

# Comportamiento de la intensidad de turbulencia en distintas áreas transversales en un túnel de viento

## Turbulence intensity behavior in several wind tunnel cross-sectional areas

Gustavo Richmond-Navarro<sup>1</sup>, Carlos Arias-Arguedas<sup>2</sup>, Pedro Casanova-Treto<sup>3</sup>

---


Fecha de recepción: 10 de marzo, 2022

Fecha de aprobación: 17 de agosto, 2022

Richmond-Navarro, G; Arias-Arguedas, C; Casanova-Treto, P. Comportamiento de la intensidad de turbulencia en distintas áreas transversales en un túnel de viento. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 134-144.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6157>

1 Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [g-richmond@tec.ac.cr](mailto:g-richmond@tec.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

2 Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: [carlosluis111@estudiantec.cr](mailto:carlosluis111@estudiantec.cr)

 <https://orcid.org/0000-0002-0463-353X>

3 Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: [pedro.casanova@ucr.ac.cr](mailto:pedro.casanova@ucr.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0001-8508-6293>

## Palabras clave

Túnel de viento; intensidad de turbulencia; velocidad de viento; turbina eólica; rotor.

## Resumen

Considerando que cada vez más turbinas eólicas operan en condiciones de turbulencia, este estudio sobre la intensidad de turbulencia (TI) en distintas áreas transversales en un túnel de viento se llevó a cabo. Un túnel de viento con un área de pruebas de 15 m de largo, 3.6 m de ancho y 2 m de alto se utilizó; se colocó una cuadrícula de madera para generar turbulencia en el flujo y la velocidad del viento se midió con un anemómetro de hilo caliente. Para determinar si hubo variaciones en la TI se definieron cinco puntos (centro, arriba, abajo, izquierda y derecha) en cuatro áreas transversales luego de la cuadrícula de madera. Se determinó que la TI varía drásticamente dentro del área. Se calculó un porcentaje de error desde 3.6 % a 15.2 % cuando se consideraba la variación de la turbulencia dentro del área del rotor en comparación con cuando se usa solamente el punto en el eje del rotor. Para poder describir apropiadamente el flujo turbulento es necesario considerar el promedio de las mediciones de la turbulencia alrededor del área que cubre el rotor.

## Keywords

Wind tunnel; turbulence intensity; wind speed; wind turbine; rotor.

## Abstract

Considering that more and more wind turbines operate at high turbulent flows, a study of the turbulence intensity (TI) in several wind tunnel cross-sectional areas was done in this paper. A wind tunnel with a test section 15 m long, 3.6 m wide and 2 m high was used; a wooden grid was placed to generate turbulence and the wind velocity was measured with a hot wire anemometer. To determine if there are significant variations of the TI value, five points (center, up, down, left, and right) at four tunnel cross-sections downstream from the grid were measured. It was determined that the TI varies drastically within the area. An error rate from 3.6 % up to 15.2 % occurred if the TI is considered only at the cross-sectional axis; to truly describe the turbulent flow it is necessary to use the average of the measurements taken in the cross-sectional area.

## Introducción

Las turbinas eólicas son usualmente instaladas en ubicaciones de baja turbulencia, sin embargo, el desarrollo urbano junto con la creciente ocupación de campos eólicos en tierra ha creado un mercado para la instalación de turbinas en lugares de mayor irregularidad superficial, como zonas boscosas o cerca de comunidades desarrolladas [1]. En estas regiones la velocidad del viento es variable, registrándose moderada ( $0.15 > TI > 0.10$ ) a alta ( $TI \geq 0.15$ ) intensidad de turbulencia (TI, por su nombre en inglés) [2]. TI se define como la razón entre la desviación estándar muestral y la velocidad promedio del viento en un mismo periodo [3].

Es por esta razón que numerosos estudios se enfocan en el efecto de la turbulencia sobre el rendimiento de las turbinas eólicas. Se ha realizado una comparación entre las turbinas de eje horizontal con las de eje vertical; encontrándose que las turbinas de eje horizontal en pequeña escala superan su contraparte vertical, sin embargo, estas requieren mayor mantenimiento debido a ser más afectadas por las condiciones del viento [4]. El efecto del viraje en condiciones turbulentas también es investigado, donde con la presencia de un concentrador de flujo se consiguió mejor rendimiento de la turbina cuando el viraje se encontraba en un ángulo entre

0° y 20° con vientos en velocidades moderadas a altas [5], [6], [7]. Hay estudios enfocados en los efectos de la turbulencia sobre microturbinas aumentadas con difusores donde se obtiene un incremento en el coeficiente de rendimiento comparado con su contraparte regular [8], [9]. Finalmente, la TI se relaciona con la recuperación de estela; a mayor TI se consigue una recuperación más veloz debido a la energía cinética turbulenta de estela [10], [11].

Otros estudios que lidian con turbinas en flujos turbulentos reportan que bajo estas condiciones la turbina puede producir ligeramente más potencia que bajo flujos más laminares [12]. También, a bajas velocidades la alta turbulencia puede resultar en un aumento en la cantidad de energía producida [13]. Otros investigadores concluyen que la TI no tiene un efecto significativo sobre la potencia producida por las turbinas [14].

El fenómeno de alta turbulencia en perfiles aerodinámicos usualmente implica la comparación entre simulaciones numéricas y mediciones experimentales [15] y necesita el uso de modelos muy específicos de turbulencia para considerar las particularidades de la zona límite, así como los bordes del perfil [16]. La optimización de la geometría del perfil es un área donde las simulaciones computacionales, junto con resultados experimentales, han ayudado a determinar que una geometría optimizada atrasa la separación del flujo, lo cual incrementa la potencia obtenida por 7.5 % [11]. En [17] tres diferentes geometrías de generadores de vórtices se pusieron a prueba, una rectangular, triangular y una Clark-Y; esto debido a que los generadores de vórtices pueden ser utilizados para optimizar el flujo en las aspas de las turbinas, esto puede mejorar la energía anual producida de 1% a 3%. No obstante, otros estudios concluyen que las simulaciones numéricas no son suficientes para describir adecuadamente las condiciones del viento alrededor del perfil; en una de estas se descubrió una relación inversa entre la velocidad del flujo del jet y el coeficiente de arrastre [18].

La literatura a menudo considera la TI solamente en el eje de giro de la turbina dentro del túnel de viento o en pruebas en campo, dejando por fuera la variación de la TI en otras partes del área barrida por el rotor, obviando que esta puede variar en este espacio. [19] muestra una colección de puntos de medición en el área barrida por el rotor, pero no detalla como es que varía la intensidad de turbulencia en dicha área.

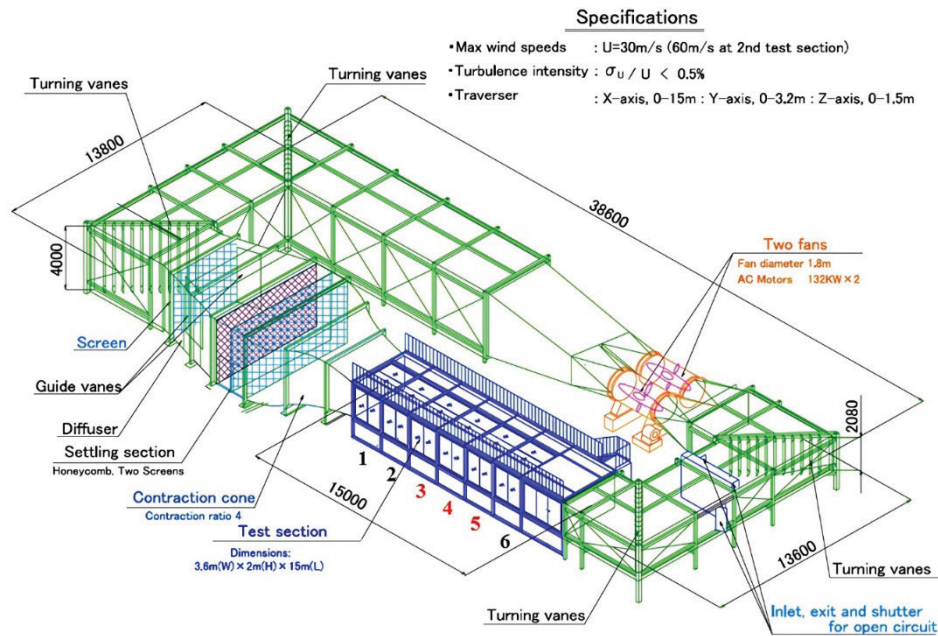
Como se indica por [20], los estudios que lidian con las fluctuaciones con la velocidad del viento deben ser muy detallados para describir correctamente las condiciones reales del viento y sus efectos sobre el rendimiento de la turbina; también se da a saber que las turbinas eólicas a pequeña escala no han sido ampliamente investigadas. Más aún, [6] reconoce que hay una ausencia de literatura que se enfoque sobre los efectos de bajos números de Reynolds sobre la TI. En la poca literatura disponible donde se considera el efecto de la TI sobre la producción de potencia los rangos varían de bajo a moderados, como lo es el caso de [19] en donde se usan valores de TI de 1.4 %, 8 % y 13.5 %.

Es de mucha importancia saber en detalle las características del flujo a través de una turbina, especialmente en condiciones de alta turbulencia. Así, este estudio presenta un análisis detallado de la TI dentro de un túnel de viento sobre el área barrida por un rotor a distintas distancias de la cuadrícula de madera.

## Materiales y métodos

### Equipo

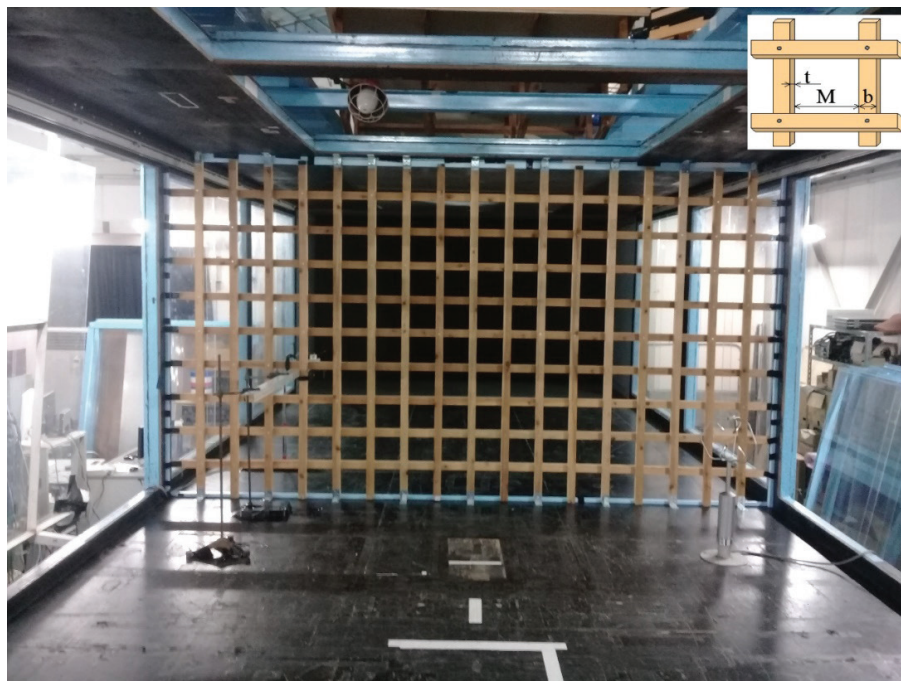
Las pruebas fueron llevadas a cabo en un túnel de viento de capa límite en el Instituto de investigación para mecánica aplicada (RIAM, por su nombre en inglés) en la universidad de Kyushu en Japón. Una ilustración esquemática del túnel se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Túnel de viento de capa límite, Universidad de Kyushu. Fuente: [21].

La sección de prueba es de 15 m de largo, 3.6 m de ancho y 2 m de alto. Las características técnicas del túnel se pueden consultar en [21]. Hay 9 paneles removidos en la sección de prueba para reducir el efecto de bloqueo [22], [23], así como los paneles laterales en las secciones 3, 4 y 5 del túnel de la figura 1. El panel 3 en el lado derecho (visto desde la dirección del flujo) está parcialmente removido. Esta configuración del túnel ha sido utilizada con éxito en investigaciones como [24] y [25].

La turbulencia fue generada con la cuadrícula de madera de la figura 2, con las siguientes dimensiones:  $M = 156.2\text{ mm}$ ,  $b = 43.5\text{ mm}$  y  $t = 29.9\text{ mm}$ .



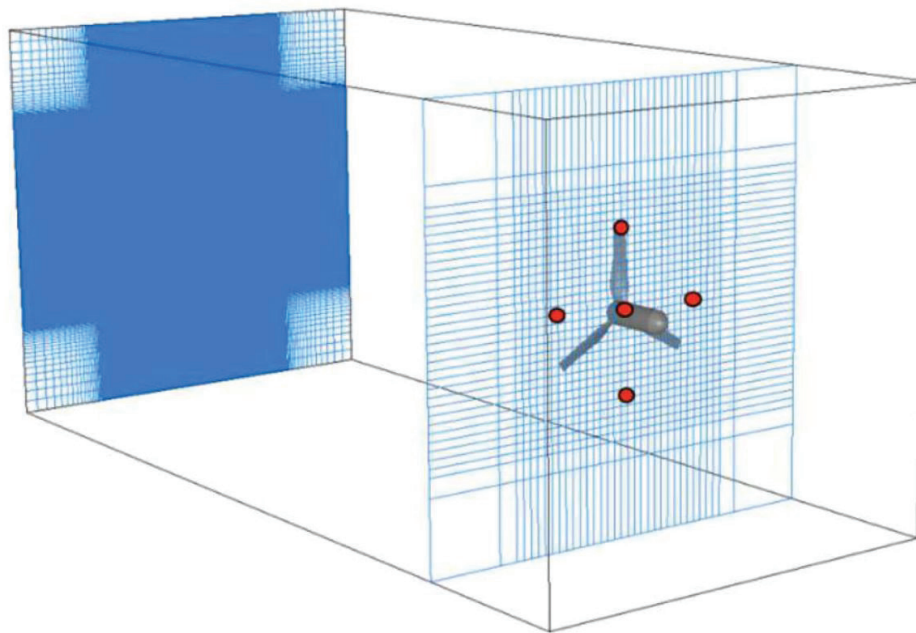
**Figura 2.** Cuadrícula de turbulencia.

La velocidad del viento fue medida con un anemómetro de hilo caliente manufacturado por Kanomax Japan Inc., Modelo 0251R-T5. Consiste en un filamento de Tungsteno de 5  $\mu\text{m}$  de diámetro. Cada punto fue medido por 60 s, con una frecuencia de muestreo de 1 kHz con un filtro pasa bajas de 200 Hz. Más detalles de estos parámetros, calibración de equipo y especificaciones están disponibles en [5].

### Montaje experimental

La cuadrícula de turbulencia se colocó en el marco entre los paneles 2 y 3 del túnel. Cuatro secciones transversales fueron determinadas, localizadas a 0.5 m, 0.93 m, 1.32 m y 3.1 m desde la cuadrícula. Las secciones de medición no están equidistantes debido a que la turbulencia no varía linealmente dentro del túnel [26].

Cinco puntos de medición del viento fueron simultáneamente montados en cada sección transversal, como se puede observar en la figura 3. Cuatro de los cinco puntos están separados 0.5 m del eje del túnel (su centro), localizados arriba, abajo y a ambos lados de él, mientras que el quinto punto se encuentra en lo que sería el eje de la turbina. Estos puntos fueron identificados como “Center, Up, Left, Down y Right” (sus nombres en inglés), donde su nombre corresponde a su ubicación relativa al eje del túnel. Es importante mencionar que la Figura 3 muestra una turbina en el túnel, pero esta está para fines ilustrativos solamente, las pruebas se realizaron en un túnel sin turbina, solo contaba con la cuadrícula para generar la turbulencia. También, en la figura 3 el túnel se observa como cuadrado, pero el utilizado es un túnel rectangular.



**Figura 3.** Puntos de medición en cada sección transversal.

La TI es calculada como la desviación estándar muestral dividida por el promedio de las mediciones tomadas en un periodo de prueba [27], donde un periodo corresponde a 60 s. Luego, este número es multiplicado por 100 para expresarlo como un porcentaje. Esta fórmula se observa en la ecuación 1.



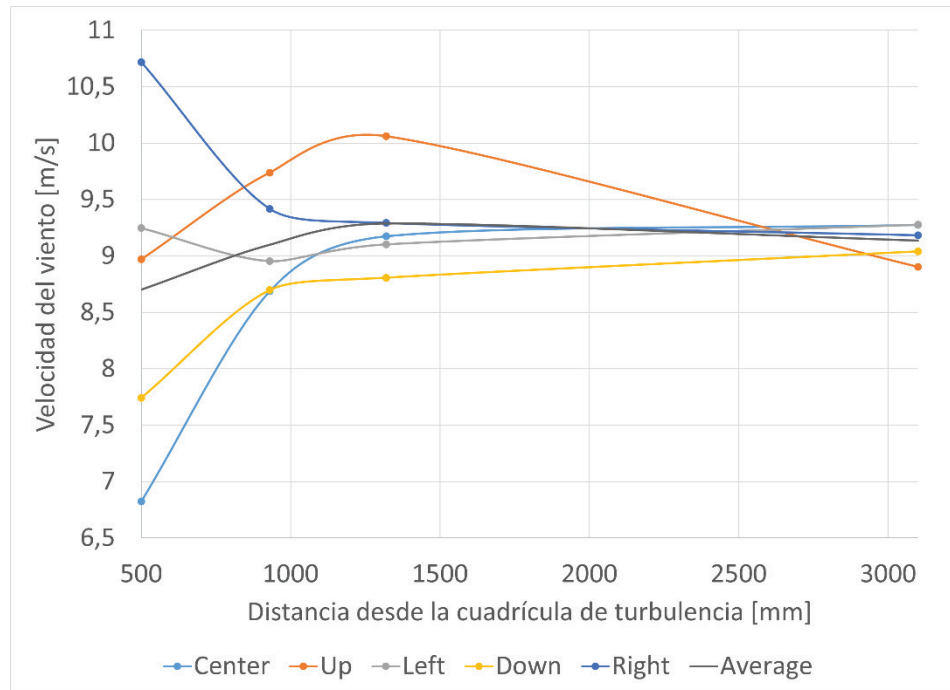
$$TI = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n - 1}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i} \quad (1)$$

Aquí,  $v_i$  representa la velocidad en cada medición,  $\bar{v}$  es el promedio de las mediciones y  $n$  es la cantidad total de datos recolectados cada 60 s. Finalmente, en el caso en que alguna de las mediciones relacionadas con los puntos no se adhiera a la tendencia que muestren los otros, un análisis más profundo será realizado de la velocidad y la TI del punto atípico.

## Resultados

### Velocidad del viento

Midiendo solamente la velocidad del viento en cada uno de los puntos, se genera la figura 4.

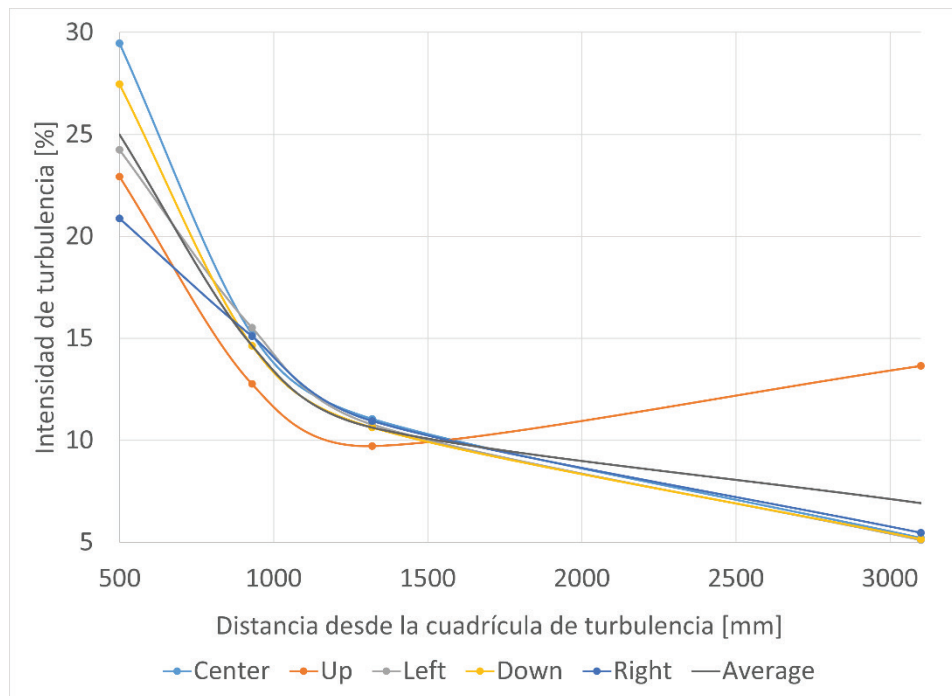


**Figura 4.** Velocidad del viento promedio en cada uno de los puntos de medición.

La tendencia de la velocidad del viento es estabilizarse a un valor alrededor de 9 m/s. Los puntos más cercanos a la cuadrícula muestran la diferencia más grande en velocidades, lo cual sucede debido a la cuadrícula alterando el flujo (en las especificaciones del túnel, su TI regular es menor a 0.5 %, de acuerdo con la figura 1) causando anisotropía en la velocidad que es evidente en el área transversal. Conforme aumenta la distancia desde el eje, disipación viscosa y transferencia de momento permiten resultados más similares en el área barrida del rotor. Esta disminución en velocidades no sucede para el punto Up (arriba del eje), lo cual es investigado más a fondo luego.

### Intensidad de turbulencia

En la figura 5 se presentan los resultados sobre intensidad de turbulencia en cada punto luego de haberse aplicado la fórmula (1).



**Figura 5.** Intensidad de turbulencia en cada uno de los puntos de medición.

Justo como sucedió con la velocidad del viento, la TI tiende a decrecer a mayores distancias de la cuadrícula de madera. No obstante, a diferencia de las velocidades de la figura 4 que mostraban valores altos a 1.32 m de la cuadrícula y luego empezaban a converger a valores de alrededor de 9.25 m/s; el comportamiento de la TI tiende a decrecer claramente. Esto sucede debido a la manera en la que se calcula la intensidad de turbulencia. Como la TI se calcula usando la desviación estándar de la velocidad alrededor de un punto, alta TI se puede obtener cuando el viento es, en promedio, más lento pero su desviación estándar en ese punto es mayor. Como se puede esperar, hay una variación alta de la velocidad instantánea cerca de la cuadrícula y, como se mencionó antes, esta mayor variabilidad da camino a que haya un flujo más estable conforme aumenta la distancia desde la cuadrícula.

No obstante, en la figura 5 el punto “Up” presenta un comportamiento completamente distinto al que presentan los otros cinco en la sección transversal de 3.1 m. A continuación, un análisis más profundo se realizará sobre el punto “Up” en específico.

### El caso del punto “Up”

Ambas las figuras 4 y 5 muestran como el punto Up difiere en el comportamiento de su velocidad y TI respectivamente al resto de los puntos. En la figura 4, su velocidad no converge de la misma manera a como lo hacen los otros. En la figura 5, hay un claro aumento en la TI del punto “Up” comparado a la disminución en los otros.

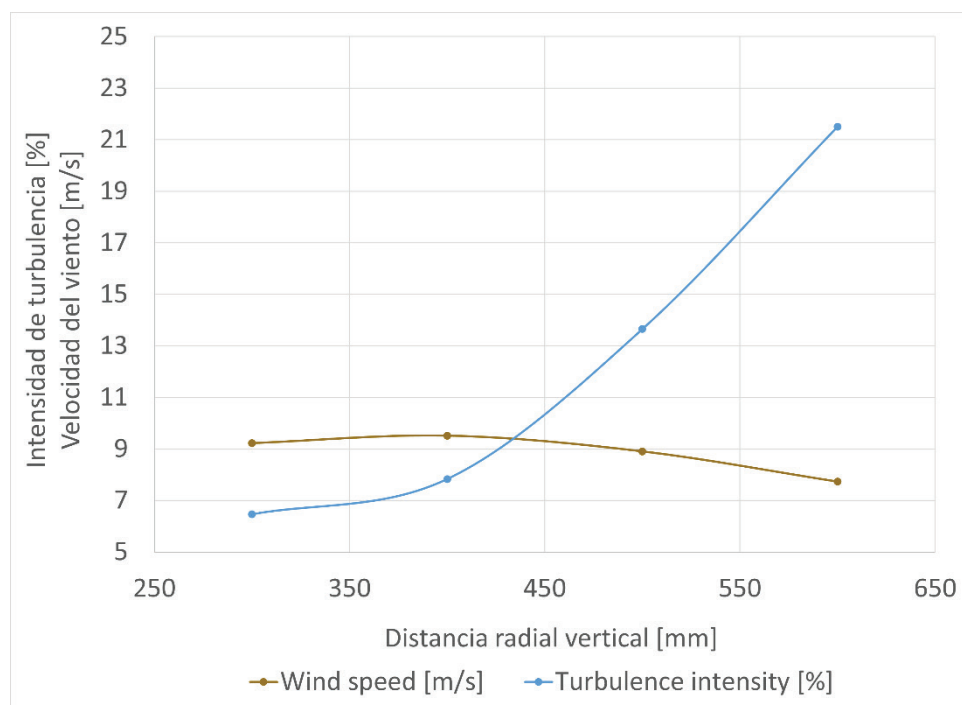
Para comprender ambos fenómenos, es importante primero recordar las dimensiones del túnel discutidas en la sección de Equipo. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que el túnel no está completamente cerrado para evitar el efecto de bloqueo. En específico, es necesario considerar que el punto “Up” está tan solo medio metro debajo del exterior del túnel. Esto es

algo que no sucede en los otros puntos, el punto a la izquierda y derecha del eje se encuentran a 1.3 m del exterior mientras que el punto inferior está a medio metro del piso. Esto significa que el punto “Up” es el que se encuentra más cerca de las secciones abiertas del túnel.

Si bien este es un túnel de circuito cerrado, al tener una sección parcialmente abierta algo del flujo puede salir del túnel temporalmente a través del panel removido en la sección 3 y luego ser succionado de nuevo en la sección 5 (ver figura 1), uniéndose al flujo dentro del túnel. Esta particularidad sucede principalmente debido a que el aire tiende a evitar obstáculos en su camino, por ejemplo, los instrumentos de medición.

Como el punto “Up” es el más cercano al exterior, el flujo dirigido hacia afuera es registrado por el anemómetro, lo cual explica por qué la velocidad es mayor que en el resto de los puntos en la figura 4.

El comportamiento de la TI es más complejo y necesita un mayor análisis, por esto se realizó una nueva serie de mediciones alrededor del punto “Up” con una variación vertical. Los resultados de estas mediciones se presentan en la figura 6.



**Figura 6.** TI y velocidad del viento en el punto “Up” en la sección transversal localizada a 3.1 m de la cuadrícula.

Como se puede observar, los nuevos puntos de medición fueron colocados a 300 mm, 400 mm, 500 mm y 600 mm desde el eje del túnel. En la figura 6 la velocidad tiende a disminuir conforme la distancia vertical aumenta. Eventualmente, la distancia fuera del túnel sería de 0 m/s.

La TI aumenta considerablemente a lo largo de la componente vertical, lo cual sugiere que la combinación de las vigas en el techo del túnel (ver figura 2), con el aire entrante ocasionado por la sección semi abierta, afectan la variabilidad en la velocidad del viento. Al suceder esto, se pierde la consistencia con los otros 4 puntos principales.

Si el punto “Up” se colocara a 0.4 m por encima del eje de la turbina en vez de 0.5 m en la sección transversal de 3.1 m, las mediciones realizadas coincidirían más con las tomadas en los otros puntos. Esta pequeña disminución de 10 cm entre puntos de medición se traduce a



un significativo cambio en la TI. Esto apoya la idea de que estudios que lidian con fluctuaciones en la velocidad deben ser realizados bajo situaciones muy controladas para poder conocer las verdaderas condiciones del viento [20].

Es importante considerar que la dirección del viento cambia hacia el exterior del túnel. Como los anemómetros solo pueden medir la velocidad a lo largo de la dirección del túnel, este cambio de dirección genera mediciones erráticas. Esto conlleva a la ilusión de una TI aún mayor.

Con todo lo anterior en mente, esta nueva sección analiza la desviación entre el promedio de las mediciones y los datos tomados en solamente el eje del túnel.

### Comparación entre la velocidad promedio y la velocidad en el eje del túnel

En la introducción se mencionó que muchos estudios dentro de túneles de viento, así como estudios de campo toman en cuenta solamente un punto de medición para la velocidad y TI: el eje de la turbina. Esto lo hacen para determinar la velocidad y TI a la que está sujeta la turbina en sí.

Dados los resultados anteriores, parece relevante que un pequeño cambio en los puntos de medición puede causar una gran variación en la intensidad de turbulencia. El cuadro 1 muestra el porcentaje de error entre las mediciones tomadas en el eje de la turbina (considerado como el valor teórico) en contra de el promedio de las mediciones en los 5 puntos experimentales (considerado como experimental). En la sección transversal de 3.1 m se utilizó el punto “Up” a 0.4 m sobre el eje de la turbina para evitar alterar los promedios (dada la explicación anterior).

**Cuadro 1.** Porcentajes de error para la intensidad de turbulencia.

Distancia desde la cuadrícula (m)	TI medida en el eje del túnel (%)	TI promedio en el área barrida por el rotor (%)	Porcentaje de error (%)
0.5	29.49	25.00	15.2
0.93	15.19	14.65	3.6
1.32	11.05	10.63	3.8
3.1	5.21	5.76	-10.5

Los porcentajes de error en el cuadro 1 muestran que la TI en el eje de la turbina puede variar considerablemente, hasta 15.2 % de acuerdo con los datos estudiados del valor promedio de TI en el área barrida por el rotor. También, los promedios aquí calculados se basan en solamente cinco puntos experimentales, por lo tanto, una malla más robusta de puntos en el área barrida podrá brindar resultados más exactos sobre la TI para estudiar a más profundidad las diferencias.

### Conclusiones y recomendaciones

En este estudio, una cuadrícula de turbulencia fue usada para analizar la velocidad del viento y la intensidad de turbulencia a lo largo de diferentes secciones transversales de un túnel, tomando en cuenta el área barrida por el rotor de una turbina eólica.

Al examinar la velocidad del viento, diferencias importantes en los valores medidos en los cinco puntos en el área barrida fueron encontradas en regiones de alta turbulencia cerca de la cuadrícula, pero existe una convergencia de velocidades en las secciones transversales más alejadas de la cuadrícula lo cual llevó a una reducida TI.

Investigando la TI obtenida, se encontró que esta sigue lo establecido por la literatura, la TI no tiene un comportamiento lineal decreciente conforme se aleja de la cuadrícula.

Adicionalmente, se demostró que el porcentaje de error puede alcanzar hasta 15.2 % si la TI se considera solamente en el eje de la turbina, en vez de obtener el promedio de esta en toda el área barrida.

También, el valor de TI puede cambiar rápidamente en cortas distancias, especialmente en regiones cercanas al exterior del túnel de viento.

La principal conclusión de esta investigación es que para describir adecuadamente el flujo que incide sobre las turbinas eólicas, es necesario tomar en cuenta el promedio de las mediciones dentro del área barrida por el rotor de la turbina y no limitarlas a medir exclusivamente sobre el eje de la turbina.

Como recomendación para trabajo futuro, es necesario medir el efecto sobre el coeficiente de potencia cuando la velocidad del viento y la TI se registran en el eje de la turbina en comparación con cuando se toma en cuenta el promedio sobre el área barrida.

## Contribución de los autores

Los autores declaran un porcentaje de contribución al presente artículo de la siguiente forma: Gustavo Richmond Navarro 80%; Carlos Arias Arguedas 10% y Pedro Casanova Treto 10%.

## Referencias

- [1] S. Mertens, *Wind energy in the built environment: concentrator effects on buildings*, Brentwood, United Kingdom: Technische Universiteit Delf, 2006.
- [2] D. Kim, Y. Kim and B. Kim, "Changes in wind turbine power characteristics and annual energy production due to atmospheric stability, turbulence intensity, and wind shear," *Energy*, vol. 214, p. 119051, 2021.
- [3] 61400-12-1, IEC, *Wind turbines - Part 12-2: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, 2005.
- [4] L. C. Pagnini, M. Burlando and M. P. Repetto, "Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment," *Applied Energy*, vol. 154, pp. 112-121, 2015.
- [5] G. Richmond-Navarro, P. Casanova-Treto and F. Hernández-Castro, "Efecto de un difusor tipo wind lens en un flujo turbulento," *Uniciencia*, vol. 35, no. 2, pp. 1-18, 2021a.
- [6] Q. Li, Y. Kamada, T. Maeda, J. Murata, N. Yusuke and e. al., "Effect of turbulence on power performance of a horizontal axis wind turbine in yawed and no-yawed flow conditions," *Energy*, vol. 109, pp. 703-711, 2016a.
- [7] T. Rogers and S. Omer, "Yaw analysis of a micro-scale horizontal axis wind turbine operating in turbulent wind conditions," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 58-63, 2013.
- [8] B. Kosasih and H. S. Hudin, "Influence of inflow TI on the performance of bare and diffuser-augmented micro wind turbine model," *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 154-167, 2016.
- [9] L. Clements and A. Chowdhury, "Performance evaluation of wind lens in turbulent environment," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 777-782, 2019.
- [10] S. Wang, Y. Zhou, M. M. Alam and H. Yang, "Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers," *Physics of Fluids*, vol. 26, no. 11, p. 115107, 2014.
- [11] M. Tahani, T. Maeda, N. Babayan, S. Mehrnia, M. Shadmehri, Q. Li, R. Fahimi and M. Masdari, "Investigating the effect of geometrical parameters of an optimized wind turbine blade in turbulent flow," *Energy Conversion and Management*, vol. 153, pp. 71-82, 2017.
- [12] C. R. Chu and P. H. Chiang, "Turbulence effects on the wake," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 124, pp. 82-89, 2014.
- [13] W. D. Lubitz, "Impact of ambient turbulence of a small wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 61, pp. 69-73, 2006.

- [14] C. Sicot, P. Devinant, T. Laverne, S. Loyer and J. Hureau, "Experimental study of the effect of turbulence on horizontal axis wind turbine aerodynamics," *Wind Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 361-370, 2006.
- [15] S. W. Li, W. Wang, J. P. Wang and J. C. Mi, "Effect of TI on airfoil flow: Numerical simulations and experimental measurements," *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, vol. 32, no. 8, pp. 1029-1038, 2011.
- [16] M. Lin and H. Sarlak, "A comparative study on the flow over an airfoil using transitional turbulence models," in *AIP conference proceedings*, 2011.
- [17] R. Soto, S. Bartholomay, M. Manolesos, C. Nayeri and P. C. O, "EArfoil Shaped Vortex Generators applied on a Research Wind Turbine," in *Schitech 2021 Forum*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [18] S. Hoseinzadeh, A. Bahrami, S. M. Mirhosseini, A. Sohami and S. Heyns, "A detailed experimental airfoil performance investigation using an equipped wind tunnel," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 72, p. 101717, 2020.
- [19] Q. Li, Y. Kamada, M. T. M. J and Y. Nishida, "Visualization of the flow field and aerodynamic force on a horizontal axis wind turbine in turbulent inflows," *Energy*, Vols. 1304-1315, p. 111, 2016b.
- [20] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajaya and V. H. Krishna, "A review on small scale wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1351-1371, 2016.
- [21] Y. Ohya, J. Miyasaki, U. Göltenbott and K. Watanabe, "Power augmentation of shrouded wind turbines in a multirotor system," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 5, p. 139, 2017.
- [22] U. Göltenbott, Ohya, Y, S. Yoshida and P. Jamieson, "Aerodynamic interaction of diffuser augmented wind turbines in multi-rotor systems," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 25-34, 2017.
- [23] K. Watanabe and Y. Ohya, "Multi-rotor systems using ducted wind turbines for power output increase (Multi lens turbine)," *AIAA Scitech Forum*, vol. 141, no. 5, 2019.
- [24] Y. Ohya and T. Karasudani, "A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology," *Energies*, vol. 3, no. 4, pp. 634-649, 2010.
- [25] Y. Ohya and K. Watanabe, "A new approach toward power output enhancement using multirotor systems with shrouded wind turbines," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 141, no. 5, 2019.
- [26] A. Al-Abadi, J. Seok, M. Härtl, Ö. Ertunc and A. Delgado, "Experimental Investigations of the Turbulence Impact on the," in *10th EAWC PhD Seminar on Wind Energy in Europe*, Orleans, 2014.
- [27] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [28] Q. Li, J. Murata, M. Endo, T. Maeda and C. Kamada, "Experimental and numerical investigation on the effect of turbulent inflows on a horizontal axis wind turbine (part II: Wake characteristics)," *Energy*, vol. 113, pp. 1304-1315, 2016c.
- [29] G. Richmond-Navarro, T. Uchida and W. R. Calderón-Muñoz, "Shrouded wind turbine performance in yawed turbulent," *Wind Engineering*, p. 0309524X211036041, 2021b.