

Obtención de coeficientes de presión en edificios altos por dinámica de fluidos computacional (CFD)

*Obtaining pressure coefficients
in tall buildings using computational
fluid dynamics (CFD)*

Citlali Villalobos García 

Enrique Rico García* 

Luis Francisco Pérez Moreno 

Iván Fermín Arjona Catzim 

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

*ricog@uaq.mx

DOI: [10.61820/dcua.2395-8847.1973](https://doi.org/10.61820/dcua.2395-8847.1973)

Fecha de recepción: 16 de junio del 2025

Fecha de aceptación: 11 de noviembre del 2025

Resumen

En la actualidad, la dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta útil que forma parte de la industria en general. Se emplea para el mantenimiento, diseño, uso y análisis de equipos o estructuras que están en contacto con algún fluido, como es el caso del viento en los edificios altos. Además, fomenta la innovación en la ingeniería con la ayuda de simuladores que facilitan el estudio del comportamiento de los flujos. Esta investigación se realizó con la finalidad de evaluar la precisión de las simulaciones CFD con respecto a estudios experimentales, tales como pruebas en túneles de viento y a escala real. Los datos utilizados para este análisis proceden de Kikuchi et al. (2024), quienes tomaron muestras de las presiones del viento sobre las caras de un edificio alto. Con base en ello, se diseñó un modelo mediante simulaciones en CFD y los resultados se compararon con los obtenidos experimentalmente. Se encontró que el mallado polyhexacore reduce el costo computacional y alcanza un 92% de precisión en comparación con lo que establecen los estudios experimentales, por lo que constituye un instrumento eficiente para el análisis del viento en edificios.

Palabras clave: Ansys Fluent, CFD, coeficientes de presión, efectos del viento, estudios experimentales, rugosidad del terreno



Abstract

Computational fluid dynamics (CFD) is a useful tool that is currently integrated into the industry at large. It is used for maintaining, designing, operating, and analyzing equipment or structures in contact with fluids, such as wind impacting tall buildings. Additionally, it encourages engineering innovation through simulators that help studying flow behavior. This work was conducted to assess the accuracy of CFD simulations compared to experimental studies, such as wind tunnel tests and full-scale studies. Based on data from a study by Kikuchi et al. (2024), where wind pressure samples were taken from the surfaces of a tall building, a model was created using CFD simulations, and the results were contrasted with the experimental data. The findings show that polyhexacore meshing reduces computational costs and attains 92% accuracy relative to experimental studies, which signals its efficiency in wind assessments in buildings.

Keywords: Ansys Fluent, CFD, experimental studies, pressure coefficients, terrain roughness, wind effects

Introducción

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una rama de la mecánica de fluidos basada en el análisis del comportamiento de los flujos mediante simulaciones realizadas en computadoras (Versteeg y Malalasekera, 2007). Está directamente relacionada con diversas disciplinas: las ciencias computacionales, al utilizar software y programación para analizar el comportamiento de un fluido en movimiento a través del tiempo y el espacio; con las matemáticas, mediante ecuaciones asociadas con las leyes de la conservación de masa, *momentum* (movimiento) y energía del fluido; con modelos matemáticos para el proceso de discretización; y con la ingeniería dedicada a la mecánica de fluidos (Fernández Oro, 2012).

Hoy en día, las simulaciones con CFD se utilizan en varias industrias para analizar el comportamiento de un fluido, además de que son útiles en el diseño de aparatos o estructuras, lo que influye en la innovación y evolución de la tecnología en la ingeniería (Fernández Oro, 2012).

El CFD está basado en la resolución de ecuaciones de Navier-Stokes mediante procedimientos numéricos discretos. Entre los modelos matemáticos aplicados se encuentran el método de volumen finito, que divide el dominio en volúmenes discretos y conserva las cantidades físicas en cada uno; el de diferencias finitas, que aproxima las derivadas mediante diferencias entre valores en puntos de una malla; y el de elementos finitos.

Estos modelos funcionan con base en el análisis de ecuaciones diferenciales que permiten crear un mallado cuyos nodos unen cada elemento a través de un medio continuo. Se conoce como discretización al proceso de transición de un medio continuo a un medio finito utilizando elementos geométricos (Xamán y Gijón-Rivera, 2016).

Debido a los avances tecnológicos, ahora es posible realizar análisis mediante simulaciones de flujos por CFD en lugar de recurrir a costosos estudios experimentales. Asimismo, la falta de laboratorios de aerodinámica con túneles de viento –alrededor de 34 en todo el mundo– ocasiona que este tipo de ensayos experimentales sean poco factibles (Cruz Gavilán *et al.*, 2020; Khalil y Lakkis, 2023).

Las simulaciones CFD presentan alta complejidad al intentar predecir las acciones o comportamientos reales del viento, ya que exponen situaciones desde el punto de vista de la aerodinámica urbana (Baghaei Daemei *et al.*, 2019). Se han realizado estudios que comparan los resultados por medio de CFD y los obtenidos por medio de túneles de viento, en los que la respuesta de la simulación ha sido satisfactoria cuando se replica el comportamiento turbulento del flujo. La desventaja de los estudios de túneles de viento es que los instrumentos utilizados deben estar perfectamente calibrados, sin que exista algún tipo de desviación instrumental; de lo contrario, esto generaría un margen de error y no se obtendrían datos precisos sobre las acciones del viento (Samaniego *et al.*, 2021). Si bien el CFD requiere un alto conocimiento del comportamiento del flujo mediante modelos matemáticos, puede aproximarse a su turbulencia real.

Baghaei Daemei *et al.* (2019) analizaron el comportamiento de diversos edificios según su forma, enfocándose en el efecto del arrastre aerodinámico en zonas urbanas y cómo varía la velocidad del viento por niveles. Se llevaron a cabo siete simulaciones en condiciones comparables y se incorporó un coeficiente de arrastre que dependía de la forma del edificio. Las simulaciones se realizaron mediante CFD, donde los resultados dependían de la forma de los edificios, y se determinó que fueran mediante Flow Design y Ansys Fluent, que solo generaban un 6% de margen de error en comparación con pruebas experimentales. Esto permite verificar los métodos tradicionales de diseño de edificios frente al viento.

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 la

Tabla 1, se muestran algunas de las investigaciones que toman en cuenta diferentes formas, tamaños y condiciones de la zona, tanto ambientales como topográficas.

Tabla 1.

Datos recolectados a través del estado del arte

Título	Comentario	Referencia
Simulación CFD de coeficientes de presión inducidos por el viento en edificios con y sin balcones: validación y análisis de sensibilidad.	Los balcones reducen notablemente el impacto del viento en las caras de los edificios.	Montazeri y Blocken (2013)
Comparación de coeficientes de presión del viento entre experimentos en túnel de viento y mediciones a escala real utilizando datos operativos de un edificio urbano de gran altura.	Los resultados difieren por factores como las adecuaciones en la escala de la zona y en las propiedades del flujo.	Kikuchi <i>et al.</i> (2024)
Estimación experimental de los coeficientes de carga del viento para tornados: una perspectiva alternativa.	Las altas turbulencias complican el análisis y limitan al CFD cuando se intenta replicar tornados.	Haan <i>et al.</i> (2024)
Coeficientes de presión externa en un edificio de gran altura atípico: simulación informática y mediciones en un túnel de viento.	Considera la energía cinética y turbulencia, con un error < 5% en condiciones lisas. La rugosidad del terreno juega un papel importante en CFD, al igual que en los túneles de viento.	Hubova <i>et al.</i> , (2017)
Impacto de un edificio de gran altura sobre la presión del viento que actúa sobre los edificios de poca altura circundantes.	Se simularon remolinos. Destaca la importancia de considerar edificios adyacentes.	Ishida <i>et al.</i> (2024)
Una revisión técnica de las aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional (CFD) en el diseño eólico de edificios y estructuras altas: pasado, presente y futuro.	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 <i>et al.</i> (2023)

Fuente: elaboración propia

La intención del presente trabajo es evaluar si las simulaciones por CFD pueden emplearse como herramientas complementarias para obtener coeficientes de presión que contribuyan de forma efectiva al diseño por viento en edificios. Para ello, se compararon los resultados obtenidos por CFD con los datos procedentes de estudios experimentales.

El interés de obtener coeficientes de presión cercanos a los que se observan en realidad radica en que se utilizan en el análisis de diseño por viento de estructuras para determinar las presiones ejercidas sobre las caras de un edificio. Se define el coeficiente de presión como la relación entre la presión en un punto y la presión dinámica del flujo libre, a una altura de referencia respecto al suelo.

Materiales y métodos

La metodología general para realizar las simulaciones CFD se describe en la Figura 1.

Figura 1.

Metodología general del CFD



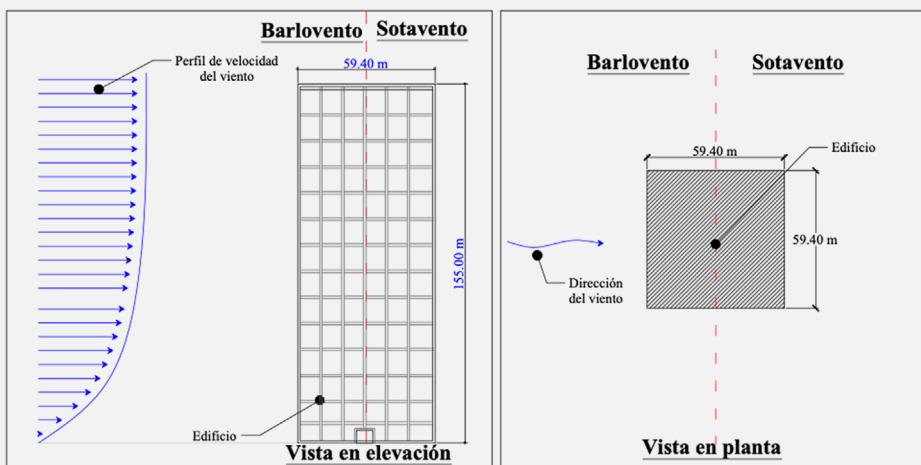
Fuente: basado en Xamán y Gijón-Rivera (2016)

Datos generales

Los datos generales para llevar a cabo este estudio se establecieron en *Kikuchi et al. (2024)*, donde se tomaron 129 puntos en las cuatro caras de un edificio. A partir de los datos obtenidos, se elaboró un modelo mediante CFD en Ansys Fluent Student. Las medidas del edificio son: 59.4 m por 59.4 m de cada lado, con una altura de 155 m (Figura 2), ubicado en zona urbana, según el plano del proyecto PLATEAU publicado por el Ministerio de Tierra, Infraestructura, Transporte y Turismo en Japón.

Figura 2.

Dirección del flujo y dimensiones geométricas
del elemento de estudio



Fuente: Kikuchi et al. (2024)

El viento no se desplaza de manera lineal; en realidad, presenta una forma hiperbólica que, en otras ocasiones, ha sido objeto de estudio por la complejidad de su comportamiento. Este fenómeno se conoce como capa límite, una característica que aparece en todo fluido viscoso. La capa límite se desarrolla sobre una zona sólida y genera fricción con el fluido al no ser una superficie deslizante. Esto provoca que la velocidad del fluido, y en este caso del viento, varíe de cero a la velocidad máxima, alcanzada cuando el flujo se vuelve estable y no presenta perturbaciones (White, 2010).

El perfil de velocidad del viento se obtuvo por medio de la fórmula de Archibald, emitida por World Meteorological Organization (WMO) en 1960 (Guevara Díaz, 2013):

$$V_z = V_{ref} \left(\frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

donde V_z representa la velocidad del viento a estimar a una altura Z sobre el nivel del suelo (m); V_{ref} corresponde a la velocidad de referencia, es decir, la velocidad del viento observada a una altura preestablecida –denominada altura de referencia (Z_{ref})–, generalmente 10 m o 2 m, aunque puede ser otra; y α que equivale al exponente de rugosidad y varía entre 0.0 y 0.40 según el tipo de rugosidad del terreno (Tabla 2).

Tabla 2.

Valores del exponente de rugosidad

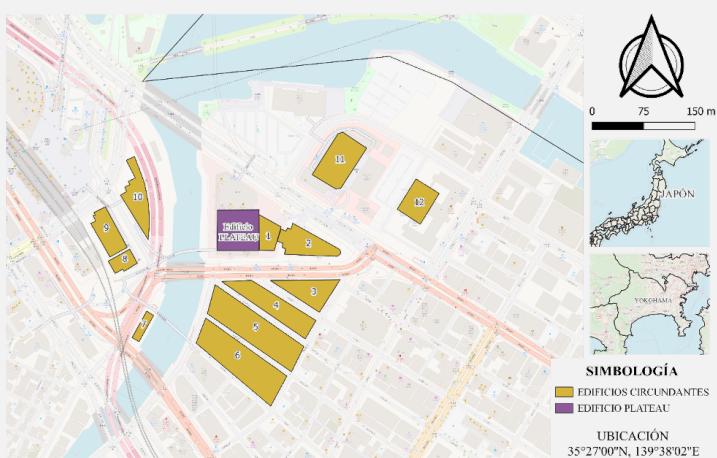
Zona	Valores
Agua	0.13
Césped	0.14 a 0.16
Cultivos y arbustos	0.20
Bosques	0.25
Zonas urbanas	0.40

Fuente: Guevara Díaz (2013)**Modelo de CFD**

El análisis se efectuó mediante el software Ansys Fluent Student, en el cual se definió la geometría del objeto de estudio, a partir del subprograma SpaceClaim, con las medidas previamente establecidas, de manera que se formó un objeto sólido. Para elaborar el modelado de la zona en la que se encuentra el edificio (ciudad de Yokohama, Japón), se investigó su ubicación exacta por medio de Google Earth y se obtuvieron las medidas aproximadas de los edificios aledaños. En la Figura 3, se muestra la distribución de los 12 edificios que influyen en el comportamiento y la distribución de las presiones sobre la cara del edificio (objeto de estudio).

Figura 3.

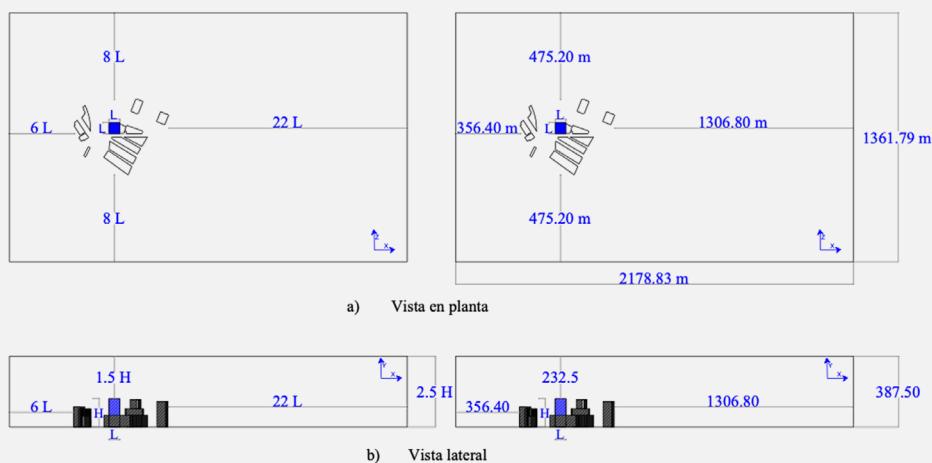
Distribución de edificios aledaños

**Fuente:** elaboración propia

Posteriormente, se elaboró la representación del dominio, la cual desempeña un papel importante en la simulación del desarrollo natural del flujo. Este se caracteriza por tener una geometría cúbica o rectangular prismática, cuyo tamaño se define en función de las dimensiones del objeto de estudio (Figura 4).

Figura 4.

Dimensiones del dominio: $H = 155$ m (altura del edificio); $L = 54.9$ m (secciones del edificio)

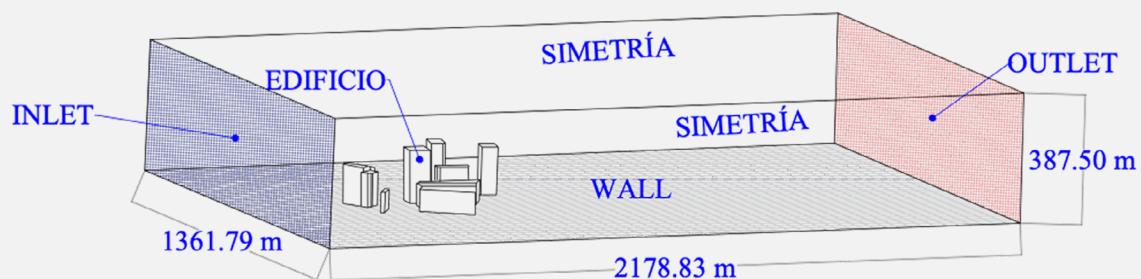


Fuente: modificado de Huang et al. (2007)

Asimismo, en el entorno donde se haría el análisis, se llevó a cabo la configuración inicial y las condiciones de frontera, se determinó la zona de entrada (*inlet*) y salida (*outlet*) del flujo, así como el objeto de estudio (Figura 5).

Figura 5.

Configuración del modelo



Fuente: elaboración propia

Durante esta etapa se estableció el mallado, uno de los procedimientos más importantes en el análisis mediante simulaciones.

Para este caso, se usaron dos tipos de mallas, con base en los parámetros expuestos en la Tabla 3, para evaluar la solución obtenida y verificar los resultados frente a los datos del estudio realizado por Kikuchi *et al.* (2024).

Tabla 3.

Parámetros para el mallado

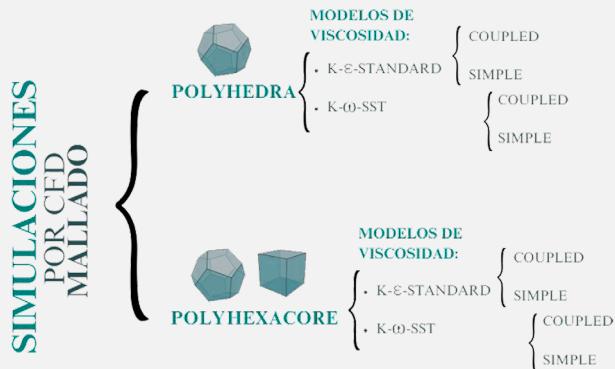
Malla	Tamaño de la cara	Regiones de refinamiento	Malla global	Calidad ortogonal
Polyhedra	1.5 m	7.75 m	12.2 m	0.45
Polyhexacore	1.1 m	3 m	10 m	0.46

En total, se realizaron 16 simulaciones para evaluar los dos tipos de malla. La principal diferencia es que *polyhedra*, al ser una malla no estructurada, se adapta mejor a bordes irregulares; mientras que *Polyhexacore* combina elementos de una malla estructurada con hexaedros –lo que disminuye el costo computacional al reducir el número de elementos sobre el dominio– y una malla no estructurada con *Polyhedros*, por lo que cumple con las características de adaptarse a las formas irregulares (Figura 6). En ambos casos se estableció una calidad ortogonal mayor a 0.4, considerada como buena (Fatchurrohman y Chia, 2017).

Para la selección del modelo de viscosidad se eligió el $k-\varepsilon$ -standard, debido a que es uno de los más utilizados por su simplicidad; además, se emplea para flujo turbulento y no requiere de un alto costo computacional. También se seleccionó el $k-\omega$ -SST, puesto que su desempeño se basa en la confiabilidad de perfiles aerodinámicos y en obtener datos precisos cercanos o sobre la pared (Ansys, 2024).

Figura 6.

Selección de la muestra



Fuente: elaboración propia

A continuación, se explicarán las ecuaciones aplicadas para calcular la intensidad de la turbulencia en cada una de las simulaciones (Huang *et al.*, 2007):

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

donde k (m^2/s^2) representa la energía cinética turbulenta por unidad de masa asociada a las fluctuaciones de velocidad del fluido, es decir, los movimientos caóticos y desordenados que caracterizan la turbulencia.

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

donde ϵ (m^2/s^3) equivale a la tasa de disipación de energía turbulenta. Expresa la velocidad a la que la energía cinética contenida en los movimientos turbulentos se transforma en calor debido a la acción de la viscosidad del fluido.

$$\omega = \frac{\epsilon}{kC\mu} \quad (4)$$

donde ω es igual a la frecuencia específica de disipación (1/s). Se utiliza para el modelo de $k-\omega$ y simboliza la frecuencia con la que la energía cinética turbulenta se disipa en el flujo. Y por último:

$$u^{*0.4} = \frac{V_{ref}}{In\left(\frac{Z_0+Z_{ref}}{Z_0}\right)} \quad (5)$$

donde u^* expresa la velocidad de fricción (m/s) y Z_0 la altura de rugosidad del terreno. La ecuación permite obtener la velocidad ficticia con respecto a la rugosidad del terreno a una altura de referencia. Indica la intensidad del esfuerzo cortante que un fluido ejerce sobre una superficie, especialmente en flujos turbulentos cerca de paredes.

En la Tabla 4 se muestran los datos utilizados para realizar las simulaciones con CFD, dos de los cuales –velocidad de referencia (V_{ref}) y altura de referencia (Z_0)– fueron tomados de Kikuchi *et al.* (2024). La velocidad de entrada es respecto al oeste y la altura de rugosidad se obtuvo de Guevara Díaz (2013), donde el tipo de terreno se clasifica como *skimming*, correspondiente a una zona urbana con edificios altos. La presión de salida utilizada es 0.0 Pa para observar cómo se desarrolla el

fluido a lo largo de su trayectoria en el dominio, mientras que la constante de viscosidad dinámica del fluido ($C\mu$) es 0.09, valor considerado para las simulaciones con un modelo $k-\varepsilon$ o $k-\omega$ (Montazeri y Blocken, 2013).

Tabla 4.

Datos de entrada para cada simulación

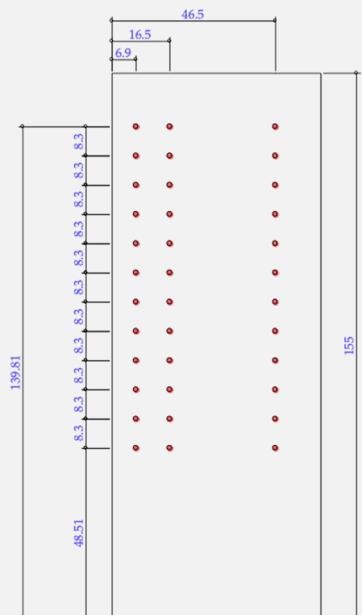
V_{ref}	Z_{ref}	Z_0	Presión de salida	Condiciones de pared	C
1.51 m/s	155 m	1 m	0.0 Pa	No deslizamiento	0.09

Fuente: elaboración propia a partir de Kikuchi *et al.* (2024)
y Montazeri y Blocken (2013)

En la Figura 7, se muestra la ubicación de los 36 puntos de interés en barlovento (Kikuchi *et al.*, 2024), con una dirección de incidencia del viento desde el oeste. Esto se hizo con el fin de comparar los mismos puntos entre los coeficientes de presión obtenidos a partir de los estudios experimentales y los valores arrojados por CFD.

Figura 7.

Ubicación de los 36 puntos de interés sobre
la cara barlovento del edificio



Fuente: Kikuchi *et al.* (2024)

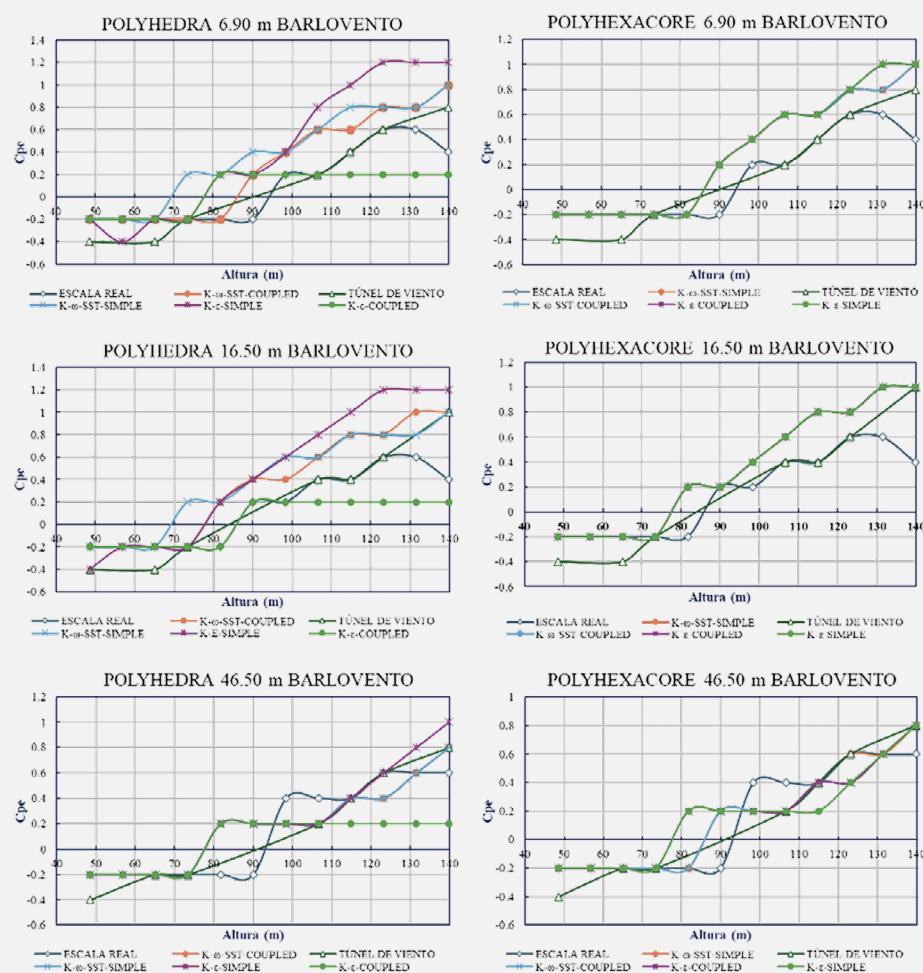
Resultados y discusión

Se elaboró una gráfica comparativa para evaluar los resultados obtenidos por medio de los dos tipos de mallado: *polyhedra* y *polyhexacore*. Asimismo, se analizó qué modelo de viscosidad se desempeñaba mejor. Para ello, se evaluaron el modelo $k-\varepsilon$ estándar y el modelo $k-\omega$ -SST, en sus métodos de solución simple y acoplada. En la Figura 8 se observa que la simulación $k-\omega$ -SST simple, con una malla *polyhexacore*, alcanza una precisión del 80% en los coeficientes de presión obtenidos a escala real. Sin embargo, a partir de 100 m de altura, los coeficientes obtenidos mediante simulaciones son mayores que los obtenidos en los estudios experimentales, aunque estos últimos son conservadores.

Figura 8.

Comparación de los coeficientes de presión sobre barlovento con distintos modelos de turbulencia y alturas:

$k-\varepsilon$ -standard-SIMPLE, $k-\varepsilon$ -standard-COUPLED, $k-\omega$ -SST-SIMPLE y $k-\omega$ -SST-COUPLED
(izquierda: *polyhedra*; derecha: *polyhexacore*)



Fuente: elaboración propia

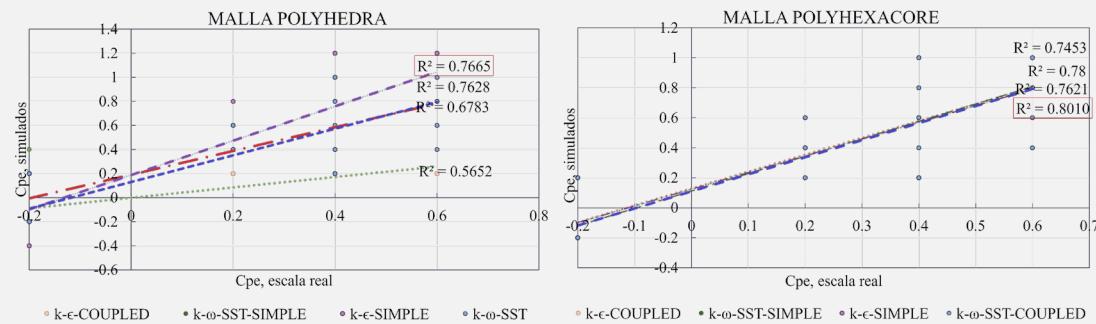
Cuando se obtuvieron los coeficientes de determinación (R^2), se encontraron mejores resultados en contraste con los del túnel de viento, como se muestra en la Figura 9 y la Figura 10. Este coeficiente se refiere a la comparación entre dos valores y evalúa la precisión o la similitud entre ambos: entre más cercano a 1, mayor es la correspondencia. En este caso, la comparativa se realizó entre los coeficientes de presión obtenidos en túnel de viento y en muestras a escala real, frente a los obtenidos por CFD. En total se efectuaron 16 simulaciones y se consideraron los valores de cada una para equipararlos con los datos extraídos de los estudios experimentales.

Los resultados indican que la malla *polyhedra*, aunque requiere un menor costo computacional, presenta algunas deficiencias para obtener coeficientes de presión sobre las paredes de una estructura, ya que sus valores se alejan de los obtenidos en las muestras experimentales. Además, se observa que el modelo de viscosidad $k-\omega$ -SST-SIMPLE arroja valores más cercanos a los datos de estudios a escala real y de túneles de viento, independientemente del tipo de malla, con una precisión del 80% y 92%, respectivamente. Por otro lado, el modelo $k-\varepsilon$ produce resultados más conservadores, pero también más alejados de los obtenidos en estudios experimentales, con una precisión del 76% para la malla *polyhedra* en ambos métodos de solución, en comparación con muestras a escala real, y del 87% en contraste con datos obtenidos por túnel de viento.

Con respecto al modelo $k-\omega$ -SST, en su método de solución SIMPLE, se muestra que se acopla mejor a este tipo de estudios, donde la velocidad y la turbulencia son altas. Adicionalmente, en relación con otros métodos de solución como LES, requiere un menor costo computacional, puesto que presenta errores no mayores al 7% con una malla *polyhexacore*.

Figura 9.

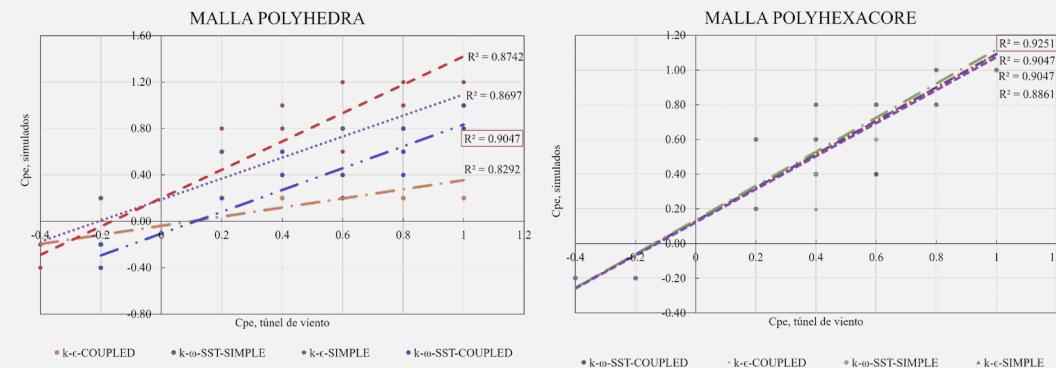
Coeficiente de determinación (R^2) de los resultados con modelos de turbulencia: $k-\varepsilon$ -standard-SIMPLE, $k-\varepsilon$ -standard-COUPLED, $k-\omega$ -SST-SIMPLE y $k-\omega$ -SST-COUPLED en comparación con datos obtenidos a escala real



Fuente: elaboración propia

Figura 10.

Coeficiente de determinación (R^2) de los resultados con modelos de turbulencia: $k-\varepsilon$ -standard-SIMPLE, $k-\varepsilon$ -standard-COUPLED, $k-\omega$ -SST-SIMPLE y $k-\omega$ -SST-COUPLED en comparación con datos obtenidos de túnel de viento



Fuente: elaboración propia

Las variaciones en los coeficientes de presión probablemente se debieron a que no se contaba con las medidas y coordenadas reales de los edificios aledaños, lo cual representó un problema para la investigación. Tampoco fue posible replicar toda la zona urbana con un radio de 3 km, sino que únicamente se modelaron los edificios colindantes que podían influir significativamente en la obtención de los resultados. Esto se hizo porque, al alcanzar la altura de las edificaciones aledañas –que impedían el paso directo del viento–, los coeficientes de presión se alejaban de los datos experimentales.

Por otro lado, es posible que la calidad ortogonal del malla haya influido en la precisión de los resultados, por lo que se deberían realizar simulaciones con una malla de mejor calidad, aunque esto requiera un mayor costo computacional. Cabe mencionar que en este estudio no fue posible hacerlo debido a que la versión estudiantil de Ansys Fluent limita el número de elementos que se pueden utilizar.

Entre las causas de precisión con respecto a los datos por medio de escala real, influyó la velocidad de referencia obtenida por la estación meteorológica. En el artículo donde se extrajeron los datos base, se menciona que estos se tomaron de la estación más cercana; sin embargo, aunque las velocidades son similares por la cercanía, no son iguales, puesto que influyen las perturbaciones existentes sobre la zona. Prueba de ello es la similitud de los resultados obtenidos en túnel de viento, que presentaron un error del 7%.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el túnel de viento y las simulaciones por CFD consideran que las condiciones de las paredes son estructuras cerradas, sin contemplar las presiones internas ni la posible existencia de aberturas que podrían influir en la obtención de los coeficientes de presión sobre la pared exterior.

Conclusiones

Para realizar pruebas de viento en edificios, este estudio demuestra que se puede considerar las simulaciones mediante CFD, debido a su similitud con los resultados obtenidos en estudios experimentales en cuanto a la obtención de coeficientes de presión. Sin embargo, para que los resultados de las simulaciones sean confiables, es necesario contar con los recursos computacionales necesarios, así como con las dimensiones reales del objeto y de la zona de estudio. De esta manera, se lograría que las perturbaciones mediante simulaciones CFD sean mínimas.

Referencias

- Ansys. (2024). 4. Turbulencia. Ansys Fluent R2 2024. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th_sec_turb_kw_sst.html
- Baghaei Daemei, A., Khotbehsara, E.M., Nobarani, E.M. y Bahrami, P. (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*, 10(3), 541-548. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.008>
- Cruz Gavilán, Y., Valdés Hernández, P.A., Laffita Leyva, A., Gómez Águila, M.V. y Chairey, C.M. (2020). Computational fluid dynamics: review

- and analysis of applications in engineering. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(4).
- Fatchurrohman, N. y Chia, S.T. (2017). Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: simulation approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012060>
- Fernández Oro, J.M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Editorial Reverté.
- Guevara Díaz, J.M. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra Nueva Etapa*, 29(46), 81-101.
- Haan F.L., Wang J., Sterling M. y Kopp G.A. (2024). Experimentally estimating wind load coefficients for tornadoes – An alternative perspective. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 251(105811). <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105811>
- Huang S., Li Q.S. y Xu, S. (2007). Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(5), 612-627. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.008>
- Hubova, O., Macak, M., Konecna, L. y Ciglan, G. (2017). External pressure coefficients on the atypical high-rise building – computing simulation and measurements in wind tunnel. *Procedia Engineering*, 190, 488-495. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.368>
- Ishida, Y., Yoshida, A., Yamane, Y. y Akashi M. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105742>
- Khalil, I. y 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=eMCqEAAQBAJ&redir_esc=y
- Kikuchi, T., Ohtake, K., Takahashi, Y., Watanabe, H., Hidari, K., Tanabe, S. y 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>
- Montazeri, H. y Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60, 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.012>
- Samaniego, G.F., Guerrero, B. y Antamba, J.F. (2021). Análisis del diseño aerodinámico de un alerón preparado para competencia utilizando simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (DFC). *Información tecnológica*, 32(2), 19-28.

- Versteeg, H.K. y Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method* (2nd Edition). Pearson Education Limited.
- White, F.M. (2010). *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill.
- Wijesooriya, K., Mohotti, D., Lee, C.-K. y Mendis, P. (2023). A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: past, present and future. *Journal of Building Engineering*, 74(106828). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106828>
- Xamán. J. y Gijón-Rivera, M. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio.