



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA TORRE DE ACERO
MEDIANTE EL MÉTODO PUSHOVER ADAPTATIVO**

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. José Alfredo Quesada Tinoco

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

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 licenciatario 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 licenciatario.

 **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.



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

Diseño estructural de una torre de acero
mediante el método Pushover adaptativo

Tesis

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

Presenta:

Ing. José Alfredo Quesada Tinoco

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Secretario

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Vocal

Dr. Enrique Rico García
Suplente

M. en C. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Mayo de 2025
México

RESUMEN

El presente trabajo aborda el diseño estructural de torres de acero mediante el uso del método *Pushover* adaptativo, con el objetivo de proporcionar una evaluación más precisa del comportamiento estructural bajo cargas sísmicas. En el contexto sísmico de México, donde la interacción de placas tectónicas genera una alta vulnerabilidad a terremotos, se desarrolló una herramienta computacional para implementar el método *Pushover* adaptativo y analizar su desempeño frente a métodos tradicionales y dinámicos. La investigación se centró en el análisis de tres configuraciones de torres de acero destinadas a uso habitacional, con alturas de 4, 6 y 8 niveles, diseñadas bajo normativas mexicanas. Para las simulaciones se emplearon perfiles específicos para columnas y vigas, garantizando una representación realista de las condiciones estructurales típicas. Además, se seleccionaron registros sísmicos representativos del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Mw 7.1) en México, utilizado como entrada para los análisis. El método *Pushover* adaptativo demostró ventajas significativas en comparación con el método tradicional, particularmente en estructuras más altas. Las curvas *Pushover* y los análisis de distorsiones angulares evidenciaron que el método adaptativo es más conservador, distribuyendo mejor las deformaciones plásticas a lo largo de la estructura, lo que resulta en un comportamiento más realista y seguro, especialmente relevante para zonas de alta sismicidad. Por otro lado, el análisis tiempo-historia proporcionó una evaluación más precisa de la respuesta dinámica de las estructuras, destacando la capacidad del método adaptativo para aproximarse a estas respuestas con menor error que el método tradicional. Se concluye que el método adaptativo cumple con los criterios de seguridad establecidos por la normativa y aumenta la precisión en al menos un 5%, especialmente en estructuras altas. Finalmente, se sientan las bases para que en futuros análisis sea posible implementar este método en estructuras irregulares y configuraciones más complejas, explorando su potencial como herramienta estándar para el diseño sismorresistente en regiones sísmicas como México.

(Palabras clave: *Pushover* adaptativo, cálculo estructural, estructuras de acero, análisis sísmico)

ABSTRACT

This study focuses on the structural design of steel towers using the Adaptive *Pushover* method, aiming to provide a more accurate assessment of structural behavior under seismic loads. In the seismic context of Mexico, where tectonic plate interactions generate high earthquake vulnerability, a computational tool was developed to implement the Adaptive *Pushover* method and analyze its performance compared to traditional and dynamic methods. The research analyzed three configurations of steel towers for residential use, with heights of 4, 6, and 8 stories, designed according to Mexican building codes. Specific profiles were used for columns and beams to ensure a realistic representation of typical structural conditions. Additionally, seismic records from the September 19, 2017, earthquake (Mw 7.1) in Mexico were selected as input for the analyses. The Adaptive *Pushover* method showed significant advantages over the traditional method, particularly for taller structures. *Pushover* curves and angular distortion analyses revealed that the adaptive method is more conservative, distributing plastic deformations more effectively throughout the structure. This leads to a more balanced and safer response, especially relevant to high-seismicity regions. Furthermore, the time-history analysis provided a more precise evaluation of the dynamic response of the structures, highlighting the adaptive method's ability to approximate these responses with less error than the traditional method. The study concludes that the adaptive method complies with safety standards and improves accuracy by at least 5%, especially in taller structures. Finally, the groundwork is laid for future studies to apply this method to irregular structures and more complex configurations, exploring its potential as a standard tool for seismic-resistant design in seismic regions like Mexico.

(Keywords: Adaptive *Pushover*, structural analysis, steel structures, seismic analysis)

DEDICATORIAS

A mis padres, por su amor incondicional, por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo y la constancia, y por estar siempre presentes, incluso en los momentos más difíciles. Este logro también es suyo.

A mi hermana, por su compañía, apoyo y alegría a lo largo de este camino. Gracias por estar ahí en cada paso.

A mis abuelos, por su sabiduría, cariño y enseñanzas que me han acompañado desde la infancia. Su legado vive en cada logro que alcanzo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el respaldo económico brindado a través de la beca que me permitió continuar con mis estudios de posgrado. Su apoyo fue fundamental para la realización de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por ofrecerme los recursos, la formación académica y el entorno necesario para desarrollar este proyecto. Me siento profundamente agradecido por haber formado parte de esta institución.

Al Dr. Francisco Pérez, mi asesor de tesis, por su valiosa guía, paciencia y compromiso a lo largo de este proceso. Su acompañamiento fue esencial para lograr los objetivos de esta investigación.

A los sinodales de este trabajo, por el tiempo dedicado a su revisión, así como por sus observaciones y aportaciones, que enriquecieron de manera significativa el desarrollo de esta tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	4
2. ANTECEDENTES	6
2.1 HISTORIA DEL MÉTODO.....	7
2.2 ALGUNAS APLICACIONES DEL MÉTODO <i>PUSHOVER</i>.....	10
2.3 DESARROLLO TEÓRICO DEL MÉTODO <i>PUSHOVER</i> ADAPTATIVO.....	11
2.4 MÉTODO DEL COEFICIENTE DE DESPLAZAMIENTO.....	14
2.5 MÉTODO DEL COEFICIENTE DE DESPLAZAMIENTO MEJORADO	16
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	22
3.1 HIPÓTESIS	22
3.2 OBJETIVO GENERAL	22
3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
4. METODOLOGÍA.....	23
4.1 DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.....	24
4.1.1 Codificación del programa en MATLAB.....	24
4.1.2 Diseño del sistema para la integración de cargas.	25
4.1.3 Validación y confiabilidad mediante simulaciones.	26
4.2 ANÁLISIS DE UN CASO DE ESTUDIO REPRESENTATIVO.....	27

4.2.1	<i>Diseño de la topología estructural de la torre de acero.</i>	27
4.2.2	<i>Selección de datos sísmicos reales.</i>	29
4.2.3	<i>Aplicación del análisis Pushover.</i>	30
4.2.4	<i>Comparación preliminar de curvas pushover.</i>	32
4.3	COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL MÉTODO	33
4.3.1	<i>Analisis tiempo-historia del caso de estudio.</i>	33
4.3.2	<i>Comparación de los resultados</i>	35
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
5.1	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL <i>PUSHOVER</i>	36
5.1.1	<i>Codificación del programa en MATLAB</i>	36
5.1.2	<i>Validación y confiabilidad mediante simulaciones.</i>	37
5.2	CASO DE ESTUDIO REPRESENTATIVO	38
5.2.1	<i>Diseño de la topología estructural de la torre de acero.</i>	38
5.2.2	<i>Aplicación del análisis Pushover.</i>	38
5.2.3	<i>Comparación preliminar de curvas pushover.</i>	39
5.3	COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL MÉTODO	39
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
7.	REFERENCIAS	48
	APÉNDICE	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de los diferentes tipos de análisis sísmicos para estructuras	6
Figura 2. Línea del tiempo del desarrollo de análisis <i>Pushover</i>	9
Figura 3. Representación gráfica del método del coeficiente de desplazamiento.....	15
Figura 4. Método de Actualización Total	21
Figura 5. Diagrama de la metodología.....	23
Figura 6. Curva <i>Pushover</i> obtenida de MATLAB.....	26
Figura 7. Marcos de 4, 6 y 8 niveles analizados.	28
Figura 8. Acelerograma del sismo elegido, estación IDEI PATIO 5.....	30
Figura 9. Zona intensa de interés usada para este trabajo.....	30
Figura 10. Metodología del <i>Pushover</i> tradicional.....	31
Figura 11. Metodología del <i>pushover</i> Adaptativo.	32
Figura 12. Curvas <i>pushover</i>	33
Figura 13. Gráfica de histéresis.	34
Figura 14. Interfaz de la herramienta computacional	36
Figura 15. Interfaz, ejemplo de Torre de 4 niveles	37
Figura 16. Curva <i>Pushover</i> obtenida en MATLAB.....	38
Figura 17. Gráfica comparativa de torre de 8 niveles	40
Figura 18. Gráfica comparativa de torre de 6 niveles.....	41
Figura 19. Gráfica comparativa de torre de 4 niveles.....	42

Figura 20. Distorsiones angulares de la torre de 4 niveles	44
Figura 21. Distorsiones angulares de la torre de 6 niveles	45
Figura 22. Distorsiones angulares de la torre de 8 niveles	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nombres y coordenadas de los nodos.....	24
Tabla 2. Nombramiento y características de los elementos de la estructura.....	25
Tabla 3. Configuraciones geométricas de las torres	28
Tabla 4. Comparación de precisión	43

1. INTRODUCCIÓN

El diseño estructural es un campo de la ingeniería que utiliza técnicas de optimización matemática para seleccionar la forma y los tamaños de los miembros estructurales (Papalambros & Chirehdast, 2020), es un proceso mediante el cual se planifican y se detallan las características de una estructura para asegurar que pueda soportar las cargas y las fuerzas a las que estará expuesta durante su vida útil. Este proceso implica la selección de materiales, el dimensionamiento de los elementos estructurales, y el análisis de cómo se comportará la estructura bajo diversas condiciones de carga.

Uno de los materiales más utilizados en el diseño estructural es el acero, debido a sus características flexibles, sostenibles, rentables y versátiles, lo que lo hace adecuado para varios tipos de estructuras (De'Nan et al., 2023). Debido a sus propiedades mecánicas permite que las estructuras de acero sean capaces de resistir grandes cargas y deformarse antes de una falla estructural. Además, el acero es un material versátil que se puede moldear y combinar de diversas formas, lo que lo convierte en una opción ideal para estructuras que deben ser seguras, duraderas, y capaces de resistir los efectos producidos por eventos sísmicos.

México es un caso particular de regiones en el mundo con alta frecuencia de ocurrencia de eventos sísmicos, al encontrarse en la zona de interacción de cinco placas tectónicas, por lo tanto, la seguridad sísmica de las edificaciones es de importancia crítica. La capacidad de las estructuras para resistir los efectos producidos por un sismo es un aspecto esencial en la prevención de pérdidas humanas y materiales.

Para la evaluación de la respuesta estructural bajo cargas sísmicas, se han desarrollado diferentes acercamientos y metodologías, algunas de las cuales se mencionan a continuación.

Los análisis de historia temporal no lineal son los más precisos para estimar las demandas sísmicas, pero su complejidad matemática y altos requisitos computacionales limitan su uso en aplicaciones de ingeniería rutinarias (Kuria & Kegyes-Brassai, 2023), por lo que es más común utilizar métodos como los análisis estáticos, que tienen menores requerimientos.

Entre estos métodos, el análisis *Pushover* se ha utilizado ampliamente debido a su simplicidad y eficiencia computacional. Sin embargo, este método tiene limitaciones significativas al asumir que las distribuciones de carga son invariables a lo largo de la respuesta estructural, lo cual no refleja adecuadamente la naturaleza real dinámica y compleja de los sismos.

Esta metodología convencional consiste en aplicar un patrón de carga lateral con incrementos constantes a lo largo de la altura de la estructura, lo que plantea muchas preguntas sobre la validez de estos perfiles de fuerza, dado que las cargas iniciales aplicadas a la estructura, inducidas por un terremoto, dependen del historial de carga (Rahmani et al., 2019).

Además, el análisis *Pushover* tradicional por lo general, subestima la influencia de los modos superiores de vibración, lo que puede llevar a una evaluación imprecisa de la demanda sísmica, especialmente en estructuras de gran altura y complejidad. Para abordar estas limitaciones, se han propuesto métodos más avanzados, como el análisis *Pushover* adaptativo y multimodal, que intentan capturar de manera más realista el comportamiento inelástico y los cambios en las características dinámicas de la estructura durante un evento sísmico. Estos métodos buscan mejorar la precisión en la estimación de desplazamientos y otras variables de respuesta, aunque su implementación puede ser más complicada y requerir mayor capacidad computacional.

Sin embargo, aún se necesita una comparación más exhaustiva de un método estático más avanzado con métodos tradicionales y dinámicos para confirmar su efectividad en diversos contextos estructurales, de esta forma, es necesario encontrar una metodología que sea capaz de evaluar los desplazamientos estructurales de manera más precisa y realista, considerando las limitaciones de los métodos actuales y aprovechando los avances recientes en el análisis estructural.

De lo anterior, los resultados del presente trabajo fueron una herramienta computacional capaz de utilizar la metodología *pushover* adaptativo, el análisis de tres casos de estudio de

diferentes niveles y la comparación de diferentes parámetros de diseño obtenidos mediante el método *Pushover* adaptativo respecto a un método tradicional.

En las siguientes secciones se presenta la justificación del proyecto donde se detalla el porqué de la investigación, además de una breve descripción del problema, que incluye un contexto general de la actualidad de la situación y el que es lo que debería estar pasando.

En el Capítulo 2, se presentan los antecedentes relevantes para el desarrollo de esta investigación, proporcionando el contexto necesario para entender la importancia del estudio. Posteriormente, en el Capítulo 3, se formula la hipótesis central y se detallan los objetivos que se persiguen alcanzar a lo largo del trabajo. Después, en el Capítulo 4 se describe la metodología empleada para cumplir con los objetivos establecidos en el Capítulo 3, explicando los pasos y procedimientos seguidos en la investigación. Durante el Capítulo 5, se discuten los resultados obtenidos, se realiza una comparación entre los diferentes métodos utilizados, y se presentan los resultados en forma de gráficos que ilustran los hallazgos principales. Finalmente, en el Capítulo 6, se exponen las conclusiones derivadas del estudio y se ofrecen recomendaciones para futuras investigaciones en esta área.

1.1 Justificación

Este proyecto tuvo como objetivo desarrollar una herramienta computacional avanzada para realizar análisis *pushover* adaptativo en estructuras de acero. A través de esta herramienta, se buscó determinar de manera precisa los desplazamientos en la estructura cuando es sometida a cargas sísmicas, permitiendo así evaluar su respuesta no lineal y su capacidad de deformación antes de alcanzar el colapso.

México es un país altamente vulnerable a los sismos debido a la interacción de cinco placas tectónicas, lo que genera una intensa actividad sísmica en gran parte del territorio nacional. Esto hace que la evaluación y el diseño de estructuras resistentes a terremotos sea esencial para garantizar la seguridad y el bienestar de la población. Aunque los métodos de diseño estático no lineal, como el análisis *pushover* convencional, son comunes, estos suelen incluir muchas simplificaciones que no capturan de manera adecuada el comportamiento real de las estructuras bajo cargas sísmicas. Estas simplificaciones pueden llevar a una evaluación

errónea de la capacidad de la estructura, lo que incrementa el riesgo de falla. Por ello, este proyecto buscó implementar un análisis *pushover* adaptativo, que ofrecerá una representación más precisa y detallada del comportamiento estructural.

La herramienta desarrollada permitió obtener datos cruciales para guiar la metodología de diseño estructural en México, asegurando que las estructuras cumplan con las normativas de seguridad y estén mejor preparadas para resistir los efectos de un sismo. Se espera que los resultados obtenidos a partir de esta herramienta orienten a la ingeniería estructural hacia la posibilidad de mejorar los métodos de diseño actuales, haciéndolos más precisos y efectivos para enfrentar las condiciones sísmicas específicas del país.

1.2 Descripción del problema

México es un país con una alta actividad sísmica debido a su ubicación en una de las zonas tectónicas más activas del mundo. Esta compleja situación tectónica coloca a México en un riesgo constante de terremotos de alta magnitud, lo que hace imprescindible el avance en la ingeniería estructural para garantizar la seguridad de las edificaciones y la protección de la población, como mencionan Avila & Gutierrez (2009) en países con alta actividad sísmica la ingeniería debe presentar avances significativos. Los métodos tradicionales de análisis estructural, como el análisis *pushover*, aunque útiles, presentan muchas simplificaciones que no capturan con precisión la complejidad de la respuesta estructural durante un sismo. Estas simplificaciones pueden comprometer la seguridad estructural al subestimar la demanda sísmica real.

Por otro lado, los métodos más precisos, como el análisis tiempo historia no lineal, ofrecen una mejor estimación de la respuesta sísmica. Sin embargo, su aplicación está limitada debido a los altos costos computacionales y de tiempo que requieren. Esto deja un vacío en la necesidad de métodos de análisis que, sin sacrificar la precisión, sean también eficientes y prácticos para su uso en el diseño sismorresistente.

Debido al contexto sísmico de México, es fundamental avanzar en el desarrollo y validación de métodos de análisis que equilibren precisión y eficiencia. En particular, la evaluación y mejora de métodos recientes, como el análisis *Pushover* adaptativo y

multimodal, es esencial para optimizar el diseño de estructuras capaces de resistir mejor los sismos y reducir el riesgo de desastres en un país donde la actividad sísmica es una constante amenaza.

Dado el rápido avance en la capacidad de computación y el acceso a herramientas más potentes, es crucial que el campo de la ingeniería estructural evolucione hacia el uso de métodos de análisis cada vez más complejos y avanzados. Estos métodos, como el análisis *Pushover* adaptativo y multimodal, permiten capturar con mayor precisión la respuesta dinámica de las estructuras bajo condiciones sísmicas. Al aprovechar estas tecnologías, es posible realizar simulaciones más detalladas y realistas, lo que contribuye a un diseño sismorresistente más robusto y seguro. La integración de estas técnicas en la práctica del diseño estructural se vuelve cada vez más viable y necesaria, permitiendo optimizar la resistencia de las edificaciones frente a los riesgos sísmicos en regiones altamente vulnerables como México.

2. ANTECEDENTES

En la ingeniería estructural, el análisis sísmico se clasifica en dos categorías principales: estático y dinámico (Kuria & Kegyes-Brassai, 2023). Dentro de los análisis estáticos, se encuentran los métodos lineales y no lineales, los análisis lineales asumen que la estructura se comporta de manera elástica y no experimenta grandes deformaciones. En contraste, los análisis no lineales consideran que la estructura puede experimentar deformaciones significativas y cambios en su comportamiento durante un sismo. En el análisis dinámico, también existen enfoques lineales y no lineales, como se puede ver en la Figura 1. Los métodos dinámicos lineales suelen basarse en la teoría modal, mientras que los métodos dinámicos no lineales pueden incluir el análisis de tiempo historia no lineal (NTH) para capturar de manera más precisa la respuesta estructural bajo condiciones sísmicas extremas.

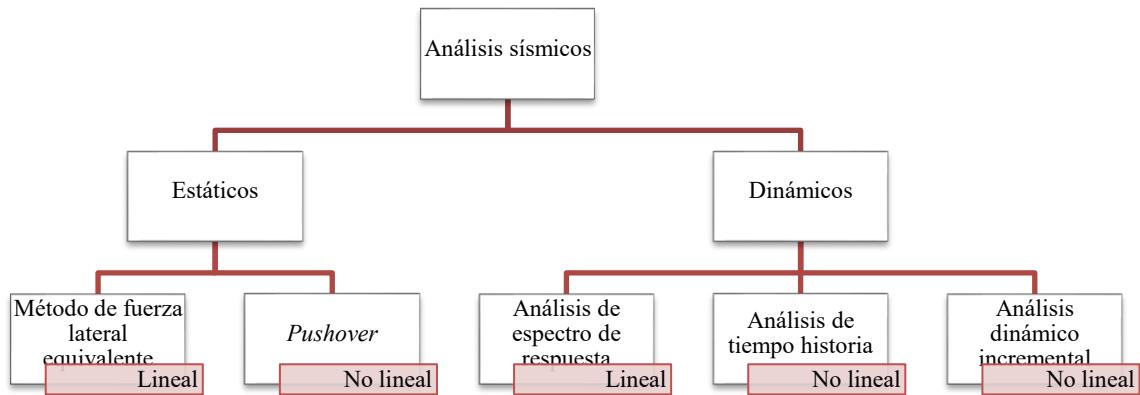


Figura 1. Mapa de los diferentes tipos de análisis sísmicos para estructuras

El método *Pushover* ha sido ampliamente utilizado en la ingeniería estructural para evaluar el desempeño sísmico de edificaciones. Este método estático no lineal permite aplicar un patrón de carga lateral creciente a una estructura hasta alcanzar su capacidad última. Inicialmente, el método *Pushover* se desarrolló como una herramienta simplificada, pero

efectiva, para obtener una visión global de la respuesta de la estructura ante cargas sísmicas severas. Sin embargo, el enfoque tradicional de este método tiene limitaciones significativas que han motivado la evolución hacia métodos más sofisticados, como el *Pushover* adaptativo.

A continuación, se presenta una visión general de los métodos de análisis sísmico, comenzando con una breve historia del desarrollo de los métodos que serán discutidos. Primero, se aborda el desarrollo y las diversas aplicaciones del método *Pushover* adaptativo, luego, se ofrece un desarrollo teórico del método *Pushover* adaptativo, así como una descripción detallada del diseño por desempeño. Finalmente, se explora el diseño por desempeño mejorado, destacando sus avances y diferencias con respecto a las técnicas anteriores.

2.1 Historia del método

La suposición de un comportamiento elástico lineal ha sido fundamental en las evaluaciones de respuesta sísmica a lo largo de los años. Sin embargo, esta premisa no siempre logra estimar con precisión el daño estructural real, como señala Shehu, (2021). Para abordar esta limitación, se requieren métodos de análisis más precisos que consideren las complejidades inherentes de las estructuras y las demandas sísmicas. Aunque el análisis dinámico por historia de tiempo es uno de los métodos más detallados y exactos, su uso en aplicaciones regulares está limitado por la complejidad del procedimiento y la necesidad de modelos detallados de múltiples grados de libertad (MDOF).

En respuesta a estos desafíos, el análisis estático no lineal por *pushover* ha surgido como una alternativa más simple, ganando popularidad para predecir la resistencia lateral y la deformación inelástica de las estructuras. No obstante, también requiere el uso de modelos MDOF detallados (Zameeruddin & Sangle, 2021). Este método, aunque útil, enfrenta limitaciones cuando se trata de estructuras complejas o de efectos de modos superiores, lo que llevó al desarrollo de métodos más avanzados para mejorar su precisión.

La historia del análisis *pushover* comienza como un método simplificado y práctico, diseñado para proporcionar una visión global del comportamiento estructural bajo cargas sísmicas severas. Su popularidad radica en la facilidad con la que puede aplicarse a una

estructura, incrementando las cargas de manera gradual hasta alcanzar la capacidad última del sistema. Sin embargo, a medida que la complejidad de las estructuras y la magnitud de los eventos sísmicos aumentaba, se hizo evidente que el enfoque tradicional del *pushover* tenía limitaciones significativas, particularmente cuando los efectos inelásticos y de los modos superiores eran importantes.

Ante estas deficiencias, surgieron métodos más sofisticados como el análisis *pushover* modal (MPA) y sus variantes, como el análisis modal modificado (MMPA) y el análisis de límite superior (UBPA). Estos avances introdujeron una mayor precisión en la estimación de las demandas sísmicas, pero también incrementaron la complejidad computacional y de modelado. A pesar de ello, estos métodos se consolidaron como herramientas clave para el diseño sísmico de estructuras más robustas.

Posteriormente, para continuar mejorando la precisión en la estimación de las demandas sísmicas inelásticas, se desarrollaron procedimientos *pushover* adaptativos. Estos métodos, a diferencia del enfoque tradicional, ajustan los vectores de carga de manera progresiva durante la fase inelástica para reflejar los cambios en los atributos modales del sistema. Entre los avances más recientes, se destacan los métodos como la combinación modal adaptativa (AMC), que han mostrado un gran potencial para proporcionar estimaciones más realistas y precisas de las demandas sísmicas, como se puede ver en la Figura 2.

Los algoritmos no lineales que emplean datos de análisis *pushover*, en particular los procedimientos adaptativos, están siendo integrados en las normativas de ingeniería basada en el desempeño (Pednekar et al., 2015). Esto marca un hito en la evolución del análisis estructural sísmico, ya que no solo se mejora la precisión, sino que también se refuerza la capacidad de los ingenieros para diseñar estructuras más seguras y eficientes. Los métodos de análisis sísmico se dividen ahora en las categorías de estáticos y dinámicos, y cada una de ellas se subdivide en procedimientos lineales y no lineales, como se puede ver en la Figura 1. La técnica estática lineal sigue siendo ampliamente adoptada debido a su simplicidad, mientras que las técnicas dinámicas lineales ofrecen una variedad de enfoques para analizar las respuestas estructurales que cambian con el tiempo durante los eventos sísmicos. Sin

embargo, es en los métodos no lineales, tanto estáticos como dinámicos, donde se encuentran las herramientas más avanzadas y precisas para enfrentar los desafíos actuales en el diseño sísmico.

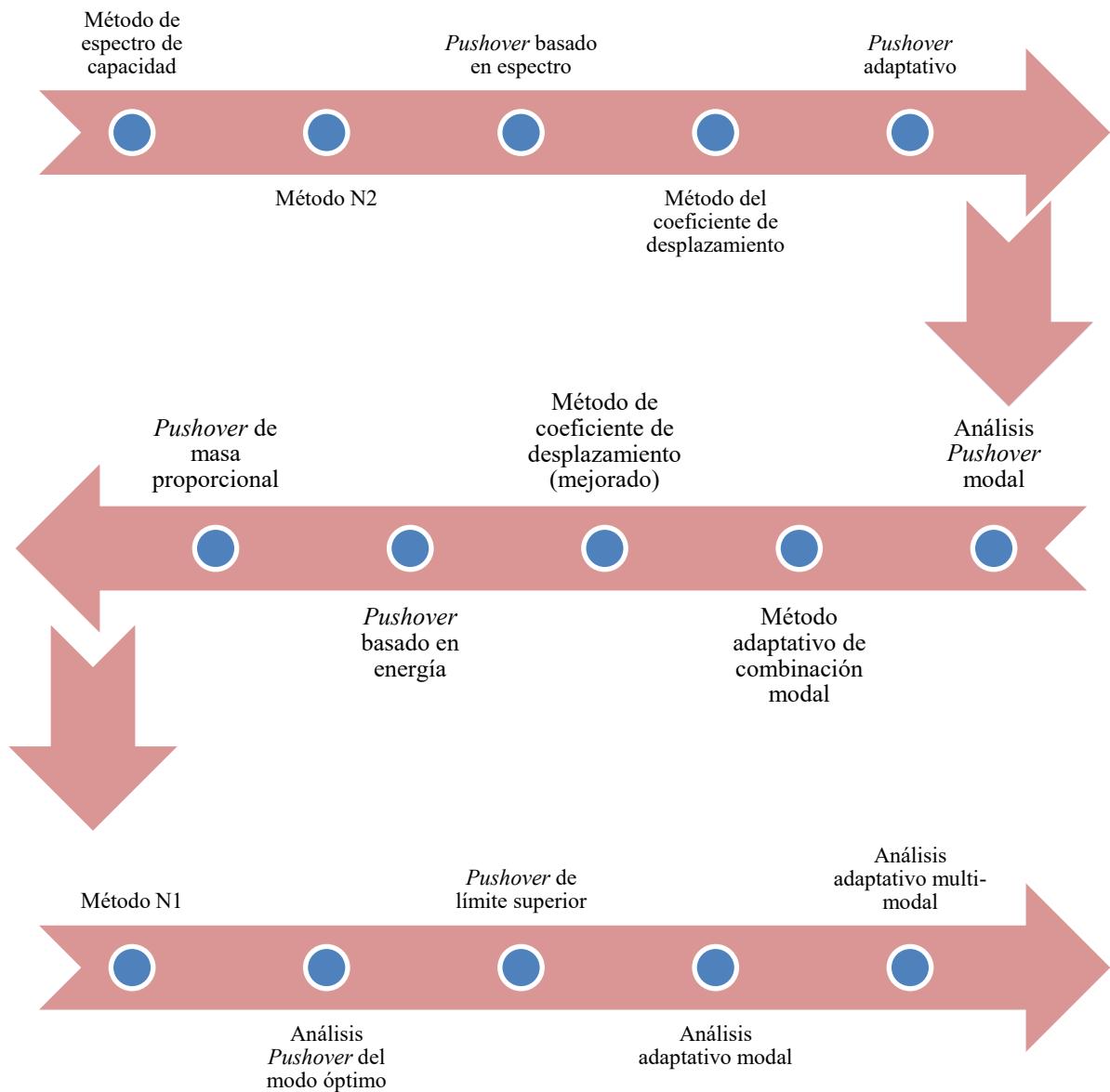


Figura 2. Línea del tiempo del desarrollo de análisis *Pushover*

2.2 Algunas aplicaciones del Método *Pushover*

En un estudio presentado por Rofooei et al. (2007), se utilizó el método *Pushover* adaptativo aplicando registros sísmicos reales del Estado de California. En particular, se evaluaron los desplazamientos obtenidos en edificios de 10 y 15 niveles utilizando este método y los compararon con los resultados de un análisis dinámico completo. Se demostró que el método proporciona resultados más cercanos a los del análisis dinámico en comparación con los métodos tradicionales. Sin embargo, los autores observaron que el método podría beneficiarse de la inclusión de más modos de vibración en la evaluación para capturar mejor la respuesta estructural completa. En el presente trabajo, se tomó la metodología de Rofooei et al. (2007) como base, ampliando la comparación a incluir múltiples modos de vibración para un análisis más exhaustivo.

En el estudio de Rahmani et al. (2019) se utilizó el procedimiento conocido como *Pushover* adaptativo de límite superior (AUB). El enfoque AUB fue usado para evaluar el desempeño sísmico de marcos de acero resistentes a momentos en edificios, incorporando los efectos de modos superiores de vibración y los cambios progresivos en las características dinámicas de la estructura durante su respuesta inelástica. Este trabajo presenta un avance significativo, pero hace falta una comparación con los métodos tradicionales y un análisis dinámico completo podría ofrecer una evaluación más integral del desempeño estructural. En este sentido, se considera que la metodología AUB es altamente efectiva, pero su implementación en el presente trabajo incluirá comparaciones detalladas con métodos estáticos tradicionales y un análisis dinámico para validar su aplicabilidad en diversos escenarios.

En su investigación, Jalilkhani et al. (2020) utilizaron un enfoque que combina los métodos *Pushover* multimodal y adaptativo para mejorar la estimación de demandas sísmicas en marcos resistentes a momento de concreto reforzado. Este enfoque, conocido como análisis *Pushover* adaptativo multimodal, permite una evaluación más precisa de las demandas sísmicas al considerar tanto los efectos de modos superiores como las variaciones en las propiedades dinámicas de la estructura. En el contexto del presente estudio, se utilizó

esta metodología para evaluar la precisión del análisis en comparación con enfoques más convencionales.

2.3 Desarrollo Teórico del Método *Pushover* Adaptativo

En términos de la formulación teórica, las ecuaciones diferenciales de movimiento para un sistema de edificio tipo de masa concentrada se pueden expresar en notación matricial de la siguiente manera:

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + R(U) = -M\{1\}\ddot{U}_g(t) \quad (1)$$

Donde:

- M y C son las matrices de masa y amortiguamiento, respectivamente.
- El vector $U(t)$ contiene los desplazamientos relativos de los diferentes pisos con respecto al suelo.
- $R(U)$ es el vector de resistencia.
- $\ddot{U}_g(t)$ es la aceleración del suelo.

Se asume un vector de deflexión aproximado $\Theta(x)$ para transformar el sistema de múltiples grados de libertad (MDOF) en un sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF), donde x es el desplazamiento relativo del techo con respecto a su base. Este vector de deflexión aproximado corresponde a la forma deformada de la estructura bajo la acción de una carga lateral aplicada estáticamente con un patrón de carga específico $\xi(x)$.

El patrón de carga y el patrón de deflexión son funciones del comportamiento no lineal de la estructura, que están siendo rastreadas por el parámetro x , el desplazamiento relativo del techo con respecto al suelo. Por lo tanto, en cualquier momento t , el desplazamiento de los diferentes pisos del modelo estructural puede expresarse como:

$$U(t) = Q(x) x(t) \quad (2)$$

El vector de resistencia R se define como:

$$R(x) = \xi(x) V(x) \quad (3)$$

Donde $V(x)$ es el cortante basal de la estructura.

En el método *Pushover* adaptativo propuesto, el patrón de carga $\xi(x)$ en cualquier etapa de la carga *Pushover* se calcula utilizando las formas modales significativas, es decir, las primeras formas modales de la estructura que incluyen al menos el 90% de la masa total del sistema. Esto implica que para cualquier desplazamiento del techo x , se asume que el patrón de carga $\xi(x)$ puede determinarse a partir de la siguiente ecuación:

$$\xi(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [EMM_i(x)\Psi_i(x)]^2} \quad (4)$$

Donde n es el número de modos requeridos, $EMM_i(x)$ es la masa modal efectiva del i -ésimo modo, y $\Psi_i(x)$ se calcula a partir de:

$$\Psi_i(x) = K(x) \varphi_i(x) \quad (5)$$

O

$$\Psi_i(x) = \omega_i^2(x) M \varphi_i(x) \quad (6)$$

En esta expresión, $K(x)$ es la matriz de rigidez del sistema, $\varphi_i(x)$ es la forma modal del i -ésimo modo normalizada con respecto a su mayor elemento, y $\omega_i(x)$ es la frecuencia angular del i -ésimo modo.

Sustituyendo lo anterior se puede llegar a la próxima ecuación de movimiento:

$$M\Theta(x)\ddot{x}(t) + C\Theta(x)\dot{x}(t) + \xi(x)V(x) = -M\{1\}\ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

Asumiendo que la matriz de amortiguamiento C es una matriz ortogonal y multiplicando por la traspuesta de $\Theta(x)^T$, resulta la siguiente ecuación escalar:

$$M^*(x)\ddot{x}(t) + C^*(x)\dot{x}(t) + R^*(x) = -L\{x\}\ddot{u}_g(t) \quad (8)$$

en donde:

$$M^*(x) = \Theta(x)^T M \Theta(x) \quad (9)$$

$$C^*(x) = \Theta(x)^T C \Theta(x) \quad (10)$$

$$R^*(x) = \Theta(x)^T \xi(x) V(x) \quad (11)$$

y

$$L^*(x) = \Theta(x)^T M \{1\} \ddot{u}_g \quad (12)$$

$M^*(x)$, $C^*(x)$, $R^*(x)$ y $L^*(x)$ se definen como los equivalentes del sistema SDOF, ambos lados se dividen entre $M^*(x)$ y $C^*(x)/M^*(x)$ se sustituye con la identidad:

$$C^*(x) / M^*(x) = \alpha + \beta k_0 \quad (13)$$

$$C = \alpha M + \beta K \quad (14)$$

por lo que la ecuación se puede escribir como:

$$\ddot{x}(t) + (\alpha + \beta k_0)\dot{x}(t) + r(x) = -\iota \ddot{u}_g(t) \quad (15)$$

2.4 Método del coeficiente de desplazamiento

El método del coeficiente de desplazamiento, inicialmente utilizado en FEMA 273 y posteriormente incorporado en FEMA 356, tiene como objetivo mejorar la precisión de los procedimientos estáticos no lineales al estimar directamente los valores del desplazamiento inelástico máximo utilizando factores de modificación. Aunque este método del coeficiente de desplazamiento, al ser un enfoque simplificado, es menos preciso para estructuras irregulares o no lineales. El método implica el cálculo de coeficientes de desplazamiento para cada modo de vibración de la estructura para estimar la respuesta en desplazamiento (Ali Abass & Khalaf Jarallah, 2021).

Primero, se realiza un análisis Pushover del sistema de múltiples grados de libertad (MDOF), seguido de un análisis de eigen-valores para determinar las propiedades modales del sistema. Luego, se utiliza la siguiente relación para determinar el desplazamiento objetivo:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} * g \quad (16)$$

donde:

- C_0 : Factor que ajusta el desplazamiento en la estructura de un solo grado de libertad (SDOF) al desplazamiento en la estructura real.
- C_1 : Factor de amplificación de desplazamiento debido a efectos no lineales.
- C_2 : Factor que considera la variación en la capacidad de deformación en función del nivel de desempeño.
- C_3 : Factor que ajusta por efectos de la rigidez del suelo.
- S_a : Aceleración espectral en el período fundamental de la estructura.
- T : Período fundamental de la estructura.
- g : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

Los valores de los factores C_0 , C_1 , C_2 , y C_3 se determinan en función del tipo de estructura, la ductilidad, la rigidez del suelo, y los objetivos de desempeño, según las normas

y guías de diseño por desempeño, la relación y sus coeficientes se detallan en (Asikoğlu et al., 2021).

En la Figura 3, K_i es la rigidez lateral inicial o elástica de un edificio, que refleja su capacidad de deformarse elásticamente bajo pequeñas fuerzas. Por otro lado, K_{eff} , la rigidez lateral efectiva, se calcula en el punto en que la fuerza cortante en la base es el 60% de la resistencia efectiva de cedencia del edificio. Esta se obtiene a partir de una representación bilineal de la curva de capacidad, lo que indica el comportamiento del edificio bajo fuerzas mayores.

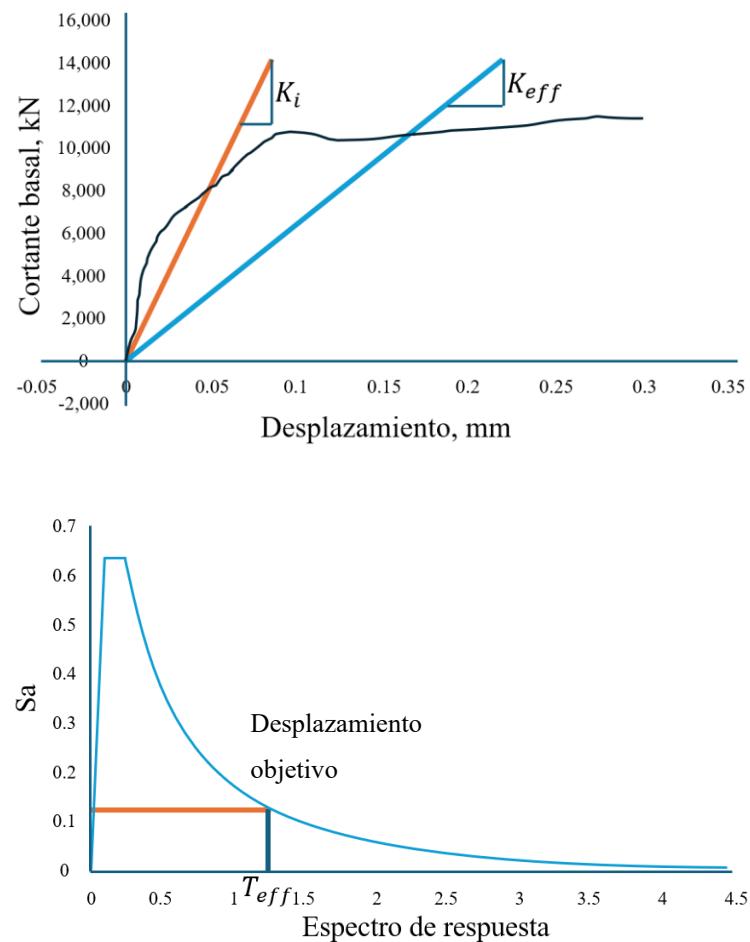


Figura 3. Representación gráfica del método del coeficiente de desplazamiento.

2.5 Método del coeficiente de desplazamiento mejorado

El documento FEMA-440 sugiere varias mejoras sobre el método de coeficiente de FEMA-356 para la estimación del desplazamiento objetivo. En primer lugar, introduce una ecuación revisada para C_1 de la siguiente manera:

$$C_1 = 1.0 + \frac{R-1}{\alpha T_e^2} \quad (17)$$

Aquí, α se establece en 130, 90 y 60 para las clases de sitio B, C y D, respectivamente (ver FEMA-440 para un desglose detallado de las clases de sitio). La siguiente mejora se refiere al coeficiente C_2 , expresado:

$$C_2 = 1.0 + \frac{1}{800} \left(\frac{R-1}{T} \right)^2 \quad (18)$$

Por último, FEMA-440 sugiere omitir el coeficiente C_3 y se introduce una restricción de resistencia para evitar la inestabilidad dinámica. Esta restricción de resistencia se define al establecer un valor máximo para R , como se ilustra a continuación:

$$R_{\max} = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} + \frac{\alpha_2^{-t}}{4}; t = 1.0 + 0.5 \ln(T) \quad (19)$$

En esta ecuación, Δ_d representa la deformación en el punto de resistencia máxima, Δ_y denota la deformación de fluencia, y α_2 es la pendiente negativa del segmento de degradación de resistencia en la curva de esfuerzo-deformación.

Pushover Adaptativo

La implementación del método *pushover* adaptativo se puede dividir en 4 fases principales.

1. Definir el vector nominal de cargas.
2. Cálculo del factor de carga.

3. Determinación del vector de escalamiento normalizado.
4. Actualización del vector de fuerzas.

La primera etapa se realiza una sola vez, mientras que las etapas restantes se repiten de forma iterativa dentro del análisis estático no lineal.

Definir el vector nominal de cargas.

En el análisis *pushover* convencional, el vector de carga nominal (P_0) se define al inicio del análisis. La magnitud de este vector no tiene un impacto significativo en los resultados obtenidos, ya que los algoritmos de solución de pushover escalan automáticamente el vector de carga para cumplir con el objetivo del análisis. Aunque Antoniou & Pinho (2004) sugieren que, entre el cero y la unidad, generalmente, es conveniente elegir una magnitud inicial tal que el factor de carga del análisis (λ) varíe entre cero y la unidad, donde este último representa la capacidad horizontal total de la estructura o un valor cercano a ella. Su utilidad principal radica en dos aspectos, establece los nodos estructurales donde se aplicarán las cargas y define la forma de distribución de las cargas (triangular, uniforme, etc.) que se mantendrá durante todo el análisis.

Por otra parte, en el análisis *Pushover* Adaptativo se recomienda que la forma del vector nominal (P_0) tenga una forma uniforme o rectangular ya que el vector de carga se actualiza por el algoritmo de solución en cada paso del análisis. Esto para evitar distorsiones en el vector de carga adaptativo, el cual está determinado en función de las características dinámicas de respuesta de la estructura en cada etapa del análisis. En otras palabras, las cargas nominales definidas al inicio del análisis deben ser iguales en todos los niveles, aunque su magnitud puede seleccionarse de manera arbitraria. De igual manera se recomienda usar valores tales que el factor de carga (λ) varíe entre cero y la unidad.

El análisis *pushover* adaptativo necesita incluir la masa de la estructura (M) como parte de las condiciones iniciales. Esto es importante porque el algoritmo utiliza el análisis de valores propios para actualizar la forma del vector de carga en cada paso. Básicamente, la masa permite al modelo entender cómo la estructura responde dinámicamente.

En este método, se pueden usar masas concentradas (en puntos específicos, como nodos) o masas distribuidas (a lo largo de los elementos), y estas se pueden colocar libremente en toda la estructura. Esto asegura que el comportamiento dinámico real de la estructura se refleje en cada actualización del análisis, haciendo el proceso más preciso y adaptable.

Cálculo del factor de carga.

En el algoritmo adaptativo propuesto, la magnitud del vector de carga aplicado (P) en cualquier paso del análisis se calcula como el producto del vector de carga nominal (P_0) definido previamente y el factor de carga (λ) correspondiente a ese paso, como se indica en la ecuación:

$$P = \lambda * P_0 \quad (20)$$

El factor de carga (λ) se incrementa automáticamente mediante una estrategia de control, ya sea por fuerza o por respuesta, hasta que se alcanza un objetivo de análisis predefinido o se produce una falla numérica.

- **Control por Fuerza:**

Incrementa directamente el factor de carga y calcula después la respuesta estructural (desplazamientos o rotaciones). Este enfoque es similar al análisis *pushover* tradicional basado en fuerzas y se utiliza para alcanzar la capacidad máxima de la estructura.

- **Control por Respuesta:**

Controla primero la respuesta estructural (desplazamientos o rotaciones en un nodo) y luego calcula el factor de carga necesario para alcanzar esa deformación. Este método es más preciso, ya que vincula directamente la carga aplicada con los daños estructurales observados.

Determinación del vector de escalamiento normalizado.

En el análisis *pushover* adaptativo, el vector de escalamiento modal normalizado (\bar{F}) se utiliza para definir la forma del vector de carga en cada paso del análisis. Este vector se calcula al inicio de cada incremento de carga para reflejar el estado de rigidez actual de la estructura, determinado mediante un análisis de valores propios. Para ello, se emplea el algoritmo de Lanczos, como recomiendan Chopra & Goel (2001) para identificar las formas modales y los factores de participación de los modos previamente definidos.

La fuerza modal por nivel (F_{ij}) se determina mediante:

$$F_{ij} = \Gamma_j \cdot \phi_{ij} \cdot M_i \quad (21)$$

donde:

i : número de nivel

j : número de modo

Γ_j : factor de participación modal de j

ϕ_{ij} : forma modal normalizada por la masa para el nivel i

M_i : masa del nivel i

Opcionalmente, las fuerzas modales pueden incluir el efecto de amplificación espectral ($S_{a,j}$), que ajusta las fuerzas modales de acuerdo con la respuesta espectral del modo:

$$F_{ij} = \Gamma_j \cdot \phi_{ij} \cdot M_i \cdot S_{a,j} \quad (22)$$

Esto permite capturar características dinámicas más realistas, considerando el contenido frecuencial del movimiento sísmico.

Combinación Modal: Las fuerzas modales de cada modo se combinan utilizando métodos como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) o la combinación cuadrática completa (CQC), dependiendo de la correlación entre los modos. La fuerza total por nivel (F_i) se normaliza respecto al total para obtener el vector escalado final:

$$\bar{F}_i = \frac{F_i}{\sum F_i} \quad (23)$$

Actualización del vector de carga.

La actualización del vector de carga en el análisis *pushover* adaptativo se realiza para reflejar los cambios en las propiedades de la estructura conforme avanza el análisis. Este proceso puede abordarse mediante dos métodos principales: Actualización Total y Actualización Incremental.

- **Actualización Total**

En este enfoque, el vector de carga en cada paso de análisis reemplaza completamente al vector de carga del paso anterior. Esto implica que el nuevo vector de carga se calcula como el producto del factor de carga total actual (λ_t), el vector de escalamiento modal normalizado (\bar{F}_t) y el vector de carga nominal (P_0).

$$P_t = \lambda_t * \bar{F}_t * P_0 \quad (24)$$

Este método permite una representación precisa de las características dinámicas de la estructura, ajustando completamente el vector de carga en cada paso para reflejar el estado actual de rigidez y propiedades vibratorias (Figura 4.) Sin embargo, un problema significativo es la inestabilidad numérica que puede surgir debido a cambios abruptos en las fuerzas de los niveles, lo que puede llevar a problemas de convergencia.

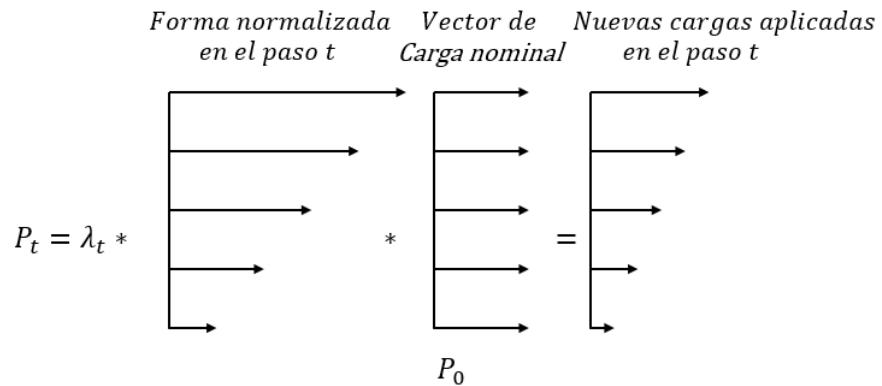


Figura 4. Método de Actualización Total

- **Actualización Incremental**

Este método se basa en agregar un incremento al vector de carga del paso anterior en lugar de reemplazarlo por completo. El incremento se calcula como el producto entre el incremento del factor de carga ($\Delta\lambda_t$), el vector de escalamiento modal normalizado (\bar{F}_t) y el vector de carga nominal (P_0).

$$P_t = P_{t-1} + \Delta\lambda_t * \bar{F}_t * P_0 \quad (25)$$

Este enfoque proporciona resultados similares con los de la Actualización Total, pero con mayor estabilidad numérica, especialmente en estructuras donde los cambios abruptos en las cargas pueden ser problemáticos.

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Hipótesis

El desarrollo de una herramienta de software que implemente el método *Pushover* adaptativo en el diseño estructural de una torre de acero permite obtener una respuesta estructural al menos 5% más precisa, en comparación con un método tradicional de análisis sísmico, al tiempo que cumple con los criterios de seguridad establecidos por la normativa.

3.2 Objetivo general

Desarrollar una herramienta computacional que permita determinar con precisión la respuesta de una estructura de acero en términos de desplazamientos, asegurando que esta cumpla con los requisitos de seguridad establecidos en la normativa vigente, mediante la implementación del método *Pushover* adaptativo.

3.3 Objetivos específicos

1. Diseñar una herramienta computacional que incorpore la metodología del análisis *Pushover* y *Pushover* adaptativo.
2. Analizar un caso de estudio representativo.
3. Comparar la eficiencia del método *Pushover* adaptativo, en términos de desplazamientos obtenidos, con los resultados de un análisis dinámico.

4. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se organizó en tres 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. En la Figura 5 se presenta un diagrama de la metodología.

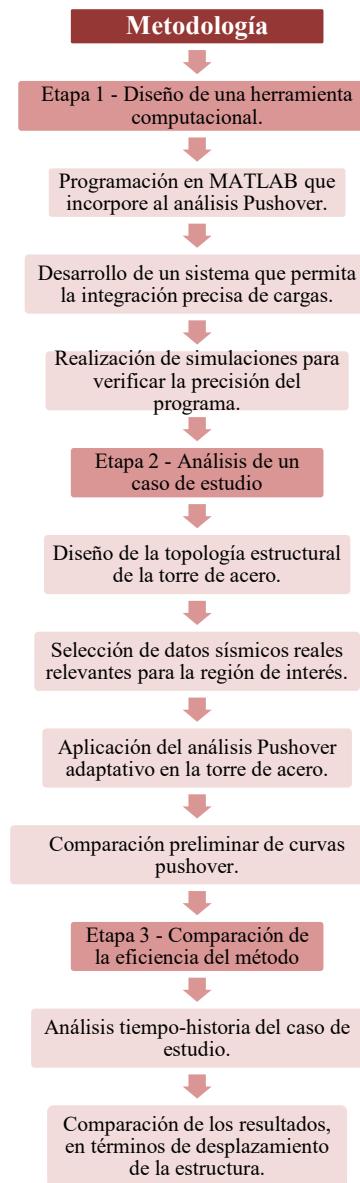


Figura 5. Diagrama de la metodología

4.1 Diseño de una herramienta computacional.

En la primera etapa de esta investigación, se desarrolló una herramienta computacional diseñada específicamente para implementar la metodología del análisis *Pushover*, adaptada a las necesidades del proyecto.

4.1.1 Codificación del programa en MATLAB

La primera fase consistió en la creación de un programa en MATLAB para realizar un análisis estructural empleando el método *Pushover*. Se eligió MATLAB debido a su facilidad para trabajar con matrices, lo cual es fundamental en el cálculo de propiedades estructurales como las matrices de rigidez y masa, facilitando el manejo eficiente de grandes volúmenes de información.

Para la entrada de datos, se modificó el código para leer información desde un archivo Excel, donde se proporcionaban dos hojas de cálculo principales. La primera hoja contenía los datos de los nodos, incluyendo sus nombres, coordenadas en el espacio tridimensional (X, Y, Z), y niveles correspondientes en la estructura como se puede ver en la Tabla 1. La segunda hoja (Tabla 2) incluyó una lista detallada de los elementos estructurales, especificando su tipo (viga o columna), perfil, y propiedades físicas como el área y el peso. Este enfoque permitió una entrada de datos flexible y fácil de actualizar, lo que agilizó el proceso de análisis.

Tabla 1. Nombres y coordenadas de los nodos.

Nodo	X	Y	Z	Nivel
1	0	0	0	0
2	6	0	0	0
3	0	3.5	0	1
4	6	3.5	0	1
5	0	7	0	2
6	6	7	0	2
7	0	10.5	0	3
8	6	10.5	0	3
9	0	14	0	4
10	6	14	0	4

Además, se implementaron funciones que calcularon automáticamente propiedades adicionales necesarias para el análisis. Entre estas propiedades se incluyeron los cosenos directores de cada elemento, que se utilizaron para definir la orientación espacial de los mismos y las longitudes de los elementos, calculadas con base en las coordenadas de los nodos de inicio y final de cada uno.

Tabla 2. Nombramiento y características de los elementos de la estructura.

Nombre	Tipo	Perfil	NI	NF
C1	columna	W 10X33	1	3
C2	columna	W 10X33	2	4
C3	columna	W 10X33	3	5
C4	columna	W 10X33	4	6
C5	columna	W 10X33	5	7
C6	columna	W 10X33	6	8
C7	columna	W 10X33	7	9
C8	columna	W 10X33	8	10
T1	trabe	W 8X24	3	4
T2	trabe	W 8X24	5	6
T3	trabe	W 8X24	7	8
T4	trabe	W 8X24	9	10

4.1.2 Diseño del sistema para la integración de cargas.

Durante esta fase, se diseñó un sistema para la integración de las cargas que considerara tanto las cargas permanentes como las cargas vivas de la estructura. Las cargas sobre los elementos estructurales, incluidas las cargas vivas, se ingresaron manualmente desde el archivo Excel, en el cual se organizó la información en columnas correspondientes a cada elemento.

Además, los vectores de cargas externas fueron programados siguiendo los lineamientos de la metodología *Pushover*. Este proceso permitió distribuir las cargas laterales de manera adecuada en función de la ubicación de los nodos y la altura de la estructura, asegurando una correcta simulación del comportamiento estructural bajo condiciones de sismo. El programa fue diseñado para ajustar automáticamente la magnitud y distribución de estas cargas laterales en función de la geometría y el peso de la estructura. Esto facilitó la

simulación de múltiples escenarios de carga, asegurando la adaptabilidad del modelo a distintas configuraciones estructurales.

4.1.3 Validación y confiabilidad mediante simulaciones.

En esta fase, se llevó a cabo una validación de la herramienta computacional desarrollada. Las simulaciones realizadas consistieron en analizar diferentes configuraciones estructurales, evaluando el comportamiento de la estructura bajo diversas formas y distribuciones de cargas, como se muestra en la Figura 6. Se seleccionaron diferentes estructuras de referencia para verificar el desempeño del programa en una variedad de escenarios.

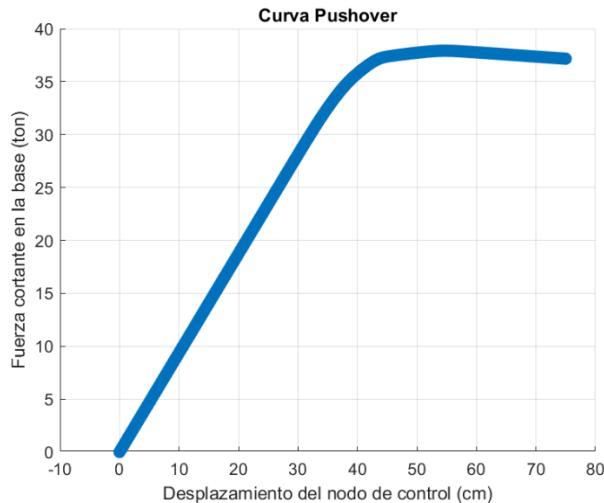


Figura 6. Curva *Pushover* obtenida de MATLAB

Además, se comparó el análisis de la misma estructura utilizando el programa desarrollado y un software comercial de análisis estructural utilizado en la industria. Esta comparación permitió validar la confiabilidad del programa, ya que los resultados obtenidos fueron consistentes con los generados por el software comercial. Se prestó especial atención a la concordancia en los desplazamientos, las fuerzas internas, y los puntos de desempeño de las estructuras bajo las cargas aplicadas, asegurando que la herramienta desarrollada ofreciera resultados precisos y confiables.

A lo largo de este proceso de validación, se comprobó que el programa podía manejar con éxito diferentes configuraciones y características estructurales, confirmando su fiabilidad. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones permitieron verificar que el enfoque metodológico implementado era coherente con los principios teóricos del análisis, lo cual reforzó la validez de la herramienta.

4.2 Análisis de un caso de estudio representativo.

La segunda etapa de la investigación se centró en la aplicación de la herramienta computacional desarrollada en un caso de estudio específico. Este análisis se llevó a cabo para evaluar la eficacia del método *Pushover* adaptativo aplicado a estructuras de acero bajo condiciones sísmicas reales.

4.2.1 Diseño de la topología estructural de la torre de acero.

En primer lugar, se diseñaron las topologías estructurales de tres torres de acero, todas destinadas para uso habitacional y clasificadas como tipo B2 según el reglamento vigente. Las torres tienen configuraciones de 4, 6 y 8 niveles, respectivamente, y todas cuentan con una altura de nivel uniforme de 3.5 m y un ancho de crujía de 6 m.

La decisión de analizar torres de 4, 6 y 8 niveles se tomó considerando la representatividad de estas configuraciones en edificaciones habitacionales comunes en zonas urbanas de México. Estas alturas permiten evaluar el desempeño estructural bajo condiciones sísmicas típicas, cubriendo un rango de estructuras de baja, media y mayor altura, conforme a las categorías de diseño establecidas en las normativas. Además, estas configuraciones se eligieron para analizar cómo el aumento en la altura y el número de niveles afecta el comportamiento estructural y las demandas sísmicas, particularmente en estructuras de acero. (Figura 7).

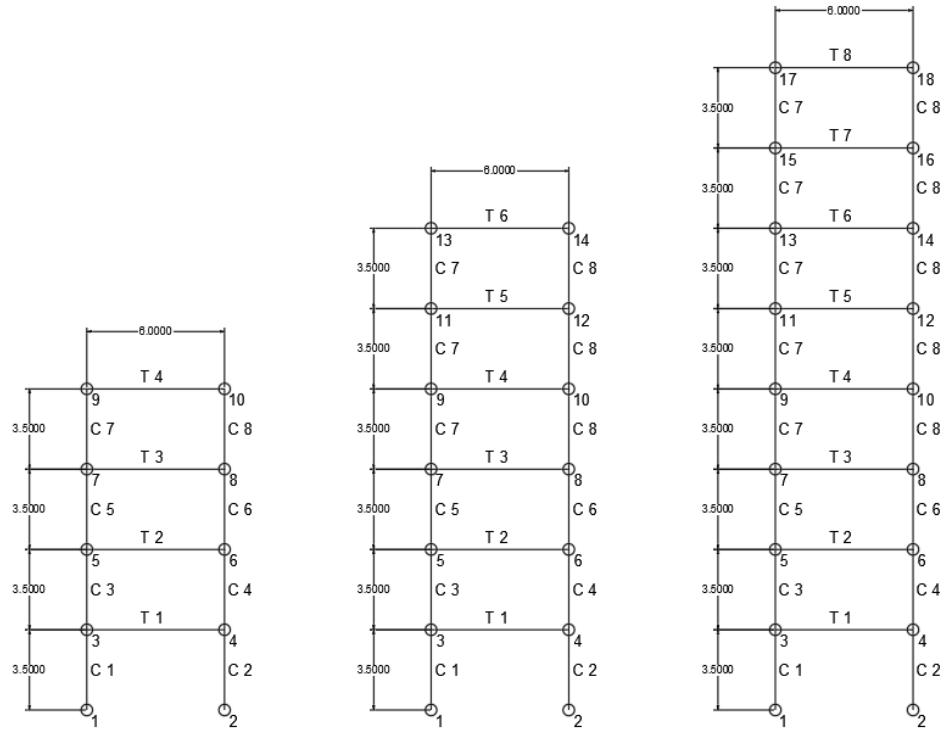


Figura 7. Marcos de 4, 6 y 8 niveles analizados.

Para las columnas y vigas se seleccionaron los siguientes perfiles:

Tabla 3. Configuraciones geométricas de las torres

Niveles	Altura por nivel (m)	Ancho de crujía (m)	Columnas	Vigas	Carga por viga (kN/m)	Carga total por viga (kN)
4	3,5	6	W10x33	W8x24	6	36
6	3,5	6	W14x38	W8x24	6	36
8	3,5	6	W18x97 (1-4) W16x77 (5-6) W16x67 (7-8)	W8x24	6	36

Se asignó una carga distribuida de 6 kN/m a cada viga, lo que corresponde a cargas muertas y vivas típicas para edificaciones habitacionales. Esta carga se calculó considerando el peso propio de las vigas, el peso de los acabados y losa, así como cargas vivas estandarizadas de acuerdo con las normativas mexicanas para viviendas. Este valor busca representar de manera realista las condiciones de carga de servicio que enfrentan este tipo de

edificaciones, asegurando que el diseño sea representativo y adecuado para el análisis comparativo.

En todas las torres, esta carga distribuida resulta en una carga total de 36 kN por viga. La selección de perfiles se realizó para garantizar la capacidad estructural bajo diferentes condiciones de carga, especialmente considerando cargas sísmicas.

Se definieron las características geométricas y propiedades de los materiales tomando como base las normativas vigentes para diseño estructural sismorresistente. Además, los modelos estructurales fueron parametrizados para permitir ajustes en las configuraciones de altura y elementos, facilitando así la evaluación de múltiples escenarios.

4.2.2 Selección de datos sísmicos reales.

Se seleccionaron datos sísmicos representativos de la zona centro de México, asegurando que reflejaran las condiciones geológicas y tectónicas particulares del área. Para este análisis, se escogió el sismo del 19 de septiembre de 2017 (Mw 7.1), registrado en el centro de México, con coordenadas 18.5678° N, 98.4808° W, a las 18:14:38 UTC (Figura 8). Este sismo fue elegido porque fue uno de los de mayor intensidad y afectación que se ha presentado en la historia reciente de México.

Los datos sísmicos fueron obtenidos de la estación "IDEI PATIO 5", ubicada en CDMX, la cual se encuentra en la caseta del patio del Instituto de Ingeniería, UNAM. Las coordenadas de la estación son 19.33024° N y 98.181076° W, con una altitud de 2240 msnm. El tipo de suelo registrado en la estación es "roca basáltica". La clave de la estación es CUP5.

Para el análisis, se utilizó únicamente la parte intensa del acelerograma registrado, con el fin de centrarse en el intervalo del sismo que produce los mayores efectos en las estructuras, se usó un intervalo que incluye el 95% de la energía total, comenzando a partir del arribo de la onda S. El acelerograma completo se muestra en la Figura 8, mientras que la

Figura 9 destaca específicamente la parte intensa, que fue la utilizada para realizar el análisis estructural.

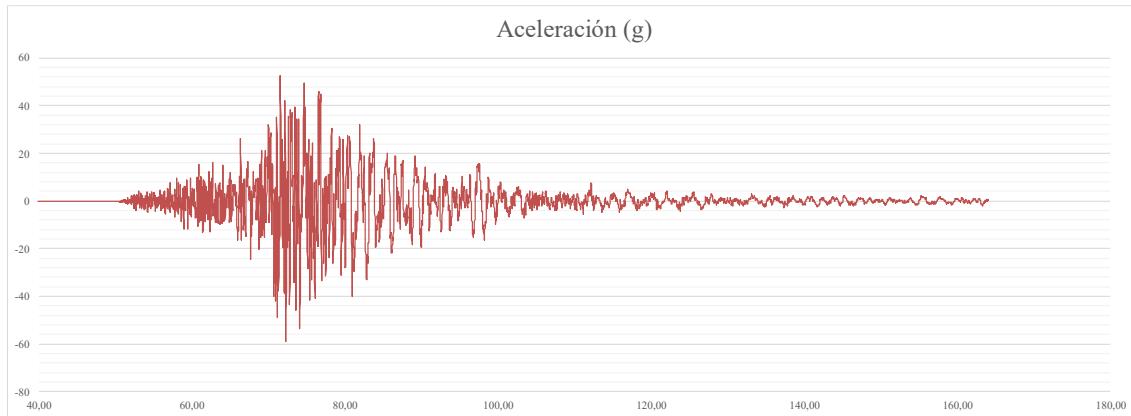


Figura 8. Acelerograma del sismo elegido, estación IDEI PATIO 5.

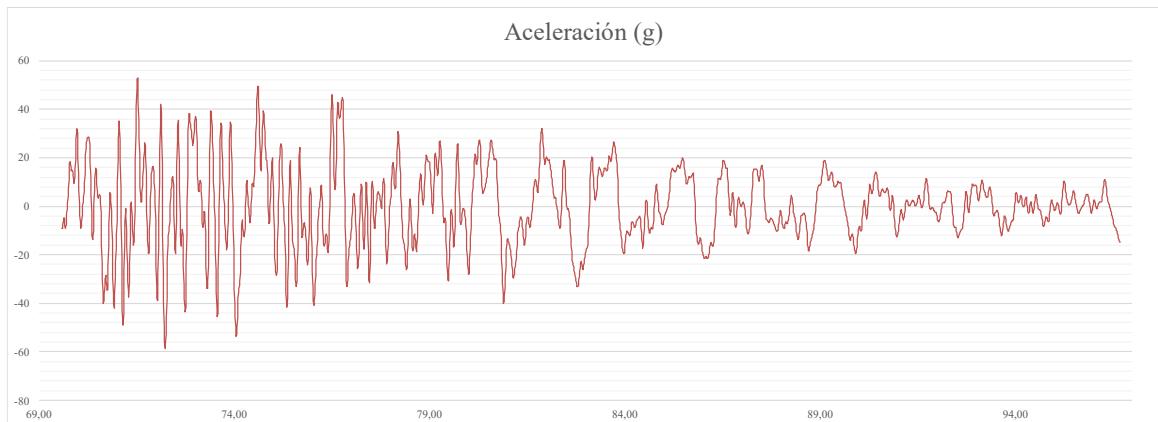


Figura 9. Zona intensa de interés usada para este trabajo

Los datos seleccionados fueron procesados y adaptados para su uso dentro del análisis. Esto incluyó la transformación de los registros sísmicos en parámetros de entrada compatibles con la metodología de análisis implementada.

4.2.3 Aplicación del análisis *Pushover*.

Una vez definida la geometría a analizar, se procedió a aplicar el análisis *Pushover* tradicional y adaptativo a las torres de acero, con base en la ecuación (15). Esto permitió evaluar el comportamiento de las estructuras bajo las condiciones sísmicas especificadas,

siguiendo los pasos de la metodología previamente implementada en el programa desarrollado en MATLAB.

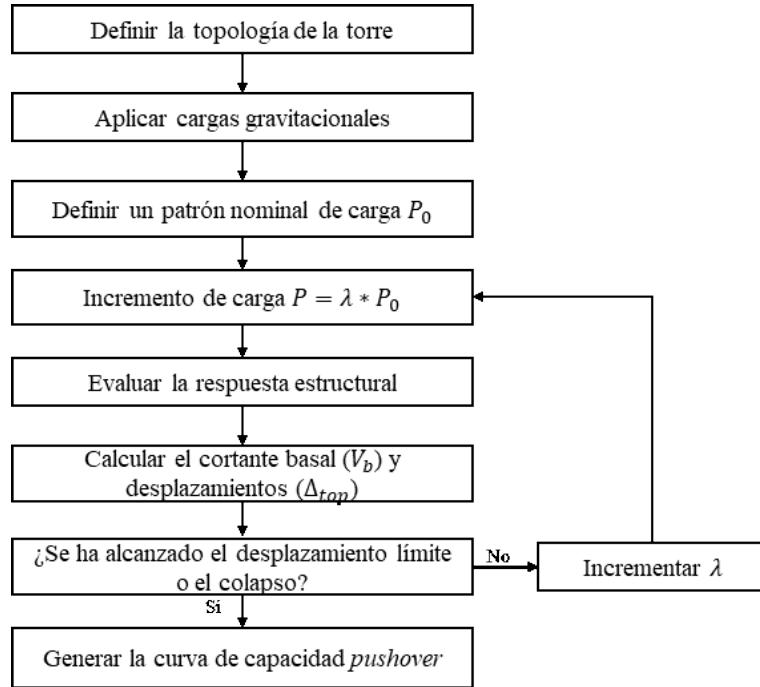


Figura 10. Metodología del *Pushover* tradicional.

El análisis *Pushover* se llevó a cabo para obtener curvas de capacidad que describen la relación entre la demanda de desplazamiento y la capacidad de las estructuras. Se aplicaron cargas laterales progresivas en función de la metodología *Pushover* previamente descrita y como se puede observar en la Figura 10, permitiendo observar el comportamiento de las torres a medida que se incrementaban las cargas hasta alcanzar su capacidad máxima. Este proceso incluyó múltiples iteraciones para simular el comportamiento no lineal de los elementos estructurales.

Durante el análisis, se registraron las deformaciones y los esfuerzos en los diferentes niveles de las torres, en especial en el techo, lo que permitió identificar los puntos críticos. La herramienta computacional facilitó la visualización de los resultados, mostrando gráficas que ilustraban la relación entre la carga aplicada y el desplazamiento resultante, la metodología aplicada para el análisis adaptativo se muestra en la Figura 11.

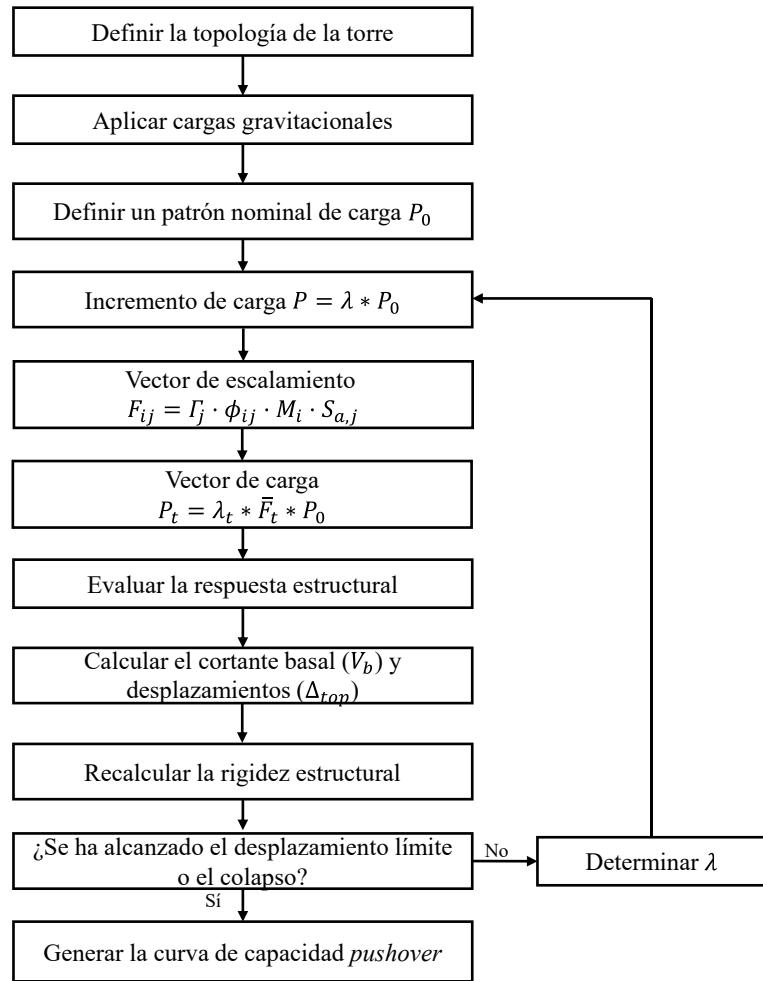


Figura 11. Metodología del *Pushover* Adaptativo.

4.2.4 Comparación preliminar de curvas *pushover*.

Los resultados obtenidos del análisis *Pushover* fueron sometidos a un análisis detallado para evaluar el desempeño estructural de las torres de acero. Se compararon las curvas de capacidad generadas (Figura 12), en cada uno de los métodos, permitiendo observar las diferencias en su comportamiento bajo las mismas condiciones sísmicas.

Se examinó la relación entre la carga lateral aplicada y los desplazamientos resultantes en los diferentes niveles de las torres. Este análisis reveló información crucial sobre la respuesta de las estructuras en cada método. Se identificaron los niveles críticos

donde se concentraron las mayores deformaciones, lo que permitió hacer una evaluación de la vulnerabilidad estructural.

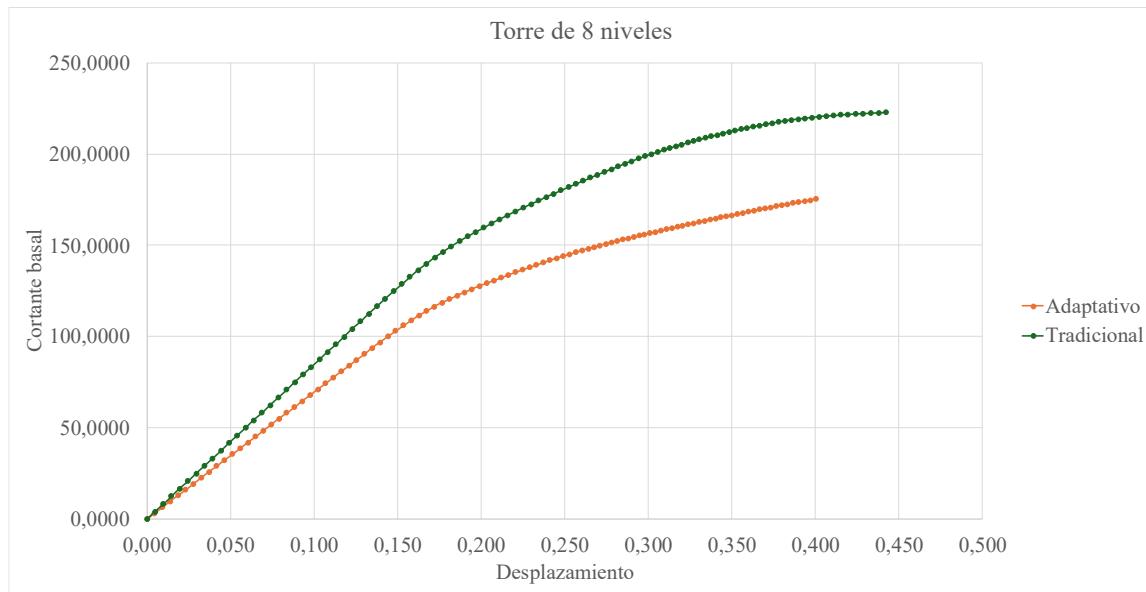


Figura 12. Curvas *pushover*

4.3 Comparación de la eficiencia del método

En esta etapa, se realizó una comparación detallada entre los resultados obtenidos mediante el análisis *Pushover* adaptativo y un análisis tiempo-historia no lineal, utilizando datos de un evento sísmico real para validar la precisión y eficiencia del método propuesto.

4.3.1 Análisis tiempo-historia del caso de estudio.

Para el análisis del comportamiento estructural bajo cargas sísmicas, se utilizó el evento del 19 de septiembre de 2017, que ocurrió en el centro de México, con coordenadas 18.5678° N y 98.4808° W, y tuvo lugar a las 18:14:38 UTC. Este sismo se seleccionó debido a su impacto significativo en estructuras de acero en la región y su relevancia como caso de estudio para la validación de modelos de análisis estructural.

El análisis tiempo-historia se basó en el registro acelerográfico de este evento, aplicado a las dos configuraciones de torres seleccionadas en el estudio: una torre de 4 niveles, una de 6 y una de 8 niveles, ambas diseñadas para uso habitacional, siguiendo los parámetros de diseño tipo B2 según el reglamento. Las características geométricas y de material de ambas estructuras, así como la distribución de cargas, fueron definidas previamente en las etapas anteriores del estudio.

Para comparar la eficiencia del método *Pushover* adaptativo, se utilizaron también simulaciones en un software comercial de análisis estructural. En dicho software, las estructuras de 4, 6 y 8 niveles fueron modeladas con las mismas propiedades y sometidas al análisis tiempo-historia no lineal, empleando los datos sísmicos del evento de 2017.

Las simulaciones generaron resultados en forma de curvas de histéresis, como la Figura 13, que muestran la relación entre el cortante basal y el desplazamiento lateral en diferentes niveles de la estructura. Estas curvas son fundamentales para evaluar el comportamiento no lineal de la estructura, ya que reflejan el ciclo de carga y descarga durante el evento sísmico, incluyendo la disipación de energía y la acumulación de daño en los elementos estructurales.

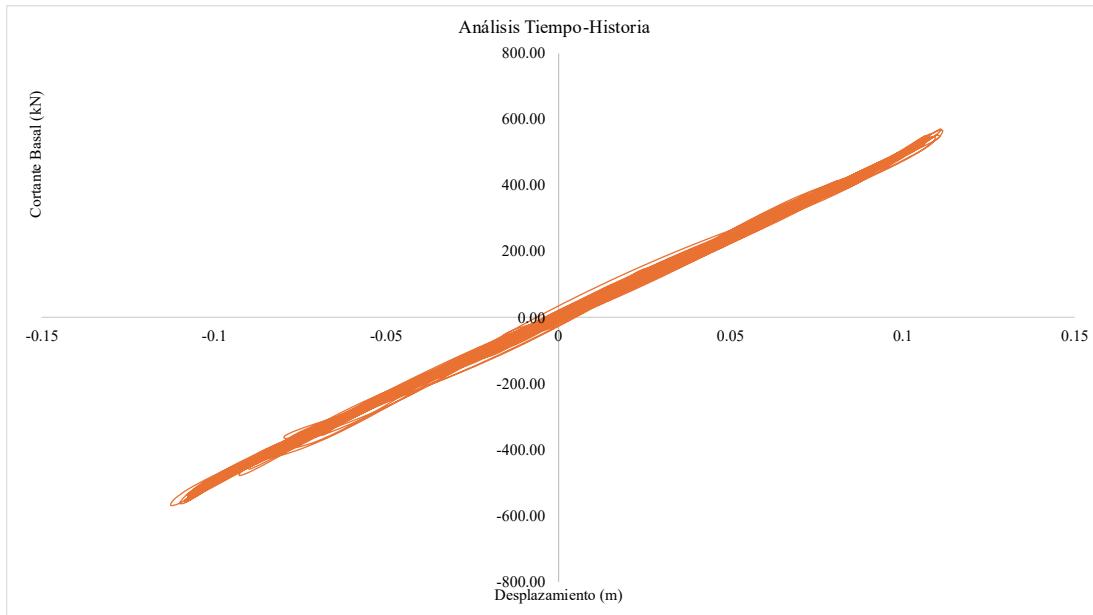


Figura 13. Gráfica de histéresis.

4.3.2 Comparación de los resultados

Los resultados obtenidos, muestran variaciones esperadas entre los métodos *pushover* tradicional y adaptativo, aunque ambos, al ser métodos estáticos no lineales, tienen cierta similitud en su comportamiento general (específicamente en la zona elástica), estos resultados se presentan a detalle en el capítulo 5.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del desarrollo de la herramienta computacional (Figura 14), la aplicación de la metodología *Pushover* en el caso de estudio representativo, y la comparación de los resultados obtenidos con los de la metodología dinámica para determinar la eficiencia de cada método.

5.1 Herramienta computacional *Pushover*

5.1.1 Codificación del programa en MATLAB

El programa desarrollado en MATLAB permitió implementar el análisis *Pushover* de manera eficiente, tanto en su versión tradicional como en su variante adaptativa. La herramienta fue capaz de generar curvas de capacidad estructural de manera consistente con los resultados esperados para las configuraciones de las torres analizadas.

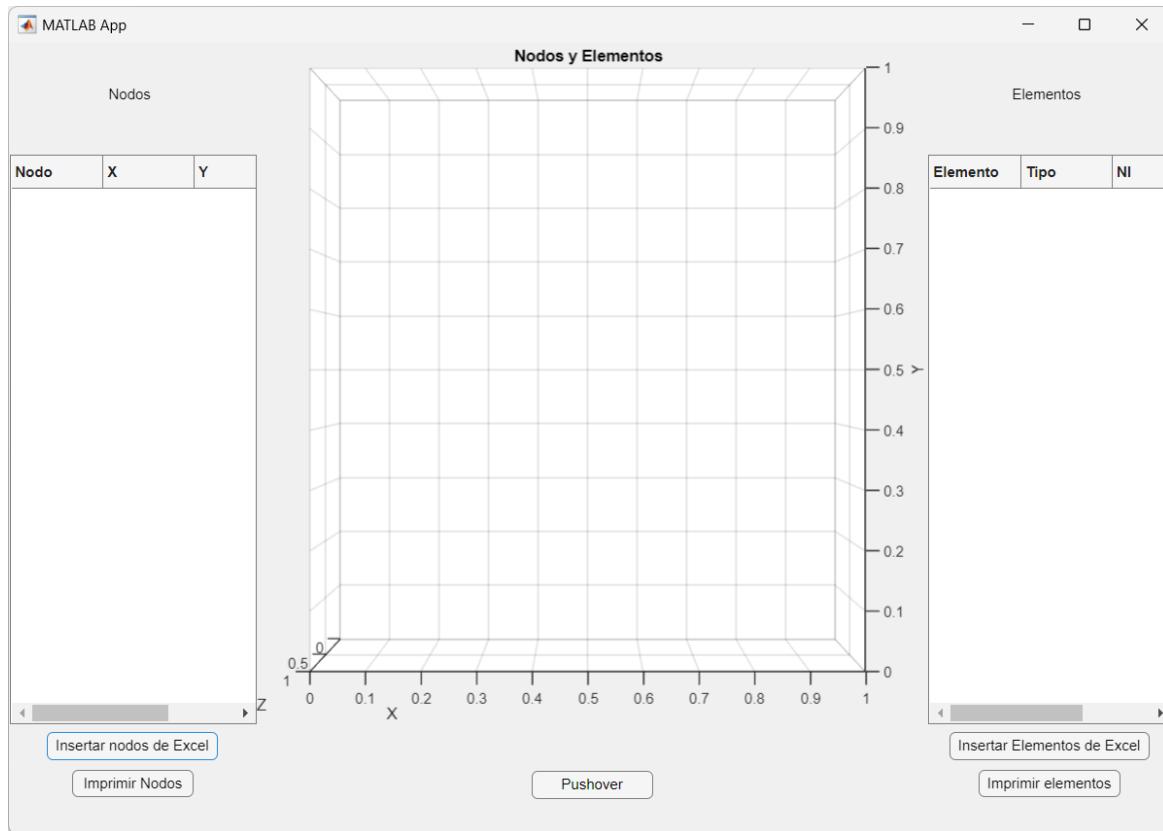


Figura 14. Interfaz de la herramienta computacional

Uno de los logros clave de la herramienta fue su capacidad para leer de manera efectiva los datos estructurales directamente desde un archivo Excel. Esta funcionalidad simplificó la entrada de datos, permitiendo la incorporación de los nodos, sus coordenadas, los elementos estructurales y sus características (Figura 15), como tipo de perfil, área, peso, y longitud. Además, mediante algoritmos de cálculo, se obtuvieron propiedades derivadas como las longitudes de los elementos.

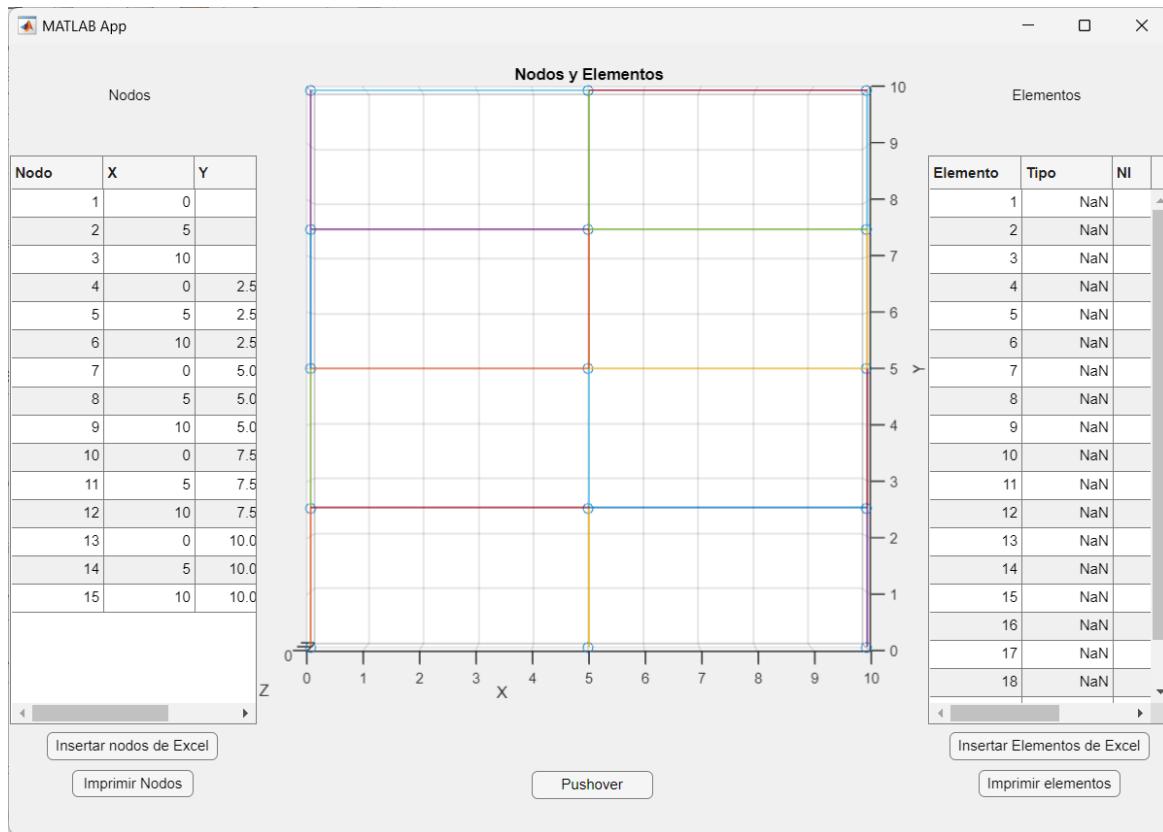


Figura 15. Interfaz, ejemplo de Torre de 4 niveles

5.1.2 Validación y confiabilidad mediante simulaciones.

El rendimiento del programa fue satisfactorio para el procesamiento de las estructuras de 4, 6 y 8 niveles, y no se observaron problemas significativos al ejecutar los análisis. Las curvas de capacidad generadas por la herramienta fueron consistentes, proporcionando información clara sobre la relación entre la demanda de desplazamiento y la capacidad de carga lateral de las estructuras.

Los resultados obtenidos mediante el método *Pushover* tradicional en MATLAB mostraron una alta concordancia con los resultados del software comercial de referencia, por lo que se pudo considerar como correcta la implementación realizada en MATLAB para este tipo de análisis.

5.2 Caso de estudio representativo

5.2.1 Diseño de la topología estructural de la torre de acero.

El análisis del caso de estudio se centró en tres configuraciones de torres de acero: una de 4 niveles, otra de 6 niveles y una más de 8 niveles, todas diseñadas para uso habitacional de tipo B2 según el reglamento mexicano. Para las columnas, se seleccionaron perfiles W específicos para cada configuración, aumentando en robustez conforme crecía la altura de la torre, mientras que para las vigas se utilizaron perfiles uniformes W8x24. La altura de cada nivel fue de 3.5 m y el ancho de las crujías fue de 6 m, con una crujía en todas las configuraciones. Estos parámetros geométricos y de materiales se establecieron para representar diseños comunes y realistas bajo las condiciones normativas y sísmicas de México.

5.2.2 Aplicación del análisis *Pushover*.

Como se puede ver en la Figura 16, el análisis pudo ser realizado en MATLAB, permitiendo además la extracción de los datos necesarios para su posterior evaluación externa.

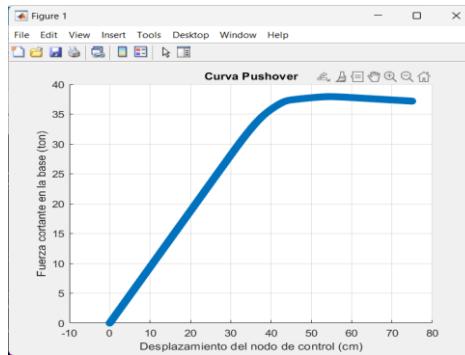


Figura 16. Curva *Pushover* obtenida en MATLAB

5.2.3 Comparación preliminar de curvas *pushover*.

El análisis *Pushover* se realizó tanto en su versión tradicional como adaptativa a ambas configuraciones de torres. Las curvas de capacidad obtenidas para cada configuración mostraron un comportamiento predecible en la zona elástica, donde no se observaron diferencias significativas entre los dos métodos. Sin embargo, al llegar a la zona plástica, el análisis tradicional permitió que las estructuras alcanzaran cortantes basales más altos, mientras que el método adaptativo se mostró más conservador.

Específicamente, ambas torres exhibieron un comportamiento similar en la fase elástica, pero la torre de 8 niveles mostró una mayor vulnerabilidad en la zona plástica, donde las cargas aplicadas comenzaron a afectar más rápidamente su capacidad estructural. Esta diferencia fue especialmente relevante cuando se compararon los desplazamientos máximos y las deformaciones registradas en los niveles superiores de las torres.

5.3 Comparación de la eficiencia del método

Los resultados obtenidos, presentados en la gráfica comparativa Figura 17, muestran variaciones esperadas entre los métodos *pushover* tradicional y adaptativo, aunque ambos, al ser métodos estáticos no lineales, tienen cierta similitud en su comportamiento general (específicamente en la zona elástica). El método tradicional alcanza un cortante basal máximo cercano a los 200 kN. No obstante, se observa una disminución en la rigidez estructural a partir de desplazamientos de aproximadamente 0.25 m. Esto está relacionado con el desarrollo de deformaciones plásticas concentradas en los niveles inferiores, donde se genera la mayor demanda de energía debido al colapso progresivo.

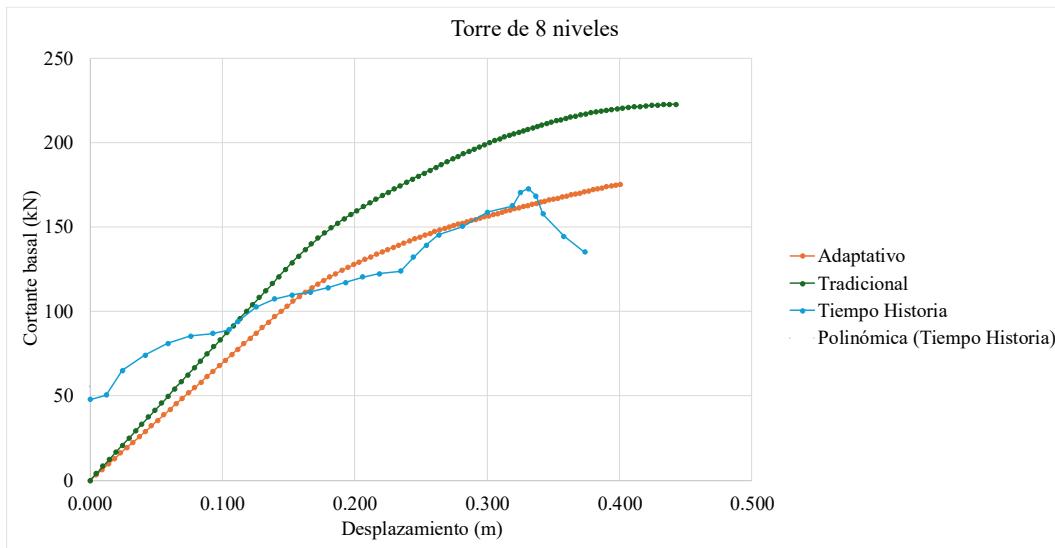


Figura 17. Gráfica comparativa de torre de 8 niveles

Por su parte, el método adaptativo muestra una curva más estable y distribuida, alcanzando un cortante basal máximo ligeramente inferior, de aproximadamente 180 kN. A pesar de tener una resistencia ligeramente menor, este método permite mayores desplazamientos, superando los 0.35 m. Esto refleja un comportamiento más equilibrado, con una mejor distribución de las deformaciones plásticas a lo largo de la altura de la estructura, reduciendo los riesgos de concentraciones críticas de daño.

Finalmente, el análisis Tiempo-Historia (TH) captura de manera más precisa la respuesta dinámica de la estructura, presentando oscilaciones que representan las características inerciales y disipativas de la torre bajo un sismo real. Este método sigue de cerca la curva adaptativa en las primeras fases, pero muestra una reducción progresiva del cortante basal en desplazamientos mayores, debido a la disipación de energía y la degradación estructural. La curva polinómica ajustada al análisis TH ilustra claramente estas variaciones dinámicas.

Como se puede observar en la Figura 18, el método tradicional alcanza un cortante basal máximo de aproximadamente 145 kN y muestra una disminución de rigidez a partir de 0.25 m de desplazamiento, lo que indica concentración de daño en niveles específicos.

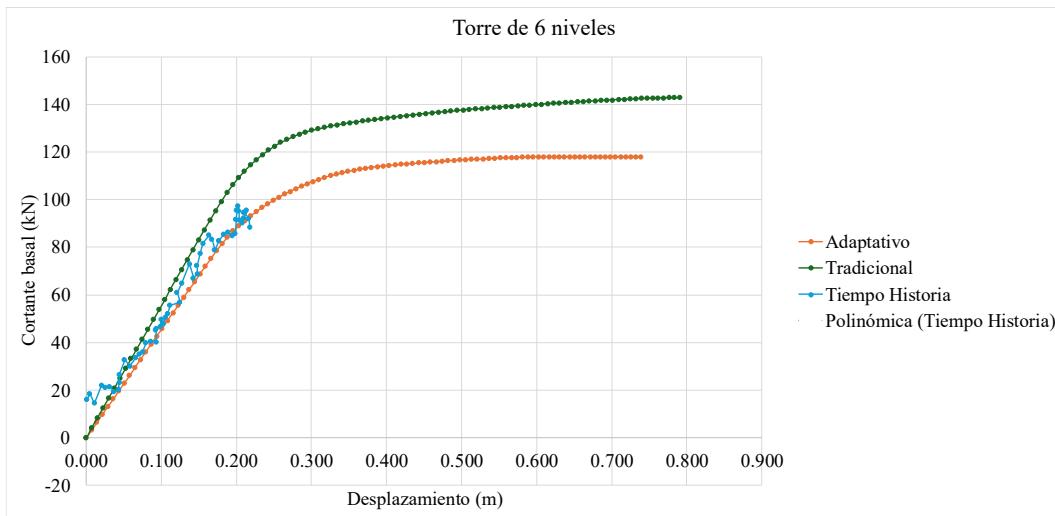


Figura 18. Gráfica comparativa de torre de 6 niveles

El método adaptativo, por otro lado, presenta un cortante basal máximo menor, cercano a 120 kN, pero logra distribuir mejor las deformaciones a lo largo de la estructura, alcanzando desplazamientos mayores de hasta 0.8 m sin pérdida significativa de rigidez.

El análisis tiempo-historia comienza con un cortante basal mayor a ambos métodos, este sigue inicialmente al método tradicional, pero a partir de un desplazamiento de 0.12 m incluye oscilaciones propias de la respuesta dinámica real de la estructura bajo un sismo, para al final mostrar resultados más cercanos al método adaptativo. Este análisis refleja con mayor precisión la disipación de energía y la degradación acumulada.

Para la torre de 4 niveles, el método tradicional alcanza un cortante basal máximo cercano a 130 kN, como se ve en la Figura 19, con una pérdida de rigidez poco significativa hacia el final del análisis. Este método es suficiente para capturar el comportamiento general de una estructura baja, ya que las deformaciones se distribuyen uniformemente debido a su simplicidad.

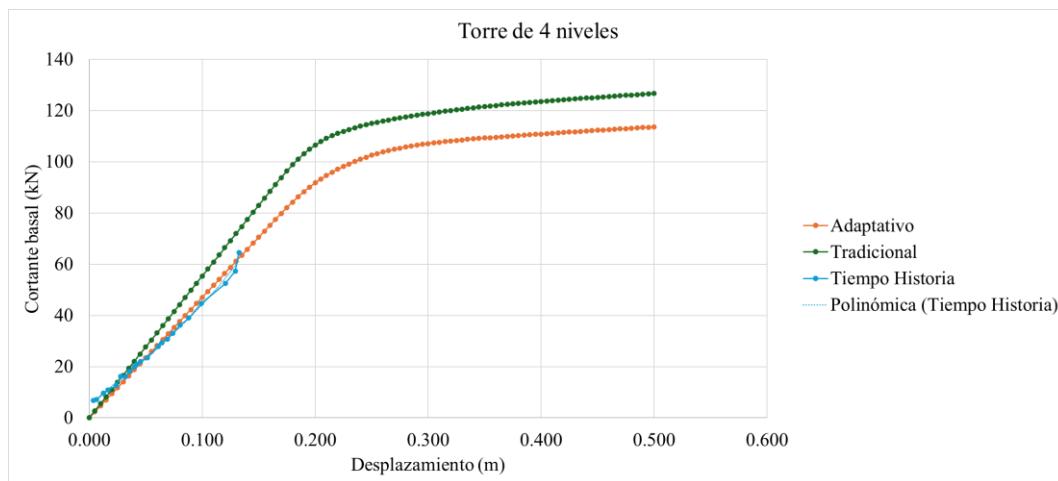


Figura 19. Gráfica comparativa de torre de 4 niveles

El método adaptativo, aunque registra un cortante basal ligeramente menor, alrededor de 120 kN, muestra un desempeño más equilibrado y estable en términos de deformaciones a lo largo de la altura de la estructura. Su respuesta es consistente con las demandas sísmicas esperadas para estructuras de menor altura.

El análisis tiempo-historia sigue de cerca a ambos métodos en las primeras etapas, pero captura mejor las variaciones dinámicas y la disipación de energía. Las oscilaciones observadas son resultado de la evaluación de la respuesta estructural bajo un registro sísmico real.

La Tabla 4 presenta un análisis comparativo entre los métodos de análisis sísmico *Pushover* Tradicional, *Pushover* Adaptativo y Tiempo-Historia (TH) para torres de 4, 6 y 8 niveles. Se evalúan los promedios del cortante basal máximo (en kN) necesarios para un mismo desplazamiento y el error asociado a cada método, junto con la diferencia porcentual entre el método tradicional y el adaptativo.

Tabla 4. Comparación de precisión

4 niveles			
	Tradicional	Adaptativo	TH
Promedios	37.35	31.74	27.23
Error	20.62%	16.58%	
Diferencia			
	4.03%		
6 niveles			
	Tradicional	Adaptativo	TH
Promedios	65.10	54.29	60.03
Error	18.01%	9.57%	
Diferencia			
	8.44%		
8 niveles			
	Tradicional	Adaptativo	TH
Promedios	146.39	117.99	116.51
Error	24.37%	1.28%	
Diferencia			
	23.10%		

La hipótesis planteaba que el método adaptativo proporcionaría una respuesta al menos un 5% más precisa que el método tradicional. Los resultados muestran que:

En la torre de 4 niveles, la diferencia es menor al 5% (4.03%), aunque el error es significativamente menor en el método adaptativo, lo que respalda su mayor precisión.

En las torres de 6 y 8 niveles, la diferencia porcentual supera ampliamente el 5% (8.44% y 23.10%, respectivamente), confirmando que el método adaptativo mejora considerablemente la precisión del análisis estructural para torres más altas.

El método *pushover* adaptativo, como se observa en las gráficas, tiende a ser más conservador en comparación con el método tradicional. Esto se traduce en deformaciones más uniformemente distribuidas a lo largo de la altura de la estructura, una característica particularmente relevante para zonas sísmicas como México. En contraste, el método tradicional tiende a concentrar mayores distorsiones angulares en los niveles superiores.

Para la torre de 4 niveles, ambas metodologías cumplen con el estado de ocupación inmediata. Sin embargo, el método adaptativo produce valores ligeramente menores de distorsión, distribuyendo mejor las fuerzas sísmicas.

En la torre de 6 niveles, las distorsiones del método tradicional se acercan al límite de seguridad de vida, especialmente en los niveles superiores, mientras que el adaptativo permanece dentro de los límites normativos con una distribución más uniforme.

Finalmente, en la torre de 8 niveles, el método adaptativo destaca por mantener las distorsiones dentro de los límites de seguridad de vida. En cambio, el método tradicional supera este límite en niveles superiores, lo que indica un desempeño menos favorable para estructuras altas.

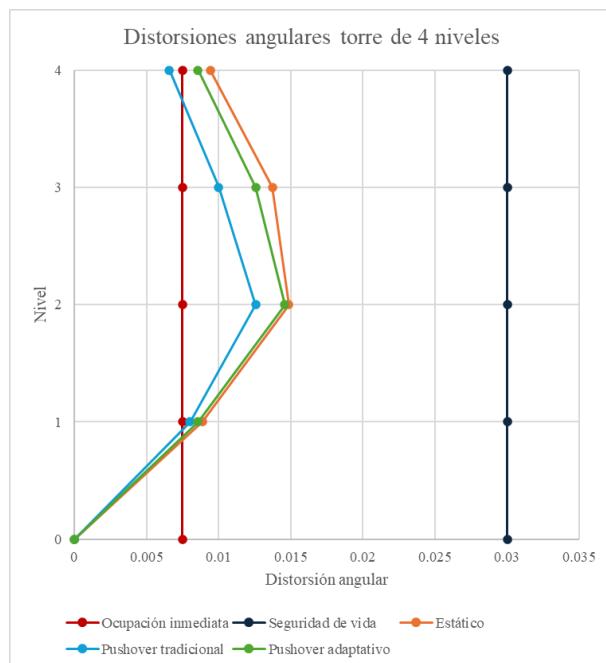


Figura 20. Distorsiones angulares de la torre de 4 niveles

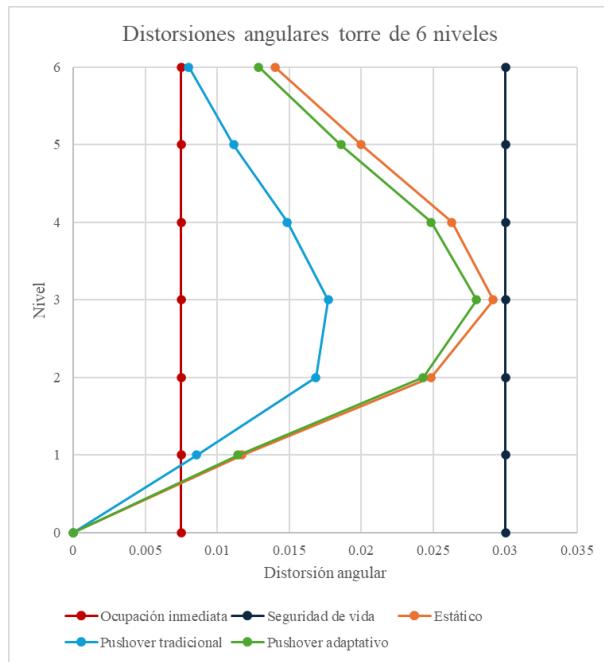


Figura 21. Distorsiones angulares de la torre de 6 niveles

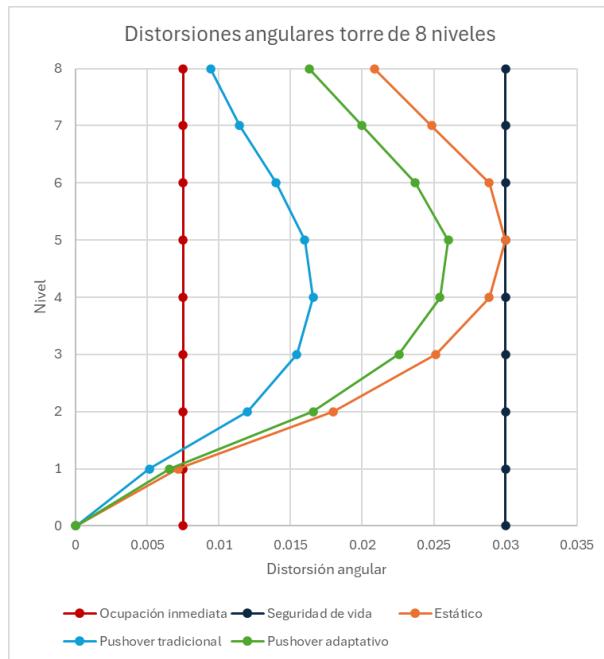


Figura 22. Distorsiones angulares de la torre de 8 niveles

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El método adaptativo cumple con la hipótesis planteada, especialmente en torres de mayor altura (6 y 8 niveles), donde proporciona resultados significativamente más precisos que el método tradicional. Esto respalda su utilidad como herramienta avanzada para el análisis sísmico y diseño estructural, garantizando cumplimiento normativo y optimizando el desempeño de las estructuras.

Las curvas *pushover* muestran que el método adaptativo es más conservador que el tradicional. Mientras el tradicional alcanza valores de cortante basal mayores, tiende a concentrar el daño en niveles específicos, particularmente en estructuras altas. El adaptativo, por su parte, redistribuye mejor las fuerzas y permite un mayor control de los desplazamientos antes del colapso, lo que lo hace más adecuado para diseños sismorresistentes en zonas como México.

En las gráficas de distorsiones angulares, el método adaptativo demuestra una distribución más uniforme de las deformaciones en comparación con el tradicional, que concentra mayores distorsiones en los niveles superiores. Esto es especialmente relevante para estructuras de 6 y 8 niveles, donde el adaptativo mantiene las deformaciones dentro de los límites normativos de seguridad de vida, mientras que el tradicional se acerca o supera estos límites.

- Cumplimiento normativo: Tanto el método tradicional como el adaptativo cumplen con los límites establecidos en la normativa mexicana para estructuras con ductilidad alta, pero el adaptativo lo hace de manera más uniforme.
- Análisis estático lineal: Este método proporciona un punto de referencia importante, validando que las estructuras analizadas tengan un comportamiento inicial adecuado bajo cargas gravitacionales y fuerzas laterales.
- Conservadurismo del adaptativo: El método adaptativo tiende a ser más conservador, mostrando una mejor redistribución de las fuerzas y reduciendo el riesgo de concentraciones de daño en niveles específicos, lo cual es crítico en zonas de alta sismicidad como México.

- Estructuras altas: El método adaptativo demuestra ventajas significativas en estructuras más altas (6 y 8 niveles), donde el tradicional presenta mayores concentraciones de daño y riesgo de colapso.
- Normativa mexicana: Este estudio respalda la importancia de evaluar los métodos de análisis no lineales, especialmente el adaptativo, como una herramienta valiosa para diseñar estructuras más seguras y resistentes, adaptadas a las condiciones sísmicas del país.

Una línea de investigación futura es la aplicación del método adaptativo en estructuras irregulares, ya que este método podría capturar de manera más precisa el comportamiento no lineal en configuraciones complejas, donde el método tradicional podría ser insuficiente.

Este estudio sugiere que el método adaptativo podría ser adoptado como una herramienta estándar en el diseño estructural sismorresistente, ya que proporciona una evaluación más realista de la respuesta estructural, promoviendo diseños más seguros y optimizados. El método adaptativo tiene el potencial de ajustarse a diferentes normativas internacionales de diseño por desempeño, lo que lo convierte en una opción versátil para aplicaciones globales. Dada la alta actividad sísmica en México, el método adaptativo resulta una herramienta indispensable para garantizar la seguridad estructural, reduciendo el riesgo de colapso y asegurando un comportamiento controlado durante eventos sísmicos severos.

7. REFERENCIAS

- Federal Emergency Management Agency. FEMA356/November 2000 Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings; Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA, 2000.
- FEMA. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440; Applied Technology Council: Redwood City, CA, USA, 2005.
- Ali Abass, H., & Khalaf Jarallah, H. (s/f). *Comparative Study of the Seismic Assessment According to ATC-40, FEMA-356 and FEMA-440 for Existing Hospital Building Located at Baghdad City.*
- Antoniou, S., & Pinho, R. (2004). Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based *pushover* procedures. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(4), 497–522. <https://doi.org/10.1080/13632460409350498>
- Asikoğlu, A., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2021). Overview on the nonlinear static procedures and performance-based approach on modern unreinforced masonry buildings with structural irregularity. En *Buildings* (Vol. 11, Número 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/buildings11040147>
- Avila, J. A., & Gutierrez, K. I. (2009). Non-linear step by step seismic response and Push-over analysis for reinforced concrete buildings in Mexico City. *WIT Transactions on the Built Environment*, 108, 527–538. <https://doi.org/10.2495/SAFE090491>
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2001). *A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings.*
- De'Nan, F., Lau, J. S., Ounahe, A. M., Kamela, M. I., & Hashim, N. S. (2023). Stability Consideration in Design of Steel Structures: A Review. En *Electronic Journal of Structural Engineering* (Vol. 23, Número 2, pp. 27–32). Department of Civil and Environmental Engineering. <https://doi.org/10.56748/ejse.234142>

- Jalilkhani, M., Ghasemi, S. H., & Danesh, M. (2020). A multi-mode adaptive *pushover* analysis procedure for estimating the seismic demands of RC moment-resisting frames. *Engineering Structures*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110528>
- Kuria, K. K., & Kegyes-Brassai, O. K. (2023). *Pushover Analysis in Seismic Engineering: A Detailed Chronology and Review of Techniques for Structural Assessment*. *Applied Sciences*, 14(1), 151. <https://doi.org/10.3390/app14010151>
- Pednekar, S. C., Chore, H. S., & Patil, S. B. (2015). Seismic assesment using *pushover* analysis: an overview. ... of *Pure and Applied Research in*
- Rahmani, A. Y., Bourahla, N., Bento, R., & Badaoui, M. (2019). Adaptive upper-bound *pushover* analysis for high-rise moment steel frames. *Structures*, 20, 912–923. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.07.006>
- Rofooei, F., Rofooei, F. R., Attari, N. K., Rasekh, A., & Shodja, A. H. (2007). Adaptive *pushover* analysis. En *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING* (Vol. 8, Número 3). <https://www.researchgate.net/publication/261362924>
- Shehu, R. (2021). Implementation of *pushover* analysis for seismic assessment of masonry towers: Issues and practical recommendations. *Buildings*, 11(2), 1–21. <https://doi.org/10.3390/buildings11020071>
- Zameeruddin, M., & Sangle, K. K. (2021). Performance-based Seismic Assessment of Reinforced Concrete Moment Resisting Frame. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(3), 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.005>

APÉNDICE

Como complemento a este trabajo, el código fuente desarrollado para la implementación del análisis estructural mediante el método Pushover adaptativo se encuentra disponible en el siguiente repositorio de GitHub:

<https://github.com/Darth-Ragnar/MATLAB>