



Wind Energy Generation Worldwide: A review

Gustavo Arturo Castellanos Guzmán^{1}, Tanya Estrella Torres Valdez¹, Claudia Graciela Torres Orozco¹, Adrián Vázquez Vázquez¹, Oscar Castillo Martínez¹*

¹Universidad Politécnica de Altamira

**gustavoacastellanosg@gmail.com*

RESUMEN

La necesidad de producción de energía limpia para reemplazar los métodos convencionales y contaminantes de generación de energía ha provocado una amplia gama de investigaciones a nivel mundial. Esta energía se transforma en electricidad a través de turbinas eólicas que deben cumplir ciertos parámetros. Sin embargo, existen varias complicaciones para su diseño óptimo, como un flujo de viento irregular y un flujo bajo, en muchas áreas. En consecuencia, algunos autores han desarrollado investigaciones donde estudian la energía eólica para diseñar perfiles aerodinámicos que les permitan aprovechar al máximo esta energía limpia.

Palabras claves: Energía eólica, Energía limpia, Diseños de turbinas eólicas, Una revisión, Investigación mundial de turbinas eólicas

ABSTRACT

The necessity of production of clean energy to replace conventional and polluting power generation methods has sparked a wide range of research at a global level. One of the least polluting energy sources in the world is wind power. This energy is transformed into electricity through wind turbines which must fulfill certain parameters for the best generation of energy. However, there are various complications for their optimal design such as irregular wind flow and low flow in many areas. Consequently, some authors have developed research where they study wind energy to design aerodynamic profiles that allow them to take the most advantage of this clean energy.

Key words: Wind Energy, Clean Energy, Wind Turbines Designs, A Review, Worldwide Wind Turbine Research.

INTRODUCCIÓN

A nivel global se atraviesa una fase de transición energética basada en una mayor incidencia de la electricidad y un mayor peso de las energías renovables las cuales producen un 7% del total de energía eléctrica a nivel mundial, de los cuales, la energía eólica representa el 50% de las energías generada por estos métodos (Aggio C. et al., 2018). La eólica es, después de la hidráulica, una de las fuentes de energía más productivas para generar la electricidad y se considera un recurso de energía renovable limpio y competitivo (NatGeo 2020). Se espera que para el año 2025 la generación de energía eólica instalada supere los 760 (REN21, 2017; GWEC, 2017).

Desafíos del viento.

La energía eólica es aquella que aprovecha la energía del viento transformando la energía cinética de este mismo en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica para que llegue a ser útil (Beltrán-Telles, A., 2017). La transformación de la energía se realiza con el uso de aerogeneradores, los cuales, dependiendo de su tipo de rotor o eje de rotación, varían en su potencia nominal (C. Martín Mayordomo, 2015). La problemática por las irregularidades del flujo del viento ha desatado investigaciones y propuestas por el desarrollo de diseños que sean capaces de aprovechar al máximo la energía cinética del viento a fin de que los aerogeneradores sean lo más eficiente. Xingxing Li, et al., (2020) presentaron el diseño de un perfil aerodinámico para turbinas eólicas de eje horizontal en regiones de baja velocidad del viento. Como resultado, se presentó una optimización de diseño especial para estas condiciones utilizando modelos matemáticos mejorados y una plataforma de optimización automática modificada, con este método, tanto el rendimiento general como las características clave adaptadas a los sitios de baja velocidad del viento podrían mejorarse de manera efectiva. De forma similar, A. Suresh and S. Rajakumar (2019) realizaron un estudio donde diseñaron una pequeña turbina de eje horizontal de 2kW para que trabaje con vientos de bajas velocidades encontrados en algunas áreas rurales. Para conseguir esto realizaron un análisis evaluando 10 perfiles aerodinámicos distintos usando el software Qblade, se analizaron los coeficientes de elevación, las relaciones de elevación arrastre, con diferentes ángulos de inclinación para después compararlos entre sí. Después de realizar simulaciones y cálculos, encontraron el perfil aerodinámico necesario para conseguir su

objetivo, siendo seleccionado el SD7080. Kain Liu, M. Yu, and W. Zhu, (2019) describieron la propuesta de una herramienta analítica adecuada para turbinas eólicas de eje vertical de palas rectas (SBVAWT) de alta solidez, ya que los SBVAWT de alta solidez podrían ser valiosos en la aplicación por su velocidad operativa comparativamente baja y buen rendimiento de arranque automático. La aplicabilidad del modelo de tubo de flujo múltiple de doble disco (DMST), que es una herramienta principal para la medición de fuerzas aerodinámicas se examinó primero para SBVAWT de alta solidez utilizando los datos de medición en las palas obtenidos de las pruebas de túnel de viento. Se encontró que el campo de flujo complejo alrededor del SBVAWT de alta solidez presentó dificultades para que el modelo DMST actual hiciera predicciones satisfactorias. Luego, propusieron un modelo híbrido DMST, que utilizaba la relación Angulo de ataque-coeficiente de fuerza aerodinámica dinámica establecida en base a los datos de medición. El resultado demostró que las fuerzas aerodinámicas estimadas a partir del modelo DMST híbrido propuesto podía predecir las fuerzas aerodinámicas en las palas del SBVAWT de alta solidez con mayor precisión que los modelos DMST existentes. Actualmente, se han desarrollado investigaciones para implementar generadores de eje vertical que aprovechen el recurso eólico. Gómez, J.B., (2019) diseño un aerogenerador de eje vertical Darrieus tipo Giromill que generaba menos de 1,000 vatios de potencia en el eje, Hao Su, et. al., (2020) probó un nuevo tipo de turbina eólica de eje vertical que consta de tres pares de aspas en un túnel de viento para verificar la confiabilidad y eficiencia de la nueva configuración. La propuesta presenta ventajas significativas en el tema del arranque automático, la potencia de salida y la regulación de potencia, lo que hace que la configuración del equipo sea una solución práctica para los aerogeneradores de eje vertical de mediana y gran escala. En una novedosa aplicación, Ziyun Wang, et. al., (2019) realizaron un diseño enfocando a túneles de largas distancias y a edificios subterráneos. Este dispositivo, llamado "WIND ENERGY FAN (WEF)" utilizó la energía del viento para impulsar un ventilador conectado con una turbina eólica directamente por un eje de transmisión. Estos en conjunto eran capaces de generar ventilación subterránea. Establecieron una plataforma experimental para probar el rendimiento del WEF con la consideración de tres relaciones de transmisión y dos tipos de turbinas eólicas con 3 y 5 palas. El resultado fue que el WEF con la turbina eólica de

3 palas podía arrancar automáticamente con una velocidad del viento de más de 4,3 m / s, mientras que el WEF con la turbina eólica de 5 palas podía arrancar con una velocidad del viento de más de 5.1 m/s. El estudio realizado por S. Seralathan et al., (2020) analizan las propiedades mecánicas estáticas de la pala helicoidal del aerogenerador Savonius que se probó con una fuerza que varía de 15 N a 25 N, lo que representa las condiciones del viento oscilan entre 5 m / s a 11 m / s. Las propiedades a conocer fueron la tensión principal máxima, esfuerzo equivalente (von-misses), esfuerzo cortante, esfuerzo cortante máximo, deformación elástica equivalente y se realizó un análisis de deformaciones.

Rotores tipo H:

Una de las innovaciones que se le han implementado a este tipo de aerogeneradores, han sido los rotores tipo H. En los últimos años han sido objeto de estudio, con el objetivo de proporcionar una ventaja sobre los Aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus. Díaz, A.J.G., (2016) realizó una investigación en la cual diseño un aerogenerador vertical de tipo Darrieus para la zona costera del departamento de Córdoba en Colombia, con parámetros de una densidad de $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, viscosidad $\mu = 1.7894e^{-05} \text{ kg/ms}$, el flujo de aire se consideró incompresible, además de una intensidad turbulenta del 5% y un radio de viscosidad turbulenta de 10. Para esta investigación se utilizó el perfil naco 0025 dada las condiciones de estabilidad dinámica en bajos números de Reynolds. Se eligió el rotor Darrieus tipo H de baja potencia y a través del modelado del rotor (usando el método DMST) se obtuvieron la dimensión óptima del perfil y el diámetro del aerogenerador. Con el software ANSYS se determinó el rendimiento, obteniendo una longitud de cuerda óptima de 0,55 m y un radio del rotor de 1,3 m. En comparación con los resultados obtenidos el DMST, respecto a las simulaciones realizadas en ANSYS, se tuvo como resultado una discrepancia del 15% para el máximo momento a la velocidad de giro nominal.

Desafíos de los VAWT:

De acuerdo a la literatura, los aerogeneradores de eje horizontal son mas utilizados para la generación de energía eólica, debido a que una desventaja de los generadores de eje vertical se relaciona con el cambio de dirección del viento, el cual, a diferencia de los HAWT, el torque positivo no siempre se genera cuando la corriente de viento entrante

interactúa con las palas giratorias de los VAWT. El torque negativo que reacciona en la dirección contraria reduce el rendimiento general de los VAWT. Por lo tanto, los investigadores han sugerido muchas ideas innovadoras para mejorar el desempeño de los VAWT. La mayoría de los dispositivos de aumento se componen de un estator que se coloca en el lado de la turbina contra el viento. Puede ser una placa recta, una placa curva o cualquier otra forma. Generalmente, estas placas se utilizan como escudos para reducir el par negativo creado en el VAWT, para canalizar el flujo hacia un mejor ángulo de ataque o para mejorar la velocidad del flujo del viento al concentrar más flujo del viento hacia la turbina. A. Arab et al (2017) propuso un método numérico para estudiar las características de autoarranque de un aerogenerador Darrieus donde se consideró el momento de inercia del aerogenerador. La simulación comenzó desde el estado estacionario inicial y continuo hasta la condición periódica estable final. la velocidad de rotación instantánea de la turbina se calculó con respecto al tiempo. Los resultados indicaron que a medida que aumenta la inercia del rotor, la turbina tarda más en alcanzar su velocidad final, de manera que la turbina puede incluso no alcanzar la condición final y la rotación se detiene. Los resultados también mostraron que a medida que disminuyó la inercia del rotor, aumento la amplitud de las oscilaciones de la velocidad de rotación de la turbina. Esto puede permitir que la turbina pase pares resistentes más altos que los calculados con el método tradicion

Aerogeneradores de eje horizontal.

Se han realizado diversos prototipos y estudios en base a los aerogeneradores de eje horizontal para comprobar su rendimiento óptimo, Vinueza A., y Narvaez J., (2018), realizaron un estudio, que consistió en el diseño y simulación de un rotor para aerogeneradores de eje horizontal localizados en el parque Eólico del Cerro Villonaco, cuya velocidad promedio anual es de 12.4 m/s y la densidad del aire es de 0.9 kg/m³. Este diseño aerodinámico buscó tener un álabe con una geometría óptima, se realizó una simulación aerodinámica en un software, así como un análisis del rotor, se obtuvo como resultado una potencia de 107 KW de potencia de salida mecánica en la simulación, comprobando que el diseño del álabe cumple con el objetivo propuesto. D Icaza. Et al., (2018) Realizaron la construcción de un aerogenerador de 400W de eje horizontal con material reciclado en Ecuador. Utilizaron MATLAB para el análisis de datos, finalmente

se concluyó que los datos eran bastante consistentes y que mostraban un patrón de relación entre el modelo matemático que se utilizó y los datos obtenidos en sitio. B. Navin Kumar et al., (2020) realizaron un trabajo para controlar el exceso de velocidad de la turbina de viento de eje horizontal en el cual determinaron que el aspa de la turbina con la ranura de cuerdas altera la distribución de la presión sobre la turbina la cual reduce la velocidad de rotación de la turbina de viento dentro del límite permitido. En éste el exceso de velocidad del rotor de la turbina eólica se controla eficazmente sin afectar a la generación de energía, el análisis se realizó utilizando software de computación. En un estudio realizado por Suresh and S. Rajakumar, (2019), se diseñó una turbina eólica de eje horizontal a pequeña escala de 2 kW con un radio de rotor de 1,8 m y una relación de velocidad de punta de 6 para trabajar a baja velocidad del viento en aplicaciones rurales. El análisis aerodinámico se realizó en 10 perfiles aerodinámicos, que son, Aquila, BW-3, E387, FX63-137, NACA0012, NASA LS-0413, RG-15, S1223, SD7080 y SG6043 utilizando el software QBlade. Estos perfiles aerodinámicos se utilizaron para analizar el coeficiente de sustentación, la relación entre sustentación y resistencia, con diferentes ángulos de ataque y comparados entre sí, de la simulación numérica se determinó que el perfil SD7080 fue el más adecuado para comenzar a producir alta potencia en aplicaciones de baja velocidad del viento en la zona de estudio. En estudios de inclinación de las palas del aerogenerador, Venkaiah and Bikrash. K., (2020) realizaron un modelo para el control de la inclinación de la turbina eólica de eje horizontal el cual fue validado con resultados experimentales. El rendimiento del controlador PID de alimentación difusa propuesto se investigó con varias señales de prueba, así como con la demanda de tono pronosticada de los datos del viento y para evitar las fuertes ráfagas de viento. El índice de rendimiento difusa que propusieron se encontró como 0.08606, 0.08849 y 0.09809 con fugas normales, fugas altas y fugas muy altas, respectivamente. Feng-mei Jing et al. (2017) realizaron experimentos de la turbina modelo (1 kW) como de la turbina a escala completa (10 kW) en un tanque de remolque y una cuenca, se realiza la prueba de la turbina a escala real en el mar. Al comparar el modelo de turbina (= 0,7 m) de Diámetro y la turbina de escala completa (= 2,0 m) de diámetro, se obtiene que el coeficiente de potencia máxima aumenta con el aumento del diámetro de la turbina. Los resultados de las pruebas en el mar se utilizan para estudiar el rendimiento hidrodinámico de la turbina

de eje horizontal y proporcionar una base para el diseño. Los resultados experimentales pueden validar la precisión de los resultados de la simulación numérica. El coeficiente de potencia está relacionado con la velocidad del flujo entrante y el ángulo de inclinación de la pala. El coeficiente de potencia máxima disminuye con el aumento de la velocidad del flujo entrante, para el modelo de turbina diseñado, cuando el ángulo de paso de la pala es 0 grados, el rendimiento de potencia es el mejor.

Aerogeneradores Onshore y Offshore.

En cuestión de producción de energía eólica se pueden distinguir dos tipos distintos, en función de cómo y de donde se ubican, por un lado, están los onshore, la cual es sobre tierra y por el otro la offshore, la cual es en mar abierto (Peter Enevoldsen et al 2016). La estructura de una turbina eólica en tierra funciona en un entorno complicado y su estado de operación es complejo. En un estudio realizado por Yan Zhao et al (2020), se trabajó con el estado operativo de una turbina eólica de 1,5 MW y la respuesta a la vibración de la torre fueron monitoreados durante cierto periodo de tiempo en diferentes condiciones de funcionamiento, dicho fenómeno es corroborado por los diagramas de historia temporal de la condición operativa y la velocidad de vibración de un determinado proceso de impulso, Gustavo Oliveira et al (2018) realizaron un análisis basado en el monitoreo de un aerogenerador de 2.0 MW, la descripción del sistema de monitoreo instalado, así como los principales pasos incluidos en la metodología desarrollada para el procesamiento continuo de los datos recolectados, los resultados obtenidos durante un año de seguimiento permitieron la caracterización con precisión y la variabilidad de las propiedades dinámicas del aerogenerador, con especial énfasis en las frecuencias naturales y ratios de amortiguación de los modos de vibración más importantes, durante las condiciones normales de funcionamiento de la turbina eólica. Además, también, se identificaron varios sucesos de parada y los cuales fueron utilizados para estimar la amortiguación modal de la turbina eólica mediante el análisis de las respuestas de descomposición libre de la estructura. De modo similar, Mohamed Khaled M. et al (2019) desempeñaron un estudio en el cual compararon tres posibles soluciones para la cimentación de turbinas eólicas en tierra. Durante el desarrollo de dicho trabajo se centraron en el comportamiento geotécnico de las tres probables soluciones de cimentación para los aerogeneradores. El primer diseño constó de una balsa plana

tradicional, el segundo de una balsa plana profunda y el tercero consistió en una balsa cónica. Se mostró que una balsa cónica generó una disminución significativa de la inclinación en comparación con una balsa plana circular. Por lo tanto, el uso de una balsa cónica podría reducir las dimensiones de la base de la turbina, lo que podría conducir a la posible reducción de costes. Por su cuenta Jingxuan Feng, L et al (2020) realizaron en la zona de China Continental una evaluación sobre el potencial de energía eólica terrestre en la zona basándose en el modelo GIS y análisis EROI. se consideraron los efectos topográficos locales como la rugosidad de la superficie, densidad del aire. Otro tema que es de suma importancia con respecto a los aerogeneradores onshore es que medida que incrementa el número y las áreas de parques eólicos alrededor del mundo, se está volviendo cada vez más importante examinar el impacto de la energía eólica en el medio ambiente circundante. Un efecto en algunos escenarios es el ruido, el cual depende del tipo y la antigüedad de las turbinas eólicas y de las distancias entre éstas y los edificios habitacionales. En este orden de ideas Xiawei Wu et al. (2020) publicaron un estudio en el cual se analizaba la optimización en el diseño de parques eólicos terrestres para reducir el ruido, el trabajo se centró en un diseño óptimo para un parque eólico teniendo en cuenta su ruido sin sacrificar la producción de energía. Pablo Hevia-Koch and H. Klinge Jacobsen (2019) compararon el desarrollo eólico marino y terrestre considerando los costos de aceptación de cada uno. Para llevar a cabo la comparación en tierra y en alta mar se requirió una estimación de los costos de aceptación los cuales pueden derivarse de los pagos de compensación, la pérdida de valor de propiedad o estudios de preferencias, se concluyó que los tres métodos proporcionan estimaciones similares para la aceptación, pero que también existe un alto rango de incertidumbre en el límite superior de los costos de aceptación. Así que la expansión eólica terrestre moderada considerando solo la aceptación local tiene una ventaja de costos.

CONCLUSIONES

Con las investigaciones que se muestran en esta recopilación, se puede concluir que en la actualidad existen diferentes opciones para el aprovechamiento de la energía cinética del viento y convertirla en energía electricidad así también para la mejor selección del

aerogenerador a utilizar, dependerá del lugar donde serán instalados y la capacidad de generación que se requiere.

LITERATURA CITADA

- Aggio C., V. Verre, and F. Gatto, 2018, "Innovación y marcos regulatorios en energías renovables: el caso de la energía eólica en la argentina," Ciudad Autónoma de Buenos Aires: CIECTI.
- A. Arab, M. Javadi, M. Anbarsooz, and M. Moghiman, 2017, "A numerical study on the aerodynamic performance and the self- starting characteristics of a darrieus wind turbine considering its moment of inertia," *Renewable Energy*, vol. 107, pp. 298 – 311.
- A. Suresh and S. Rajakumar, 2019, "Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 23, pp. 16 – 22, 2020, advanced Materials for Clean Energy and Health Applications (AMCEHA) , University of Jaffna Sri Lanka.
- Beltrán-Telles, A. 2017, "Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica." *CienciaUAT*, vol. 11, numero 2.
- B. Navin kumar, S. Rajendran, A. Vasudevan, and G. Balaji, 2020, "Aerodynamic braking system analysis of horizontal axis wind turbine using slotted airfoil," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, Parte 7, pp 3970-3979.
- C. Martín Mayordomo, 2015, "Análisis de la fiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores.", Universidad de Valladolid.
- Díaz, A.J.G., 2016, "Diseño y modelamiento de un aerogenerador vawt darrieus tipo h para la zona costera del departamento de Córdoba." *Revista Ingeniare*, vol. 20.
- D Icaza. A. Lojano, 2018, "Construction of a 400W wind generator with recycled material in the Parish Tarqui, canton Cuenca-Ecuador Construcción de un aerogenerador de 400W con material reciclado en la Parroquia Tarqui, cantón Cuenca-Ecuador." *Congreso Internacional I+D+i en Sustentabilidad Energetica INER 2017*, pp. 19 – 25.
- Feng-Mei Jing, W. jia Ma, L. Zhang, S. qi Wang, and X. hang Wang, 2017, "Experimental study of hydrodynamic performance of full-scale horizontal axis tidal current turbine," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 29, no. 1, pp. 109 – 117.

- Gómez, J.B., 2019, "Diseño de un aerogenerador de eje vertical para zonas no interconectadas de Colombia." Educación, ciencia y tecnologías.
- Gustavo Oliveira, F. Magalhaes, Álvaro Cunha, and E. Caetano, 2018, "Continuous dynamic monitoring of an onshore wind turbine," *Engineering Structures*, vol. 164, pp. 22 – 39.
- GWEC Global Wind Energy Council, 2017, "Global wind statistics 2016.", Available: www.gwec.net
- Hao Su, B. Dou, T. Qu, P. Zeng, and L. Lei, 2020, "Experimental investigation of a novel vertical axis wind turbine with pitching and self-starting function," *Energy Conversion and Management*, vol. 217.
- Jingxuan Feng, L. Feng, J. Wang, and C. W. King, 2020, "Evaluation of the onshore wind energy potential in mainland china based on GIS modeling and EROI analysis," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 152.
- Kain Liu, M. Yu, and W. Zhu, 2019 "Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: A fluid-structure interaction study," *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 912 – 927.
- Mohamed Khaled, M. M. Ibrahim, H. E. Abdel Hamed, and A. F. AbdelGwad,, 2019, "Investigation of a small horizontal-axis wind turbine performance with and without winglet," *Energy*, vol. 187.
- NatGeo, 2020, "Energía renovable para abastecer a todo el planeta," *National Geographic España*, <https://www.nationalgeographic.com.es/temas/energia-eolica>.
- Peter Enevoldsen and S. V. Valentine, 2016, "Do onshore and offshore wind farm development patterns differ?" *Energy for Sustainable Development*, vol. 35, pp. 41–51.
- Pablo Hevia-Koch and H. Klinge Jacobsen, 2019, "Comparing offshore and onshore wind development considering acceptance costs," *Energy Policy*, vol. 125, pp. 9 – 19.
- P. Koetket, T. Chaichana, Y. Auttawaitkul, W. Chiracharit, S. Khunkhet, and J. Waewsak, 2018, "Increasing efficiency in wind energy electricity generating by signal processing from wind measuring equipment on wind turbine for the determination of wind direction," in 2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), pp. 1–4.

- P. Venkaiah and Bikrash. K., 2020, "Hidraulically actuated horizontal axis wind turbine pitch control by model free adaptive controller," *Renewable Energy*, vol. 147, n.1, pp. 55 – 68.
- REN21., 2017, "Renewables 2016: Global status report (gsr).", <http://www.ren21.net/>
- S. Seralathan, C. Pavan Veera Sai Ganesh, B. P. R. Venganna, N. Sai Srinivas, B. Lokesh Chowdary, V. Hariram, and T. Micha Premkumar, 2020, "Simulation studies to analyze the static mechanical properties of helical savonius vertical axis wind turbine blade," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33 n. 7, pp 3737-3745.
- Vinueza A., Narvaez J., 2018, "Aerodynamic design of 100 kw blades for horizontal axis wind turbines located on the cerro villonaco zone," *Enfoque UTE*, vol. 9, no. 3, pp. 106–115.
- W. T. Chong, A. Fazlizan, S. Poh, K. Pan, and W. Hew, 2012 "Early development of an innovative building integrated wind, solar and rain water harvester for urban high rise application," *Energy and Buildings*, vol. 47, p. 201–207.
- Xingxing Li, L. Zhang, J. Song, F. Bian, and K. Yang, 2020, "Airfoil design for large horizontal axis wind turbines in low wind speed regions," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2345 – 2357.
- Xiawei Wu, W. Hu, Q. Huang, C. Chen, M. Z. Jacobson, and Z. Chen, 2020, "Optimizing the layout of onshore wind farms to minimize noise," *Applied Energy*, vol. 267.
- Yan Zhao, J. Pan, Z. Huang, Y. Miao, J. Jiang, and Z. Wang, 2020, "Analysis of vibration monitoring data of an onshore wind turbine under different operational conditions," *Engineering Structures*, vol. 205.
- Ziyun Wang, Y. Wu, S. Lu, X. Meng, and J. Zhang, 2019, "A study on model experiment and aerodynamic match of wind energy fan (WEF)," *Sustainable Cities and Society*, vol. 49.