

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN**  
**INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**



**TESIS**

**DESEMPEÑO Y COSTOS DE UN EDIFICIO DE ACERO  
LOCALIZADO EN CANCÚN CONSIDERANDO DIVERSOS  
ESCENARIOS DE CARGA POR VIENTO**

QUE PRESENTA PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN  
**ING. INELVA MARÍA BÁEZ ORTÍZ**

**DIRECTORES**

**DR. JOSÉ RAMÓN GAXIOLA CAMACHO**  
**DR. EDMUNDO AMAYA GALLARDO**

Culiacán de Rosales, Sinaloa, a 19 de agosto de 2026



**Universidad Autónoma de Sinaloa**

**Dirección General de Bibliotecas**

**Repositorio Institucional Buelna**

**Restricciones de uso**

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Dirección General de Bibliotecas  
Ciudad Universitaria  
Av. de las Américas y Blvd.  
Universitarios  
C.P. 80010 Culiacán Sin. Méx.  
Tel (667) 713 78 32 y  
(667) 712 50 57  
dgbuas@uas.edu.mx

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores de tesis, al Dr. José Ramón Gaxiola Camacho, por confiar nuevamente en mí para trabajar en este proyecto, y al Dr. Edmundo Amaya Gallardo, por compartir generosamente sus conocimientos, los cuales fueron de gran ayuda para el desarrollo de este trabajo. Es un verdadero honor para mí haber colaborado con ambos, les agradezco profundamente su apoyo, guía y valiosos consejos durante todo este proceso.

A mis padres, Inelva y Aurelio, por su apoyo incondicional en cada etapa de este camino y por inculcarme siempre el valor de trabajar con dedicación por mis sueños, este logro también es suyo. A mi hermano Mario, por seguir siendo el mejor hermano que la vida me pudo dar, quiero que sepas que estoy sumamente orgullosa de ti.

A mi pareja, Eduardo, porque sin tu apoyo constante a lo largo de estos años no lo habría logrado. Gracias por ser mi mejor amigo, mi refugio y por estar siempre para mí en cada momento; te amo.

A mis compañeros del área de estructuras, al M.I. Aaron Gutiérrez y al M.C. Aron Nevárez, les agradezco sinceramente por su apoyo, compañerismo y buenos consejos durante estos últimos años de trabajo compartido. De igual manera, extendiendo mi agradecimiento al Ing. Aurelio Beltrán, por su valiosa ayuda en la parte de estimación de costos de este proyecto.

Asimismo, agradezco al Dr. Federico Valenzuela por su tiempo y paciencia al enseñarme a realizar el análisis Pushover en los edificios, un conocimiento fundamental que enriqueció enormemente esta investigación.

Al Ing. Jonathan Ramírez, por permitirme de nueva cuenta realizar mi estancia profesional en JASAR, brindándome el espacio para continuar con mi aprendizaje y desarrollo laboral.

Asimismo, deseo manifestar un agradecimiento especial al señor Raúl y a la señora Alma, por abrirme las puertas de su casa y por todo el apoyo y cariño que le han brindado a mi familia.

Por último, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento otorgado para la realización de este proyecto, haciendo posible la culminación con éxito de esta investigación.

## RESUMEN

Cancún y otras zonas costeras están expuestas constantemente al impacto de huracanes, eventos que suelen someter a los edificios altos (como los desarrollos hoteleros) a fuerzas de viento que rebasan los parámetros convencionales de diseño. En este trabajo se evalúa el desempeño eólico-estructural de un edificio de acero de 30 niveles ubicado en Cancún, considerando una velocidad normativa de diseño y tres escenarios críticos asociados a los huracanes Roxanne, Emily y Wilma, para después estimar el costo directo del sistema estructural conforme se incrementa la demanda por viento.

Para realizar la comparación el edificio se analizó en el software ETABS para cuatro escenarios considerados, manteniendo constantes la geometría, el uso y el sistema estructural. El desempeño se evaluó mediante los estados límite de servicio establecidos en la normativa y se complementó con un análisis estático no lineal (Pushover), utilizando tres desplazamientos objetivo para identificar la secuencia de formación de articulaciones plásticas. El costo directo de los edificios se estimó considerando partidas de acero estructural, losacero, concreto, conexiones, pintura, traslado y montaje.

Los resultados indican que el edificio diseñado con la velocidad normativa no presenta un desempeño suficiente cuando se somete a demandas superiores a las de diseño. Al incrementar la velocidad de diseño las distorsiones de entrepiso disminuyen y el desempeño estructural mejora, sin embargo, el costo directo aumenta en el orden de 28 %, 53 % y 66 % para los escenarios correspondientes a 200, 255 y 300 km/h, respectivamente. En el análisis Pushover la plastificación empieza en los contravientos y progresa hacia vigas y columnas de los primeros niveles. La mayor parte de las articulaciones se mantuvo en estados aceptables, aunque algunas alcanzaron estados cercanos al colapso.

A partir de estos resultados, se concluye que mantener el edificio diseñado únicamente con la velocidad normativa no resulta suficiente para atender demandas eólicas superiores. El rediseño permite mejorar el desempeño estructural, pero implica un incremento importante en el costo del sistema. Por ello, se sugiere que futuras investigaciones evalúen alternativas de control de la respuesta que permitan mejorar el desempeño ante vientos severos sin depender exclusivamente del rediseño global de la estructura.

**Palabras clave:** ingeniería de viento; desempeño estructural; Pushover; costos de acero; edificios de acero.

## ABSTRACT

Cancún and other coastal areas are constantly exposed to the impact of hurricanes, events that often subject high-rise buildings, such as hotel developments, to wind forces that exceed conventional design parameters. This study evaluates the wind-structural performance of a 30-story steel building located in Cancún, considering a code-based design wind speed and three critical scenarios associated with Hurricanes Roxanne, Emily, and Wilma, in order to estimate the direct cost of the structural system as wind demand increases.

To perform the comparison, the building was analyzed in ETABS for the four scenarios considered, while keeping the geometry, use, and structural system constant. Performance was evaluated through the serviceability limit states established by the applicable code and complemented with a nonlinear static analysis (Pushover), using three target displacements to identify the sequence of plastic hinge formation. The direct cost of the buildings was estimated considering structural steel, steel deck, concrete, connections, painting, transportation, and erection.

The results indicate that the building designed with the code-based wind speed does not provide sufficient performance when subjected to demands greater than the design demand. As the design wind speed increases, interstory drifts decrease and structural performance improves; however, the direct cost increases by approximately 28%, 53%, and 66% for the scenarios corresponding to 200, 255, and 300 km/h, respectively. In the Pushover analysis, yielding begins in the braces and progresses toward beams and columns in the lower stories. Most of the hinges remained in acceptable states, although some reached states close to collapse.

Based on these results, it is concluded that maintaining the building designed solely for the code-based wind speed is not sufficient to accommodate higher wind demands. Redesigning the structure improves structural performance but entails a significant increase in the cost of the system. Therefore, future research should evaluate response-control alternatives that can improve performance under severe wind conditions without relying exclusively on global structural redesign.

**Keywords:** Wind Engineering; Performance-based wind design; Pushover; Costs; Steel Building.

## ÍNDICE

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                    | <b>1</b>  |
| 1.1. Generalidades .....                                        | 1         |
| 1.2. Planteamiento del problema .....                           | 3         |
| 1.3. Hipótesis .....                                            | 7         |
| 1.4. Objetivos.....                                             | 7         |
| 1.5. Justificación .....                                        | 8         |
| <b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>                                   | <b>11</b> |
| 2.1. Marco conceptual.....                                      | 11        |
| 2.1.1. Viento en la atmósfera.....                              | 11        |
| 2.1.2. Aerodinámica civil .....                                 | 14        |
| 2.1.3. Normativa para diseño eólico/acero.....                  | 17        |
| 2.1.4. Análisis Pushover como apoyo en estudios de viento ..... | 20        |
| 2.1.5. Diseño por viento basado en desempeño (PBWD) .....       | 22        |
| 2.2. Estado del arte .....                                      | 24        |
| <b>3. METODOLOGÍA .....</b>                                     | <b>30</b> |
| 3.1. Materiales.....                                            | 30        |
| 3.2. Métodos .....                                              | 31        |
| 3.2.1. Descripción del edificio.....                            | 32        |
| 3.2.2. Velocidad regional de diseño .....                       | 34        |

|        |                                                                 |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3. | Acciones por viento.....                                        | 34 |
| 3.2.4. | Escenarios de viento .....                                      | 36 |
| 3.2.5. | Modelación estructural .....                                    | 37 |
| 3.2.6. | Evaluación del desempeño .....                                  | 38 |
| 3.2.7. | Análisis estático no lineal (Pushover).....                     | 39 |
| 3.2.8. | Estimación de costo directo .....                               | 41 |
| 4.     | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                    | 43 |
| 4.1.   | Carga de viento aplicada .....                                  | 43 |
| 4.2.   | Configuración estructural .....                                 | 46 |
| 4.3.   | Desempeño: distorsión de entrepiso y desplazamiento global..... | 48 |
| 4.4.   | Resultados de Pushover .....                                    | 51 |
| 4.5.   | Costos estructurales.....                                       | 55 |
| 5.     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                            | 58 |
| 5.1.   | Conclusiones.....                                               | 58 |
| 5.2.   | Recomendaciones .....                                           | 59 |
| 6.     | REFERENCIAS .....                                               | 61 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Resumen de afectaciones y pérdidas económicas asociadas a huracanes relevantes en Cancún. .... | 5  |
| Tabla 2. Escala de vientos de huracanes de Saffir–Simpson. ....                                         | 13 |
| Tabla 3. Materiales y recursos utilizados en la investigación. ....                                     | 30 |
| Tabla 4. Velocidades regionales para Cancún con respecto a periodos de retorno. ....                    | 34 |
| Tabla 5. Escenarios de viento considerados en la investigación. ....                                    | 36 |
| Tabla 6. Cargas vivas en $\text{kg/m}^2$ . ....                                                         | 37 |
| Tabla 7. Combinaciones de carga. ....                                                                   | 38 |
| Tabla 8. Fuerzas de viento por nivel para caso normativo. ....                                          | 43 |
| Tabla 9. Fuerzas de viento en techo para caso normativo. ....                                           | 44 |
| Tabla 10. Fuerzas de viento por nivel para los tres escenarios de huracanes. ....                       | 44 |
| Tabla 11. Fuerzas de viento en techo para los tres escenarios de huracanes. ....                        | 45 |
| Tabla 12. Configuración estructural de los edificios. ....                                              | 47 |
| Tabla 13. Desplazamientos globales para cada escenario. ....                                            | 48 |
| Tabla 14. Resultados del análisis Pushover en X. ....                                                   | 52 |
| Tabla 15. Resultados del análisis Pushover en Y. ....                                                   | 52 |
| Tabla 16. Costo del edificio normativo. ....                                                            | 55 |
| Tabla 17. Costo del edificio Roxanne. ....                                                              | 56 |
| Tabla 18. Costo del edificio Emily. ....                                                                | 56 |
| Tabla 19. Costo del edificio Wilma. ....                                                                | 56 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Península de Yucatán. ....                                                                                                                                                                              | 2  |
| Figura 2. Comparación cualitativa entre la densidad espectral normalizada del viento y del sismo según la frecuencia estructural.....                                                                             | 4  |
| Figura 3. Mapa de ocurrencia de huracanes en la Península de Yucatán. ....                                                                                                                                        | 4  |
| Figura 4. Registro de velocidad del viento en función del tiempo.....                                                                                                                                             | 12 |
| Figura 5. Zonas principales del flujo cerca de un edificio de aristas vivas. ....                                                                                                                                 | 15 |
| Figura 6. Distribución esquemática de presiones de barlovento y succiones de sotavento sobre un edificio.....                                                                                                     | 16 |
| Figura 7. Mapa de isotacas de velocidad regional del viento para un periodo de retorno de 50 años. ....                                                                                                           | 18 |
| Figura 8. Distorsión de entrepiso.....                                                                                                                                                                            | 20 |
| Figura 9. Proceso del análisis Pushover. ....                                                                                                                                                                     | 21 |
| Figura 10. Curva de Capacidad con criterios de aceptación. ....                                                                                                                                                   | 22 |
| Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología.....                                                                                                                                                               | 32 |
| Figura 12. Vista en planta (a) y lateral (b) del edificio (dimensiones en metros). ...                                                                                                                            | 33 |
| Figura 13. Esquema de ubicación de articulaciones plásticas en el modelo estructural.....                                                                                                                         | 40 |
| Figura 14. Asignación de articulaciones plásticas en el modelo estructural en ETABS. ....                                                                                                                         | 41 |
| Figura 15. Representación esquemática de la distribución de fuerzas sobre las superficies de barlovento y sotavento por entrepiso/crujía, y sobre la cubierta para los distintos escenarios de carga eólica. .... | 45 |
| Figura 16. Modelo 3D del edificio en ETABS. ....                                                                                                                                                                  | 46 |
| Figura 17. Distorsiones de entrepiso de sismo y viento del edificio normativo, Roxanne, Emily y Wilma. ....                                                                                                       | 49 |
| Figura 18. Distorsiones de entrepiso del edificio normativo sometido a cada escenario.....                                                                                                                        | 50 |
| Figura 19. Diagrama de capacidad de articulaciones.....                                                                                                                                                           | 53 |
| Figura 20. Vista lateral de articulaciones.....                                                                                                                                                                   | 54 |

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades

El viento influye de forma directa en el desempeño de los edificios altos. Aunque en la mayoría de los casos la resistencia suele cumplirse, el estado de servicio puede gobernar decisiones clave desde etapas tempranas del proyecto. Actualmente, en México, el cálculo de la acción por viento se rige por el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento (MDOC-DV) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y se complementa con reglamentos locales como las Normas Técnicas Complementarias 2023 de la Ciudad de México [1], [2], ante la ausencia de un reglamento nacional. En la práctica, se emplean límites de servicio como la distorsión de entrepiso y desplazamiento global que sirven para mantener la funcionalidad del edificio. Sin embargo, aún existe una gran incertidumbre en lo que respecta al desempeño estructural de edificios altos sometidos a la acción del viento. En México, este es un tema de gran relevancia que merece ser explorado a detalle.

En la península de Yucatán (Figura 1), los huracanes de alta intensidad ilustran el nivel de demanda que puede provocar el viento en las edificaciones. Entre los casos más representativos están Wilma (2005), que devastó la costa noreste de Yucatán; Emily (2005), que alcanzó categoría 5 en el Caribe y afectó Cancún y Cozumel; y Dean (2007), que impactó como categoría 5 cerca de Mahahual [3], [4], [5]. Más recientemente, Beryl (2024) ingresó a tierra en Quintana Roo y cruzó la península, confirmando que la región enfrenta escenarios extremos que pueden superar el nivel normativo [6]. Lo anterior evidencia que sigue existiendo una incertidumbre técnica sobre el desempeño de los edificios altos diseñados con criterios normativos de viento cuando se someten a demandas extraordinarias provocadas por huracanes. En particular, no siempre es claro si las velocidades normativas son suficientes para controlar de manera adecuada la distorsión de entrepiso, el desplazamiento global y los posibles daños en fachadas, anclajes y otros elementos no estructurales.



Figura 1. Península de Yucatán.

En años recientes, gran parte de las investigaciones en ingeniería de viento se han orientado hacia el diseño por viento basado en desempeño (PBWD, por sus siglas en inglés), el cual propone evaluar de manera integral la respuesta esperada de estructuras mediante la relación de niveles de peligro de viento con estados de desempeño que la edificación debe alcanzar (operación, servicio aceptable y seguridad). En lugar de limitarse a cumplir valores prescriptivos, el PBWD utiliza probabilidades de excedencia de cada estado y busca que éstas sean coherentes con objetivos de confiabilidad/riesgo, para esto se tienen los criterios de aceptación en variables de respuesta (por ejemplo, distorsión de entrepiso, desplazamiento/aceleración en azotea, demandas en anclajes en la fachada y presiones locales), y se combinan con el peligro eólico (velocidades asociadas a periodos de retorno y direccionalidad) y con modelos demanda-capacidad [7]. Los documentos recientes de ASCE/SEI (*American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute*) y NIST (*National Institute of Standards and Technology*) proponen grupos de desempeño, rangos orientativos de umbrales (confort, servicio y seguridad) y lineamientos para cuantificar incertidumbres en demanda, capacidad y amortiguamiento. Además, nos permiten relacionar las decisiones de rigidez/control con consecuencias económicas (pérdidas, tiempo fuera de servicio), lo que facilita comparar alternativas bajo el criterio desempeño–costo [8], [9].

El uso del análisis estático no lineal (Pushover) es más común en ingeniería sísmica, en ingeniería de viento puede llegar a emplearse como herramienta práctica para entender la capacidad lateral del sistema e identificar el mecanismo de plastificación de los elementos conforme crece el desplazamiento de azotea. En esta investigación se utilizó un patrón de carga lateral triangular y desplazamientos objetivo asociados a vientos severos con distintos niveles de intensidad, con el objetivo de ubicar zonas críticas, reconocer la secuencia de plastificación y proponer refuerzos selectivos sin recurrir a análisis dinámicos complejos. Aunque este

procedimiento no representa la naturaleza dinámica (turbulenta) ni la duración característica de los eventos extremos, es una aproximación útil para explorar la capacidad resistente del sistema estructural y complementar la evaluación basada en indicadores de servicio [10].

En este contexto, Cancún es un caso representativo debido a su exposición recurrente a huracanes y al desarrollo de edificaciones verticales. Por ello, en la presente investigación se analiza un edificio alto de acero bajo cuatro velocidades de viento que van del nivel normativo a valores equivalentes a huracanes intensos. Lo anterior, usando como indicadores la distorsión de entrepiso y el desplazamiento global, y complementando con un análisis Pushover, con lo cual es posible estudiar de manera ordenada el equilibrio entre desempeño y costo que requieren los proyectos en zonas con huracanes.

## **1.2. Planteamiento del problema**

En términos generales, las edificaciones deben diseñarse y construirse para resistir cargas gravitacionales y laterales, siendo el viento una de las acciones más importantes. En la Figura 2, el viento concentra gran parte de su energía en frecuencias bajas, mientras que la energía sísmica suele presentarse en frecuencias altas. Por ello, las estructuras esbeltas, como edificios altos, son particularmente sensibles a la acción del viento, mientras que estructuras más rígidas suelen verse afectadas por la excitación sísmica. En consecuencia, conforme aumenta la altura de una edificación, el viento será más influyente sobre el comportamiento estructural. El viento no solo compromete la resistencia, también gobierna los estados límite de servicio: la distorsión de entrepiso y el desplazamiento global, los cuales responden al confort, funcionalidad y operatividad del edificio [11]. Por ello, resulta evidente la existencia en México de una vulnerabilidad latente ante la acción del viento en las estructuras, especialmente en la Península de Yucatán como se muestra en la Figura 3.

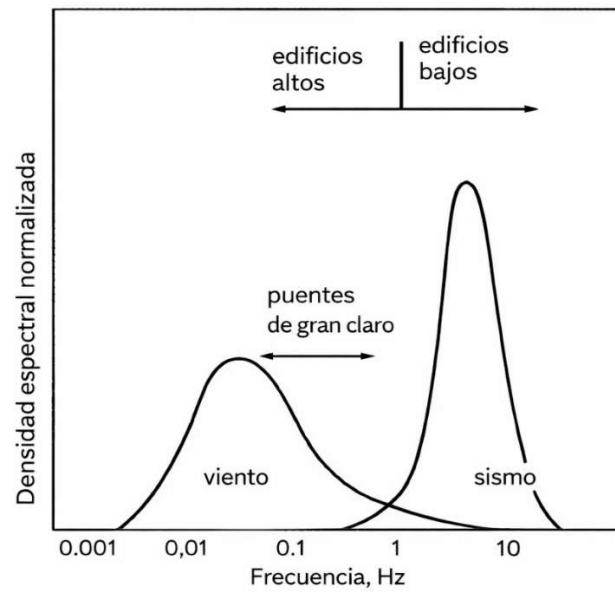


Figura 2. Comparación cualitativa entre la densidad espectral normalizada del viento y del sismo según la frecuencia estructural. Fuente: [12].

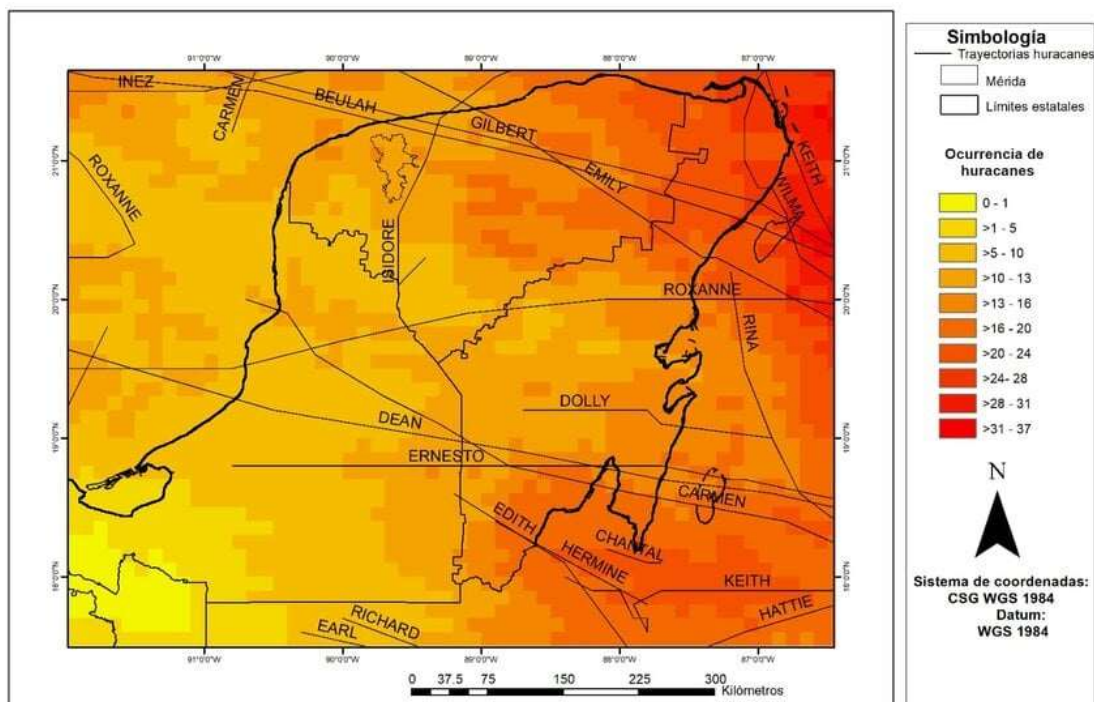


Figura 3. Mapa de ocurrencia de huracanes en la Península de Yucatán. Fuente: [13].

En México, el diseño estructural por viento se realiza mediante el uso de documentos técnicos como el MDOC-DV de la CFE [1], las NTC [2], reglamentos locales, y, en ocasiones, estándares internacionales como ASCE 7-22 [14], ante la ausencia de un reglamento nacional unificado. Desde la práctica profesional se ha observado que en distintas regiones del país las velocidades de diseño especificadas en reglamentos locales pueden diferir de aquellas recomendadas por el MDOC y otros documentos técnicos de referencia, lo cual tiene implicaciones directas en el dimensionamiento del sistema estructural y en el costo de la superestructura. Esta situación genera la necesidad de analizar, más allá del cumplimiento prescriptivo, cómo la selección de la velocidad de diseño influye en el desempeño estructural y en los costos que derivan de estos diseños.

Este problema toma particular relevancia en zonas costeras impactadas frecuentemente por huracanes, como Cancún, Quintana Roo. Esta ciudad ha sido afectada por huracanes intensos a lo largo de 3 décadas. Por ejemplo, el huracán Gilbert (1988) impactó la costa de Quintana Roo con vientos extremos y dejó daños en la península [15]. Roxanne (1995) provocó daños por oleaje en lobbies de hoteles en las ciudades de Cancún y Cozumel, y afectó severamente el arbolado de la zona [16]. En 2005, Emily tocó Yucatán como un huracán de categoría 4 y meses después, Wilma permaneció horas sobre el norte de Quintana Roo con vientos intensos y marea de tormenta que afectaron la zona hotelera de Cancún [4]. Más tarde, Dean (2007) llegó como categoría 5 a la costa oriental de Yucatán [5]. En años recientes, Delta (2020) y Grace (2021) causaron cortes de electricidad y afectaciones operativas; y en 2024 Beryl ocasionó cancelaciones de vuelos en Cancún y apagones en el corredor Tulum–Cancún [17], [18], [19]. Estos eventos ponen en evidencia afectaciones significativas en la operación de edificios altos y la economía local incluso cuando las construcciones se hayan diseñado conforme a la normativa vigente. En la Tabla 1 se muestra un resumen de pérdidas económicas y afectaciones asociadas a diversos huracanes en Cancún.

Tabla 1. Resumen de afectaciones y pérdidas económicas asociadas a huracanes relevantes en Cancún. Fuente: [4][5][18][19][20][21].

| Huracán / año | Afectaciones reportadas                                                                                                                                                                                        | Impacto principal                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wilma (2005)  | Erosión drástica y pérdida de playa en la zona hotelera de Cancún; concentración de daños en Quintana Roo; afectación severa al sector turístico; daños directos en hoteles, fachadas, ventanales, cubiertas e | Mayor exposición de edificaciones al oleaje y al viento; 97 % de los daños en México se concentró en Quintana Roo; de éstos, 94 % correspondió al sector turístico; pérdidas económicas asociadas tanto a daños físicos en infraestructura como a interrupciones operativas y reducción de ingresos. |

| Huracán / año | Afectaciones reportadas                                                                                               | Impacto principal                                                                     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|               | infraestructura, y daños indirectos por cierres temporales, suspensión de servicios y pérdida de actividad turística. |                                                                                       |
| Emily (2005)  | Pérdidas económicas directas y afectación notable a la planta hotelera en la península                                | Daños de miles de millones de pesos                                                   |
| Dean (2007)   | Pérdidas económicas relevantes a escala regional y daño asegurado internacional                                       | Aproximadamente 1.9 mil millones de USD                                               |
| Delta (2020)  | Interrupciones en el suministro eléctrico                                                                             | Dejó sin energía a cientos de miles de usuarios                                       |
| Grace (2021)  | Interrupciones en el suministro eléctrico                                                                             | Dejó alrededor de 700,000 usuarios sin electricidad en la península                   |
| Beryl (2024)  | Cancelación de vuelos, apagones y afectaciones operativas de corto plazo en el corredor turístico                     | Más de 100 vuelos cancelados en Cancún; interrupciones de servicios en Tulum y Cancún |

El PBWD brinda el marco conceptual adecuado para abordar esta discusión técnica al relacionar niveles de peligro con estados de desempeño. El Prestandard del ASCE/SEI v1.1 y los reportes del NIST recomiendan fijar objetivos de servicio y seguridad y comprobarlos con otras herramientas conforme al riesgo e importancia del edificio, obteniendo decisiones basadas en criterios de servicio y tolerancias de daño explícitas, no solo en cargas nominales. También, el diseño por desempeño nos permite estudiar demandas más realistas (por ejemplo el *Database-Assisted-Desing/Performance Based Desing* con datos de túnel/bases de datos) y a dejar en claro las incertidumbres que tiene esta metodología (rigidez efectiva, amortiguamiento, modelado de conexiones, etc.) [7], [8], [10].

No obstante, para llevar a cabo una implementación completa del PBWD es necesario desarrollar un diseño estructural dinámico no lineal en el dominio del tiempo, lo que resulta costoso y poco práctico. Dicho esto, resulta pertinente explorar herramientas como el análisis Pushover, el cual nos que permite identificar el mecanismo progresivo de plastificación, sin tener recurrir a modelos dinámicos complejos. La literatura reciente muestra que se ha utilizado este análisis en

problemas gobernados por viento (como marcos arriostrados y torres de transmisión), mostrando su utilidad para reconocer mecanismos en niveles bajos y comparar la capacidad lateral como complemento en la verificación por servicio [20], [21].

Debido a lo anterior, el problema que aborda esta investigación es la falta de evidencia comparativa de un edificio alto de acero ubicado en Cancún, que permita cuantificar los cambios en términos de distorsiones de entrepiso y desplazamiento global al pasar de un caso normativo a escenarios de viento asociados a huracanes, y cuál es el costo directo que implica ese aumento. Además, se implementa un análisis estático no lineal para ubicar zonas críticas de plastificación bajo desplazamientos equivalentes a vientos severos dentro del marco PBWD, en un contexto regional donde las pérdidas económicas por viento han sido muy altas.

### **1.3. Hipótesis**

Un edificio de acero en Cancún diseñado con criterios normativos locales incumplirá con el estado de servicio ante vientos extremos de tres huracanes ocurridos en la región. La evaluación del desempeño y un análisis estático no lineal revelará concentraciones de daño y la necesidad de refuerzos estructurales, con un incremento de costo respecto del caso base.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar el desempeño estructural de un edificio de acero diseñado bajo la normativa local, sometido a la acción del viento considerando diversos escenarios de carga producidos por huracanes comunes registrados en la zona de estudio, y documentar la implicación económica que tendría en el diseño estructural el considerar velocidades de viento extremas registradas durante la ocurrencia de huracanes. Lo anterior, mediante el uso de modelado estructural, análisis por desempeño y análisis Pushover, con el fin de demostrar la pertinencia e importancia del diseño basado en desempeño de edificios sometidos a carga por viento.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Seleccionar una ciudad en una región costera dentro de la República Mexicana como zona de estudio, basándose en su historial de problemas recientes a causa de la acción del viento provocada por huracanes de categoría elevada para contar con un caso de estudio representativo y replicable (con historial de huracanes, datos meteorológicos disponibles y marco normativo aplicable) que permita evaluar comparativamente el desempeño en servicio y el costo directo del sistema estructural bajo escenarios de viento severo.

2. Definir las velocidades de viento de diseño, tomando como referencia la velocidad normativa y las máximas registradas durante tres huracanes ocurridos en la zona de estudio para crear los escenarios de carga.
3. Establecer la geometría, el uso y el material de construcción de un edificio, con configuración arquitectónica típica de la zona de estudio para el diseño de este.
4. Definir los niveles de desempeño del estado límite de servicio mediante los límites de distorsión de entrepiso y desplazamiento global definidos en la normativa aplicable para evaluar el desempeño estructural del edificio.
5. Calcular las cargas de viento considerando el método dinámico del MDOC-DV (CFE, 2020) para cada escenario de carga.
6. Modelar y dimensionar el edificio en ETABS considerando vigas, columnas, losas y contravientos para diseñar el caso normativo y el de los tres huracanes.
7. Realizar un análisis Pushover al modelo normativo utilizando el software ETABS considerando un patrón de carga triangular y desplazamientos objetivo-equivalentes a los desplazamientos generados por cada huracán en este modelo, para identificar la secuencia de plastificación y los elementos críticos.
8. Evaluar el desempeño estructural de los cuatro modelos en términos de distorsión de entrepiso, desplazamiento global y resistencia de los elementos estructurales para verificar si la estructura cumple con los límites de servicio establecidos.
9. Estimar y comparar el costo directo de la superestructura en cada escenario, considerando acero estructural, losa-acero, concreto, conexiones, pintura, traslado y montaje, para conocer la implicación económica que traería el considerar cargas máximas de viento generadas por la ocurrencia de huracanes.
10. Integrar los resultados para documentar ventajas, límites y recomendaciones del enfoque por desempeño en zonas con huracanes, lo anterior como referencia para ingenieros de la práctica.

### **1.5. Justificación**

Las cargas accidentales por viento continúan representando una amenaza significativa para la sociedad, como lo han demostrado eventos devastadores en la península de Yucatán. Huracanes como Roxanne, Emily y Wilma han causado severos daños en Cancún y sus alrededores, dejando pérdidas millonarias en

infraestructura, colapsos estructurales y afectaciones en los sectores turístico y habitacional. Estos eventos resaltan la necesidad urgente de atender la problemática del diseño estructural por viento en esta región y, en particular, de evaluar las implicaciones de cargas extremas provocadas por huracanes de gran magnitud en las edificaciones.

Además, este problema obtiene mayor importancia en el contexto actual de cambio climático. Aunque no es correcto atribuir de forma directa cada huracán individual a este fenómeno, la evidencia científica reciente sí indica que el entorno de riesgo en las zonas costeras está cambiando. La temperatura media global en el periodo 2011–2020 fue aproximadamente 1.1 °C mayor que en 1850–1900, y el nivel medio global del mar aumentó alrededor de 0.20 m entre 1901 y 2018, con una tasa de ascenso que se aceleró hasta 3.7 mm/año en el periodo 2006–2018 [22]. Para una ciudad costera como Cancún, estos cambios no son menores ya que un mayor nivel del mar incrementa la exposición de la infraestructura al oleaje, la inundación y la erosión costera, mientras que una atmósfera más cálida favorece lluvias más intensas durante los ciclones tropicales.

A este contexto se suma que, bajo escenarios de calentamiento antropogénico del orden de 2 °C, se proyecta una mediana aproximada de aumento de 14 % en la tasa de precipitación de los ciclones tropicales, de 5 % en sus vientos máximos y de 13 % en la proporción de eventos que alcanzan categorías 4 y 5 [23]. En términos prácticos, esto significa que las ciudades costeras podrían enfrentar con mayor frecuencia condiciones combinadas de viento extremo, lluvia intensa, inundación y afectaciones sobre la infraestructura urbana y turística.

La decisión de realizar esta investigación se justificó por varios aspectos. En primer lugar, mejorar el diseño por viento con base en el desempeño se ha demostrado que puede ser una vía adecuada para reducir daños y optimizar recursos a lo largo de la vida útil de las edificaciones. En segundo lugar, la aplicación del PBWD en México no es muy común; algunos reglamentos han comenzado a incorporar conceptos de desempeño, y esta tesis demuestra su aplicación en un edificio departamental representativo de Cancún. En tercer lugar, el tema se relaciona directamente con el PRONACE de Vivienda de la SECIHTI, al contribuir con evidencia técnica para un entorno más seguro y resiliente en zonas costeras.

La literatura revisada demuestra una falta de comparativas exhaustivas en términos de desempeño y costos para el diseño estructural por viento. Igualmente, se evidencia que el análisis Pushover no es de uso común en estudios por viento, aun así, la evidencia disponible muestra que resulta útil para identificar zonas críticas y la secuencia de plastificación. En esta tesis se atiende ese vacío al comparar, en un mismo edificio con criterios uniformes, la distorsión de entrepiso, el desplazamiento global y el costo directo de la superestructura cuando la velocidad de diseño pasa de 180 km/hr a valores equivalentes a huracanes ocurridos en la zona (200, 255 y 300 km/hr).

Los hallazgos de esta investigación aportan bases prácticas para distintos grupos de profesionistas. Para ingenieros estructurales, pueden fundamentar las bases para el desarrollo de guías para definir niveles de diseño, priorizar refuerzos

selectivos y estimar su impacto económico. Para desarrolladores y administradores de vivienda, la comparación desempeño–costo facilita la planeación de inversiones con mayor certidumbre. Para autoridades, los resultados ofrecen elementos para ajustar criterios de servicio en zonas costeras y valorar riesgos con mejor información. En el ámbito académico, este estudio es útil para el desarrollo de futuras investigaciones con un caso realista, datos claros y una metodología que se puede replicar en otras ciudades de la República Mexicana.

La viabilidad del proyecto se respalda por la disponibilidad de recursos técnicos y económicos. Se contó con equipo de cómputo y software especializado con licencia para el diseño estructural, la evaluación del desempeño y el análisis Pushover del modelo normativo, así como con criterios normativos actualizados lo que aseguró precisión de los resultados.

Los resultados obtenidos en este proyecto contribuyen al avance del conocimiento en el diseño estructural por viento en Cancún y brinda orientación práctica para evaluar el desempeño de edificios sometidos a vientos extremos. En este trabajo se presenta información que relaciona la velocidad de viento con la distorsión de entrepiso y el desplazamiento global, diagramas de plastificación derivados del Pushover, así como comparativos de costos por escenario que apoyaron al análisis de los resultados y la formulación de conclusiones. Para su difusión, se redactó un artículo el cual se presentó en el Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica 2025 organizado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

Esta investigación logró desarrollarse gracias al financiamiento de la SECIHTI mediante una beca de posgrado, equivalente a 4.5 UMA (Unidad de Medida y Actualización), lo cual permitió cubrir los gastos que el proyecto requirió.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco conceptual

#### 2.1.1. Viento en la atmósfera

En ingeniería estructural, el viento se entiende como el movimiento de las masas de aire respecto a la superficie terrestre. De manera más precisa, la *American Meteorological Society* define el viento como aire en movimiento relativo a la superficie de la Tierra, mientras que la UNDRR (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*), con base en terminología de la WMO (*World Meteorological Organization*), señala que, salvo que se indique lo contrario, se considera únicamente su componente horizontal [24], [25]. Para fines de diseño, esta componente horizontal suele ser la de mayor interés, ya que es la que interactúa activamente con las fachadas y controla la mayor parte de las presiones que actúan sobre una estructura.

La parte de la atmósfera donde este movimiento se desarrolla bajo la influencia directa de la superficie terrestre se conoce como capa límite atmosférica. Esta corresponde a la región más baja de la troposfera y se caracteriza porque sus propiedades dependen de la rugosidad del terreno, de los intercambios de calor con la superficie y, a mayor altura, de la acción de la rotación terrestre. En esta capa, la velocidad del viento cambia con la altura y el flujo es turbulento, sobre todo en las zonas cercanas al suelo [26], [27]. Esto significa que el viento no debe interpretarse como una corriente uniforme y constante, sino como un fenómeno que varía tanto en el espacio como en el tiempo.

Por esta razón, en ingeniería del viento es habitual descomponer la velocidad en dos partes: una componente media y una componente fluctuante o turbulenta. La componente media representa la tendencia general del flujo durante un intervalo de tiempo determinado, mientras que la componente fluctuante representa las variaciones rápidas alrededor de ese valor medio. Esta descomposición es importante porque la respuesta estructural no depende solo del valor promedio del viento, sino también de la intensidad y frecuencia de sus fluctuaciones. En la práctica estas oscilaciones rápidas se presentan como ráfagas. La WMO define la ráfaga como el máximo de la media móvil de 3 segundos de la velocidad del viento dentro del periodo de observación. De igual manera, documentos técnicos de medición atmosférica también señalan que las ráfagas se reportan con base en promedios cortos de 3 segundos [28]. En consecuencia, dos sitios con una misma velocidad media pueden generar demandas distintas si uno de ellos presenta un contenido turbulento más severo o ráfagas de mayor magnitud.

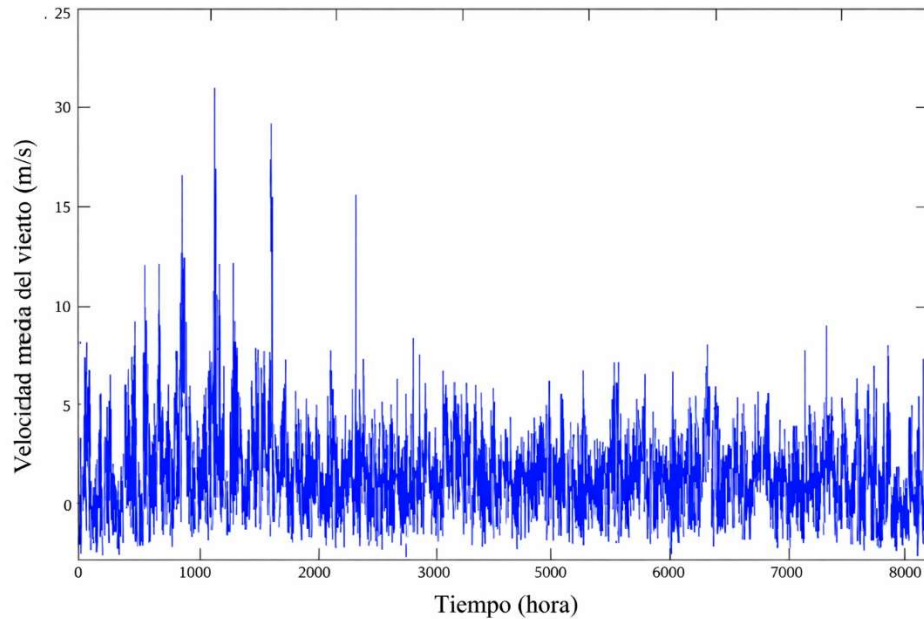


Figura 4. Registro de velocidad del viento en función del tiempo. Fuente: [29].

En la Figura 4 se observa un registro de velocidades turbulentas que fluctúan en el tiempo. Desde el punto de vista estructural, estas fluctuaciones son relevantes porque pueden amplificar la demanda sobre fachadas, anclajes y otros elementos expuestos.

A partir de su escala de generación y de sus características físicas, el viento puede clasificarse de forma general en sinóptico y vientos de naturaleza convectiva. Los vientos sinópticos están asociados a sistemas meteorológicos de gran escala, como gradientes regionales de presión, frentes fríos o ciclones extratropicales. Suelen desarrollarse en intervalos relativamente largos y, por ello, su comportamiento se adapta mejor a los modelos clásicos de la capa límite atmosférica. En cambio, los vientos no sinópticos están asociados a fenómenos más localizados y transitorios, como tormentas convectivas severas, *downbursts*, *microbursts* y otros eventos extremos de corta duración [30]. Esta clasificación es importante porque los modelos convencionales de diseño por viento han sido desarrollados principalmente para vientos sinópticos, mientras que los eventos no sinópticos presentan cambios más rápidos en dirección e intensidad y, por tanto, pueden producir efectos diferentes en las estructuras [30], [31].

Dentro de estos vientos extremos, los huracanes tienen especial importancia en regiones costeras como la península de Yucatán. Desde el punto de vista meteorológico, un huracán es un ciclón tropical de núcleo cálido, organizado alrededor de un ojo y una pared del ojo, donde se concentran los vientos máximos. Su campo de viento disminuye con la distancia al centro y depende, entre otros factores, del radio de vientos máximos, de la velocidad de traslación y de la interacción con la superficie marina o terrestre. Para clasificar su intensidad, el *National Hurricane Center* utiliza la escala de vientos de huracanes de Saffir–Simpson, que agrupa los huracanes en cinco categorías con base en la velocidad del viento sostenido de 1 minuto, medida a 10 m de altura. Esta escala proporciona

rangos de velocidad en mph, nudos y km/h, así como una descripción cualitativa del daño esperado. Es importante recordar que la escala Saffir–Simpson se refiere únicamente al viento, y no considera otros efectos también relevantes, como la marea de tormenta o la lluvia [32], [33]. Esta escala se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Escala de vientos de huracanes de Saffir–Simpson. Fuente: [32].

| Categoría | Vientos sostenidos                              | Tipos de daños debidos a vientos de huracán                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1         | 74–95 mph<br>64–82 kt<br>19–153 km/h            | Vientos muy peligrosos producirán algunos daños: Las viviendas de estructura bien construidas podrían presentar daños en el techo, tejas, recubrimientos de vinilo y canaletas. Las ramas grandes de los árboles se romperán y los árboles de raíces poco profundas podrían ser derribados. Los daños extensos en líneas y postes eléctricos probablemente ocasionarán cortes de energía que podrían durar de algunos días a varios días.                                                        |
| 2         | 96–110 mph<br>83–95 kt<br>154–177 km/h          | Vientos extremadamente peligrosos causarán daños extensos: Las viviendas de estructura bien construidas podrían sufrir daños importantes en techos y revestimientos. Muchos árboles de raíces poco profundas se quebrarán o serán arrancados y bloquearán numerosos caminos. Se esperan pérdidas de energía casi totales, con apagones que podrían durar desde varios días hasta semanas.                                                                                                        |
| 3 (mayor) | 111–129 mph<br>96–112 kt<br>178–208 km/h        | Ocurrirán daños devastadores: Las viviendas bien construidas con estructura podrían sufrir daños importantes o la remoción de la cubierta del techo y de los extremos de los hastiales. Muchos árboles serán quebrados o arrancados, bloqueando numerosos caminos. La electricidad y el agua no estarán disponibles durante varios días o semanas después del paso de la tormenta.                                                                                                               |
| 4 (mayor) | 130–156 mph<br>113–136 kt<br>209–251 km/h       | Ocurrirán daños catastróficos: Las viviendas bien construidas con estructura pueden sufrir daños severos con pérdida de la mayor parte de la estructura del techo y/o de algunas paredes exteriores. La mayoría de los árboles serán quebrados o arrancados y los postes eléctricos caerán. La caída de árboles y postes eléctricos aislará zonas residenciales. Los cortes de energía durarán semanas o posiblemente meses. La mayor parte de la zona será inhabitable durante semanas o meses. |
| 5 (mayor) | 157 mph o más<br>137 kt o más<br>252 km/h o más | Ocurrirán daños catastróficos: Un alto porcentaje de las viviendas con estructura será destruido, con falla total del techo y colapso de paredes. La caída de árboles y postes eléctricos aislará zonas residenciales. Los cortes de energía durarán semanas o posiblemente meses. La mayor parte de la zona será inhabitable durante semanas o meses.                                                                                                                                           |

En esta tesis, la escala Saffir–Simpson se utiliza como una referencia teórica para ubicar la severidad de los escenarios de viento asociados a huracanes. Esto permite relacionar de forma más clara las velocidades empleadas en el estudio con fenómenos atmosféricos reales y con el contexto costero de Cancún.

### **2.1.2. Aerodinámica civil**

La aerodinámica civil estudia los procesos y mecanismos en que el flujo de aire interactúa con las edificaciones y cómo esa interacción se traduce en presiones y fuerzas sobre sus superficies. En edificios altos, esta interacción adquiere especial importancia porque el viento no solo genera acciones globales sobre la estructura, sino también efectos locales en fachadas, bordes, esquinas y cubiertas. A diferencia de cuerpos aerodinámicos, muchas edificaciones se comportan como cuerpos romos (*bluff bodies*), es decir, geometrías en las que el flujo no puede mantenerse adherido a la superficie durante todo su recorrido. Como consecuencia, al encontrar cambios bruscos de forma, aristas o esquinas vivas, la corriente tiende a separarse de la superficie. Este fenómeno se conoce como desprendimiento de la corriente o separación del flujo, y es uno de los mecanismos fundamentales que explican la distribución de presiones sobre la envolvente de un edificio [34].

Cuando el flujo se separa, se forman regiones de recirculación y una estela turbulenta detrás del cuerpo. Esta separación modifica la presión sobre las superficies y puede generar zonas de baja presión o succión, especialmente en las caras laterales, en sotavento y en las esquinas de la azotea. Además, el desprendimiento periódico de vórtices puede inducir fluctuaciones de presión en el tiempo, lo que se vuelve relevante en estructuras altas y esbeltas. Por ello, la forma arquitectónica del edificio tiene una influencia directa en su respuesta aerodinámica. Edificios con esquinas prismáticas tienden a provocar una separación más marcada, mientras que modificaciones geométricas como esquinas redondeadas pueden alterar la intensidad de la estela y redistribuir las presiones sobre la superficie [34], [35]. La Figura 5 presenta las principales zonas asociadas al flujo separado cerca de un edificio de aristas vivas, incluyendo la zona de estela y la región de separación aguas arriba.

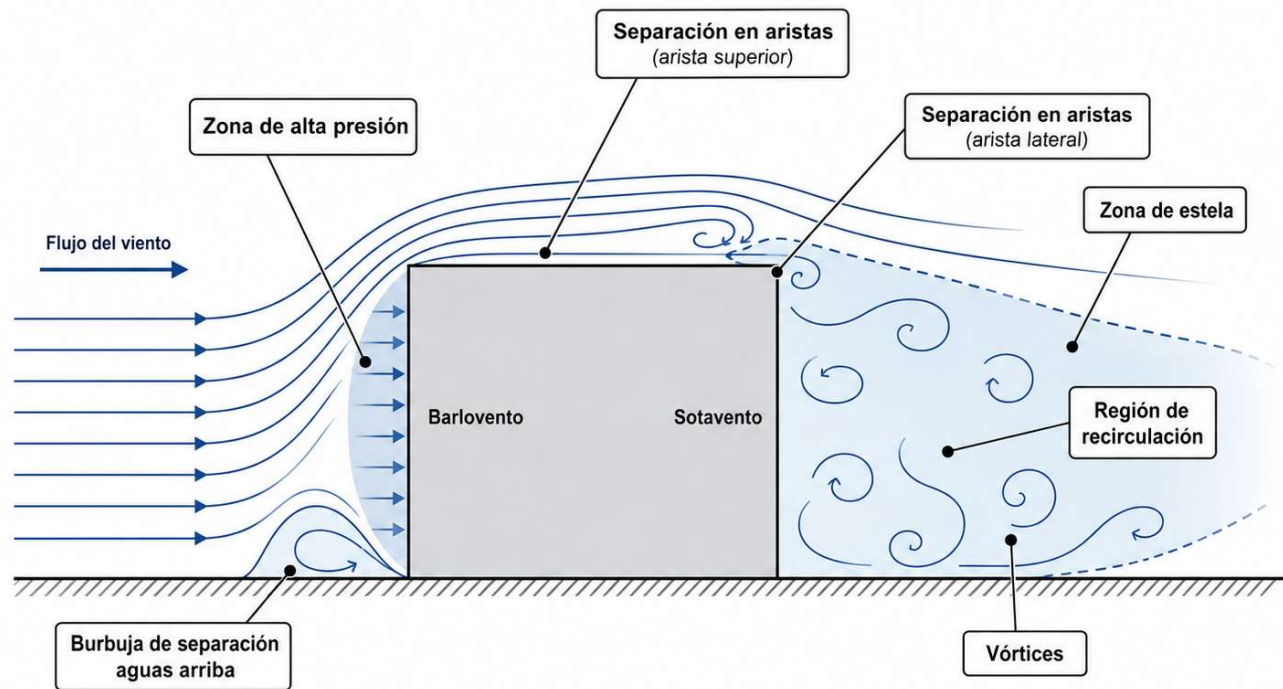


Figura 5. Zonas principales del flujo cerca de un edificio de aristas vivas.

Esta idea se conecta directamente con la interacción viento–estructura. Desde el punto de vista físico, el edificio recibe la acción del viento en forma de presiones y succiones distribuidas sobre su superficie; sin embargo, la respuesta estructural también puede influir, en cierta medida, en la forma en que el flujo se desarrolla a su alrededor. En edificios bajos o rígidos, esta retroalimentación suele ser menos importante y el problema puede tratarse principalmente como una acción aerodinámica externa. En cambio, en edificios altos y flexibles, la interacción entre el viento y la estructura se vuelve más relevante, porque la deformación del sistema puede modificar la acción del flujo, sobre todo en respuestas transversales y torsionales [36].

En este contexto, la respuesta estructural al viento puede presentarse a lo largo del viento, transversal al viento y en torsión. La primera se asocia principalmente con la turbulencia incidente y con la componente media del flujo. La respuesta transversal, en cambio, está fuertemente relacionada con el desprendimiento alternado de vórtices y con la formación de la estela. La respuesta torsional aparece cuando las distribuciones de presión son asimétricas o cuando la geometría del edificio favorece excentricidades aerodinámicas [37]. Estas tres componentes explican por qué el diseño frente al viento en edificios altos no puede interpretarse únicamente como un problema estático, sino como una interacción entre la atmósfera, la forma del edificio y su sistema resistente.

En los últimos años, esta interacción ha cobrado mayor relevancia dentro del diseño basado en desempeño por viento, porque se ha demostrado que la representación realista de la demanda requiere considerar la intensidad del viento y la forma en que la estructura responde a ella. Estudios recientes han mostrado que, cuando se

incorpora esta interacción en edificios altos, se presenta un cambio en las estimaciones de demanda y en la interpretación del desempeño global del sistema [36]. Aunque en esta tesis no se desarrolla un estudio aeroelástico completo, es importante establecer este concepto dentro del marco teórico, ya que ayuda a entender por qué algunas configuraciones estructurales y geométricas son más sensibles que otras frente a la acción del viento.

La forma más directa en que esta interacción se traduce al diseño es a través de las superficies de presión y de los coeficientes de presión. Cuando el viento incide sobre una edificación, las distintas caras del edificio no experimentan la misma acción. La cara que recibe directamente el flujo se conoce como barlovento y suele presentar presiones positivas, mientras que la cara opuesta, conocida como sotavento, suele presentar succiones debidas a la separación del flujo y a la formación de la estela. La Figura 6 muestra una representación gráfica de estas caras. De manera semejante, en cubiertas y azoteas aparecen zonas de presión o succión que dependen de la forma del edificio, de la dirección del viento y de la posición dentro de la superficie. En bordes y esquinas, las succiones suelen ser mayores debido a la aceleración local del flujo y al desprendimiento de la corriente [34], [38].

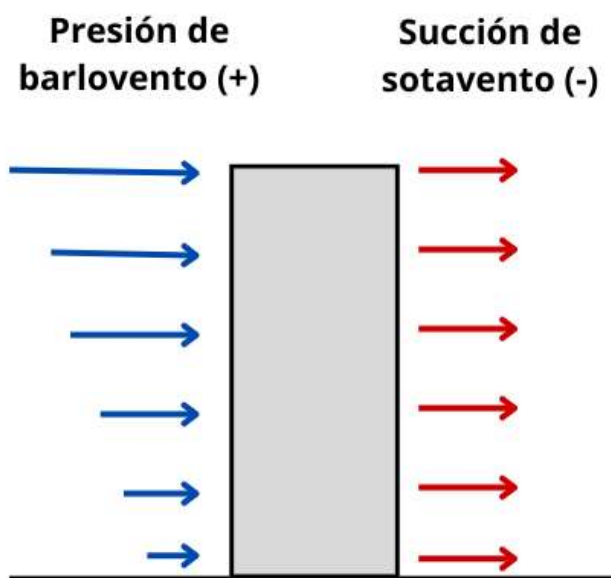


Figura 6. Distribución esquemática de presiones de barlovento y succiones de sotavento sobre un edificio.

Para expresar cuantitativamente estos efectos, la ingeniería de viento utiliza los coeficientes de presión, que son parámetros adimensionales que relacionan la presión que actúa en una superficie con una presión de referencia asociada a la velocidad del viento. También, indican si una zona del edificio está sometida principalmente a presión o a succión, y con qué intensidad relativa. Su valor depende de la geometría del edificio, de la dirección del viento, del punto específico

de la superficie y del patrón de flujo que se desarrolla alrededor de la estructura. Es por esto por lo que el coeficiente de presión funciona como el vínculo entre la interpretación física del flujo y la carga que posteriormente se aplica al modelo estructural [38].

En resumen, la aerodinámica civil demuestra que las cargas de viento dependen de una velocidad regional y también de la forma en que el flujo se separa, interactúa con la estructura y se distribuye sobre las distintas superficies del edificio. Esta visión resulta importante en edificios altos, porque ayuda a explicar por qué la forma arquitectónica, la configuración estructural y la distribución de superficies expuestas influyen de manera directa en las presiones de diseño, en la respuesta global de la estructura y en las demandas locales sobre la envolvente.

### **2.1.3. Normativa para diseño eólico/acero**

El análisis y diseño de edificios altos sometidos a la acción del viento se apoya en un conjunto de documentos normativos que permiten pasar del peligro atmosférico a la respuesta estructural. En esta investigación, los documentos de referencia principales fueron el Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento (MDOC-DV) de la Comisión Federal de Electricidad, el ASCE/SEI 7-22 como referencia internacional de cargas, y el *Prestandard for Performance-Based Wind Design* de ASCE/SEI, que aporta el marco para organizar objetivos de desempeño, criterios de aceptación y niveles de peligro [1], [7], [14]. En conjunto, estos documentos permiten definir la demanda de viento, establecer criterios de servicio y dar soporte a una lectura del comportamiento estructural orientada al desempeño.

Uno de los conceptos básicos en la normativa eólica es la velocidad regional del viento, ya que representa el punto de partida del cálculo. En México, el MDOC-DV define esta velocidad como una referencia asociada a una región del país y a un periodo de retorno determinado. En términos prácticos, la velocidad regional representa el peligro eólico básico que se espera en el sitio antes de considerar las particularidades del terreno y del edificio. Su valor se obtiene a partir de registros anemométricos y análisis estadísticos de valores extremos, y se presenta en forma de mapas de isotacas (Figura 7), los cuales permiten identificar la velocidad correspondiente a cada zona del país [1]. Este procedimiento es conceptualmente semejante al adoptado por ASCE 7-22, donde la velocidad básica también se asocia a mapas de peligro y a niveles de probabilidad vinculados al riesgo estructural [14].

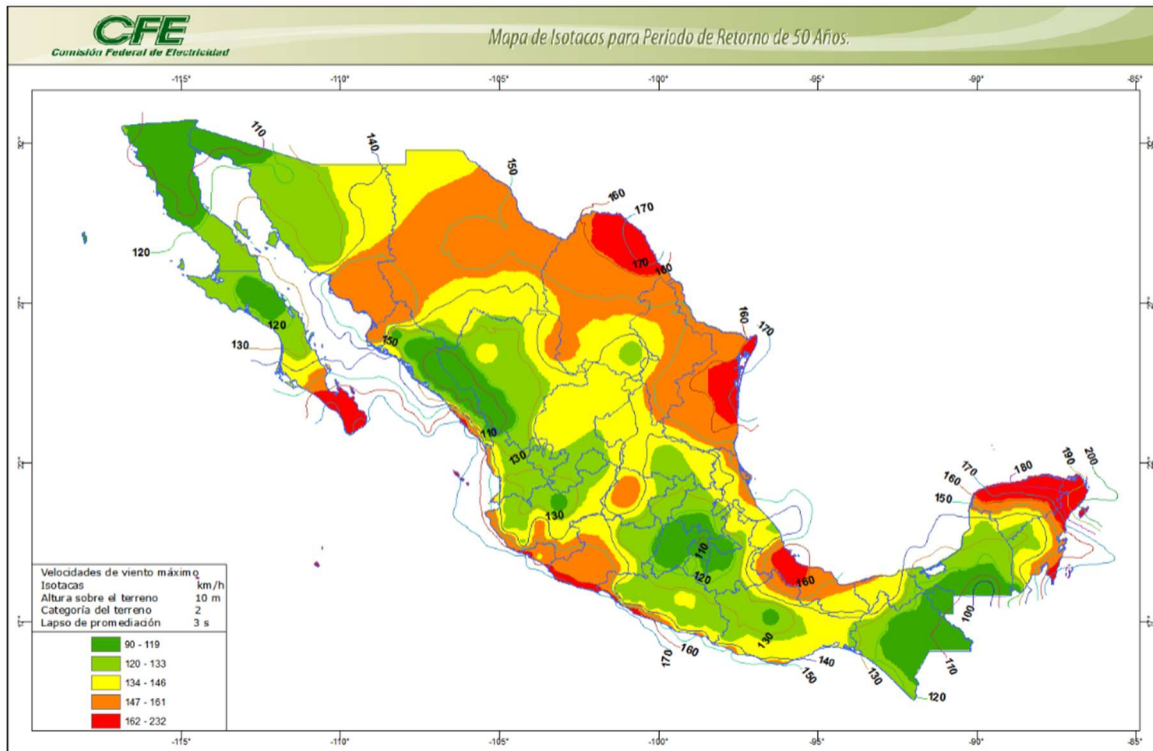


Figura 7. Mapa de isotacas de velocidad regional del viento para un periodo de retorno de 50 años. Fuente: [1]

El periodo de retorno es otro concepto central, porque relaciona el valor de la velocidad con su frecuencia de ocurrencia. Desde el punto de vista probabilístico, expresa el tiempo promedio en el que un evento de igual o mayor intensidad puede ser excedido. Esto permite distinguir entre acciones más frecuentes, asociadas al servicio, y acciones menos frecuentes, asociadas a la seguridad estructural. En otras palabras, no todas las decisiones de diseño deben responder al mismo nivel de exigencia: un edificio debe conservar un comportamiento aceptable frente a vientos relativamente frecuentes, pero también mantener seguridad ante eventos raros de mayor intensidad. En regiones como Cancún, donde el contexto climático incluye huracanes severos, esta relación entre velocidad, periodo de retorno y criterio de diseño adquiere una importancia particular [1], [14].

A partir de la velocidad regional  $V_R$ , la normativa mexicana define la velocidad básica de diseño  $V_D$ , la cual incorpora el efecto de la topografía y de la exposición local. Esta velocidad se calcula mediante la expresión:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad (1)$$

donde  $F_T$  es el factor de topografía,  $F_{rz}$  es el factor de exposición local y  $V_R$  es la velocidad regional del viento [1]. Esta formulación muestra que la velocidad usada en diseño también depende de las características específicas del sitio. Por ello, dos edificios ubicados en una misma ciudad no necesariamente estarán sujetos a la

misma demanda final, ya que la exposición del terreno, la altura del edificio y la topografía local pueden modificar la velocidad de diseño.

Con la velocidad básica de diseño se obtiene la presión dinámica de base a la altura  $z$ , denotada como  $q_z$ , la cual el MDOC-DV [1] expresa como:

$$q_z = 0.047 G V_D^2 \quad (2)$$

donde  $G$  es un factor de corrección por temperatura y altitud,  $V_D$  se expresa en km/h y  $q_z$  en Pa [1]. Esta presión dinámica funciona como base para calcular las presiones exteriores, interiores y locales que posteriormente se aplican a fachadas y cubiertas.

Una vez establecida la demanda de viento, el diseño debe verificarse mediante estados límite. En el contexto de esta tesis, el interés principal se centra en los estados límite de servicio, ya que el objetivo es estudiar cómo cambia el comportamiento del edificio cuando aumenta la velocidad del viento. Los estados límite de servicio están relacionados con la funcionalidad, el confort y el buen comportamiento de los elementos no estructurales, más que con la resistencia última del sistema. En edificios altos, esto se traduce de manera práctica en el control de la distorsión de entrepiso y del desplazamiento global, puesto que ambos indicadores se vinculan con la percepción de movimiento, el desempeño de fachadas y particiones, y la operación general del edificio [7], [14].

En la práctica profesional, y también dentro del enfoque adoptado en esta investigación, se utilizaron como referencia límites de distorsión de entrepiso  $\leq 0.005$  [39] (Figura 8) y desplazamiento global  $\leq H/500$  [2]. Aunque estos valores no provienen de un reglamento internacional, sí son consistentes en las normativas mexicanas aplicables para el caso de estudio. Esto resulta útil porque se puede expresar el desempeño del edificio en variables que pueden interpretarse fácilmente tanto desde el punto de vista estructural como desde el arquitectónico. En otras palabras, el estado límite de servicio nos indica si la estructura funciona adecuadamente bajo la acción del viento.

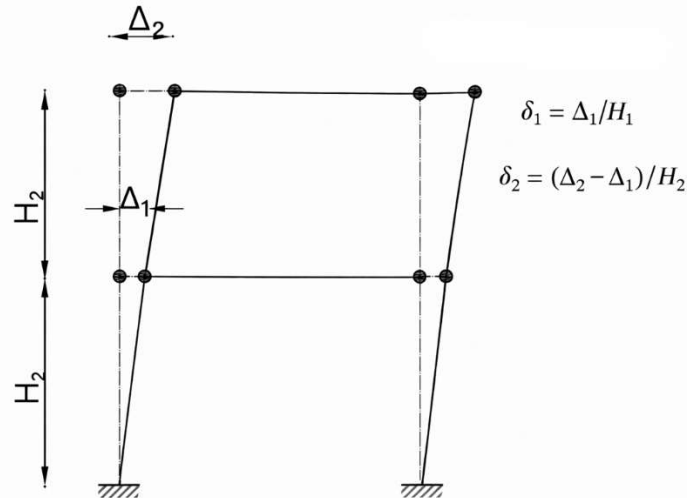


Figura 8. Distorsión de entrepiso.

En este punto adquiere relevancia el *Prestandard for Performance-Based Wind Design* de ASCE/SEI, ya que este documento presenta el diseño basándose en objetivos de desempeño, niveles de peligro y criterios de aceptación. A diferencia del enfoque prescriptivo, el preestandar plantea que la demanda de viento debe evaluarse junto con las consecuencias esperadas en términos de servicio, confort y seguridad, y que la respuesta estructural debe expresarse mediante variables medibles, como la distorsión de entrepiso, el desplazamiento global y, cuando sea necesario, las aceleraciones [7].

En conjunto, la normativa para diseño eólico puede entenderse como un sistema integrado ya que primeramente se caracteriza el peligro de viento mediante velocidades regionales y periodos de retorno, después, ese peligro se transforma en velocidades de diseño, presiones y cargas estructurales, posteriormente se revisa la respuesta del edificio mediante estados límite de servicio y finalmente, se interpreta el comportamiento en términos de desempeño.

#### 2.1.4. Análisis Pushover como apoyo en estudios de viento

El Pushover es un procedimiento estático no lineal en el que se aplica al edificio un patrón lateral de fuerzas (o un control de desplazamientos) que crece de forma monótona hasta alcanzar un punto de control en azotea. Durante el incremento, los elementos se modelan con relaciones fuerza-deformación no lineales (articulaciones plásticas), por lo que el análisis muestra la pérdida progresiva de rigidez, la redistribución de fuerzas y la capacidad última del sistema. El resultado central es la curva de capacidad (cortante basal vs. desplazamiento de control) y el orden de plastificación por niveles y por tipo de elemento. Esta metodología está establecida en FEMA 356 [40], y ASCE 41-17 [41], y se ha incorporado como herramienta en la evaluación de capacidad en estudios de diseño basado en desempeño para acciones laterales. En la Figura 9 se muestra este proceso.

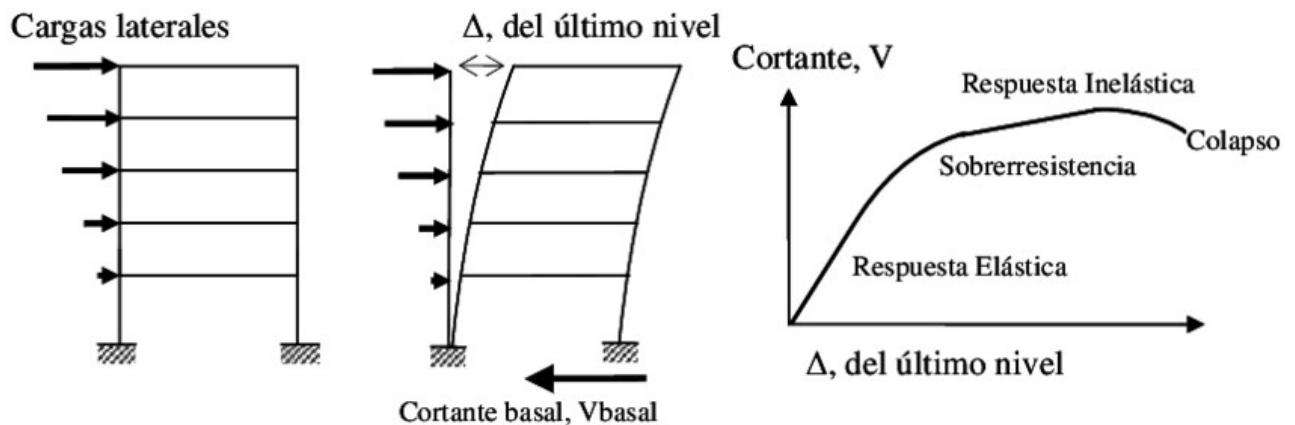


Figura 9. Proceso del análisis Pushover. Fuente: [42].

Para que aporte información útil en viento, el patrón lateral debe representar la forma de deformación del edificio (por ejemplo, triangular con la altura o modal del primer modo). En estructuras de acero, las articulaciones se ubican en extremos de vigas y columnas y en contravientos en la mitad del elemento [41].

El ASCE 41-17 [41] clasifica la demanda de cada articulación según su posición en la curva idealizada del elemento como:

- A (elástico): respuesta antes de fluencia. Sin daño apreciable.
- B (inicio de plastificación): inelasticidad limitada, recuperación práctica sin pérdida de resistencia. Cercano a Operación (IO).
- C (daño moderado): rotaciones/plasticidad significativa con estabilidad y capacidad residual. Asociado a Seguridad de Vida (LS).
- D (cercano al colapso): capacidad adicional muy limitada; grandes deformaciones o inestabilidades locales incipientes. Equivalente a *Near-Collapse/CP*.
- E (falla): pérdida de capacidad del componente (p. ej., inestabilidad, fractura o degradación que impide seguir transfiriendo fuerza).

La Figura 10, muestra la curva Pushover con los niveles de demanda descritos anteriormente.

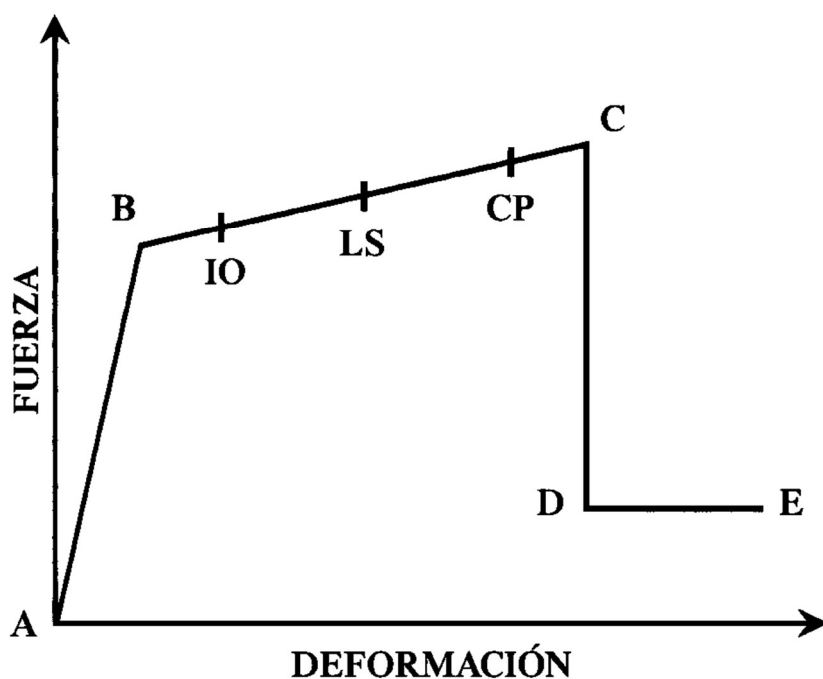


Figura 10. Curva de Capacidad con criterios de aceptación. Fuente: [40].

El Pushover se consolidó en la ingeniería estructural como una herramienta útil para estimar la capacidad lateral, reconocer mecanismos de falla y verificar la jerarquía de resistencias. Los primeros trabajos mostraron que, cuando la respuesta está dominada por el primer modo, la curva de capacidad resume bastante bien el comportamiento global y ayuda a comparar alternativas, calibrar modelos y detectar mecanismos de falla [43], [44], [45]. Estos hallazgos llevaron a que se incorporara formalmente en documentos normativos con estados de aceptación y reglas de modelación [40], [41]. En años recientes, varios estudios lo han extendido a problemas gobernados por viento, usándolo como lectura cuasiestática de capacidad y secuencia de plastificación en torres y marcos, y como apoyo dentro de estudios de PBWD para evaluar decisiones de rigidez y refuerzo [7], [10], [21].

En esta tesis, el Pushover se utilizó como complemento a la revisión de servicio para ubicar zonas críticas y leer la secuencia de plastificación bajo desplazamientos objetivo. Con ello se obtuvo la capacidad local de los elementos tomando en cuenta las distorsiones observadas y esto se utiliza más adelante para interpretar resultados y contextualizar las discusiones de costo directo.

#### 2.1.5. Diseño por viento basado en desempeño (PBWD)

El diseño por viento basado en desempeño es una metodología que busca evaluar la respuesta de una estructura a partir de objetivos de desempeño previamente definidos. Este enfoque permite establecer condiciones de operación, servicio y seguridad que la edificación debe satisfacer ante determinados niveles de peligro

por viento. Los documentos recientes de ASCE/SEI (Prestandard, 2023) [7] y el reporte de NIST (GCR 23-045, 2023) [10] plantean este procedimiento mediante grupos de desempeño, criterios de aceptación y un proceso de documentación en el que se relacionan las decisiones de modelación con los resultados obtenidos y sus posibles consecuencias.

Para definir el peligro de viento es necesario considerar, entre otros aspectos, su intensidad, dirección e incertidumbre. A partir de estos parámetros, la velocidad del viento se transforma en presiones compatibles con las disposiciones de la normativa correspondiente (MDOC-DV/ASCE 7), para posteriormente establecer los casos de carga que representen las direcciones críticas. De esta manera, las condiciones consideradas en el análisis buscan representar de forma adecuada las características del sitio y de la región donde se encuentra la estructura [1], [14].

Uno de los aspectos importantes dentro de esta metodología corresponde a la definición de los criterios de aceptación. Estos permiten establecer límites con los cuales puede determinarse si la respuesta de la estructura resulta adecuada para las condiciones analizadas. Entre los parámetros que pueden utilizarse se encuentran la distorsión de entrepiso y el desplazamiento global para condiciones de servicio, así como las aceleraciones asociadas al confort de los ocupantes y las demandas en los elementos de anclaje de la envolvente. Para condiciones relacionadas con la seguridad, se busca evitar la formación de mecanismos no deseados o alcanzar estados cercanos al colapso en elementos estructurales relevantes. El *Prestandard* establece rangos para clasificar las respuestas obtenidas como aceptables o sujetas a revisión, aunque señala la necesidad de considerar las características particulares de la ocupación, el uso y la importancia de cada edificio [7].

Otro aspecto que debe considerarse es la incertidumbre presente en las variables utilizadas durante el análisis. Para ello, es necesario dejar establecidos los supuestos adoptados y, cuando alguna variable tenga una influencia importante sobre los resultados, realizar análisis de sensibilidad que permitan identificar su efecto. El registro de estos aspectos facilita la revisión del procedimiento y permite conocer cómo las diferentes consideraciones influyen en la decisión final respecto al desempeño de la estructura [10].

La aplicación de esta metodología también se ha estudiado en diferentes problemas relacionados con el comportamiento de edificios ante la acción del viento. Por ejemplo, se ha desarrollado un marco probabilista para la evaluación de fachadas que considera tanto la direccionalidad del viento como la lluvia dirigida hacia el edificio [46]. De igual manera, diferentes estudios y revisiones han analizado los criterios de confort asociados con la aceleración, destacando la utilidad de este parámetro como indicador del desempeño en edificios altos [47]. A esto se suman evaluaciones realizadas a escala real, en las cuales se ha señalado la importancia de caracterizar adecuadamente propiedades como el amortiguamiento y las frecuencias de la estructura, debido a su influencia en la confiabilidad de las aceleraciones calculadas [48].

Además del comportamiento estructural, el enfoque basado en desempeño puede relacionarse con las consecuencias económicas de las decisiones de diseño. Los estudios relacionados con el costo del ciclo de vida muestran que aspectos como la rigidez y las estrategias de control pueden optimizarse cuando se busca encontrar un equilibrio entre el desempeño esperado y el costo total del sistema [49]. En este sentido, algunos trabajos recientes sobre PBWD aplicado a edificios altos han considerado el confort de los ocupantes y muestran formas de establecer y documentar objetivos, umbrales de aceptación y las decisiones tomadas durante el proceso de diseño [50].

En conjunto, los estudios mencionados muestran que el diseño por viento basado en desempeño no se limita a determinar si una estructura cumple o no con determinados requisitos. Su aplicación permite relacionar los objetivos establecidos para el edificio con la respuesta obtenida mediante el análisis y con las consecuencias que pueden derivarse de las diferentes alternativas de diseño. Bajo este enfoque, también es posible realizar comparaciones entre desempeño y costo, de manera que la alternativa seleccionada no dependa únicamente de la cantidad de material utilizada, sino de la relación entre los recursos empleados y el nivel de desempeño alcanzado. La literatura reciente presenta este tipo de comparaciones y destaca el uso de métricas de daño como apoyo para la toma de decisiones de diseño [51].

## **2.2. Estado del arte**

El diseño por viento basado en desempeño ha adquirido mayor relevancia en los últimos años como una alternativa para evaluar edificios altos considerando no solo el cumplimiento de requisitos normativos, sino también los niveles de servicio, confort y seguridad que puede alcanzar una estructura ante diferentes intensidades de viento. Su desarrollo ha estado relacionado con la necesidad de encontrar soluciones que permitan controlar las distorsiones y aceleraciones sin recurrir necesariamente a un incremento generalizado de las secciones estructurales. En este sentido, diversas investigaciones han incorporado criterios de optimización, análisis no lineales, control estructural y evaluación de costos, buscando establecer una relación entre el desempeño obtenido y los recursos necesarios para alcanzarlo.

Entre los primeros trabajos relacionados directamente con este enfoque se encuentra el desarrollado por Huang et al. (2017) [52], quienes propusieron una estrategia de diseño que combina el PBWD con técnicas de optimización. El objetivo fue encontrar un equilibrio entre la rigidez, la demanda estructural y el costo, considerando que pequeños incrementos en la velocidad del viento pueden producir aumentos importantes en los desplazamientos laterales y las distorsiones de entrepiso de edificios altos, para ello, utilizaron análisis elásticos en escenarios frecuentes y estimaciones inelásticas, incluyendo análisis Pushover, para identificar zonas de plastificación bajo condiciones de viento severo. A partir de la comparación entre diferentes configuraciones estructurales y sistemas de control, encontraron que una distribución adecuada de la rigidez permite disminuir las distorsiones sin

incrementar de manera uniforme las dimensiones de los elementos. Asimismo, para demandas extremas, los refuerzos concentrados en las zonas identificadas mediante el Pushover resultaron más eficientes. El estudio representa uno de los antecedentes importantes en la integración del desempeño estructural, la capacidad no lineal y el costo dentro de un mismo procedimiento de diseño.

Posteriormente, Micheli et al. (2019) [53] ampliaron la aplicación del diseño basado en desempeño a edificios altos sometidos a viento y equipados con sistemas de control de movimiento. Los autores analizaron diferentes periodos de retorno, de 10, 50 y 100 años, y utilizaron la aceleración máxima como indicador de desempeño asociado al confort de los ocupantes, además de considerar la distorsión de entrepiso y la resistencia estructural. Se compararon sistemas de amortiguamiento viscoso y de fricción, diseñados para satisfacer determinados niveles de desempeño. El análisis también incorporó el costo del ciclo de vida, considerando tanto los costos de instalación y mantenimiento como las posibles pérdidas derivadas de un desempeño insuficiente. Para un edificio de 39 niveles, el campo de viento se representó mediante un proceso estocástico multivariante calibrado con información obtenida en túnel de viento. Los resultados mostraron que el PBWD puede conducir a soluciones costo-efectivas, particularmente cuando el control de movimiento permite reducir las aceleraciones sin incrementar de manera excesiva la demanda sobre el sistema estructural.

La utilización de herramientas no lineales también ha sido estudiada como una alternativa para identificar zonas críticas bajo acciones laterales importantes. Wang, Martinez-Vazquez y Zhao (2020) [20] analizaron el empleo del Pushover en estructuras sometidas a acciones combinadas de sismo y viento. Aunque el estudio considera ambos peligros, sus resultados son relevantes para el análisis de estructuras gobernadas por viento debido a que permiten observar la secuencia de plastificación y la evolución de la capacidad lateral. Los autores encontraron que un patrón lateral triangular con control en azotea permite identificar mecanismos de falla en los niveles inferiores. Además, observaron que las articulaciones plásticas se desarrollan inicialmente en los contravientos, seguidas por las vigas y posteriormente por las columnas conforme aumenta la demanda. A partir de estos resultados, plantearon la posibilidad de realizar refuerzos selectivos para disminuir las distorsiones de entrepiso sin generar incrementos importantes en el tonelaje. El estudio también señala las limitaciones del Pushover frente a los análisis dinámicos no lineales y propone consideraciones como la combinación modal y la evaluación en dos direcciones para mejorar su representatividad.

A partir de estos avances, Jeong y Kwon (2021) [9] realizaron una revisión del PBWD aplicado a edificios altos y destacaron la importancia de relacionar las características del peligro de viento con criterios de aceptación definidos previamente. Entre estos criterios se encuentran la distorsión de entrepiso y el desplazamiento para condiciones de servicio, las aceleraciones para evaluar el confort y la resistencia y estabilidad para condiciones asociadas con la seguridad. Los autores también señalaron que tanto la demanda como la capacidad presentan incertidumbres. La primera depende de variables como la dirección del viento, la exposición y el amortiguamiento, mientras que la segunda está relacionada con

factores como la rigidez, las conexiones y la degradación de la resistencia. Por ello, recomiendan expresar los resultados mediante probabilidades de excedencia para los diferentes niveles de desempeño y recurrir a datos de túnel de viento o a metodologías DAD (*database-assisted design*) cuando se requiera una representación más detallada del viento. La revisión también destaca que la distribución de la rigidez puede ser más eficiente cuando se concentran contravientos de mayor capacidad en los niveles inferiores y se realizan ajustes en las columnas, en lugar de incrementar las secciones a lo largo de toda la altura.

En el mismo periodo, Ouyang y Spence (2021) [54] estudiaron el comportamiento de un edificio de 45 niveles sometido a vientos extremos, considerando tanto los daños en la envolvente como la respuesta del sistema estructural. El edificio analizado se localiza en Miami, Florida, y fue evaluado para intensidades correspondientes a periodos de retorno de 50 y 700 años, con velocidades de referencia de aproximadamente 44 a 54 m/s. La metodología incorporó la presión dinámica neta, modelos de desprendimiento de vórtices y un proceso no gaussiano calibrado con información de túnel de viento. Mediante análisis dinámicos no lineales, los autores obtuvieron medidas probabilistas del desempeño y observaron que, mientras los vientos de retorno medio podían ser atendidos bajo condiciones de servicio, los eventos de mayor intensidad generaban deformaciones inelásticas concentradas en los niveles inferiores. Asimismo, las fallas en los anclajes de cubierta representaron una parte importante de las pérdidas. Estos resultados muestran la conveniencia de diferenciar las condiciones de servicio de aquellas relacionadas con la seguridad y de prestar especial atención a conexiones y puntos de anclaje cuando se consideran vientos extremos.

La influencia de la dirección del viento en la respuesta estructural fue analizada por Pang et al. (2022) [55], quienes estudiaron el comportamiento inelástico de un edificio alto con aislamiento. Los resultados mostraron que la condición más desfavorable no necesariamente corresponde al viento perpendicular a la fachada de mayor dimensión, algunas direcciones intermedias produjeron mayores desplazamientos y aceleraciones debido a efectos de acoplamiento modal y a las características aerodinámicas de la estructura. Lo anterior pone de manifiesto que una evaluación basada en desempeño debe considerar diferentes direcciones del viento en lugar de limitarse a una única orientación. Los autores también analizaron la influencia del amortiguamiento y de la distribución de la rigidez lateral, encontrando que concentrar una mayor rigidez en los primeros niveles puede disminuir las distorsiones, pero también modificar la respuesta modal e incrementar las aceleraciones en la parte superior del edificio. Por tanto, la distribución de la rigidez debe buscar un equilibrio entre los distintos parámetros de desempeño.

Con la publicación del *Prestandard* para PBWD de ASCE/SEI (2023) [7], se estableció un marco más definido para la aplicación de este enfoque en edificios altos. El documento propone diferentes estados de desempeño, entre ellos operación, servicio aceptable y seguridad, y plantea valores orientativos para parámetros como la distorsión de entrepiso, el desplazamiento y la aceleración. Estos valores deben adaptarse a las características del edificio y a los objetivos particulares del proyecto. El *Prestandard* también reconoce la importancia de

considerar la direccionalidad del viento y contempla diferentes alternativas para obtener las demandas, desde procedimientos prescritos hasta estudios en túnel de viento y metodologías DAD. Otro aspecto relevante es la trazabilidad de las decisiones de diseño, ya que permite relacionar la selección de la rigidez, los sistemas de control y los refuerzos con los niveles de desempeño que se pretende alcanzar. Aunque el documento no establece como requisito el empleo de análisis no lineales, su marco permite incorporar herramientas como el Pushover cuando se espera que la estructura alcance niveles importantes de desplazamiento.

En complemento con el *Prestandard*, el reporte NIST GCR 23-045 (2023) [10] recopiló avances y aplicaciones del PBWD orientados a su incorporación en proyectos reales. El documento destaca la utilidad de los estudios de túnel de viento y de las metodologías DAD para estimar con mayor precisión las presiones y fuerzas que actúan sobre edificios altos, particularmente cuando las características aerodinámicas tienen una influencia importante en la respuesta. También se aborda el tratamiento de las incertidumbres relacionadas con el amortiguamiento, la rigidez efectiva y el modelado de las conexiones, debido a su influencia sobre los desplazamientos y las aceleraciones obtenidas. Asimismo, se presentan casos en los que una solución estructural convencional se compara con alternativas que incorporan sistemas de control, mostrando que una solución con amortiguamiento puede alcanzar los requisitos de servicio con menor tonelaje y costo total cuando se consideran las pérdidas y el tiempo fuera de servicio. Estas consideraciones respaldan la necesidad de relacionar las variables de respuesta, como la velocidad del viento, la distorsión de entrepiso y el desplazamiento global, con las consecuencias económicas de cada alternativa.

En este contexto, Athanasiou, Tirca y Stathopoulos (2023) [56] plantearon un marco de diseño multiamenaza para torres de acero sometidas simultáneamente a viento y sismo. El estudio parte de que determinadas decisiones relacionadas con la rigidez y el detallado pueden beneficiar la respuesta ante ambos peligros. Los objetivos de desempeño se establecen de acuerdo con la acción considerada, asociando las condiciones de operación y servicio principalmente con el viento y los requisitos de seguridad con el sismo. Mediante modelos no lineales, los autores verificaron que las articulaciones plásticas se concentren en zonas donde sea posible detallarlas y reforzarlas sin generar costos excesivos. También analizaron el efecto del amortiguamiento suplementario y de modificaciones en los contravientos para reducir las distorsiones producidas por viento sin afectar de manera desfavorable la respuesta sísmica. Este planteamiento resulta particularmente relevante para regiones donde el viento representa el peligro lateral dominante y permite considerar el diseño estructural desde una perspectiva conjunta de desempeño.

Más recientemente, Alinejad, Ahn y Kang (2024) [57] compararon dos estrategias para mejorar el desempeño de edificios altos ante viento: modificar las esquinas de la estructura para mejorar su comportamiento aerodinámico y permitir cierto grado de inelasticidad controlada durante eventos de viento poco frecuentes. Para ello, generaron historias de viento correspondientes a diferentes periodos de retorno y estudiaron la sensibilidad de la respuesta respecto a la rigidez, el amortiguamiento

y el detallado estructural. Los resultados indicaron que, bajo determinadas condiciones, permitir una plastificación local controlada puede resultar más eficiente que realizar únicamente modificaciones aerodinámicas. La combinación de ambas estrategias también mostró mejoras en el cumplimiento de los criterios de servicio, particularmente en términos de distorsión, desplazamiento y aceleración. Los autores concluyeron que, cuando una estructura se encuentra próxima a los límites de servicio, puede ser conveniente analizar modificaciones locales de rigidez y capacidad antes de recurrir a un sobredimensionamiento generalizado.

La nota técnica 2293 del NIST (2024) [8] abordó el comportamiento de edificios altos de acero sensibles a cargas laterales, relacionando los criterios de servicio con parámetros como la rigidez y el amortiguamiento. El documento incluye recomendaciones para calibrar modelos numéricos a partir de mediciones de respuesta y resultados de túnel de viento. Uno de los aspectos señalados es la influencia del amortiguamiento efectivo adoptado durante el diseño, ya que valores elevados pueden conducir a una subestimación de desplazamientos y distorsiones y, en consecuencia, a una evaluación poco representativa del desempeño. También se comparan diferentes esquemas de distribución de rigidez, encontrando que el refuerzo de contravientos y columnas en los niveles inferiores puede resultar más eficiente que incrementar las dimensiones de los elementos en toda la altura. Finalmente, se plantean procedimientos de revisión por desempeño que permiten expresar la respuesta mediante probabilidades de excedencia para diferentes estados, facilitando la definición y revisión de los objetivos de diseño.

En 2025, Rahimian et al. [58] presentaron una revisión enfocada en la aplicación práctica del PBWD a edificios altos. El trabajo compara este enfoque con los procedimientos prescriptivos y analiza aspectos como los criterios de aceptación para servicio, confort y seguridad, la definición direccional del peligro, el tratamiento de las incertidumbres y las alternativas para caracterizar el viento mediante estudios de túnel o procedimientos numéricos. Los autores también destacan la importancia de documentar los supuestos empleados, la calibración de los modelos y los márgenes de seguridad, de manera que las decisiones de diseño puedan ser trazables. Entre los indicadores considerados se encuentran la distorsión de entrepiso, la aceleración en la parte superior del edificio y las demandas en la envolvente. En términos generales, concluyen que el PBWD puede establecer una relación entre los objetivos de riesgo y las decisiones relacionadas con la rigidez y los sistemas de control, siempre que las incertidumbres sean consideradas de manera consistente. Para edificios ubicados en regiones expuestas a huracanes, se destaca además la conveniencia de combinar escenarios de viento severo con criterios de servicio y confort.

Por otra parte, Vu, Lee y Kim (2025) [21] estudiaron la aplicación del análisis Pushover no lineal en torres de transmisión reforzadas sometidas a cargas de viento cuasiestáticas. Aunque el objeto de estudio no corresponde a un edificio, el procedimiento empleado resulta de interés para estructuras en las que el viento representa una acción lateral importante. Los autores utilizaron patrones de carga compatibles con los perfiles de viento e incrementaron el desplazamiento en la parte superior hasta alcanzar estados de fluencia y formación de rótulas. A partir de la

secuencia de plastificación fue posible identificar elementos con menor capacidad y plantear refuerzos localizados. También se comparó la capacidad de la estructura antes y después del refuerzo y se cuantificó la reducción de las distorsiones ante vientos equivalentes a periodos de retorno elevados. Los resultados muestran que un análisis Pushover adecuadamente planteado puede proporcionar información sobre los mecanismos de comportamiento con un menor costo computacional que un análisis dinámico no lineal, por lo que puede utilizarse como herramienta complementaria para identificar zonas críticas.

En conjunto, los estudios revisados muestran que el diseño por viento basado en desempeño permite evaluar de manera más completa la respuesta de edificios altos, considerando parámetros como la distorsión de entrepiso, el desplazamiento global, la aceleración y la resistencia, así como la influencia de la dirección del viento, el amortiguamiento y la distribución de la rigidez. Asimismo, los avances recientes han incorporado herramientas de optimización, análisis no lineales y criterios de costo, demostrando que es posible mejorar el desempeño mediante refuerzos localizados sin recurrir necesariamente a un incremento uniforme de las secciones estructurales. A pesar de estos avances, existe una limitada cantidad de estudios que relacionen, para un mismo edificio, el incremento de la velocidad del viento con la respuesta estructural y el costo directo de la superestructura, particularmente bajo escenarios asociados con huracanes. De igual manera, son escasos los trabajos que emplean el análisis Pushover para identificar la secuencia de plastificación y las zonas críticas producidas por demandas extremas de viento en edificios altos de acero. En este sentido, se identifica la necesidad de desarrollar evaluaciones que integren el desempeño estructural, el comportamiento no lineal y el costo para diferentes escenarios de viento, considerando las condiciones particulares de edificios ubicados en regiones expuestas a huracanes, como Cancún.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Materiales

Para desarrollar esta investigación se utilizaron distintos recursos, los cuales incluyen software especializado, normativa técnica, equipo de cómputo y material auxiliar para el procesamiento de resultados. Estos insumos permitieron definir los escenarios de viento, modelar el edificio, ejecutar los análisis estructurales, interpretar la respuesta en servicio, realizar el análisis Pushover y estimar el costo directo de cada escenario. En la Tabla 3 se resumen los principales materiales utilizados, la etapa en la que se emplearon y su costo o forma de acceso.

Tabla 3. Materiales y recursos utilizados en la investigación.

| <b>Material / recurso</b> | <b>Descripción</b>                                                                                                        | <b>Actividad o etapa en la que se utilizó</b>                                                                       | <b>Costo / forma de acceso</b>     |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Artículo de investigación | Artículo de congreso derivado de la investigación, donde se resume el planteamiento, metodología y principales resultados | Presentación del artículo en el Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica 2025                                        | \$5,200 MXN                        |
| ETABS                     | Software de modelado y análisis estructural                                                                               | Modelado del edificio, asignación de cargas de viento, análisis estructural y Pushover                              | Licencia institucional / académica |
| Microsoft Excel           | Hoja de cálculo                                                                                                           | Cálculo de presiones, organización de resultados, tablas comparativas, cuantificación de partidas y costos directos | Licencia de uso personal           |
| Microsoft Word            | Procesador de texto                                                                                                       | Redacción y edición del documento de tesis                                                                          | Licencia de uso personal           |
| Mendeley                  | Gestor bibliográfico                                                                                                      | Organización de referencias y generación de citas                                                                   | Sin costo                          |
| MDOC-DV 2020 (CFE) [1]    | Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento                                                                      | Método dinámico para el cálculo de presiones                                                                        | Documento técnico de consulta      |
| ASCE/SEI 7-22 [14]        | Norma internacional de cargas mínimas                                                                                     | Contraste y apoyo para criterios de diseño eólico                                                                   | Documento técnico de consulta      |
| ASCE/SEI 41-17 [41]       | Norma para evaluación y reforzamiento de edificios existentes                                                             | Definición y clasificación de articulaciones plásticas en el análisis Pushover                                      | Documento técnico de consulta      |

| <b>Material / recurso</b>                                                                               | <b>Descripción</b>                                                                                       | <b>Actividad o etapa en la que se utilizó</b>                            | <b>Costo / forma de acceso</b>                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| FEMA 356 [40]                                                                                           | Documento de referencia para análisis no lineal                                                          | Apoyo conceptual para el análisis Pushover                               | Documento técnico de consulta                          |
| ASCE/SEI<br>Prestandard for<br>PBWD [7]                                                                 | Preestándar para diseño por viento basado en desempeño                                                   | Definición de objetivos de desempeño y criterios de aceptación           | Documento técnico de consulta                          |
| NTC del<br>Reglamento de<br>Construcción para<br>el Municipio de<br>Benito Juárez,<br>Quintana Roo [39] | Norma Técnica Complementaria aplicable para la ciudad de Cancún, Quintana Roo                            | Velocidad regional y definición de límite de distorsión de entrepiso     | Documento técnico de consulta                          |
| NTC sobre<br>criterios y<br>acciones para el<br>diseño estructural<br>de las<br>edificaciones [2]       | Norma Técnica Complementaria de la Ciudad de México                                                      | Definición de límite de desplazamiento global                            | Documento técnico de consulta                          |
| Escala Saffir-Simpson y registros de NOAA [32]                                                          | Clasificación de huracanes según velocidad del viento y velocidades de los huracanes                     | Contextualización de escenarios históricos de viento extremo             | Documento técnico de consulta                          |
| Equipo de cómputo                                                                                       | Computadora y laptop con capacidad suficiente para análisis estructural                                  | Modelado, análisis, redacción y procesamiento de resultados              | Recurso propio                                         |
| Base de datos de costos / cotizaciones                                                                  | Información de precios unitarios de acero, losa-acero, concreto, conexiones, pintura, traslado y montaje | Estimación del costo directo del sistema estructural para cada escenario | Cotización sin costo realizada en Castilla Estructuras |

### 3.2. Métodos

La metodología de esta investigación se estructuró para analizar, de manera comparativa, el comportamiento estructural y el costo directo de un edificio de acero localizado en Cancún cuando se somete a distintas velocidades de viento. El procedimiento general siguió la secuencia mostrada en la Figura 11, iniciando con la selección de la ciudad y la definición de las velocidades de diseño, para después establecer la geometría y el uso del edificio, calcular las acciones por viento, modelar la estructura en ETABS, evaluar su desempeño ante distintos escenarios, realizar un análisis estático no lineal del modelo normativo y, finalmente, comparar el costo directo del sistema estructural en cada caso.

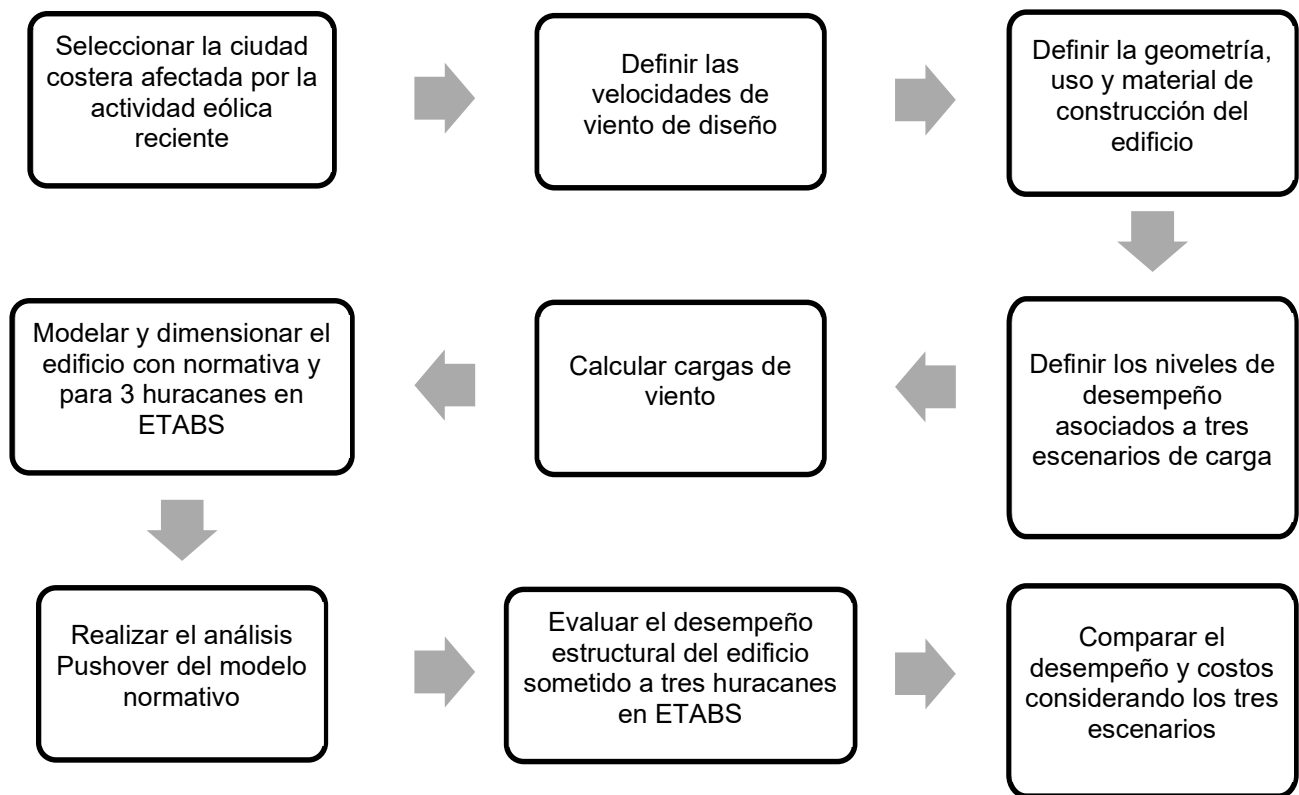
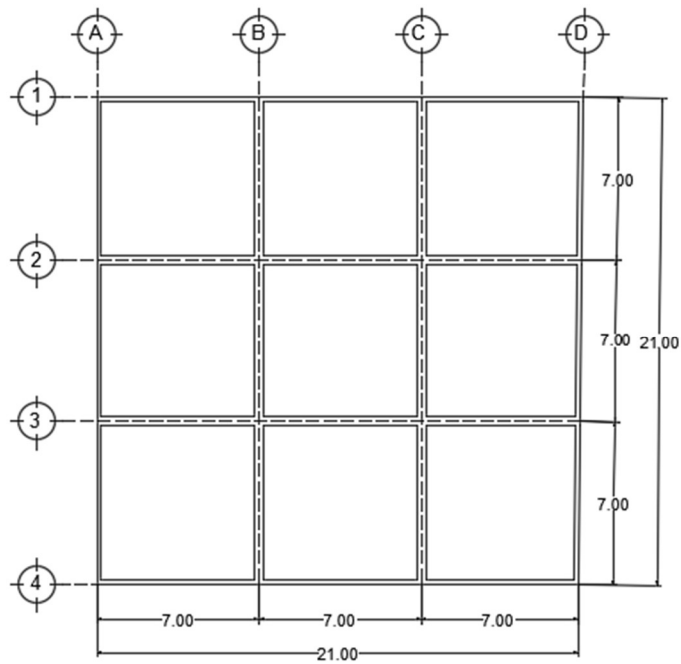


Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología.

### 3.2.1. Descripción del edificio

La presente investigación se desarrolló a partir de la definición de un caso hipotético representativo para zonas de alta exposición eólica, como la ciudad de Cancún, Quintana Roo. Para ello, se modeló un edificio habitacional de acero de 30 niveles, con una altura total de 91 m y una configuración arquitectónica compuesta por tres crujías de 7 m en ambas direcciones. El primer nivel se definió con una altura de 4 m, mientras que los niveles superiores se consideraron con una altura de 3 m cada uno. Esta geometría se mantuvo constante en todos los escenarios de análisis, con el fin de que las variaciones observadas en la respuesta estructural y en el costo se debieran únicamente al cambio en la demanda de viento y no a modificaciones en la configuración del edificio. En la Figura 12 se presentan la vista en planta y la vista lateral del edificio utilizado como caso de estudio.

a)



b)

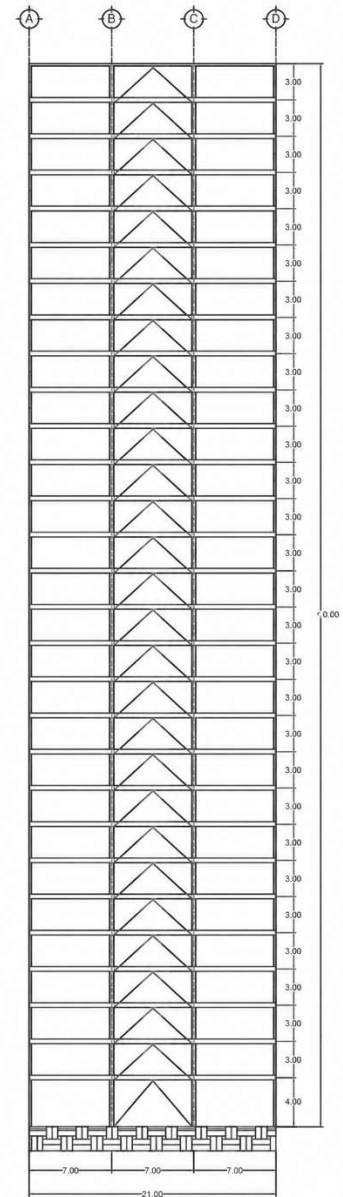


Figura 12. Vista en planta (a) y lateral (b) del edificio (dimensiones en metros).

Desde el punto de vista estructural, el edificio se resolvió mediante un sistema principal de acero, integrado por vigas, columnas y elementos de arriostramiento que proporcionan resistencia y rigidez lateral frente a la acción del viento. La configuración del sistema resistente se mantuvo sin cambios en todos los casos analizados, de manera que la comparación entre escenarios pudiera realizarse sobre una misma base geométrica y estructural. En el siguiente capítulo (Resultados) se muestra el dimensionamiento estructural de cada edificio.

### 3.2.2. Velocidad regional de diseño

Una vez definido el edificio de estudio, se estableció la velocidad regional de diseño correspondiente al sitio donde se ubica el caso analizado. Para esta investigación se adoptó un valor de 180 km/h asociado a un periodo de retorno de 100 años, obtenido de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción del Municipio de Benito Juárez, Quintana Roo. Este valor se tomó como referencia para el caso normativo, ya que representa la velocidad de viento que la reglamentación local considera para el diseño estructural en la zona de estudio y el uso de la edificación. En la Tabla 4 se muestran las velocidades regionales para el municipio de Benito Juárez.

Tabla 4. Velocidades regionales para Cancún con respecto a periodos de retorno.

| Periodo de retorno (años)    | 10  | 100 | 2000 |
|------------------------------|-----|-----|------|
| Velocidad del viento (km/hr) | 120 | 180 | 200  |

Fuente:[39].

### 3.2.3. Acciones por viento

Las acciones por viento consideradas en esta investigación se calcularon conforme al método dinámico establecido en el Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento (MDOC-DV, 2020). Este procedimiento es apropiado para estructuras como la estudiada, ya que el edificio presenta una altura considerable y una relación de esbeltez que hace necesario considerar no solo la acción media del viento, sino también la influencia de sus fluctuaciones y la respuesta dinámica de la estructura.

A diferencia del análisis estático, el análisis dinámico incorpora de manera explícita la interacción entre la turbulencia del viento y las propiedades dinámicas del edificio. En este enfoque, la fuerza de diseño no se obtiene únicamente a partir de una presión media sobre la envolvente, sino que se construye a partir de una fuerza dinámica equivalente, la cual incluye tanto la contribución cuasiestática como la resonante. De esta manera, el procedimiento resulta más adecuado para edificios altos y flexibles, donde la respuesta estructural puede verse amplificada por la acción fluctuante del viento.

El procedimiento inició con la definición de la velocidad media del viento a la altura de interés, la cual en el MDOC-DV se expresa como:

$$V_D' = \frac{F_T F_{rz}' V_R}{3.6} \quad (3)$$

donde  $V_R$  es la velocidad regional de ráfaga en km/h,  $F_T$  es el factor de topografía y  $F'_{rz}$  es el factor de exposición para la velocidad media. Esta expresión permite convertir la velocidad regional de diseño en una velocidad media de diez minutos, compatible con el análisis dinámico. El factor  $F'_{rz}$  toma en cuenta, de manera conjunta, la rugosidad local del terreno y la variación de la velocidad con la altura, por lo que es uno de los parámetros más importantes del procedimiento.

Con la velocidad media se determinó la presión actuante sobre la estructura, dada por:

$$p_z = C_p q_z \quad (4)$$

donde  $C_p$  es el coeficiente de presión y  $q_z$  es la presión dinámica de base a la altura  $z$ . A partir de esta presión se obtiene la fuerza dinámica equivalente en la dirección del viento:

$$F_{eq}(z) = p_z A_{exp} F_{AD} \quad (5)$$

donde  $A_{exp}$  es el área expuesta proyectada en un plano perpendicular a la dirección del viento, y  $F_{AD}$  es el factor de amplificación dinámica. Esta ecuación es central dentro del método, porque traduce la presión sobre la superficie en una fuerza lateral que ya considera la amplificación producida por la respuesta dinámica del edificio. En otras palabras, la fuerza dinámica equivalente representa la acción de viento que finalmente se aplica a la estructura a cada altura.

El parámetro más importante de este procedimiento es precisamente el factor de amplificación dinámica, ya que es el que permite incorporar los efectos de la turbulencia del viento y de las propiedades dinámicas de la estructura. En el MDOC-DV [1], para estructuras prismáticas, este factor se expresa como:

$$F_{AD} = \frac{1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B'^2 + R'^2}}{1 + 7I_v(z_s)} \quad (6)$$

donde  $z_s$  es la altura de referencia,  $I_v(z_s)$  es el índice de turbulencia evaluado a esa altura,  $B'$  es el factor de respuesta de fondo,  $R'$  es el factor de respuesta en resonancia, y  $k_p$  es el factor pico. Esta expresión muestra que la amplificación dinámica depende de dos componentes principales: una parte asociada a la respuesta cuasiestática o de fondo, y otra asociada a la respuesta resonante. Por lo tanto, el valor de  $F_{AD}$  aumenta cuando la estructura es más sensible a la turbulencia del viento o cuando sus características dinámicas favorecen la resonancia.

En términos metodológicos, todos estos factores fueron necesarios para determinar la fuerza dinámica equivalente que se aplicó al edificio en las direcciones principales de análisis. En esta investigación, las acciones por viento se calcularon para los

ejes X y Y, considerando las distintas superficies expuestas del edificio (barlovento, sotavento y cubierta). Después, estas fuerzas se distribuyeron sobre el modelo estructural en ETABS, donde se combinaron con las cargas gravitacionales para evaluar la respuesta en servicio y, posteriormente, realizar el análisis comparativo entre el caso normativo y los escenarios asociados a huracanes.

### 3.2.4. Escenarios de viento

Con el fin de evaluar cómo cambia el comportamiento estructural del edificio cuando la demanda eólica aumenta por encima del valor reglamentario, en esta investigación se definieron cuatro escenarios de viento. El primero correspondió al caso normativo, es decir, al edificio diseñado con la velocidad regional de 180 km/h establecida en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción del Municipio de Benito Juárez, Quintana Roo [39]. Este escenario se tomó como referencia base, ya que representa la condición de diseño que sería adoptada en la práctica local para un edificio con las características del caso de estudio.

A partir de este caso base, se plantearon tres escenarios adicionales asociados a huracanes históricos relevantes para la región. Para ello se seleccionaron velocidades representativas correspondientes a Roxanne (200 km/h), Emily (255 km/h) y Wilma (300 km/h). La elección de estos eventos respondió a su importancia dentro del historial de huracanes que han afectado a la península de Yucatán y, en particular, a la zona de Cancún. Además, estos tres valores permitieron construir una secuencia de incremento gradual en la demanda, desde un escenario ligeramente superior al normativo hasta una condición claramente extrema. En la Tabla 5 se resumen los escenarios de viento considerados en la investigación.

Tabla 5. Escenarios de viento considerados en la investigación.

| Escenario      | Velocidad de viento (km/h) | Referencia                                                                |
|----------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Caso normativo | 180                        | NTC del Reglamento de Construcción del Municipio de Benito Juárez, Q. Roo |
| Escenario 1    | 200                        | Huracán Roxanne                                                           |
| Escenario 2    | 255                        | Huracán Emily                                                             |
| Escenario 3    | 300                        | Huracán Wilma                                                             |

Fuente: [3], [4], [16], [39].

Para mantener la coherencia del análisis, todos los escenarios se evaluaron sobre la misma geometría, el mismo uso y la misma configuración estructural general del edificio. Esto significa que la comparación entre casos se realizó modificando únicamente la demanda de viento, mientras que la forma arquitectónica, la altura, las crujías y el sistema principal resistente permanecieron sin cambios. Con ello se garantizó que las variaciones observadas en la respuesta del edificio se debieran al

cambio en la velocidad de viento y no a diferencias geométricas o de configuración estructural.

### 3.2.5. Modelación estructural

La modelación estructural del edificio se realizó en el software ETABS [59], donde se definieron y obtuvieron las dimensiones de los elementos principales del sistema resistente, incluyendo vigas, columnas, contravientos y losas. Para ello, se construyó un modelo tridimensional del edificio a partir de la geometría previamente establecida, asignando las propiedades de los materiales y las secciones iniciales de los elementos estructurales.

Una vez generado el modelo, se incorporaron las acciones gravitacionales, sísmicas y por viento consideradas en la investigación. En el caso de las acciones gravitacionales, el peso propio de la estructura fue considerado automáticamente por el software a partir de las propiedades geométricas y mecánicas asignadas a los elementos estructurales. Adicionalmente, se definieron las cargas vivas de acuerdo con el uso habitacional del edificio. En la Tabla 6 se muestran los valores de carga viva utilizados en el modelo.

Tabla 6. Cargas vivas en kg/m<sup>2</sup>.

|                        | Entrepiso | Azotea |
|------------------------|-----------|--------|
| Carga viva máxima      | 100       | 100    |
| Carga viva instantánea | 190       | 70     |
| Sobrecarga             | 150       | 90     |

Fuente: [2].

Además, se consideró la acción sísmica, con el fin de verificar si esta podía llegar a gobernar el diseño estructural en comparación con el viento. Para ello, se generaron dos espectros de respuesta utilizando el software PRODISIS [60]. El primero se empleó para la revisión del estado límite de servicio, utilizando el espectro de diseño transparente dividido entre un factor de 5.5, conforme al MDOC-DS (2015) [61]. El segundo se utilizó para el estado límite de colapso, considerando los parámetros  $Q = 3$ ,  $R_0 = 2$ ,  $\alpha = 1$  y  $\rho = 1.25$ . Ambos espectros se calcularon para un suelo tipo 1 y posteriormente se incorporaron al modelo estructural en ETABS [59].

Por otro lado, las acciones por viento se aplicaron al modelo a partir del procedimiento dinámico establecido en el MDOC-DV (2020) [1], tal como se describió en el apartado anterior. Estas cargas se asignaron en las direcciones principales del edificio y se combinaron con las acciones gravitacionales y sísmicas para evaluar la respuesta estructural bajo distintos escenarios.

Para el diseño y revisión de la estructura se definieron las combinaciones de carga correspondientes, integrando la participación de carga muerta, sobrecarga, carga viva instantánea, sismo y viento. Estas combinaciones se obtuvieron con base en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México [2], con el objetivo de mantener consistencia normativa en el

proceso de análisis y dimensionamiento. En la Tabla 7 se presentan las combinaciones de carga utilizadas.

Tabla 7. Combinaciones de carga.

| Combinación | Muerta | Sobrecarga | Viva | CVins | Sismo X | Sismo Y | Viento X | Viento Y |
|-------------|--------|------------|------|-------|---------|---------|----------|----------|
| 1           | 1.3    | 1.3        | 1.5  |       |         |         |          |          |
| 2 sismo     | 1.1    | 1.1        |      | 1.1   | ±1.1    | ±0.3    |          |          |
| 2 viento    | 1.1    | 1.1        |      | 1.1   |         |         | ±1.1     |          |
| 3 sismo     | 1.1    | 1.1        |      | 1.1   | ±0.3    | ±1.1    |          |          |
| 3 viento    | 1.1    | 1.1        |      | 1.1   |         |         |          | ±1.1     |

Fuente: [2].

Con esta información, el programa llevó a cabo el análisis estructural necesario para obtener las fuerzas internas, reacciones, desplazamientos y distorsiones de entrepiso del edificio. Estos resultados se revisaron para verificar que el comportamiento global de la estructura fuera congruente y que las respuestas obtenidas se mantuvieran dentro de los límites adoptados en la investigación.

Posteriormente, se utilizó el software para dimensionar y ajustar las secciones de los elementos estructurales. Mediante este proceso se definieron configuraciones de vigas, columnas, contravientos y losasacero compatibles con las demandas de cada escenario de viento.

### 3.2.6. Evaluación del desempeño

Una vez diseñado el edificio para cada uno de los escenarios de viento considerados, se procedió a evaluar su desempeño estructural mediante el análisis de las principales respuestas globales del sistema. Esta evaluación se enfocó en verificar si el edificio cumplía con los límites de servicio en términos de distorsión de entrepiso y desplazamiento global, ya que ambas variables permiten valorar de manera directa la funcionalidad del edificio ante la acción del viento.

La distorsión de entrepiso se utilizó como indicador del desplazamiento relativo entre niveles consecutivos. Por su parte, el desplazamiento global se empleó para evaluar la respuesta total del edificio a nivel de azotea, ya que este parámetro permite identificar la magnitud del movimiento lateral acumulado a lo largo de la altura. En esta investigación se adoptaron como criterios de referencia los límites de distorsión de entrepiso  $\leq 0.005$  y desplazamiento global  $\leq H/500$ , por considerarse apropiados para el análisis del comportamiento en servicio del edificio [2], [39].

La evaluación se realizó para los cuatro escenarios definidos previamente: el caso normativo y los tres escenarios asociados a huracanes históricos. Para cada modelo se obtuvieron los perfiles de desplazamiento y de distorsión de entrepiso a lo largo de la altura del edificio en las direcciones principales de análisis. Posteriormente, estos resultados se compararon con los límites establecidos, con el fin de identificar

si la estructura mantenía un comportamiento aceptable en servicio o si, por el contrario, rebasaba los valores permisibles bajo demandas de viento más severas.

### **3.2.7. Análisis estático no lineal (Pushover)**

Además del análisis lineal realizado para los cuatro escenarios de viento, en esta investigación se llevó a cabo un análisis Pushover sobre el modelo normativo del edificio. El propósito de este análisis fue complementar la evaluación del desempeño estructural mediante la identificación de la secuencia de plastificación y de las zonas críticas del sistema resistente cuando la estructura se somete a desplazamientos laterales crecientes.

El análisis se realizó en el software ETABS, utilizando el mismo modelo tridimensional desarrollado para el caso normativo. Sobre este modelo se definió un patrón de carga lateral triangular, aplicado en la dirección de análisis y distribuido en función de la altura del edificio. Esta distribución se adoptó por ser congruente con la forma general en que aumenta la demanda lateral en estructuras altas y por su uso común en este tipo de procedimientos.

El control del análisis se realizó mediante el desplazamiento en azotea, que se tomó como parámetro para seguir la evolución de la respuesta global del edificio. Los desplazamientos objetivo empleados en el Pushover se definieron a partir de los desplazamientos laterales máximos en azotea obtenidos previamente en el edificio diseñado con normativa, cuando fue sometido a los escenarios de carga por viento asociados a los huracanes considerados en esta investigación. De esta manera, el análisis no lineal se planteó con metas de desplazamiento coherentes con la respuesta real que presentó el edificio bajo demandas de viento severo.

Para representar la respuesta inelástica, se asignaron articulaciones plásticas en vigas, columnas y contravientos. En el caso de las vigas y columnas, las articulaciones se colocaron a distancias de  $0.2L$ ,  $0.1L$ ,  $0.05L$  y  $0.03L$ , medidas a lo largo del eje longitudinal del elemento y a partir del nodo extremo, con el fin de explorar distintas posibles zonas de concentración de deformaciones inelásticas cerca de los extremos. En los contravientos, la articulación se ubicó en  $0.5L$ , es decir, en la mitad de la longitud del elemento, buscando representar la posible concentración de respuesta no lineal en la parte media del miembro.

Además de su ubicación, en el modelo se definió el grado de libertad asociado a cada articulación, de acuerdo con el mecanismo resistente predominante de cada tipo de elemento. En las vigas, las articulaciones se asignaron en el grado de libertad M3, con el propósito de representar la formación de rótulas plásticas por flexión. Esta elección es consistente con el comportamiento esperado de estos elementos, ya que en ellas la respuesta inelástica suele estar gobernada principalmente por los momentos flexionantes.

En el caso de las columnas, las articulaciones plásticas se definieron considerando la interacción P-M2-M3, debido a que estos elementos están sometidos simultáneamente a carga axial y a momentos flexionantes en ambos ejes principales. Esta idealización permite representar de manera más realista su

comportamiento no lineal, ya que la respuesta inelástica de una columna no depende únicamente de la flexión en un solo eje, sino de la combinación entre compresión axial y flexión biaxial. Por ello, mientras que en las vigas se emplearon articulaciones asociadas principalmente a la flexión, en las columnas se adoptó una articulación de interacción que reproduce de mejor forma el mecanismo resistente esperado en este tipo de elementos.

Por su parte, en los contravientos las articulaciones se asignaron en el grado de libertad P, ya que estos elementos desarrollan su respuesta inelástica principalmente a través de la deformación axial, ya sea por tensión o compresión. Esta decisión permitió que el modelo no lineal representara de manera más congruente el comportamiento esperado del sistema de arriostramiento bajo cargas laterales crecientes.

Para facilitar la interpretación del modelo no lineal, en la Figura 13 se presenta un esquema de la ubicación adoptada para las articulaciones plásticas en vigas, columnas y contravientos. Asimismo, en la Figura 14 se muestra una captura del modelo en ETABS, donde puede observarse la asignación de dichas articulaciones en el edificio analizado.

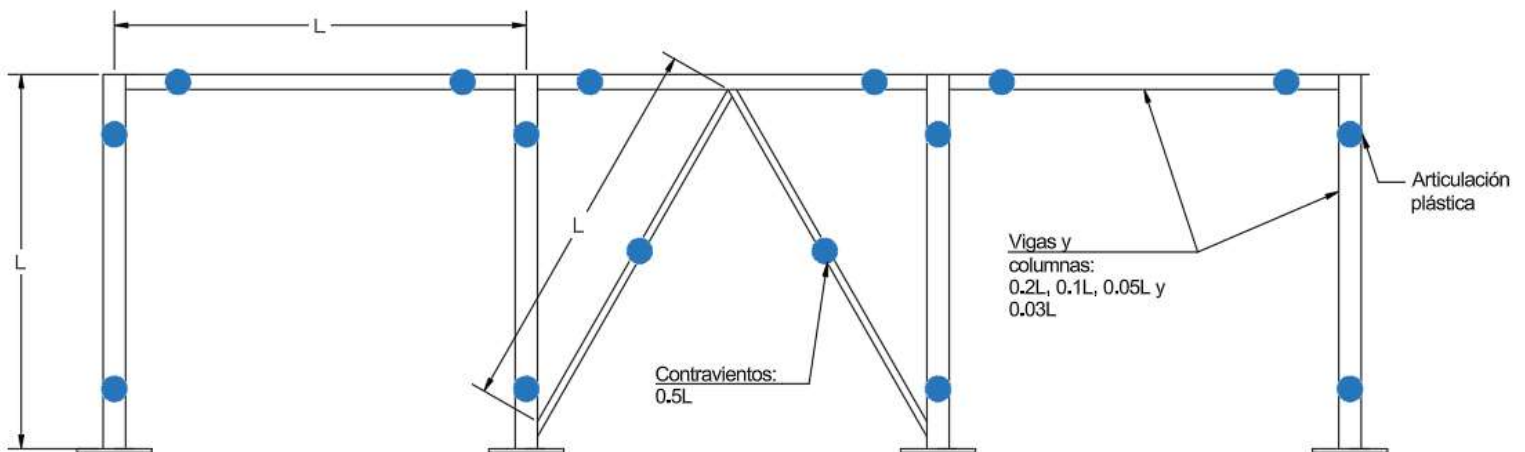


Figura 13. Esquema de ubicación de articulaciones plásticas en el modelo estructural.

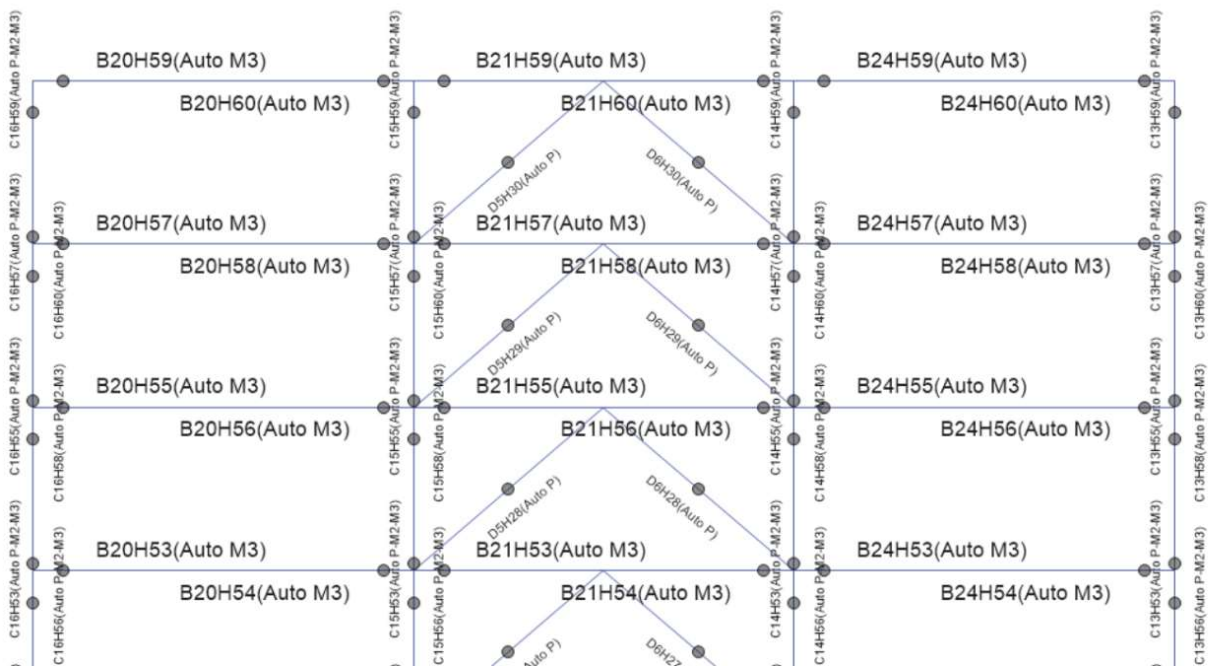


Figura 14. Asignación de articulaciones plásticas en el modelo estructural en ETABS.

La interpretación de la respuesta de estas articulaciones se realizó con base en los criterios del ASCE/SEI 41-17 [41], utilizando la clasificación por estados B, C, D y E. Esta clasificación permitió distinguir entre articulaciones con comportamiento cercano al desempeño inmediato, daño moderado, cercanía al colapso y falla del componente. Con ello fue posible reconocer si la estructura comenzaba a plastificarse y también el nivel de severidad del daño que podrían alcanzar sus elementos bajo desplazamientos laterales equivalentes a los generados por vientos extremos.

La información obtenida mediante el Pushover no se utilizó para rediseñar la estructura ni para proponer refuerzos, sino como una herramienta complementaria para interpretar la capacidad del sistema. De esta manera, el análisis estático no lineal sirvió para enriquecer la evaluación del desempeño estructural más allá de los resultados en servicio, aportando una lectura adicional sobre la localización de zonas vulnerables y la forma en que el edificio podría evolucionar hacia estados de mayor daño.

### 3.2.8. Estimación de costo directo

Finalmente, se estimó el costo directo del sistema estructural para cada escenario de viento. Con esto fue posible complementar la evaluación del comportamiento estructural con la variación económica asociada al incremento de la velocidad de diseño, considerando los cambios que se presentan en las dimensiones y cantidades de los elementos estructurales.

La estimación consideró únicamente la superestructura metálica y los componentes directamente relacionados con su construcción. Las partidas incluidas fueron acero estructural, losa-acero, concreto, conexiones, pintura epóxica, traslado y montaje. Se mantuvo el mismo alcance para los cuatro escenarios para que la comparación entre ellos se realizara bajo los mismos conceptos constructivos.

Las cantidades de material se obtuvieron de los modelos estructurales desarrollados en ETABS [59], una vez realizado el dimensionamiento correspondiente a cada escenario de carga. Para el acero se utilizó el peso total de los elementos estructurales, mientras que para la losa-acero y el concreto se determinaron las áreas y volúmenes correspondientes al sistema de piso. Las conexiones se consideraron como un 18 % adicional del peso total del acero.

Los precios unitarios empleados se obtuvieron mediante una cotización directa con Castilla Estructuras, empresa dedicada al suministro y fabricación de estructuras metálicas. En el caso del acero estructural, los precios presentaron algunas diferencias entre escenarios, relacionadas con las secciones requeridas, su disponibilidad comercial, el tonelaje solicitado y las condiciones particulares de cada cotización. Todos los costos se expresaron en pesos mexicanos (MXN) y se conservaron las mismas partidas para los cuatro casos.

Esta comparación se realizó para los cuatro casos de estudio: el edificio normativo y los tres edificios diseñados para las velocidades asociadas a Roxanne, Emily y Wilma, respectivamente. Esto permitió identificar cómo cambia el costo directo conforme aumenta la velocidad de diseño y, en consecuencia, el tamaño y peso de los elementos estructurales, considerando además las variaciones de cotización observadas en el acero estructural para cada escenario.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Carga de viento aplicada

El cálculo de la carga de viento mediante el método dinámico del MDOC-DV (CFE, 2020) [1] permitió obtener la distribución de fuerzas laterales sobre las superficies de barlovento, sotavento y cubierta del edificio para cada uno de los escenarios considerados. Los resultados mostraron que, al incrementarse la velocidad del viento, las fuerzas aplicadas sobre la estructura también aumentaron de forma importante en toda la altura del edificio. En las Tablas 8 a 11 se presentan las fuerzas obtenidas por nivel para cada escenario, mientras que en la Figura 15 se muestra una representación esquemática de su distribución sobre la envolvente del edificio.

Tabla 8. Fuerzas de viento por nivel para caso normativo.

| Nivel | Barlovento (Ton) | Sotavento (Ton) |
|-------|------------------|-----------------|
| 1     | 4.42             | -2.76           |
| 2     | 3.79             | -2.37           |
| 3     | 3.79             | -2.37           |
| 4     | 3.91             | -2.44           |
| 5     | 4.01             | -2.51           |
| 6     | 4.09             | -2.56           |
| 7     | 4.17             | -2.61           |
| 8     | 4.23             | -2.65           |
| 9     | 4.29             | -2.68           |
| 10    | 4.35             | -2.72           |
| 11    | 4.40             | -2.75           |
| 12    | 4.44             | -2.78           |
| 13    | 4.48             | -2.80           |
| 14    | 4.52             | -2.83           |
| 15    | 4.56             | -2.85           |
| 16    | 4.60             | -2.87           |
| 17    | 4.63             | -2.89           |
| 18    | 4.66             | -2.91           |
| 19    | 4.69             | -2.93           |
| 20    | 4.72             | -2.95           |
| 21    | 4.75             | -2.97           |
| 22    | 4.77             | -2.98           |
| 23    | 4.80             | -3.00           |
| 24    | 4.82             | -3.02           |
| 25    | 4.85             | -3.03           |
| 26    | 4.87             | -3.04           |
| 27    | 4.89             | -3.06           |
| 28    | 4.92             | -3.07           |
| 29    | 4.94             | -3.09           |
| 30    | 4.96             | -3.10           |

Tabla 9. Fuerzas de viento en techo para caso normativo.

| Distancia horizontal (m) | Fuerza techo (Ton) |
|--------------------------|--------------------|
| 0                        | -9.40              |
| 7                        | -18.79             |
| 14                       | -18.79             |
| 21                       | -9.40              |

Tabla 10. Fuerzas de viento por nivel para los tres escenarios de huracanes.

| Nivel | ROXANNE          |                 | EMILY            |                 | WILMA            |                 |
|-------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|       | Barlovento (Ton) | Sotavento (Ton) | Barlovento (Ton) | Sotavento (Ton) | Barlovento (Ton) | Sotavento (Ton) |
| 1     | 5.62             | -3.51           | 9.88             | -6.18           | 14.49            | -9.06           |
| 2     | 4.82             | -3.01           | 8.47             | -5.30           | 12.42            | -7.76           |
| 3     | 4.82             | -3.01           | 8.47             | -5.30           | 12.42            | -7.76           |
| 4     | 4.98             | -3.11           | 8.75             | -5.47           | 12.83            | -8.02           |
| 5     | 5.10             | -3.19           | 8.97             | -5.61           | 13.16            | -8.22           |
| 6     | 5.21             | -3.26           | 9.16             | -5.73           | 13.43            | -8.40           |
| 7     | 5.31             | -3.32           | 9.33             | -5.83           | 13.68            | -8.55           |
| 8     | 5.39             | -3.37           | 9.47             | -5.92           | 13.89            | -8.68           |
| 9     | 5.46             | -3.41           | 9.61             | -6.00           | 14.09            | -8.80           |
| 10    | 5.53             | -3.46           | 9.73             | -6.08           | 14.26            | -8.91           |
| 11    | 5.59             | -3.50           | 9.84             | -6.15           | 14.42            | -9.01           |
| 12    | 5.65             | -3.53           | 9.94             | -6.21           | 14.57            | -9.11           |
| 13    | 5.71             | -3.57           | 10.03            | -6.27           | 14.71            | -9.19           |
| 14    | 5.76             | -3.60           | 10.12            | -6.33           | 14.84            | -9.28           |
| 15    | 5.80             | -3.63           | 10.21            | -6.38           | 14.96            | -9.35           |
| 16    | 5.85             | -3.66           | 10.29            | -6.43           | 15.08            | -9.43           |
| 17    | 5.89             | -3.68           | 10.36            | -6.48           | 15.19            | -9.49           |
| 18    | 5.93             | -3.71           | 10.43            | -6.52           | 15.29            | -9.56           |
| 19    | 5.97             | -3.73           | 10.50            | -6.56           | 15.39            | -9.62           |
| 20    | 6.01             | -3.75           | 10.56            | -6.60           | 15.49            | -9.68           |
| 21    | 6.04             | -3.78           | 10.63            | -6.64           | 15.58            | -9.74           |
| 22    | 6.08             | -3.80           | 10.69            | -6.68           | 15.67            | -9.79           |
| 23    | 6.11             | -3.82           | 10.74            | -6.71           | 15.75            | -9.84           |
| 24    | 6.14             | -3.84           | 10.80            | -6.75           | 15.83            | -9.90           |
| 25    | 6.17             | -3.86           | 10.85            | -6.78           | 15.91            | -9.94           |
| 26    | 6.20             | -3.88           | 10.90            | -6.81           | 15.99            | -9.99           |
| 27    | 6.23             | -3.89           | 10.95            | -6.85           | 16.06            | -10.04          |
| 28    | 6.26             | -3.91           | 11.00            | -6.88           | 16.13            | -10.08          |
| 29    | 6.28             | -3.93           | 11.05            | -6.90           | 16.20            | -10.12          |
| 30    | 6.31             | -3.94           | 11.09            | -6.93           | 16.26            | -10.16          |

Tabla 11. Fuerzas de viento en techo para los tres escenarios de huracanes.

| Distancia horizontal (m) | Fuerza techo (Ton) |        |        |
|--------------------------|--------------------|--------|--------|
|                          | ROXANNE            | EMILY  | WILMA  |
| 0                        | -11.96             | -21.03 | -30.83 |
| 7                        | -23.92             | -42.06 | -61.67 |
| 14                       | -23.92             | -42.06 | -61.67 |
| 21                       | -11.96             | -21.03 | -30.83 |

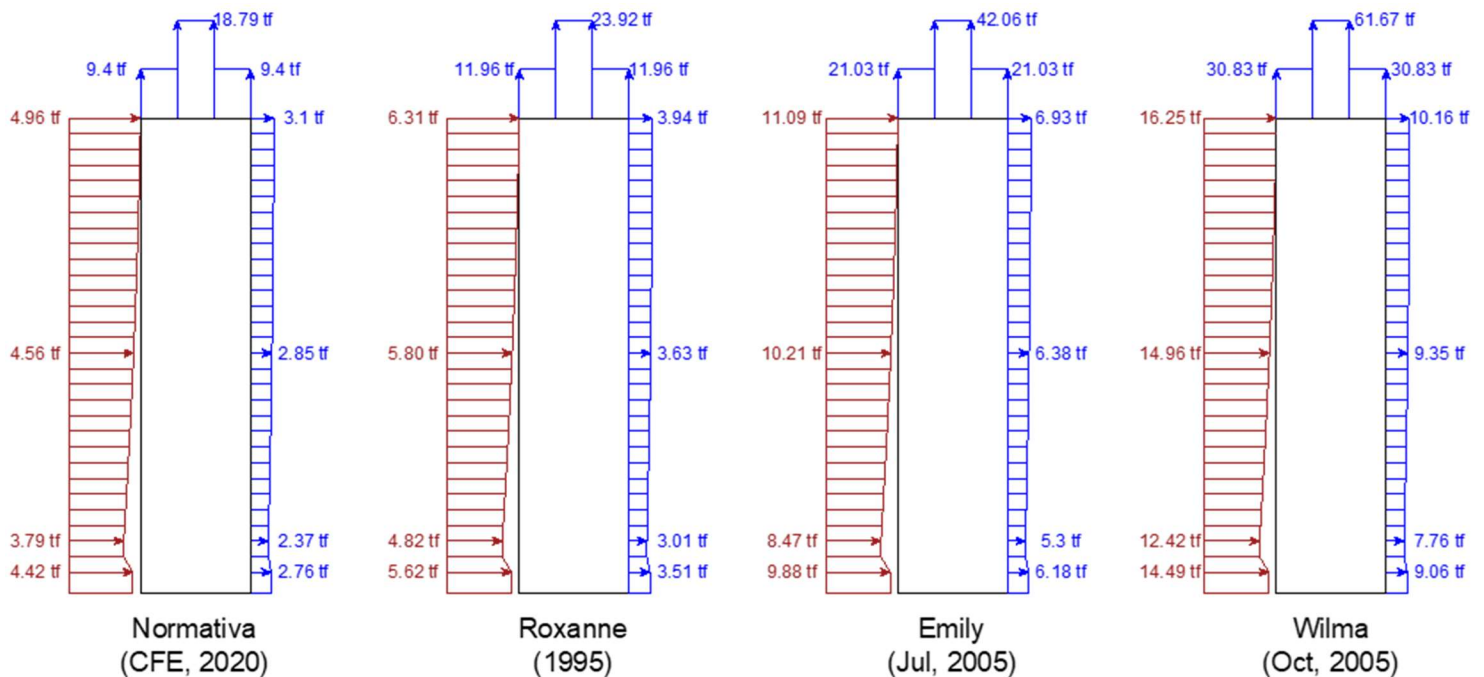


Figura 15. Representación esquemática de la distribución de fuerzas sobre las superficies de barlovento y sotavento por entrepiso/crujía, y sobre la cubierta para los distintos escenarios de carga eólica.

De manera general, la Figura 15 permite observar que la distribución de fuerzas mantiene la misma tendencia en los cuatro escenarios: las acciones aumentan gradualmente con la altura, y las mayores succiones se concentran en la cubierta. Sin embargo, también se aprecia que el crecimiento de las fuerzas no resulta despreciable desde el punto de vista estructural, ya que los escenarios de huracán producen demandas muy superiores a las del diseño normativo. Esto es importante en edificios altos, ya que pequeñas variaciones en la carga lateral pueden traducirse en incrementos significativos en desplazamiento, distorsión de entrepiso y exigencia sobre los elementos resistentes.

Estos resultados ponen en evidencia que el edificio diseñado con la velocidad normativa parte de una condición de carga considerablemente menor que la asociada a huracanes históricos de la región. Por ello, la carga de viento aplicada constituye el primer indicador de que existe una diferencia importante entre el escenario reglamentario y los escenarios extremos. Esta diferencia es la que posteriormente se refleja en la configuración estructural, en el desempeño en servicio y en el costo directo del sistema estructural.

#### **4.2. Configuración estructural**

El edificio se resolvió mediante un sistema de marcos de acero arriostrados en V invertida, utilizando losa-acero calibre 22 como sistema de piso. Debido a que en Cancún la acción del viento gobierna el diseño, el dimensionamiento estructural se orientó principalmente al control de distorsiones, reforzando sobre todo los contravientos y las columnas en los niveles inferiores, sin descuidar la resistencia requerida en vigas. En la Figura 16 se muestra el modelo 3D de la edificación de estudio en el programa ETABS [59].

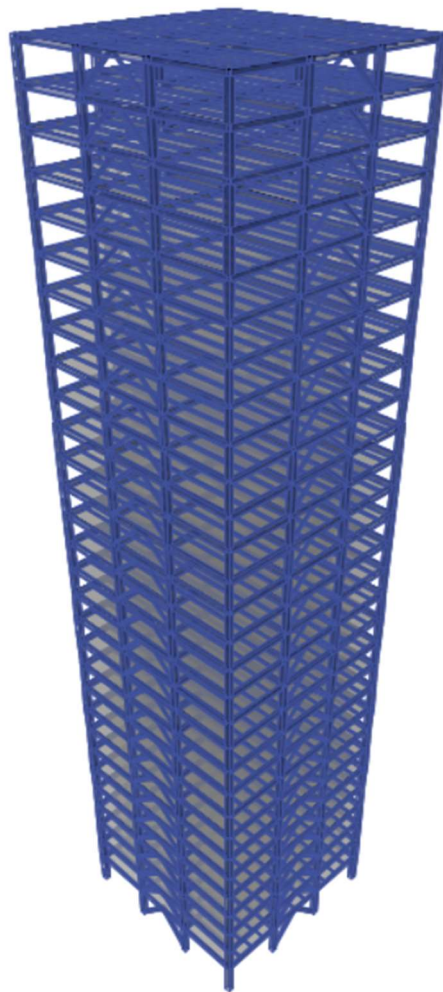


Figura 16. Modelo 3D del edificio en ETABS.

Para cada escenario de viento considerado, es decir, el normativo, Roxanne, Emily y Wilma, se asignaron secciones por grupos de niveles, con el fin de representar de manera más eficiente la variación de la demanda a lo largo de la altura del edificio. El sistema de piso se mantuvo constante en todos los casos, por lo que los cambios principales entre escenarios se concentraron en los elementos del sistema resistente lateral. En la Tabla 12 se presenta la configuración estructural final obtenida para cada escenario, incluyendo las secciones de vigas principales, vigas secundarias, columnas, contravientos y el periodo del primer modo de vibrar.

Tabla 12. Configuración estructural de los edificios.

| Edificio              | Viga principal<br>(Nivel)                           | Viga secundaria<br>(Nivel) | Columna (Nivel)                                                     | Losa                   | Contraviento V<br>invertida<br>(Nivel)     | T1 (seg) |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|----------|
| Edificio<br>normativo | W24x76 (1-20)<br>W18x76 (21-30)                     | W8x31 (1-30)               | HSS22x22x7/8 (1-10)<br>HSS20x20x7/8 (11-20)<br>HSS18x18x3/4 (21-30) | Losacero<br>25 cal. 22 | W14x90 (1)<br>W12x65 (2-4)<br>W8x40 (5-30) | 2.07     |
| Edificio<br>Roxanne   | W24x94 (1-9)<br>W24x84 (10-19)<br>W21x111 (20-30)   | W8x31 (1-30)               | W14x370 (1-12)<br>W14x342 (13-19)<br>W14x257 (20-30)                |                        | W12x87 (1)<br>W12x65 (2-30)                | 2.00     |
| Edificio<br>Emily     | W30x108 (1-9)<br>W27x94 (10-20)<br>W24x104 (21-30)  | W10x45 (1-30)              | W14x455 (1-10)<br>W14x426 (11-20)<br>W14x398 (21-30)                |                        | W14x82 (1-30)                              | 2.60     |
| Edificio<br>Wilma     | W30x116 (1-9)<br>W27x129 (10-19)<br>W24x146 (20-30) | W10x19 (1-30)              | W14x550 (1-10)<br>W14x500 (11-22)<br>W14x455 (23-30)                |                        | W14x90 (1-5)<br>W12x65 (6-30)              | 1.35     |

Los resultados muestran que el incremento en la velocidad de diseño produjo una modificación progresiva de las secciones estructurales. En el caso normativo, las secciones fueron las más pequeñas del edificio analizado. Para el escenario de Roxanne se observa un aumento en las vigas principales y en las columnas, lo que indica que el edificio comenzó a requerir mayor rigidez lateral para controlar su respuesta. Esta tendencia continuó en los escenarios de Emily y Wilma, donde los perfiles aumentaron de manera importante, particularmente en columnas y contravientos.

En cuanto a la variación del periodo del primer modo de vibrar el edificio normativo presentó el mayor valor, de 2.07 s, mientras que los escenarios de Roxanne, Emily y Wilma registraron valores de 2.00 s, 1.60 s y 1.35 s, respectivamente. Esta disminución del periodo conforme aumentó la velocidad de diseño indica que el edificio se volvió progresivamente más rígido, lo cual es coherente con el uso de perfiles más robustos y con el incremento de la capacidad lateral del sistema estructural. En otras palabras, los resultados no solo muestran que aumentó el

tamaño de los elementos, sino también que dicho aumento tuvo un efecto directo en la respuesta dinámica global del edificio.

#### 4.3. Desempeño: distorsión de entrepiso y desplazamiento global

La evaluación del desempeño estructural, se realizó a partir de la distorsión de entrepiso y del desplazamiento global en azotea, ya que ambos parámetros permiten valorar si el edificio conserva un comportamiento aceptable en servicio bajo las distintas demandas de viento consideradas. La verificación del edificio diseñado por normativa, con velocidad de 180 km/h, sometido a las cargas equivalentes de los huracanes analizados mostró que las distorsiones y los desplazamientos globales pueden exceder los límites adoptados en la investigación, es decir, distorsión  $\leq 0.005$  [39] y desplazamiento global  $\leq H/500$  [2]. En particular, los desplazamientos globales del modelo normativo sometido a cargas equivalentes a los huracanes fueron de 0.47 m para Roxanne, 0.83 m para Emily y 1.22 m para Wilma, como se resume en la Tabla 13. Estos valores superan el umbral de  $H/500 = 0.182$  m para una altura total de 91 m, lo que indica que el edificio diseñado con la velocidad reglamentaria no mantuvo el nivel de servicio cuando fue sometido a escenarios de viento de huracanes extremos.

Tabla 13. Desplazamientos globales para cada escenario.

| Huracán | Desplazamiento (m) |
|---------|--------------------|
| Roxanne | 0.47               |
| Emily   | 0.83               |
| Wilma   | 1.22               |

En la Figura 17 se comparan los perfiles de distorsión de entrepiso por viento y por sismo de los cuatro edificios diseñados para cada escenario, es decir, el caso normativo y los edificios dimensionados para Roxanne, Emily y Wilma. Esta representación permite evaluar, en una sola gráfica, cómo cambia la respuesta lateral del edificio cuando el diseño estructural se ajusta a demandas eólicas cada vez mayores.

En la figura se observa que, aun cuando cada edificio fue diseñado para su escenario correspondiente, la acción del viento continúa gobernando claramente la respuesta lateral, mientras que la contribución del sismo permanece en valores considerablemente menores. De manera aproximada, las distorsiones máximas asociadas al sismo se mantienen del orden de 0.0002 a 0.001, mientras que las debidas al viento se ubican cercanas al límite de servicio adoptado de 0.005. Esto confirma que, para el caso de estudio y la ubicación considerada, el diseño estructural está condicionado principalmente por el viento y no por la acción sísmica.

También puede apreciarse que los perfiles de distorsión por viento conservan una forma general semejante entre escenarios, aunque con variaciones en su magnitud y distribución a lo largo de la altura. En todos los casos, las mayores distorsiones tienden a concentrarse en la parte media e inferior del edificio, mientras que hacia los niveles superiores la respuesta disminuye gradualmente. En conjunto, la figura muestra que el rediseño de cada edificio para su escenario específico permite mantener las distorsiones dentro de un rango cercano al límite de servicio, pero confirma al mismo tiempo que el viento es la acción que controla el comportamiento lateral del sistema estructural.

Comparación de las distorsiones de entrepiso por viento y sismo de los edificios diseñados para cada escenario

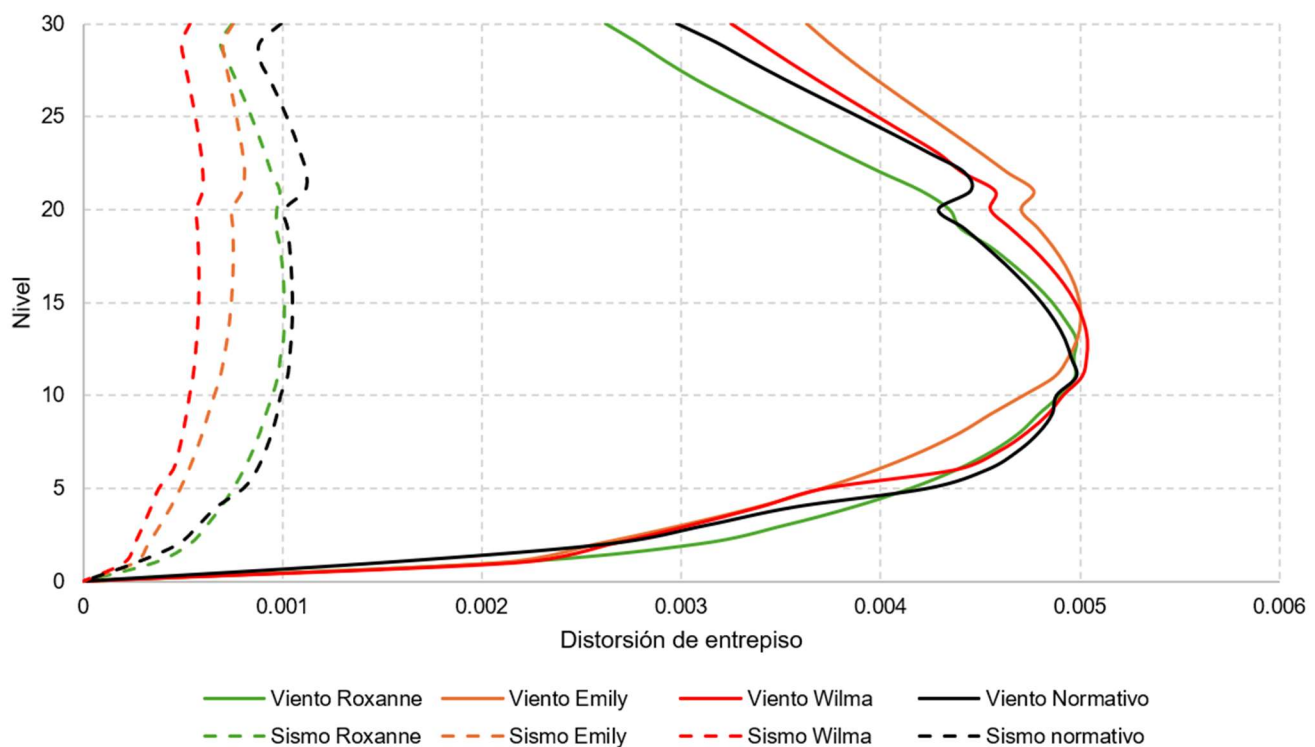
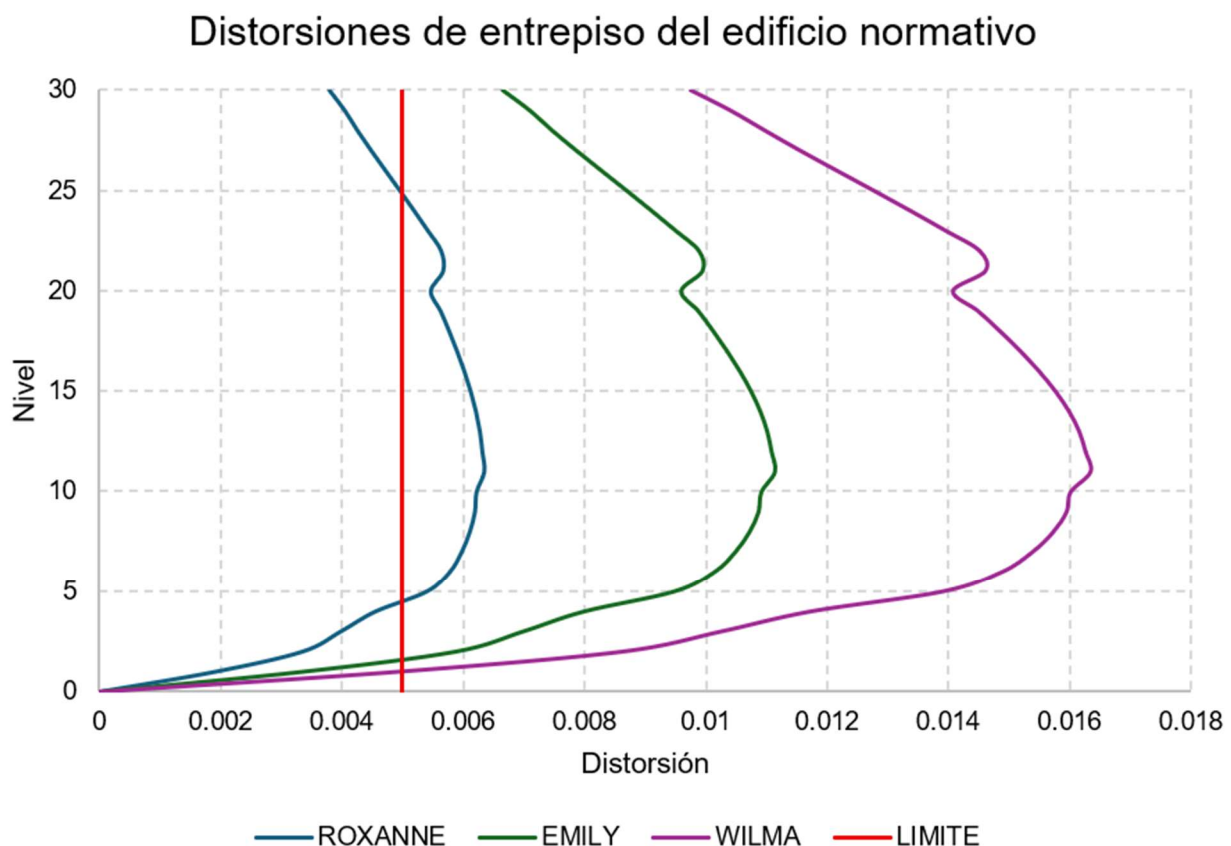


Figura 17. Distorsiones de entrepiso de sismo y viento del edificio normativo, Roxanne, Emily y Wilma.

La Figura 18 permite ver con mayor claridad cómo cambia la respuesta del edificio normativo cuando se le aplican demandas equivalentes a los tres huracanes. A simple vista, la distorsión aumenta de Roxanne a Emily y, con mayor intensidad, a Wilma. Lo más relevante es que una porción cada vez mayor de la altura del edificio rebasa el límite de 0.005. Esto indica que, a medida que la demanda de viento se vuelve más severa, la afectación deja de ser puntual y pasa a involucrar una parte más amplia del sistema estructural.

También se aprecia que las distorsiones más altas no se concentran en un único nivel, sino en una franja ubicada principalmente entre la parte baja y la zona media del edificio. Esto puede explicarse porque las cargas laterales por viento se aplican a lo largo de toda la altura y se van acumulando conforme son transmitidas hacia la base, de modo que los niveles inferiores resisten una demanda global mayor. Sin embargo, la distorsión máxima no necesariamente aparece en el primer nivel, ya que su magnitud también depende de cómo se distribuye la rigidez lateral del edificio. En otras palabras, la figura muestra que el comportamiento lateral del edificio no se entiende únicamente a partir del desplazamiento máximo en azotea ya que también importa la forma en que la deformación se reparte entre los distintos niveles.

Visto así, la figura refuerza una idea importante de la investigación: el edificio diseñado con la velocidad normativa puede responder de manera aceptable ante la condición reglamentaria, pero frente a escenarios de viento más severos la deformación crece de forma progresiva y compromete cada vez más niveles. Por ello, el problema no radica solo en el aumento del valor máximo de la respuesta, sino en que una porción mayor del edificio entra en condiciones incompatibles con



el estado de servicio deseado.

Figura 18. Distorsiones de entrepiso del edificio normativo sometido a cada escenario.

En resumen, con la evaluación del desempeño se observó que la distorsión de entrepiso y el desplazamiento global aumentaron de manera importante con la velocidad de viento, y que el edificio diseñado con la velocidad normativa no mantuvo el estado de servicio bajo demandas equivalentes a los huracanes Roxanne, Emily y Wilma. Este resultado pone en evidencia la diferencia entre cumplir con un criterio reglamentario mínimo y conservar un desempeño adecuado frente a eventos extremos.

#### **4.4. Resultados de Pushover**

Con el propósito de complementar la evaluación del desempeño estructural en servicio, se realizó un análisis Pushover sobre el edificio diseñado con la velocidad normativa. Este análisis permitió estudiar la respuesta inelástica de la estructura cuando fue llevada a desplazamientos laterales equivalentes a los generados por los escenarios de huracán considerados en la investigación (Tabla 5). A diferencia del análisis lineal, el Pushover hizo posible identificar la secuencia de activación de las articulaciones plásticas y localizar las zonas del edificio con mayor concentración de daño potencial.

El procedimiento se llevó a cabo en el software ETABS [59], utilizando un patrón de cargas laterales de forma triangular, aplicado en las direcciones principales del edificio. Para representar el comportamiento no lineal del sistema estructural, se asignaron articulaciones plásticas en vigas, columnas y contravientos. La localización de dichas articulaciones se definió mediante distancias relativas a la longitud del elemento, con el propósito de identificar las zonas con mayor concentración de demanda inelástica durante el análisis. En vigas y columnas, las articulaciones se ubicaron a distancias de  $0.20L$ ,  $0.10L$ ,  $0.05L$  y  $0.03L$  medidas desde los extremos del elemento, considerando que las mayores demandas inelásticas suelen concentrarse en las regiones cercanas a los nodos. En los contravientos, las articulaciones se colocaron en la mitad de su longitud, debido a que estos elementos trabajan principalmente bajo demanda axial y su respuesta inelástica puede desarrollarse a lo largo del miembro. Este criterio es consistente con estudios de análisis Pushover en los que se han considerado distintas ubicaciones relativas de articulaciones plásticas, tales como  $0.00L$ ,  $0.05L$ ,  $0.10L$ ,  $0.15L$  y  $0.20L$ , para evaluar su influencia en la respuesta estructural [62].

Esta distribución permitió explorar distintas posibles zonas de concentración de deformaciones inelásticas y observar con mayor claridad la progresión del daño estructural. En total se asignaron 2640 articulaciones en todo el edificio.

Las Tablas 14 y 15 muestran el número de articulaciones plásticas activadas por estado de desempeño en las direcciones X y Y, respectivamente. En ambos casos se reportan los conteos para tres metas de desplazamiento del nodo de control y para las distintas posiciones relativas de la articulación en vigas y columnas. En términos generales, los resultados muestran una secuencia donde la activación inició principalmente en los contravientos, continuó en algunas vigas y, bajo mayores demandas alcanzó a las columnas de los primeros niveles. Este comportamiento indica que el sistema de arriostramiento fue el primer mecanismo

en absorber la demanda lateral creciente, mientras que las columnas conservaron una mayor reserva de capacidad hasta etapas más avanzadas del análisis.

Tabla 14. Resultados del análisis Pushover en X.

| PUSHOVER X - ARTICULACIONES PLÁSTICAS |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ubicación de articulación             | 0.2L   |        |        | 0.1L   |        |        | 0.05L  |        |        | 0.03L  |        |        |
| Desplazamiento objetivo               | 1.22 m | 0.83 m | 0.47 m | 1.22 m | 0.83 m | 0.47 m | 1.22 m | 0.83 m | 0.47 m | 1.22 m | 0.83 m | 0.47 m |
| B                                     | 18     | 2      | 0      | 24     | 4      | 0      | 102    | 2      | 0      | 154    | 2      | 0      |
| C                                     | 0      | 2      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 2      | 0      | 0      | 2      | 0      |
| D                                     | 34     | 16     | 0      | 34     | 16     | 0      | 34     | 16     | 0      | 32     | 16     | 0      |
| E                                     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |

Tabla 15. Resultados del análisis Pushover en Y.

| PUSHOVER Y - ARTICULACIONES PLÁSTICAS |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ubicación de articulación             | 0.2L   |        |        | 0.1L   |        |        | 0.05L  |        |        | 0.03L  |        |        |
| Desplazamiento objetivo               | 1.22 m | 0.83 m | 0.47 m | 1.22 m | 0.83 m | 0.47 m | 1.22 m | 0.83 m | 0.47 m | 1.22 m | 0.83 m | 0.47 m |
| B                                     | 18     | 2      | 0      | 24     | 4      | 0      | 112    | 4      | 0      | 146    | 4      | 0      |
| C                                     | 0      | 2      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 2      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| D                                     | 34     | 16     | 0      | 34     | 16     | 0      | 32     | 16     | 0      | 32     | 16     | 0      |
| E                                     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |

En cuanto a los estados de desempeño, se observó que la mayor parte de las articulaciones se mantuvo en estado B, lo que indica un comportamiento todavía aceptable y cercano al desempeño inmediato. También, aparecieron algunos casos en estado C, aunque en menor proporción, y se registraron articulaciones en estado D, particularmente en los niveles inferiores del edificio. Estas últimas son importantes porque señalan zonas donde la estructura se acercó a condiciones de daño severo o cercanas al colapso, aun cuando no se desarrolló una falla global del sistema. Por otro lado, no se observaron articulaciones en estado E, lo que indica que bajo las demandas impuestas en el análisis no se alcanzó una pérdida total de capacidad en los elementos modelados.

El diagrama de capacidad (Figura 19) obtenido en ETABS permite complementar esta lectura, ya que muestra la evolución de la respuesta global del edificio conforme aumenta el desplazamiento lateral. A través de esta curva es posible identificar la pérdida progresiva de rigidez del sistema y relacionarla con la activación de articulaciones en los distintos elementos estructurales. En este sentido, el diagrama de capacidad nos sirve como referencia para interpretar la transición entre el comportamiento elástico y el inicio del comportamiento inelástico.

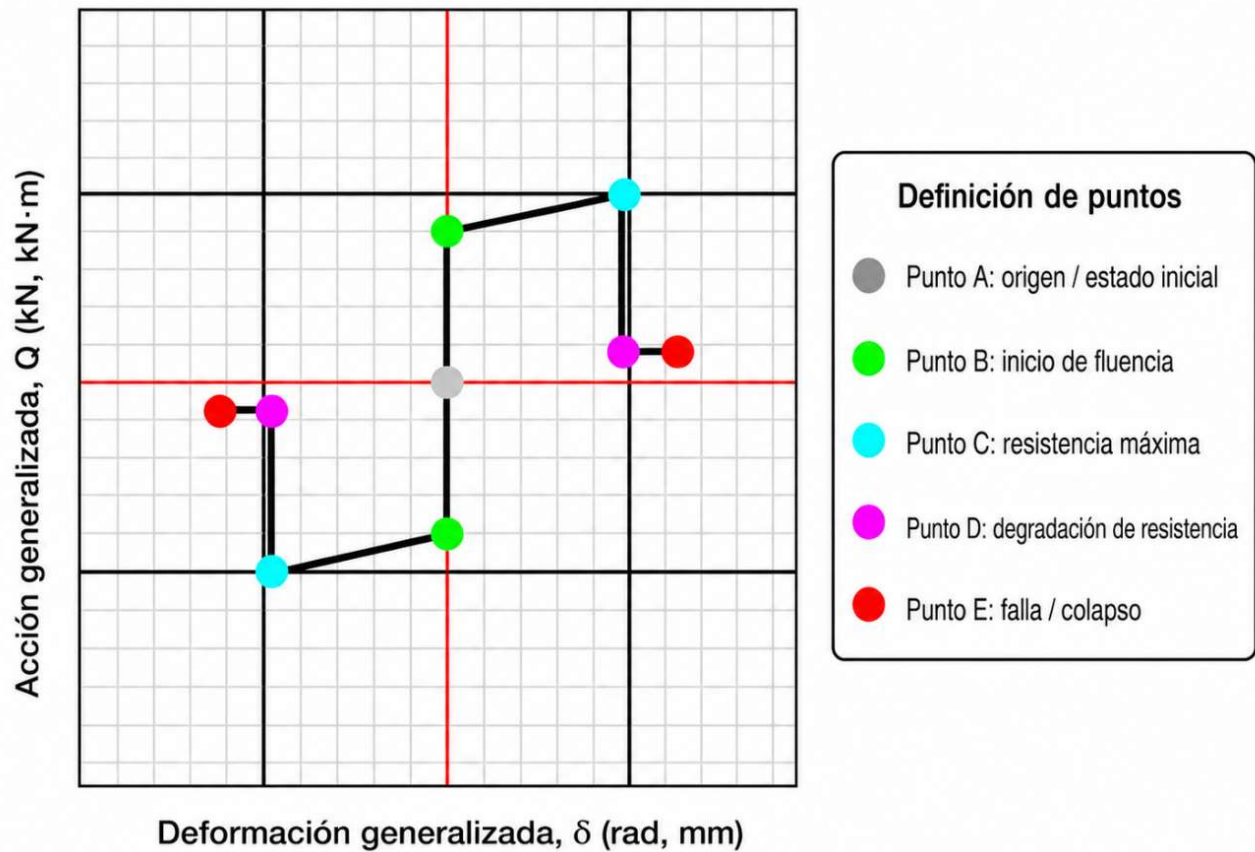


Figura 19. Diagrama de capacidad de articulaciones.

La Figura 20 presenta la vista lateral de articulaciones, donde se observa las zonas con mayor concentración de daño potencial. Esta figura muestra que la respuesta inelástica tendió a concentrarse en los primeros niveles y en elementos del sistema lateral, lo cual resulta coherente con la forma en que las cargas laterales por viento se acumulan y se transmiten hacia la base del edificio. Este patrón puede considerarse lógico para el sistema estructural empleado, ya que al tratarse de marcos arriostrados en V invertida era razonable esperar que los primeros elementos en entrar al rango inelástico fueran los contravientos, después algunas vigas y por último las columnas de los niveles inferiores.

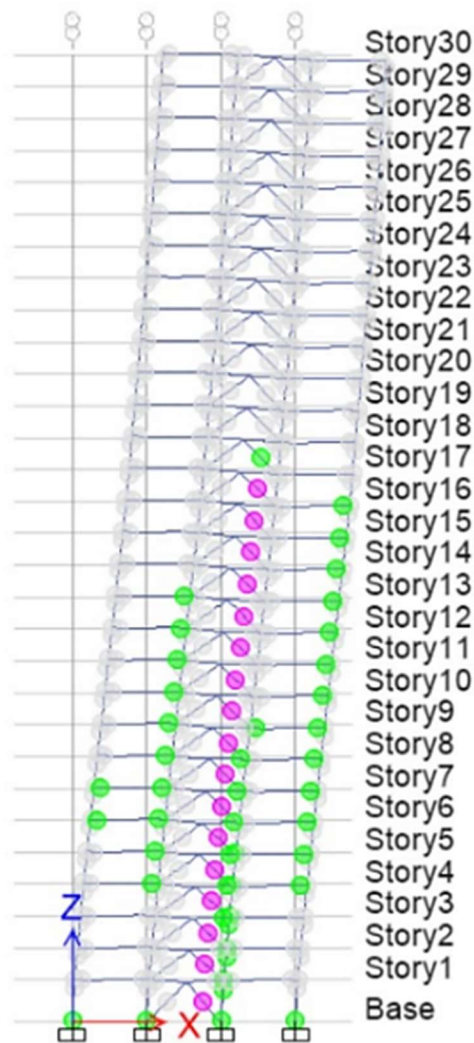


Figura 20. Vista lateral de articulaciones.

El análisis permitió identificar la secuencia de formación de las articulaciones, los niveles donde se concentró la demanda y los estados de desempeño alcanzados bajo los desplazamientos asociados con los huracanes estudiados. Los resultados muestran que el edificio diseñado para la velocidad normativa presenta una respuesta insuficiente en términos de servicio cuando se somete a las demandas equivalentes a vientos extremos. También se observó la concentración de articulaciones en elementos importantes del sistema resistente, lo que indica que algunas zonas comienzan a presentar una mayor demanda inelástica. Por lo tanto, la evaluación mediante un análisis elástico resulta limitada cuando se busca conocer la respuesta de la estructura ante escenarios de viento que superan las condiciones consideradas en el diseño normativo.

La secuencia de formación de las articulaciones mostró que la respuesta inelástica comenzó principalmente en los contravientos, posteriormente se extendió hacia algunas vigas y ante mayores demandas se presentaron articulaciones en columnas de los primeros niveles. Aunque la mayor parte de las articulaciones se mantuvo

dentro de estados de desempeño aceptables, la aparición de estados cercanos al colapso en algunos elementos permitió identificar zonas con mayor sensibilidad. Estos resultados permiten ubicar de manera más precisa los elementos que podrían requerir atención si se buscara incrementar la capacidad de la estructura para este tipo de demandas.

Es importante señalar que el objetivo del análisis no fue llevar la estructura hasta el colapso, sino evaluar la evolución de su comportamiento inelástico ante demandas laterales severas. Para estudiar la respuesta hasta estados de colapso sería necesario considerar desplazamientos objetivo mayores y procedimientos de análisis no lineal que permitan seguir la respuesta después de la formación de un número importante de articulaciones. Asimismo, sería conveniente incorporar con mayor detalle fenómenos como la degradación de rigidez y resistencia y el comportamiento de las conexiones, debido a su posible influencia en la capacidad última del sistema. En resumen, el análisis realizado se enfocó en identificar el inicio y desarrollo de la respuesta inelástica, así como las zonas que adquieren mayor relevancia conforme aumenta la demanda de viento.

#### 4.5. Costos estructurales

La estimación del costo de la superestructura mostró que a medida que aumentó la velocidad de diseño, también se incrementó de manera importante el costo directo del edificio. En la Tabla 16, 17, 18 y 19 se presentan los costos obtenidos para los cuatro escenarios analizados, considerando los conceptos de acero, losa-acero y concreto, así como el subtotal, el IVA y el total correspondiente a cada caso.

Tabla 16. Costo del edificio normativo.

| EDIFICIO NORMATIVO- 180 KM/H |             |          |                   |
|------------------------------|-------------|----------|-------------------|
| CONCEPTO                     | P.U.        | CANTIDAD | COSTO             |
| ACERO (KG)                   | \$ 68.14    | 1425950  | \$ 97,164,233.00  |
| LOSACERO (M2)                | \$ 814.07   | 13230    | \$ 10,770,146.10  |
| CONCRETO (M3)                | \$ 3,204.00 | 694.575  | \$ 2,225,418.30   |
| SUBTOTAL=                    |             |          | \$ 110,159,797.40 |
| IVA (16%) =                  |             |          | \$ 17,625,567.58  |
| TOTAL=                       |             |          | \$ 127,785,364.98 |

Tabla 17. Costo del edificio Roxanne.

| EDIFICIO ROXANNE - 200 KM/H |             |             |                   |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------------|
| CONCEPTO                    | P.U.        | CANTIDAD    | COSTO             |
| ACERO (KG)                  | \$ 66.43    | 1926450     | \$ 127,974,073.50 |
| LOSACERO (M2)               | \$ 814.07   | 13230       | \$ 10,770,146.10  |
| CONCRETO (M3)               | \$ 3,204.00 | 694.575     | \$ 2,225,418.30   |
|                             |             | SUBTOTAL=   | \$ 140,969,637.90 |
|                             |             | IVA (16%) = | \$ 22,555,142.06  |
|                             |             | TOTAL=      | \$ 163,524,779.96 |

Tabla 18. Costo del edificio Emily.

| EDIFICIO EMILY - 255 KM/H |             |             |                   |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------------|
| CONCEPTO                  | P.U.        | CANTIDAD    | COSTO             |
| ACERO (KG)                | \$ 67.94    | 2290220     | \$ 155,597,546.80 |
| LOSACERO (M2)             | \$ 814.07   | 13230       | \$ 10,770,146.10  |
| CONCRETO (M3)             | \$ 3,204.00 | 694.575     | \$ 2,225,418.30   |
|                           |             | SUBTOTAL=   | \$ 168,593,111.20 |
|                           |             | IVA (16%) = | \$ 26,974,897.79  |
|                           |             | TOTAL=      | \$ 195,568,008.99 |

Tabla 19. Costo del edificio Wilma.

| EDIFICIO WILMA - 300 KM/H |             |             |                   |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------------|
| CONCEPTO                  | P.U.        | CANTIDAD    | COSTO             |
| ACERO (KG)                | \$ 70.53    | 2411210     | \$ 170,062,641.30 |
| LOSACERO (M2)             | \$ 814.07   | 13230       | \$ 10,770,146.10  |
| CONCRETO (M3)             | \$ 3,204.00 | 694.575     | \$ 2,225,418.30   |
|                           |             | SUBTOTAL=   | \$ 183,058,205.70 |
|                           |             | IVA (16%) = | \$ 29,289,312.91  |
|                           |             | TOTAL=      | \$ 212,347,518.61 |

El edificio normativo, diseñado para una velocidad de 180 km/h, presentó el menor costo del conjunto, con un total de \$127,785,364.98 MXN. A partir de este valor

base, el escenario asociado al huracán Roxanne alcanzó un total de \$163,524,779.96 MXN, lo que representa un incremento aproximado de 28 %. En el caso de Emily, el costo total fue de \$195,568,008.99 MXN, equivalente a un aumento cercano al 53 % respecto al caso normativo. Finalmente, el escenario más severo, correspondiente a Wilma, presentó el costo más alto, con \$212,347,518.61 MXN, es decir, un incremento del orden de 66 % en comparación con el edificio diseñado con la velocidad reglamentaria.

Estos resultados muestran que el costo del edificio creció conforme aumentó la velocidad de viento considerada en el diseño. Este comportamiento fue consecuencia directa del mayor dimensionamiento requerido en los elementos estructurales, especialmente en columnas y contravientos, como se observó en el apartado anterior. En términos prácticos, esto significa que el incremento de la demanda eólica obligó a utilizar perfiles de mayor capacidad, lo que elevó principalmente la cantidad de acero estructural, que fue la partida con mayor peso dentro del costo total en todos los escenarios.

Los costos asociados al losa-acero y al concreto permanecieron constantes en los cuatro casos, lo que indica que la diferencia económica entre escenarios estuvo gobernada casi por completo por el aumento en el peso y costo del acero estructural. Esto confirma que la variación del costo se debió al refuerzo progresivo del sistema resistente lateral necesario para controlar la respuesta frente al viento.

Estos resultados evidencian que diseñar para velocidades de viento extremas mejora la capacidad del edificio para enfrentar mayores demandas laterales, pero también implica una penalización económica considerable. Debido a esto se refuerza la necesidad de analizar conjuntamente el desempeño y el costo al momento de tomar decisiones de diseño.

Esta comparación permite cuestionar la viabilidad de resolver el problema únicamente mediante un incremento indiscriminado de la rigidez y resistencia de la estructura principal. Aunque el rediseño para velocidades más altas reduce las deformaciones, el sobre costo asociado puede llegar a ser muy elevado. En este sentido una estrategia más eficiente podría consistir en complementar el diseño estructural con un mayor cuidado en la envolvente, las fachadas y sus conexiones.

En resumen, el análisis de costos mostró que el aumento de la velocidad de viento tuvo una consecuencia económica significativa sobre el sistema estructural del edificio. El caso normativo fue el de menor costo, mientras que los escenarios de los huracanes presentaron incrementos de hasta aproximadamente dos terceras partes del valor base. Este hallazgo confirma que la mejora en el desempeño estructural tiene que evaluarse en conjunto con la viabilidad económica de las soluciones adoptadas.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en las actividades realizadas en la presente investigación, resultan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

### 5.1. Conclusiones

- La evaluación de los edificios permitió comprobar que el viento representa una acción lateral de gran importancia para este tipo de estructuras cuando se localizan en una zona costera como Cancún, Quintana Roo. La comparación de los diferentes escenarios de viento mostró que el viento dominó el diseño estructural de los edificios.
- El edificio diseñado con la velocidad normativa de 180 km/h no mantuvo las condiciones de servicio al ser sometido a las velocidades asociadas con los huracanes Roxanne, Emily y Wilma. Las distorsiones de entrepiso y el desplazamiento global superaron los límites establecidos para la evaluación, lo que indica que considerar únicamente la velocidad reglamentaria puede resultar insuficiente para representar las demandas que podría experimentar un edificio alto durante eventos de viento extremo en una región como Cancún.
- El incremento de la velocidad de diseño permitió reducir las distorsiones de entrepiso y mejorar la respuesta estructural del edificio, sin embargo, esta mejora genera un incremento importante en el costo directo. Respecto al escenario normativo, los sobrecostos obtenidos fueron de aproximadamente 28 % para Roxanne, 53 % para Emily y 66 % para Wilma. Asimismo, se observó una tendencia prácticamente lineal entre el incremento de la carga de viento y el costo directo del sistema resistente, por lo que aumentar progresivamente la resistencia y rigidez de la estructura representa una alternativa poco conveniente económicamente.
- La comparación entre desempeño estructural y costo permitió identificar que mejorar la respuesta del edificio mediante el incremento de la resistencia y rigidez de los elementos principales tiene un impacto económico considerable, esto demuestra la importancia de evaluar diferentes niveles de peligro antes de definir las condiciones de diseño, especialmente en edificios altos ubicados en regiones expuestas a huracanes.
- El análisis Pushover complementó la evaluación del edificio correspondiente al escenario normativo al permitir caracterizar su comportamiento inelástico ante cargas laterales, ya que se observó una concentración de articulaciones plásticas principalmente en los primeros niveles y la secuencia de formación inició en los contravientos, continuó en las vigas y ante mayores demandas, alcanzó las columnas del primer nivel. La mayoría de las articulaciones permaneció en estado B, lo que representa un comportamiento todavía aceptable en gran parte del sistema, pero también se identificaron articulaciones en estado D, asociadas con niveles de daño elevados y cercanos al colapso que representan zonas vulnerables dentro de la estructura.

- La definición de las articulaciones plásticas conforme a ASCE/SEI 41-17 [41] permitió representar de manera aproximada la evolución del comportamiento no lineal de los elementos estructurales, aunque este documento fue desarrollado para la evaluación de estructuras ante acciones sísmicas, su aplicación adaptada en esta investigación fue útil para complementar los resultados de los análisis elásticos y reconocer la secuencia en la que los elementos comenzaron a desarrollar comportamiento inelástico.
- Los resultados obtenidos permitieron cumplir con los objetivos planteados y resolver el problema de investigación. Se definió el edificio de estudio, se establecieron los escenarios de viento, se evaluó el desempeño estructural, se realizó el análisis Pushover del modelo normativo y se estimó el costo directo correspondiente a cada escenario.
- La hipótesis de investigación fue confirmada, debido a que el edificio diseñado con la velocidad normativa de 180 km/h presentó un desempeño inadecuado cuando fue sometido a velocidades de viento mayores asociadas con eventos extremos.
- Desde una perspectiva aplicada, los resultados muestran que el diseño basado en desempeño (PBWD) puede complementar los criterios establecidos en el MDOC-DV de la CFE (2020) [1], debido a que permite comparar diferentes niveles de peligro y evaluar sus efectos tanto en el comportamiento estructural como en el costo directo.

## **5.2. Recomendaciones**

- Se recomienda que en el diseño de edificios altos de acero ubicados en zonas costeras no se limite la evaluación al cumplimiento de la velocidad de viento establecida por la normativa. Cuando las características del inmueble, su ocupación o la continuidad de sus operaciones lo justifiquen, puede ser conveniente realizar evaluaciones adicionales basadas en desempeño que permitan analizar diferentes niveles de peligro y sus consecuencias sobre la respuesta estructural.
- Se recomienda prestar mayor atención al diseño y comportamiento de las fachadas y de los elementos que conforman la envolvente del edificio. En esta investigación se consideró que la fachada mantenía su integridad durante la aplicación de las cargas máximas de viento, por lo que futuros estudios podrían incorporar modelos que permitan representar el daño progresivo de estos elementos y evaluar su influencia sobre la funcionalidad del inmueble.
- Se recomienda analizar estrategias alternativas al incremento directo de la resistencia y rigidez de la estructura principal para controlar la respuesta ante eventos de viento extremo. Entre estas alternativas pueden considerarse modificaciones en la configuración estructural y la incorporación de dispositivos de control, como amortiguadores, con el propósito de evaluar si es posible reducir las demandas estructurales sin depender exclusivamente del aumento de las secciones de los elementos resistentes.
- Se recomienda incorporar en futuras investigaciones los costos indirectos asociados con el daño producido por eventos extremos, incluyendo

reparaciones, suspensión de actividades, pérdida de operación y afectaciones a los elementos no estructurales.

- Se recomienda ampliar la aplicación del diseño basado en desempeño para edificios con diferentes alturas, configuraciones estructurales y sistemas resistentes, así como para otras localidades expuestas a huracanes ya que esto permitiría determinar si las tendencias observadas en esta investigación respecto al desempeño y al costo se mantienen para diferentes condiciones de exposición y tipologías estructurales.
- Se recomienda realizar análisis dinámicos incrementales en futuras investigaciones para estudiar con mayor detalle la evolución de la respuesta estructural conforme aumenta la demanda de viento.
- Finalmente, se recomienda continuar desarrollando metodologías de evaluación que consideren de manera conjunta la estructura principal, la envolvente y las consecuencias económicas del daño. Un enfoque de este tipo permitiría establecer criterios de diseño más completos, orientados a conservar la funcionalidad y continuidad de operación de edificios altos durante eventos extremos.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Comisión Federal de Electricidad, “MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DISEÑO POR VIENTO MÉXICO,” 2020.
- [2] Gaceta Oficial de la Ciudad de México, “NORMA TÉCNICA COMPLEMENTARIA SOBRE CRITERIOS Y ACCIONES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE LAS EDIFICACIONES,” 2023.
- [3] R. J. Pasch, E. S. Blake, H. D. Cobb III, and D. P. Roberts, “Tropical Cyclone Report: Hurricane Wilma (15–25 October 2005),” 2005. [Online]. Available: [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL252005\\_Wilma.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL252005_Wilma.pdf)
- [4] J. L. Franklin and D. P. Brown, “Tropical Cyclone Report: Hurricane Emily (11–21 July 2005),” 2005. [Online]. Available: [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL052005\\_Emily.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL052005_Emily.pdf)
- [5] J. L. Franklin, “Tropical Cyclone Report: Hurricane Dean (13–23 August 2007),” 2007. [Online]. Available: [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL042007\\_Dean.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL042007_Dean.pdf)
- [6] J. L. Beven II, C. Fritz, and L. Alaka, “Tropical Cyclone Report: Hurricane Beryl (2024),” 2024. [Online]. Available: [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL022024\\_Beryl.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL022024_Beryl.pdf)
- [7] American Society of Civil Engineers, *Prestandard for Performance-Based Wind Design V1.1*. American Society of Civil Engineers.
- [8] D. Yeo, S. Pingree, S. Sisson, E. Heumann, and M. Mashnad, “Database-assisted design: Performance-Based Approach for Dynamically Sensitive Steel Structures,” Jul. 2024. doi: 10.6028/NIST.TN.2293.
- [9] S. Y. Jeong, H. Alinejad, and T. H.-K. Kang, “Performance-Based Wind Design of High-Rise Buildings Using Generated Time-History Wind Loads,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003077.
- [10] D. Scott *et al.*, “Advancement in performance-based wind design,” Nov. 2023. doi: 10.6028/NIST.GCR.23-045-upd1.
- [11] P. A. Irwin, “Wind engineering challenges of the new generation of super-tall buildings,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 97, no. 7–8, pp. 328–334, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.jweia.2009.05.001.
- [12] C. Mendonça and R. Barros, “METHODS TO DESIGN A GUIDED TOWER CONCERNING DYNAMIC BEHAVIOR,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2013)*, Athens: Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research School of Civil Engineering National Technical University of Athens (NTUA) Greece, 2014, pp. 332–344. doi: 10.7712/120113.4527.C1740.

- [13] M. Granados-Flores, G. Martín-Morales, and F. Guerra-Martínez, “La construcción de resiliencia en las ciudades frente al cambio climático: el caso de Mérida, Yucatán.,” *Nuestra Tierra*, 2024.
- [14] American Society of Civil Engineers, “Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers,” 2022.
- [15] E. N. Rappaport and C. J. McAdie, “Tropical Cyclone Report: Hurricane Gilbert (1988),” 1988. [Online]. Available: <https://www.nhc.noaa.gov/pdf/NWS-NHC-1991-45.pdf>
- [16] L. A. Avila, “Tropical Cyclone Report: Hurricane Roxanne (1995),” 1995. [Online]. Available: [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL191995\\_Roxanne.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL191995_Roxanne.pdf)
- [17] J. P. Cangialosi and R. Berg, “Tropical Cyclone Report: Hurricane Delta (2020),” 2020. [Online]. Available: [https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL262020\\_Delta.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL262020_Delta.pdf)
- [18] Comisión Federal de Electricidad, “CFE – Boletín de prensa por Huracán Grace (2021),” 2021. [Online]. Available: <https://www.cfe.gob.mx/cdn/2019/Archivos/Boletines/134HuracanGrace94.pdf>
- [19] P. Chiomante and J. de J. Cortes, “Storm Beryl spares Mexico’s Yucatan beaches, takes aim at Texas.” [Online]. Available: <https://www.reuters.com/world/americas/hurricane-beryl-makes-landfall-mexican-coast-2024-07-05/>
- [20] Z. Wang, P. Martinez-Vazquez, and B. Zhao, “Pushover analysis of structures subjected to combined actions of earthquake and wind,” *Eng. Struct.*, vol. 221, p. 111034, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111034.
- [21] Q.-V. Vu, H.-J. Lee, and J.-M. Kim, “Nonlinear Pushover Analysis of Retrofitted Transmission Towers Under Static Wind Loads,” *Buildings*, vol. 15, no. 5, p. 654, Feb. 2025, doi: 10.3390/buildings15050654.
- [22] K. Calvin *et al.*, “IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.,” Jul. 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- [23] T. Knutson *et al.*, “Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 101, no. 3, pp. E303–E322, Mar. 2020, doi: 10.1175/BAMS-D-18-0194.1.
- [24] & I. S. C. (ISC) United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), “UNDRR–ISC Hazard Information Profiles – 2025 Update: MH0301 Wind United Nations Office for Disaster Risk Reduction; International Science Council.” [Online]. Available: <https://www.undrr.org/terms/hips/MH0301>

- [25] American Meteorological Society, "Wind," Glossary of Meteorology. [Online]. Available: <https://glossary.ametsoc.org/wiki/wind/>
- [26] L. Liu and R. J. A. M. Stevens, "Vertical structure of conventionally neutral atmospheric boundary layers," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 119, no. 22, May 2022, doi: 10.1073/pnas.2119369119.
- [27] R. P. Hoxey and P. J. Richards, "Structure of the atmospheric boundary layer below 25 m and implications to wind loading on low-rise buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 41, no. 1–3, pp. 317–327, Oct. 1992, doi: 10.1016/0167-6105(92)90426-B.
- [28] WMO/OSCAR, "Wind gust – definition." [Online]. Available: [https://space.oscar.wmo.int/variables/view/wind\\_gust](https://space.oscar.wmo.int/variables/view/wind_gust)
- [29] F. Fazelpour, N. Tarashkar, and M. A. Rosen, "Short-term wind speed forecasting using artificial neural networks for Tehran, Iran," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 377–390, Dec. 2016, doi: 10.1007/s40095-016-0220-6.
- [30] M. B. Vallis, A. M. Loredou-Souza, V. Ferreira, and E. de L. Nascimento, "Classification and identification of synoptic and non-synoptic extreme wind events from surface observations in South America," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 193, p. 103963, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jweia.2019.103963.
- [31] S. Zhang, G. Solari, M. Burlando, and Q. Yang, "Directional decomposition and properties of thunderstorm outflows," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 189, pp. 71–90, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jweia.2019.03.014.
- [32] National Hurricane Center, "Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale." [Online]. Available: <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>
- [33] National Hurricane Center (NOAA), "SSHWS Table." [Online]. Available: [https://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws\\_table.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws_table.pdf)
- [34] P. A. Irwin, "Bluff body aerodynamics in wind engineering," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 6–7, pp. 701–712, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.jweia.2007.06.008.
- [35] D.-X. Zhao and B.-J. He, "Effects of architectural shapes on surface wind pressure distribution: Case studies of oval-shaped tall buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 12, pp. 219–228, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.06.009.
- [36] S. P. Hareendran, A. Alipour, B. Shafei, and P. Sarkar, "Characterizing wind-structure interaction for performance-based wind design of tall buildings," *Eng. Struct.*, vol. 289, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115812.
- [37] K. C. S. Kwok, "Cross-wind response of tall buildings," *Eng. Struct.*, vol. 4, no. 4, pp. 256–262, Oct. 1982, doi: 10.1016/0141-0296(82)90031-1.

- [38] V. Picozzi, A. Malasomma, A. M. Avossa, and F. Ricciardelli, "The Relationship between Wind Pressure and Pressure Coefficients for the Definition of Wind Loads on Buildings," *Buildings*, vol. 12, no. 2, p. 225, Feb. 2022, doi: 10.3390/buildings12020225.
- [39] Ayuntamiento de Benito Juárez, "Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción para el Municipio de Benito Juárez, Quintana Roo," 2007.
- [40] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, "PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS," *FEMA 356*, Nov. 2000.
- [41] *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings: ASCE/SEI, 41-17*. American Society of Civil Engineers, 2017.
- [42] S. Arango, A. Paz, and M. del P. Duque, "PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UNA ESTANTERÍA METÁLICA," *Revista EIA*, vol. 12, pp. 139–154, Dec. 2009.
- [43] N. Shome, C. A. Cornell, P. Bazzurro, and J. E. Carballo, "Earthquakes, Records, and Nonlinear Responses," *Earthquake Spectra*, vol. 14, no. 3, pp. 469–500, Aug. 1998, doi: 10.1193/1.1586011.
- [44] P. Fajfar, "A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design," *Earthquake Spectra*, vol. 16, no. 3, pp. 573–592, Aug. 2000, doi: 10.1193/1.1586128.
- [45] A. K. Chopra and R. K. Goel, "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 31, no. 3, pp. 561–582, Mar. 2002, doi: 10.1002/eqe.144.
- [46] Z. Ouyang and S. M. J. Spence, "A Performance-Based Wind Engineering Framework for Envelope Systems of Engineered Buildings Subject to Directional Wind and Rain Hazards," *Journal of Structural Engineering*, vol. 146, no. 5, May 2020, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002568.
- [47] F. A. Johann, M. E. N. Carlos, and F. L. S. Ricardo, "Wind-induced motion on tall buildings: A comfort criteria overview," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 142, pp. 26–42, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.jweia.2015.03.001.
- [48] R. Bashor, S. Bobby, T. Kijewski-Correa, and A. Kareem, "Full-scale performance evaluation of tall buildings under wind," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 104–106, pp. 88–97, May 2012, doi: 10.1016/j.jweia.2012.04.007.
- [49] L. Ierimonti, L. Caracoglia, I. Venanzi, and A. L. Materazzi, "Investigation on life-cycle damage cost of wind-excited tall buildings considering directionality effects," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 171, pp. 207–218, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.09.020.

- [50] E. Bernardini, S. M. J. Spence, D.-K. Kwon, and A. Kareem, "Performance-Based Design of High-Rise Buildings for Occupant Comfort," *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no. 10, Oct. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001223.
- [51] W. Cui and L. Caracoglia, "Performance-Based Wind Engineering of Tall Buildings Examining Life-Cycle Downtime and Multisource Wind Damage," *Journal of Structural Engineering*, vol. 146, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002479.
- [52] M. Huang, "Performance-Based Design Optimization of Wind-Excited Tall Buildings," in *High-Rise Buildings under Multi-Hazard Environment*, Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 157–185. doi: 10.1007/978-981-10-1744-5\_7.
- [53] L. Micheli, A. Alipour, S. Laflamme, and P. Sarkar, "Performance-based design with life-cycle cost assessment for damping systems integrated in wind excited tall buildings," *Eng. Struct.*, vol. 195, pp. 438–451, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.04.009.
- [54] Z. Ouyang and S. M. J. Spence, "Performance-based wind-induced structural and envelope damage assessment of engineered buildings through nonlinear dynamic analysis," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 208, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104452.
- [55] H. Pang, Q. Yang, M. Liu, Y. Hui, and B. Cheng, "The Influence of Wind Direction on the Inelastic Responses of a Base-Isolated Square Section High-Rise Building," *Buildings*, vol. 12, no. 8, p. 1208, Aug. 2022, doi: 10.3390/buildings12081208.
- [56] A. Athanasiou, L. Tirca, and T. Stathopoulos, "Performance-based wind and earthquake design framework for tall steel buildings with ductile detailing," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 240, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jweia.2023.105492.
- [57] H. Alinejad, B. Ahn, and T. H.-K. Kang, "Performance-Based Wind Design of Tall Buildings Considering Corner Modification and Inelastic Behavior," *Journal of Structural Engineering*, vol. 150, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.1061/JSENDH.STENG-13100.
- [58] A. Rahimian, K. Udilovich, I. Shleykov, D. Kelly, and J. Garber, "On performance-based wind design of tall buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 267, p. 106248, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.jweia.2025.106248.
- [59] Inc. Computers and Structures, "ETABS," 2023, 21.
- [60] Comisión Federal de Electricidad, "PRODISIS: PROgrama de Diseño Sísmico," 2015, 4.1.
- [61] Comisión Federal de Electricidad, "MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DISEÑO POR SISMO MEXICO," 2015.

- [62] N. Hede and B. Narayan, "Stochastic analysis for assessment of Sensitivity of pushover curve to design parameters," *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 2014.