

Diseño e implementación de un sistema experimental para la caracterización del funcionamiento de un aerogenerador de eje vertical

M.I. Carlos Iván Estrella Euán¹, M.I. Marisol Díaz Rico¹, Dra. Nidiana Rosado-Hau², Dr. Mauricio A. Escalante Soberanis¹, Dr. Mauricio Gamboa-Marrufo^{1,*}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán

²Sheffield University, England, U.K.

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2024 - Fecha de aceptación: 29 de abril de 2025

Resumen

Debido a la preocupación a nivel mundial por reducir el consumo de combustibles fósiles, el uso de fuentes renovables de energía para producir electricidad se ha extendido en los últimos años. De las tecnologías eólicas disponibles, los aerogeneradores de eje vertical han demostrado un gran potencial para ser instalados en ambientes terrestres, urbanos y marítimos. A pesar de que existe mucha investigación numérica bidimensional de estos dispositivos, entender la aerodinámica en 3D y su operación resulta crucial para mejorar el diseño y el desempeño de los aerogeneradores verticales. En este artículo se describe un diseño experimental capaz de analizar el momento instantáneo que se genera sobre el eje de un rotor durante una revolución. Para comprender la influencia de cada una de las aspas en la generación del momento sobre el eje y definir el adecuado rango de relación de velocidad de punta del aerogenerador, se realizan simulaciones en 3D con el código CACTUS. La curva de potencia estimada con CACTUS presenta un rango de operación entre 0.5 y 2.5, mientras que las pruebas experimentales muestran un rango aproximado entre 0 y 1.7. No se realizaron pruebas a valores de relación de velocidad de punta mayores a 1.7 debido a las limitaciones de rigidez del prototipo; sin embargo, el análisis numérico, así como el experimental, predicen valores de coeficiente de potencia similares. El diseño experimental aquí descrito es capaz de medir el momento instantáneo generado sobre el eje y, por lo tanto, predecir el coeficiente de potencia del aerogenerador.

Palabras claves: sistema experimental, aerogenerador vertical, coeficiente de potencia, momento, energía eólica.

*mauricio.gamboa@correo.uady.mx

Design and implementation of an experimental system for the characterization of a vertical axis wind turbine operation

Abstract

Due to global concern to reduce the consumption of fossil fuels, the use of renewable energy sources to produce electricity has spread in recent years. Amongst the wind technologies available, vertical axis wind turbines have shown great potential to be installed in urban and maritime environments. Although there is much two-dimensional numerical research on these devices, understanding 3D aerodynamics and their operation is crucial to improve the design and performance of vertical wind turbines. This article describes an experimental design capable of analyzing the instantaneous moment generated on the shaft of a rotor during one revolution. To understand the influence of each of the blades on the generation of the momentum on the shaft and define the operational range of tip speed ratio of the wind turbine, 3D simulations are carried out with the CACTUS code. The power curve estimated with CACTUS presents an operating range between 0.5 and 2.5, while experimental tests show an approximate range between 0 and 1.7. Tests were not performed at tip speed ratio values greater than 1.7 due to rigidity limitations of the prototype; however, numerical analysis, as well as experimental analysis, predict similar power coefficient values. The experimental design described here can measure the instantaneous moment generated on the shaft and, therefore, predict the power coefficient of the wind turbine.

Keywords: experimental system, vertical wind turbine, power coefficient, momentum, wind energy,

Introducción

En los últimos años, el incremento en el interés por reducir las emisiones de CO_2 para mitigar el impacto ambiental ha permitido el desarrollo rápido de las fuentes alternas de energía. Entre las fuentes alternas de energía, las energías solar y eólica han presentado el mayor crecimiento en la capacidad instalada. Además, ambas fuentes de energía han reducido sus costos de producción por kWh de electricidad siendo entonces competidoras directas de las otras tecnologías a base de combustibles fósiles (REN21 2021).

De las dos clasificaciones principales de los aerogeneradores eólicos, es decir, de eje horizontal y de eje vertical, la tecnología de los aerogeneradores de eje horizontal (AEH) a gran escala continúa siendo la más económica y la más empleada. Una gran cantidad de estos

parques eólicos con aerogeneradores, los cuales superan los 100 m de altura, se han instalado alrededor del mundo tierra adentro. A esas alturas, el recurso eólico bajo el que operan los AEH es estable y con poca intensidad de turbulencia. Los aerogeneradores de eje vertical (AEV) tienen aplicaciones directas, como luminarias autosustentables, soluciones energéticas móviles y microgeneración diversa (Alave-Vargas E. et al. 2022); estudios han demostrado su buena integración en entornos urbanos y su efectividad para la microgeneración en áreas residenciales o rurales.

Otras ventajas de los AEV son: (i) su bajo centro de gravedad, que los convierte en candidatos potenciales para instalaciones marítimas, ya que la tecnología de eje horizontal presenta grandes retos estructurales

en dichas instalaciones y; (ii) el fácil acceso al generador eléctrico, que se suele localizar a baja altura, reduciendo los costos por mantenimiento. Además de las características mencionadas con anterioridad, y la capacidad omnidireccional de los AEV, es decir, no requieren un sistema de ajuste de dirección al viento, éstos también encuentran aplicaciones en ambientes urbanos debido a que logran mantener bajos los límites de contaminación auditiva (Hansen, Enevoldsen, and Abkar 2020; Ianakiev A. and Wright N. 2021). Sin embargo, la tecnología de los AEV aún se encuentra en desarrollo y aunque existe transferencia tecnológica de AEH como son los materiales de las aspas y el generador eléctrico; la aerodinámica de lo AEVs es compleja y aún se requiere de mucha más investigación que permita entender la aerodinámica tridimensional (Rosado, N. et al. 2020) y con esto, mejorar los diseños.

En la teoría de los AEV, algunos de los temas que han sido abordados escasamente y que requieren una mayor cantidad de estudios son: (i) la aerodinámica transitoria; (ii) el control de la formación de vórtices que provocan un bajo rendimiento en el aerogenerador y que además provocan momentos inestables en las aspas, (iii) el mejoramiento del autoarranque, (iv) el efecto del diseño de las puntas y de los soportes de las aspas (Celik et al. 2021; Elsakka et al. 2021; Miliket, T. A. et al. 2022).

Una de las primeras campañas experimentales para entender el funcionamiento de los AEV se llevó a cabo a mediados de los 70's. En estos experimentos, parámetros como la longitud de la cuerda, el número de aspas, el número de Reynolds, la relación de velocidad de punta y el grosor del perfil aerodinámico se investigaron para analizar su influencia en la potencia entregada por el aerogenerador (Blackwell, B. F. et al. 1976). En dichos resultados se observó una gran influencia de todos estos parámetros en la curva de potencia del aerogenerador, y la información generada fue fundamental para el

desarrollo de modelos matemáticos como la teoría del doble actuador con múltiples líneas de corriente presentada en Paraschivoiu (2002).

Experimentalmente, debido al gran número de parámetros geométricos involucrados durante la operación de un AEV, el análisis de las cargas en función de la posición de rotación de las aspas se ha limitado a unas pocas condiciones de operación (Nguyen, M. T. et al. 2020). Además, debido a la complejidad de la aerodinámica transitoria que requiere una apropiada captura de datos sobre la formación de vórtices y del desarrollo de la estela detrás del aerogenerador, entre los métodos computacionales que se pueden aplicar a los aerogeneradores se encuentran el método de momento del elemento del aspa, el método de la línea de sustentación, los modelos de paneles y vórtices, los modelos generalizados de discos actuadores y los solucionadores basados en Navier Stokes; cada teoría posee pros y contras (Miliket, T. A. et al., 2022). Los experimentos en túnel de viento son ampliamente utilizados y capturan de manera precisa variables como la velocidad de viento, la presión y el par motor generado por la turbina, ya sea a través de torquímetros o motores directamente acoplados, con lo cual es viable realizar validaciones experimentales a los modelos numéricos.

Debido a la relevancia actual de los aerogeneradores de eje vertical, la urgente necesidad de entender su aerodinámica en 3D y de mejorar los diseños para incrementar la potencia producida, este trabajo tiene como objetivo principal diseñar un sistema experimental en túnel de viento que apoye en la caracterización de aerogeneradores a escala. El análisis experimental considera la tridimensionalidad de estos dispositivos, lo cual es crucial para entender completamente la operación del aerogenerador.

En este artículo se presentan las siguientes secciones: una introducción con el marco teórico en el que se definen los conceptos fundamentales de la operación de un aerogenerador de eje vertical; la metodología,

donde se describen el diseño y los componentes del sistema de caracterización; una sección de análisis numérico en 3D, cuyo objetivo es comprender la variación del par motor en el aerogenerador; una sección de resultados, que incluye mediciones obtenidas con el sistema. Finalmente, se exponen las conclusiones del estudio.

Las aspas de un aerogenerador vertical giran alrededor del eje cuando un viento de

velocidad V_∞ incide sobre ellas. El flujo de aire que pasa a través de las aspas permite la creación de dos fuerzas aerodinámicas: la de sustentación y la de arrastre. Ambas fuerzas contribuyen a la generación de la fuerza tangencial, F_T , la cual, es tangente a la trayectoria circular descrita por el movimiento de las aspas, ver Fig. 1.

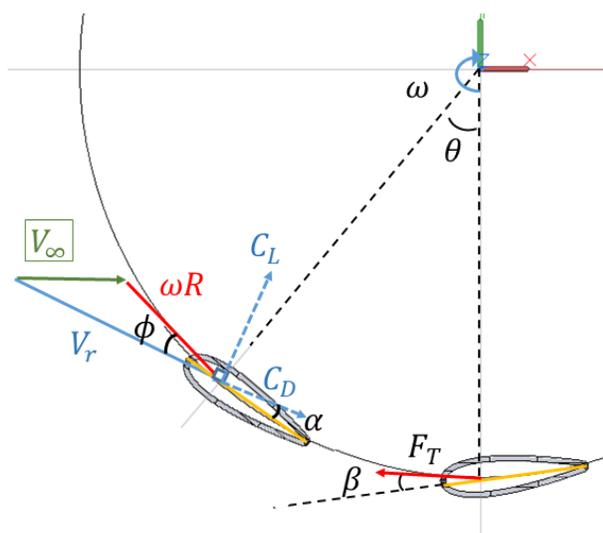


Figura 1. Representación esquemática de las fuerzas y vectores sobre las aspas en un aerogenerador vertical.

Debido a la velocidad angular, ω , el viento que incide sobre las aspas se ve modificado y la magnitud de la velocidad del viento incidente en las aspas varía en función de su posición angular, θ . Esta velocidad se conoce como velocidad relativa y la variación de su magnitud está dada por la siguiente ecuación:

$$V_{rel} = \sqrt{1 + 2\lambda \cos \theta + \lambda^2} \quad (1)$$

donde, la relación de velocidad de punta, λ , representa el cociente entre la velocidad tangencial y la velocidad de viento incidente, no perturbado:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (2)$$

El ángulo que forma el vector de la velocidad relativa con respecto a la cuerda del aspa (la línea imaginaria que une el borde de entrada con el borde de salida de un perfil como se muestra en la Fig. 1) se le conoce como ángulo de ataque y está dada de la siguiente forma:

$$\alpha(\theta) = \text{atan} \left(\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right) - \beta \quad (3)$$

donde β es el ángulo de inclinación de la cuerda del aspa con respecto a la velocidad tangencial de las aspas. En este trabajo, se considera un ángulo de inclinación de aspas de cero grados.

La variación constante de la velocidad relativa ocasiona que el número de Reynolds tenga una magnitud variable durante una

revolución; por tal motivo, es muy común emplear el término número de Reynolds promedio, Re_c , que representa su valor promedio durante una revolución, $Re_c = V_\infty \lambda c / \nu$; donde ν , es la viscosidad cinemática del fluido. Ambas variaciones de la velocidad relativa del viento y del ángulo de ataque ocasionan una aerodinámica transitoria sobre todo el rotor del aerogenerador y, por ende, la fuerza tangencial varía constantemente. Por lo cual, la determinación del momento promedio generado por las fuerzas aerodinámicas de las aspas sobre el eje del rotor requiere la determinación, del momento en función de la posición angular de las aspas en una revolución, $Q(\theta)$. Una vez identificado este parámetro, entonces el momento promedio (también conocido como par motor) producido por un aerogenerador de eje vertical está dado por la siguiente expresión:

$$\bar{Q} = \frac{N_b}{2\pi} \int_0^{2\pi} Q(\theta) d\theta \quad (4)$$

En este caso, $Q(\theta)$, representa el momento instantáneo sobre el eje de rotación debido a las fuerzas generadas sobre N , número de aspas del aerogenerador.

Además del momento promedio, el parámetro más reportado en un aerogenerador

es el coeficiente de potencia, C_p , cuyo valor se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{P_t}{1/2 \rho A V_\infty^3} \quad (5)$$

donde P_t , es la potencia producida por un aerogenerador, la cual se define como el producto del par motor, Q , generado por las aspas sobre el eje, y la velocidad angular ($P_t = \bar{Q}\omega$); A , representa el área transversal del rotor.

La curva del coeficiente de potencia (C_p) típica que caracteriza al funcionamiento de un aerogenerador vertical está representada en la Fig. 2. A bajos valores de relación de velocidad de punta, antes de que ocurra el máximo valor de C_p , se presenta el fenómeno de pérdida dinámica caracterizado por la formación de vórtices cerca del borde de entrada del perfil aerodinámico del aspa. Después de observarse el punto óptimo en la curva, el coeficiente de potencia comienza a disminuir nuevamente y esta disminución es atribuida a los efectos secundarios como son el tamaño del eje, el diseño de los soportes, y principalmente debido los bajos ángulos de ataque de la velocidad relativa.

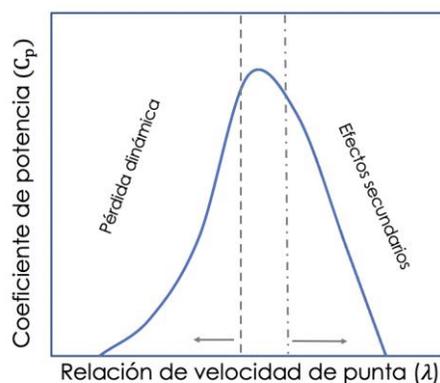


Figura 2 Curva de potencia típica de un aerogenerador vertical

La operación de un aerogenerador se identifica mediante la curva del coeficiente de

potencia en función de la relación de velocidad de punta, λ . La relación de velocidad de punta

es un parámetro adimensional que representa el cociente entre la velocidad tangencial, ωR , y la velocidad del viento no perturbado.

Metodología.

El objetivo del diseño experimental consiste en obtener, mediante pruebas en túnel de viento, la curva de potencia en función de la relación de velocidad de punta (Figura 2). Para obtener dicha curva, el aerogenerador debe mantenerse a una velocidad angular constante durante un intervalo de tiempo suficiente, de tal forma, que las lecturas de par motor adquiridas se estabilicen y la variación entre cada revolución se minimice. A continuación, se describe el diseño experimental, incluyendo los principales equipos empleados para medir el par motor y para mantener la velocidad angular constante.

El aerogenerador empleado como objeto de prueba y los componentes principales se muestran en la Figura 3. Con el fin de mantener constante la velocidad angular del rotor, es necesario emplear un servomotor. Para garantizar que el par motor medido a una determinada λ sea preciso, se requieren hasta 20 vueltas con la misma velocidad angular. En el diagrama de la Figura 3, se aprecia el acoplamiento entre el servomotor, el sensor de par motor y el aerogenerador. El sensor par motor, al ser del tipo de eje rotativo, asegura que el rotor gire con la velocidad angular indicada por el servomotor y permite medir, en su lado de prueba, el momento generado por las fuerzas de las aspas. Las características del sensor de par motor y el servomotor se indican en la Tabla 1 junto con los otros dispositivos de medición empleados para las pruebas.

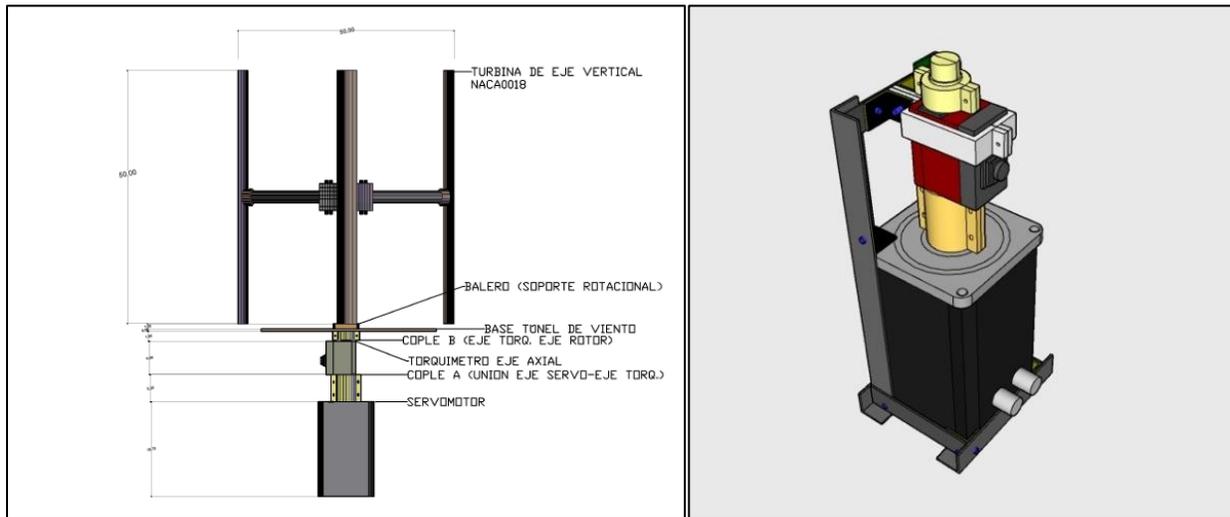


Figura 3 Acoplamiento del servomotor, sensor de par-motor y rotor.

Tabla 1 Lista de componentes del sistema experimental para la caracterización de aerogeneradores verticales

Identificador	Componente
Sensor de par-motor	Futek TRS605 20Nm
Manómetro	PCE-PFM2 con tubo de Pitot
Servomotor	Kinco SMH110D-0157-30AAK-4HKC
Servo-driver	Kinco CD620-AA-000
Tarjeta de datos	Campbell Scientific, CR6

Descripción del sistema de medición

El sistema de medición (Figura 4) se instaló en el túnel de viento del laboratorio de Ingeniería Eólica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY). La sección transversal de la zona de pruebas del túnel tiene unas dimensiones de 1.0 m x 1.0 m y 1.5 m de largo. Para medir la velocidad de viento se empleó el manómetro PCE-PFM2 con tubo de Pitot, el cual tiene un rango de medición de velocidad de viento de 1 a 80 m/s y una resolución de 0.01 m/s. Para visualizar las lecturas del manómetro se emplea el software Manometro & Flowmeter 8920 Version 1.0.

Para la adquisición del momento, Q , se emplea el sensor par motor rotatorio de la marca Futek modelo TRS605 con una señal de salida de tipo diferencial de hasta $\pm 5V$ DC.

Esta señal diferencial se lee usando una tarjeta de adquisición de datos CR6 de la marca Campbell con una precisión del 0.04% del voltaje de lectura y con una frecuencia de lectura de 1kHz. Las lecturas son monitoreadas y guardadas empleando el software Loggernet.

Las velocidades de rotación se programan en revoluciones por minuto empleando el servo-drive del servomotor. Por último, el rotor empleado para verificar la operación de todo el sistema de medición consistió en un aerogenerador de 3 aspas con el perfil aerodinámico NACA0018. El radio de rotor fue de 0.25 m con una altura de aspas de 0.5 m. Todas las conexiones con los ejes del sensor se realizaron mediante acoplamientos diseñados particularmente con las dimensiones de los ejes en contacto.

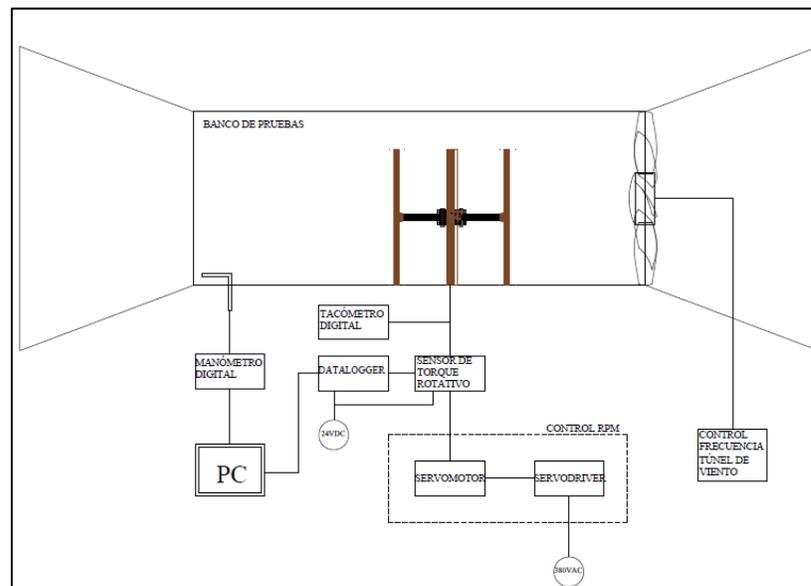


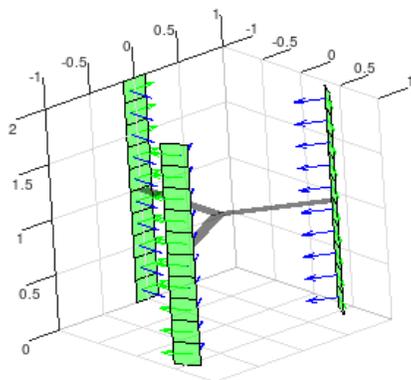
Figura 4 Diagrama del sistema de medición de momento generado en el eje del rotor.

Análisis numérico

El aerogenerador de tres aspas fue analizado numéricamente con el fin de verificar los resultados experimentales. Para dicho análisis numérico se empleó el código abierto

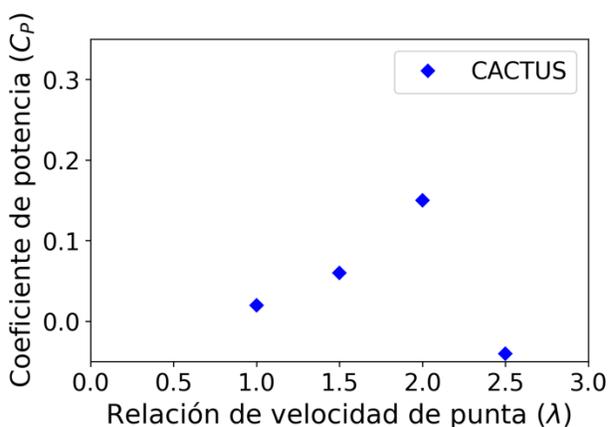
CACTUS (Murray and Barone 2011). Este último, emplea el método de vórtices (Vortex) para calcular las cargas aerodinámicas de cualquier tipo de aerogenerador, ya sea de eje

vertical u horizontal. Este código de simulación de aerogeneradores es capaz de realizar el análisis en 3D de las aspas y de incluir los soportes de las aspas. El diseño implementado en CACTUS, siguiendo la descripción geométrica de prototipo, se muestra en la



(a)

Figura 5(a). Para este caso, no se incluyó el eje del rotor. El coeficiente de potencia fue obtenido para cuatro valores de relación de velocidad de punta y se incluye en la Figura 5(b).



(b)

Figura 5 (a) Geometría simplificada del aerogenerador evaluada con CACTUS (b) Coeficiente de potencia del aerogenerador obtenida con CACTUS a 8 m/s.

En la curva del coeficiente de potencia presentada en la Fig.5(b) se observa que el rango de operación del aerogenerador se encuentra en el rango de relación de velocidad de punta [1.0-2.5]. No se analizaron valores menores debido a que CACTUS asigna un error intrínsecamente relacionado a los altos ángulos de ataque presentes a valores bajos de relación de velocidad de punta; estos ángulos de ataque quedan fuera del rango de los datos de entrada experimentales que CACTUS emplea. Los coeficientes de potencia en la Fig. 5(b) son calculados directamente empleando la herramienta CACTUS y se tomó el valor después de 10 revoluciones, las cuales son suficientes para garantizar la convergencia del C_p .

El valor máximo del coeficiente de potencia calculado fue de 0.16, con una relación de velocidad de punta $\lambda = 2.0$. El programa CACTUS, debido a que no resuelve

todas las ecuaciones de Navier-Stokes, emplea un modelo llamado “pérdida dinámica” para tomar en cuenta el efecto de la generación de los vórtices a bajos valores de relación de velocidad de punta. Por esta razón, los valores de coeficiente de potencia predichos con esta herramienta pueden verse afectados.

De igual manera, CACTUS permite analizar el comportamiento del coeficiente de momento (C_Q) para cada una de las aspas y para el conjunto de las 3 aspas (ver Figuras 6a y 6b). Las Figuras representan las curvas de momento predichas para las relaciones de velocidad de punta de $\lambda = 1$ y 2. Se observa en ambas Figuras, que C_Q repite un patrón similar para cada una de las aspas, aunque desfasado 120 grados, correspondiente al ángulo de separación entre cada una de las mismas. Los círculos permiten visualizar esta repetición en los valores del coeficiente de momento. El

coeficiente de momento en conjunto de las tres aspas considera, entonces, la suma instantánea de cada una de las contribuciones de las 3 aspas. El número de puntos analizados en CACTUS en una revolución fue de 60, es decir, un valor cada seis grados. El incremento en la resolución del ángulo de muestreo representa un aumento en el número de horas de

simulación; por lo tanto, un intervalo de 6 grados se considera suficiente para el propósito final de las simulaciones.

El análisis de estas curvas es importante para entender los resultados que se observarán más adelante en las mediciones realizadas experimentalmente.

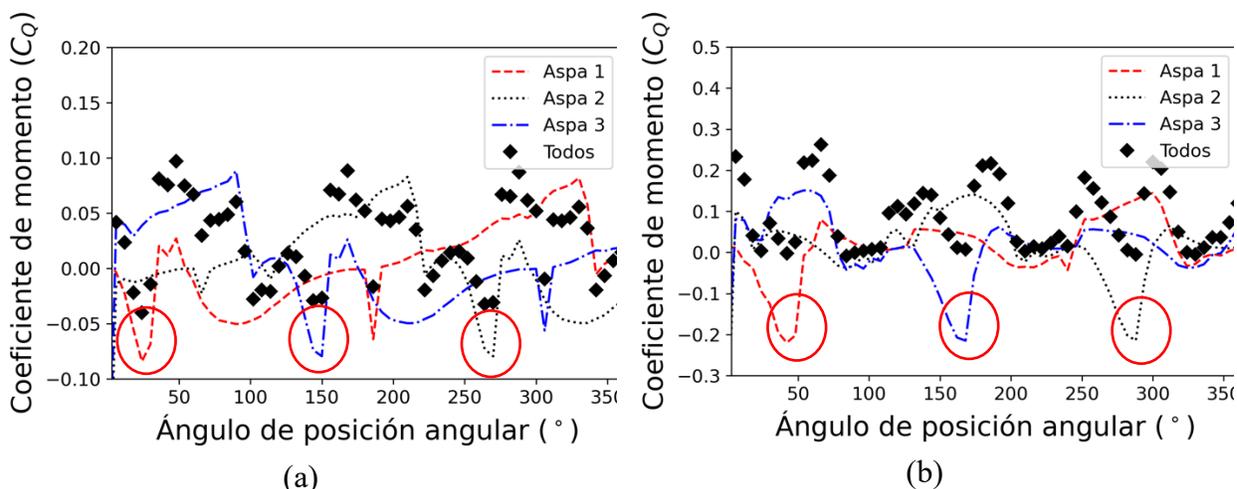


Figura 6 Coeficiente de momento calculado con CACTUS para una λ de (a) 1 y (b) de 2.

Resultados.

El control de las revoluciones por minuto empleando el servomotor fue capaz de mantener constante la velocidad angular requerida durante los intervalos de tiempo estudiados. Por ejemplo, en la Figura 7 se incluye el momento, $Q(\theta)$, medido por el sensor de par motor durante 20 vueltas. Se observa que el patrón de comportamiento del momento en todas las revoluciones se mantiene similar. También se puede observar para este caso presentado a 12 rpm, oscilaciones constantes en el valor del momento; esto se

atribuye al fenómeno de pérdida dinámica. Como explican Le Fouest S. y Mulleners, K. (2022), el fenómeno de la pérdida dinámica consiste en la formación, el crecimiento y el desprendimiento de vórtices a gran escala, seguido de una separación masiva del flujo, disminuyendo la eficiencia del aerogenerador. Dicho desprendimiento de vórtices es perjudicial para la eficiencia de la turbina y provoca importantes fluctuaciones de carga que ponen en peligro la integridad estructural de la misma.

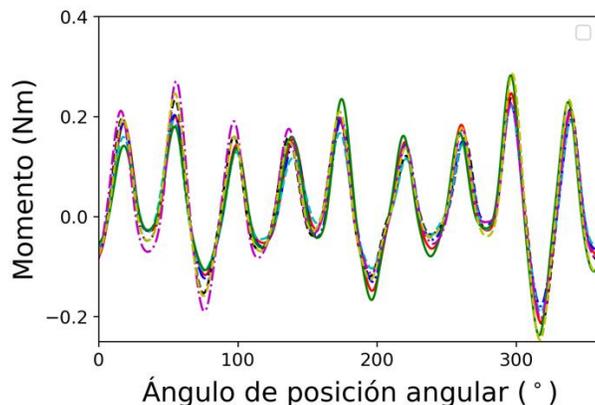


Figura 7 Momento generado por el rotor de prueba durante 10 vueltas con una velocidad de viento de 8 m/s y una velocidad angular de 12 rpm.

Para calcular el coeficiente de potencia empleando las curvas de momento instantáneos (Fig. 7), se emplean las ecuaciones (5) y (6). Cabe resaltar que, en el diseño experimental, el sensor de par motor mide la contribución total del conjunto aspas-soporte-eje. La Fig. 7 incluye los resultados para una relación de velocidad de punta de 1.0. En dicha figura, se puede observar el efecto de las tres aspas en el momento, lo cual sugiere que el sistema

experimental es capaz de capturar las variaciones del momento en función de la posición angular de manera adecuada.

Es importante recalcar que, para obtener curvas de potencia confiables, estas variaciones del momento en función de la posición angular deben capturarse correctamente. Una baja resolución de medición del momento generado puede resultar en un coeficiente de potencia erróneo.

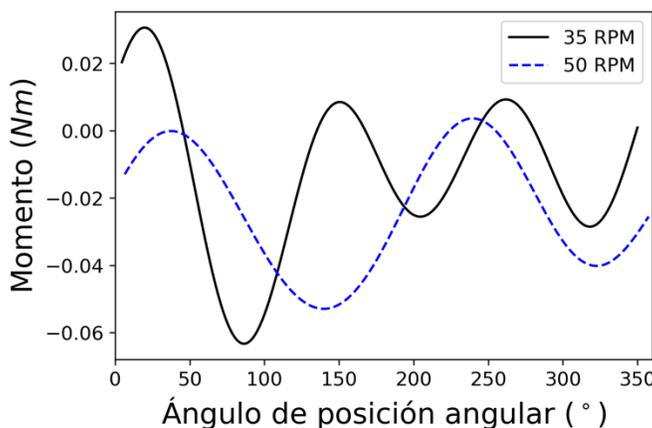


Figura 8 Momento generado por las 3 aspas del rotor de prueba a diferentes para las.

La Figura 8 presenta la curva de coeficiente de potencia obtenida experimentalmente. Los resultados experimentales se limitan hasta $\lambda = 1.7$ aproximadamente, debido principalmente a la seguridad mecánica del prototipo. La curva del

coeficiente de potencia sugiere que la operación del prototipo se puede extender un poco más allá $\lambda = 1.7$ y esto coincide con los resultados numéricos obtenidos con CACTUS. La curva obtenida experimentalmente presenta un coeficiente de potencia máximo de 0.2,

mientras que CACTUS sugiere un valor de 0.17.

El sistema de caracterización aquí implementado es una herramienta muy útil para

mejorar y entender la operación de los aerogeneradores de eje vertical, considerando los efectos tridimensionales que los análisis numéricos, en general, no toman en cuenta.

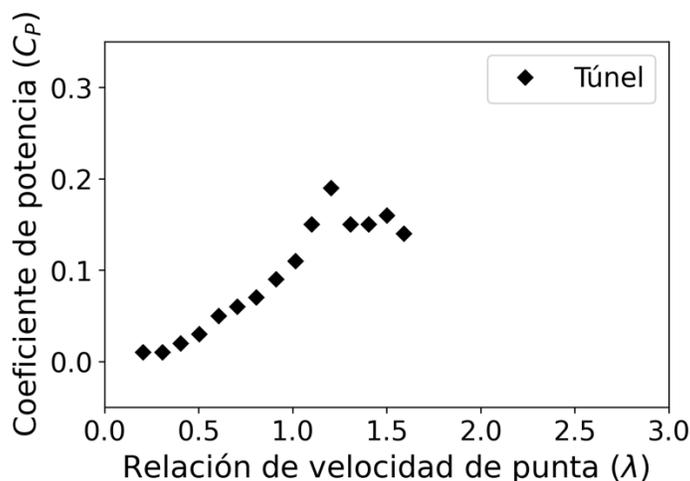


Figura 8 Coeficiente de potencia del prototipo de aerogenerador vertical medido en túnel de viento a 8 m/s.

Conclusiones

El sistema desarrollado para obtener las curvas de potencia de un aerogenerador de eje vertical (AEV) permite medir el momento generado en cada revolución, garantizando una lectura precisa de la variación del momento durante un ciclo completo. Esto facilita la estimación confiable del momento y la potencia promedio a una relación de velocidad de punta determinada.

El control de las revoluciones por minuto mediante el servomotor permitió

mantener una velocidad angular constante, lo que facilitó la adquisición de datos precisos sobre el momento instantáneo durante aproximadamente 20 vueltas del aerogenerador.

La metodología experimental propuesta permite la obtención de la curva de potencia promedio y las curvas de autoarranque de cualquier AEV. Estas mediciones están actualmente en curso, y su análisis contribuirá a una mejor comprensión del rendimiento y la eficiencia de estos dispositivos en condiciones controladas.

Referencias

- Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., and Sempértegui-Tapia, D. F. (2022). Monografía: Estado del arte de los aerogeneradores de eje vertical. *Revista Investigación & Desarrollo*, 22(1). <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- Bachant, Peter, Anders Goude, and M. Wosnik. (2016). “Actuator Line Modeling of Vertical Axis Turbines.” *Wind Energy* 00:1–17. doi: 10.1002/we.
- Blackwell, B. F., Sheldahl, R. E. and Feltz, L. V. (1976). *Wind Tunnel Performance Data for the Darrieus Wind Turbine with NACA 0012 Blades*.

- Celik, Y., Ma, L., Ingham, D. and Pourkashanian, M. (2021). “Aerodynamic Investigation of the Start-up Process of H-Type Vertical Axis Wind Turbines Using CFD.” *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 204.
- Elsakka, M., Ingham, D. B., Ma, L. and Pourkashanian, M. (2021). “Comparison of the Computational Fluid Dynamics Predictions of Vertical Axis Wind Turbine Performance Against Detailed Pressure Measurements.” *International Journal of Renewable Energy Research* 11(1):276–93.
- Hansen, M., Enevoldsen, P. and Abkar, M. (2020). “Energy Harvesting via Co-Locating Horizontal-and Vertical-Axis Wind Turbines.” *Journal of Physics: Conference Series* 1618(3). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/3/032004>.
- Ianakiev, A. and Wright, N. (2021). Review of standalone small-scale Darrieus wind turbines- a Nottingham case study.
- Le Fouest, S. and Mulleners, K. (2022). The dynamic stall dilemma for vertical-axis wind turbines. *Renewable Energy*, 198, 505–520. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.071>
- Miliket, T. A., Ageze, M. B. and Tigabu, M. T. (2022). Aerodynamic performance enhancement and computational methods for H-Darrieus vertical axis wind turbines: Review. In *International Journal of Green Energy* (Vol. 19, Issue 13, pp. 1428–1465). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.2005605>
- Murray, J., and Barone, M. (2011). “The Development of CACTUS, a Wind and Marine Turbine Performance Simulation Code.” Pp. 1–21 in *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Nguyen, M. T., Balduzzi, F., Bianchini, A., Ferrara, G. and Goude, A. (2020). “Evaluation of the Unsteady Aerodynamic Forces Acting on a Vertical-Axis Turbine by Means of Numerical Simulations and Open Site Experiments.” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104093>.
- Paraschivoiu, I., 2002, *Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept*, Polytechnic, Brooklyn, NY.
- REN21, 2021. *Renewables 2021 Global Status Report. GSR2021 Full Report*. Paris.
- Rosado, N., Ma, L., Ingham, D. and Pourkashanian, M. (2020). “A Critical Analysis of the Stall Onset in the Vertical Axis Wind Turbines.” *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 204(September):104264. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104264>.