

Evolución vertical de la intensidad de turbulencia del viento en terreno complejo con obstáculos

Vertical evolution of wind's turbulence intensity in complex terrain with obstacles

Gustavo Richmond-Navarro¹, Raziel Farid Sanabria-Sandí², Luis Enrique Castro-Rodríguez³, Juan J. Rojas⁴, Williams R. Calderón-Muñoz⁵

Richmond-Navarro, G; Sanabria-Sandí, R.F; Castro-Rodríguez, L.E; Rojas, J.J; Calderón-Muñoz, W.R. Evolución vertical de la intensidad de turbulencia del viento en terreno complejo con obstáculos⁶. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial Programa de Investigación en *Energías Limpias*. Julio, 2022. Pág. 46-57.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i7.6332>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electromecánica. Costa Rica. Correo electrónico: grichmond@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>
- 2 Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Mecánica. Costa Rica. Correo electrónico: razielfarid@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4463-6524>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electromecánica. Costa Rica. Correo electrónico: luisenriquecr27@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9303-5274>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electromecánica. Costa Rica. Correo electrónico: juan.rojas@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-3261-5005>
- 5 Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y Centro de Energía. Chile. Correo electrónico: wicalder@uchile.cl
<https://orcid.org/0000-0003-3786-7495>
- 6 Los autores aquí firmantes están de acuerdo con la versión final de este documento y hacen constar que la conceptualización, preparación y corrección del artículo se realizó según la siguiente distribución: GRN 65%; RFSS 15%; LEGR 10%; JJR 5%; WRCM 5%.

Palabras clave

Intensidad de turbulencia; terreno complejo; velocidad del viento; histograma; anemómetro.

Resumen

El mercado ofrece turbinas eólicas de pequeña escala como una solución parcial para reducir la factura eléctrica en viviendas. Sin embargo, en algunos casos el rendimiento ofrecido supera el obtenido, esto se debe a las bajas velocidades del viento en las zonas residenciales y al efecto de la turbulencia sobre los aerogeneradores. El objetivo de este trabajo es determinar la influencia local de los obstáculos en la turbulencia y describir el desarrollo de la turbulencia en función de la altura, comparando dos torres meteorológicas: una colocada entre árboles y otra colocada en una zona sin obstáculos cercanos. Se pretende determinar si dentro de un paisaje específico pueden encontrarse lugares con menor turbulencia debido a una reducción de los obstáculos de manera local. Las mediciones obtenidas entre octubre de 2018 y septiembre de 2019 se procesan y mediante histogramas se compara la intensidad de turbulencia en función de la altura. Se encuentra que la turbulencia es menor conforme aumenta la altura en la torre que está inmersa entre árboles; con valores de 30% a 14 metros de altura y de 50% a 6 m de altura. En el caso de la torre que está sin obstáculos, en su entorno cercano, la turbulencia es menos dependiente de la altura, con valores de 30% a 12 metros de altura y de 40% a 4 m de altura. Se reporta un valor de intensidad de turbulencia cercano al 30% como el más frecuente entre los datos obtenidos por los diez anemómetros del estudio.

Keywords

Turbulence intensity; complex terrain; wind speed; histogram; anemometer.

Abstract

The market provides many small-scale wind turbine which are offered as a partial solution to reduce residential electricity bills. However, the reality is that in some cases the performance offered surpass the performance obtained, this is due to low wind speeds in residential areas and the effect of turbulence on the wind turbines. The objective of this work is to determine the local influence of obstacles on the turbulence and to describe the development of turbulence as a function of height, by comparing two meteorological towers: one placed between trees and the other placed in an area without nearby obstacles. In this way, it is intended to determine if within a specific landscape there can be found places with less turbulence due to a local reduction of the obstacles. The measurements obtained between October 2018 and September 2019 from the meteorological towers are then processed to obtain histograms to compare the evolution of turbulence intensity as a function of height. It is found that the turbulence depends on the height in the tower that is immersed between trees; it is smaller as the height increases. In addition, in the case of the tower without obstacles in its close environment, the turbulence is independent of the height. A turbulence intensity value close to 30% is reported as the most frequent among the data obtained by the ten anemometers used in the study.

Introducción

La energía renovable es una necesidad para todos, disminuir la dependencia de combustibles fósiles es una idea que toma más fuerza cada día. Por otra parte, reducir el gasto en energía eléctrica es una idea muy atractiva para los consumidores. Por esta razón, existen en el mercado muchos productos de turbinas eólicas de pequeña escala, que se ofertan como una

solución parcial para reducir la factura eléctrica en viviendas. Sin embargo, la realidad es que en algunos casos el rendimiento ofrecido no corresponde con el rendimiento obtenido, esto se da principalmente porque las velocidades del viento en zonas residenciales suelen ser mucho menores a la velocidad nominal de las turbinas en venta [1]. Esto contrasta con la afirmación que las turbinas de pequeña escala pueden ser de beneficio en países en desarrollo [2].

Otra causa del desfase entre el rendimiento ofrecido y el obtenido, es el efecto de la turbulencia [3]. En [4] se reporta una pérdida del 20 % de la potencia de las turbinas eólicas debido a las condiciones de flujo turbulento. Lo anterior, contrasta con lo reportado por [5] donde la potencia entregada aumenta considerablemente conforme aumenta la turbulencia. También, es opuesto a lo indicado en [6] donde se menciona que al aumentar la intensidad de turbulencia se beneficia la recuperación de la estela debido a un aumento en la energía cinética turbulenta, lo que impacta de forma positiva el desempeño de las turbinas eólicas de ese estudio en particular. Además, en [7] se concluye que, al aumentar la intensidad de turbulencia, la potencia de salida de la turbina se sobreestima en velocidades del viento moderadas y se subestima con velocidades del viento más fuertes. Por su parte, en [8] se menciona que el coeficiente de potencia depende en gran medida de la intensidad de la turbulencia del flujo de entrada, porque la turbulencia influye en la separación del flujo en el lado de succión del aspa de la turbina.

Considerando que las turbinas eólicas ofrecidas actualmente en el mercado para soluciones residenciales no están diseñadas de forma específica para aprovechar la turbulencia, se entiende su bajo desempeño en flujo turbulento [9], [10]. Por tanto, las alternativas para la mejora del aprovechamiento del recurso eólico de pequeña escala son buscar puntos que además de una alta velocidad del viento, ofrezcan baja turbulencia, considerar desde el diseño de las turbinas eólicas el desempeño en flujo turbulento [11], o bien el uso de sistemas híbridos [12]. De acuerdo con [13] el modelo de turbulencia del régimen eólico local es un factor clave para determinar el rendimiento energético y la durabilidad de las turbinas que operan bajo la influencia de los entornos urbanos.

En las investigaciones en sitios montañosos, se ha estimado el recurso eólico a la altura del eje de la turbina, a 50 metros y 80 metros del suelo, empleando la intensidad de turbulencia superficial como predictor, se reportan resultados confiables al emplear como base métodos para terrenos planos o fuera de la costa [14]. Por otro lado, cuando se estudia el recurso eólico en cañones de una profundidad considerable se obtiene como resultado que la intensidad de turbulencia se ve afectada directamente por la altura a la cual es colocado el anemómetro, por ende, el valor de la turbulencia aumenta conforme aumenta el valor de la altura a la cual se hace la medición [15].

La turbulencia también se asocia al tipo de paisaje. Existen categorías ampliamente difundidas de la rugosidad de los terrenos en función de su descripción, por ejemplo, en [16] se mencionan matorrales, pastizales, tierras de cultivo y bosques. Entre tanto, en [17] se ofrece un detalle mayor en cuanto a terrenos abiertos, zonas de cultivos y ciudades con edificaciones altas. No obstante, este tipo de descripciones no permiten describir de manera específica la turbulencia, sino que dan un panorama general, en función de los obstáculos promedio de cada paisaje. Es sabido también que los árboles reducen el transporte turbulento proveniente de las capas atmosféricas superiores [18] y que la longitud de rugosidad cambia durante el año en un mismo paisaje, en función del crecimiento de la vegetación [19]. Por lo anterior se afirma que la longitud de rugosidad es un parámetro altamente variable en los distintos tipos de paisaje y su estimación adecuada se dificulta [20].

El objetivo de este trabajo es determinar la influencia local de los obstáculos en la turbulencia y describir el desarrollo de la turbulencia en función de la altura, comparando dos torres meteorológicas instrumentadas con anemómetros a diferentes alturas y con 500 m de separación entre ellas: una colocada entre árboles y otra colocada en una zona sin obstáculos cercanos. De esta manera se pretende determinar si dentro de un paisaje específico pueden encontrarse lugares con menor turbulencia debido a una reducción de los obstáculos de manera local, con el fin de establecer sitios más adecuados para aerogeneradores comerciales de pequeña escala, que se ven afectados por la turbulencia.

Materiales y métodos

Para esta investigación se seleccionaron dos torres que estuvieran disponibles para ser instrumentadas, una en una zona inmersa entre obstáculos, por ejemplo árboles; y la otra en una región sin obstáculos en su entorno cercano. Las condiciones de las torres son comparables pues, al estar a menos de 500 m de distancia entre sí, enfrentan condiciones meteorológicas muy similares y sus alrededores poseen el mismo tipo de vegetación.

En la figura 1 se muestra la torre instrumentada entre obstáculos, en las coordenadas $9^{\circ}51'46,564''$ Norte y $83^{\circ}54'59,861''$ Oeste, con cinco anemómetros del fabricante Davis, colocados a alturas de 6, 8, 10, 12 y 14 metros sobre el nivel del suelo. Estos anemómetros se codifican como CIF6, CIF8, CIF10, CIF12 y CIF14.



Figura 1. Torre meteorológica en el Centro de Investigación Forestal (CIF).

La torre instrumentada sin obstáculos en su entorno cercano se presenta en la figura 2. Ubicada en las coordenadas $9^{\circ}51'07,0''$ Norte y $83^{\circ}54'23,0''$ Oeste. Posee anemómetros del mismo fabricante colocados a 4, 6, 8, 10 y 12 metros sobre el nivel del suelo, estos se codifican como Planta4, Planta6, Planta8, Planta 10 y Planta12. Por el tamaño de la segunda torre no fue posible colocar de manera segura y estable un anemómetro a 14 m sobre el suelo, por lo que las alturas difieren entre una torre y la otra. En ambas torres se tomaron datos de rapidez del viento cada 10 segundos entre los meses de noviembre de 2018 y octubre de 2019. Estos

fueron registrados por un *datalogger* del mismo fabricante, modelo Envoy8X. Se definió un año completo para capturar el efecto de todas las estaciones. Los diez anemómetros utilizados son modelo Davis 6410 [21], pueden medir la magnitud de la velocidad del viento en el rango de 0 m/s a 80 m/s. La exactitud con que se mide es de ± 1 m/s para velocidades hasta 20 m/s y un ± 5 % de la indicación del instrumento para las mediciones mayores a 20 m/s. La resolución de medida es de 0,1 m/s y un valor umbral de 0,4 m/s.



Figura 2. Torre meteorológica en la planta de tratamiento (Planta).

Los meses de abril y mayo de 2019, en ambas estaciones, presentan datos faltantes. No se tiene registrada rapidez del viento en CIF6 y Planta12. Los datos originales están en un documento de base de datos (db). Se extraen mediante el programa Weather Data Transfer Utility del mismo fabricante Davis, para obtener los archivos de valores separados por comas (csv).

La intensidad de turbulencia se calcula, de acuerdo con la norma IEC 61400-12-1, como la desviación estándar muestral de las mediciones de las velocidades del viento cada 10 minutos, dividida entre el promedio de los datos en ese mismo periodo, según se muestra en la ecuación 1.

$$IT = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (1)$$

Donde S es la desviación estándar, \bar{x} es el promedio de los datos, x_i es el i ésimo dato, n es la cantidad total de datos y x es el dato en la i ésima posición.

Las mediciones obtenidas de las torres meteorológicas se procesan con Microsoft Excel para obtener la intensidad de turbulencia a cada altura en cada mes particular de medición y mediante histogramas se compara la evolución de la intensidad de turbulencia en función de la altura.

Finalmente, considerando que el tamaño de las muestras a cada altura es distinto, se realiza un análisis estadístico mediante la prueba LSD (Least significant difference) de Fisher. Esto con el fin de determinar diferencias entre las mediciones de los anemómetros a las diferentes alturas. En este caso se consideran todas las mediciones disponibles para cada altura, durante todo el año.

Resultados y discusión

Al procesar las mediciones separadas de forma mensual, se obtuvieron doce histogramas mensuales para cada torre de medición. En esta sección se presentan de mes de por medio, para evitar información redundante y a la vez mostrar la tendencia a lo largo del año en estudio. Todos los resultados se muestran agrupando la intensidad de turbulencia en rangos de 5%, de modo que los histogramas se componen de puntos ubicados en valores de 5%, 10%, 15% y así sucesivamente hasta llegar a 95%, lo que se debe interpretar de la siguiente forma. El punto a 35%, por ejemplo, indica la frecuencia con la que ocurren los valores de intensidad de turbulencia mayores a 30% y menores o iguales a 35%. Se han seleccionado puntos y no barras como es usual en los histogramas, debido a que se presentan varias tendencias en un mismo gráfico, de modo que de usarse barras quedarían estas superpuestas y se dificultaría la interpretación.

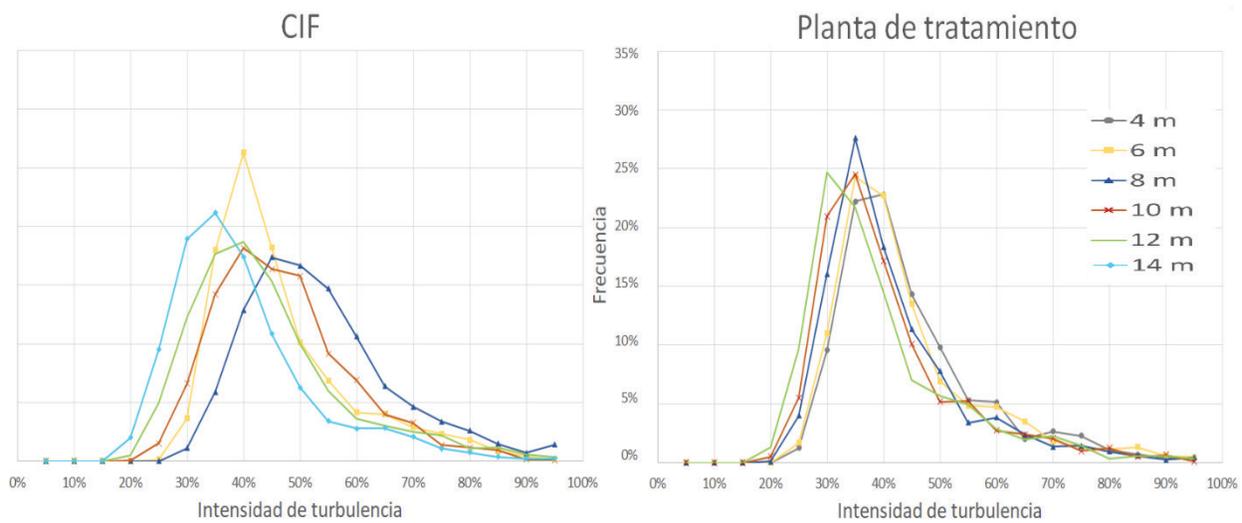


Figura 3a. Histogramas de la intensidad de turbulencia en ambas torres de medición en el mes de noviembre de 2018, CIF a la izquierda y Planta a la derecha.

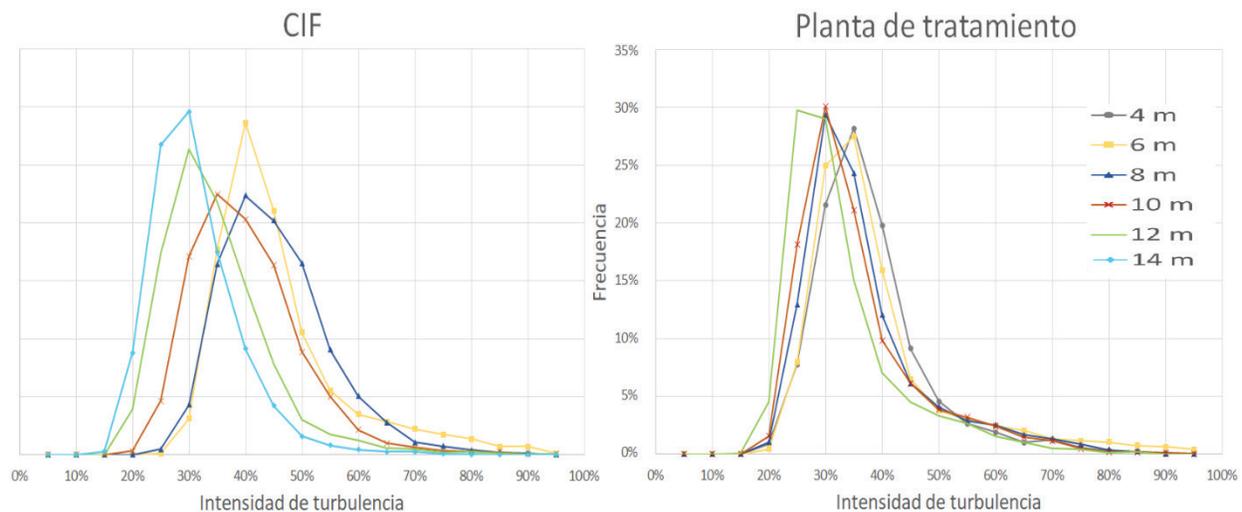


Figura 3b. Histogramas de la intensidad de turbulencia en ambas torres de medición en el mes de enero de 2019, CIF a la izquierda y Planta a la derecha.

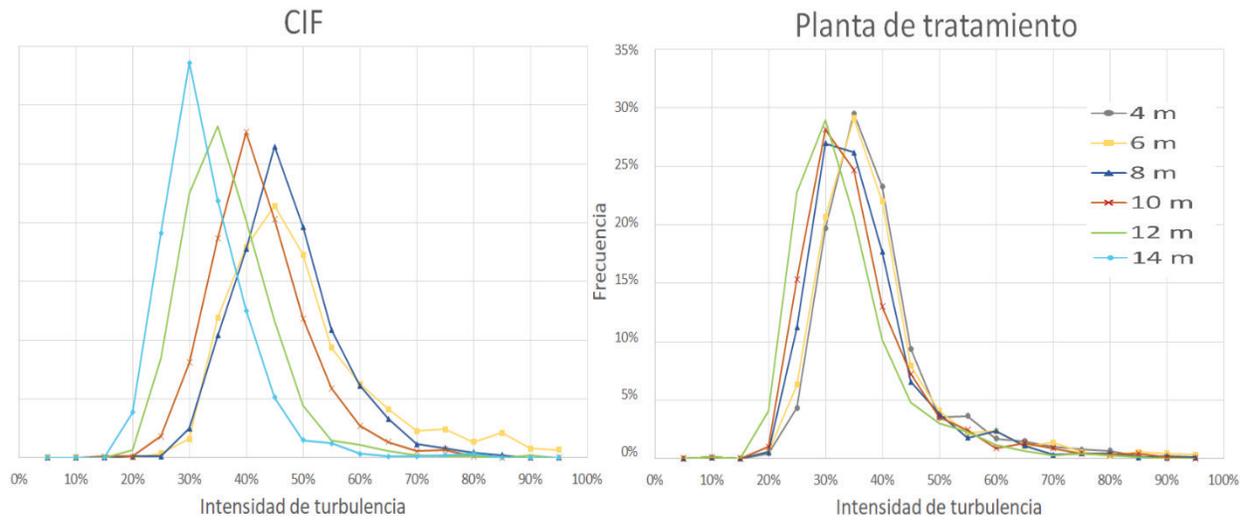


Figura 3c. Histogramas de la intensidad de turbulencia en ambas torres de medición en el mes de marzo de 2019, CIF a la izquierda y Planta a la derecha.

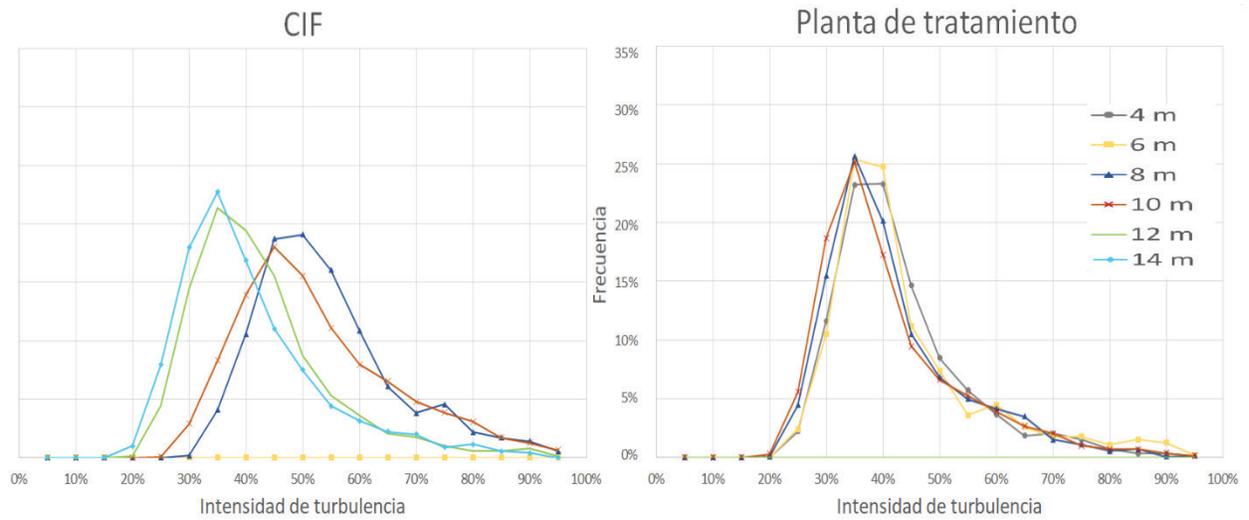


Figura 3d. Histogramas de la intensidad de turbulencia en ambas torres de medición en el mes de mayo de 2019, CIF a la izquierda y Planta a la derecha.

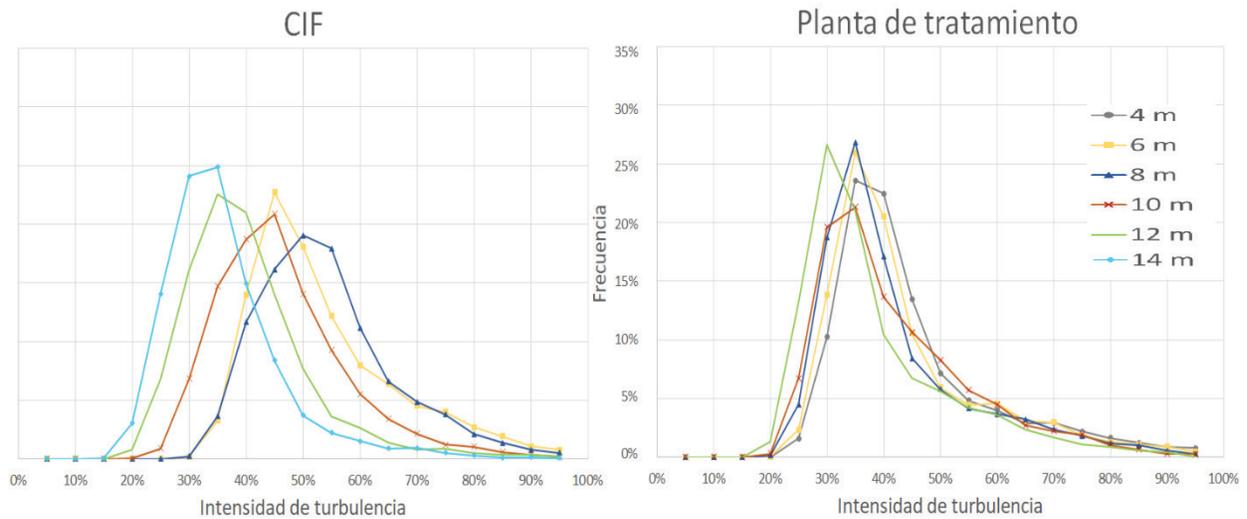


Figura 3e. Histogramas de la intensidad de turbulencia en ambas torres de medición en el mes de julio de 2019, CIF a la izquierda y Planta a la derecha.

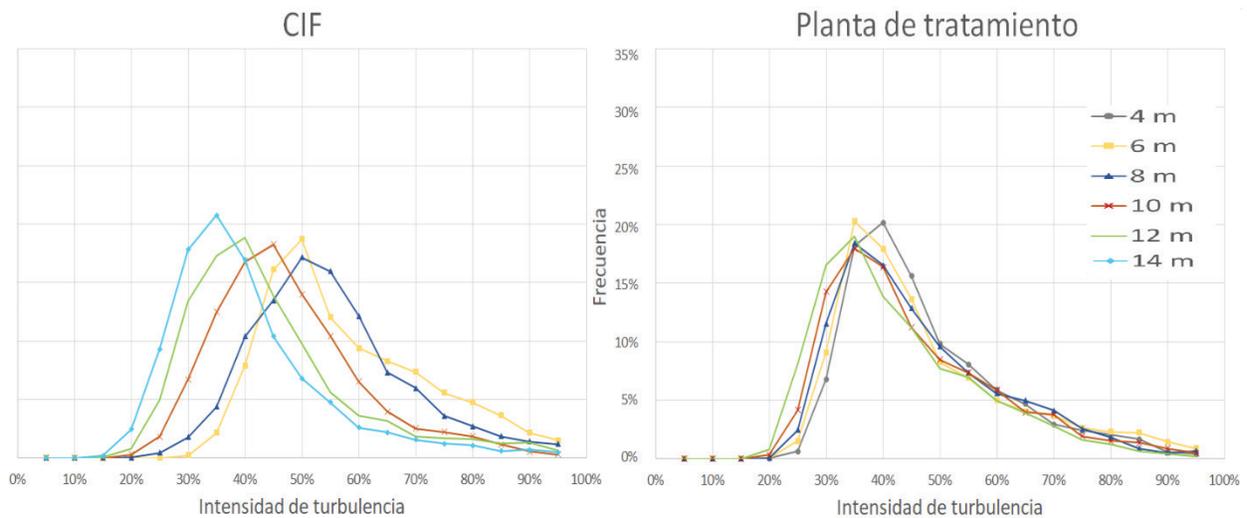


Figura 3f. Histogramas de la intensidad de turbulencia en ambas torres de medición en el mes de septiembre de 2019, CIF a la izquierda y Planta a la derecha.

En la figura 3a se comparan los resultados para el mes de noviembre de 2018. Se obtuvo una respuesta homogénea en las mediciones de la torre de Planta, donde el máximo de la intensidad de turbulencia ocurre cerca del 35 % y no hay una tendencia diferenciada en función de la altura. En cambio, para la torre en CIF en ese mismo mes los valores máximos están más dispersos y las curvas tienen menor altura, pero son más alargadas. Se evidencia una clara tendencia en función de la altura en el caso de la torre en CIF, el máximo de la intensidad de turbulencia es mayor a menor altura, excepto para el caso CIF6, que tiene una respuesta salida de la tendencia.

La figura 3b muestra los resultados para el mes de enero de 2019. Al igual que en la figura 3a, se destaca que la respuesta está en función de la altura en el caso de la torre en CIF, pero no en la torre en Planta. Nuevamente se observa que los máximos en la torre Planta están más a la izquierda y son en general de mayor altura que CIF.

En el caso de la figura 3c se comparan los resultados para el mes de marzo de 2019. Como en los casos anteriores se evidencia una clara dependencia de la altura en la torre CIF y una gran similitud de los resultados en la torre Planta. No obstante, en este mes los máximos tienen una altura muy similar en ambas torres, aunque en la torre CIF ocurren a una IT mayor conforme menor es la altura.

Los resultados para el mes de mayo de 2019 se muestran en la figura 3d. Se repite la tendencia de tener resultados casi independientes de la altura en la torre Planta y resultados dependientes de la altura en la torre CIF, no obstante, en este caso los resultados para CIF12 y CIF14 están traslapados, lo mismo ocurre para CIF8 y CIF10. Esta tendencia no se había observado en los meses anteriores.

La comparación de los resultados para el mes de julio de 2019 está en la figura 3e. Se repite la tendencia de los meses anteriores, independencia de la altura para la torre Planta y una tendencia marcada en función de la altura en la torre CIF. Los resultados en CIF6 están fuera de la tendencia, al igual que en los meses anteriores.

En la figura 3f se comparan los resultados para el mes de septiembre de 2019. Se mantienen resultados homogéneos en la torre Planta y por otra parte una respuesta dependiente de la altura en la torre CIF. Una vez más la medición en CIF6 está fuera de la tendencia del resto, donde a menor altura el máximo de la intensidad de turbulencia es mayor.

En la figura 4 se presentan, de manera consolidada, los máximos mensuales de IT para ambas torres. Al ser los datos tomados de los histogramas, donde se agrupó la IT en rangos de 5%, todos los datos son múltiplos de 5. Se debe recordar que los rangos se interpretan, por ejemplo, para una IT = 35%, como valores de la intensidad de turbulencia mayores a 30% y menores o iguales a 35%.

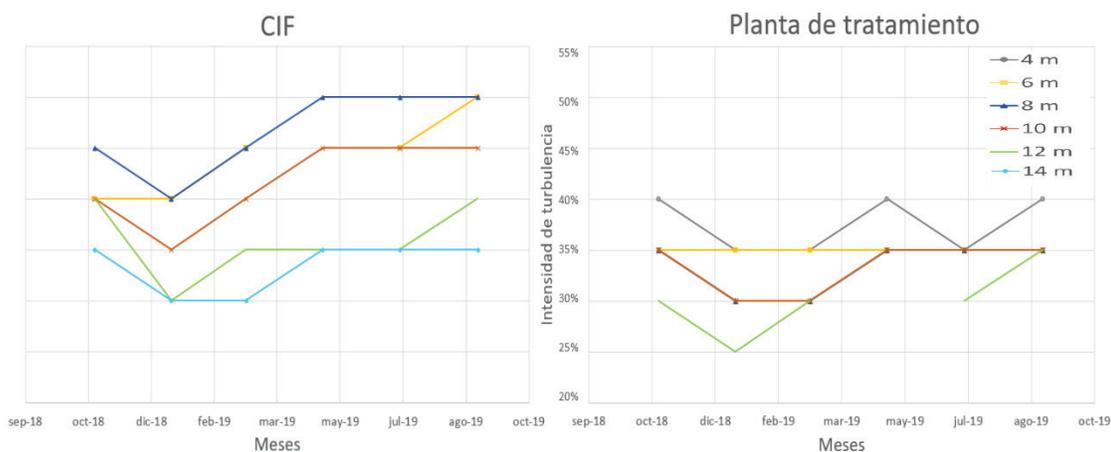


Figura 4. Máximos mensuales de la intensidad de turbulencia en ambas torres de medición, CIF a la izquierda y Planta a la derecha.

Los resultados consolidados de la figura 4 demuestran que la intensidad de turbulencia es dependiente de la altura en ambos casos, pues los máximos para todos los meses son mayores a menor altura. Sin embargo, esta dependencia es mucho más marcada en el caso de la torre CIF, donde el rango va de 30% a 50% de IT. En la torre Planta la dependencia es mucho más débil y la mayoría de los máximos se ubica entre 30% y 35% de IT para las 5 alturas.

Finalmente, mediante la prueba de diferencias mínimas (LSD) de Fisher para un nivel de significancia del 0,05 se obtuvieron los cuadros 1 y 2, para CIF y Planta de tratamiento respectivamente. Los resultados de la comparación de las medias ofrecen evidencia que

permite validar que existen diferencias entre todas las alturas, excepto al comparar CIF6 con CIF8 lo cual está asociado al mayor efecto de la turbulencia en las zonas bajas, acoplado con la presencia de árboles en la vecindad de la torre. Estas condiciones hacen que la diferencia de las mediciones a 6 m y 8 m de altura sean poco significativas en esa torre.

Cuadro 1. Prueba LSD en CIF.

Comparación	Diferencia entre medias (%)	LSD (%)	Resultado
CIF6 - CIF8	-0,24	0,25	No hay diferencia
CIF6 - CIF10	5,48	0,24	Si hay diferencia
CIF6 - CIF12	10,20	0,24	Si hay diferencia
CIF6 - CIF14	14,31	0,24	Si hay diferencia
CIF8 - CIF10	5,72	0,23	Si hay diferencia
CIF8 - CIF12	10,44	0,23	Si hay diferencia
CIF8 - CIF14	14,55	0,22	Si hay diferencia
CIF10 - CIF12	4,72	0,22	Si hay diferencia
CIF10 - CIF14	8,83	0,22	Si hay diferencia
CIF12 - CIF14	4,11	0,22	Si hay diferencia

Cuadro 2. Prueba LSD en Planta.

Comparación	Diferencia entre medias (%)	LSD (%)	Resultado
Planta12 - Planta10	0,28	0,24	Si hay diferencia
Planta12 - Planta8	2,23	0,24	Si hay diferencia
Planta12 - Planta6	3,01	0,23	Si hay diferencia
Planta12 - Planta4	5,64	0,23	Si hay diferencia
Planta10 - Planta8	1,95	0,24	Si hay diferencia
Planta10 - Planta6	2,73	0,23	Si hay diferencia
Planta10 - Planta4	5,36	0,23	Si hay diferencia
Planta8 - Planta6	0,78	0,23	Si hay diferencia
Planta8 - Planta4	3,41	0,23	Si hay diferencia
Planta6 - Planta4	2,63	0,23	Si hay diferencia

Conclusiones

Luego de analizar los datos registrados durante todo un año, en dos torres meteorológicas instrumentadas con anemómetros a cinco diferentes alturas, ambas en un terreno complejo, pero con diferencias respecto de la cercanía de los obstáculos, es posible determinar las siguientes conclusiones para una zona irregular y boscosa:

1. La intensidad de turbulencia es dependiente de la altura para el caso de las mediciones tomadas en una torre inmersa entre árboles, sin separación alguna de los obstáculos.

2. En el caso de las mediciones tomadas en una torre localmente sin árboles a su alrededor, la intensidad de turbulencia tiene una dependencia menor de la altura y su rango de variación de valores máximos es menor.
3. En ambas torres la intensidad de turbulencia alcanza niveles elevados, indistintamente de la cercanía de los obstáculos, entre 20% y 90% en la mayoría de los casos.
4. Se reporta un valor de intensidad de turbulencia de alrededor del 30%, como el más frecuente entre los datos tomados en los diez anemómetros, de las dos torres empleadas en esta investigación.
5. A pequeña escala, estar directamente sobre árboles aumenta aún más el efecto de la turbulencia.

Considerando los resultados de este estudio, se puede afirmar que para cualquier región boscosa donde se pretenda instalar turbinas eólicas de pequeña escala, es conveniente buscar una zona localmente sin obstáculos, para evitar el efecto local de la turbulencia, pero aun así se debe considerar que el equipo operará a niveles promedio de 30% de intensidad de turbulencia.

Referencias

- [1] Z. Simic, J. G. Havelka and M. Bozicevic, "Small wind turbines – A unique segment of the wind power market," *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 1027-1036, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.038>
- [2] A. Tummala et al., "A review on small scale wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1351-1371, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- [3] B. Kosasih and H. S. Hudin, "Influence of inflow turbulence intensity on the performance of bare and diffuser-augmented micro wind turbine model," *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 154-167, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.013>
- [4] 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, n° 1, p. 58–63, 2012. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts009>
- [5] T. Kamada et 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, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.078>
- [6] M. Tahani et al., "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. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.073>
- [7] L. J. Lemes Stival, A. Kolodynskie Guetter and F. Oliveira de Andrade, "The impact of wind shear and turbulence intensity on wind turbine power performance," *España Energía*, vol. 27, 2017.
- [8] M. Talavera and F. Shu, "Experimental study of turbulence intensity influence on wind turbine performance and wake recovery in a low-speed wind tunnel," *Renewable Energy*, vol. 109, pp. 363-371, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.034>
- [9] K. Torres-Castro, C. Torres-Quirós and G. Richmond-Navarro, "Microgeneración de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso," *Tecnología En Marcha*, vol. 34, no. 3, p. 61–69, 2021. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5063>
- [10] G. Richmond-Navarro, M. Montenegro-Montero and C. Otárola, "Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas," *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 17, no. 1, pp. 233-251, 2020. <https://doi.org/10.22507/rli.v17n1a22>
- [11] G. Richmond-Navarro, P. Casanova-Treto, and F. Hernández-Castro, "Efecto de un difusor tipo wind lens en flujo turbulento," *Uniciencia*, vol. 35, n° 2, pp. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.7>
- [12] V. Salas-Mora and G. Richmond-Navarro, "Safety Design of a Hybrid Wind-Solar Energy System for Rural Remote Areas in Costa Rica," *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER*, vol. 10, no. 1, pp. 33-44, 2020.
- [13] K.C. Anup, J. Whale and T. Urmee, "Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review," *Renewable Energy*, vol. 131, pp. 268-283, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.050>

- [14] G. Gualtieri, "Surface turbulence intensity as a predictor of extrapolated wind resource to the turbine hub height: method's test at a mountain site," *Renewable Energy*, vol. 120, pp. 457-467, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.001>
- [15] J. Zhang et al., "Comparison of wind characteristics at different heights of deep-cut canyon based on field measurement," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, n° 2, pp. 219-233, 2019. <https://doi.org/10.1177/1369433219868074>
- [16] A. Rigden, D. Li and G. Salvucci, "Dependence of thermal roughness length on friction velocity across land cover types: A synthesis analysis using AmeriFlux data," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 249, pp. 512-519, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.003>
- [17] M. Rashid Abbas et al., "Assessment of Aerodynamic Roughness Length Using Remotely Sensed Land Cover Features and MODIS," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/722/1/012015>
- [18] M. Giometto et al., "Effects of trees on mean wind, turbulence and momentum exchange within and above a real urban environment," *Advances in Water Resources*, vol. 106, pp. 154-168, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.06.018>
- [19] C. W. Kent et al., "Aerodynamic roughness variation with vegetation: analysis in a suburban neighbourhood and a city park," *Urban Ecosystems*, vol. 21, p. 227-243, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0710-1>
- [20] L. Kang et al., "Experimental Investigation of the Aerodynamic Roughness Length for Flexible Plants," *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 172, p. 397-416, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00449-0>
- [21] DAVIS. (MANUAL) Anemometer for Vantage Pro2 (6410). En línea (última consulta 16/11/2021) <https://support.davisinstruments.com/article/8nyitrnulq-manual-optional-ac-charger-kit-for-vantage-connect-hd-solar-power-kit-6710>