

Correlación y métricas en la validación de CFD con mediciones in situ para el análisis del recurso eólico urbano

Yuri Sara Hernández Demesa¹, Osvaldo Rodríguez Hernández¹ y José Gustavo Hernández Yepes¹¹ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México. Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Temixco, 62580, Morelos, México

Resumen

El incremento de la demanda energética ha intensificado el uso de combustibles fósiles, aumentando la contaminación ambiental. Entre las alternativas sostenibles, la energía eólica tiene alto potencial; sin embargo, su aprovechamiento en entornos urbanos es limitado debido a la complejidad del viento en áreas densamente edificadas. Este estudio tiene como objetivo desarrollar y evaluar una metodología basada en CFD, validada mediante mediciones in situ, para reproducir las condiciones de viento en entornos urbanos con topografía accidentada y analizar el recurso eólico urbano. La metodología permite visualizar áreas con concentración de viento, facilitando la microlocalización de aerogeneradores de baja potencia. Como parte del desarrollo, se utilizó el modelo de turbulencia estándar $k-\varepsilon$ para modelar el perfil de viento, generado a partir de mediciones LiDAR. Los datos del sensor ultrasónico se compararon con la potencia registrada por el aerogenerador instalado en la misma ubicación, evaluando la interacción del viento con la turbina. Además, los resultados del sensor ultrasónico se validaron con las velocidades de viento obtenidas mediante CFD, cuya alta resolución espacial permite capturar variaciones locales y zonas específicas de concentración de viento. La concordancia entre simulaciones y mediciones se evaluó mediante coeficientes de correlación y métricas estadísticas (MAE, RMSE y MAPE), obteniéndose $r = 0.953$ para CFD–sensor ultrasónico y $r = 0.914$ para CFD–aerogenerador, mostrando alta correspondencia. Estos hallazgos respaldan el uso de CFD complementado con mediciones experimentales como herramienta confiable para caracterizar el recurso eólico urbano y facilitar la planificación estratégica de la ubicación de aerogeneradores de baja potencia.

Keywords: Energía eólica, Zonas Urbanas, Sistema LiDAR, Simulación CFD

†Autor de correspondencia: Yuri Sara Hernández Demesa *Correo electrónico:* hedeuy@ier.unam.mx

DOI: <https://doi.org/10.59730/rer.v12n57a4>

Recibido: 13 de agosto, 2025 Revisado: 9 de septiembre, 2025 Aceptado: 28 de septiembre, 2025 Publicado: 2 de octubre, 2025

1. Introducción

El crecimiento sostenido de la demanda energética a nivel mundial ha intensificado el uso de combustibles fósiles, generando un aumento significativo de emisiones de gases de efecto invernadero y agravando los problemas de contaminación ambiental IPCC (2023), Agency (2024). Esta situación ha impulsado el desarrollo y uso de fuentes renovables como la solar, hidráulica y eólica, con el objetivo de avanzar hacia la descarbonización del sector eléctrico. Si bien la energía eólica se ha consolidado como una de las alternativas más competitivas en entornos rurales y marinos, la implementación en áreas urbanas sigue siendo limitada. Esto se debe a la complejidad aerodinámica que generan los edificios y otras estructuras, que modifican la distribución y dirección del viento, dificultando una estimación precisa del recurso disponible Mei et al. (2025), Talwar & Yuan (2024), Wang et al. (2025). En estos casos, es necesario emplear herramientas capaces de representar con alta resolución espacial y temporal el comportamiento del viento en entornos construidos. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta fiable para modelar el viento en microescala, permitiendo estudiar las variaciones de velocidad, turbulencia y temperatura con un nivel de detalle que otros métodos no logran resolver Toja-Silva et al. (2018), Wang et al. (2018), Baitureyeva et al. (2025), Chu & Wang (2025), Li et al. (2024). Los modelos de turbulencia RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes) más empleados, el modelo estándar $k-\varepsilon$ destaca por su eficiencia y bajo costo computacional, siendo ampliamente utilizado en simulaciones de flujo urbano y la caracterización del recurso eólico en condiciones reales Wang et al. (2025), Toja-Silva et al. (2018). Mientras que el modelo $k-\omega$ SST ofrece mejoras en la captura de efectos cercanos a superficies y en condiciones de estratificación térmica, incrementando la precisión en la simulación de flujos complejos Townsend et al. (2024), Streichenberger et al. (2021); no obstante, su costo computacional es mayor. El modelo LES (Large Eddy Simulation) se considera especialmente eficaz para la resolución de flujos turbulentos cercanos a la pared y en regímenes altamente dinámicos, caracterizados por desprendimientos de vórtices,

separación de la capa límite y fuertes inestabilidades temporales (Kostadinović et al., 2023). Sin embargo, su aplicación suele estar limitada debido al elevado costo computacional que requiere. A pesar de esto, el modelo $k-\varepsilon$ continúa siendo una opción viable y ampliamente usada por su precisión y eficiencia. La combinación y comparación de estos modelos facilita una mejor comprensión del comportamiento del viento y la validación de resultados con mediciones in situ obteniendo errores RMS considerablemente bajos Streichenberger et al. (2021). Asimismo, en zonas urbanas reales, la integración de mediciones LiDAR y estaciones meteorológicas ha permitido validar perfiles de viento y evaluar el potencial eólico en zonas de interés Wang et al. (2018), Nugraha et al. (2025). Este trabajo combina simulaciones CFD con validación experimental a partir de un sensor ultrasónico y un sistema LiDAR, centrándose en el análisis del flujo eólico en entornos urbanos complejos. Este enfoque permite no solo evaluar con mayor precisión el recurso eólico, sino también identificar zonas específicas óptimas para la instalación de aerogeneradores. La topografía natural y la estratificación térmica ejercen una influencia notable sobre el comportamiento del viento a nivel peatonal y el microclima urbano Townsend et al. (2024), Streichenberger et al. (2021). La modelación de estos factores mediante CFD ofrece herramientas valiosas para optimizar tanto el diseño urbano como la generación energética local Mei et al. (2025), Talwar & Yuan (2024). Además, la inclusión de fenómenos como estelas y sus efectos en parques eólicos ha permitido entender mejor la interacción entre turbinas y el impacto en la producción energética Tabib et al. (2015). En este sentido, el modelado tridimensional con CFD se vuelve no solo útil, sino esencial, para identificar ubicaciones óptimas en azoteas o paredes, donde los instrumentos tradicionales de medición no son suficientes para captar la complejidad espacial del flujo. El objetivo de este estudio es evaluar la confiabilidad de las simulaciones CFD del flujo de viento en un entorno urbano complejo mediante su validación con datos in situ de un sensor ultrasónico y mediciones LiDAR, y aplicar este enfoque para identificar zonas óptimas para la instalación de aerogeneradores de pequeña escala. La ventaja de CFD radica en su capacidad para

resolver con alta resolución espacial el flujo de viento incluso entre edificios, permitiendo detectar concentraciones locales de viento que otras herramientas con menor resolución no pueden capturar. Este enfoque contribuye al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles en entornos urbanos.

2. Metodología

El procedimiento CFD aplicado en este trabajo se estructuró en metodología experimental y metodología numérica, complementadas por tres etapas principales: pre-proceso, simulación y pos-proceso, como se muestra en la Figura 1. Este proceso metodológico, ampliamente empleado en estudios de dinámica de fluidos, fue adaptado para integrar mediciones experimentales in situ obtenidos del sensor ultrasónico y modelos de entrada personalizados mediante datos LiDAR, con el fin de evaluar el comportamiento del viento en un entorno urbano complejo. La aportación de este enfoque radica en la combinación y validación de las simulaciones numéricas con mediciones reales en el centro sur de México, lo que permite una caracterización más confiable del recurso eólico.

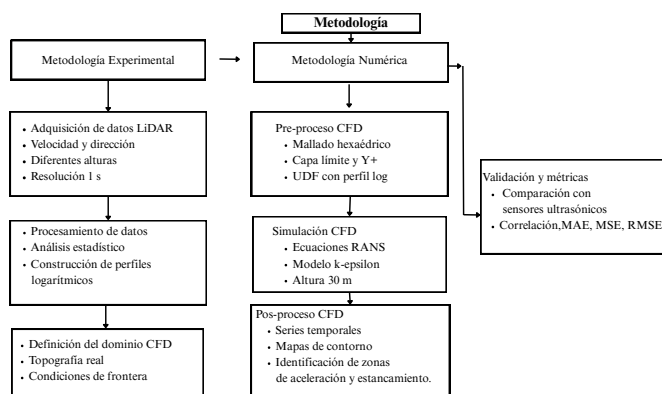


Figura 1. Flujo metodológico del estudio, integración de metodología experimental y numérica

2.1. Metodología experimental

Esta primera etapa comenzó con el tratamiento y análisis estadístico de los datos experimentales obtenidos del sistema LiDAR ubicado al noreste del terreno, que proporcionó mediciones de velocidad y dirección del viento a diferentes alturas sobre el nivel del terreno, con una resolución temporal de 1 segundo. En este trabajo, el término “velocidad del viento” se emplea de manera convencional para referirse a la magnitud (rapidez) del vector velocidad. A partir de estos datos, se construyó un perfil logarítmico de velocidad del viento, considerando las características del terreno. Los datos experimentales corresponden al mes de marzo de 2023, seleccionado porque durante ese periodo se registraron las velocidades más altas dentro del intervalo de enero a junio. Con base en esta información, se definió el dominio computacional para la simulación CFD, el cual reflejó la topografía real del terreno urbano en estudio. Las condiciones de frontera se establecieron de la siguiente manera: la entrada de flujo en el límite sur (inlet), la salida en el norte (outflow), terreno (wall) y las superficies laterales y la parte superior del dominio configuradas como simetrías (symmetry) para representar un entorno abierto. La condición de entrada se implementó mediante una función definida por el usuario (UDF) que incorporó el perfil logarítmico, usando exclusivamente los datos LiDAR. Los datos de entrada para la simulación se eligieron del día con más concentración de velocidades de viento particularmente altas. Dentro del desarrollo se usó una UDF permiten establecer condiciones personalizadas no disponibles por defecto en el software de simulación, tales como perfiles variables de velocidad y condiciones de frontera específicas. Para la discretización del dominio, se seleccionó un mallado hexaédrico. Se estimó la capa límite numérica de pared (wall boundary layer) que controlas con el

valor de Y^+ , calculado a partir del número de Reynolds (R_ρ), la longitud de referencia (δ_s), la viscosidad dinámica (μ_c), la densidad del fluido (ρ), el valor objetivo de y^+ y la velocidad del viento en flujo libre (U_∞). Esto permitió determinar la altura de la primera capa de celdas adyacentes a las superficies sólidas; las capas se diseñan para capturar con precisión el comportamiento del flujo en la capa límite, que es la región donde la viscosidad y la fricción afectan significativamente el movimiento del fluido.

2.2. Condiciones de frontera aplicadas a la geometría

En la Figura 2 se muestra el dominio computacional empleado en la simulación. Las condiciones de frontera se establecieron considerando la física del flujo turbulento y las propiedades del terreno: en la entrada (Inlet) se impuso un perfil logarítmico de velocidad, definido mediante la velocidad de fricción, la constante de von Kármán y la rugosidad del terreno, ajustado a los datos LiDAR; en la salida (outlet) se aplicó una condición de presión constante, que permite que el flujo salga sin reflejar perturbaciones; superficies sólidas (terreno y edificios) (Wall), se aplicó la condición de no deslizamiento, resolviendo la capa límite mediante el parámetro adimensional y^+ ; superficies de simetría (symmetry), se consideró ausencia de flujo normal y gradientes nulos, garantizando que no haya transferencia de flujo a través de estas superficies. La elección del dominio se realizó considerando que las perturbaciones generadas por la tapa superior y las fronteras externas no afecten significativamente el flujo en el terreno y los edificios de interés.

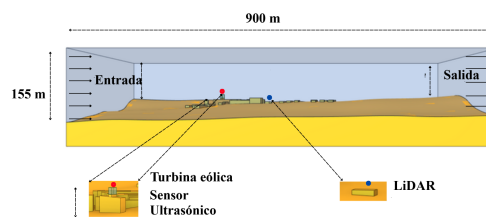


Figura 2. Condiciones de frontera del modelo

2.3. Mallado e independencia de malla

En la Figura 3 se muestran las capas de la malla. Previamente se realizó un estudio de independencia, comparando diferentes resoluciones hasta comprobar que nuevas subdivisiones no producían variaciones significativas en los resultados. La malla final, de 6.1 millones de celdas hexaédricas. La altura del primer elemento adyacente a la pared se definió a partir del valor de y^+ , obteniéndose un promedio de 169, dentro del rango recomendado para la correcta aplicación de las funciones de pared del modelo $k-\epsilon$. Debido a la complejidad de la topografía, se empleó una malla no estructurada, y se verificó la independencia mediante simulaciones adicionales con mallas más gruesas.

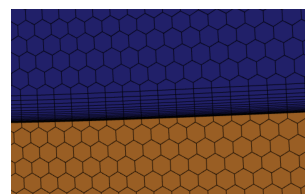


Figura 3. Malla con elementos hexaédricos con capas en la superficie

2.4. Modelo matemático y métricas de validación

Durante la etapa de simulación, se resolvieron las ecuaciones RANS empleando el modelo estándar de turbulencia $k-\epsilon$ Launder & Spalding (1974). Las simulaciones se realizaron en régimen estacionario

para cada dirección predominante del viento, según la distribución direccional observada durante un ciclo de 24 horas [Blocken et al. \(2007\)](#). La dirección de entrada se estableció de sur a norte, considerando el eje (z) como el eje horizontal dominante, en concordancia con el sistema de coordenadas del dominio computacional. La condición de frontera de velocidad se definió mediante el perfil logarítmico ajustado a los datos experimentales obtenidos con LiDAR. Para la simulación, se consideró una altura fija de 30 m sobre la superficie del terreno, correspondiente a la altura del sensor ultrasónico y a la del aerogenerador de eje vertical instalado en la misma zona. Esta elección permite una comparación directa entre los resultados numéricos y las mediciones experimentales in situ, asegurando una validación confiable del modelo CFD en la ubicación específica del dispositivo.

Finalmente, en la etapa de posprocesamiento se obtienen las series temporales de velocidad y presión correspondientes a un periodo de 24 horas, representadas también gráficamente mediante mapas de contorno. Estos resultados numéricos se compararon con mediciones experimentales tomadas del sensor ultrasónico ubicado a 30 m sobre el nivel del terreno, con una resolución temporal de 1 segundo durante el mismo intervalo. A partir de las simulaciones, se obtuvo el campo de velocidades en todo el dominio, permitiendo identificar zonas de aceleración, estancamiento y perturbaciones causadas por la geometría urbana. Estos resultados representan magnitudes y distribuciones de flujo características del sitio bajo las condiciones predominantes de viento, sirviendo como base para la evaluación microlocal del recurso eólico y su validación con datos medidos. Para ello, se realizó un análisis de correlación entre las velocidades de viento obtenidas del anemómetro ultrasónico y las predicciones del modelo. Para fundamentar el análisis y la validación de las simulaciones, es necesario describir el modelo matemático que rige el comportamiento del flujo, así como las métricas empleadas para validar su concordancia con los datos experimentales. En esta sección se detallan las ecuaciones que representan la dinámica del viento en el dominio computacional, el cuál representa un entorno urbano y se presentan indicadores estadísticos utilizados para cuantificar el ajuste entre las predicciones numéricas y las mediciones in situ. Considerar el desarrollo de la capa límite local resulta fundamental para representar de manera realista la interacción del viento con las edificaciones, esta capa es la región del flujo cercano a una superficie sólida, en este caso es el techo y paredes de las edificaciones, donde los efectos de la viscosidad son significativos y la velocidad del fluido cambia desde cero (debido a la condición de no deslizamiento) hasta casi la velocidad de flujo libre. La velocidad varía de manera continua. El parámetro α se utiliza para estimar este espesor característico mediante la ecuación empírica.

$$Re = \frac{u \cdot L}{1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{0.37 L}{\sqrt[3]{Re}} \quad (2)$$

donde:

- u es la velocidad característica del flujo [m/s].
- L es la longitud característica del objeto o del flujo [m].
- Re es el número de Reynolds, calculado usando u , L y la viscosidad cinemática ν .
- ν es la viscosidad cinemática del aire, $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.
- 0.37 es una constante empírica que surge de la aproximación y corresponde a la distancia donde la velocidad alcanza aproximadamente el 37 % de la velocidad característica.
- α es un factor empírico que ajusta la distribución de velocidad o la fuerza de interacción en el dominio simulado).

2.5. Ecuaciones de Navier–Stokes

La física de la simulación CFD se sustenta en las ecuaciones que gobiernen el movimiento de los fluidos, siendo las ecuaciones de

Navier–Stokes el pilar fundamental para describir el comportamiento del viento. El flujo de viento en el dominio simulado se describe mediante las ecuaciones de Navier–Stokes para flujo incompresible en régimen turbulento. En este trabajo, se empleó el enfoque RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes), mediante el cual las ecuaciones se promedian en el tiempo y se incorpora la viscosidad turbulenta ν_t para representar los efectos de la turbulencia. De esta manera, el comportamiento medio del flujo turbulento se puede resolver de manera estable y eficiente en el entorno urbano considerado. [Launder & Spalding \(1974\)](#):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \quad (3)$$

donde $\bar{u}_i$ es la velocidad promedio en el tiempo, $\bar{p}$ es la presión promedio, ν la viscosidad cinemática molecular, ν_t la viscosidad turbulenta obtenida del modelo $k-\epsilon$, ρ la densidad del aire y f_i las fuerzas de volumen aplicadas.

2.6. Modelo de turbulencia $k-\epsilon$ estándar

El modelo $k-\epsilon$ es ampliamente utilizado para flujos de capa límite y aplicaciones urbanas, este modelo introduce dos ecuaciones adicionales para la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ϵ):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

donde ν_t es la viscosidad turbulenta y P_k es la producción de energía cinética turbulenta.

2.7. Métricas de Correlación y Error

(CEM)

La validación de las simulaciones CFD con respecto a los datos experimentales se realizó mediante métricas de correlación y error. Estas métricas permiten cuantificar el grado de ajuste entre las predicciones numéricas y las mediciones in situ empleando las siguientes expresiones matemáticas.

2.7.1. Coeficiente de correlación de Pearson

(PCC) Evalúa la relación lineal entre las series de datos:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

2.7.2. Error Absoluto Medio (MAE)

Mide el promedio del valor absoluto de las diferencias:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (7)$$

2.7.3. Error Cuadrático Medio (MSE)

Penaliza errores grandes al elevar al cuadrado las diferencias:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \quad (8)$$

2.7.4. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

Es la raíz cuadrada del MSE y mantiene las unidades originales:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (9)$$

La metodología descrita en este trabajo, incluye el tratamiento riguroso de datos experimentales, la construcción del dominio computacional basado en la topografía real, la definición cuidadosa de condiciones de frontera mediante funciones definidas por el usuario (UDF) y la generación de un mallado adecuado, garantiza una simulación confiable del comportamiento del flujo eólico en entornos urbanos complejos. Con las imágenes mostradas anteriormente, se evidencia el nivel de detalle alcanzado para representar las características aerodinámicas del terreno. El desarrollo de esta metodología es fundamental para asegurar la validez de los resultados numéricos y su posterior comparación con datos experimentales, contribuyendo así a una evaluación viable del recurso eólico a escala micro local.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la simulación y datos experimentales comparados con la potencia de salida del aerogenerador. Los datos de la simulación están representados por contornos que muestran la distribución de velocidades de viento y presión en el entorno construido y en la zona transversal del dominio computacional. En la Figura 4 se visualiza el contorno de velocidad de viento simulado mediante CFD en el dominio del modelo, donde se observa la distribución de las velocidades y dirección general del flujo de viento en la sección transversal. Esta vista permitió contextualizar la interacción del flujo con el entorno construido. Se identificaron zonas de aceleración del viento al interactuar con las edificaciones, así como disminuciones de velocidad en las áreas ubicadas a sotavento de los edificios. Estas zonas de baja velocidad corresponden a regiones de estancamiento y recirculación, donde se forman estelas características de flujo urbano turbulento. Los resultados muestran que, en la zona más alta del edificio, las velocidades del viento oscilan entre 1.5 y 9 m/s de acuerdo con los datos experimentales. Este rango es suficiente para la operación de aerogeneradores de pequeña escala, los cuales requieren velocidades de arranque de aproximadamente 2–4 m/s y alcanzan un rendimiento aceptable a partir de 5 m/s, según la IEC 61400-2 (2013, Small Wind Turbines). Bajo estas condiciones, el sitio es apto para la instalación de turbinas con capacidades nominales en el rango de 100 W a 200 W, adecuadas para aplicaciones urbanas y residenciales. La selección del aerogenerador específico dependerá de la demanda energética local y de las restricciones de espacio para la instalación.

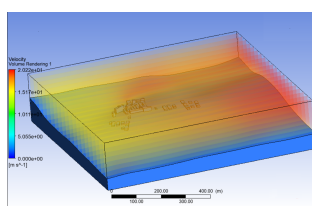


Figura 4. Distribución tridimensional de la rapidez en el dominio computacional

Por otra parte, los contornos de presión (Figuras 5a y 5b) muestran una distribución característica en entornos urbanos, con regiones de alta presión localizadas en las caras frontales de los edificios directamente expuestas al viento del sur y zonas de baja presión en las caras posteriores, asociadas con separación de flujo y formación de vórtices. Estas diferencias de presión se corresponden con los gradientes de velocidad observados en la figura de contorno de velocidad, donde las zonas de alta presión coinciden con la desaceleración del viento frente a las fachadas expuestas, mientras que las regiones de baja presión se ubican en áreas de recirculación a sotavento. La interacción presión-velocidad es fundamental para evaluar la turbulencia y los esfuerzos dinámicos sobre las turbinas de pequeña escala, ya que las variaciones de presión influyen directamente en la carga aerodinámica sobre el rotor y determinan la estabilidad operativa de los aerogeneradores. Estas observaciones refuerzan la importancia

de considerar la geometría urbana y la microlocalización precisa de turbinas para garantizar un rendimiento óptimo y seguro del recurso eólico.

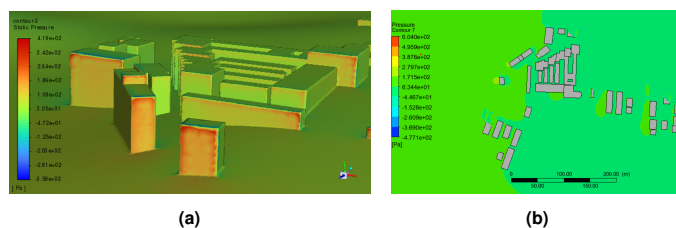


Figura 5. Contornos de presión representativos en el dominio

Se validaron las simulaciones CFD con mediciones in situ mediante un análisis de correlación para evaluar la precisión de las predicciones del flujo de viento en un entorno urbano complejo. Las Figuras 6 y 7 muestran la correlación entre la rapidez del viento obtenida mediante CFD y las mediciones experimentales registradas por el LiDAR y el sensor ultrasónico, respectivamente. En ambos casos se observa una relación lineal positiva, aunque con diferentes niveles de ajuste. La rapidez del viento modelada y la registrada por el sensor ultrasónico presentaron un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0.914$, mientras que para el LiDAR se obtuvo un valor ligeramente superior de $r = 0.953$, lo que indica una mejor correspondencia con este último. Esta diferencia puede atribuirse a factores como la altura de medición del LiDAR, que representa de manera más directa el perfil de rapidez de entrada en el dominio CFD. Es importante destacar que el sensor ultrasónico está instalado en la misma ubicación que el aerogenerador, cuyos datos de potencia se analizarán brevemente más adelante. La correlación entre la rapidez medida por el sensor ultrasónico y la simulada es ligeramente menor, lo que resalta la relevancia práctica de este instrumento, ya que refleja directamente las condiciones de operación reales en el sitio. La sobreestimación observada en los resultados de CFD respecto a este sensor podría deberse a la simplificación geométrica del dominio o a efectos locales no completamente resueltos por el modelo, como flujos de esquina o turbulencia inducida. Aun así, la buena concordancia general valida el uso del modelo propuesto para evaluar el recurso eólico disponible en el emplazamiento del aerogenerador.

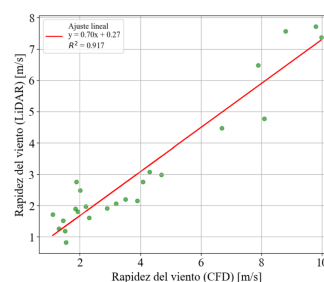


Figura 6. Ajuste lineal de rapidez del viento entre CFD y LiDAR

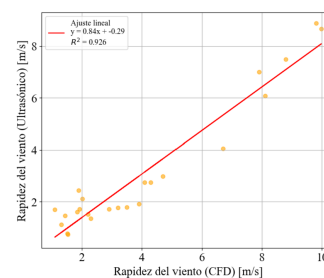


Figura 7. Relación lineal de rapidez del viento entre CFD y sensor ultrasónico

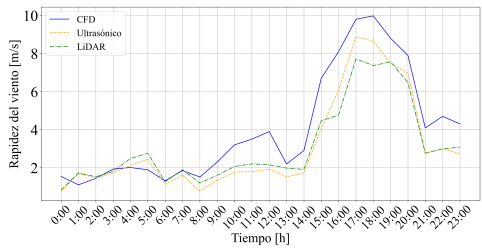


Figura 10. Distribución temporal de la rapidez del viento medida y simulada

Los mapas de densidad (Figuras 8 y 9) muestran la distribución conjunta de la rapidez del viento obtenidas mediante la simulación CFD y las mediciones experimentales de los sistemas de medición aproximadamente a la misma altura sobre el nivel del terreno. Los colores representan la densidad de puntos en el espacio de valores comparados, donde una mayor concentración cerca de la diagonal indica una mejor correlación y ajuste entre los métodos. Estas gráficas permiten visualizar la concordancia entre los datos simulados y medidos.

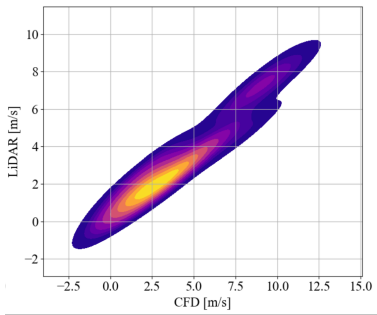


Figura 8. Distribución espacial de la rapidez del viento comparando CFD y LiDAR

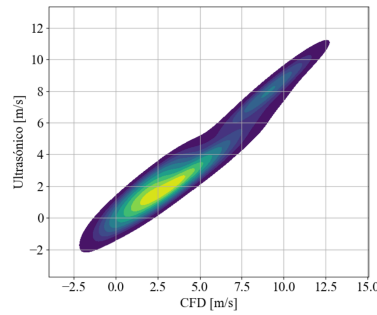


Figura 9. Distribución espacial de la rapidez del viento comparando CFD y ultrasónico

En la Figura 10 se presenta la evolución temporal de la rapidez obtenida mediante simulación CFD y la registrada por los sensores LiDAR y ultrasónico durante 24 horas. Se evidencia una buena concordancia general entre las tres series, destacando que los picos de rapidez coinciden en magnitud y momento, lo que valida la capacidad del modelo numérico para reproducir tendencias temporales. Algunas discrepancias menores, especialmente en valores máximos, podrían deberse a la resolución temporal de las mediciones o a efectos locales no capturados por el modelo. El sensor ultrasónico, al estar ubicado directamente sobre el área de interés, refleja con mayor fidelidad las condiciones reales, mientras que el LiDAR proporciona un perfil más estable y vertical del viento, explicando su mayor correlación global. Esta comparación temporal permite evaluar la precisión del modelo y su habilidad para seguir las variaciones diarias de la rapidez del viento en un entorno urbano.

La Tabla 1 muestra la comparación cuantitativa entre la rapidez de viento obtenidas mediante simulación CFD y los datos experimentales provenientes de los dos sensores anteriormente mencionados. Se utilizaron métricas estadísticas como el error absoluto medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error porcentual medio (MAPE), así como el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2).

Los resultados indican que la simulación CFD presenta una mejor concordancia con los datos del LiDAR, con valores menores de MAE (0.209 ms^{-1}) y RMSE (0.265 ms^{-1}), así como un menor error porcentual (3.05 %). Además, el coeficiente de correlación (0.953) y el coeficiente de determinación (0.908) evidencian una fuerte correlación lineal entre ambas series. En contraste, aunque la correlación con el sensor ultrasónico también es alta ($r = 0.914$), sus mediciones presentan errores ligeramente superiores a las obtenidas con el LiDAR.

Tabla 1. Errores estadísticos de la simulación CFD y los datos experimentales del sensor ultrasónico y del LiDAR a 16 m.

Métrica	CFD vs. Ultrasonico	CFD vs. LIDAR (16 m)
Error absoluto medio (m/s)	0.302	0.209
Raíz del error cuadrático medio (m/s)	0.373	0.265
Error porcentual medio (%)	4.17	3.05
Coeficiente de correlación de Pearson	0.914	0.953
Coeficiente de determinación (R^2)	0.836	0.908

Las Figuras 11 y 12 muestran, respectivamente, la localización del aerogenerador y la serie temporal de los datos registrados durante su operación en el edificio más alto del terreno. Se observa que a medida que aumenta la rapidez del viento, también se incrementa la potencia generada. En particular, la rapidez máxima registrada fue de 7.5 m/s, correspondiente a una potencia de salida instantánea de 27.5 W, valor coherente con la capacidad nominal del aerogenerador de pequeña escala instalado.

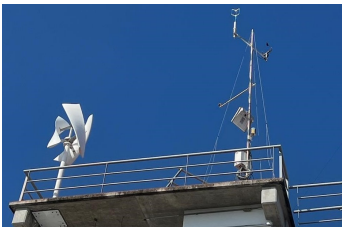


Figura 11. Localización del aerogenerador y el sensor ultrasónico

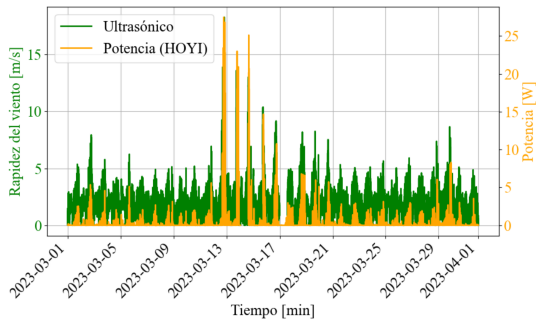


Figura 12. Serie temporal de velocidad del viento y potencia del aerogenerador

Los resultados aportan una base sólida para la identificación de sitios estratégicos para la instalación de aerogeneradores de pequeña escala. Este tipo de análisis resulta especialmente relevante para impulsar la generación distribuida de energía limpia y su integración en sistemas energéticos urbanos, tales como microrredes o edificios auto-suficientes. Además de la comparación directa entre las simulaciones

CFD y las mediciones de viento, se analizó de manera complementaria la potencia registrada por el aerogenerador situado en la misma zona que el sensor ultrasónico, ambos instalados en el edificio más alto del terreno. Se observó que la evolución temporal de la potencia presenta coherencia con los picos de rapidez del viento simulados y medidos por los sensores. Esta comparación no constituye una validación directa del modelo CFD, pero refuerza la concordancia entre el comportamiento del viento en el sitio y la respuesta del dispositivo instalado, aportando un contexto práctico al análisis del recurso eólico urbano.

4. Conclusiones

Este estudio demuestra la viabilidad de utilizar simulaciones CFD para caracterizar el recurso eólico en entornos urbanos, donde la complejidad del flujo limita la efectividad de métodos tradicionales. La integración de un perfil logarítmico derivado de datos LiDAR, implementado mediante UDF, permitió representar adecuadamente las condiciones de entrada al dominio. La validación con datos in situ obtenidos de un sensor ultrasónico mostró alta concordancia. Los picos instantáneos de velocidad y potencia alcanzaron 17.5 m/s y 27.5 W, respectivamente, con resolución temporal de un minuto. Al promediar por hora, las velocidades medidas por el ultrasónico fueron de 8–9 m/s, mientras que las simulaciones CFD mostraron valores de 10–13 m/s, reflejando la variabilidad espacial del flujo. Los coeficientes de correlación y métricas estadísticas (MAE, RMSE y MAPE) confirman alta correspondencia, ligeramente superior con el LiDAR, y se observó una leve sobreestimación cerca del edificio, atribuible a efectos locales no resueltos completamente. A pesar del viento promedio relativamente bajo, los contornos de velocidad obtenidos mediante CFD permiten identificar zonas donde se supera el umbral mínimo de operación según la IEC, indicando áreas potenciales para la microlocalización de aerogeneradores de baja potencia. Esto demuestra que CFD reproduce no solo las condiciones promedio, sino también la variabilidad espacial, facilitando decisiones estratégicas de instalación. Estos resultados confirman que el modelo $k-\epsilon$, combinado con condiciones de frontera adecuadas, reproduce el comportamiento del viento en dominios urbanos complejos. La comparación temporal evidencia que, aunque la correlación global es mayor con LiDAR, la concordancia puntual fue más precisa con el sensor ultrasónico, destacando la importancia de considerar métricas globales y análisis temporales para evaluar la capacidad del modelo de reproducir variaciones y picos de viento. Los análisis CFD validados se muestran como herramientas confiables para apoyar la microlocalización de aerogeneradores urbanos y optimizar la eficiencia energética contribuyendo al desarrollo de ciudades más sostenibles y resilientes.

■ Referencias

Agency, I. E. (2024), *World Energy Outlook 2024*, IEA, Paris, France.
URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

Baitureyeva, A., Yang, T. & Wang, H. (2025), 'Development of machine learning-aided rapid cfd prediction for optimal urban wind environment design', *Sustainable Cities and Society* **121**, 106208.

Blocken, B., Stathopoulos, T. & Carmeliet, J. (2007), 'Cfd simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems', *Atmospheric Environment* **41**, 238–252.

Chu, R. & Wang, K. (2025), 'Cfd in urban wind resource assessments: A review', *Energies* **18**(10), 2626.

IPCC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva, Switzerland.
URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr>

Launder, B. E. & Spalding, D. B. (1974), 'The numerical computation of turbulent flows', *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **3**(2), 269–289.

URL: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)

Li, J., You, W. & Ding, W. (2024), 'Evaluation of the cfd simulation method for wind prediction in complex urban spatial forms', *International Journal of Environmental Science and Technology*.

Mei, S. J., Hang, J., Fan, Y., Yuan, C. & Xue, Y. (2025), 'Cfd simulations on the wind and thermal environment in urban areas with complex terrain under calm conditions', *Sustainable Cities and Society* **118**.

Nugraha, A. D., Garingging, R. A., Wiranata, A., Sitanggang, A. C., Supriyanto, E., Tanbar, F. & Muflikhun, M. A. (2025), 'Comparison of "rose, aeroleaf, and tulip" vertical axis wind turbines (vawts) and their characteristics for alternative electricity generation in urban and rural areas', *Results in Engineering* **25**.

Streichenberger, B., Chakir, R., Jouy, B. & Waeytens, J. (2021), 'Simulation and validation of cfd turbulent airflow at pedestrian level using 3d ultrasonic anemometer in the controlled urban area "sense-city"', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **219**, 104801.

Tabib, M., Rasheed, A. & Kvamsdal, T. (2015), 'Investigation of the impact of wakes and stratification on the performance of an onshore wind farm', *Energy Procedia* **80**, 302–311.

Talwar, T. & Yuan, C. (2024), 'Impact of natural urban terrain on the pedestrian wind environment in neighborhoods: A cfd study with both wind and buoyancy-driven scenarios', *Building and Environment* **261**.

Toja-Silva, F., Kono, T., Peralta, C., Lopez-Garcia, O. & Chen, J. (2018), 'A review of computational fluid dynamics (cfd) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.

Townsend, J. F., Xu, G. & Jin, Y. (2024), 'Roughness constant selection for atmospheric boundary layer simulations using a k- sst turbulence model within a commercial cfd solver', *Advances in Wind Engineering* **1**, 100005.

Wang, H. S. S., Blocken, B. & Lin, Z. (2025), 'Cfd simulation of the stratified atmospheric boundary layer: Consistency between monin-obukhov similarity theory and the standard k- model', *Building and Environment* **267**.

Wang, Q., Wang, J., Hou, Y., Yuan, R., Luo, K. & Fan, J. (2018), 'Micro-siting of roof mounting wind turbine in urban environment: Cfd simulations and lidar measurements', *Renewable Energy* **115**, 1118–1133.