

CARACTERIZACIÓN DE RECURSO EÓLICO EN UN ENTORNO URBANO CON ALTA TURBULENCIA

WIND RESOURCE CHARACTERIZATION IN A HIGH TURBULENCE ENVIRONMENT

Roger Ariel Lizama García

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, México
roga.riel@hotmail.com

Eduardo Ernesto Ordoñez López

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, México
eduardo.ordonez@correo.uady.mx

Ricardo Javier Peón Escalante

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, México
rpeon@correo.uady.mx

Braulio José Cruz Jiménez

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, México
braulio.cruz@correo.uady.mx

Luis Josué Ricalde Castellanos

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, México
lricalde@correo.uady.mx

Recepción: 27/noviembre/2025

Aceptación: 31/marzo/2026

Resumen

Este trabajo presenta una metodología para caracterizar el recurso eólico en zonas con distinta densidad urbana analizando: patrón promedio diario, intensidad de turbulencia, probabilidades de velocidades de viento y rosa de los vientos. Se emplearon un anemómetro fijo, una torre meteorológica y un sistema SODAR (Sonic Detection and Ranging) en dos zonas de medición: “urbana” y “despejada”. En ambas zonas, las velocidades predominantes se ubicaron entre 1 y 4 m/s a bajas alturas, alcanzando hasta 7 m/s en alturas mayores. La zona despejada presentó menor turbulencia y un flujo más constante de viento; mientras que la zona urbana reprodujo condiciones típicas de áreas densamente edificadas. Los resultados indican que el recurso eólico en la zona seleccionada comparte características con una zona urbana estándar, por lo que puede considerarse como referencia para

futuras investigaciones y proyectos de aerogeneradores de microescala o de baja potencia en entornos urbanos.

Palabras Clave: Patrón promedio diario, recurso eólico, turbulencia.

Abstract

This paper presents a methodology for characterizing the wind resource in areas with varying urban densities by analyzing average daily wind patterns, turbulence intensity, wind speed probabilities, and wind roses. A fixed anemometer, a meteorological tower, and a SODAR (Sonic Detection and Ranging) system were used in two measurement zones: "urban" and "clear." In both zones, the prevailing wind speeds ranged between 1 and 4 m/s at low altitudes, reaching up to 7 m/s at higher altitudes. The uncovered zone presented less turbulence and a more constant wind flow, while the urban zone reproduced conditions typical of densely built-up areas. The results indicate that the wind resource in the selected zone shares characteristics with a standard urban area and can therefore be considered a reference for future research and micro-scale or low-power wind turbine projects in urban environments.

Keywords: Daily average pattern, turbulence, wind resource.

1. Introducción

Según Anup [2018], el recurso eólico urbano aún no se explota eficientemente debido a una falta de estudios detallados de evaluación de recursos. Igualmente, se recalca la necesidad de una o varias mediciones en sitio para entender el flujo de viento en áreas urbanas. Para una correcta evaluación técnica de proyectos eólicos a microescala, se recomienda evaluar el viento del sitio (su dirección impredecible, bajas velocidades y alta turbulencia), así como las turbinas [Fields, 2016; Tasneem, 2020].

En su estudio, Tummala [2015], menciona que las turbinas de pequeña escala pueden representar un menor impacto ambiental que las de escala mayor, ya que se pueden incorporar al entorno urbano y satisfacer necesidades domésticas sin alterar las condiciones climáticas. Según Clemente [2020], el entorno urbano ofrece

ventajas sobre proyectos eólicos a gran escala como la cercanía entre generación y consumidor, fácil interconexión a la red eléctrica y precios factibles para equipos pequeños.

Para este artículo, se plantea caracterizar el recurso eólico de una zona urbana, dentro de la ciudad de Mérida, Yucatán, México, usando un método similar al de Rezaeiha [2020], a partir de una adquisición de datos y caracterización de la velocidad del viento. El presente artículo se distingue del mencionado en que compara los datos eólicos de ambas zonas, mientras que el artículo referido se enfoca en caracterizar el viento en el edificio y encontrar un aerogenerador adecuado para el sitio, además de que requiere datos del edificio, que en esta investigación no fueron necesarios.

Para construir la base de datos, se midieron la velocidad y dirección del viento, así como la turbulencia a distintas alturas en los sitios de medición con una metodología similar a Zhou [2022], pero con un enfoque en comparar los resultados de diferentes equipos. Si se siguen con los parámetros de una zona urbana, este sitio puede servir como referencia para futuros proyectos eólicos de microescala.

Estudios como los de Yang [2016] y Anup [2018] enfatizan que la alta turbulencia y bajas velocidades reducen la potencia extraída del viento y deben analizarse para integrar aerogeneradores propiamente en los ambientes urbanos. El primer estudio sugiere modificaciones en los edificios (curvando sus bordes) para reducir la turbulencia, mientras que el segundo recopila estudios y sugiere cambios como modificar los edificios para reducir la turbulencia o instalar aerogeneradores a mayores alturas.

El análisis del recurso eólico en entornos urbanos, como la ciudad de Mérida, Yucatán, permite ampliar el conocimiento sobre el comportamiento del viento en contextos de alta complejidad aerodinámica. A diferencia de los grandes parques eólicos, la generación a microescala requiere una caracterización detallada de las condiciones locales para garantizar su viabilidad técnica y económica.

Este estudio contribuye a dicha tarea al comparar datos obtenidos en zonas despejadas y urbanas, lo que permite identificar las diferencias en velocidad, dirección y turbulencia del viento. Los resultados de este estudio podrán servir como

base para el desarrollo de futuros proyectos eólicos urbanos en la región, fomentando el aprovechamiento sostenible del recurso eólico en ciudades.

2. Métodos

Las mediciones hechas en la facultad de ingeniería de la UADY (FI-UADY) se hicieron en dos ubicaciones dentro de la misma: un edificio de dos plantas en una zona concurrida de la FI-UADY, que será referido como “zona urbana”, y una zona alejada de los edificios, que será referida como “zona despejada”. La ubicación de los puntos de medición se muestra en la Figura 1. Se colocaron tres dispositivos para realizar mediciones de dirección y velocidad de viento: en la zona despejada se trabajó con una torre de medición con un anemómetro funcionando a 20 *metros* (cuadro azul) y un equipo de medición SODAR mostrado con un cuadro negro en dicha figura, que capturó datos de alturas de hasta 100 *m*, en la zona urbana se instaló un anemómetro a una altura de 10 *m* representado con un cuadro rojo. La información recopilada funcionó para formar una base de datos con la cual comparar las condiciones del viento en ambas zonas.



Fuente: Google Earth.

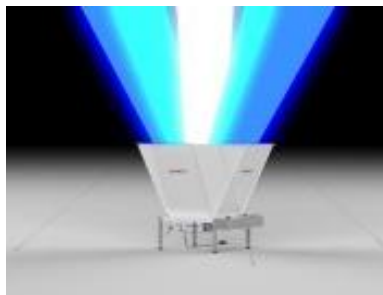
Figura 1 Zonas de trabajo y sus coordenadas.

Funcionamiento de los equipos de medición

Los equipos de medición fueron seleccionados por su disponibilidad en la FI-UADY, además de que habían recopilado datos por al menos un año. El monitoreo

con estos equipos a distintas alturas y velocidades de muestreo favoreció que se hiciera una comparación para tener resultados más precisos:

- **Dispositivo SODAR (Sonic Detection and Ranging):** Un SODAR (Figura 2) según Buzdugan [2019], es un instrumento de teledetección terrestre, que sirve para medir velocidad de viento basado en la turbulencia en la atmósfera baja, su funcionamiento se ejemplifica en la Figura 2a. Un SODAR fue instalado en la FIUADY (Figura 2b), el cual envía pulsos acústicos cortos a la atmósfera y recibe sonido retrodispersado, generado por fluctuaciones de densidad a pequeña escala; midiendo las señales que se reciben en direcciones diferentes, se determina el viento tridimensional a alturas específicas asumiendo un flujo homogéneo horizontal [SCINTEC, 2020].



a) Funcionamiento ilustrado de SODAR.

Fuente: [SCINTEC, 2020].



b) Equipo instalado.

Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Funcionamiento de un SODAR y equipo instalado.

- **Torre de medición:** La torre meteorológica se usó para evaluar las condiciones de viento in situ. Siguiendo los criterios de MEASNET [2016], la torre fue instalada en un terreno simple a una altura superior de dos tercios de la altura del aerogenerador sugerido (Figura 3).
- **Estación meteorológica Davis:** El anemómetro usado en la zona urbana es una estación meteorológica Vantage Vue de la marca DAVIS (Figura 4). La estación meteorológica mide velocidad, dirección de viento, presión atmosférica, entre otros.

Aunque los equipos seleccionados dieron resultados suficientes para una conclusión satisfactoria, es importante mencionar que, para futuros estudios de esta

naturaleza, se podría aumentar el número de instrumentos de medición y las representaciones de datos para tener más información y facilitar este concepto eólico en otros experimentos o desarrollo de nuevos prototipos.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Torre meteorológica instalada.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Estación Davis instalada.

Factores medidos

Las mediciones de velocidad y dirección de viento sirvieron para caracterizar tres propiedades del recurso eólico: patrón promedio diario mensual (PPD), intensidad de turbulencia (IT) y la probabilidad de cada velocidad de viento registrada:

- **Patrón promedio diario (PPD) mensual:** El PPD, también llamado "velocidad de viento promedio" o "mean wind speed", en inglés, se puede definir como la "velocidad de viento promediada con respecto a un intervalo de tiempo específico", Ecuación 1. Donde $\underline{U}$ es la velocidad promedio de viento y u_i la velocidad instantánea.

$$\underline{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (1)$$

El PPD mensual muestra el comportamiento del viento a lo largo de las 24 horas de un día "promedio" para cada mes. En su estudio, Suomi [2018], menciona que este parámetro se mide comúnmente a diez metros de altura.

- **Probabilidad de velocidades de viento (Modelo de Weibull):** Con las velocidades de viento registradas, se puede calcular la probabilidad de las velocidades de viento tomadas usando un ajuste al modelo de Weibull. Se

trabajó con la distribución de Weibull de dos parámetros (forma y escala). Según Kaplan [2017], esta función se ha usado ampliamente para evaluar las características de viento y puede ser graficada con un estimador de media o de mediana. Para este trabajo se utilizó la media de los datos. El modelo matemático de Weibull representa la probabilidad (x) y su función de densidad ($g(x)$). Los parámetros α y β , son los parámetros de escala y forma, respectivamente. La función usada se encuentra expresada en la Ecuación 2.

$$g(x) = \alpha\beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^\beta} \quad x \geq 0. \quad \alpha, \beta > 0 \quad (2)$$

Intensidad de turbulencia (IT): Un factor que se midió fue la Intensidad de turbulencia (IT). Según BOEM [2018], la turbulencia se define como la "variabilidad natural de la velocidad de viento en la velocidad promedio en un periodo de medición" y la IT indica la probabilidad de que se presenten turbulencias a distintas velocidades de viento (Ecuación 3). Donde σ es la desviación estándar de la velocidad de viento y V la velocidad promedio del viento.

$$IT = \frac{\sigma}{V} \quad (3)$$

Usualmente se toman en cuenta las velocidades de viento en periodos de diez minutos. Es importante considerar la IT en ambientes urbanos y complejos, debido a su composición complicada de residencias, árboles y otros obstáculos que afectan el flujo de viento. Matemáticamente, se clasificará la turbulencia en valores bajos (0 – 0.1), medios (0.1 – 0.25) o altos (mayores a 0.25). Según Yang [2016], la alta IT puede influenciar la operabilidad y el tiempo de vida de los aerogeneradores, reducir la obtención de potencia y causar una carga excesiva en los componentes de las turbinas eólicas. Es importante saber la IT a distintas velocidades y alturas para entender el comportamiento del viento en las zonas de interés.

Representación gráfica del recurso eólico (Rosa de los vientos)

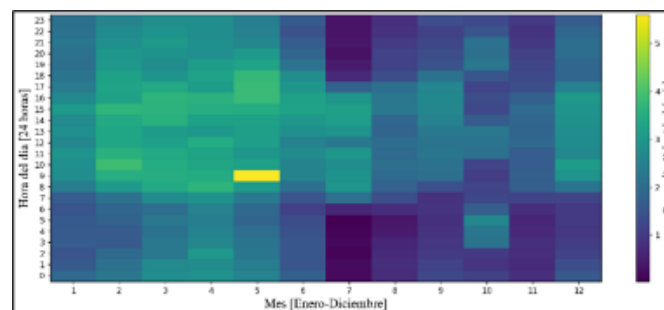
Una forma de representar el comportamiento del recurso eólico puede ser mediante las gráficas llamadas “rosa de los vientos” (RDV). Estas muestran la

dirección y probabilidad de las distintas velocidades de viento en los sitios de medición; se eligió este tipo de ilustración porque, según De Ávila [2021], en un terreno complejo o con varias direcciones de viento dominantes, la rosa de vientos permite analizar la variabilidad de la dirección y velocidad del viento.

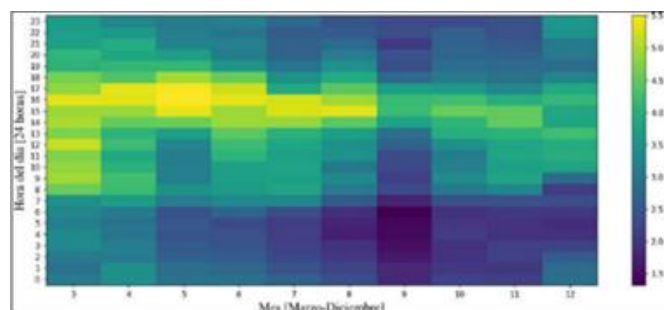
3. Resultados

Patrón promedio diario

El PPD hecho con datos obtenidos de la estación Davis se muestra en la Figura 5a. Las velocidades son bajas hasta las 8 a.m. y alcanzan sus valores máximos, entre 4 y 5 m/s, entre las 10 a.m. y 4 p.m. Los meses con mayores velocidades de viento son marzo, abril y mayo.



a) Estación Davis.



b) Torre meteorológica

Fuente: elaboración propia.

Figura 5 PPD anual con datos.

El PPD mensual de la torre de medición, (Figura 5b), muestra velocidades ligeramente mayores y con más picos que en la zona urbana. Los resultados son constantes a lo largo del año y su periodo de mayor velocidad es entre las 9 a.m. y las 6 p.m. Los meses que tienen mayores velocidades de viento son marzo, abril y

mayo. Los PPD del SODAR se comparan con los otros PPD en la Tabla 1. La estación Davis detecta las menores velocidades de viento, seguidas por la torre, que presenta un PPD más uniforme. El SODAR muestra lecturas bajas que aumentan con la altura. Los horarios de mayores lecturas permanecen constantes.

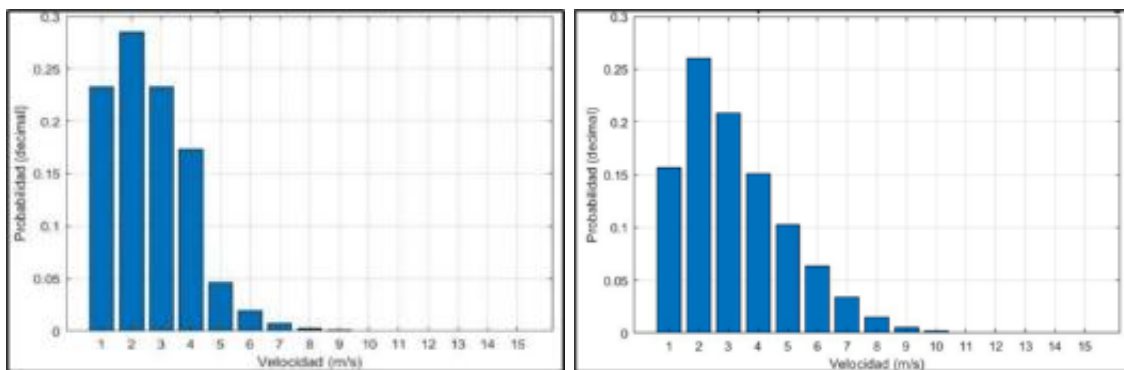
Tabla 1 Resultados de PPD del SODAR.

Altura (m)	Hora de mayores velocidades	Mayores velocidades (m/s)	Meses de velocidades mayores
10	8:00 – 18:00	5	Abril, julio, octubre
10 (Davis)	10:00 – 16:00	4	Marzo, abril y mayo
20	8:00 – 18:00	6	Abril, julio, diciembre
30 (torre)	09:00 – 18:00	5	Marzo, abril y mayo
30	8:00 – 18:00	5	Marzo, abril, octubre,
40	8:00 – 18:00	5	Marzo, abril, mayo
50	8:00 – 18:00	6	Marzo, mayo, junio, julio
60	8:00 – 18:00	7	Marzo, abril, mayo
70	8:00 – 18:00	7	Marzo, abril, mayo, junio
80	8:00 – 18:00	7	Mayo, junio, julio
90	8:00 – 18:00	7	Marzo, abril, mayo
100	8:00 – 18:00	7	Mayo, junio, julio

Fuente: elaboración propia.

Probabilidades de viento

La Figura 6 muestra las probabilidades de velocidades. En la Figura 6a, se observa que la estación Davis muestra casi un 25 y 30% de probabilidad en las velocidades de 1 y 2 m/s, respectivamente. Las velocidades registradas en la torre, vistas en la Figura 6b, muestran mayor probabilidad de ocurrencia de velocidades entre 1 y 4 m/s.



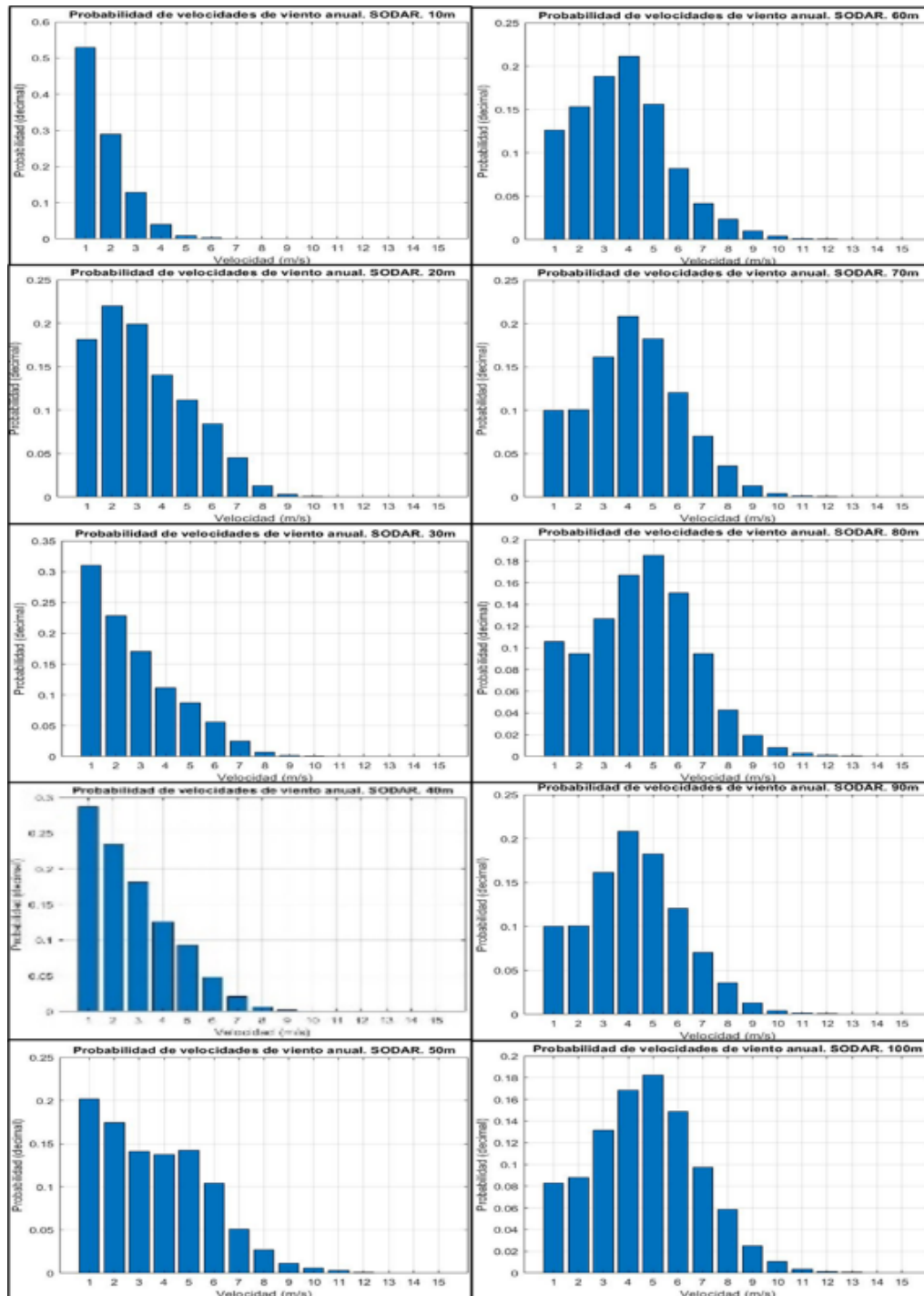
a) Velocidades de la estación Davis.

b) Velocidades de la torre meteorológica.

Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Probabilidades de velocidades.

Las velocidades obtenidas por el SODAR (Figura 7) y comparadas en la Tabla 2, muestran velocidades entre 1 y 5 m/s. En general, ambas zonas tienen bajas velocidades.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Distribución de probabilidad de viento anual del SODAR a distintas alturas.

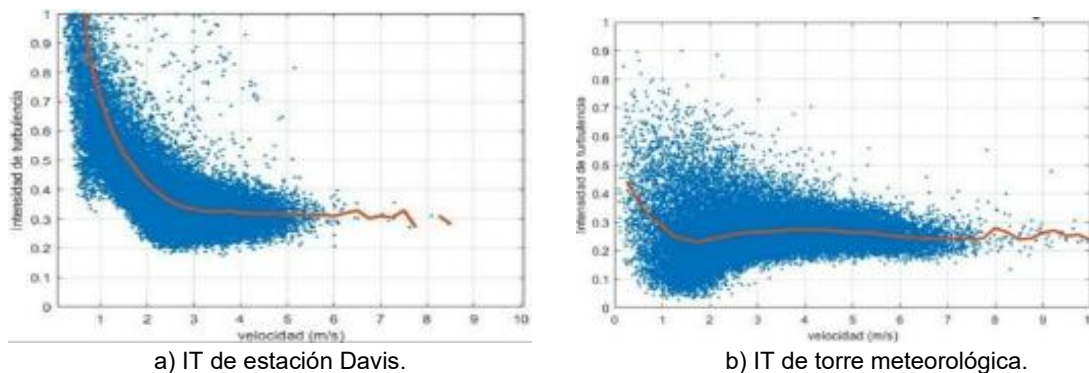
Tabla 2 Resultados de probabilidades de viento.

Altura (m)	SODAR		Torre		Davis	
	Velocidad promedio (m/s)	Probabilidad (%)	Velocidad promedio (m/s)	Probabilidad (%)	Velocidad promedio (m/s)	Probabilidad (%)
10	≤ 1	> 50	-	-	2	< 30
20	2	> 20	2	25	-	-
30	≤ 1	> 30	-	-	-	-
40	≤ 1	< 20	-	-	-	-
50	≤ 1	20	-	-	-	-
60	4	> 20	-	-	-	-
70	4	> 20	-	-	-	-
80	5	18	-	-	-	-
90	4	> 20	-	-	-	-
100	5	18	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

Intensidad de turbulencia

La turbulencia alcanzada en la estación Davis, vista en la Figura 8a, alcanza un valor estable desde velocidades de 3 m/s. La IT es igual o mayor a 30%, esto significa que, al menos hasta alcanzar los 7 m/s, el viento mantiene una IT que tiende a ser de mediana a alta. Las lecturas de la torre, vistas en la Figura 8b reflejan un valor estable a casi todas las velocidades. El valor medio de la IT se encuentra entre 20 y 30%, manteniendo una IT de mediano valor.

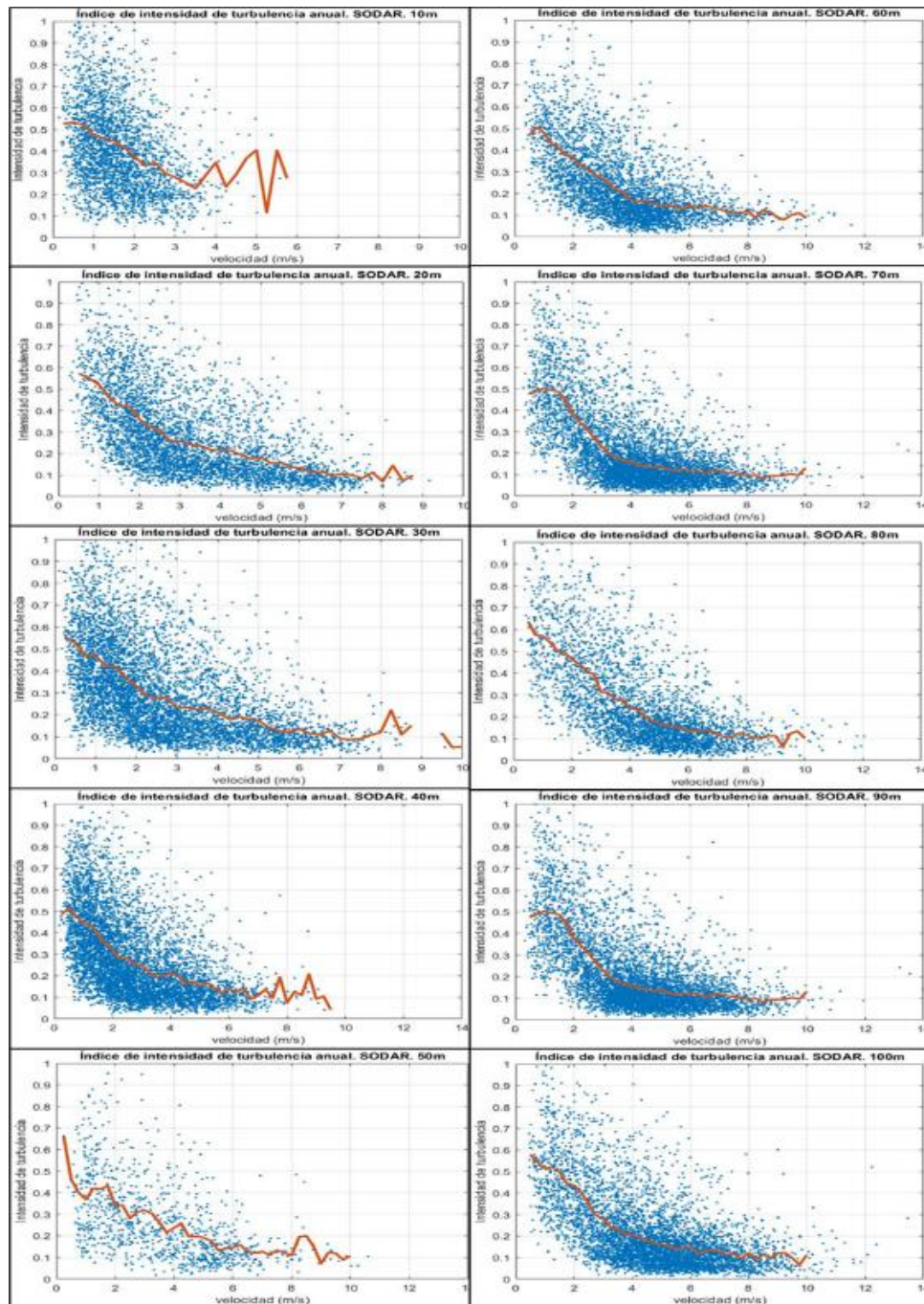


Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Intensidades de turbulencia anual.

Los datos del SODAR alcanzan IT distintas conforme se aumenta la altura, las lecturas están representadas en la Figura 9. La IT es alta a 10 metros de altura; a partir de 20 metros de altura, la IT se reduce hasta 10% entre velocidades de 5 y 10 m/s. La IT está estratificada en las mediciones de bajas alturas del SODAR, esto

puede deberse a interferencia causada por el mismo edificio en el que fue instalado y obstáculos cercanos. La IT no cambia considerablemente a distintas alturas, pues esta encuentra valores bajos (cercano a 10%) en velocidades cercanas a 6 m/s y se mantiene casi constante desde esta velocidad.

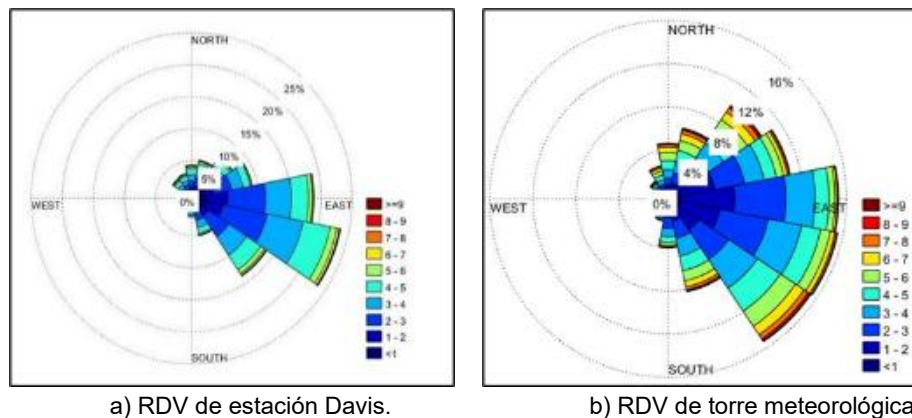


Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Intensidad de turbulencia del SODAR a distintas alturas.

Comportamiento del viento.

La estación Davis refleja que el viento más común se presenta a velocidades menores de 5 m/s y que, mayormente, proviene del este y sureste. La RDV de la estación Davis se observa en la Figura 10a. El comportamiento de la torre, visto en la Figura 10b, muestra que el viento de sureste es casi igual de probable que el viento del este. Se distingue que se alcanzan, con poca probabilidad, velocidades de hasta 9 m/s .



Fuente: elaboración propia.

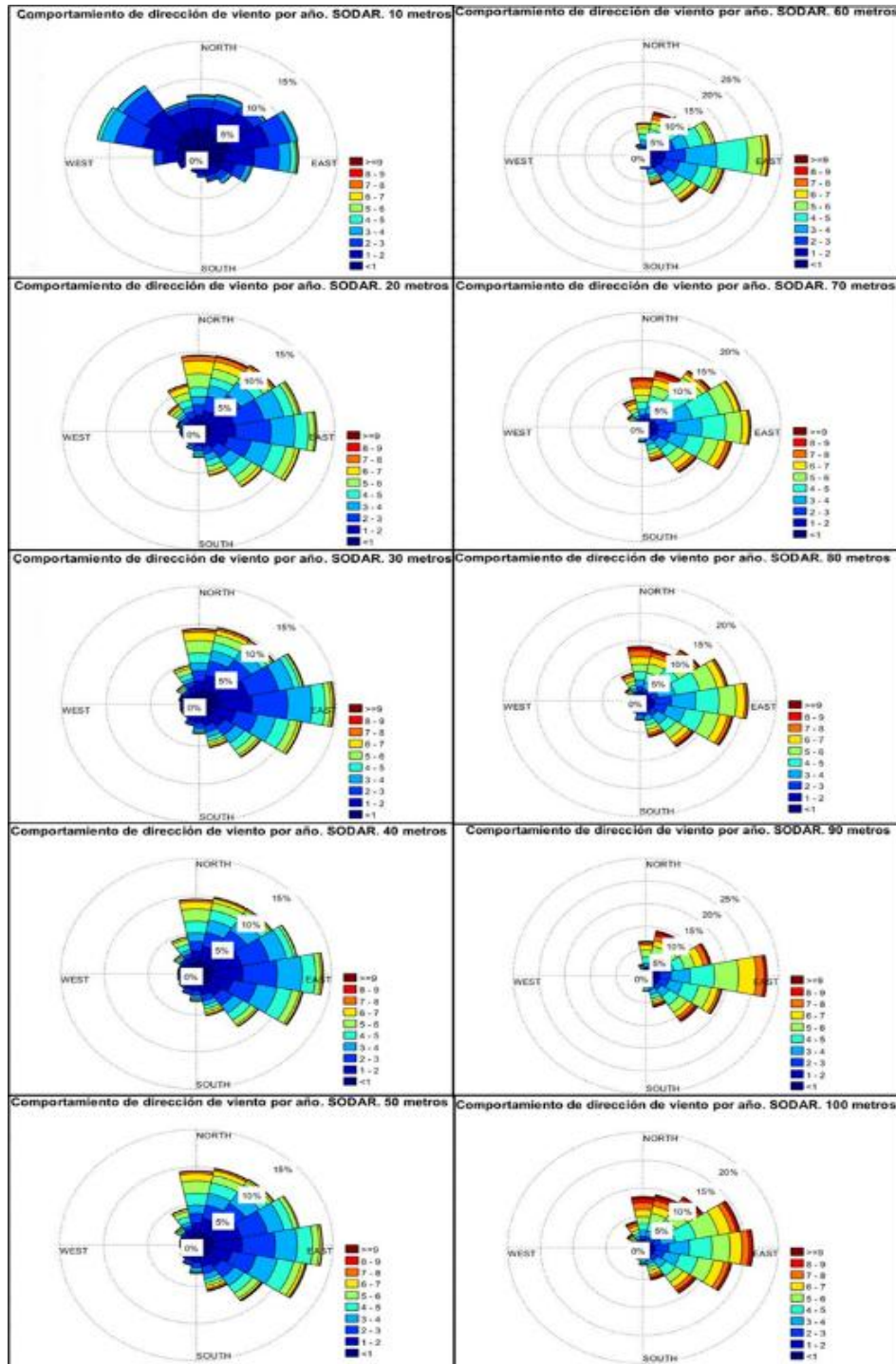
Figura 10 Recurso eólico de la estación Davis y la torre meteorológica.

Las lecturas del SODAR (Figura 11) y comparadas en la Tabla 3, muestran velocidades bajas provenientes del norte, y a 10 *metros* de altura se observa un amplio sector de viento que va de oriente a poniente. Entre los 20 y 50 *metros* de altura, se identifica la mayoría de las lecturas que provienen del este o sureste. Las velocidades más probables llegan hasta 5 m/s desde los 60 *metros* de altura. Los porcentajes de velocidades de viento desde el este se incrementan, aunque con valores relativamente bajos. A los 70, 80 y 100 *metros* de altura, se vuelve a ver viento que proviene del noreste, este y sureste, pero las velocidades aumentan hasta 9 m/s .

4. Discusión

Ambas zonas muestran una tendencia a bajas velocidades de viento proveniente del este, estas velocidades están entre 1 y 4 m/s en la estación Davis y la torre de

medición, mientras que el SODAR muestra velocidades que pueden llegar hasta 7 m/s en alturas mayores.



Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Comportamiento de recurso eólico para la estación SODAR de 10 a 100 m.

Tabla 3 Comparación de resultados de RDV.

Altura (m)	SODAR		Torre		Davis	
	Dirección	Probabilidad (%)	Dirección	Probabilidad (%)	Dirección	Probabilidad (%)
10	Oeste	15	-	-	Sureste	25
20	Este	15	Sur, Sureste	> 15	-	-
30	Este	15	-	-	-	-
40	Este	15	-	-	-	-
50	Este	< 15	-	-	-	-
60	Este	< 25	-	-	-	-
70	Este	> 15	-	-	-	-
80	Este	15	-	-	-	-
90	Este	> 20	-	-	-	-
100	Este	> 15	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia

La zona urbana tiene un comportamiento similar de las velocidades de viento a las mediciones realizadas por el SODAR a 10 y 20 *metros* y se ven mejores resultados en las mediciones de la torre a 20 *metros* y el SODAR a 30 *metros*.

Las lecturas del SODAR muestran mayores velocidades de viento que las lecturas obtenidas por la estación Davis y la torre meteorológica conforme aumenta la altura de medición.

5. Conclusiones

Se puede concluir que en la zona urbana se presenta una mayor turbulencia que en la zona despejada, la IT medida por la torre permanece casi constante a distintas velocidades y, por último, la IT tomada del SODAR disminuye considerablemente conforme se aumenta la altura. Con estas mediciones, se puede concluir que el recurso eólico en la zona urbana tiene velocidad baja y presenta una alta IT, mientras que la zona despejada muestra velocidades similares, pero con menor IT. Este fenómeno promete un flujo más constante de viento y, dependiendo de la altura, mayor velocidad. Habiendo registrado velocidades bajas y una alta IT, la zona seleccionada dentro de la FI-UADY presenta las condiciones de viento de una zona densamente poblada y puede usarse para futuros proyectos de investigación sin necesidad de mover equipos a zonas más pobladas, lo que garantiza un entorno controlado de estudio.

Se considera expandir este estudio para obtener mejores resultados y aplicarlos para aprovechar el recurso eólico en la ciudad de Mérida, Yucatán. Los desafíos principales son los resultados bajos y lo limitada que está el área de estudio, pero se buscará aprovechar las bajas velocidades en flujo laminar y turbulento.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Anup, K.C., Whale, J., & Urmee, T., Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. *Renewable Energy*, vol. 131, pp. 268–283, 2019.
- [2] Bureau of Ocean Energy Management (BOEM), Metocean Characterization Recommended Practices for U.S. Offshore Wind Energy. OCS Renewable Energy. California: DNV KEMA Renewables, Inc (DNV GL), 2018.
- [3] Buzdugan, L., & Stefan, S., A comparative study of Sodar, Lidar wind measurements and aircraft derived wind observations. *Romanian Journal of Physics*, vol. 65, no. 810, pp. 1-15, 2019.
- [4] Clemente, R., (2020). Recurso eólico urbano en Mérida Yucatán, potencial disponible y propuestas para su aprovechamiento. Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Tesis obtenida de: <http://redi.uady.mx:8080/handle/123456789/4285>.
- [5] De Ávila, A., Pérez, D., & Jiménez, J., Análisis del potencial eólico a través de la función de distribución de Weibull y Rosa de los vientos. *Latin American Developments in Energy Engineering*, no. 1, vol. 3, pp. 40-46, 2021.
- [6] Fields, J., Oteri, F., Preus, R., & Baring-Gould, I., (2016). Deployment of Wind Turbines in the Built Environment: Risks, Lessons, and Recommended Practices. National Renewable Energy Laboratory. Obtenido de: <https://docs.nrel.gov/docs/fy16osti/65622.pdf>.
- [7] Kaplan, Y., Determination of the best Weibull methods for wind power assessment in the southern region of Turkey. *IET Renewable Power Generation*, no. 1, vol. 11, pp. 175-182, 2017.
- [8] MEASNET, (2016). Measuring Network of Wind Energy Institutes. Evaluation of site-specific wind conditions: Procedure V2.0 [Guía técnica].

https://www.measnet.com/wp-content/uploads/2016/05/Measnet_Site_Assessment_V2.0.pdf

- [9] Suomi, I., Vihma, T., Wind Gust Measurement Techniques—From Traditional Anemometry to New Possibilities. *Sensors*, no. 4, vol 18, pp. 1-27, 2018.
- [10] Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B., A framework for preliminary large-scale urban wind energy potential assessment: Roof-mounted wind turbines. *Energy Conversion and Management*, vol. 214, pp. 1-16, 2020.
- [11] SCINTEC, (2020). FAS Series Sodar Wind Profilers. <https://www.scintec.com/catalogs/sodar-wind-profilers>.
- [12] Tasneem, Z., Al Noman A., Das, S. K., Saha, D., Islam, R., Ali, F., Badal, F. R., Ahamed, H., Moyeen S. I., & Alam, F., An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: prospect and challenges. *Developments in the Built Environment*. vol. 4, pp. 1-15, 2020.
- [13] Tummala, A., Velamati, R., Sinha, D., & Indraja, V., A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 56, pp. 1351-1371, 2015.
- [14] Yang, A., Su, Y., Wenc, C., Juan, Y., Wang, W., & Cheng, C., Estimation of wind power generation in dense urban area. *Applied Energy*, vol. 171, pp. 213–230, 2016.
- [15] Zhou, S., Yang, Y., Gao, Z., Xi, X., Duan, Z., & Li, Y., Estimating vertical wind power density using tower observation and empirical models over varied desert steppe terrain in northern China. *Atmospheric Measurement Techniques*, no. 3, vol. 15, pp. 757–773, 2022.