



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

ANÁLISIS Y COMPARACIONES DE PRESIONES DE VIENTO DE EDIFICIOS
REGULARES EN ZONA URBANA POR MEDIO DE SIMULACIONES EN CFD

TESIS

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

Presenta:

Ing. Citlali Villalobos García

Dirigió:

Dr. Enrique Rico García

SINODALES

Dr. Enrique Rico García
Presidente

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.

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



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

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

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

Bajo los siguientes términos:



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



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



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

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

Avisos:

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

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

RESUMEN

En este trabajo de investigación se ha explicado la importancia de tomar en cuenta la presencia de estructuras aledañas sobre una zona urbana para el diseño por viento en edificios. Se presenta una comparación entre la metodología presentada en las Normas Técnicas Complementarias 2023 (NTC-2023) y una metodología respecto a un modelo CFD, elaborada con base en lo investigado por medio del estado del arte, en donde se analizó un edificio regular de gran altura ubicado en una zona urbana mediante dos escenarios: el primero, tomando en cuenta la presencia de estructuras aledañas; y el segundo, analizando las acciones del viento en un edificio expuesto a campo abierto. Las comparaciones entre los coeficientes de presión establecidos en la NTC-2023 y los obtenidos en las simulaciones por CFD, emiten una diferencia del 31% al primer escenario y un 4% respecto al segundo, indicando que las normas actuales no toman en cuenta la presencia de otras estructuras u obstrucciones a las que un edificio puede estar expuesto.

(Palabras clave: zona urbana, efectos del viento, coeficientes de presión)

SUMMARY

This research paper highlights the significance of considering the presence of surrounding structures in urban areas for wind design in buildings. A comparison is presented between the methodology presented in the 2023 Complementary Technical Standards (NTC-2023) and a CFD model methodology developed based on state-of-the-art research. A regular high-rise building located in an urban area was analyzed using two scenarios: the first, considering the presence of surrounding structures; and the second, studying the effects of wind on a building exposed to open air. Comparisons between the pressure coefficients established in NTC-2023 and those obtained in CFD simulations show a difference of 31% for the first scenario and 4% for the second, indicating that current standards do not consider the presence of other structures or obstructions to which a building may be exposed.

(Keywords: urban area, wind effects, pressure coefficients)

A mis amados padres, Onely y Guadalupe, por ser mi guía y mi motivación, por el apoyo y amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, a mis padres, Guadalupe y Onely, por siempre brindarme amor, comprensión, enseñanza, dedicación y apoyo incondicional, por creer siempre en mí incluso cuando yo misma dudaba, por motivarme y jamás dejarme caer, sin duda alguna hoy no sería lo que soy sin ustedes.

A mi hermano y también a mi adorada y peluda amiga Lula, por esa complicidad y compañía auténtica e incondicional.

A mis profesores, por compartir un poco de su experiencia y sabiduría. A mis sinodales, Dr. Enrique Rico García, Dr. Luis Francisco Pérez Moreno, Dr. Jaime Moisés Horta Rangel, Dr. Iván Fermín Arjona Catzim, Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, por guiarme con paciencia, por sus valiosas sugerencias, además de enseñarme una visión científica y sobre todo gracias por confiar en mí a pesar de que el camino parecía largo y con varios obstáculos.

Un agradecimiento especial a mis compañeros y amigos de la maestría en ciencias (Estructuras), por los debates, las risas, bromas y sobre todo por ser parte de este logro.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por brindarme el apoyo para lograr realizar este trabajo de investigación.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 JUSTIFICACIÓN	14
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	15
2. ANTECEDENTES.....	17
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	21
3.1 EFECTOS DEL VIENTO	23
3.2 EFECTOS DINÁMICOS DEL VIENTO	24
3.3 TIPOS DE FALLAS PROVOCADAS POR EL VIENTO	26
3.4 EL VIENTO, UN FLUJO	27
3.5 PRINCIPIOS DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES	27
3.6 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES	29
3.7 MÉTODOS DE TURBULENCIA.....	31
3.8 NORMAS VIGENTES.....	32
3.8.1 Metodología de las NTC.....	33
3.8.2 Manual de diseño de obras civiles (MDOC CFE 2020).....	38
3.9 TÚNEL DE VIENTO.....	39
3.10 CONSIDERACIONES DE LA REGULARIDAD DE UN EDIFICIO	39
4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	41
4.1 HIPÓTESIS.....	41
4.2 OBJETIVO GENERAL	41
4.3 OBJETIVOS PARTICULARES.....	41
5. METODOLOGÍA	42
5.1 METODOLOGÍA GENERAL.....	42
5.2 ELABORACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD).....	43
5.2.1 Modelo CFD.....	43
5.2.2 Geometría.....	43
5.2.3 Mallado	47
5.2.4 Modelo y método de solución	51

5.2.5	<i>Posprocesamiento</i>	52
5.3	ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DE PRESIÓN POR ZONA Y ALTURA DE LA ESTRUCTURA	53
5.4	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD) CON LA NORMATIVIDAD VIGENTE	53
5.4.1	<i>Velocidades de viento para diseño</i>	54
5.4.2	<i>Factor correctivo por topografía, F_T</i>	55
5.4.3	<i>Velocidad de viento para diseño, V_D</i>	55
5.4.4	<i>Coefficientes de presión</i>	55
5.5	ELABORACIÓN DE MODELO CFD EXPUESTO A CAMPO ABIERTO.....	57
5.5.1	<i>Geometría</i>	57
5.5.2	<i>Mallado</i>	58
5.5.3	<i>Modelo y método de solución</i>	59
5.5.4	<i>Posprocesamiento</i>	60
5.6	CÁLCULO DE FUERZAS	60
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
7.	CONCLUSIONES	72
8.	REFERENCIAS	74
9.	ANEXOS	79

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Datos recolectados a través del Estado del Arte.....	20
Cuadro 3.1. Escala de Beaufort, modificada (Coordinación Nacional de Protección Civil, 2017).....	22
Cuadro 3.2. Valores de coeficiente de tipo de estructura (SEOPAN, 2018)	33
Cuadro 3.3. Factor correctivo por topografía (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023)	38
Cuadro 5.1. Criterios de evaluación para utilizar las NTC	54
Cuadro 5.2. Coeficientes de presión exterior para edificios y construcciones cerradas.....	56
Cuadro 5.3. Presión exterior,	56
Cuadro 5.4. Presión interior,	56
Cuadro 5.5. Presiones estáticas,	57
Cuadro 5.6. Fuerza en dirección del viento, según la NTC-2023.....	60
Cuadro 5.7. Cálculo de fuerzas de modelo CFD a con edificios aledaños	61
Cuadro 5.8. Cálculo de fuerzas de modelo CFD a campo abierto	62
Cuadro 9.1. Valores de Cpe, sobre las barlovento y sotavento	79
Cuadro 9.2. Valores de Cpe, sobre las caras laterales del edificio	80
Cuadro 9.3. Valores de Cpe, sobre el techo del edificio	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Efectos del viento en zona urbana (Bustamante et al., 2014).....	17
Figura 3.1. Presión positiva directa (Ambrose et al., 1999).	23
Figura 3.2. Presión positiva negativa (Ambrose et al., 1999).....	24
Figura 3.3. Arrastre aerodinámico (Ambrose et al., 1999).....	24
Figura 3.4. Desprendimiento (Ambrose et al., 1999)	25
Figura 3.5. Barlovento y sotavento	26
Figura 3.6. característica de un fluido	27
Figura 3.7. Disciplinas que involucran el CFD modificado (Xamán, 2016)	30
Figura 3.8. Estructura general del CFD, modificado (Xamán, 2016).....	30
Figura 6.1. Metodología general de la investigación.....	42
Figura 6.2. Metodología general del CFD.	43
Figura 6.3. Unidades de medida.....	44
Figura 6.4. Plano x, z en SpaceClaim.....	44
Figura 6.5. Dimensiones del edificio	44
Figura 6.6. Distribución de edificios aledaños.....	45
Figura 6.7. Dimensiones del dominio: H: 155 m (altura del edificio), L:54.9 m (secciones del edificio) (Shenghong et al., 2007), modificado.	46
Figura 6.8. Denominación de las condiciones de frontera.	46
Figura 6.9. Forma <i>polyhedra</i>	47
Figura 6.10. Malla <i>polyhedra</i> final	49

Figura 6.11. Elementos, poly-hexacore.	49
Figura 6.12.Malla <i>Poly-hexacore</i>	51
Figura 6.13. Ubicación de los puntos de interés	53
Figura 6.14. Dimensiones del dominio a campo abierto: H: 155 m (altura del edificio), L:54.9 m (secciones del edificio) (Huang, Li y Xu, 2007), modificado.....	58
Figura 6.15. Denominación de las condiciones de frontera.	58
Figura 7.1. Coeficiente de determinación (R^2) de los resultados CFD en comparación a escala real.....	63
Figura 7.2. Coeficiente de determinación (R^2) de los resultados CFD en comparación con el túnel de viento.....	63
Figura 7.3. Coeficientes de presión sobre barlovento.....	64
Figura 7.4 Comparación de coeficientes de presión sobre Barlovento	65
Figura 7.5. C_{pe} sobre barlovento en un edificio con estructuras aledañas.....	66
Figura 7.6. Comparación de coeficientes de presión.....	67
Figura 7.7. Coeficiente de determinación (R^2) en comparación con la NTC-2023.	67
Figura 7.8. Comparación de coeficientes de presión sobre caras laterales.....	68
Figura 7.9. Mapa de errores de edificio a campo abierto en comparación con la NTC-2023.....	68
Figura 7.10. Coeficiente de determinación (R^2) de los resultados CFD en comparación a NTC-2023.....	70

Figura 7.11. Fuerzas aplicadas sobre la cara barlovento según las presiones obtenidas por CFD: a) Edificios con estructuras aledañas, b) Edificio a campo abierto.....71

1. INTRODUCCIÓN

La importancia del diseño en los edificios repercute en el buen funcionamiento de las estructuras. Es por lo que en la planificación de un proyecto se deben considerar todas las posibles cargas a las que la estructura estará sometida, con el objetivo de salvaguardar a quienes harán uso de las instalaciones.

En la seguridad estructural, la regularidad de un edificio juega un papel importante y depende totalmente de su geometría. Entre los puntos que deben ser tomados en cuenta son: regularidad por torsión, regularidad por geometría, irregularidad por discontinuidad en el diafragma y la irregularidad por elevación (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023).

En México, una de las causas más usuales del fallo en las estructuras, se debe a que no se toman en cuenta las consideraciones de las cargas accidentales. Entre los errores más comunes se encuentran los colapsos o fatigas en edificios ante acciones de viento.

Dentro de los efectos principales que este fenómeno provoca sobre una estructura se encuentran las presiones positivas, que se refieren a empujes, y negativas, también conocidas como succión. Los esfuerzos generados en ocasiones se incrementan debido a la vulnerabilidad del país con la alta demanda de presencia de huracanes, sometiendo a la estructura a fuertes ráfagas, comprometiendo su seguridad, estabilidad y durabilidad.

Por lo anterior, las Normas Técnicas Complementarias (NTC-2023) y el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (MDOC-CFE-2020) establecen una metodología en donde se definen factores y coeficientes que deben ser tomados en cuenta respecto a la zona en la que se encontrará la estructura.

En la actualidad, la urbanización está en incremento con la construcción de edificios cada vez más altos. Por ello es importante considerar los efectos que se generan, debido a que las metodologías existentes establecidas en la NTC-2023

estima que la estructura se encuentra expuesta a campo abierto, sin obstrucciones, dando como resultado siempre considerar presiones positivas sobre la cara del barlovento y presiones negativas sobre el sotavento de la edificación, lo cual no es del todo cierto.

Con los avances tecnológicos, la ingeniería estructural también ha desarrollado estrategias de análisis con la ayuda de software y modelos matemáticos, a través de la discretización espacial de un medio continuo a partir de elementos finitos.

El contenido de este trabajo de investigación es acerca de analizar otras opciones para llevar a cabo el diseño por viento en edificios con el fin de implementar el uso de softwares para desarrollar simulaciones por medio de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) y analizar con mayor facilidad el comportamiento del viento. Además, se lleva a cabo una comparación de los métodos de análisis de viento, establecidos por las normas mexicanas y el análisis por medio de simulaciones CFD.

A continuación, se encuentra la justificación del proyecto de investigación, así como la descripción del problema, el cual establece la importancia del proyecto.

En el capítulo 2, se presentan conceptos y términos relacionados con los efectos del viento, la implementación de la dinámica de fluidos computacionales y la metodología establecida en las normas vigentes para el diseño por viento en las estructuras. Asimismo, se presentan datos importantes obtenidos a través de una investigación basada en el estado del arte.

En el capítulo 3, se establece la teoría de los resultados esperados en este trabajo de investigación, en donde se propone alcanzar un porcentaje mayor al 85% con respecto a las presiones obtenidas por medio de la metodología establecida por la NTC-2023. Se estipulan los objetivos establecidos para realizar este trabajo de investigación: calibración de un modelo CFD, comparación de resultados por caras

y alturas en comparación con los resultados obtenidos por medio de estudios experimentales.

En el capítulo 4, se describe cuáles fueron los pasos a seguir para poder llevar a cabo cada uno de los objetivos establecidos a lo largo de esta investigación.

En el capítulo 5, se presentan cuáles fueron los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, en donde se describe por medio de gráficas la diferencia de los valores obtenidos por medio de simulaciones por CFD y los que establece la norma, además de resaltar la importancia de los edificios aledaños en una zona urbana.

En el capítulo 6, se exponen las razones de la validación de la hipótesis de la investigación, además de proponer sugerencias para futuras investigaciones referentes al CFD en las estructuras.

1.1 Justificación

Debido a que México es afectado por eventos accidentales como huracanes y ciclones, la presencia de las velocidades máximas de viento llega a ser considerablemente perjudicial para las estructuras, provocando afectaciones sobre muros, recubrimientos o, en su peor escenario, daños estructurales.

Según el Servicio Meteorológico Nacional, en el informe anual indica que durante el año 2024 se presentaron 19 ciclones provenientes del Océano Atlántico y 14 provenientes del Océano Pacífico, de los cuales algunos de ellos, han tocado las tierras mexicanas con la categoría de Huracanes tipo 1 y 2 con vientos máximos sostenidos de 155 km/h y rachas de 195 km/h a 750 km/h (Comisión Nacional del Agua, s. f.)

Es por lo anterior que se requiere llevar a cabo un diseño por viento, en el cual se tomen en cuenta los efectos de presión, considerando que sean concisos

respecto a datos reales del comportamiento de las presiones de viento y así mejorar y poder obtener construcciones resistentes a efectos de viento.

A pesar de que las NTC-2023 mencionan que no es factible realizar un análisis de viento por medio de simulaciones de dinámica de fluidos (Secretaria de Obras y Servicios de la CDMX, 2023), los avances en la tecnología han ido en incremento y con ello nuevas técnicas de análisis, por lo que es importante evaluar los resultados del análisis por medio de simulaciones por CFD en la presencia de viento. Es por ello por lo que se espera que el análisis por medio de simulaciones en CFD sea tomado en cuenta para el diseño de viento en edificios.

La metodología de este trabajo de investigación puede ser de utilidad, debido a que establece una serie de pasos a seguir para llevar a cabo el análisis de un edificio regular expuesto a las acciones de viento. Se obtienen los coeficientes de presión y las presiones que se ejercen sobre las caras de la estructura, además de llevar a cabo una combinación de metodologías para lograr un mallado que permitió obtener resultados concisos, siendo este método un apoyo para realizar pruebas de viento por medio de dinámica de fluidos computacionales.

1.2 Descripción del problema

Los reglamentos mexicanos vigentes para el diseño de viento, NTC-2023 y MDOC-CFE-2020, establecen que los coeficientes de presión son valores uniformes sobre la estructura, lo que provoca errores de precisión al obtener la presión para el análisis del diseño de viento en edificios. Estudios de mediciones de las presiones del viento sobre estructuras en escala real y de túnel de viento han demostrado que la distribución de las presiones sobre las estructuras dista mucho de patrones bien definidos (Kikuchi et al., 2024).

En la actualidad, las normativas vigentes establecen que las estructuras se encuentran en impacto directo ante las acciones de viento, sin incluir obstrucciones

y/o perturbaciones, lo cual genera una mala distribución de las presiones sobre la cara del edificio.

Es importante recalcar que los resultados obtenidos por medio de las simulaciones CFD también dependen de la geometría del objeto en estudio, así como de la definición, forma y tamaño del mallado.

Las pruebas experimentales como túneles de viento suelen ser el método más empleado para este tipo de estudios. Sin embargo, presenta algunas dificultades como que los instrumentos utilizados deben ser correctamente calibrados, los modelos deben ser realizados a escala, y no se puede realizar un escalamiento exacto del número de Reynolds debido a las características y propiedades del flujo(Zhao et al., 2022).

Con el uso de CFD en análisis de viento como una herramienta alternativa o complementaria para este tipo de estudio, se pueden realizar modelos a escala real y obtener valores con las características del flujo sin la necesidad de emplear una similitud para escalarlos. Además, es posible realizar múltiples configuraciones en poco tiempo y con un bajo costo en comparación con la experimentación real o túnel de viento.

2. ANTECEDENTES

El estudio del viento en la ingeniería se ha basado en el análisis del confort y los beneficios que causa el viento para las condiciones climáticas en las que se encuentra un edificio, desde un enfoque ambiental y térmico. Sin embargo, pocos estudios tratan sobre cuáles son las consecuencias desfavorables del viento, ante velocidades grandes. Es importante tomar en cuenta la zona, la altura y la forma del edificio; además, se debe considerar el crecimiento de la urbanización en las construcciones futuras. A pesar de que la cantidad de construcciones aledañas aumenta la rugosidad del viento, y esto disminuye su velocidad, para el análisis se deben tomar en cuenta los efectos de la turbulencia (Coca-Obdulio, 2008).

Bustamante et al. (2014) estudiaron el comportamiento del viento en un edificio; sin embargo, no lo hicieron desde el punto de vista estructural sino desde el arquitectónico, en donde recalcaron el mejoramiento del confort térmico en la estructura con la presencia del viento. Señalan que el análisis desde el punto de vista estructural posee complejidad debido a que las acciones de viento en las zonas urbanas distorsionan el flujo laminar, provocando turbulencias y efectos de vorticidad (Figura 2.1).

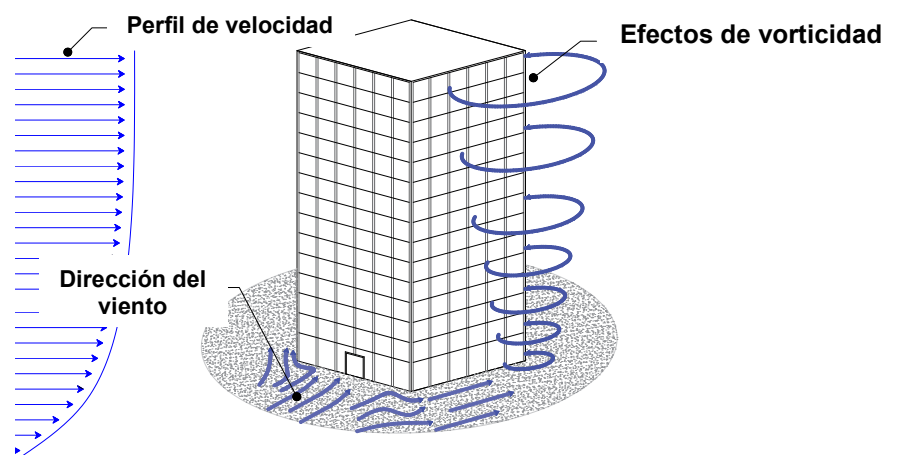


Figura 2.1. Efectos del viento en zona urbana (Bustamante et al., 2014).

Núñez et al. (2022) realizaron un estudio en donde se compararon las metodologías que establecen la norma americana ASCE 7-10 y el Eurocódigo EN1991-1-4, en el cual analizaron las cubiertas dependiendo de la zonificación de la estructura; otra de las variables era el ángulo de inclinación. Los resultados obtenidos en las comparaciones fueron desfavorables para la norma americana, debido a que la diferencia en comparación con los estudios experimentales era grande. Por otro lado, los resultados del Eurocódigo fueron más cercanos que los de la norma americana; sin embargo, en comparación con los estudios experimentales, también resultó ser desfavorable, lo cual deja deficiencias de análisis para el diseño de viento.

Lee (2017) realizó un estudio en el que se analizó el impacto de la turbulencia del viento, por efecto de los edificios colindantes, en una zona urbana en el cual, donde se evaluó el efecto que causa el viento, a través de simulaciones por CFD (Dinámica de fluidos computacionales) en ANSYS FLUENT, y debido a los resultados arrojados por medio de las simulaciones se llegó a la conclusión de que en la zona urbana reduce el impacto directo del viento. Sin embargo, para el estudio se consideraron edificios aledaños de baja altura en forma de cubos y calles perfectamente alineadas, lo cual resulta ser un error, debido a que en las zonas urbanas las calles no siempre son en forma perfectamente rectangular y conectan todas las calles entre sí.

Baghaei et al. (2019) desarrollaron un estudio en el cual se analiza el comportamiento de algunos edificios que varían respecto a su forma, y se evalúa el efecto de arrastre aerodinámico que se emite en las zonas urbanas y la velocidad del viento dividida por niveles. Las condiciones en las que se evaluaron las 7 simulaciones fueron similares, además de que se introdujo un coeficiente de arrastre dependiendo de la forma del edificio. Las simulaciones se realizaron por medio de CFD, en donde los resultados que se obtuvieron dependen de la forma de los edificios. En estudios previamente realizados se compararon las simulaciones por medio de Flow design y ANSYS FLUENT, y solo generaba un 6% de error en

comparación con pruebas experimentales, lo cual le da una oportunidad al CFD para la verificación de los métodos tradicionales para el diseño de edificios por viento.

Montazeri y Blocken (2013) afirman que el uso del CFD para el análisis del viento ha ido incrementando, aún con dificultad para reproducir el flujo de separación y recirculación. Se analizó el comportamiento del viento en presiones estáticas, modelos de turbulencia y la dirección del viento, y en comparación con los resultados de los estudios experimentales se presentan resultados semejantes.

Idrissi et al. (2025) realizaron un estudio en el que determinaron la precisión del CFD sobre una zona urbana ante un edificio de gran altura, en donde se recalcó la importancia de un buen mallado y la calibración del modelo para resultados precisos. Además, se evaluaron 3 modelos de turbulencia en los que se encontraban: RNG k- ϵ , SST- ω y SRANS/URANS, todos en su método de solución simple usando un perfil de viento tipo exponencial. El resultado de ese estudio concluyó que el modelo RNG k- ϵ brindó valores parecidos respecto a los obtenidos por medio de túnel de viento en cuanto a la velocidad del flujo.

Cheng et al. (2025) generaron un estudio en donde se analizaron las cargas del viento sobre edificios regulares de gran altura expuestos a campo abierto mediante CFD por medio del programa Open FOAM. En este se valida la precisión del CFD para la obtención de C_{pe} (Coeficientes de presión) para edificios regulares de gran altura con un error menor al 20% en comparación con estudios realizados por medio de túnel de viento; sin embargo, sugiere continuar con la investigación acerca del uso de CFD y la comparación de los modelos de turbulencia.

El uso del CFD en la ingeniería ha ido avanzando, debido a la necesidad de analizar el comportamiento aerodinámico de los edificios. Se han realizado estudios experimentales de túnel de viento, con edificios presentándose en diferentes formas, en donde los resultados han aportado datos que sin lugar a duda

han servido para el estudio del comportamiento ante acciones de viento en los edificios.

Es importante recalcar que los resultados obtenidos por medio de las simulaciones CFD también dependen de la geometría del objeto en estudio, así como de la definición, forma y tamaño del mallado. En el **Cuadro 2.1**, se muestran algunos de los estudios analizados por medio de CFD, en los cuales se toman en cuenta diferentes formas, tamaños y condiciones, tanto ambientales como topográficas de la zona. Cabe recalcar que la mayoría de los estudios hacen la comparación con respecto a estudios realizados por medio de túneles de viento, pero no sobre muestras extraídas a escala real.

Cuadro 2.1. Datos recolectados a través del Estado del Arte

Comentario	Ref.
Los balcones reducen notablemente el impacto del viento sobre las caras de los edificios.	(Haan F. L. et al., 2024)
Los resultados difieren por factores como adecuaciones en la escala en la zona y en las propiedades del flujo.	(Kikuchi et al., 2024)
Considera energía cinética y turbulencia; error < 5% en condiciones lisas.	(Ishida, Y. et al., 2024)
Se simularon remolinos; destaca la importancia de considerar edificios adyacentes.	(Richmond-Navarro G. et al., 2022)
Destaca la importancia de considerar los perfiles de velocidad del viento, la intensidad de la turbulencia, debido a la influencia de la presión media y la desviación estándar.	(Wijesooriya et al., 2023)
Afirma la importancia de definir un perfil de viento, indica una metodología para la evaluación de edificios de gran altura con forma regular; sin embargo, no recalca que deberían analizarse edificios con formas más irregulares.	(Mou et al., 2017)

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El diseño estructural es la base para garantizar la seguridad, estabilidad y durabilidad de una estructura; para ello es importante conocer los conceptos básicos en un diseño. Se define al diseño como un proceso creativo mediante el cual se definen las características de un sistema para que cumpla en forma óptima con sus objetivos (Meli Piralla, 2001). Entonces se puede decir que el diseño estructural es un proceso cuyo objetivo es formular modelos de construcción adecuados.

Para conseguir que el prototipo sea adecuado y práctico, es necesario llevar a cabo una metodología para desarrollar el modelo por medio de una memoria de cálculo en la que se toman en cuenta diversas consideraciones como: la revisión de las normas y reglamentos vigentes respecto a la zona, condiciones geológicas y climáticas de la región, análisis y criterios de diseño que garantice la funcionalidad, ductilidad, seguridad, confort, y durabilidad de la estructura, análisis estructural, en la cual se consideran todas las cargas que trabajan sobre una estructura (Meli Piralla, 2001). Dentro de ella, se toman en cuenta las cargas permanentes que se refieren a los pesos que soportan por sí solas las estructuras, las cargas vivas que se refieren a los pesos variables sobre la estructura, por último, pero no menos importante, las cargas accidentales.

Se define como acciones accidentales a aquellas cuya posibilidad de actuación durante un período de referencia establecido es pequeña, pero cuya importancia puede ser considerable en ciertas estructuras (Ruiz y Blanco, 2014). Dentro de las cargas accidentales se pueden encontrar acciones de sismos, el impacto de presiones de viento en la estructura, etc.

El viento se define como el movimiento del aire ocasionado por las diferencias de presión atmosférica entre dos puntos, así como por la rotación de la Tierra (Cavallo et al., 1993). De una manera más empírica, se puede decir que el viento es generalmente el desplazamiento horizontal del aire, que se expande hacia diversas direcciones, generando diferentes presiones y velocidades, las cuales se catalogan como las condiciones del viento. Para determinar en qué categoría se

encuentra el viento, se presenta la Escala de Beaufort (**Cuadro 3.1**), en donde se observa la clasificación de las condiciones del viento en una escala de 0 - 12, respecto a las velocidades que se presentan.

Cuadro 3.1. Escala de Beaufort, modificada (Coordinación Nacional de Protección Civil, 2017).

Escala	Velocidad del viento (Nodos)	velocidad del viento en (km/hr)	Efectos del viento en tierra	Concepto/ valoración
0	<1	1	Hay calma, el humo asciende verticalmente.	Tranquilo
1	1-3	1-5	El humo indica la dirección del viento.	Suave
2	4-6	6-11	Se mueven las hojas de los árboles.	Suave
3	7-10	12-19	Las copas de los árboles se agitan y banderas ondean.	Moderado
4	11-16	20-28	Además de que las copas de los árboles se agitan, el polvo y los papeles se levantan.	Moderado
5	17-21	29-38	Se observan pequeños movimientos en los árboles y la superficie de los lagos se ondula.	Vivo
6	22-27	39-49	Las ramas de los árboles se mueven y resulta difícil mantener abierto un paraguas.	Fuerte
7	28-33	50-61	Los árboles grandes se mueven y es difícil caminar contra el viento.	Fuerte
8	34-40	62-74	Las copas de los árboles se quiebran, además de que la circulación de las personas se dificulta.	Muy fuerte
9	41-47	75-88	Se observan daños en los árboles y es imposible caminar contra el viento.	Muy fuerte
10	48-55	89-102	Los árboles son arrancados y las estructuras de las construcciones sufren daños.	Masivo

Cuadro 3.1. Continuación...

Escala	Velocidad del viento (Nodos)	velocidad del viento en (km/hr)	Efectos del viento en tierra	Concepto/ valoración
11	56-63	103-117	Ocurren daños severos en las construcciones, tejados y árboles	Masivo
12	>64	>118	Hay destrucción total.	Huracanes

Para analizar los efectos del viento sobre una estructura, es necesario conocer y tomar en cuenta las condiciones eólicas del lugar donde se encontrará la estructura, así como situaciones desfavorables donde se presentan velocidades del viento en su etapa máxima, como lo son los tornados y los huracanes.

3.1 Efectos del viento

Presión directa positiva: Se presenta en sentido opuesto a la dirección del viento, resistiendo y contrarrestando las presiones de viento sobre el impacto directo con el objeto o estructura (Figura 3.1).

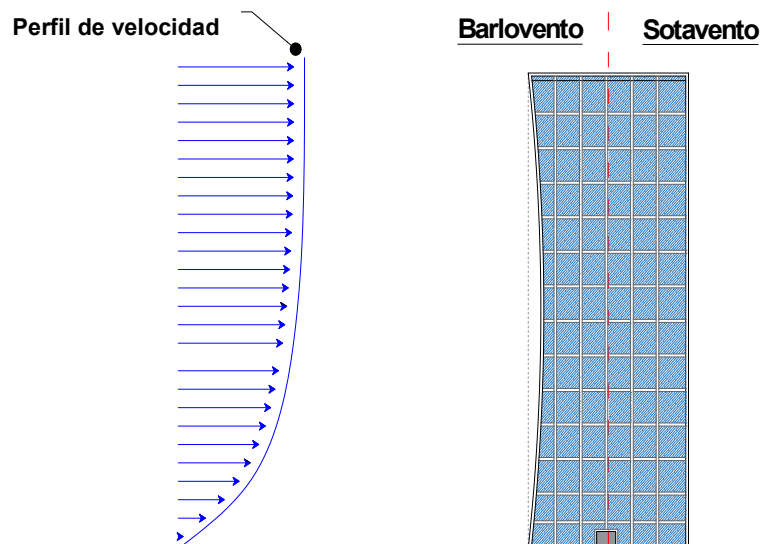


Figura 3.1. Presión positiva directa (Ambrose et al., 1999).

Presión Negativa: Se presenta en el lado opuesto a la dirección del viento, generando un efecto de succión o compresión en la superficie de contacto del objeto o estructura, a ese efecto se le conoce como succión (Figura 3.2).

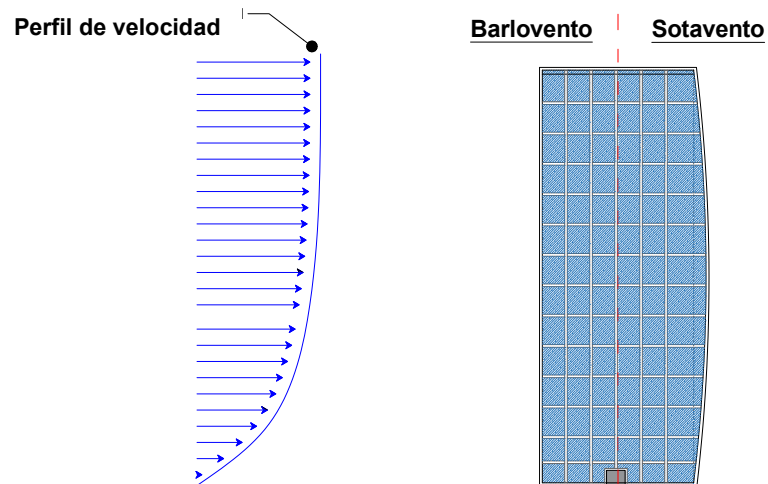


Figura 3.2. Presión positiva negativa (Ambrose et al., 1999).

3.2 Efectos dinámicos del viento

Arrastre aerodinámico: se le llama así al efecto que provoca el viento sobre un objeto que está sujeto a las presiones del viento. Esto sucede debido a que el viento fluye alrededor del objeto (Figura 3.3).

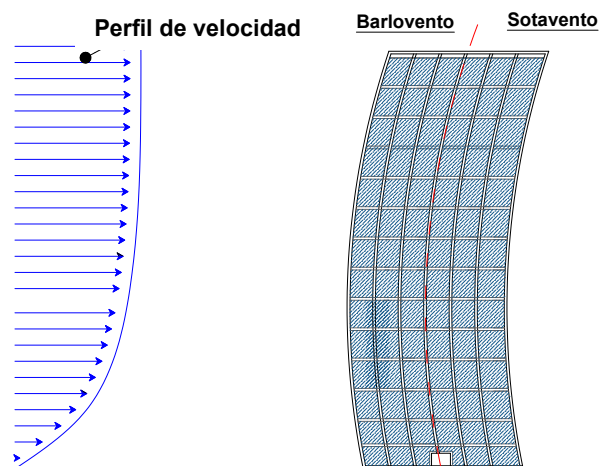


Figura 3.3. Arrastre aerodinámico (Ambrose et al., 1999)

Efectos de desprendimiento: Por lo general, se presentan en las coberturas o en objetos que no están bien anclados sobre una superficie fija o en el suelo. Este efecto se refiere a la separación de una de las partes del objeto, como se muestra en la Figura 3.4.

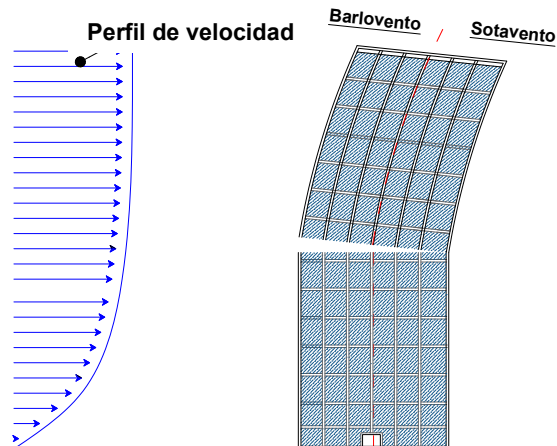


Figura 3.4. Desprendimiento (Ambrose et al., 1999)

Efectos armónicos y oscilantes: Se refiere al efecto de vibración que se produce por la sincronización de los efectos por presión de viento y el estado natural de vibración del objeto. El oscilante se relaciona con los desplazamientos laterales con un periodo de tiempo, similar a la que se produce con los sismos, pero en este caso es causado por las presiones del viento.

El flujo del viento varía su velocidad respecto a la forma en la que este se desplaza. Para definir los efectos del viento en una estructura, es necesario definir los puntos de referencia a partir de los cuales se analiza una estructura.

Barlovento: Es del lugar donde viene el viento y se impacta con el objeto de estudio.

Sotavento: Es el sentido opuesto al barlovento, es decir, este se encuentra en sentido opuesto a la dirección del viento.

En la Figura 3.5, se muestra una representación de las zonas de la estructura.

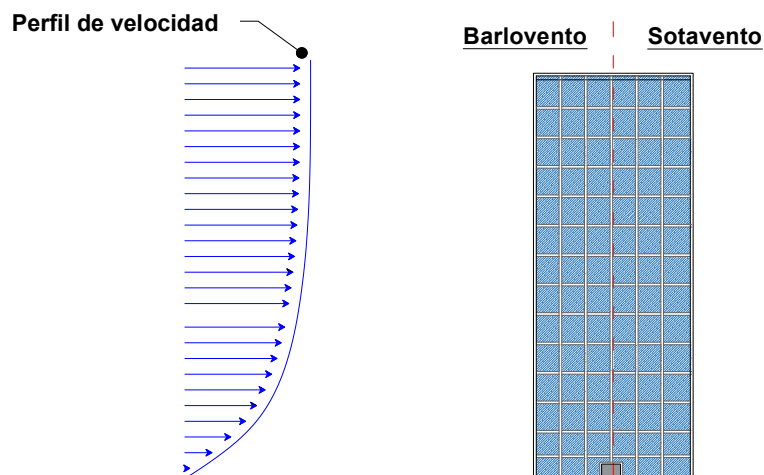


Figura 3.5. Barlovento y sotavento

Así también, en las zonas laterales que son paralelas a la dirección del viento se generan flujos turbulentos.

3.3 Tipos de fallas provocadas por el viento

Son consecuencias asociadas a los efectos del viento ante algún objeto y, en este caso, a la estructura, en general, las fallas totales, se interpretan como la pérdida total de la estructura, en donde comúnmente sucede por presentar fragilidad ante acciones como es el caso de los efectos del viento.

Las fallas locales se interpretan como la falla en alguna o algunas zonas específicamente, en las cuales se debe llevar a cabo un dictamen que determine si es factible o no la rehabilitación del elemento o no (Ambrose et al., 1999).

Las fallas por acciones de viento se pueden provocar por diferentes factores como que los elementos sean frágiles para resistir las velocidades del viento, volteo o desprendimiento en donde la estructura pudiera ser arrancada desde la cimentación por no estar lo suficientemente anclada al suelo, etc. (Ambrose et al., 1999).

3.4 El viento, un flujo

El viento es un flujo es el movimiento de un fluido, señalando que las características de un fluido son las siguientes:

Se moldea dependiendo de la forma del lugar o recipiente, se expande y genera presiones sobre la superficie, tal como se muestra en la Figura 3.6.

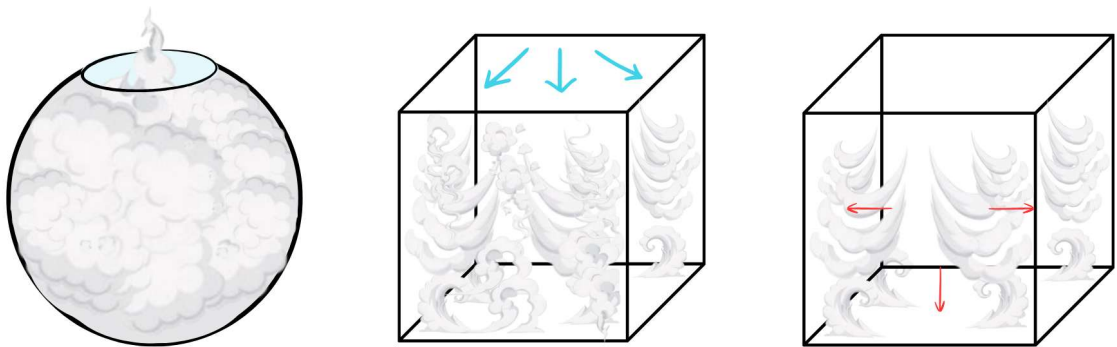


Figura 3.6. característica de un fluido

Para llevar a cabo el estudio del comportamiento de un fluido dinámico, se hace a través de modelos matemáticos con formación euleriana como lo son las ecuaciones de la conservación, en las se encuentran: la conservación de la masa, la conservación del momentum y la conservación de la energía esto con el fin de suponer que se trata de un medio continuo y poder aplicar las leyes de la conservación (Xamán, 2016).

3.5 Principios de la dinámica de fluidos computacionales

Ecuación de la conservación local de la masa (Gurtin, 1986).

$$\dot{\rho} + \rho \operatorname{div} \underline{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho' + \operatorname{div}(\rho \underline{v}) = 0 \quad (2)$$

Ecuación de la conservación de la momentum (Gurtin, 1986).

- Momentum lineal

$$\ell(P, t) = \int_{Pt} (v) \rho dv \quad (3)$$

- Momentum angular

$$a(P, t) = \int_{Pt} (\underline{r} \times v) \rho dv \quad (4)$$

Ecuación de la conservación de la energía (Gurtin, 1986).

En una fuerza $b = 0$, se supone que

$$Sn \cdot \dot{x} = 0 \quad \text{en } \partial B \quad (5)$$

$$\int_B \left(\sigma + \rho_0 \frac{\dot{x}^2}{2} \right) dV = \text{constante} \quad (6)$$

Ecuaciones de Navier-Stokes (Gurtin, 1986).

Se desarrollan a través del método de volumen finito, en donde gradiente de \underline{v} se asocia a la turbulencia del fluido:

$$- \text{grad } \pi_0 + v \Delta \underline{v} + \underline{b}_0 = v' + (\text{grad } \underline{v}) \underline{v} \quad (7)$$

$$\text{div } \underline{v} = 0 \quad (8)$$

El análisis de fluidos se realiza por medio de fórmulas y ecuaciones que, debido a su complejidad de realizar el modelo analítico del comportamiento de un fluido, ha llevado a la necesidad de encontrar otro tipo de soluciones para analizar el comportamiento de un fluido, como lo son los análisis experimentales y las simulaciones por medio de CFD (Xamán, 2016).

3.6 Dinámica de fluidos computacionales

La dinámica de fluidos computacionales es una rama de la mecánica de fluidos, que analiza y resuelve problemas sobre el comportamiento de los fluidos por medio de simulaciones realizadas en computadoras (Versteeg & Malalasekera, 2007). El CFD consiste en discretizar un medio continuo compuesto por una cantidad de puntos infinitos y transformarlo a un medio finito con puntos conocidos que facilitan la solución de ecuaciones que permiten el análisis del fluido (Fernández, 2012).

Los elementos finitos facilitan la solución, debido a la cantidad de soluciones numéricas que presenta; su rol en el CFD es discretizar un medio continuo a elementos geométricos unidos entre sí por medio de nodos, para formar así a lo que se conoce como malla (White, 2010).

La fundamentación del CFD se basa en la evaluación de métodos matemáticos en modelos discretos a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes. Dentro de los modelos matemáticos se encuentran: el método de volumen finito, diferencias y elementos finitos. Estos métodos funcionan a través del análisis de ecuaciones parciales, realizando un mallado del cual se obtienen nodos para realizar el análisis del modelo (Xamán, 2016).

Una de las ventajas del estudio por CFD es que, debido a los avances tecnológicos, se ha logrado el análisis por medio de simulaciones de flujos, los cuales en estudios experimentales como los túneles de viento resultan ser caros, lo cual resulta ser poco factible (Khalil y Lakkis, 2023).

La dinámica de fluidos computacionales engloba una gran variedad de las ramas de la ingeniería; dentro de ella se encuentra la ingeniería estructural, debido a que por medio del análisis de CFD se puede llevar a cabo un pronóstico del comportamiento del viento en las estructuras (Xamán, 2016).

El análisis por CFD resulta ser una metodología compleja debido a que relaciona varias disciplinas de las cuales se debe tener conocimiento previo, antes

de poder llevar a cabo un modelo. En la Figura 3.7 se muestra cuáles son las disciplinas relacionadas.

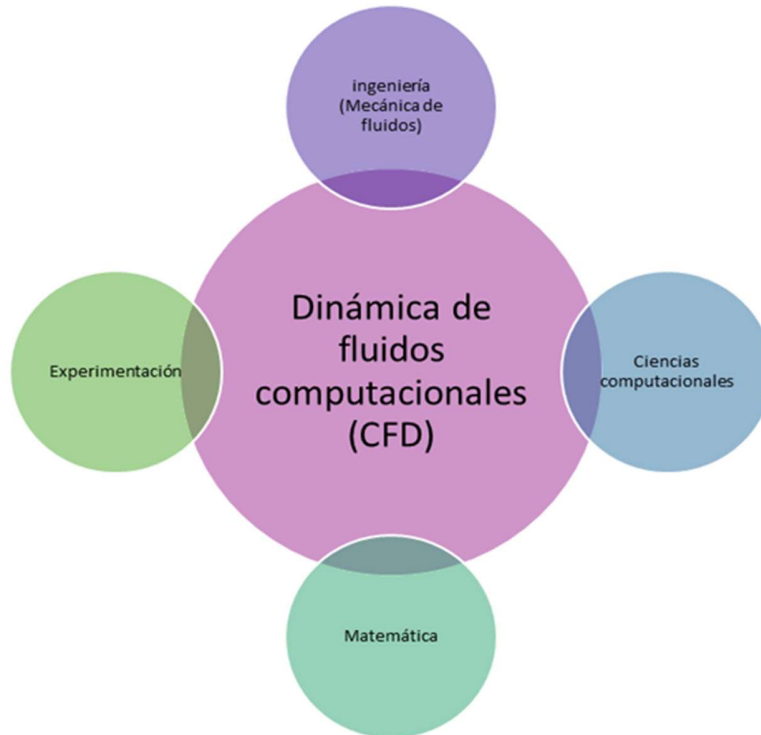


Figura 3.7. Disciplinas que involucran el CFD modificado (Xamán, 2016)

La estructura general en la que se basa el CFD en tres fases, en la Figura 3.8 se muestra cuál es el procedimiento general que rige el CFD.



Figura 3.8. Estructura general del CFD, modificado (Xamán, 2016)

Para la solución de los problemas que se plantean en los análisis, existen diferentes softwares en los cuales se pueda llevar a cabo el modelo por CFD, dentro de ellos se encuentran:

ANSYS: Software de simulación que permite el análisis del elemento.

OPENFOAM: Software de simulación que resuelve problemas de calor y el comportamiento de otros fluidos.

FLOW-3D: Software de simulación que analiza el comportamiento de los fluidos a partir de un análisis en 3D.

COMSOL: Software de simulación que realiza la solución de problemas por medio del método de elementos finitos.

El CFD tiene la ventaja de basar sus estudios en escala real, lo que permite a las simulaciones un mayor grado de precisión. Además, es utilizado para el análisis de las presiones del viento sobre el recubrimiento de los edificios, donde el análisis arroja resultados dependiendo de la forma que se le dé al objeto de estudio, la mayoría de los estudios realizados se basan en caras de superficie lisa, lo que permite analizar las presiones de viento con el impacto directo al recubrimiento, sin embargo, los estudios mencionan que es importante analizar cómo se comportan los edificios con obstáculos en sus fachadas (Montazeri & Blocken, 2013) .

3.7 Métodos de turbulencia

En el análisis por medio de CFD se necesitan utilizar métodos de análisis del fluido dentro de los cuales se encuentran los métodos de turbulencia, la elección de ellos depende exclusivamente en la precisión que se requiere para el estudio, además de la capacidad del equipo de cómputo con el que se cuente:

Modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*): modelan todos los rangos de turbulencia a través de flujos promediados; una de sus principales características es que requieren bajo costo computacional. Las ecuaciones de este modelo se utilizan para el análisis de flujo que depende del tiempo (*ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 6.1.3 Choosing the Appropriate Mesh Type*, 2021).

LES: Estas, a diferencia de las RANS, modelan el transporte del flujo a través de la solución de Navier-Stokes filtrada, simplificando los remolinos más pequeños que el tamaño del filtro definido; su uso es para flujos industriales en donde se encuentran flujos con extrema turbulencia.

RNG-k- ϵ , e utiliza para flujos turbulentos giratorios, sin embargo requiere más costo computacional (Idrissi et al., 2025)

K- ϵ -Standard, se utiliza para analizar los flujos turbulentos y los efectos de viscosidad molecular son despreciables (*ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 6.1.3 Choosing the Appropriate Mesh Type*, 2021).

K- ω -SST, se utiliza para obtener las presiones que se ejercen sobre la pared, aunque requiere de una malla fina en la zona de interés (Idrissi et al., 2025).

3.8 Normas vigentes

El diseño por viento de estructuras en México está regido por las Normas Técnicas Complementarias para el diseño por viento en su versión 2023, en la cual se establece una metodología para llevar a cabo el diseño cumpliendo con las restricciones. El diseño por viento también puede ser diseñado por medio del Manual de obras civiles de la CFE 2020, en el que, al igual que en las NTC-2023, se explica una serie de pasos y restricciones a cumplir para aplicar la metodología. A continuación, se explica en qué consiste cada una de ellas.

3.8.1 Metodología de las NTC

La NTC-2023, para llevar a cabo un diseño de viento en estructuras, existe dos tipos de análisis, el experimental y el teórico. Menciona que para que una estructura pueda ser diseñada con forme al procedimiento que marca la norma, debe cumplir con las siguientes restricciones:

- La estructura debe medir menos de 200 metros de altura
- Los claros de la estructura no deben ser mayores a 100 metros
- Los periodos fundamentales no deben exceder de 5 segundos

El periodo fundamental se refiere al tiempo de vibración que genera una estructura. Cabe mencionar que para obtener el periodo fundamental de una estructura se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$T = C \cdot H^{3/4} \quad (9)$$

Donde:

T: Periodo fundamental

H: Altura

C: Coeficiente que depende del tipo de estructura (Cuadro 3.2)

Cuadro 3.2. Valores de coeficiente de tipo de estructura (SEOPAN, 2018)

Tipo de estructura	C
Edificio con pórticos espaciales de acero resistentes a flexión	0.085
Edificio con pórticos espaciales de hormigón resistentes a flexión	0.075
Otras estructuras	0.050

Si la estructura tiene muros de pantalla a corte el valor de C se determina por medio de (European Committee for Standardization (CEN), 2005):

$$C = \frac{0.075}{Ac^{0.5}} \quad (10)$$

Donde A_c se refiere al área efectiva combinada en m^2 de los muros de pantalla obtenida de la siguiente ecuación (European Committee for Standardization (CEN), 2005):

$$A_c = \sum [A_i \cdot (0.20 + \left(\frac{l_{wi}}{H}\right)^2)] \quad (11)$$

l_{wi} : Longitud del muro de pantalla sometida a esfuerzo cortante, en dirección paralela a las fuerzas aplicadas. Además, que debe cumplir con la siguiente restricción (European Committee for Standardization (CEN), 2005):

$$\frac{l_{wi}}{H} < 0.90 \quad (12)$$

Si la estructura no cumple con alguna de las 3 restricciones que establece la NTC, entonces la estructura debe ser analizada por medio de estudios experimentales como “túnel de viento”. Las NTC-2023 también establecen que para realizar el diseño por viento se debe definir la importancia y el tipo de estructura, y a partir de ello tomar el criterio por el cual se llevará a cabo el diseño.

3.8.1.1 Clasificación de la importancia de la estructura. Para el diseño por viento se considera que la clasificación de la importancia de la estructura se clasifica en grupos A y B, en donde también están incluidas las estructuras temporales. Los periodos de retorno que se relacionan con la velocidad para estructuras de los Grupos A, B y temporales serán 200, 50 y 10 años, respectivamente (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023).

Clasificación de tipo de estructura:

Tipo 1: Estructuras que son afectadas ante acciones estáticas de viento, en donde los efectos dinámicos de las acciones de viento son despreciados por el efecto mínimo que causa en la estructura. Las construcciones cerradas, en donde

la construcción sea capaz de resistir las acciones de viento, sin alterar nada de la estructura.

Tipo 2: Se refiere a estructuras esbeltas, o a estructuras sensibles a efectos dinámicos, las cuales son sensibles a las ráfagas de corta duración; la esbeltez de la estructura está definida como la altura y la dimensión menor de la planta y esta relación debe ser mayor que 5.

Tipo 3: Son estructuras con las características de las construcciones tipo 2, pero la forma transversa influye en la creación de remolinos que causan efectos aerodinámicos en la estructura.

Tipo 4: Son estructuras sumamente sensibles a efectos aerodinámicos.

Los efectos que se toman en cuenta para el diseño de estructuras sometidas a las acciones de viento son:

- Empujes y succiones
- Fuerzas dinámicas paralelas al flujo principal
- Vibraciones transversales al flujo e inestabilidad aeroelástica.

Cabe mencionar que para las estructuras tipo 1, solo se toman en cuenta los efectos estáticos que se ejercen sobre la construcción. En el caso de las estructuras tipo 2, se deben tomar en cuenta también los efectos dinámicos producidos por la turbulencia. En el caso de las estructuras tipo 3, para el diseño se deben tomar en cuenta las consideraciones de los criterios para el diseño de estructuras tipo 2 e incluir la revisión de la capacidad de resistir los efectos dinámicos de los vórtices alternantes (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023).

Estudios experimentales

Dentro de los estudios experimentales se encuentra los estudios de túnel de viento, la cual debe cumplir con los requisitos NMX-C-567-2-ONNCCE-2020, donde se realizan modelos de las estructuras a analizar, para poder reproducir el perfil de la velocidad promedio del viento, en la prueba se obtienen los efectos tanto

estáticos como dinámicos del viento (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023).

Velocidades de viento para diseño (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023).

- **Velocidad de diseño del viento para presiones estáticas, V_D**

Se refiere a la velocidad de la presión del viento cuando no está en movimiento, se calcula a partir de:

$$V_D = F_T F_{r_z} V_R \quad (13)$$

donde:

V_D : Velocidad de las presiones estáticas

F_T : Factor correctivo por topografía local del sitio de desplante, adimensional

F_{r_z} : Factor de exposición local, adimensional

V_R : Velocidad regional de ráfaga que corresponde al sitio de interés, m/s

- **Velocidad Regional, V_R**

Se refiere a la máxima velocidad alcanzada a una altura de 10 metros a partir del nivel de donde se encuentra desplantada la construcción.

- **Factor de exposición local, F_{r_z}**

La velocidad depende la altura, en función de la rugosidad en la que se encuentra el terreno en el que se encuentran el lugar de construcción, y se calcula:

$$F_{r_z} = c \text{ si } z < 10 \text{ m} \quad (14)$$

$$F_{r_z} = c \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \text{ sí } 10 \text{ m} < z < \delta \quad (15)$$

$$F_{r_z} = c \left(\frac{\delta}{10} \right)^\alpha \text{ sí } z > \delta \quad (16)$$

Donde:

C : Coeficiente de escala de rugosidad

z : altura de un punto desde el terreno

δ : altura gradiente

α : exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura para un intervalo de ráfaga de 3 segundos, adimensional.

Para los parámetros c , z , δ , se obtienen del cuadro 3.3

Cuadro 3.3 Valores de c , α y δ (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023)

	Tipos de rugosidad del terreno	c	α	δ (m)
R1	Escasas o nulas a obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto. Las obstrucciones existentes, tienen alturas menores que 1.5 m La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 200 m o 20 veces la altura de la construcción por diseñar, lo que sea mayor.	1.142	0.061	280
R2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones. Las obstrucciones existentes, tienen alturas de 1.5 a 5 m, la longitud mínima debe ser la mayor entre 1500 m o 20 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.	1.000	0.095	350
R3	Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del tipo R4. Las obstrucciones existentes presentan alturas de 3 a 10 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe de ser de 500 m o 20 veces la altura de la construcción, la que sea mayor.	0.832	0.140	410
R4	Zona de densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y 20 veces la altura de la construcción, la que sea mayor.	0.668	0.192	470

Nota: En un caso especial de que se encuentre rugosidad en una longitud menor de 500 m, se debe considerar el efecto más desfavorable del cuadro 3.3.

- **Factor correctivo por topografía, F_T**

Se refiere al factor que toma en cuenta las características topográficas del terreno en el que se encuentra la construcción; los valores son tomados del cuadro 4.

Cuadro 4. Factor correctivo por topografía (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023)

Tipos de topografía		F_T
T1	Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.8
T2	Valles cerrados	0.9
T3	Terreno prácticamente plano, campo abierto ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menos que 5% (normal)	1.0
T4	Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %	1.1
T5	a) cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes entre 10 y 15 %, cañadas o valles cerrados	1.2
	b) cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores que 15 %, cañadas o valles cerrados.	1.5

3.8.2 *Manual de diseño de obras civiles (MDOC CFE 2020).*

Para el diseño de estructuras con respecto a las acciones de viento, el manual de diseño de obras civiles de la comisión federal de electricidad en su versión 2020, indica los mismos parámetros que de la NTC-2023 en las cuales enlista cuales son las estructuras aptas para la metodología sugerida en el manual, además de la metodología es similar a la que se utiliza en la NTC-2023, la variabilidad en ambas metodología muy son pocas, sin embargo también es importante revisar la diferencia de diseño en los resultados que se obtienen por medio del manual (Comisión Nacional de Electricidad, 2020).

3.9 Túnel de viento

Es una estructura que sirve como una herramienta, en la cual se genera aire artificial para analizar las presiones y efectos del viento que se ejercen sobre algún objeto, sobre la representación de un modelo a escala (Batista, 2016).

Los túneles de viento se clasifican según la forma en la que el fluido actúa, además del tipo de uso al que estará sometido, la velocidad que emite y el diseño del circuito, dentro de ellos destacan (Britcher y Landman, 2024):

- Túnel por inyección
- Túnel por aspiración
- Túnel en circuito cerrado

Aunque son considerados métodos de análisis de viento efectivos, tienen dificultades para generar de forma precisa los efectos del viento sobre edificios, además de presentarse problemas al replicar las altas turbulencias (Li et al., 2025).

3.10 Consideraciones de la regularidad de un edificio

Las NTC establecen los criterios que deben ser considerados para un edificio se considere regular son los siguientes (Secretaria de Obras y Servicios de la CDMX, 2023):

- Irregularidad por torsión: se refiere a que existe desfase lateral de un 15% o más sobre las plantas del edificio.
- Irregularidad en planta: Está estrictamente relacionada con la asimetría sobre la planta del edificio.
- Irregularidad por discontinuidad en el diafragma: Es considerada cuando se presenta un claro mayor al 40 % de algunas de las longitudes de la planta.
- Irregularidad por reducciones geométricas en elevación: Se presenta cuando se realiza algún cambio de sección de forma en planta brusca mayor al 40% del ancho inferior.

- Irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral: Hace referencia a cuando existe un cambio brusco de secciones en sus elementos estructurales y su rigidez lateral es 15% a su entrepiso superior o 30% mayor que el entrepiso inferior.

4. Hipótesis y objetivos

4.1 Hipótesis

El modelo de análisis por Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) arroja coeficientes de presión con una precisión superior al 85% en comparación con datos experimentales en edificios de gran altura en zonas urbanas.

4.2 Objetivo general

Evaluar la precisión del análisis por Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), en el cálculo de las presiones de viento en edificios altos.

4.3 Objetivos particulares

- Elaborar y calibrar el modelo de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD).
- Analizar las variaciones de presión por zona y altura de la estructura.
- Comparar los resultados obtenidos por la simulación de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) con la normatividad vigente.

5. Metodología

5.1 Metodología general

En este capítulo se describen la metodología (Figura 5.1) que se efectuó para obtener los resultados de la investigación, es importante mencionar que para llevar a cabo la investigación se utilizó Laptop Asus Rog Strix g15, procesador: AMD Ryzen 7 6800HS with Radeon Graphics, memoria RAM instalada: 32.0 GB (15.3 GB usable) Edición Windows 11, versión 23H2. y el software ANSYS FLUENT (versión student).

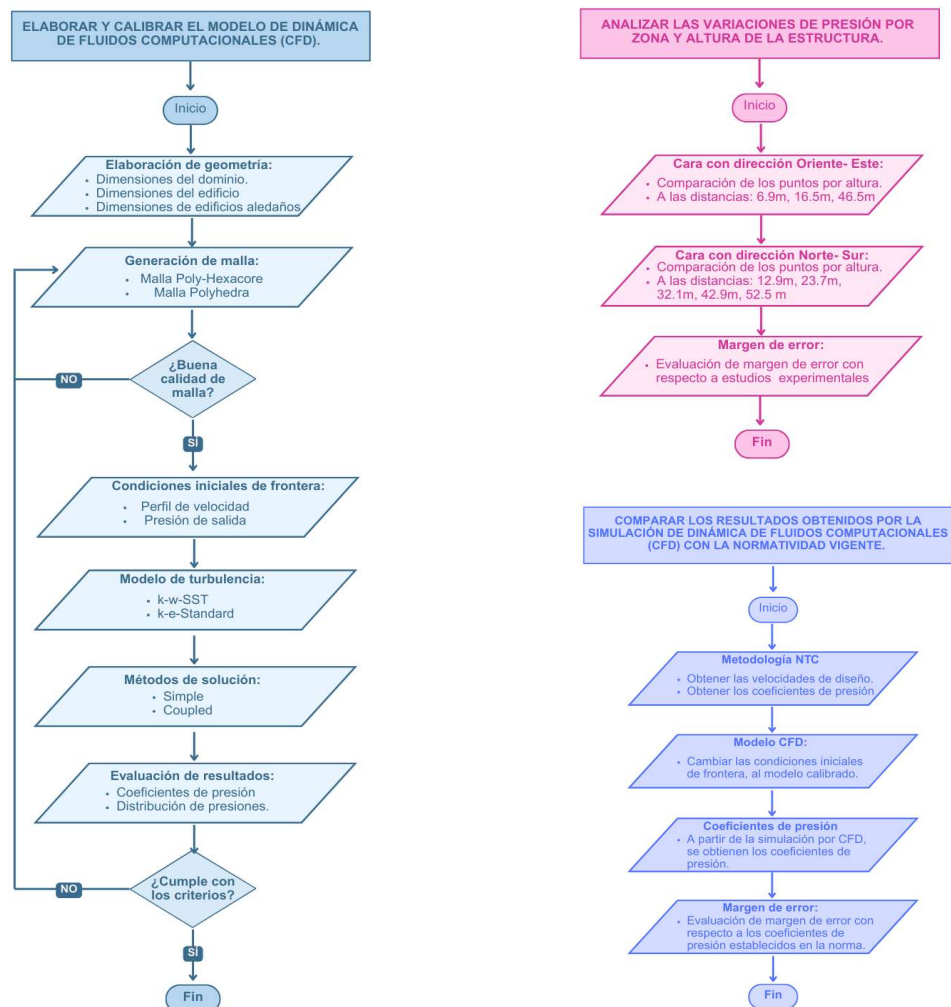


Figura 5.1. Metodología general de la investigación.

5.2 Elaboración y calibración del modelo de dinámica de fluidos computacionales (CFD).

5.2.1 Modelo CFD

Para llevar a cabo la elaboración de las simulaciones CFD por medio de ANSYS FLUENT, se realizó el procedimiento descrito en la Figura 5.12, en donde por medio de un diagrama de flujo se describe paso a paso la metodología ejecutada. En la Figura 5.2, se describe la metodología general del CFD.

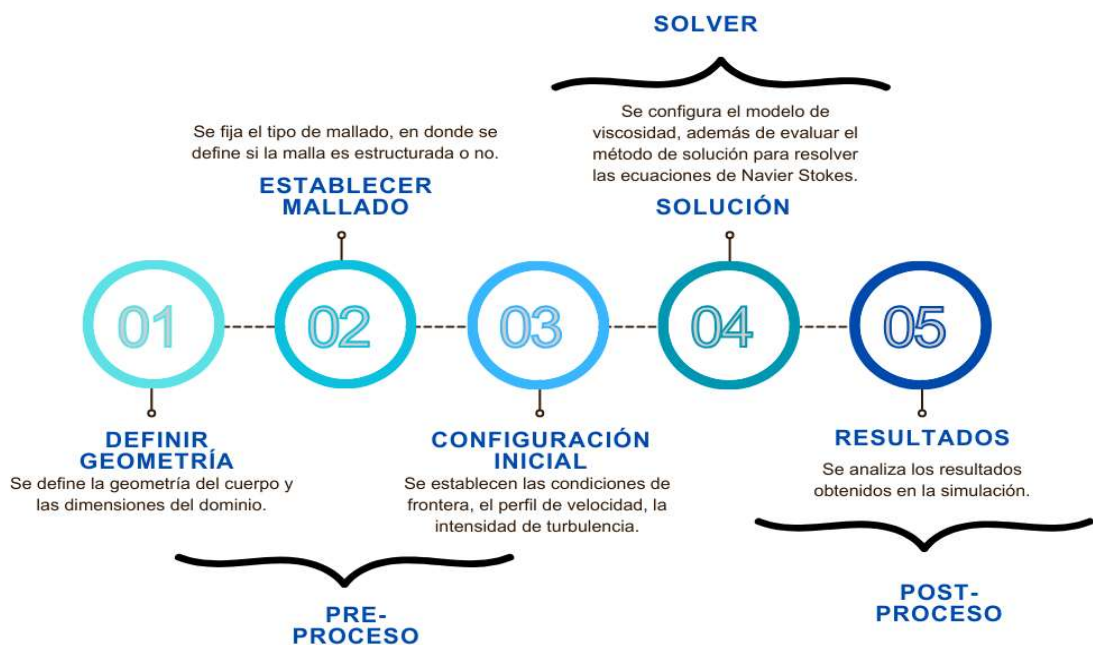


Figura 5.2. Metodología general del CFD.

5.2.2 Geometría

Se definió el plano en el que se iniciaría el proyecto en SpaceClaim, debido a que el programa ANSYS FLUENT toma el eje “y” como la altura del objeto de estudio; se estableció trabajar en el plano x,z (Figura 5.3). Para posteriormente configurar las unidades de medida en las que se trabajaron, para este tema de

investigación se las medidas establecidas fueron a escala real por lo que la unidad de medida que se estableció fue el sistema métrico (m) (Figura 5. 5.4)

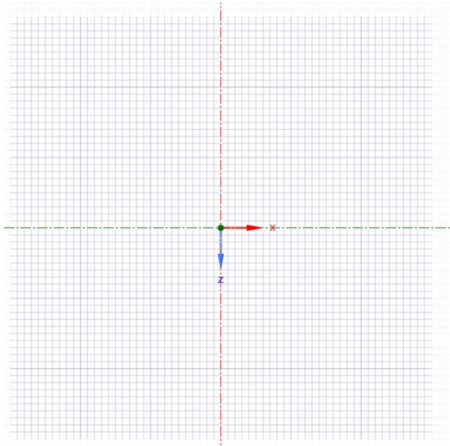


Figura 5.3. Plano x, z en SpaceClaim.

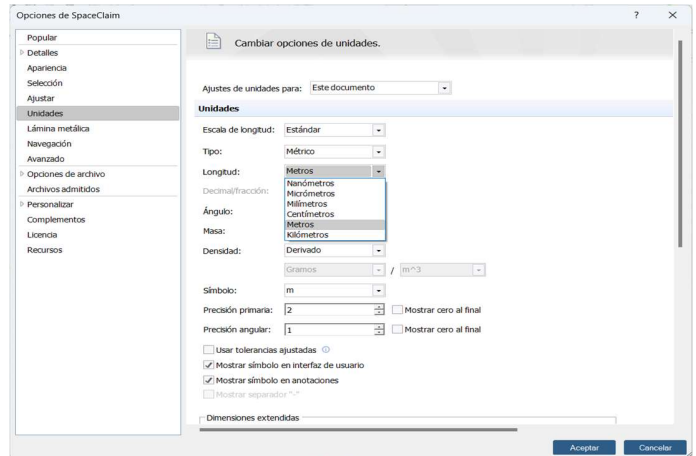


Figura 5.4. Unidades de medida.

De acuerdo con lo establecido en el artículo base que se utilizó para calibrar el modelo (Kikuchi et al., 2024), se tomaron los siguientes datos: las medidas del edificio en análisis se muestran en la Figura 5.3.

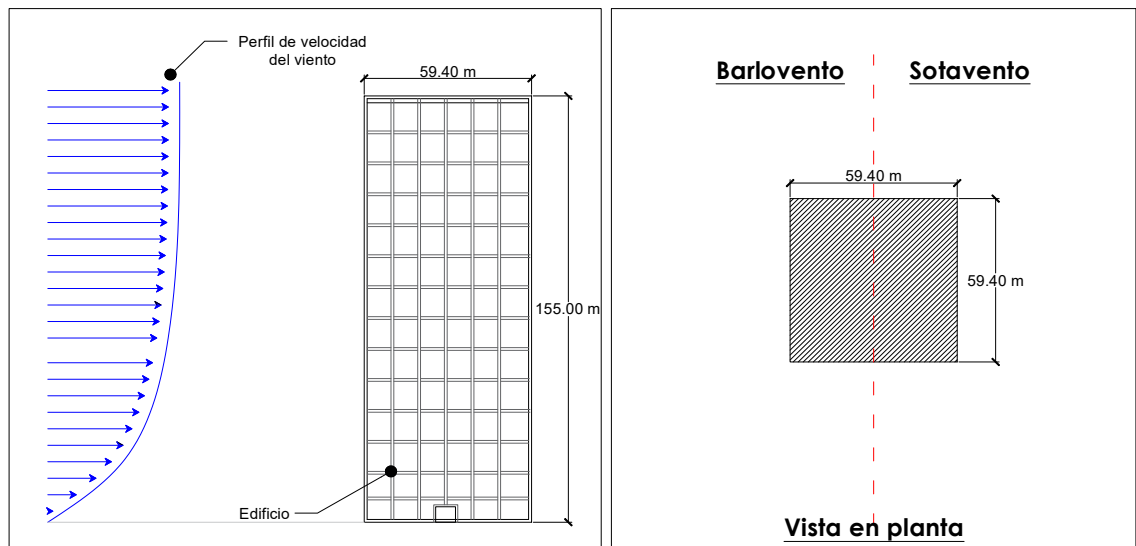


Figura 5.3. Dimensiones del edificio

Por medio del SpaceClaim, se trazó la base del edificio, la cual corresponde a un cuadrado de 59.4 x 59.4 metros. Posteriormente, se asignó la altura del edificio, medida que se representó en sentido al eje “y”, la medida de la altura fue de 155 metros.

Para elaborar el modelado de la zona en la que se encuentra el edificio, se llevó a cabo la investigación de la ubicación exacta del edificio por medio de Google earth, en donde se obtuvieron las medidas aproximadas de los edificios aledaños, en la Figura 5.4, se muestra cómo se encuentran distribuidos los 12 edificios que influyen en el comportamiento y la distribución de las presiones sobre la cara del edificio (objeto de estudio). El edificio se encuentra ubicado en la ciudad de Yokohama, Japón. Este proceso fue un punto clave para la calibración del modelo, debido a que se realizaron pruebas con el edificio en condiciones de campo abierto, y los resultados son completamente diferentes, debido a que los edificios aledaños se toman como obstrucciones en la trayectoria del viento.

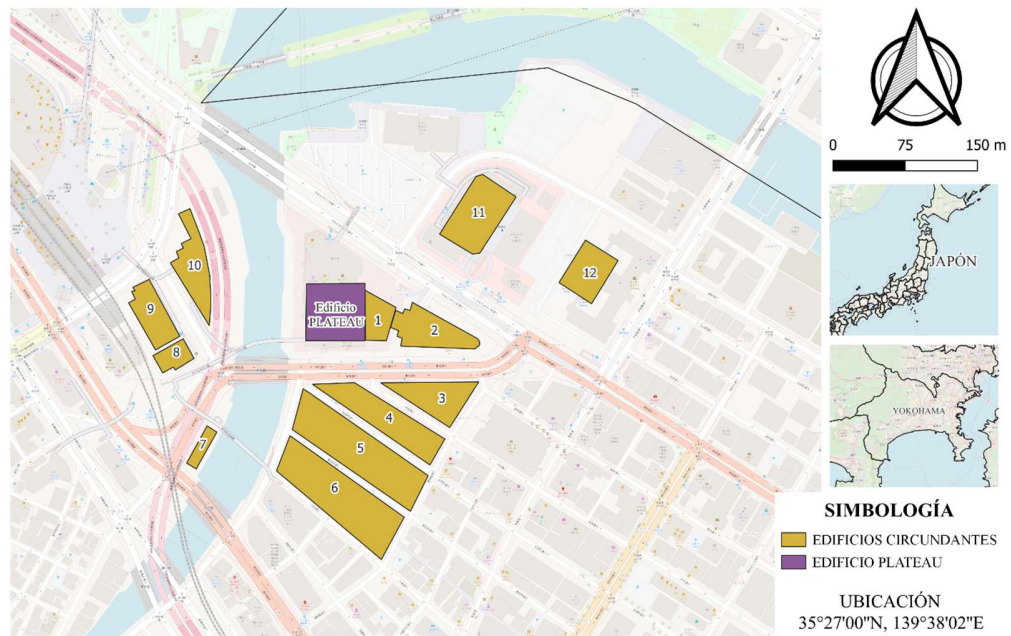


Figura 5.4. Distribución de edificios aledaños.

Una vez terminado el modelo geométrico por medio de *SpaceClaim*, se establecieron las medidas correspondientes al dominio computacional, donde se llevó a cabo el análisis de la zona en cuestión. Las medidas recomendadas para establecer dicho dominio corresponden a las descritas en la Figura 5.5.

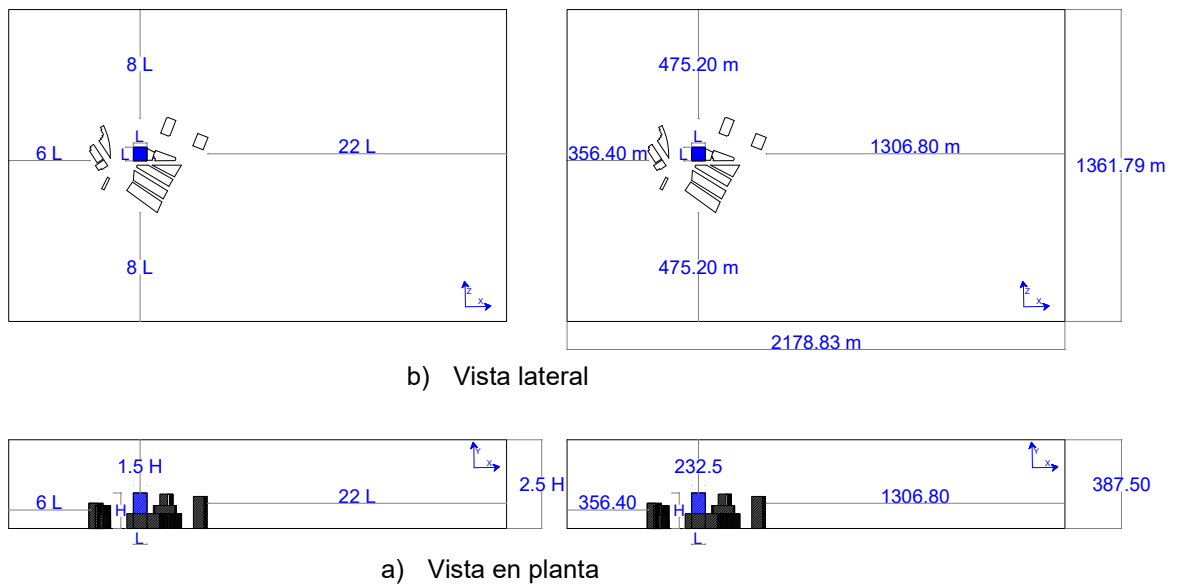


Figura 5.5. Dimensiones del dominio: H: 155 m (altura del edificio), L:54.9 m (secciones del edificio) (Huang Shenghong et al., 2007), modificado.

Se asignaron los nombres a las condiciones de frontera del dominio tal como se muestra en la Figura 5.6.

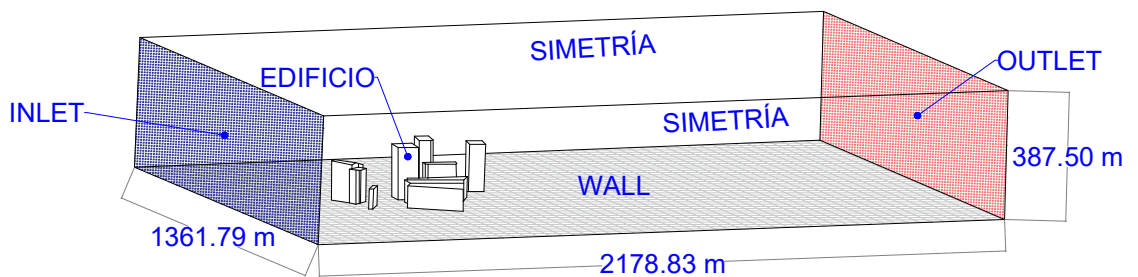


Figura 5.6. Denominación de las condiciones de frontera.

5.2.3 Mallado

Se creó un flujo de trabajo para realizar el mallado por medio de FLUENT (*with Fluent Meshing*), en donde se llevó a cabo la elaboración de 2 tipos de mallas: *Polyedra* y *Poly-hexacore*, debido que, al ser mallas estructuradas, se adaptan mejor a la forma del dominio, además de que producen un menor costo computacional, la configuración de ambas mallas se realizó con la condición de que la calidad ortogonal > 0.4 (Fatchurrohman y Chia, 2017).

5.2.3.1 Condiciones de malla *polyhedra*. Para el primer caso, debido a que el edificio de interés presenta una forma regular, se decidió utilizar una malla *polyhedra* estructurada, debido a la simplicidad de la geometría del dominio como el del edificio de interés, tratando de aumentar la aproximación de cobertura sobre la región de la frontera tanto de dominio como el del edificio (*ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 6.1.3 Choosing the Appropriate Mesh Type*, 2021).

Las mallas *polyhedras* estructuradas se caracterizan por ser elementos con varios lados como se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5.7. Forma *polyhedra*.

Se eligió este tipo de malla con la finalidad de obtener resultados precisos con un bajo costo computacional, esto en comparación con otro tipo de métodos.

Se estableció el tamaño de malla del objeto de estudio, en este caso el edificio, donde se obtuvo del 10% de la altura del edificio, es decir 10% de 155m igual a 15.5 m y a eso volver aplicarle un 10% obteniendo un total de 1.5 m, para simplificar el modelo y reducir el número de elementos y con ello el costo computacional, además de facilitar el cubrir detalladamente la zona de interés al

ser un tamaño de malla bastante pequeño en comparación al tamaño del dominio. (Fernández, 2012)

Se aplicó un *local sizing: face size* con respecto al edificio de interés, unificando el tamaño del mallado del edificio con un tamaño local de 1.5 m. Además, se colocó un *local refinement regions*, esto con la finalidad de tener una mayor precisión en la obtención de los datos debido al refinamiento de la malla con respecto a las paredes del edificio de interés. El tamaño de malla que se definió fue de 7.75 m por lo menos 5 veces el tamaño de la malla del edificio de interés.

Para el tamaño global de la malla, se definió un tamaño de 15 m con un *growth rate* de 1.1, esto con la finalidad de no tener cambios bruscos en el incremento de tamaño de las mallas.

Se agregaron las capas límite que se refieren a la rugosidad que se ejerce sobre un plano, cuando se impacta sobre un sólido, para obtener el número de capas a utilizar, se obtuvo el número de Reynolds, debido a que si el flujo es turbulento requiere un menor número de capas.

$$Re = \frac{V.L}{\nu} = \frac{(1.51 \text{ m/s})(155 \text{ m})}{1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.56 \times 10^7$$

Se comprobó que el flujo corresponde a un flujo turbulento, por lo que el número de capas que se asignó fue de 10 con un *growth rate* de 1.1 que corresponde a un factor de incremento discreto, para evitar cambios de tamaño bruscos.

Además, para colocar el tamaño de la primera capa se utilizó la siguiente ecuación:

$$y = \frac{y^+ \nu}{u_T} = \frac{1(1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})}{0.05 \left[1.51 \text{ m/s} \left(\frac{155 \text{ m}}{39.4 \text{ m}} \right)^{0.4} \right]} = 1.1487 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Se generó el volumen global de la malla con un parámetro de *growth rate* 1.1 para evitar transiciones de tamaño bruscas y se asignó un tamaño global de 12.2 m porque el tamaño de 15 m generaba una mala calidad de malla con un *Quality Orthogonal* de 0.01. Al final, con las modificaciones hechas se obtuvo una malla con una calidad ortogonal de 0.45, lo cual corresponde a una calidad de malla aceptable. En la Figura 5.8 se muestra el mallado final.

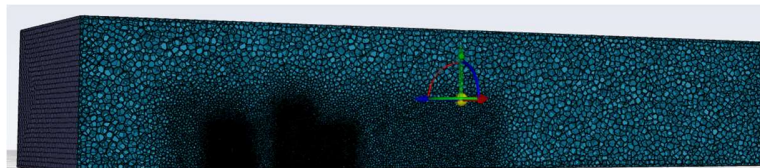


Figura 5.8. Malla polyhedra final.

5.2.3.2 Condiciones de Malla *Poly-Hexacore*. Para el siguiente caso se eligió una malla, *poly-hexacore*, que es la combinación de elementos poliedros y hexaedros con 8 nodos (Figura 5.9), esto con la finalidad que se adecuara de una forma óptima a la forma de los edificios aledaños, al igual que el primer caso, se tomaron en cuenta los mismos factores, considerando los edificios aledaños como espacios huecos, esto para reducir el costo computacional.

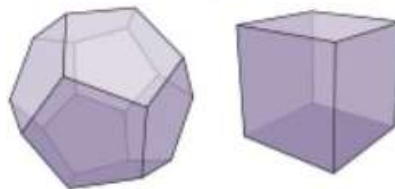


Figura 5.9. Elementos, poly-hexacore.

Se aplicó un local *sizing: face size* con respecto al edificio de interés, unificando el tamaño del mallado del edificio con un tamaño local de 1.1 m. Además, se colocó un *local refinement regions*, esto con la finalidad de tener una mayor precisión en la obtención de los datos debido al refinamiento de la malla con respecto a las paredes del edificio de interés. El tamaño de malla que se definió fue de 3 m por lo menos 3 veces el tamaño de la malla del edificio de interés.

Para el tamaño global de la malla, se definió un tamaño de 10 m con un *growth rate* de 1.2, esto con la finalidad de no tener cambios bruscos en el incremento de tamaño de las mallas.

Se agregaron las capas límite que se refieren a la rugosidad que se ejerce sobre un plano, cuando se impacta sobre un sólido, para obtener el número de capas a utilizar, se obtuvo el número de Reynolds, debido a que si el flujo es turbulento requiere un menor número de capas (White, 2010).

$$Re = \frac{V.L}{\nu} = \frac{(1.51 \text{ m/s})(155 \text{ m})}{1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.56 \times 10^7$$

El valor es mayor que 4000, por lo que se refiere a un flujo turbulento. Y por lo tanto se requiere de una capa límite delgada.

Se comprobó que el flujo corresponde a un flujo turbulento, por lo que el número de capas que se asignó fue de 10 con un *growth rate* de 1.1, que corresponde a un factor de incremento discreto, para evitar cambios de tamaño bruscos.

Además, para colocar el tamaño de la primera capa se utilizó la siguiente ecuación:

$$y = \frac{y^+ \nu}{u_T} = \frac{1(1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})}{0.05 \left[1.51 \text{ m/s} \left(\frac{155 \text{ m}}{39.4 \text{ m}} \right)^{0.4} \right]} = 1.1487 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Se generó el volumen global de la malla con un parámetro de *growth rate* 1.1 para evitar transiciones de tamaño bruscas y se asignó un tamaño global de 10 m porque el tamaño de 15 m generaba una mala calidad de malla con un *Quality Orthogonal* de 0.01. Al final, con las modificaciones hechas se obtuvo una malla con una calidad ortogonal de 0.46, lo cual corresponde a una calidad de malla aceptable. En la Figura 5.10 se muestra el mallado final.

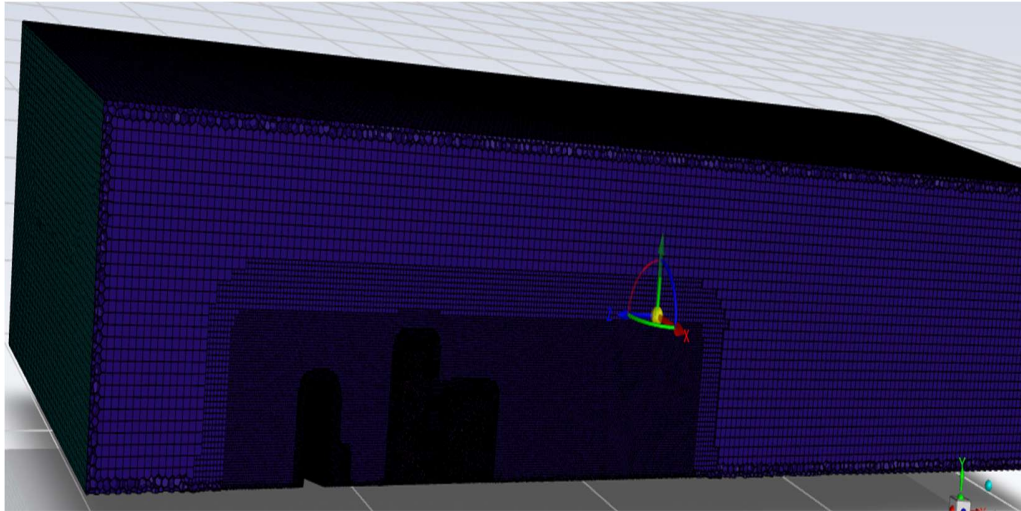


Figura 5.10. Malla *Poly-hexacore*.

5.2.4 Modelo y método de solución

Para la etapa del procesamiento, se llevó a cabo la evaluación de los modelos de viscosidad:

- K- ϵ -Standard, se utiliza para analizar los flujos turbulentos y los efectos de viscosidad molecular son despreciables.
- K- ω -SST, se utiliza para obtener las presiones que se ejercen sobre la pared, aunque requiere de una malla fina en la zona de interés.

En donde se utilizaron las siguientes ecuaciones correspondientes a los índices de turbulencia (Huang Shenghong et al., 2007):

- k, energía cinética turbulenta [m^2/s^2] es relacionada con las fluctuaciones de la velocidad con respecto a un flujo turbulento.

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C\mu}} \quad (17)$$

- ϵ , tasa de disipación de energía turbulenta [m^2/s^3], representa la cantidad y el perfil de intensidad de turbulencia en un fluido.

$$\epsilon = \frac{u^{*3}}{0.4(z + z_0)} \quad (18)$$

- ω , frecuencia específica de disipación [$1/s$], se utiliza para el modelo de $k-\omega$. En donde la intensidad de turbulencia está en relación a la viscosidad.

$$\omega = \frac{\epsilon}{kC\mu} \quad (19)$$

- u^* , velocidad de fricción [m/s], es la velocidad con respecto a la rugosidad del terreno a una altura de referencia.

$$u^* = 0.4 \frac{V_{ref}}{\ln\left(\frac{z_0 + z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (20)$$

Donde Z_0 se refiere a la altura de rugosidad del terreno, para el caso de zonas urbanas se considera como 1 m.

Es así como también se evaluó el método de solución del modelo, entre:

- *Simple*: Es utilizado solucionar análisis con respecto a las presiones
- *Coupled*

5.2.5 Posprocesamiento

La convergencia se refiere a dar los mejores resultados que se obtienen al incrementar las iteraciones de solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, es así que se tomó como criterio de convergencia que todas las variables llegaran a la solución de residuales de $\times 10^{-3}$ (Fernández, 2012).

5.3 Análisis de las variaciones de presión por zona y altura de la estructura

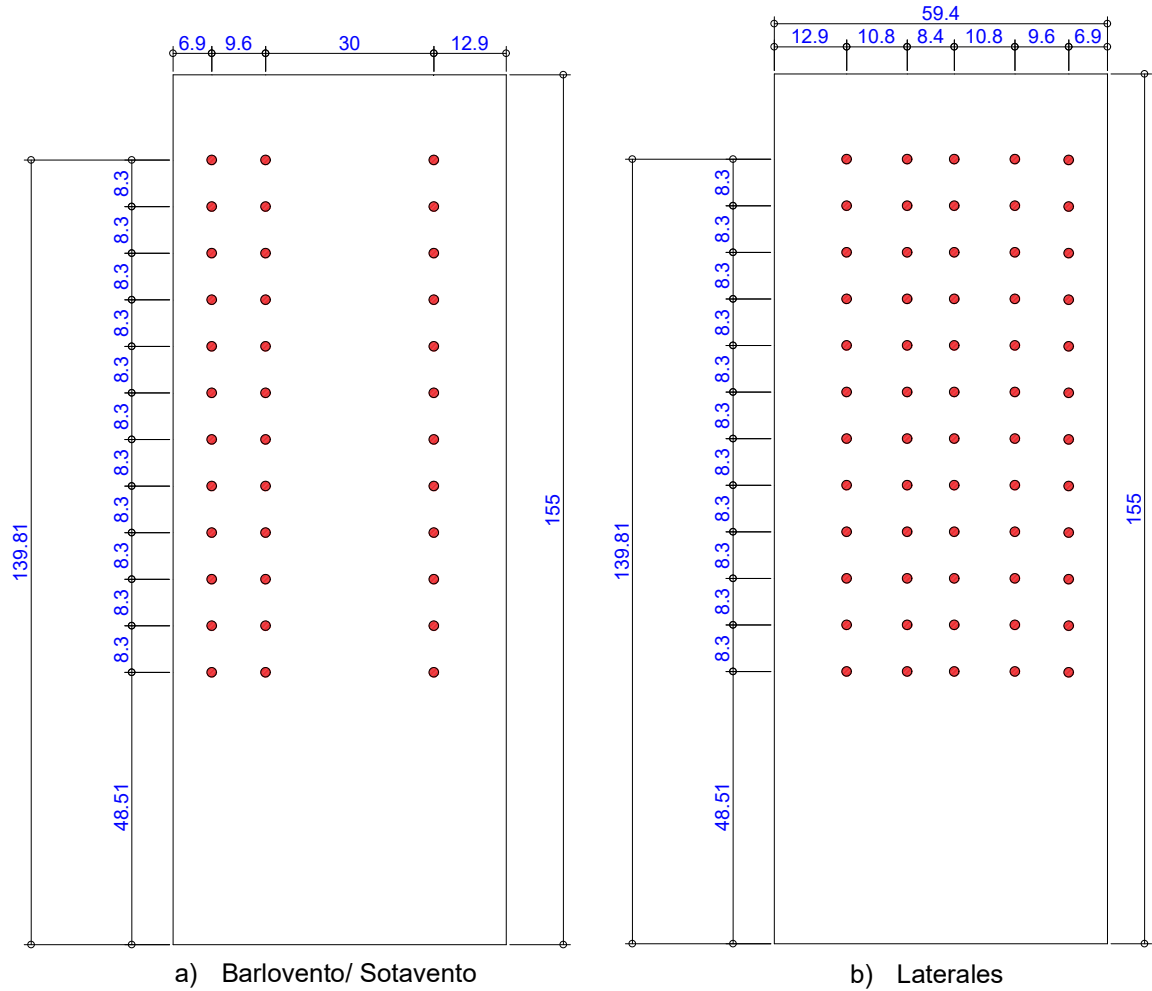


Figura 5.11. Ubicación de los puntos de interés.

Se obtuvieron 192 puntos (Figura 5.11), 36 de ellos sobre la cara de sotavento, para posteriormente llevar a cabo la comparación y validar la calibración del modelo.

5.4 Comparación de los resultados obtenidos por la simulación de dinámica de fluidos computacionales (CFD) con la normatividad vigente

El edificio cumplió con 3 de las restricciones establecidas en el capítulo de las normas técnicas complementarias de la Ciudad de México 2023 (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1. Criterios de evaluación para utilizar las NTC

Criterios	Evaluación
La estructura debe medir menos de 200 metros de altura (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023).	Cumple, debido a que la altura del edificio es de 155 m.
Los claros de la estructura no deben ser mayores de 100 metros (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023).	Es una sola estructura y sus dimensiones son de 59.4 m por cada lado.
Los periodos fundamentales no deben exceder de 5 segundos (Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX, 2023).	Se definió que la estructura, sería de concreto armado, por lo que el periodo fundamental es de: $T=0.075(155 \text{ m})^{3/4} = 3.30 \text{ segundos}$

De acuerdo con la clasificación que establecen las normas mexicanas, el edificio se clasifica como una estructura tipo 3, debido a que cumple con las características de ser una estructura prismática con un periodo de vibración mayor a 1 segundo. Para realizar esta investigación no fue necesario llevar a cabo el diseño por viento del edificio; sin embargo, para realizar la comparación con las simulaciones CFD, fue necesario obtener las velocidades de diseño, esto con respecto a lo que establece la norma.

5.4.1 Velocidades de viento para diseño

Factor de exposición local, F_{rz} . Para el cálculo de este factor se toma la ecuación 15 de este trabajo de tesis, en donde la altura del edificio (z) es mayor que 10 m, pero menor que cualquiera de los valores de la altura del gradiente (δ).

$$F_{rz} = 0.67 \left(\frac{155}{10} \right)^{0.19} = 1.131$$

Nota: esto es para poder llevar a cabo una comparación de la metodología por medio de CFD. Sin embargo, para la metodología según la norma, se refiere a un perfil de velocidad del viento. Por lo tanto:

$$F_{rz} = 0.67 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.19}$$

5.4.2 Factor correctivo por topografía, F_T

El factor correctivo por topografía se obtuvo del cuadro 4, donde se define como un T3, Terreno prácticamente plano, campo abierto, con ausencia de cambios topográficos importantes con pendientes menores al 5%, entonces F_T : 1.0

5.4.3 Velocidad de viento para diseño, V_D

$$V_D = F_T F_{rz} V_R$$

El valor de la velocidad de retorno (V_R) se obtuvo de la velocidad crítica establecida en la norma con un periodo de retorno de 50 años, a una altura de 10 m. Entonces el valor de V_R : 40 m/s

$$V_D = (1)(1.131)(40 \text{ m/s}) = 45.23 \text{ m/s}$$

Para obtener el perfil de velocidad del viento con respecto a la variación de la altura, la ecuación se emplea de la siguiente manera:

$$V_D = (1) \left[(0.67) \left(\frac{z}{10} \right)^{0.19} \right] (40 \text{ m/s})$$

5.4.4 Coeficientes de presión

Las Normas técnicas complementarias de la Ciudad de México establecen que los coeficientes de presión para edificios y construcciones cerradas se consideran de forma constante a lo largo de las paredes del edificio; los valores son los establecidos en el Cuadro 5.2, en los cuadros 5.3-5.5 se muestran las presiones obtenidas sobre las caras del edificio.

Cuadro 5.2. Coeficientes de presión exterior para edificios y construcciones cerradas

Zona de afectación	C_{pe}
Pared de barlovento	0.80
Pared de sotavento	-0.4
Paredes laterales	-0.8
Techos planos	-0.7
Techos inclinados a sotavento	-1.0 para $0^\circ < \theta < 20^\circ$
Techos inclinados a barlovento	-1.0 < 0.05 θ - 2.0 < 0.5 para $20^\circ < \theta < 50^\circ$

Cuadro 5.3. Presión exterior, $p_e = 0.52 C_{pe} V_D^2$

Zona de afectación	P_e
Pared de barlovento	850.85 Pa
Pared de sotavento	-425.43 Pa
Paredes laterales	-850.85 Pa
Techos planos	-744.49 Pa

Cuadro 5.4. Presión interior, $p_e = 0.52 C_{pi} V_D^2$

Zona de afectación	P_i
Pared de barlovento	-319.07 Pa
Pared de sotavento	-319.07 Pa
Paredes laterales	-319.07 Pa
Techos planos	-319.07 Pa

Cuadro 5.5. Presiones estáticas, $p_z = p_e - p_i$

Zona de afectación	Pz
Pared de barlovento	1169.92 Pa
Pared de sotavento	-106.36 Pa
Paredes laterales	-531.78 Pa
Techos planos	-425.43 Pa

5.5 Elaboración de modelo CFD expuesto a campo abierto

Con base en los resultados obtenidos por medio de la calibración, se elaboró otro modelo CFD el cual se pudiera comparar con lo establecido en la NTC-2023 y corroborar la calibración del modelo expuesto a campo abierto como lo indica la normativa mexicana.

5.5.1 Geometría

Para la elaboración de la geometría de este modelo se tomaron las medidas previamente establecidas en el apartado 5.2.2, en donde se ubica la Figura 5.3 que establece las medidas del edificio a evaluar.

Para este caso, el edificio se encontraba en un campo abierto, es decir, que no tenía obstáculos ni perturbaciones a su alrededor. Para la elaboración del dominio se siguió con el mismo criterio que el apartado 5.2.2, tal y como se muestra en la Figura 5.12.

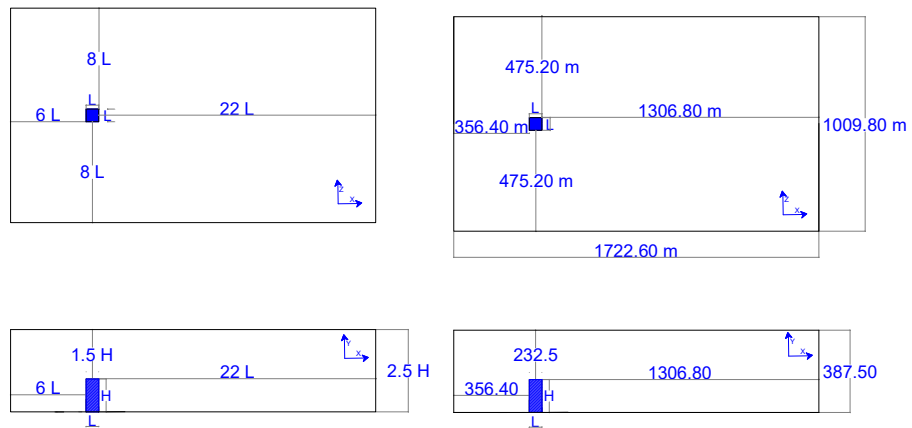


Figura 5.12. Dimensiones del dominio a campo abierto: H: 155 m (altura del edificio), L:54.9 m (secciones del edificio) (Huang, Li y Xu, 2007), modificado.

Se asignaron las condiciones iniciales y de frontera para el edificio expuesto a campo abierto como se muestra en la Figura 5.13

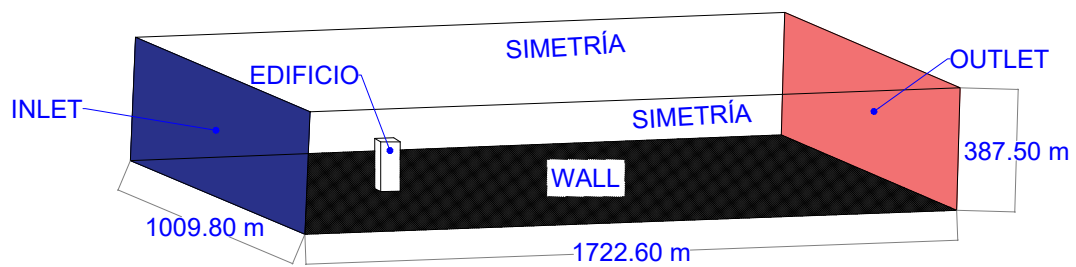


Figura 5.13. Denominación de las condiciones de frontera.

5.5.2 Mallado

A partir de los resultados de la calibración, se decidió emplear exclusivamente una malla *poly-hexacore*. Aplicando el mismo criterio utilizado en la calibración (1 % de la altura del edificio), se obtuvo un tamaño de celda inicial de 1.5 m para la región del edificio. Sin embargo, para aumentar la precisión y mejorar la calidad del mallado, se adoptó finalmente un tamaño de 1 m.

Se aplicó un local *sizing: face size* con respecto al edificio de interés, unificando el tamaño del mallado del edificio con un tamaño local de 1 m. Además, se colocó un local *refinement regions*, esto con la finalidad de tener una mayor precisión en la obtención de los datos debido al refinamiento de la malla con respecto a las paredes del edificio de interés. El tamaño de malla que se definió fue de 10 m por lo menos 10 veces el tamaño de la malla del edificio de interés, esto para reducir el costo computacional.

Se agregaron las capas límite que se refieren a la rugosidad que se ejerce sobre un plano, cuando se impacta sobre un sólido, para obtener el número de capas a utilizar, se obtuvo el número de Reynolds, debido a que si el flujo es turbulento requiere un menor número de capas.

$$Re = \frac{V.L}{\nu} = \frac{(45.23 \text{ m/s})(155\text{m})}{1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.56 \times 10^7$$

Se comprobó que el flujo corresponde a un flujo turbulento, por lo que el número de capas que se asignó fue de 5 con un *growth rate* de 1.2, que corresponde a un factor de incremento discreto, para evitar cambios de tamaño bruscos. El tamaño de la primera capa límite fue de 0.272 m. Obteniendo una calidad ortogonal de 0.5.

5.5.3 Modelo y método de solución

Este procedimiento se utilizó para el mallado del edificio expuesto a campo abierto y también para el modelo utilizado en la calibración con edificios aledaños con la malla *poly-hexacore*.

Para la etapa del procesamiento, se llevó a cabo la definición del modelo de turbulencia. Debido a los resultados obtenidos en la calibración, se utilizó únicamente el modelo k- ω -SST en su método de solución simple.

De igual manera se tomaron en cuenta las ecuaciones de la energía cinética, tasa de disipación de turbulencia, frecuencia específica de disipación y la velocidad de fricción, ya explicadas anteriormente en el modelo de la calibración.

Se utilizó el perfil de velocidad tipo exponencial, debido a su simplicidad de expresión. Este fue descrito en el capítulo de fundamentación teórica. La velocidad de referencia utilizada fue la obtenida por medio de las NTC-2023 para poder realizar la comparación de las metodologías, obteniendo la siguiente expresión como la representación del perfil de velocidad.

$$V_z = 45.23 \text{ m/s} \left(\frac{y}{155 \text{ m}} \right)^{0.4}$$

5.5.4 Posprocesamiento

La convergencia se evaluó a las 1500 iteraciones debido a la amplia turbulencia generada por las altas velocidades utilizadas para esta investigación, además de tomar como criterio de convergencia la estabilidad del flujo con respecto a la gráfica de residuales.

5.6 Cálculo de fuerzas

Cuadro 5.6. Fuerza en dirección del viento, según la NTC-2023

Zona de afectación	Presión	kg/m ²	kg
Pared de barlovento	1169.92 Pa	119.30	7086.344

Para obtener las fuerzas que impactan sobre las caras del edificio en base a las presiones obtenidas medio de CFD, se trazaron líneas de referencia a las alturas establecidas en los puntos de interés, se tomó el valor máximo en el caso de la presiones positivas y el valor mínimo en el de las presiones negativas y se multiplicó por la longitud que abarcaba cada una de las presiones sobre la planta

del edificio por un ancho igual 4.15 m a los puntos extremos, es decir en las alturas de 48.51 m y 139.81 m, el resto de las presiones fue por un ancho igual al 8.30 m.

En el caso del edificio con presencia de edificios aledaños al existir presiones positivas y negativas sobre una misma línea, se exportaron todos los puntos al programa AutoCAD en el que a través de unir los puntos se logró ubicar la longitud aproximada en donde las presiones cambiaban de sentido, para ello se muestra la siguiente tabla con las presiones máximas y mínimas, el área correspondiente a cada presión en ambos escenarios (Cuadro 5.7 y

Cuadro 5.8).

Cuadro 5.7. Cálculo de fuerzas de modelo CFD a con edificios aledaños

y	Presión estática		Longitud	Ancho	Área	Fuerza
(m)	(Pa)	(g/m²)	(m)	(m)	(m²)	(kg)
48.51	-302.47	-30.84	55.00	4.15	228.25	-7039.99
48.51	354.43	36.14	4.40	4.15	18.26	659.95
56.81	-316.40	-32.26	59.40	8.30	493.02	-15906.57
65.11	-244.29	-24.91	59.40	8.30	493.02	-12281.57
73.41	-287.68	-29.34	59.40	8.30	493.02	-14462.75
81.71	-1781.98	-181.71	5.64	8.30	46.81	-8506.28
81.71	73.95	7.54	29.17	8.30	242.11	1825.73
81.71	-382.43	-39.00	24.60	8.30	204.18	-7962.32
90.01	321.02	32.73	39.20	8.30	325.36	10650.57
91.01	-335.22	-34.18	20.20	8.30	167.66	-5731.17
98.31	602.55	61.44	41.93	8.30	348.02	21383.34
98.31	-258.25	-26.33	17.47	8.30	145.00	-3818.51
106.61	769.38	78.45	45.77	8.30	379.89	29804.29
106.61	-156.65	-15.97	13.63	8.30	113.13	-1807.12
114.91	894.46	91.21	52.81	8.30	438.32	39979.15
114.91	-89.58	-9.13	6.59	8.30	54.70	-499.62
123.21	1005.93	102.58	57.17	8.30	474.51	48673.54
123.21	-80.94	-8.25	2.23	8.30	18.51	-152.77
131.51	1106.97	112.88	58.04	8.30	481.73	54377.87
131.51	-49.73	-5.07	1.36	8.30	11.29	-57.25
139.81	1181.05	120.43	59.40	4.15	246.51	29688.19

Cuadro 5.8. Cálculo de fuerzas de modelo CFD a campo abierto

y	Presión estática		Longitud	Ancho	Área	Fuerza
(m)	(Pa)	(Kg/m²)	(m)	(m)	(m²)	(kg)
48.51	589.35	60.10	59.40	4.15	246.51	14814.48
56.81	644.88	65.76	59.40	8.30	493.02	32420.85
65.11	702.36	71.62	59.40	8.30	493.02	35310.26
73.41	756.50	77.14	59.40	8.30	493.02	38032.20
81.71	810.88	82.69	59.40	8.30	493.02	40766.33
90.01	865.12	88.22	59.40	8.30	493.02	43493.32
98.31	916.75	93.48	59.40	8.30	493.02	46088.91
106.61	965.61	98.46	59.40	8.30	493.02	48545.05
114.91	1012.74	103.27	59.40	8.30	493.02	50914.42
123.21	1051.39	107.21	59.40	8.30	493.02	52857.80
131.51	1075.88	109.71	59.40	8.30	493.02	54088.96
139.81	1069.66	109.08	59.40	4.15	246.51	26888.10

6. Resultados y discusión

Los resultados de la calibración del modelo arrojaron que se tiene una compatibilidad del 80% con respecto a muestras tomadas a escala real con una malla tipo *poly-hexacore*. El resultado se muestra en la Figura 6.1.

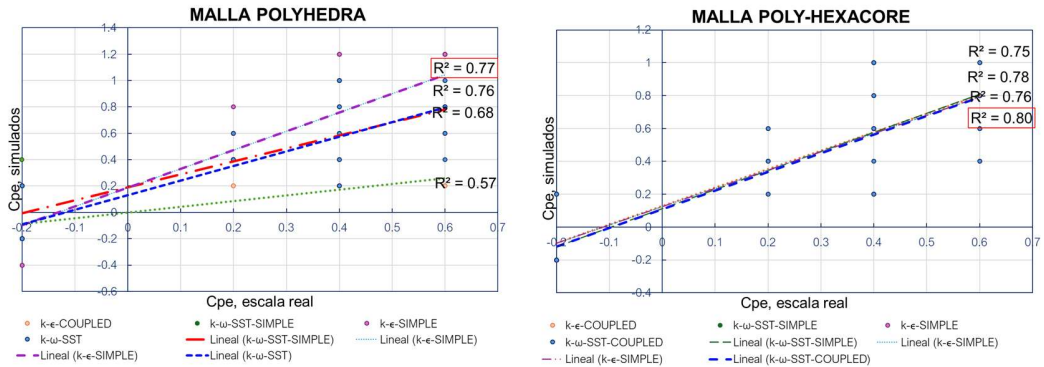


Figura 6.1. Coeficiente de determinación (R^2) de los resultados CFD en comparación a escala real.

Así también, se evaluaron los resultados de la calibración con muestras tomadas por medio de túneles de viento en donde se obtuvieron valores de R^2 arriba del 0.9, de igual forma corresponde a una malla tipo *poly-hexacore* con un modelo de turbulencia de k- ω -SST, método de solución simple (Figura 6.2).

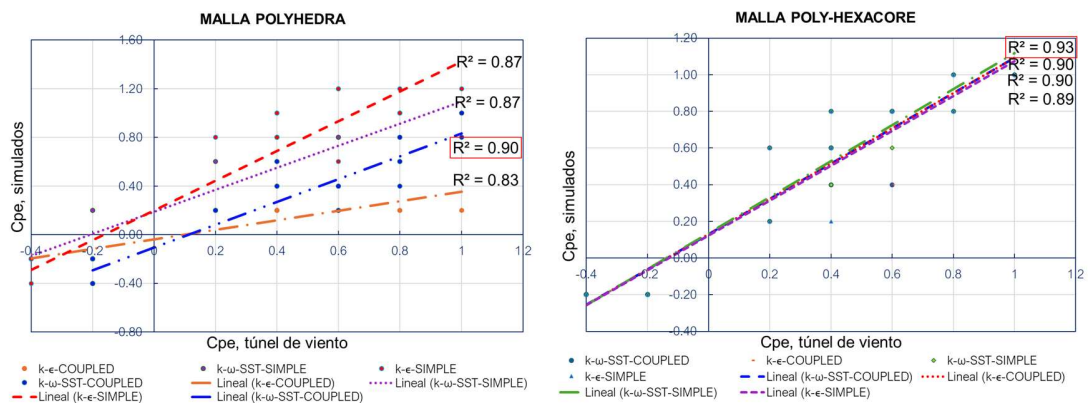


Figura 6.2. Coeficiente de determinación (R^2) de los resultados CFD en comparación con el túnel de viento.

Se realizó una comparación de los modelos de CFD evaluados con los modelos de calibración y las velocidades obtenidas por la NTC-2023; los resultados obtenidos por simulaciones CFD arrojaron coeficientes de presión diferentes a los que establece la NTC-2023. Debido a que son considerados constantes a lo largo de la altura del edificio, en la Figura 6.3 se observan los resultados obtenidos en la evaluación del edificio a campo abierto.

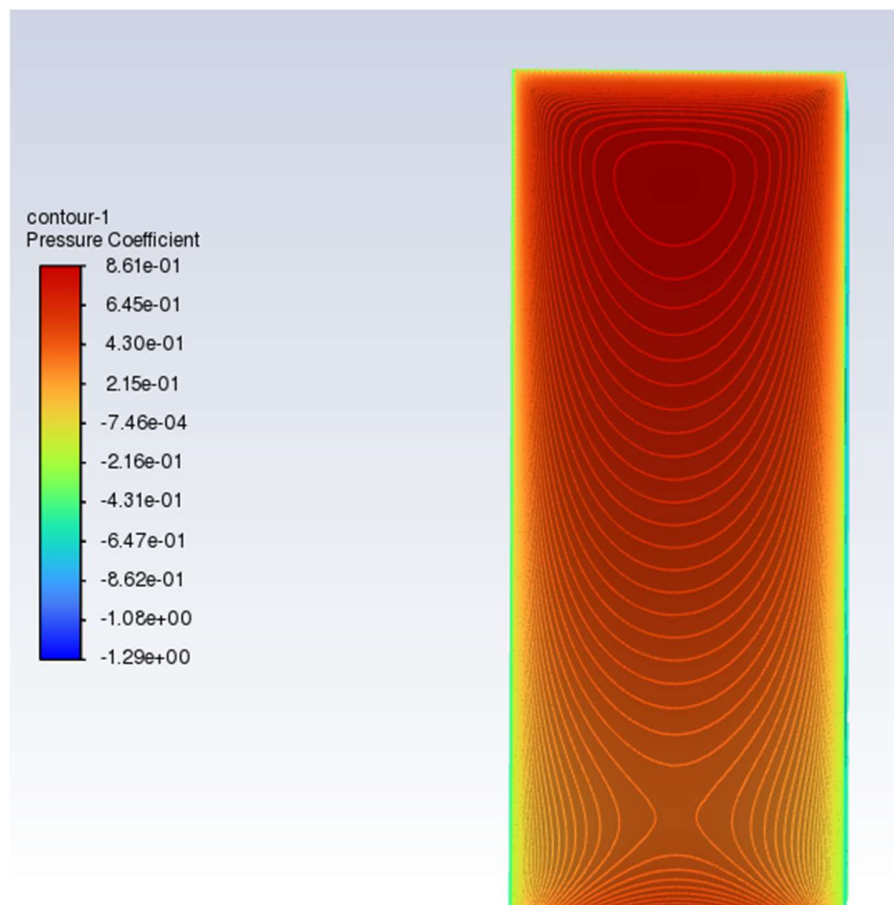


Figura 6.3. Coeficientes de presión sobre barlovento.

Se observa que, aunque son muy parecidos a la norma, la distribución sobre la cara del edificio varía y no de forma lineal y mucho menos constante, en la Figura 6.4 se muestra la diferencia entre resultados sobre la cara de barlovento en un edificio a campo abierto.

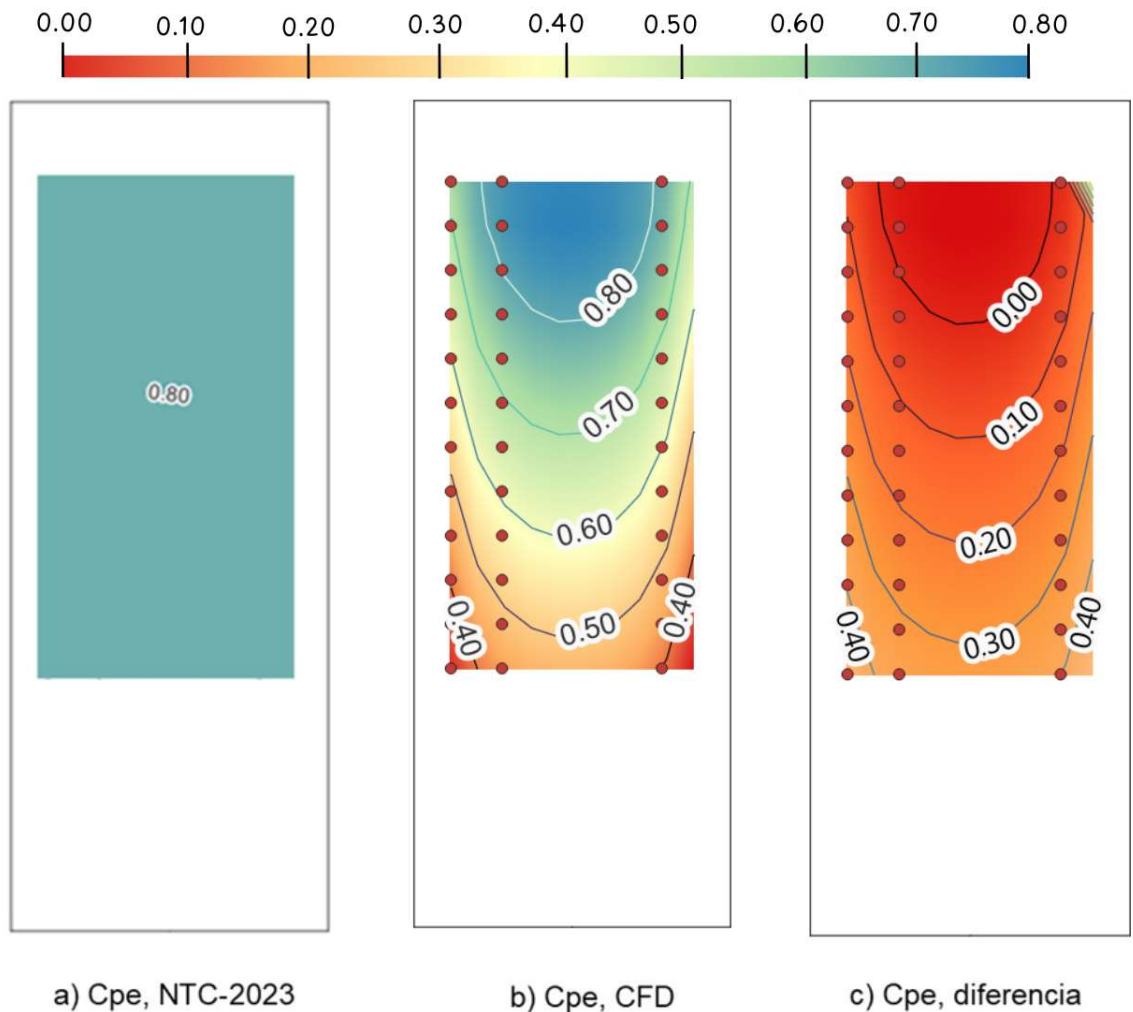


Figura 6.4 Comparación de coeficientes de presión sobre Barlovento.

Los resultados que se obtuvieron de las simulaciones de un edificio ubicado en zona urbana con edificios aledaños de igual o menor altura arrojaron una distribución de coeficientes de presión diferente a la de un edificio expuesto a campo abierto, debido a los efectos de vorticidad que generan las estructuras colindantes, además generar succiones sobre algunas partes de la cara de barlovento como se muestra en la Figura 6.5.

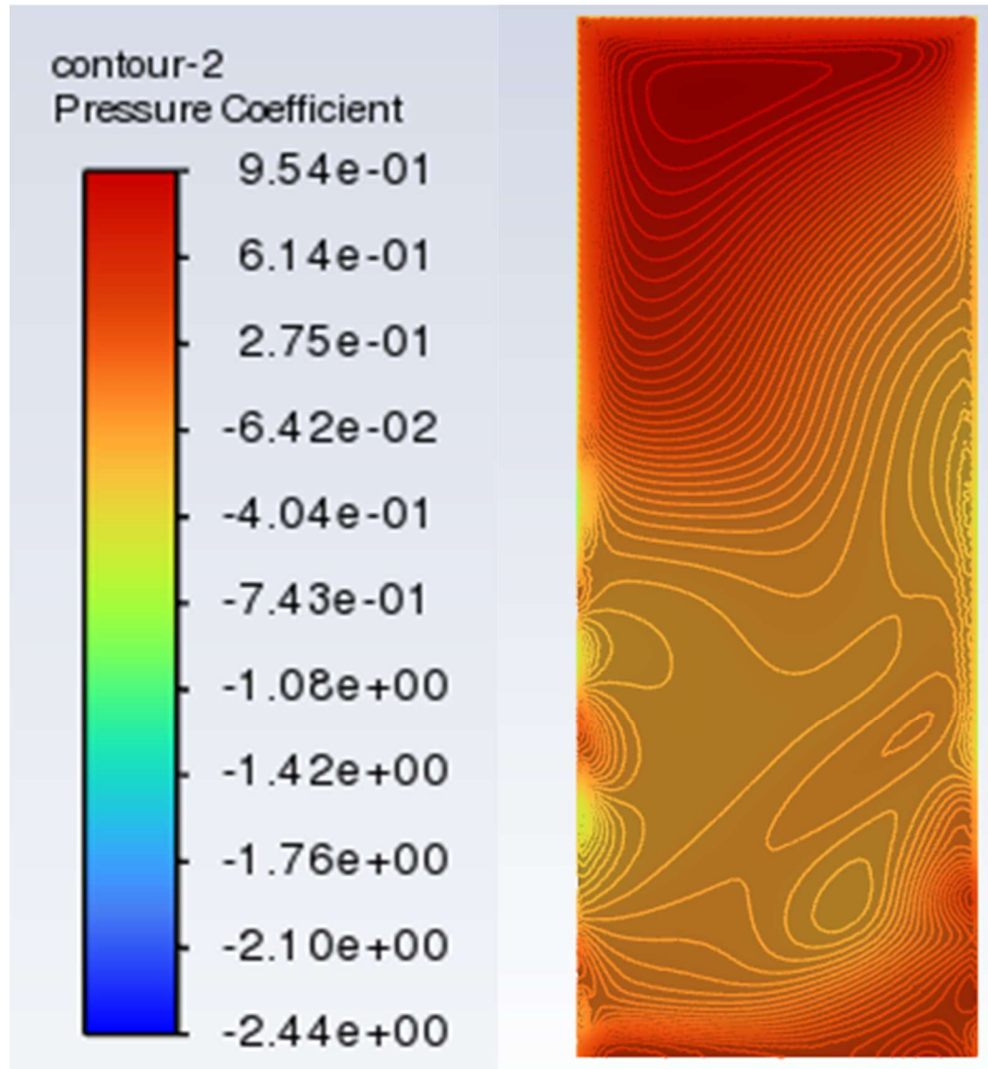


Figura 6.5. C_{pe} sobre barlovento en un edificio con estructuras aledañas.

Para ello se extrajeron valores con los coeficientes de presión sobre puntos conocidos descritos anteriormente en el capítulo de metodología, sobre todas las caras del edificio tal y como se muestra en el Anexo A.

Por medio de los valores obtenidos se realizó una gráfica comparativa (Figura 6.6) en la que se puede observar la variación de valores entre los puntos del edificio, sobre la misma gráfica se representan 3 caras del edificio con base en un anillo vertical.

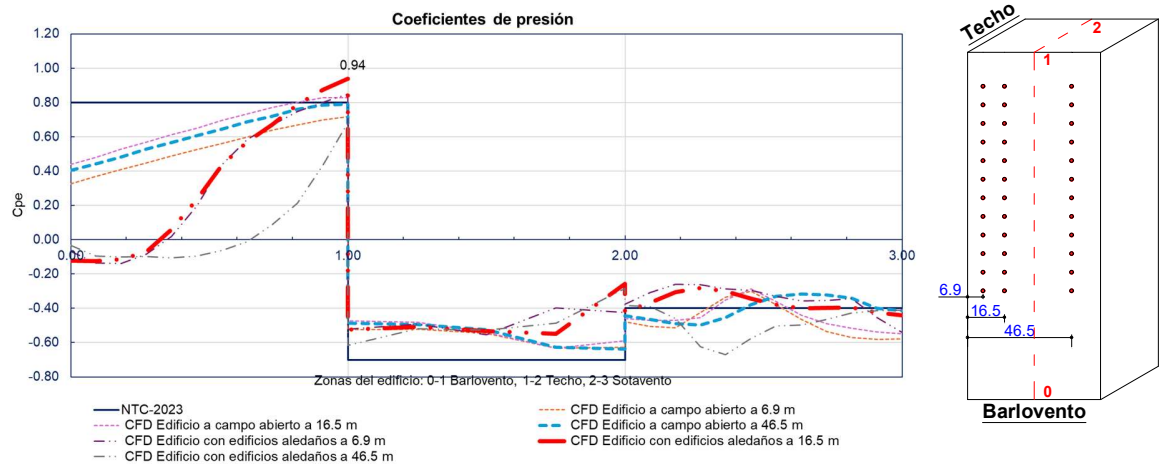


Figura 6.6. Comparación de coeficientes de presión.

Podemos observar que ambos modelos de CFD tienen valores un poco más altos sobre la cara de sotavento, siendo este un valor conservador, por lo que se realizó una gráfica de dispersión para obtener el coeficiente de determinación, donde se observa la cercanía de los métodos de análisis (Figura 6.7).

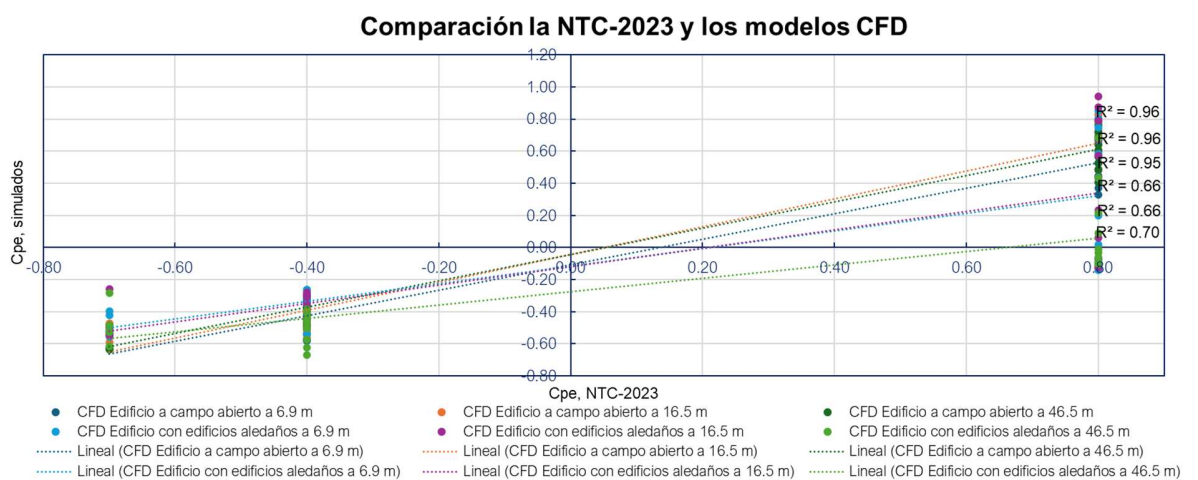


Figura 6.7. Coeficiente de determinación (R^2) en comparación con la NTC-2023.

Se realizó la misma gráfica comparativa por medio de un anillo vertical, mostrando las caras laterales 1 y 2 del edificio (Figura 6.8).

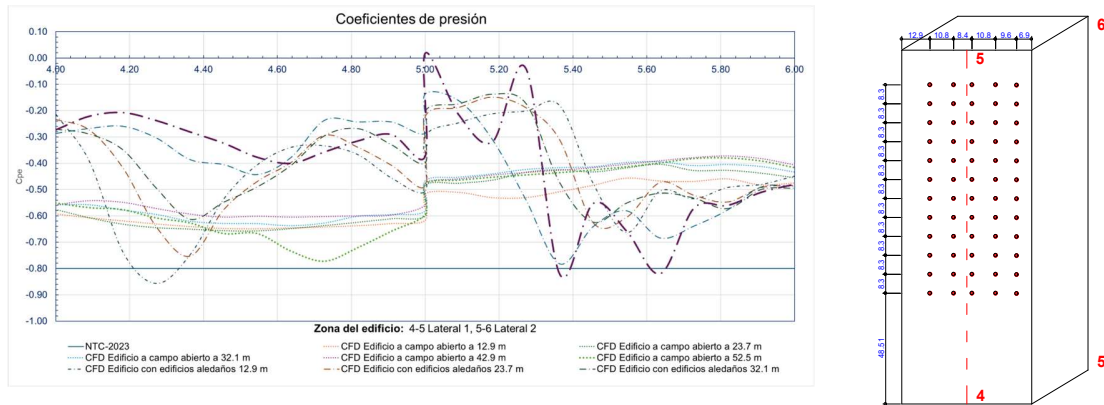


Figura 6.8. Comparación de coeficientes de presión sobre caras laterales.

Así también, se muestra una distribución de coeficiente de presión sobre la cara de barlovento del edificio ubicado en zona urbana, en donde se compara con lo establecido en la norma NTC-2023 (Figura 6.9).

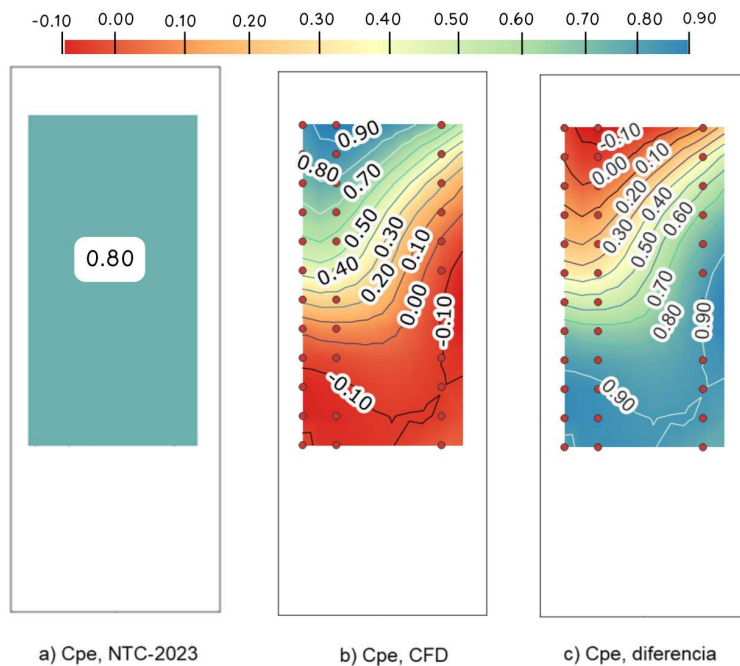


Figura 6.9. Mapa de errores de edificio a campo abierto en comparación con la NTC-2023.

Una vez analizados los coeficientes de presión, también se obtuvieron las comparaciones entre lo establecido con la NTC-2023 y lo obtenido por medio de los análisis de CFD, para ser un poco más realista, lo establecido por la norma se varió con respecto al factor de exposición local y la altura del edificio. En donde se obtuvieron los siguientes resultados (Cuadro 6.4).

Cuadro 6.1. Variación de presiones, según la NTC-2023

Perfil de velocidad			Estática			
z	F _{Rz}	V _D	Barlovento	Sotavento	Laterales	Techo plano
48.51	0.90	36.18	748.91	-68.08	-340.41	
56.81	0.93	37.30	795.73	-72.34	-361.70	
65.11	0.96	38.29	838.51	-76.23	-381.14	
73.41	0.98	39.18	878.05	-79.82	-399.11	
81.71	1.00	39.99	914.92	-83.17	-415.87	
90.01	1.02	40.74	949.55	-86.32	-431.61	
98.31	1.04	41.44	982.26	-89.30	-446.48	
106.61	1.05	42.09	1013.31	-92.12	-460.60	-425.43
114.91	1.07	42.70	1042.91	-94.81	-474.05	
123.21	1.08	43.28	1071.22	-97.38	-486.92	
131.51	1.10	43.82	1098.37	-99.85	-499.26	
139.81	1.11	44.34	1124.49	-102.23	-511.13	
155.00	1.13	45.23	1169.92	-106.36	-531.78	

Sin embargo, en los análisis por medio de CFD se puede observar que la variación de los coeficientes de presión y las presiones mismas cambian no solo con base a la altura, sino también con base a lo largo de la cara del edificio, es por ello por lo que se llevó a cabo una comparación en las donde se evalúa la presión

estática que se presentan en las caras barlovento de los edificios, además se obtuvo la R^2 de cada una de las alturas sobre las caras del edificio como se muestra en la Figura 6.10.

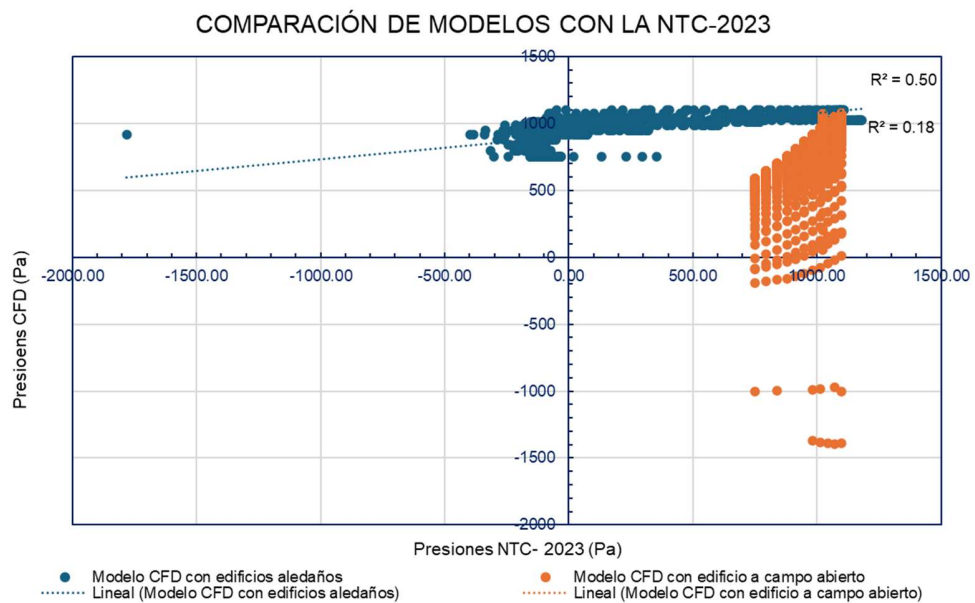
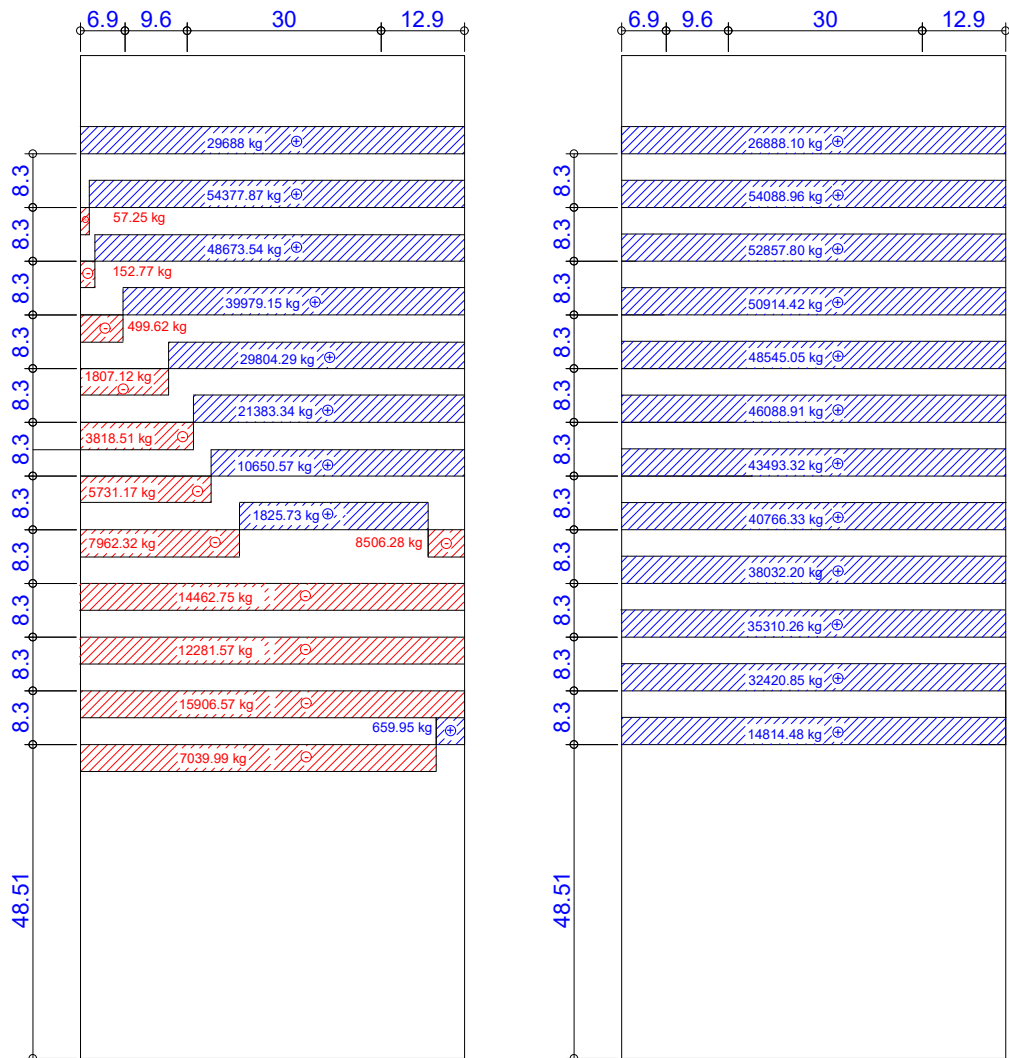


Figura 6.10. Coeficiente de determinación (R^2) de los resultados CFD en comparación a NTC-2023.

Se observa que la variación de presión no coincide con la presentada en la NTC; en estos casos, la norma establece un valor de presión que contribuye a estar del lado de la seguridad al ser un valor conservador.

Así mismo, se realizó una comparación con respecto a las fuerzas que se ejercen sobre la estructura; es claro que la diferencia entre metodologías es grande debido a la variación de presiones que se ejercen. En el capítulo de metodología se obtuvo la fuerza de empuje sobre barlovento y es totalmente positiva. Para el caso del edificio que se encuentra rodeado de edificios de igual o menor altura al que se analizó, sobre la cara de barlovento se presentaron succiones debido a los efectos de vorticidad que generaron las demás estructuras. En la Figura 6.11 se muestra la distribución de fuerzas en ese caso.

BARLOVENTO



a)

b)

Nota: El sombreado en color rojo se refiere a fuerzas de succión. El sombreado en color azul corresponde a empujes.

Figura 6.11. Fuerzas aplicadas sobre la cara barlovento según las presiones obtenidas por CFD: a) Edificios con estructuras aledañas, b) Edificio a campo abierto.

7. CONCLUSIONES

El modelo de calibración CFD resultó ser un 92% preciso con respecto a túneles de viento y un 80% con respecto a muestras tomadas a escala real. La variación de la precisión pudo influir en diversos factores como la presencia de otros edificios aledaños de gran altura, la posible presencia de algunas ventanas abiertas, etc. Sin embargo, los resultados por medio del análisis de CFD resultaron ser un poco más conservadores.

El modelo de turbulencia k- ω -SST en su método de solución simple resultó ser más efectivo para este tipo de análisis. La evaluación para el caso del edificio con estructuras aledañas los coeficientes de presión distan, por lo que sería de ayuda utilizar el CFD como una herramienta, alternativa o de apoyo para evaluar el comportamiento y las acciones del viento, esto debido a las succiones que se pudiesen presentar sobre la estructura, en conjunto con lo establecido en las NTC-2023.

En un modelo a campo abierto con respecto a la norma el resultado de este estudio logró obtener un 96% de precisión, obteniendo resultados más conservadores en comparación al valor más alto sobre la cara de barlovento y con respecto a estudios experimentales como túnel de viento solo se presentó un error de 8% por lo que la hipótesis al tener una precisión mayor al 85% en la obtención de coeficientes de presión en comparación con la NTC- y túnel de viento si se cumple. El CFD podría ser utilizado como una herramienta de apoyo para obtener coeficientes de presión sobre las caras de alguna estructura, al obtener resultados positivos también con respecto a estudios experimentales. Sin embargo, al promediar los valores obtenidos de C_{pe} sobre la cara de barlovento, se deduce que los valores obtenidos subestiman a los que se establecen las NTC-2023.

Para futuras investigaciones, sería importante evaluar otros tipos de modelos de turbulencia, además de lograr considerar las condiciones reales del entorno en el que se practica el estudio para evaluar la influencia de las propiedades

del flujo, como lo es la temperatura, y cómo esta pudiese impactar en la obtención de coeficientes de presión.

8. REFERENCIAS

- Ambrose, Vergun, D., & Salas, R. N. (1999). *Diseño simplificado de edificios para cargas de vientos y sismo*. Limusa.
- ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide—6.1.3 Choosing the Appropriate Mesh Type. (2021).
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node164.htm>
- Baghaei, Khotbehsara, Nobarani, & Bahrami. (2019). Study on wind aerodynamic and flow characteristics of triangular-shaped tall buildings and CFD simulation in order to assess drag coefficient. *Ain Shams Engineering Journal*, 541548(2090–4479). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.008>.
- Batista, M. (2016). Túnel de Viento. *El Tecnológico*, 25(1), 10-11.
- Britcher, C., & Landman, D. (2024). *Wind Tunnel Test Techniques*. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818099-0.00011-2>
- Bustamante, C., Jans, M., & Higuera, E. (2014). El comportamiento del viento en la morfología urbana y su incidencia en el uso estancial del espacio público, Punta Arenas, Chile. *AUS*, 15, 28-33.
- Cheng, Z., Wong, J. K., & Mercan, O. (2025). Evaluating the wind loads on high-rise buildings of various plan dimensions through numerical simulations. *Engineering Structures*, 343(120981).
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120981>
- Coca-Obdulio. (2008). DAÑOS DEL VIENTO EN ZONAS URBANAS. *Arquitectura y Urbanismo*, 29(0258-591X), 64-67.

- Comisión Nacional de Electricidad. (2020). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento*.
- Comisión Nacional del Agua. (s. f.). *Servicio Meteorológico Nacional*. Recuperado 25 de julio de 2025, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/8-smn-general>
- European Committee for Standardization (CEN). (2005). *Eurocode 1: Actions on structures—Part 1-4: General actions—Wind actions*.
- Fernández, M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté.
- Gurtin, M. E. (1986). *An Introduction to Continuum Mechanics*. Academic Press.
- Haan F. L., Wang J., Sterling M., & Kopp G. A. (2024). Experimentally estimating wind load coefficients for tornadoes – An alternative perspective. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 251(105811).
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105811>
- Huang Shenghong, Li Q.S., & Xu Shengli. (2007). Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(5), 612-627.
- Idrissi, A., El Mghari, H., & El Amraoui, R. (2025). CFD simulation advances in urban aerodynamics: Accuracy, validation, and high-rise building applications. *Results in Engineering*, 26(105148).
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105148>

- Ishida, Y., Yoshida, A., Yamane, Y., & Akashi Mochida. (2024). Impact of a single high-rise building on the wind pressure acting on the surrounding low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 250(105742). <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105742>
- Khalil, I., & Lakkis, I. (2023). *Computational Fluid Dynamics: An Introduction to Modeling and Applications* (1st Edition). McGrawHill. https://books.google.com.mx/books/about/Computational_Fluid_Dynamics_An_Introduc.html?id=eMCqEAAAQBAJ&redir_esc=y
- Kikuchi, T., Ohtake, K., Takahashi, Y., Watanabe, H., Hidari, K., Tanabe, S., & Nobe, T. (2024). Comparison of wind pressure coefficients between wind tunnel experiments and full-scale measurements using operational data from an urban high-rise building. *Building and Environment*, 252, 111244. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111244>
- Lee, D. S.-H. (2017). Impacts of surrounding building layers in CFD wind simulations. *Energy Procedia*, 122(1876–6102), 50-55.
- Li, S., Anarak, K. Y., Catarelli, R. A., Guo, Y., Gurley, K. R., & van de Lindt, J. W. (2025). A novel wind tunnel testing method for debris flight in turbulent winds. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 265(106183). <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2025.106183>
- Montazeri, H., & Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60(0360-1323), 137-149.

- Mou, B., He, B.-J., Zhao, D.-X., & Chau, K. (2017). Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(1), 293-309. <https://doi.org/10.1080/19942060.2017.1281845>
- Nuñez, M. A., Fernández, I., López, A., & V. B. Parnás. (2022). Estudio comparativo de coeficientes de presión normativos y experimentales en cubiertas de naves industriales. *Ingeniería y Desarrollo*, 39(02), 296-314.
- Richmond-Navarro G., Fallas-Hernández E., Padilla-Barrientos J. A., & Jiménez-Ceciliano M. (2022). Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo. *Revista Tecnología En Marcha*, 35(3). <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5711>
- Secretaria de Obras and Servicios de la CDMX. (2023). *Normas Técnicas Complementarias para diseño por Viento*.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (Second Edition). Pearson Education Limited.
- White, F. M. (2010). *Mecánica de fluidos*. Mcgraw-Hill.
- Wijesooriya, K., Mohotti, D., Lee, C.-K., & Mendis, P. (2023). A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future. *A Technical Review of Computational Fluid Dynamics (CFD) Applications on Wind Design of Tall*

Buildings and Structures: Past, Present and Future, 74(106828).

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106828>

Xamán. (2016). *Dinámica De Fluidos Computacional Para Ingenieros*. Palibrio.

Zhao, Y., Li, R., Feng, L., Wu, Y., & Gao, N. (2022). Boundary layer wind tunnel tests of outdoor airflow field around urban buildings: A review of methods and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235604031>

Zhou, W., Liu, X., Zhang, L., Liu, W., & Yang, L. (2023). Comparative Study on Anemometer Calibration of Two Kinds of Wind Tunnel Devices with Different Structures. *2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEM)*, 284-288.

9. ANEXOS

Anexo A. Valores de coeficiente de presión sobre las 5 zonas del edificio en estudio.

Cuadro 9.1. Valores de Cpe, sobre las barlovento y sotavento

Z	X	Barlovento			Sotavento		
		N	CA	ZU	N	CA	ZU
48.51	6.9	0.8	0.33	-0.07	-0.4	-0.48	-0.38
56.81	6.9	0.8	0.37	-0.14	-0.4	-0.51	-0.31
65.11	6.9	0.8	0.41	-0.14	-0.4	-0.51	-0.26
73.41	6.9	0.8	0.45	-0.08	-0.4	-0.42	-0.26
81.71	6.9	0.8	0.49	0.02	-0.4	-0.34	-0.29
90.01	6.9	0.8	0.53	0.2	-0.4	-0.3	-0.29
98.31	6.9	0.8	0.56	0.44	-0.4	-0.38	-0.33
106.61	6.9	0.8	0.6	0.58	-0.4	-0.47	-0.36
114.91	6.9	0.8	0.64	0.67	-0.4	-0.54	-0.35
123.21	6.9	0.8	0.67	0.75	-0.4	-0.57	-0.34
131.51	6.9	0.8	0.7	0.8	-0.4	-0.58	-0.46
139.81	6.9	0.8	0.72	0.85	-0.4	-0.58	-0.54
48.51	16.5	0.8	0.44	-0.12	-0.4	-0.46	-0.42
56.81	16.5	0.8	0.48	-0.13	-0.4	-0.47	-0.37
65.11	16.5	0.8	0.53	-0.11	-0.4	-0.47	-0.31
73.41	16.5	0.8	0.57	-0.07	-0.4	-0.45	-0.28
81.71	16.5	0.8	0.61	0.06	-0.4	-0.35	-0.3
90.01	16.5	0.8	0.65	0.23	-0.4	-0.29	-0.34
98.31	16.5	0.8	0.7	0.43	-0.4	-0.36	-0.38
106.61	16.5	0.8	0.73	0.57	-0.4	-0.44	-0.4
114.91	16.5	0.8	0.77	0.67	-0.4	-0.49	-0.4
123.21	16.5	0.8	0.8	0.79	-0.4	-0.52	-0.39

Nota: Z, altura; X, distancia en x; N, Norma; CA, Campo Abierto; ZB, Zona Urbana.

Cuadro 9.1. Continuación...

Barlovento					Sotavento		
Z	X	N	CA	ZU	N	CA	ZU
131.51	16.5	0.8	0.83	0.87	-0.4	-0.54	-0.42
139.81	16.5	0.8	0.83	0.94	-0.4	-0.55	-0.44
48.51	46.5	0.8	0.4	-0.03	-0.4	-0.44	-0.39
56.81	46.5	0.8	0.44	-0.1	-0.4	-0.46	-0.39
65.11	46.5	0.8	0.48	-0.1	-0.4	-0.49	-0.46
73.41	46.5	0.8	0.53	-0.1	-0.4	-0.5	-0.63
81.71	46.5	0.8	0.57	-0.11	-0.4	-0.45	-0.67
90.01	46.5	0.8	0.61	-0.09	-0.4	-0.38	-0.58
98.31	46.5	0.8	0.64	-0.06	-0.4	-0.33	-0.5
106.61	46.5	0.8	0.69	-0.01	-0.4	-0.32	-0.5
114.91	46.5	0.8	0.72	0.09	-0.4	-0.32	-0.46
123.21	46.5	0.8	0.76	0.21	-0.4	-0.34	-0.43
131.51	46.5	0.8	0.78	0.43	-0.4	-0.4	-0.41
139.81	46.5	0.8	0.79	0.68	-0.4	-0.41	-0.41

Nota: Z, altura; X, distancia en x; N, Norma; CA, Campo Abierto; ZB, Zona Urbana.

Cuadro 9.2. Valores de Cpe, sobre las caras laterales del edificio

			ZU		CA	
Z	X	N	L 1	L 2	L 1	L 2
48.51	12.9	-0.80	-0.59	-0.52	-0.21	-0.30
56.81	12.9	-0.80	-0.61	-0.51	-0.39	-0.25
65.11	12.9	-0.80	-0.62	-0.53	-0.74	-0.21
73.41	12.9	-0.80	-0.63	-0.53	-0.86	-0.20
81.71	12.9	-0.80	-0.64	-0.51	-0.75	-0.18

Nota: Z, altura; X, distancia sobre la cara del edificio; N, Norma; CA, Campo Abierto; ZB, Zona Urbana; L1, Lateral 1; L2, Lateral 2.

Cuadro 9.2. Continuación...

Z	X	N	ZU		CA	
			L 1	L 2	L 1	L 2
90.01	12.9	-0.80	-0.65	-0.48	-0.54	-0.48
98.31	12.9	-0.80	-0.65	-0.46	-0.41	-0.66
106.61	12.9	-0.80	-0.65	-0.47	-0.34	-0.50
114.91	12.9	-0.80	-0.64	-0.47	-0.33	-0.53
123.21	12.9	-0.80	-0.64	-0.46	-0.37	-0.49
131.51	12.9	-0.80	-0.63	-0.48	-0.46	-0.48
139.81	12.9	-0.80	-0.62	-0.47	-0.51	-0.45
48.51	23.7	-0.80	-0.58	-0.48	-0.23	-0.22
56.81	23.7	-0.80	-0.61	-0.48	-0.27	-0.19
65.11	23.7	-0.80	-0.63	-0.46	-0.42	-0.15
73.41	23.7	-0.80	-0.64	-0.43	-0.64	-0.19
81.71	23.7	-0.80	-0.65	-0.42	-0.75	-0.31
90.01	23.7	-0.80	-0.66	-0.43	-0.58	-0.63
98.31	23.7	-0.80	-0.66	-0.42	-0.47	-0.61
106.61	23.7	-0.80	-0.65	-0.40	-0.40	-0.47
114.91	23.7	-0.80	-0.64	-0.43	-0.29	-0.52
123.21	23.7	-0.80	-0.62	-0.43	-0.34	-0.55
131.51	23.7	-0.80	-0.61	-0.44	-0.41	-0.49
139.81	23.7	-0.80	-0.60	-0.46	-0.49	-0.48
48.51	32.1	-0.80	-0.56	-0.47	-0.27	-0.20
56.81	32.1	-0.80	-0.56	-0.45	-0.29	-0.17
65.11	32.1	-0.80	-0.58	-0.44	-0.35	-0.14
73.41	32.1	-0.80	-0.59	-0.42	-0.50	-0.17
81.71	32.1	-0.80	-0.62	-0.42	-0.61	-0.47

Nota: Z, altura; X, distancia sobre la cara del edificio; N, Norma; CA, Campo Abierto; ZB, Zona Urbana; L1, Lateral 1; L2, Lateral 2.

Cuadro 9.2. Continuación...

Z	X	N	ZU		CA	
			L 1	L 2	L 1	L 2
90.01	32.1	-0.80	-0.63	-0.41	-0.55	-0.62
98.31	32.1	-0.80	-0.63	-0.40	-0.49	-0.55
106.61	32.1	-0.80	-0.64	-0.39	-0.41	-0.51
114.91	32.1	-0.80	-0.63	-0.41	-0.30	-0.53
123.21	32.1	-0.80	-0.60	-0.40	-0.27	-0.57
131.51	32.1	-0.80	-0.59	-0.41	-0.33	-0.50
139.81	32.1	-0.80	-0.58	-0.43	-0.40	-0.49
48.51	42.9	-0.80	-0.56	-0.47	-0.29	-0.14
56.81	42.9	-0.80	-0.54	-0.46	-0.27	-0.16
65.11	42.9	-0.80	-0.55	-0.44	-0.26	-0.31
73.41	42.9	-0.80	-0.57	-0.43	-0.30	-0.54
81.71	42.9	-0.80	-0.59	-0.43	-0.39	-0.78
90.01	42.9	-0.80	-0.60	-0.42	-0.41	-0.64
98.31	42.9	-0.80	-0.60	-0.40	-0.44	-0.58
106.61	42.9	-0.80	-0.60	-0.39	-0.38	-0.68
114.91	42.9	-0.80	-0.60	-0.38	-0.24	-0.64
123.21	42.9	-0.80	-0.60	-0.37	-0.24	-0.58
131.51	42.9	-0.80	-0.60	-0.38	-0.24	-0.49
139.81	42.9	-0.80	-0.56	-0.41	-0.29	-0.49
48.51	52.5	-0.80	-0.55	-0.48	-0.27	0.02
56.81	52.5	-0.80	-0.57	-0.46	-0.22	-0.22
65.11	52.5	-0.80	-0.58	-0.45	-0.21	-0.32
73.41	52.5	-0.80	-0.61	-0.44	-0.24	-0.04

Nota: Z, altura; X, distancia sobre la cara del edificio; N, Norma; CA, Campo Abierto; ZB, Zona Urbana; L1, Lateral 1; L2, Lateral 2.

Cuadro 9.2. Continuación...

Z	X	N	ZU		CA	
			L 1	L 2	L 1	L 2
81.71	52.5	-0.80	-0.63	-0.44	-0.28	-0.82
90.01	52.5	-0.80	-0.67	-0.43	-0.32	-0.55
98.31	52.5	-0.80	-0.67	-0.41	-0.38	-0.66
106.61	52.5	-0.80	-0.73	-0.40	-0.40	-0.82
114.91	52.5	-0.80	-0.77	-0.38	-0.36	-0.57
123.21	52.5	-0.80	-0.72	-0.38	-0.31	-0.56
131.51	52.5	-0.80	-0.66	-0.39	-0.29	-0.51
139.81	52.5	-0.80	-0.59	-0.42	-0.37	-0.48

Nota: Z, altura; X, distancia sobre la cara del edificio; N, Norma; CA, Campo Abierto; ZB, Zona Urbana; L1, Lateral 1; L2, Lateral 2.

Cuadro 9.3. Valores de Cpe, sobre el techo del edificio

Z	X	N	CA	ZB
12.9	6.9	-0.70	-0.52	-0.52
23.7	6.9	-0.70	-0.52	-0.49
32.1	6.9	-0.70	-0.54	-0.55
52.5	6.9	-0.70	-0.63	-0.42
12.9	16.5	-0.70	-0.47	-0.52
23.7	16.5	-0.70	-0.48	-0.51
32.1	16.5	-0.70	-0.54	-0.53
52.5	16.5	-0.70	-0.59	-0.26
12.9	46.5	-0.70	-0.49	-0.62
23.7	46.5	-0.70	-0.49	-0.52
32.1	46.5	-0.70	-0.53	-0.53
52.5	46.5	-0.70	-0.64	-0.28

Nota: Z, altura; X, distancia en x; N, Norma; CA, Campo Abierto; ZB, Zona Urbana.