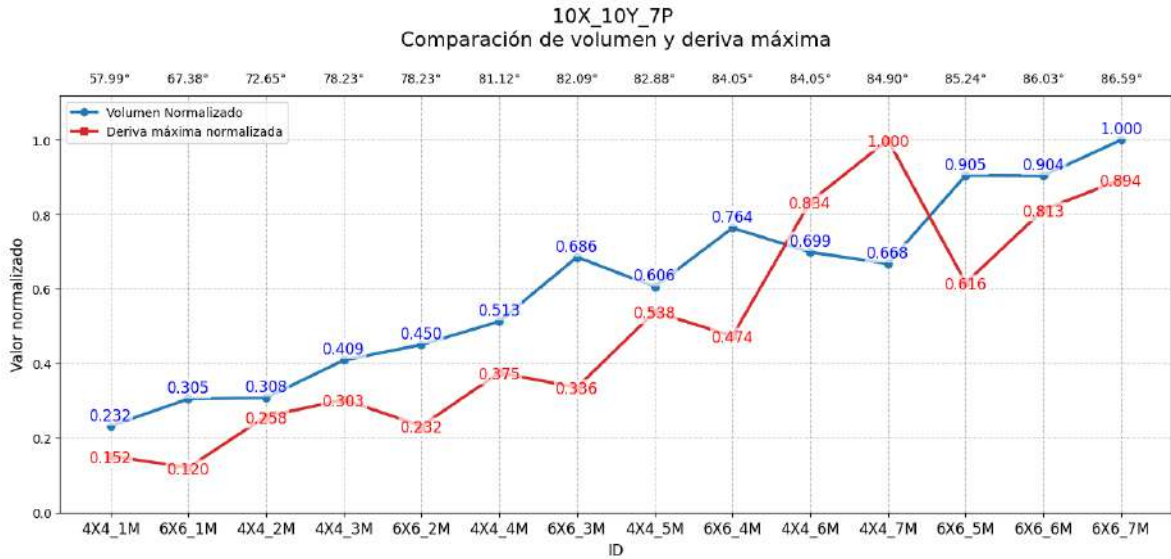
**Figura 62 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 30X\_30Y\_6P**

### 7.2.3.7 10m x 10m con 7 niveles

En la [Figura 63](#) se muestra la comparativa para los casos de estudio con planta de 10m x 10m para DG de 7 niveles.

Se observan cambios en el comportamiento del volumen al aumentar el ángulo de inclinación, las configuraciones 4X4 son más ligeras que sus opciones de 6X6, incluso más que algunas que tengan el tamaño del módulo más pequeño, por ejemplo el caso 4X4\_5M (82.88°) tiene un valor de volumen normalizado de 0.606, mientras que la configuración 6X6\_3M (82.09°) tiene un valor de 0.686, sin embargo para la rigidez, debido a la saturación de grids, si tiene una menor deriva máxima la configuración 6X6\_3M.

El caso más ligero de la estructuras de 6 pisos con una sección en planta de 10m x 10m es el caso 4X4\_1M, la cual tiene 57.99° de inclinación en los elementos grids, mientras que el caso que tiene una menor deriva máxima es el 6X6\_1M, la cual tiene 67.38° de inclinación en la rejilla perimetral.



**Figura 63 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 10X\_10Y\_7P**

### 7.2.3.8 15m x 15m con 7 niveles

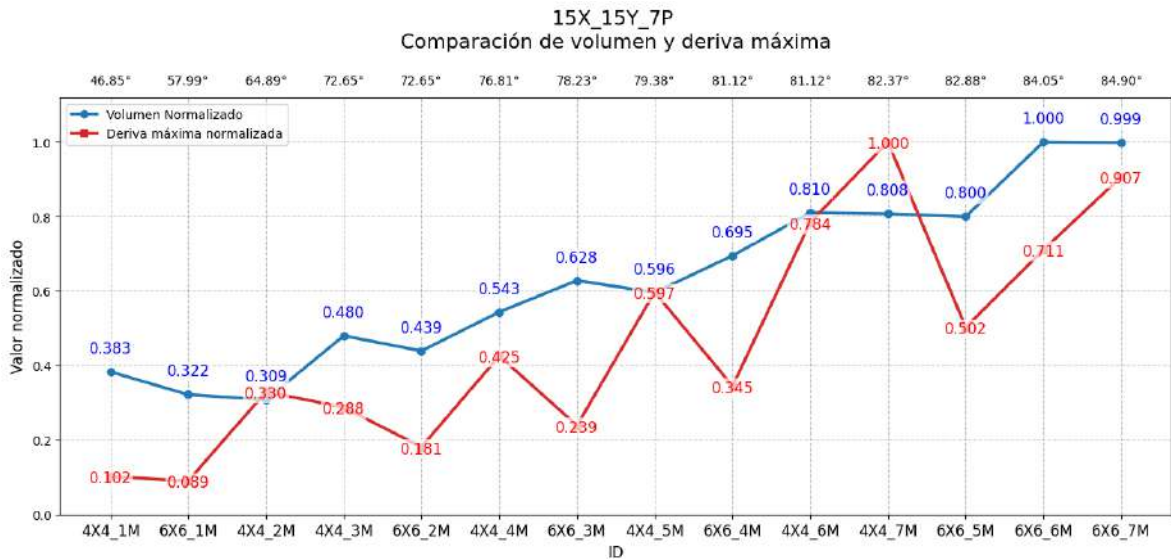
En la [Figura 64](#) se muestran los casos de estudio de 7 niveles que tienen una dimensión en planta de 15m x 15m.

El comportamiento que se observa en la [Figura 64](#) es más estable que en otras configuraciones teniendo una diferencia de solamente 0.691 entre la configuración más ligera contra la más pesada.

Los cambios de volumen observados en la [Figura 63](#) se mantienen, no por incrementar el ángulo de la rejilla perimetral, se tendrá un mayor volumen, siendo las configuraciones de 4X4 las soluciones más ligeras.

El caso más ligero de la estructuras de 7 pisos con una sección en planta de 15m x 15m es el caso 4X4\_2M, la cual tiene 64.89° de inclinación en los elementos grids, mientras que el caso que tiene una menor deriva máxima es el 6X6\_1M, la cual tiene 57.99° de inclinación en la rejilla perimetral.

Para esta configuración se repite lo observado en la sección [7.2.3.5](#), donde la solución más ligera se acerca a los 70°.



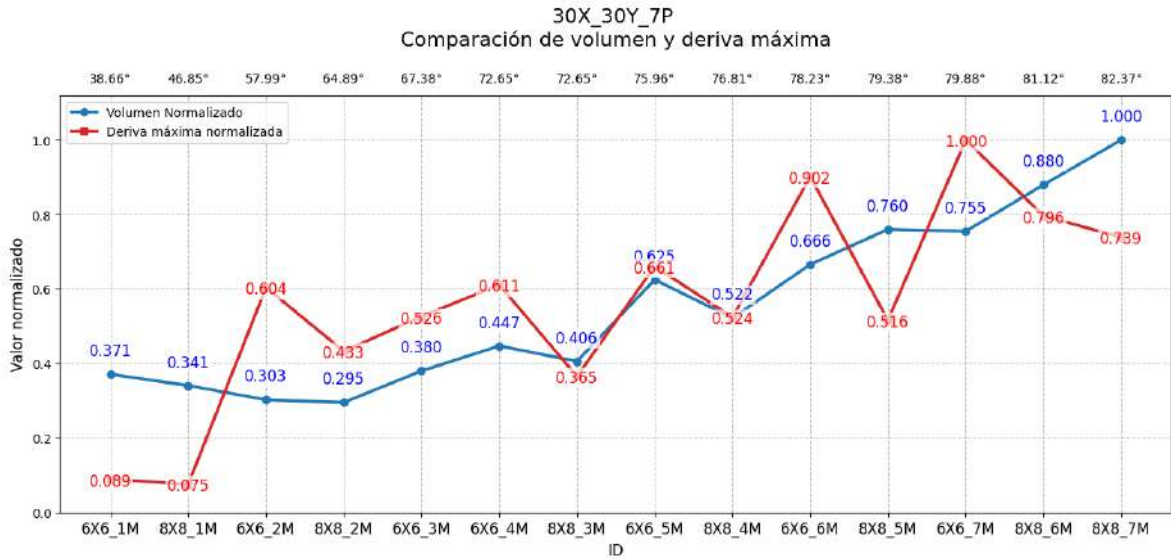
**Figura 64 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 15X\_15Y\_7P**

### 7.2.3.9 30m x 30m con 7 niveles

En la [Figura 65](#) se muestran los casos de estudio de 7 niveles que tienen una dimensión en planta de 30m x 30m.

Se observa un cambio de rigidez súbito entre el ángulo de 46.85° en adelante, entendiéndose que bajo la configuración de 1 módulo el comportamiento es muy rígido a comparación del resto de configuraciones. Sin embargo, el peso tiene una tendencia a la baja en la primer parte de la gráfica siendo la solución más ligera la correspondiente al caso 8X8\_2M (64.89°), cambiando la tendencia observada anteriormente en donde la solución con una menor densidad de grids era la más ligera.

La solución con la menor deriva máxima corresponde al caso 8X8\_1M (46.85°) con un valor de 0.075, sin embargo, el DG 6X6\_1M (38.66°) es mayor solo por 0.014 por lo que se puede concluir que el comportamiento es similar.



**Figura 65 Comparación de volumen y deriva máxima de DG 30X\_30Y\_7P**

#### 7.2.4 Evaluación del comportamiento estructural

A partir de los datos observados en el subcapítulo [7.2.3](#) es necesario conocer la geometría que mejora la viabilidad de la estructura para poder llevarse a cabo.

Uno de los principales factores que determina que un proyecto sea o no sea viable es el costo de la estructura, y lo que impacta directamente en este factor es el peso, por lo que fue una de las propiedades esenciales que se tomó para medir la eficiencia de las DG.

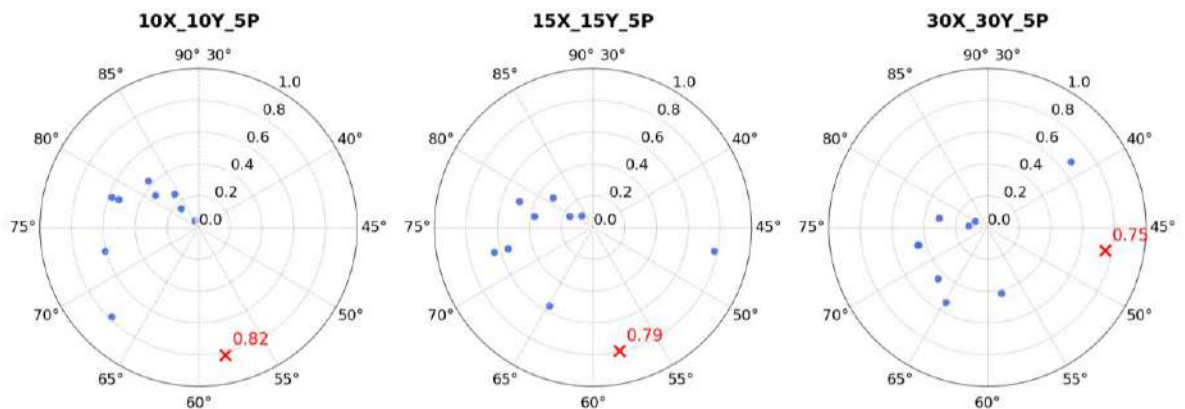
Otro de los factores que determinó la eficiencia fue la máxima deriva, debido a que este es un parámetro que debe ser controlado ante la acción de carga lateral (CDMX, 2023), por lo que se definió que entre menor sea el valor de la deriva máxima, más eficiente se vuelve el DG.

A partir de esto se definió el parámetro de eficiencia G, como se muestra en la Ecuación [\(32\)](#)*Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, en donde se relaciona el peso del DG junto al valor de la deriva máxima ambos normalizados con respecto a los casos de estudio que comparten número de niveles y dimensiones en planta.

A partir de estas relaciones es posible determinar la eficiencia del modelo y elegir si el usuario prefiere utilizar la solución más ligera o si es inviable para el proyecto por alguna razón, que se elija algún DG con un valor cercano al máximo.

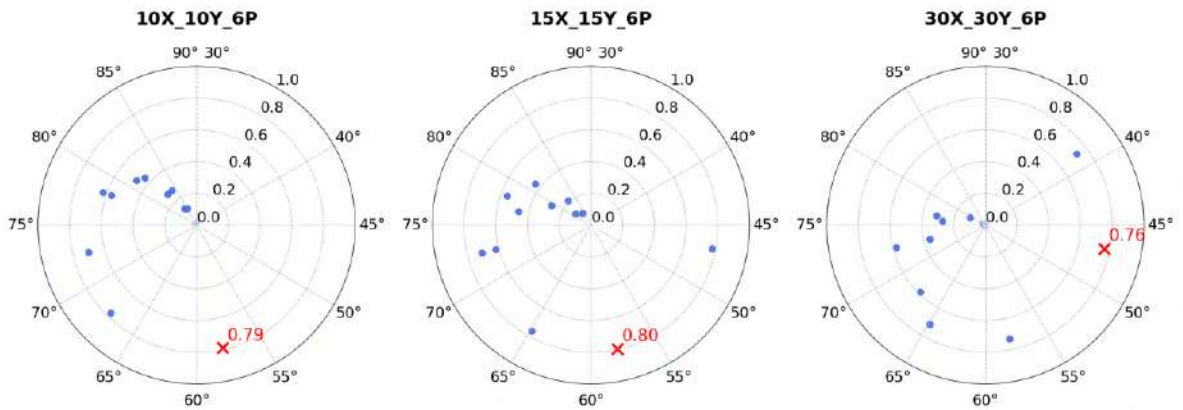
En la [Figura 66](#), [Figura 67](#) y [Figura 68](#) se muestran los valores del parámetro G para 5, 6 y 7 niveles respectivamente mediante una gráfica circular la cual está dividida según el ángulo de inclinación de la rejilla perimetral, en donde se muestra en color rojo el valor máximo de eficiencia para cada uno de los casos de estudio.

El parámetro G para los casos de 5 niveles oscila entre 0.75 y 0.82 como se muestra en la [Figura 66](#). Se observa en la gráfica que los DG que mejor eficiencia tienen están en un rango entre 55° y 60° para los DG de 10m y 15m de lado, mientras que para la configuración de 30m el ángulo decrece a un rango entre 45° y 50°



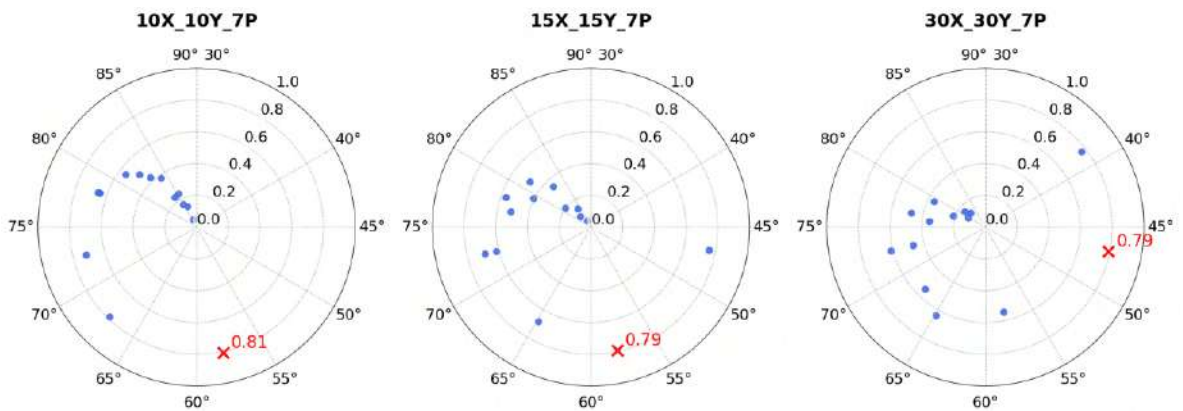
**Figura 66** Parámetro G para 5 niveles

Para los casos de 6 niveles el valor de mayor eficiencia oscila entre 0.76 y 0.80 como se muestra en la [Figura 67](#). Los ángulos en donde se encuentran estos valores de mayor eficiencia, para cada una de las tipologías en planta, son los mismos que los mostrados en la [Figura 66](#).



**Figura 67 Parámetro G para 6 niveles**

En la [Figura 68](#) se muestran los valores para 7 niveles, en donde los valores máximos marcados en color rojo oscilan entre 0.79 y 0.81, manteniendo los mismos ángulos que en los casos de 5 y 6 niveles.



**Figura 68 Parámetro G para 7 niveles**

Al relacionar tanto el peso como la deriva máxima, se observa que los valores máximos de eficiencia de los casos DG, no corresponden con los casos más ligeros, esto debido al peso por igual que se les ha otorgado para ambas variables.

Debido a los valores mostrados para el parámetro G de 5, 6 y 7 niveles, los resultados parecen mostrar que los valores tienden a aumentar con respecto al número de niveles, sin embargo, para poder realizar esta afirmación es necesario que en investigaciones posteriores se aumente el número de niveles por lo menos

hasta cruzar el límite que divide a una DG de altura media contra las DG de gran altura.

### **7.3 Desarrollo de una red neuronal**

A partir de la información generada en los capítulos [7.1](#) y [7.2](#), se desarrolló una red neuronal que servirá como una herramienta que nos indique que ángulo de inclinación de rejilla perimetral se recomienda usar para tener la solución más ligera, y que nos indique que eficiencia G tiene la solución propuesta.

#### **7.3.1 Determinar las variable de entrada y salida de la red neuronal**

Para la elección de la rejilla perimetral es necesario tener una variable que otorgue una calificación a la calidad de la solución, por lo que el parámetro G cubre perfectamente esta característica, por lo que se decidió que fuera la primer variable de salida.

Adicionalmente se consideró necesario indicar al usuario el valor del ángulo de la geometría más ligera, esto para poder acomodar tanto la saturación como el tamaño del módulo hasta lograr este valor, por lo que el valor del ángulo de la solución más ligera fue la segunda variables de salida.

A partir de las dos variables de salida, se eligieron las variables de entrada. Se buscó incluir todos los parámetros geométricos que fueron modificados en la investigación para que la red neuronal pudiera conocer que factores afectan realmente al comportamiento.

El primer valor de entrada corresponde a la cantidad de niveles de análisis, esto debido a los diferentes cambios en el comportamiento que resultan el aumentar la cantidad de pisos en los casos de estudio.

El segundo valor de entrada es una relación entre el tamaño del módulo de la rejilla perimetral entre la longitud de análisis, en este caso para el módulo se tienen valores de 1 hasta 5, 6 o 7 según la cantidad de pisos que se hayan elegido, además

para la longitud de análisis corresponden los valores de 10m, 15m , y 30m según el caso de estudio que se considere.

El tercer valor de entrada es la relación entre el número de grids entre la longitud de análisis, para los grids, se utilizaron los valores de 4, 6 y para la configuración de 30m x 30m, 8 grids.

Para el cuarto valor de entrada se eligió colocar el ángulo de inclinación que tiene la rejilla perimetral, esto para poder indicarle a la red todos los parámetros geométricos que tiene el DG como la cantidad de grids, el tamaño de módulo y finalmente el valor del ángulo.

### **7.3.2 Construir arquitectura de la red neuronal de perceptrón multicapa.**

A partir de las entradas y salidas definidas, se estructuró la red neuronal considerando 2 capas ocultas, la primera capa oculta cuenta con 16 neuronas y la segunda capa oculta con 8 neuronas, como se observa en la Figura 69.

Se utilizó la función de activación RELU para ambas capas ocultas, mientras que para la capa de salida se utilizó una función de activación lineal, en donde la función de RELU es la de dejar pasar todos los valores positivos y bloquear los valores negativos.

Entrada 4 neuronas

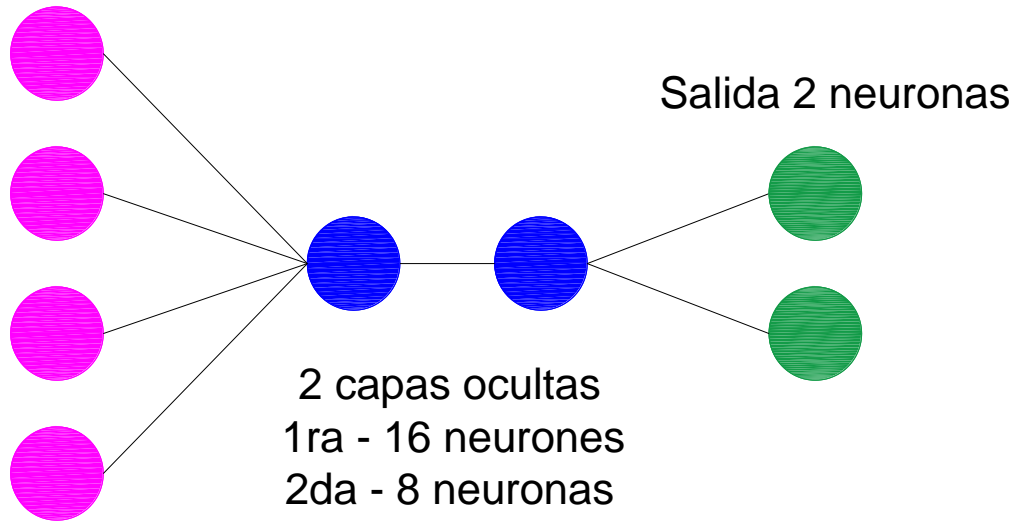


Figura 69 Arquitectura de red neuronal artificial

### 7.3.3 Entrenar red neuronal con la base de datos hecha y las relaciones obtenidas entre diferentes configuraciones.

A partir de la base de datos hecha, considerando las 4 entradas y 2 salidas, se entrenó la red con el 75% de los datos, dejando el 25% para la prueba y validación.

Se utilizó el modo de pausa temprana o “*EarlyStopping*” en donde de 2000 épocas disponibles, solo se utilizaron 328, esto debido a que la red dejó de mejorar y de esta forma se evitó el sobre ajuste de la red.

Se utilizó un tamaño de lote o “*batch size*” de 8, por lo que el gradiente no se calculó considerando todos los datos al mismo tiempo, sino que se utilizaron 8 lotes.

### 7.4 Evaluar y comparar la red neuronal.

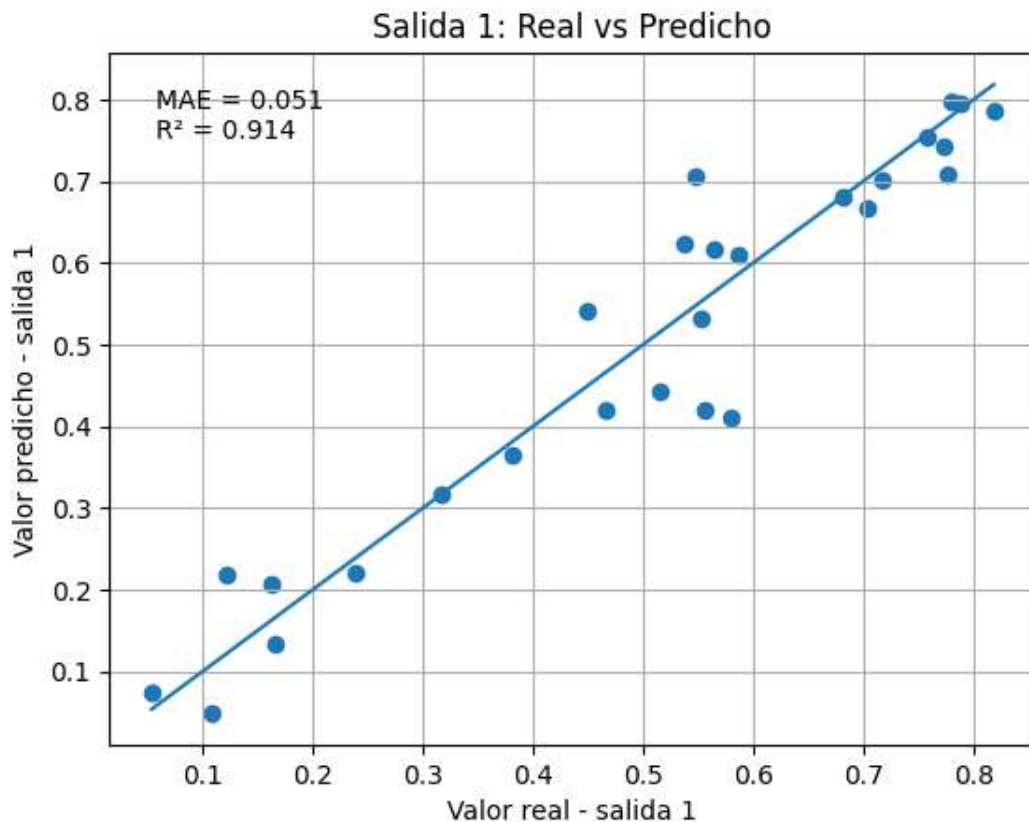
A continuación, se presenta la evaluación y validación de la red neuronal a partir del entrenamiento de la red, en donde se utilizaron el 25% de los datos para la evaluación de la red neuronal, obteniendo los valores mostrados en la [Figura 70](#) y [Figura 71](#).

#### 7.4.1 Determinar el error cuadrático medio de la red neuronal.

Se observa en la [Figura 70](#) los valores predichos por la red neuronal para la salida 1, la cual corresponde al parámetro G, en donde se aprecia que el error absoluto medio (MAE) tiene un valor de 0.051 el cual al ser medido en el rango de los valores obtenidos en todos los casos de estudio el cual va de 0.00155 hasta 0.81848, el error absoluto medio representa un error del 6.2% del rango observado.

La [Figura 70](#) muestra un valor del coeficiente de determinación de 0.914, esto indicó un ajuste bastante bueno para la salida 1.

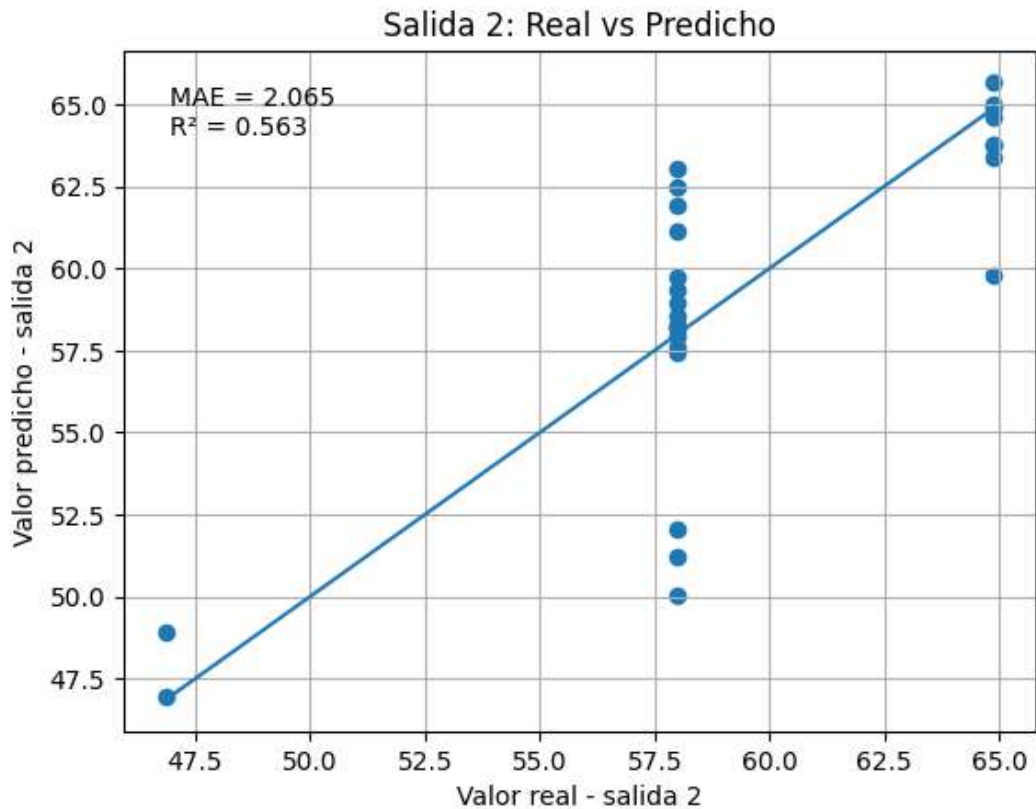
Todos los datos mantienen una dispersión adecuada, evitando tener un sesgo sistemático en donde la red no está siempre por encima o por debajo de la diagonal de color azul, la cual indica la predicción perfecta de la red.



**Figura 70** Dispersión de valores de predicción de salida 1

Para la Figura 71 se observan los valores predichos por la red para el ángulo que tiene la configuración más ligera. El MAE tiene un valor de 2.065 unidades reales el cual representa un error de aproximadamente el 4.3% en el rango observado entre 38.66° y 86.59°, que fueron los ángulos que tomaron las rejillas perimetrales de todos los casos de estudio de la presente investigación. El coeficiente de determinación fue de 0.563 lo que indica que la red explica aproximadamente el 56.3% de la variabilidad observada, esto indica un ajuste moderado, en donde la red neuronal reconoce la tendencia y comportamiento general pero no reproduce la predicción con suficiente precisión.

Se observa en la Figura 71 que los datos no están dispersos, sino concentrados en 3 lotes, debido a que los casos de estudio se limitan a 3 configuraciones en planta: 10m, 15m y 30m.



**Figura 71** Dispersión de valores de predicción de salida 2

#### 7.4.2 Comparar resultados con estado del arte.

En el estado del arte se encuentran DG de altura media como se mencionó en el capítulo [2.1](#), en donde los principales DG son: Manukau Institute Of Technology, 1 The Avenue, y el Pabellón De Chile Expo Milán.

Por lo que se obtuvieron los datos de cada una de las estructuras, determinando los valores de entrada para la red neuronal, obteniendo el siguiente análisis:

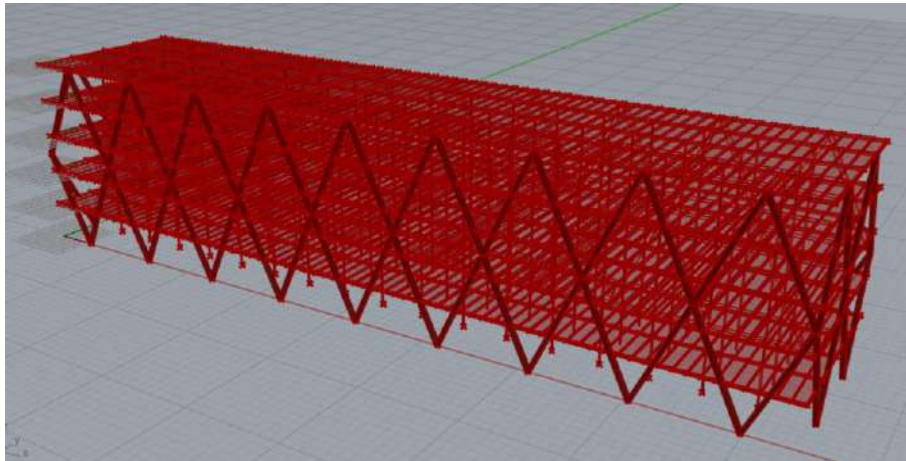
Para la geometría obtenida a partir de una zona del Manukau Institute Of Technology, se tienen las siguientes entradas de red:

- Entrada 1: 5
- Entrada 2:  $2.5/84.5 = 0.0296$
- Entrada 3:  $14/84.5 = 0.1656$
- Entrada 4: 58.91

En donde las salidas de la red son:

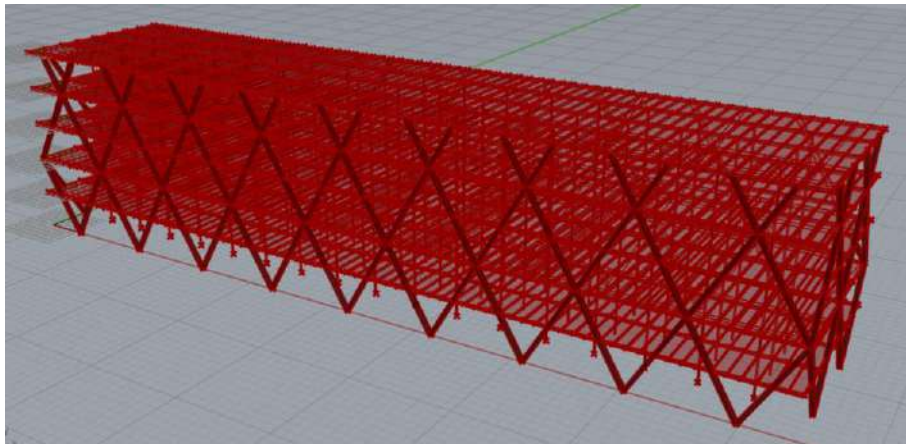
- Salida 1: 0.689
- Salida 2: 53.00

La Geometría del edificio Manukau presenta una configuración de un módulo de 2.5 niveles en un edificio de 5 pisos, formando dos módulos completos con un grid de 18 ([Figura 72](#)). La red neuronal recomendó pasar de 58.91 grados a 53 grados, por lo que se disminuyó de 2.5 módulos a 2 módulos ([Figura 73](#)).



**Figura 72 Geometría original Manukau Institute of Technology**

Este cambio provocó una disminución del peso en la retícula perimetral de 8.5%, según lo indica la [Figura 78](#).



**Figura 73 Geometría de red neuronal Manukau Institute of Technology**

Para la geometría obtenida a partir de una zona del Edificio1 The Avenue, se tienen las siguientes entradas de la red:

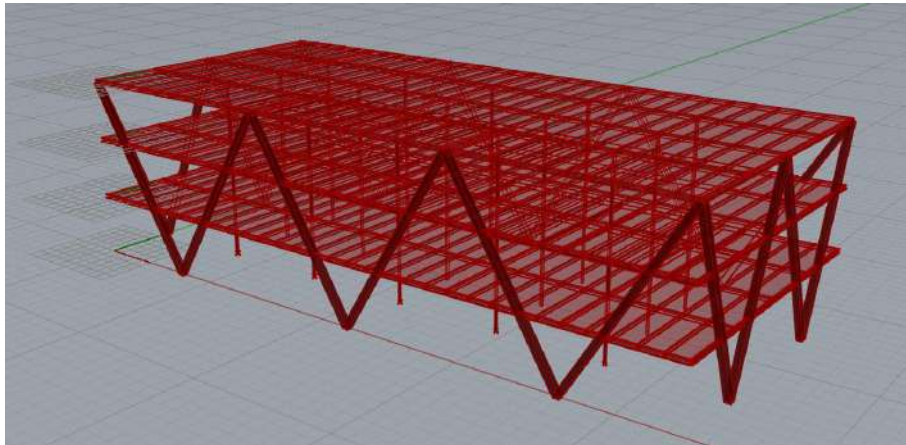
- Entrada 1: 3
- Entrada 2:  $3/43.96 = 0.0682$
- Entrada 3:  $6/43.96 = 0.1365$

- Entrada 4: 58.41

En donde las salidas de la red son:

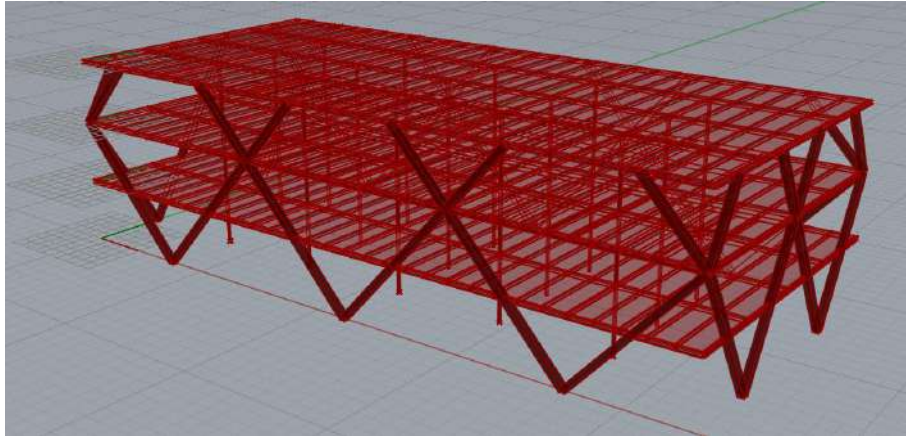
- Salida 1: 0.6417
- Salida 2: 46.66

La geometría presenta un DG menos denso que en otros edificios, considerando un módulo de 3 niveles con un grid de 6 ([Figura 74](#)) en un edificio de 3 niveles, mientras que la red indicó que el ángulo que mejor se adapta es de 46.66 grados, por lo que se adaptó esta arquitectura a un módulo de 2 niveles manteniendo el mismo grid ([Figura 75](#)).



**Figura 74 Geometría original 1 The Avenue**

Esto provocó una mejora del 7.9% en el peso de la retícula perimetral, como se muestra en la [Figura 78](#).



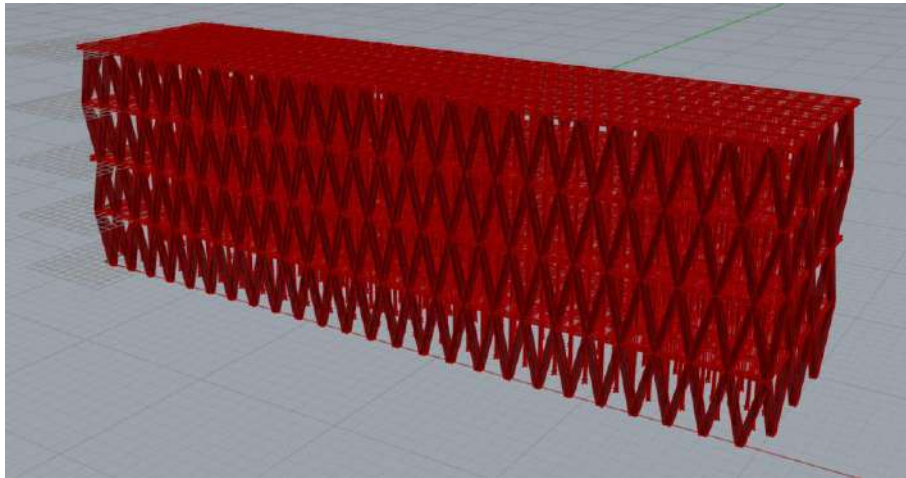
**Figura 75 Geometría de red neuronal 1 The Avenue**

El Pabellón de Chile Expo Milán, en contraparte con el edificio de 1 the avenue presenta una densidad muy alta en la rejilla perimetral considerando 52 grid y un módulo de 1 en un edificio de 4 niveles ([Figura 76](#)). La entrada de datos para la red neuronal es la siguiente:

- Entrada 1: 4
- Entrada 2: 1/60
- Entrada 3: 52/60
- Entrada 4: 73.83

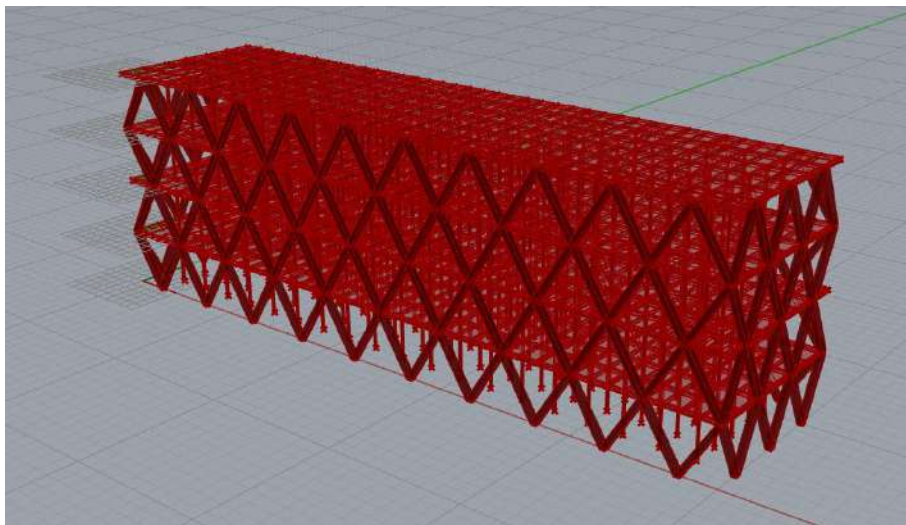
En donde las salidas de la red son:

- Salida 1: 0.58
- Salida 2: 55.80



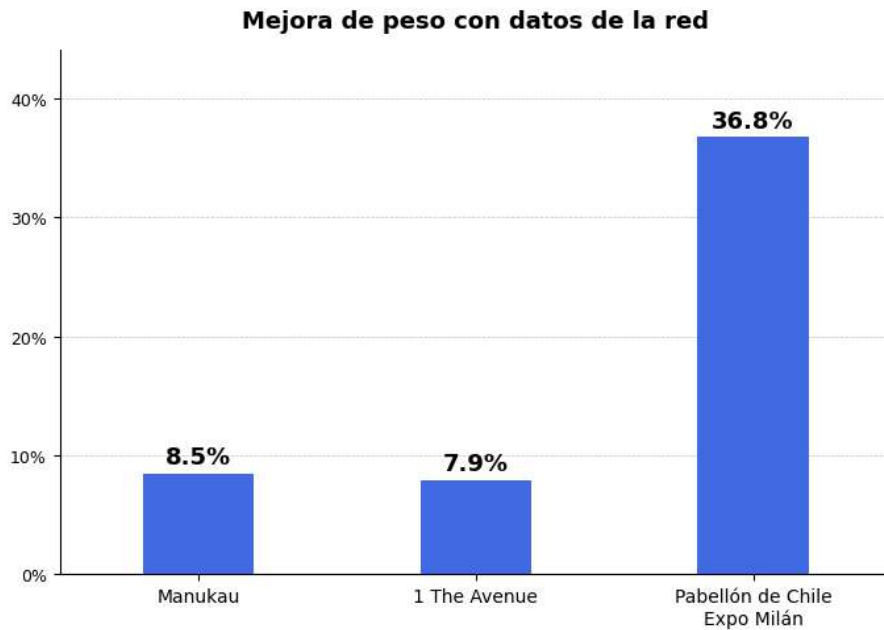
**Figura 76 Geometría original Pabellón de Chile Expo Milán**

La red neuronal indicó que el ángulo que minimizaba el peso del DG es de 55.80 grados por lo que, al apreciar una densidad alta en el grid, se disminuyó la densidad de la rejilla perimetral de 52 a 20 manteniendo el mismo módulo de 1 ([Figura 77](#)) y llegando a un ángulo de 59 grados, esto provocó una mejora del 36.8% ([Figura 78](#)).



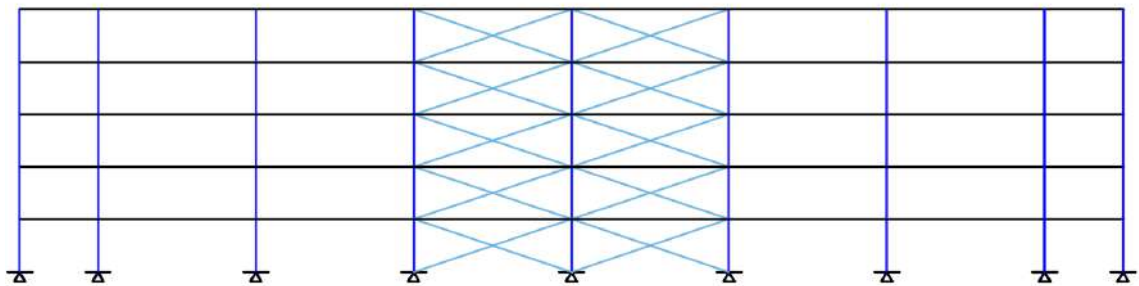
**Figura 77 Geometría de red neuronal Pabellón de Chile Expo Milán**

A partir de los 3 modelos analizados se encontraron mejoras de entre el 7.9% hasta el 36.8%, esto indica que en el estado del arte no se suelen utilizar los modelos que minimicen el peso, sino que otros factores influyen directamente, tales como estética y criterios arquitectónicos.

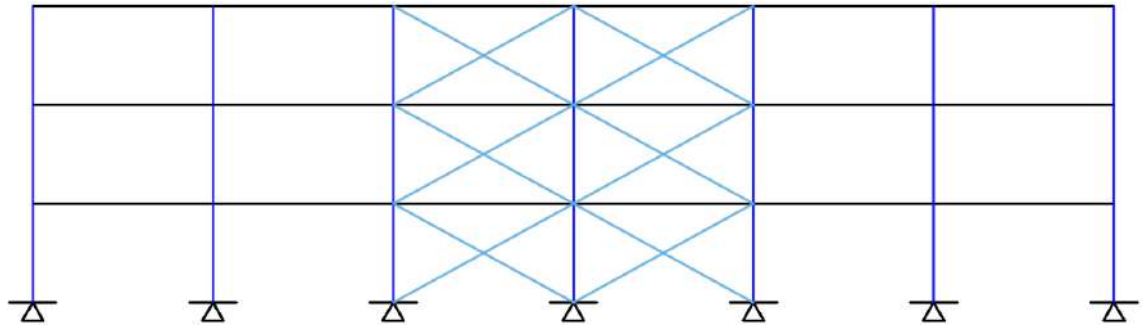


**Figura 78 Mejoras de peso de los modelos de la red neuronal**

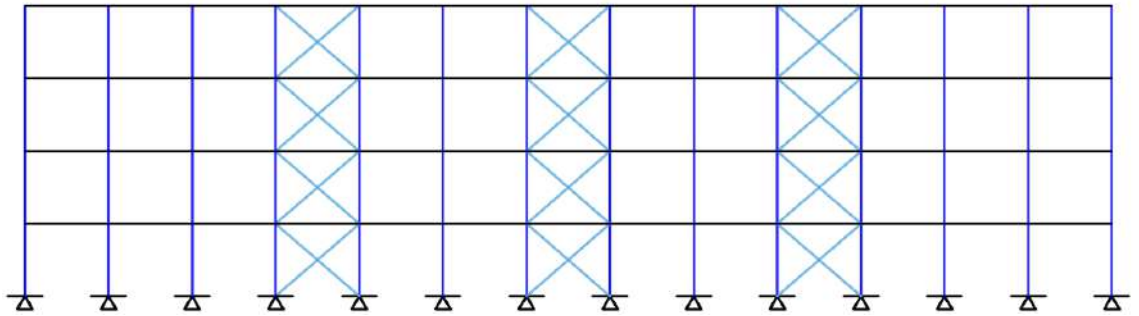
A partir de las mejoras mostradas se compararon los pesos contra estructuraciones tradicionales contraventeadas. La configuración para el edificio de Manukau tuvo la geometría mostrada en la [Figura 79](#), mientras que la geometría correspondiente al edificio 1 The Avenue se muestra en la [Figura 80](#), y finalmente el Pabellón de Chile Expo Milán tiene la geometría mostrada en la [Figura 81](#).



**Figura 79 Geometría Contraventeadada Manukau Institute of Technology**



**Figura 80 Geometría Contraventeada 1 The Avenue**

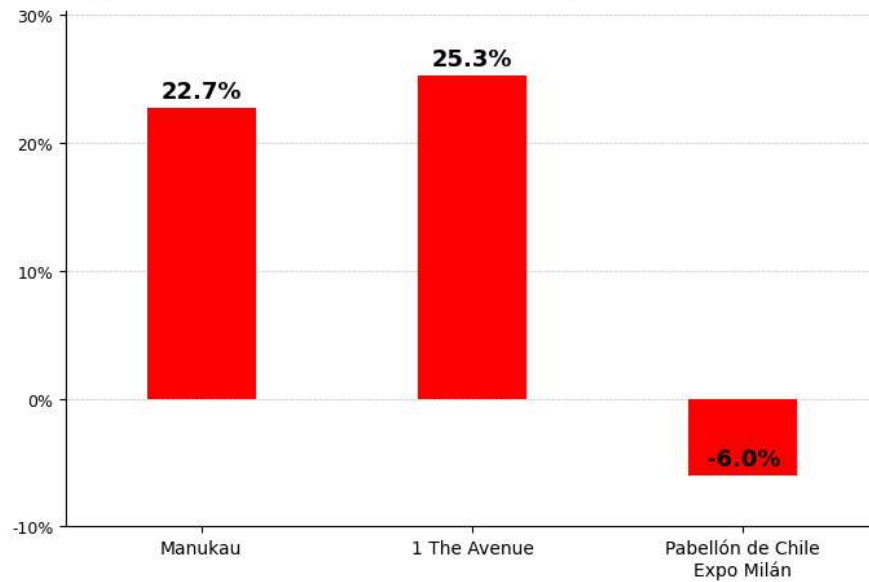


**Figura 81 Geometría Contraventeada Pabellón de Chile Expo Milán**

A partir de estas propuestas incluyendo columnas y contravientos en forma de “x”, se limitó a que las diagonales en cruz debían ser de la misma sección transversal.

Utilizando la configuración contraventeada, la geometría de los edificios Manukau y 1 The Avenue tuvieron un peso mayor que las configuraciones DG de 22.73% y 25.32% respectivamente, mientras que la geometría correspondiente al Pabellón de Chile Expo Milán tuvo una geometría 5.99% más ligera que la propuesta de la red neuronal con configuración DG, tal como se ve en la [Figura 82](#).

### Peso de configuraciones contraventeadas con respecto a resultados de red neuronal



**Figura 82 Comparativa de peso de estructuras contraventeadas vs soluciones DG de red neuronal**

Los resultados muestran una similitud entre los pesos de la rejilla perimetral de las DG con respecto a las estructuraciones tradicionales, por lo que se observa que es posible tener DG de altura media como alternativa en proyectos de infraestructura.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación permitió analizar de forma exhaustiva el comportamiento de las estructuras diagrid (DG) de altura media para edificios en zonas sísmicas, enfocándose en determinar la configuración que minimice el peso variando los parámetros geométricos de la rejilla perimetral, tales como tamaño de módulo y densidad de diagonales por entrepiso.

La variable que mayor impactó en el comportamiento de las DG fue la relación entre la configuración en planta contra la altura, entre más pequeñas las dimensiones en planta con respecto a la altura. Adicionalmente la variación en la densidad de diagonales del modelo mostró un cambio considerable en la respuesta sísmica, por lo que el análisis de esta variable es fundamental para el diseño del DG.

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis planteada, debido a que, a través del análisis realizado, la utilización de un modelo de red neuronal permitió determinar que los modelos usados en el estado del arte no son los más eficientes, debido a que al cambiar la configuración geométrica es posible disminuir su peso y/o disminuir sus desplazamientos laterales. Este análisis fue posible debido a la identificación de patrones no lineales a través del modelo de red neuronal.

A través de los resultados obtenidos es posible entender los cambios de peso y los desplazamientos de la rejilla perimetral, así como conocer la eficiencia de la solución mediante el uso de la red neuronal y el ajuste de los parámetros geométricos analizados como el tamaño del módulo y la densidad de las diagonales.

La elección del arreglo que minimice el peso impacta directamente en la viabilidad del proyecto, permitiendo mantener la seguridad estructural, disminuyendo el costo de la estructura tanto en material como en mano de obra, manteniendo una vista estética del edificio.

Con base en los resultados se concluye que es posible utilizar la solución DG dentro de los edificios de altura media en México, esto debido a que la variación del peso

es similar entre soluciones DG y soluciones tradicionales de marcos contraventeados., con la ventaja arquitectónica que representa un DG.

Generalmente, se espera una mayor eficiencia “G” en edificios con dimensiones pequeñas en planta con respecto de su altura.

A pesar de la respuesta obtenida, los modelos de regresión de la red neuronal, reflejan una falta de casos de estudio que permitan extrapolar el uso de la red a cualquier geometría posible, por lo que se propone considerar para trabajos posteriores un análisis considerando configuraciones rectangulares, y no cuadrilaterales, irregularidades en planta y en elevación, así como la exploración de modelos de alturas mayores que permitan identificar la geometría límite entre el comportamiento de un diagrid altura media contra uno de gran altura.

## 9 REFERENCIAS

- Abd-Elhamed, A., Shaban, Y. & Mahmoud, S., 2018. Predicting Dynamic Response of Structures under Earthquake Loads Using Logical Analysis of Data. *MDPI Buildings*.
- AISC, 2022. *Specification for structural steel buildings*, s.l.: American Institute of Steel Construction.
- Ali, M. M. & Moon, K. S., 2007. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects.. *Architectural science review*, pp. 205-223.
- Asadi, E. & A. H., 2017. Diagrid: An innovative, sustainable, and efficient structural system. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, p. 26(8).
- Aswin Jeba Mahir, A. y otros, 2026. Fine-Tuning of Pattern net Artificial Neural Network for Classification Based Design of Porous Ceramic Matrix Based Burners: A Comparison of Mean Squared Error and Sum Absolute Error as Performance Function Under Different Hidden Neurons. *Heat Transfer*, Volumen 55, p. 683–707.
- Bojórquez, J., Tolentino, D., Ruiz, S. & Edén, B., 2016. Diseño sísmico preliminar de edificios de concreto reforzado usando redes neuronales artificiales. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*.
- CDMX, G., 2023. *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero*. Ciudad de México: Gobierno CDMX.
- CFE, 2015. *Manual de Diseño de Obras Civiles Sección C: Estructuras Diseño por Sismo*. Ciudad de México: IIE.
- Chopra, A. K., 2014. *Dinámica de estructuras*. Ciudad de México (traducción): Pearson Educación.

Computers and Structures, Inc. (CSI), 2023. *ETABS (Versión 22)*, s.l.: Computers and Structures, Inc..

Cord, M. & Cunningham, P., 2008. *Machine Learning Techniques for Multimedia*. Francia: Springer.

Du, K.-L., Leung, C.-S., Mow, W. H. & Swamy, M., 2022. Perceptron: Learning, Generalization, Model Selection, Fault Tolerance, and Role in the Deep Learning Era. *mathematics*, p. 10244730.

Graham, P., 2008. Displacement-based seismic design of structures. *Earthquake Spectra*, pp. 555-557.

Gupta, N., 2020. Artificial Neural Network. *Network and Complex Systems*, p. 31.

Hodson, T., 2022. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not.. *Geoscientific Model Development Discussions*, pp. 1-10.

INEGI, 2020. *Censo de Población y Vivienda*, Ciudad de México: s.n.

INEGI, 2020. *Encuesta Nacional de Vivienda*, Ciudad de México: INEGI.

Jahangiri, V. y otros, 2025. Machine learning-based prediction of seismic response of steel diagrid systems. *Structures*, p. 109791.

Jaimes, M. & Suárez, G., 2025. Estimation of Damage Scenarios in the Mexico City Basin Caused by Local Crustal Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 1907-1923.

Johan, L., 2007. *Investigation of Shear Lag Effect in High-rise Buildings*. [Arte] (Massachusetts Institute of Technology).

Kazemi, P., Khoraskani, R. & Tahsildoost, M., 2026. Exploring the Structural Performance of Diagrid Tall Buildings via Evaluation of Floor Plan Geometrical Parameters: A Comparative Study. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Volumen 34, p. e70027.

Kim, J. & Lee, Y.-H., 2010. Seismic performance evaluation of diagrid system buildings. *The structural design of tall and special buildings*.

Kim, N.-H., 2015. *Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. New York: Springer.

LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G., 2015. Deep Learning. *nature*, pp. 436-444.

López-Téllez, R. C., 2020. *Respuesta Inelástica con fines de diseño del sistema estructural de acero diagrid*, Ciudad de México: UAM.

Lu, X. L. X. Z. W. & Y. L., 2011. Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes. *Science China Technological Sciences*, pp. 2549-2560.

Mamin, A. y otros, 2020. The design of the overall stability of the Shukhov radio tower taking into account the local damage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869(5), p. 052061.

Maurya, R., Aggarwal, D., Gopalakrishnan, T. & Pandey, N.-N., 2023. Enhancing Deep Neural Network Convergence and Performance: A Hybrid Activation Function Approach by Combining ReLU and ELU Activation Function. *2023 Second International Conference on Informatics (ICI)*, pp. 1-5.

Mazloom, M. G. M. & G. M., 2019. Evaluating inelastic performance of mega-scale bracing systems in low-and medium-rise structures. *Asian Journal of Civil Engineering*, pp. 383-393.

Milton, M.-C., Moreno-Villanueva, M. & Espinoza-Jiménez, E., 2020. Mapping Vertical Urban Growth in Mexico City in a Seismic Risk Context. *International Journal of Safety and Security Engineering*, pp. 97-103.

Moon, K.-S., Connor, J. & Fernandez, J., 2007. DIAGRID STRUCTURAL SYSTEMS FOR TALL BUILDINGS CHARACTERISTICS AND METHODOLOGY FOR

PRELIMINARY DESIGN. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, pp. 205-230.

Nadith, S. y otros, 2018. Structural damage identification based on autoencoder neural networks and. *Engineering Structures*, pp. 13-28.

ONU, 2015. *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, Nueva York: s.n.

Patel, R., 2023. Exploring the Different Types of Loads in Structures. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, pp. 1402-1408.

Perez-Martinez, J., Horta-Rangel, J. M., Perez-Moreno, L. & Arjona-Catzim, I., 2025. Effect of shear lag in diagrid structures. *CONIIN*, 1(1), pp. 200-204.

Perez-Martinez, J., Horta-Rangel, J. M., Perez-Moreno, L. & Arjona-Catzim, I., 2025. Influence of Geometrical Configuration on the Dynamic Response of 5-Story Diagrid Structures. *Current Journal of Applied Science and Technology*, p. 147828.

Popescu, M. C. B. V. E. P.-P. L. & M. N., 2009. Multilayer perceptron and neural networks. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, pp. 579-588.

Robert McNeel & Associates, 2023. *Grasshopper*, Seattle, WA, Estados Unidos: Robert McNeel & Associates.

Saini, R., 2025. A Review on Artificial Neural Networks for Structural Analysis. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, p. 142.

Schmidhuber, J., 2015. Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, pp. 85-117.

Seo, J., 2024. Solving real-world optimization tasks using physics-informed neural computing. *Scientific Reports*, p. 202.

Shahhosseini, M., Hu, G. & Pham, H., 2022. Optimizing ensemble weights and hyperparameters of machine learning models for regression problems. *Machine Learning with Applications*, p. 100251.

Shah, M. I. M. S. V. & P. V. B., 2016. Comparative study of diagrid structures with conventional frame structures. *Int J Eng Res Appl*, pp. 22-29.

Sharifani, K. & Amini, M., 2023. Machine Learning and Deep Learning: A Review of Methods and Applications. *World Information Technology and Engineering Journal*, pp. volume 10, issue 07.

Sharma, N., Patel, R. & Verma, M., 2026. Optimization of Voronoi tessellation with diagrid & hexagrid using MATLAB. *Asian Journal of CIVIL ENGINEERING*, Volumen 27, pp. 2593-2608.

Sifón-Miralles, M., 2016. *Aplicación del CSM al diseño sísmico prestacional de estructuras aporticadas de hormigón armado: Comparación de los métodos FEMA EL y N2*. Valencia: s.n.

Sthapit, N., Shrestha, K. & Maskey, P., 2026. Diagrid Systems in High-Rise Reinforced Concrete Frame Structures. *Journal of Structural Design and Construction Practice*, 31(3).

Terán-Gilmore, A., Roeslin, S. & Tapia-Hernández, E., 2020. Displacement-based design of tall earthquake-resistant diagrid systems. *Journal of Building Engineering*, pp. 2352-7102.

Tiway, A. y otros, 2026. Optimizing lateral performance of a 60-story diagrid steel structure: influence of diagonal configuration and bracing strategies. *Building Pathology and Rehabilitation*, 11(34).

Vafaei, M., Alih, S. & Shad, H., 2018. Prediction of strain values in reinforcements and concrete of a RC frame using neural networks.. *International Journal of Advanced Structural Engineering* , pp. 10:29-35.

- Vhanmane, M. & M Bhanuse, M., 2020. Analysis of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings. *Journal of Computational Engineering and Physical Modeling*, pp. 21-33.
- Villarrubia, G., De Paz, J. F., Chamoso, P. & De la Prieta, F., 2018. Artificial neural networks used in optimization problems. *Neurocomputing*, pp. 10-16.
- Wang, B. y otros, 2026. Research on seismic performance of diagrid structures with energy-dissipating joint connections. *Journal of Building Engineering*, Volumen 125, p. 116145.
- Wang, B. & Liu, C., 2025. Intelligent design of high-rise diagrid structures using the Snow Ablation Optimizer. *Automation in Construction*, p. 106402.
- Wang, T. & Chen, H.-M., 2023. Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle. *Automation in Construction*, p. 104832.
- Yang, L. & Shami, A., 2020. On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice. *Neurocomputing*, pp. 295-316.
- Zaidi, S., Jaffer, N., Khan, K. & Maher, A., 2020. Categorization of Buildings Based on the Relative Effect of Lateral & Vertical Forces with Change in Height. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, pp. 19-24.
- Zhang, C., Zhao, F. & Liu, Y., 2012. Diagrid tube structures composed of straight diagonals with gradually varying angles. *The structural design of tall and special buildings*, pp. 283-295.
- Zhang, P. y otros, 2022. Variation Characteristics of Building Height Types in the Vertical Urban Expansion Process. *Polish Journal of Environmental Studies*, pp. 519-531.

Zhoong, C. & Christopoulos, C., 2022. Scaled shaking table testing of higher-mode effects on the seismic response of tall and slender structures. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, pp. 549-570.

## ANEXO 1

```
import os

import shutil

import numpy as np

import pandas as pd

from sklearn.model_selection import train_test_split

from sklearn.preprocessing import StandardScaler

import tensorflow as tf

from tensorflow import keras

from tensorflow.keras import layers, regularizers

from openpyxl import load_workbook

import matplotlib.pyplot as plt

from sklearn.metrics import r2_score

carpeta = r"C:\Users\guich\Desktop\Maestría\Tesis\Análisis DG tesis"

archivo_in = "Análisis diagrid tesis.xlsx"

ruta_in = os.path.join(carpeta, archivo_in)

archivo_out = "Análisis diagrid tesis_PRED.xlsx"

ruta_out = os.path.join(carpeta, archivo_out)

sheet_name = "REDN_DG"
```

```

df = pd.read_excel(ruta_in, sheet_name=sheet_name)

x_cols = ["entrada1", "entrada2", "entrada3", "entrada4"]

y_cols = ["salida1", "salida2"]

faltantes = [c for c in x_cols + y_cols if c not in df.columns]

if faltantes:

    raise ValueError(f"Faltan estas columnas en la hoja '{sheet_name}': {faltantes}")

X = df[x_cols].to_numpy(dtype=np.float32)

y = df[y_cols].to_numpy(dtype=np.float32)

print("X shape:", X.shape, "| y shape:", y.shape)

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(

    X, y, test_size=0.25, random_state=42

)

x_scaler = StandardScaler()

X_train_s = x_scaler.fit_transform(X_train)

X_test_s = x_scaler.transform(X_test)

y_scaler = StandardScaler()

```

```

y_train_s = y_scaler.fit_transform(y_train)

y_test_s = y_scaler.transform(y_test)

model = keras.Sequential([
    layers.Input(shape=(4,)),
    layers.Dense(16, activation="relu", kernel_regularizer=regularizers.l2(1e-4)),
    layers.Dense(8, activation="relu", kernel_regularizer=regularizers.l2(1e-4)),
    layers.Dense(2)
])

model.compile(
    optimizer=keras.optimizers.Adam(learning_rate=1e-3),
    loss="mse",
    metrics=[keras.metrics.MeanAbsoluteError(name="mae")]
)

model.summary()

early = keras.callbacks.EarlyStopping(
    monitor="val_loss",
    patience=25,
    restore_best_weights=True
)

```

```
history = model.fit(  
    X_train_s, y_train_s,  
    validation_split=0.2,  
    epochs=2000,  
    batch_size=8,  
    callbacks=[early],  
    verbose=1  
)
```

```
loss, mae = model.evaluate(X_test_s, y_test_s, verbose=0)  
print(f"Test MSE (scaled): {loss:.6f} | Test MAE (scaled): {mae:.6f}")
```

```
X_all_s = x_scaler.transform(X)  
y_pred_s = model.predict(X_all_s, verbose=0)  
y_pred = y_scaler.inverse_transform(y_pred_s)
```

```
shutil.copy2(ruta_in, ruta_out)  
wb = load_workbook(ruta_out)  
ws = wb[sheet_name]
```

```

ws["J1"] = "salida1_pred"

ws["K1"] = "salida2_pred"

for i in range(y_pred.shape[0]):

    fila_excel = i + 2

    ws[f"J{fila_excel}"] = float(y_pred[i, 0])

    ws[f"K{fila_excel}"] = float(y_pred[i, 1])

wb.save(ruta_out)

print("Listo. Archivo de salida con predicciones:", ruta_out)

len(history.history["loss"])

y_test_pred_s = model.predict(X_test_s, verbose=0)

y_test_pred = y_scaler.inverse_transform(y_test_pred_s)

mae_real_por_salida = np.mean(np.abs(y_test_pred - y_test), axis=0)

print("MAE real [salida1, salida2]:", mae_real_por_salida)

mae_s1 = np.mean(np.abs(y_test_pred[:, 0] - y_test[:, 0]))

r2_s1 = r2_score(y_test[:, 0], y_test_pred[:, 0])

plt.figure()

```

```

plt.scatter(y_test[:, 0], y_test_pred[:, 0])

plt.plot(
    [y_test[:, 0].min(), y_test[:, 0].max()],
    [y_test[:, 0].min(), y_test[:, 0].max()]
)

plt.xlabel("Valor real - salida 1")

plt.ylabel("Valor predicho - salida 1")

plt.title("Salida 1: Real vs Predicho")

plt.grid(True)

plt.text(
    0.05, 0.95,
    f"MAE = {mae_s1:.3f}\nR² = {r2_s1:.3f}",
    transform=plt.gca().transAxes,
    verticalalignment="top"
)

plt.show()

rango_min = 0.00154519

rango_max = 0.81848015

r2 = r2_s1

```

```
mae = mae_s1

porcentaje_rango = mae / (rango_max - rango_min) * 100

texto_resultado = (

    f"El modelo presenta un coeficiente de determinación de {r2:.3f}, "

    f"lo que indica que explica aproximadamente el {r2*100:.1f}% de la variabilidad "

    f"de la salida. El error absoluto medio es de {mae:.3f}, lo cual representa "

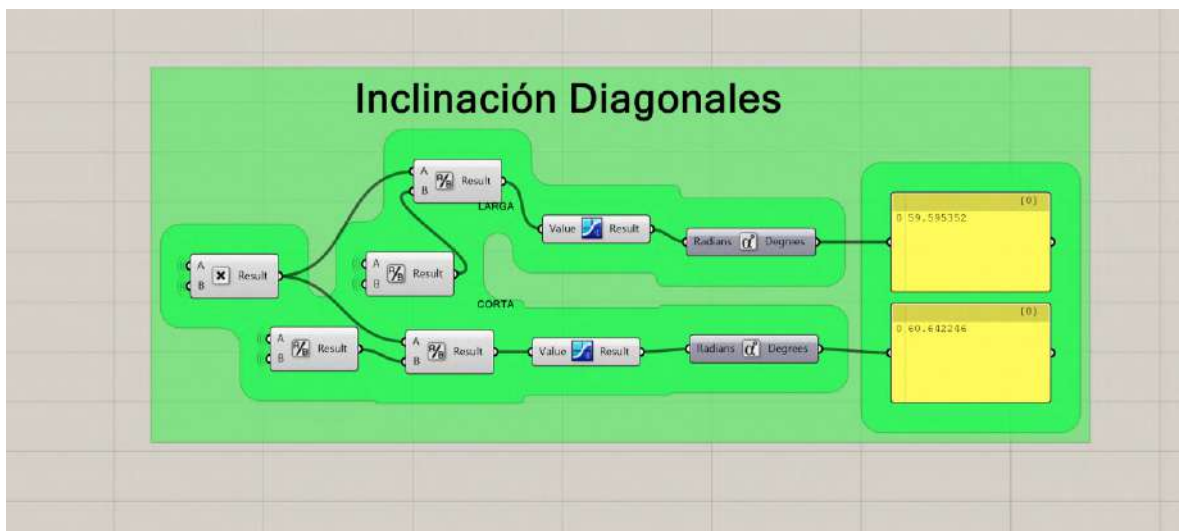
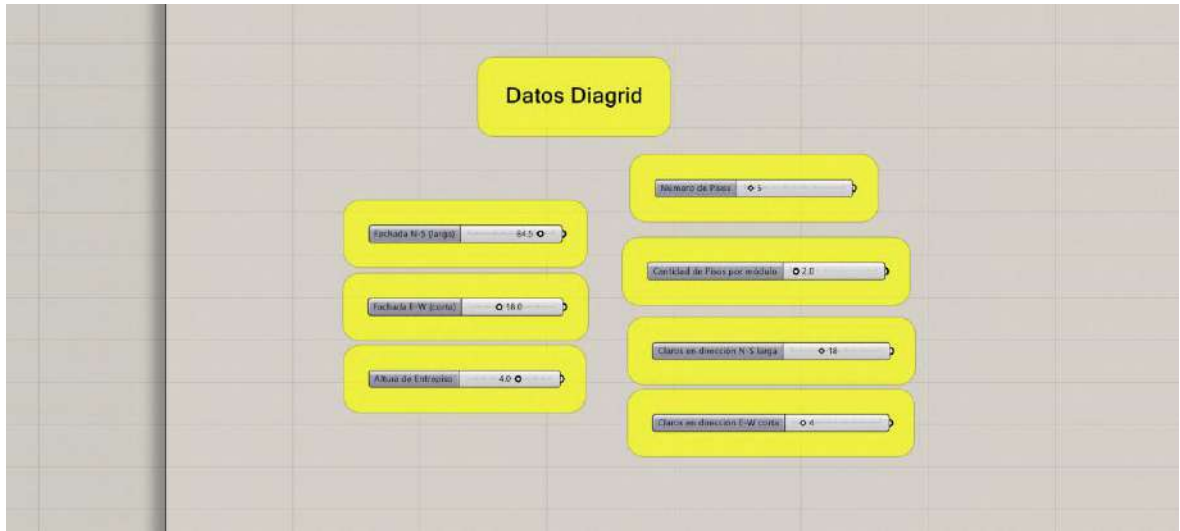
    f"alrededor del {porcentaje_rango:.1f}% del rango observado "

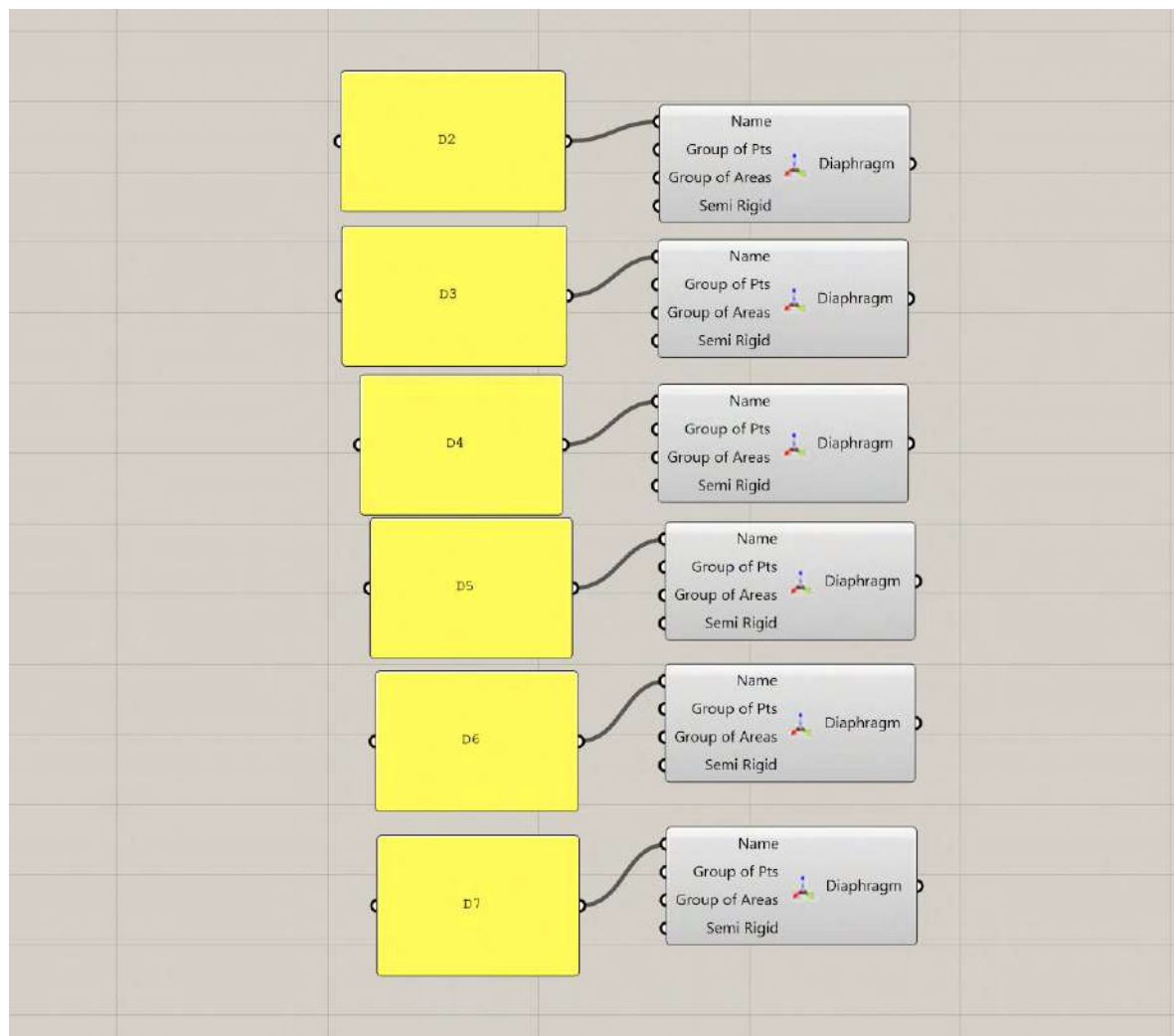
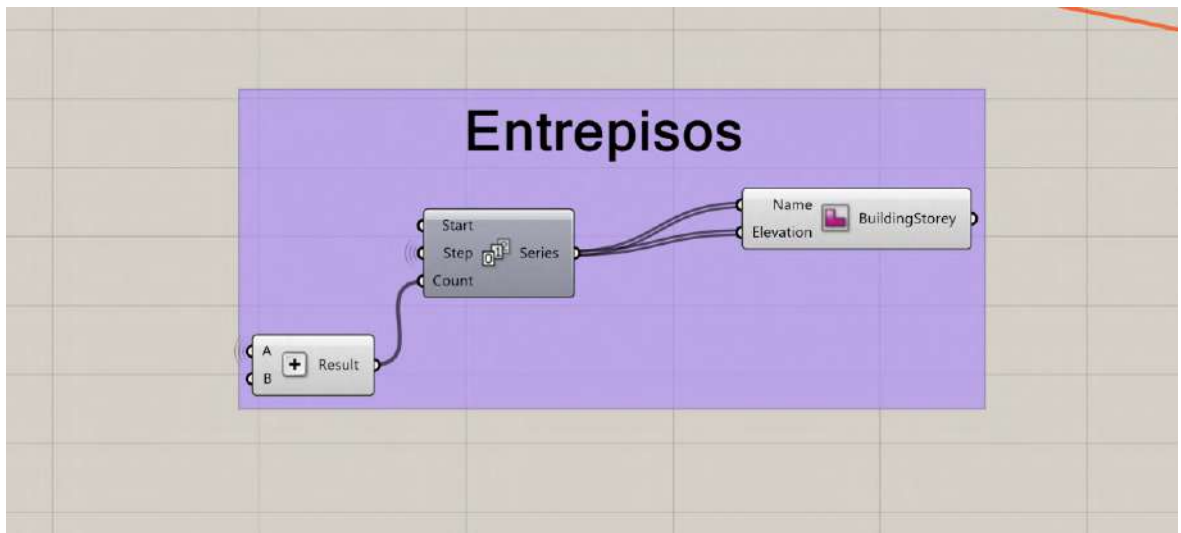
    f"({rango_min:.3f}–{rango_max:.3f})."

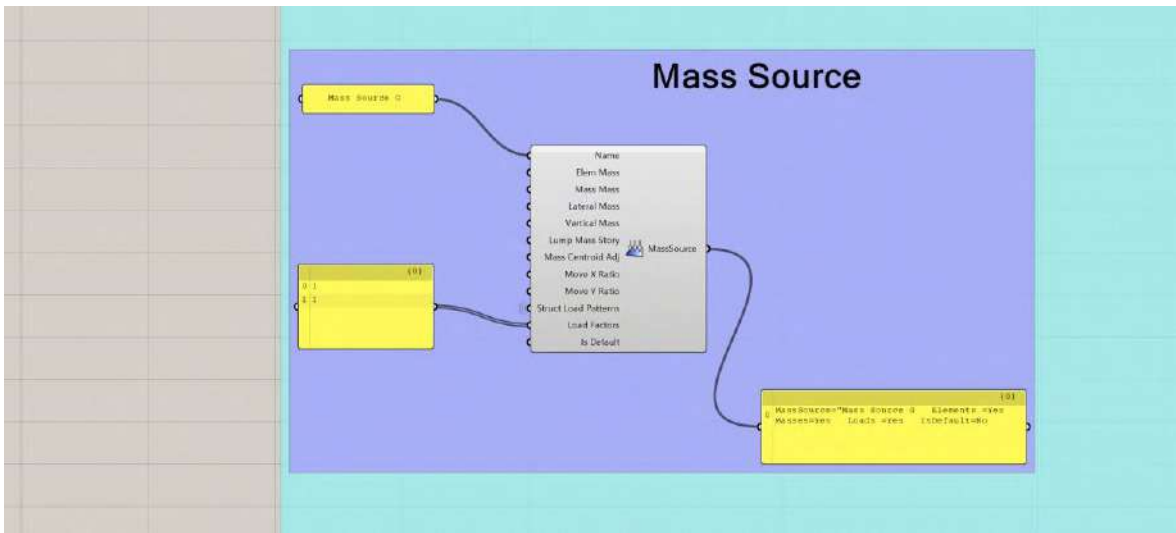
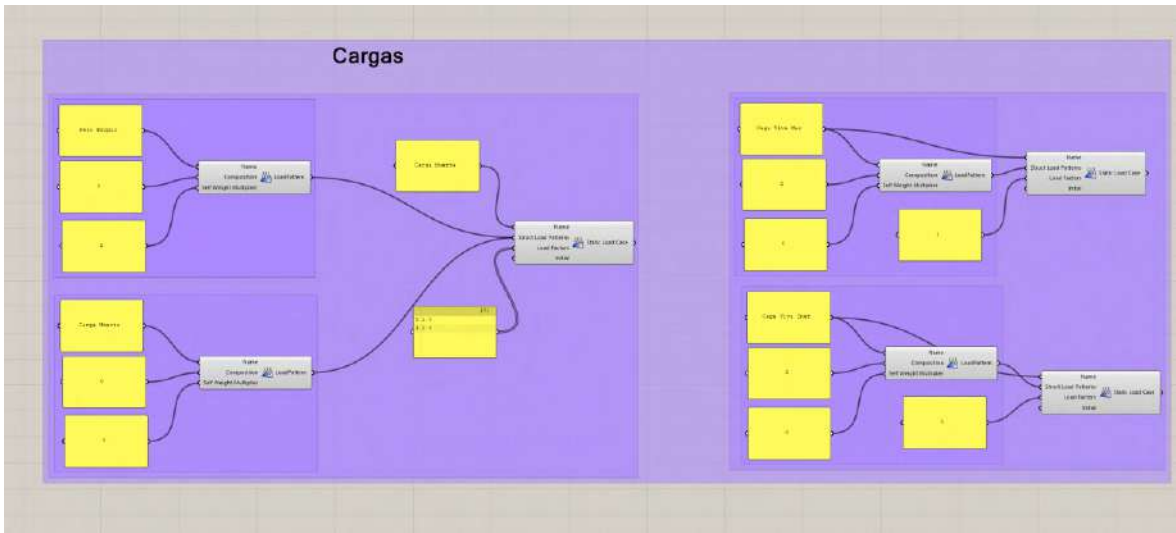
)

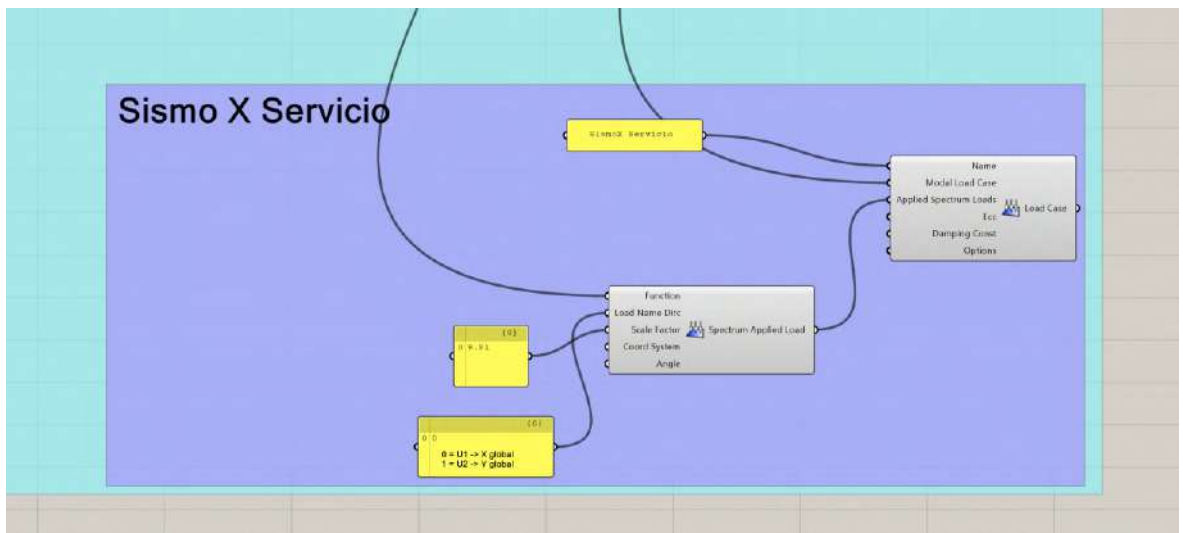
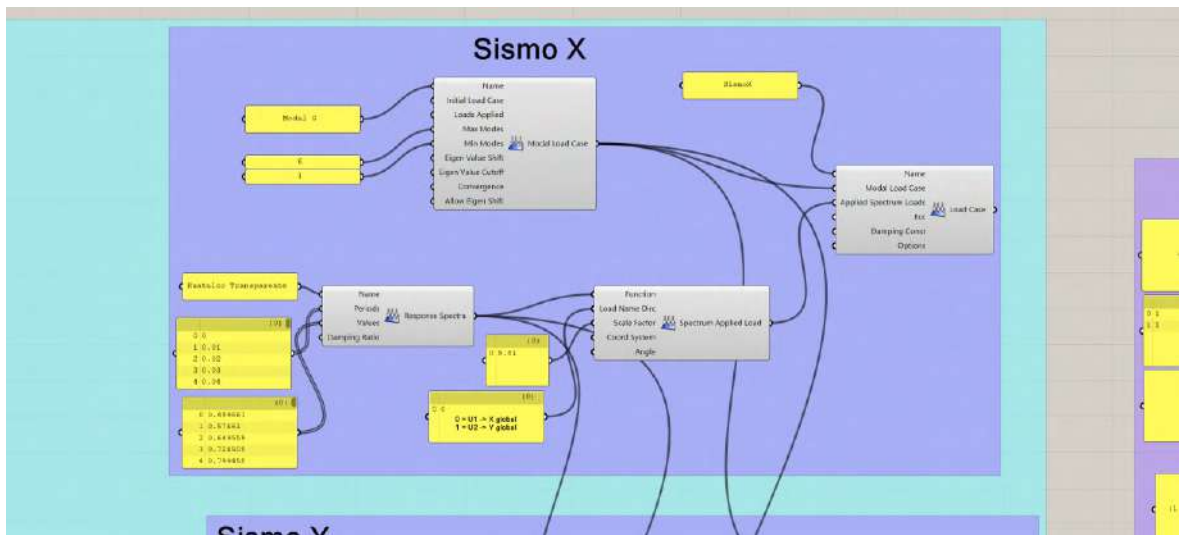
print(texto_resultado)
```

## ANEXO 2









# Combinaciones de Carga

