



DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA INNOVADORA PARA EL ENSAYO DE PROTOTIPOS A ESCALA DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE VERTICAL EN TÚNELES DE VIENTO

Luis Santamaría Bertolín, Sandra Velarde Suárez

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

En la actualidad, los modelos energéticos mundiales están cada vez más centrados en el uso de renovables. Tecnologías renovables como la solar o la eólica dependen de fenómenos naturales difícilmente predecibles, por ello la generación de energía distribuida es muy importante. Dentro de ese marco las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) han cobrado interés, sobre todo para su aplicación en entornos urbanos. Además, se ha concluido recientemente que este tipo de turbinas podrían resultar competitivas en aplicaciones offshore en aguas profundas. Sin embargo, el estudio de estas turbinas es complejo debido a la complicada aerodinámica que presentan. En este contexto, existe una gran cantidad de investigación en modelos de predicción de prestaciones. Sin embargo, para validar estos modelos es necesario contar con datos experimentales, lo cual suele resultar difícil y costoso. En experimentos al aire libre, es complicado obtener datos fiables, debido a la falta de control sobre las condiciones de los ensayos, mientras que los experimentos en túneles de viento requieren una gran infraestructura, forzando frecuentemente una reducción en la escala de los experimentos. Esto dificulta la medida de variables como la potencia, debido a su pequeña magnitud.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una innovadora metodología para la caracterización de prestaciones de turbinas de eje vertical en túneles de viento. Dicha metodología presenta ventajas relevantes frente a las convencionales, siendo capaz de obtener una profunda caracterización, y un gran número de puntos, sin incurrir en largos tiempos de ensayo. Además, los costes de infraestructura e

instrumentación son moderados, ya que la utilización de un elemento activo permite solucionar los problemas derivados de la escala, y no se necesitan instrumentos de medida de alto coste como pueden ser los torquímetros.

Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de esta metodología para la validación de modelos analíticos y computacionales fluidodinámicos (CFD) y resulta especialmente interesante porque permite aislar los efectos de elementos secundarios como la estructura o los brazos. Además, los resultados obtenidos coinciden con los previsibles para una turbina de estas características y concuerdan con los encontrados en la bibliografía, permitiendo validar la metodología desarrollada.

Se espera que la buena caracterización que permite la metodología desarrollada, así como sus moderados costes de infraestructura e instrumentación, promuevan su aplicación en otros ensayos, permitiendo que la investigación experimental de este tipo de turbinas, generalmente restringida al ámbito de las grandes universidades e importantes centros de investigación, se extienda y se enriquezca.

ABSTRACT

Nowadays, global energy models are increasingly focused on the use of renewables. Renewable technologies such as solar or wind power depend on natural phenomena which are difficult to predict, hence, distributed energy generation is very important. Within this framework, vertical axis wind turbines (VAWT) have gained interest, especially for application in urban environments. In addition, it has recently been concluded that this type of turbines could



be competitive in deepwater offshore applications. However, the study of these turbines is complex due to their complicated aerodynamics. In this context, there is a great deal of research done in performance prediction models. Nevertheless, validating these models requires experimental data, which is often difficult and costly. In open air experiments, it is challenging to obtain reliable data, due to the lack of control over test conditions, while wind tunnel experiments require a large infrastructure, often forcing a reduction in the scale of the experiments. This increases the difficulty of measuring variables such as power, due to their small magnitude.

This work presents the development of an innovative methodology for performance characterization of vertical axis wind turbines in wind tunnels. This methodology has significant advantages over conventional ones, being able to obtain a deep characterization and many points, without incurring in long test times. In addition, infrastructure and instrumentation costs are moderate, since the use of an active element avoids the problems derived from scale, and high-cost measuring instruments such as torque-meters are not needed.

The results obtained demonstrate the usefulness of this methodology for the validation of analytical and computational fluid dynamic models (CFD), being especially interesting because it isolates the effects of secondary elements such as the structure or the arms. Furthermore, the results obtained coincide with those expected for a turbine of these characteristics and are in line with those found in the literature, allowing the developed methodology to be validated.

It is expected that the good characterization that the developed methodology provides, as well as its moderate infrastructure and instrumentation costs, will promote its application in other tests. Thus, it will allow the experimental research of this type of turbines, generally restricted to the scope of large universities and important research centers, to be extended and enriched.

INTRODUCCIÓN

La creciente concienciación sobre el cambio climático y el progresivo agotamiento de las reservas de combustibles fósiles son la principal motivación para que, en la actualidad, los modelos energéticos mundiales estén cada vez más centrados en el uso de renovables. Sin embargo, tecnologías renovables como la solar o la eólica dependen de fenómenos naturales difícilmente predecibles, por lo que, conforme se avanza en este sentido, cada vez resulta más complicado el ajuste de las curvas de oferta y demanda energética. En este marco, la generación distribuida es un concepto que está cobrando cada vez más importancia. Este modelo no centra la producción de energía sólo en grandes instalaciones de producción, sino que incorpora también un gran número de pequeñas fuentes de energía distribuidas. De esta manera asegura el suministro energético independientemente de fenómenos locales.

En este contexto, el interés por las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) ha resurgido, ya que por sus características encajan especialmente bien para este enfoque. Las VAWT resultan mejores candidatas que las turbinas de eje horizontal (HAWT) para su aplicación en entornos urbanos, ya que no necesitan mecanismo de orientación, trabajan mejor con vientos variables y producen menor contaminación acústica [1]. Otro campo donde estas turbinas están resultando competitivas es la generación offshore en aguas profundas donde plataformas o elementos flotantes son más rentables. Estas turbinas necesitan una menor altura de torre y experimentan fuerzas mucho menores, por lo que su vida es más larga y presentan una menor necesidad y dificultad de mantenimiento [2]. Estos son aspectos muy importantes en este tipo de aplicaciones offshore en las que el entorno dificulta enormemente operaciones como la instalación o el mantenimiento.

No obstante, a pesar del gran potencial de las turbinas VAWT, su estado actual de desarrollo aún es limitado. Esto se debe principalmente a la complicada aerodinámica que presentan, ya que tienen ángulos de incidencia continuamente variables y tanto las palas, como el eje y los



brazos del rotor producen estelas que interaccionan con el flujo. Numerosos autores han tratado de modelizar el comportamiento de estas turbinas y ver la influencia de diferentes parámetros como la solidez o la rugosidad de palas. El estudio de estas turbinas sigue tres vías principales: el desarrollo de modelos analíticos, las simulaciones mediante CFD y los ensayos experimentales.

Los modelos analíticos son la opción más económica y rápida y se suelen utilizar para cálculos preliminares ya que cuentan con importantes simplificaciones. Las simulaciones CFD se suelen centrar en aspectos concretos de una turbina y ofrecen una mayor precisión que los modelos analíticos. Sin embargo, la complejidad de los flujos en estas turbinas hace necesario un importante esfuerzo en la modelización de la turbulencia y suele desembocar en mallas con enormes costes computacionales. Tanto los modelos analíticos como las simulaciones CFD tienen un gran inconveniente y es que necesitan validación experimental.

Los ensayos experimentales se pueden realizar al aire libre o en túnel de viento.

Los experimentos al aire libre se realizan en condiciones más realistas, pero es complicado obtener datos fiables debido a la falta de control sobre las condiciones de los ensayos. Además, la fabricación de prototipos experimentales a escala real es altamente costosa y se suele reservar para cuando ya se cuenta con datos de modelos CFD previamente validados, o ensayos experimentales a escala que respalden la elección del diseño.

Los ensayos experimentales en túnel de viento requieren una gran infraestructura, forzando frecuentemente una reducción en la escala de los experimentos. Al reducir la escala del modelo, variables como la potencia o el par se reducen sustancialmente, mientras que resulta necesario aumentar otras como la velocidad de giro para alcanzar condiciones dinámicas semejantes. Debido a la reducción de escala, tanto las pérdidas mecánicas como el momento de inercia se suelen encontrar en un orden de magnitud no despreciable, lo que

dificulta la medida. Las turbinas VAWT son especialmente sensibles a este problema ya que suelen presentar problemas de autoarranque. Además, las metodologías convencionales utilizan elementos pasivos como torquímetros [3], frenos Prony [4] o frenos electromagnéticos [5] para la medida del par y la potencia, mientras que ajustan el comportamiento de la turbina mediante la carga en el generador [6], o mediante un freno regulable [7]. Estos elementos pasivos incrementan la resistencia del sistema y necesitan potencias notables para realizar una medida precisa.

El resultado es que en la mayoría de estudios donde no se dispone de un túnel de viento lo suficientemente grande, se acaba optando por diseños que se alejan de la solidez óptima, para garantizar el autoarranque [8]. Semejante solidez suele resultar en menores eficiencias y prestaciones más típicas de turbinas de arrastre que de sustentación.

Para poder producir turbinas competitivas en las aplicaciones anteriormente mencionadas, es necesario trabajar en diseños con buenas prestaciones. Por ello, este trabajo se centra en el desarrollo de una metodología innovadora que permita ensayar turbinas de estas características y obtener una buena caracterización de las prestaciones, con unos costes de infraestructura e instrumentación moderados. De esta manera, se busca extender la investigación experimental de este tipo de turbinas, generalmente restringida al ámbito de las grandes universidades e importantes centros de investigación.

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada se basa en el uso de un elemento activo (un motor eléctrico) para controlar el comportamiento de la turbina y para obtener la medida de la potencia, en lugar de utilizar elementos pasivos. Este método permite un mayor control de las condiciones del experimento, resultando en una caracterización más amplia de las prestaciones de la turbina. Además, utilizar un elemento activo elimina los problemas derivados de las dificultades de



autoarranque. Utilizar un motor para obtener condiciones de semejanza dinámica es una práctica habitual en ensayos experimentales para la caracterización del flujo como los que utilizan técnicas PIV [9–11]. Sin embargo, para la medida de potencia, lo más común es inducir con el motor la velocidad de giro deseada y posteriormente desacoplar el motor o hacer que funcione como un generador. No se han encontrado antecedentes de ensayos que midan potencia con un motor accionando la turbina [12]. No obstante, la única condición necesaria para ello es que la carga en el eje (ya sea natural en forma de pérdidas mecánicas o inducida con un freno) sea siempre superior a la potencia aerodinámica.

La metodología aquí propuesta tiene especial interés para la validación de modelos analíticos o simulaciones CFD, en los cuales no se suele considerar el efecto de la estructura de la turbina o los brazos. Esto se debe a que la metodología desarrollada se centra específicamente en el estudio aerodinámico de las palas de la turbina, y minimiza la influencia de elementos secundarios en la caracterización de este elemento.

El montaje experimental está compuesto por los siguientes elementos:

Túnel de viento. Los experimentos se realizaron en el "XAWT" (*Xixón Aeroacoustic Wind Tunnel*) que se encuentra en las instalaciones del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo en el campus de Gijón. Este túnel tiene una sección de ensayo de $1 \times 1.15 \text{ m}^2$ y en su configuración natural es de cámara abierta. Sin embargo, los resultados de los experimentos aquí presentados pertenecen a una investigación en la cual resultaba pertinente trabajar con cámara cerrada. Por esta razón se diseñó y construyó un apéndice modular que continúa la sección de la tobera y donde se encuentra situado el prototipo (*Figura 1*). Este túnel permite alcanzar velocidades de hasta 22 m/s y tiene una turbulencia inferior al 1%.

Prototipo. La turbina ensayada es un modelo a escala de VAWT con rotor tipo "H". Las características principales del modelo se recogen en la *Tabla 1*.

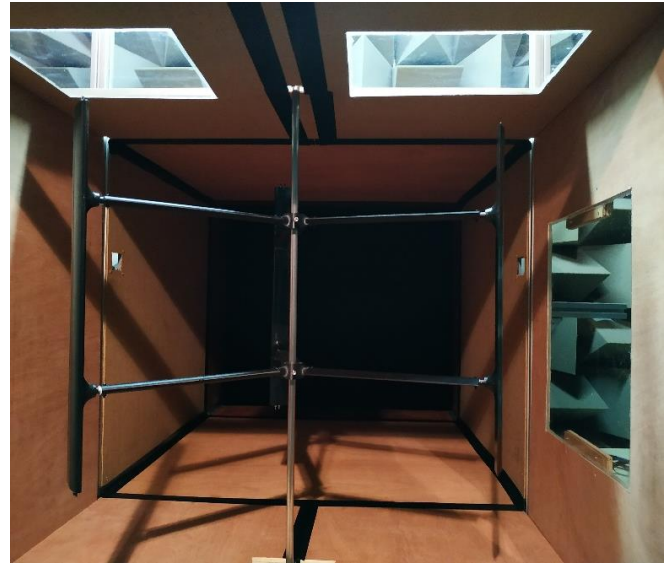


Figura 1: Prototipo experimental en la cámara de ensayo del túnel de viento.

Perfil aerodinámico	DU 06-W-200
Cuerda (c) [m]	0.065
Diámetro (D) [m]	0.8
Longitud de las palas (L) [m]	0.52
Solidez (σ)	0.5
Relación de aspecto (D/L)	1.5

Tabla 1: Características principales de la turbina.

Este modelo ha sido fabricado combinando elementos comerciales como perfiles tubulares de aluminio o tornillería y piezas a medida fabricadas mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM). Además, incorpora un recubrimiento de resina epoxi en las palas para mejorar el acabado superficial y aumentar la resistencia. En fases anteriores de la investigación, se concluyó que el arrastre en los brazos (cilíndricos inicialmente) era considerable, por lo que se optó por cubrirlos con un perfil aerodinámico de bajo arrastre (EPPLER 863 Strut Airfoil).

Instrumentación. Las variables que se miden en los experimentos son: velocidad del viento, velocidad de giro de la turbina e intensidad eléctrica en el motor. La velocidad del viento se mide mediante la diferencia de presión en la tobera, asumiendo flujo ideal y utilizando

un transductor de presión diferencial con un rango de ± 1000 Pa y compensación por temperatura. De manera auxiliar, para el cálculo de la densidad del aire también se registra dicha temperatura y se comprueba la presión atmosférica en un barómetro analógico. Dado que se trabaja con velocidad de viento constante, la medida se registra a partir de la lectura del display. En cuanto a la velocidad de giro de la turbina, se utiliza un tacómetro digital conectado a una tarjeta de adquisición. El motor eléctrico es un motor DC de imanes permanentes, de 1000 W de potencia. Previamente, este motor ha sido caracterizado experimentalmente para obtener su constante de par, permitiendo así obtener el par a partir de la intensidad eléctrica. El motor eléctrico se alimenta con una fuente de alimentación de laboratorio de 30 V/10 A, que cuenta con un sistema de medición incorporado. Aunque en este caso la medida de la intensidad se realiza directamente con la fuente de alimentación, también sería posible utilizar un amperímetro con ese fin. Dicha fuente se controla mediante un equipo informático a través de software propio y registra la medida en el mismo equipo. El equipo informático también incorpora el software propio de adquisición para la señal del tacómetro a través de la tarjeta de adquisición y de cálculo para la obtención de los resultados, ambos basados en Matlab.

En la *Figura 2* se muestra un esquema simplificado con los principales elementos del montaje experimental y la instrumentación utilizada.

La obtención de la potencia aerodinámica se realiza mediante la aplicación de un balance de energía en el rotor, considerando las distintas fuentes y sumideros. El mismo planteamiento es válido si en lugar de un balance energético, se aplica un balance de fuerzas (momentos) en el eje para obtener el par aerodinámico y después este se multiplica por la velocidad angular.

Para poder aislar el efecto de los elementos secundarios, es necesario realizar ensayos con diferentes configuraciones de la turbina. En total se realizan 4 ensayos:

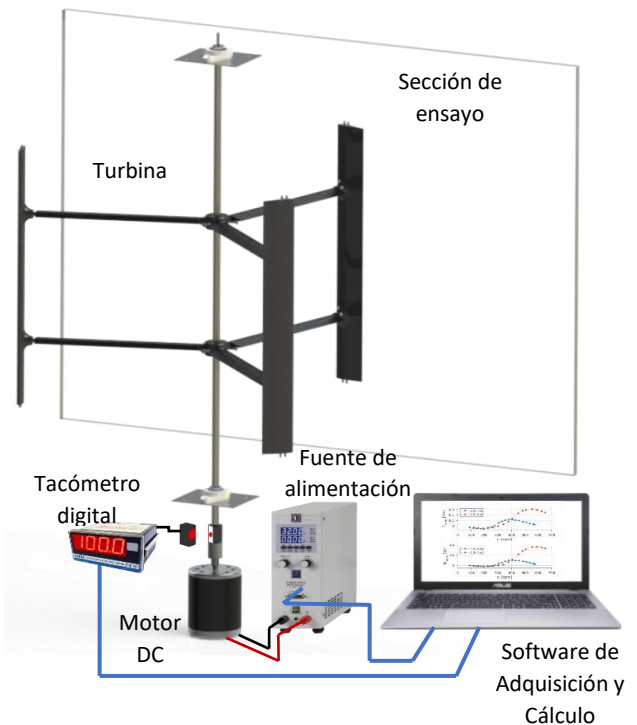


Figura 2: Esquema simplificado del montaje experimental e instrumentación utilizada.

1. Turbina completa actuada mediante el motor y sin viento.
2. Turbina completa actuada mediante el motor y con velocidad del viento constante.
3. Turbina sin palas actuada mediante el motor y sin viento.
4. Turbina sin palas actuada mediante el motor y con velocidad del viento constante.

En todos los ensayos el motor DC se controla mediante la regulación del voltaje a través de la fuente de alimentación, lo que permite fijar la velocidad de la turbina (*Figura 3*). Esto se debe a que la fuerza contraelectromotriz actúa como un lazo cerrado, forzando a la velocidad de giro a permanecer constante. En los ensayos sin viento el motor produce el par necesario para igualar la carga y la velocidad de giro es proporcional al voltaje. Sin embargo, en el ensayo de la turbina completa con viento, el par aerodinámico ayuda al motor, por lo que para una misma velocidad de giro el motor necesita producir un par menor.

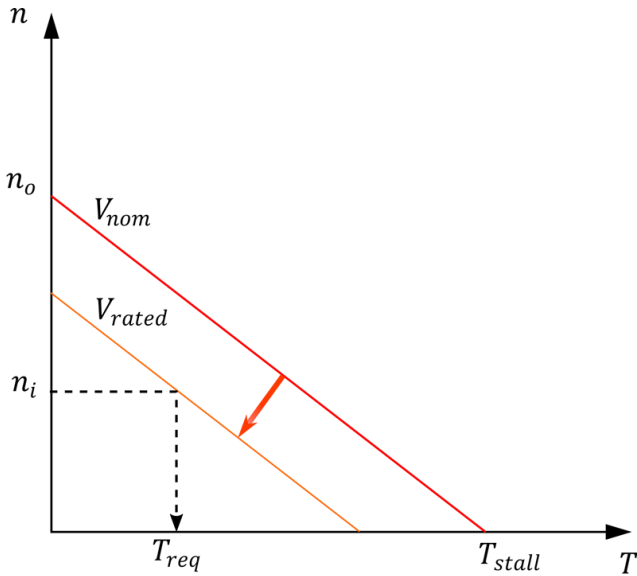


Figura 3: Curva velocidad angular - par útil de un motor DC y esquema de funcionamiento en modo control de voltaje.

A continuación, se expone el desarrollo matemático-físico que permite obtener la potencia aerodinámica a partir de las medidas experimentales. Se han utilizado subíndices numéricos para indicar a qué experimento corresponde cada variable. La numeración de los experimentos es la misma que se indicó anteriormente.

En primer lugar, en el ensayo de la turbina completa actuada con el motor y sin viento (ensayo 1), el balance de energía en el rotor es el siguiente:

$$\dot{W}_{mec_1} = \dot{W}_{drag_{blades}} + \dot{W}_{drag_{arms1}} + \dot{W}_{mec_{loss1}} \quad (1)$$

Donde \dot{W}_{mec_1} es la potencia mecánica suministrada por el motor eléctrico en este ensayo y $\dot{W}_{drag_{blades}}$, $\dot{W}_{drag_{arms1}}$ y $\dot{W}_{mec_{loss}}$ son las potencias disipadas mediante fricción viscosa en forma de arrastre aerodinámico en las palas y en los brazos y las pérdidas mecánicas mediante fricción y vibraciones en los elementos mecánicos y la estructura, respectivamente.

Después, aplicando el mismo balance al ensayo con la turbina completa actuada con el motor y con velocidad del viento constante (ensayo 2):

$$\dot{W}_{aero} + \dot{W}_{mec_2} = \dot{W}_{drag_{arms2}} + \dot{W}_{mec_{loss1}} \quad (2)$$

Donde el término \dot{W}_{aero} representa la potencia aerodinámica que las palas consiguen aprovechar de manera efectiva y las pérdidas mecánicas son iguales que en el primer ensayo ya que se trata de la misma configuración de máquina. Sin embargo, el arrastre en los brazos no es el mismo, ya que depende de la velocidad relativa, la cual es combinación de la velocidad de giro y la velocidad del viento.

Reordenando la expresión (1) para despejar las pérdidas mecánicas, se obtiene:

$$\dot{W}_{mec_{loss}} = \dot{W}_{mec_1} - \dot{W}_{drag_{blades}} - \dot{W}_{drag_{arms1}} \quad (3)$$

Sustituyendo en (2):

$$\begin{aligned} \dot{W}_{aero} = & (\dot{W}_{mec_1} - \dot{W}_{mec_2}) + \\ & + (\dot{W}_{drag_{arms2}} - \dot{W}_{drag_{arms1}}) - \dot{W}_{drag_{blades}} \end{aligned} \quad (4)$$

Los ensayos de la turbina sin palas actuada con el motor, sin viento y con viento (ensayos 3 y 4 respectivamente) permiten obtener el término $(\dot{W}_{drag_{arms2}} - \dot{W}_{drag_{arms1}})$ según el procedimiento descrito a continuación:

Se aplica el balance de energía al rotor de manera análoga a lo descrito anteriormente, con la salvedad de que, al no tener palas, estas ni disipan (ensayo 1) ni generan (ensayo 2), por lo que no aparecen en las ecuaciones. Además, al modificar la máquina las pérdidas mecánicas cambian respecto a los ensayos 1 y 2. Sin embargo, el arrastre en los brazos será igual al de su ensayo análogo (1 y 3, 2 y 4). Por tanto, en el ensayo 3:

$$\dot{W}_{mec_3} = \dot{W}_{drag_{arms1}} + \dot{W}_{mec_{loss3}} \quad (5)$$

De manera similar, en el ensayo 4:

$$\dot{W}_{mec_4} = \dot{W}_{drag_{arms2}} + \dot{W}_{mec_{loss3}} \quad (6)$$

Al igual que sucedía entre los ensayos 1 y 2, entre los ensayos 3 y 4 también son iguales las pérdidas mecánicas porque se trata de la misma configuración de la máquina. Por tanto, combinando las expresiones 5 y 6:

$$\dot{W}_{drag_{arms2}} - \dot{W}_{drag_{arms1}} = \dot{W}_{mec_4} - \dot{W}_{mec_3} \quad (7)$$

Una alternativa a explorar sería utilizar únicamente los ensayos 2 y 4 (los ensayos con viento), pero sería necesario conseguir que las



pérdidas en ambos fueran iguales, por ejemplo, añadiendo el peso de las palas al eje. Esta modificación evitaría tener que estimar el arrastre viscoso en las palas y simplificaría bastante el procedimiento. No obstante, no se han estudiado ni la viabilidad y ni fiabilidad de esta alternativa.

La *Figura 4* representa estos balances de forma gráfica para facilitar el seguimiento del desarrollo.

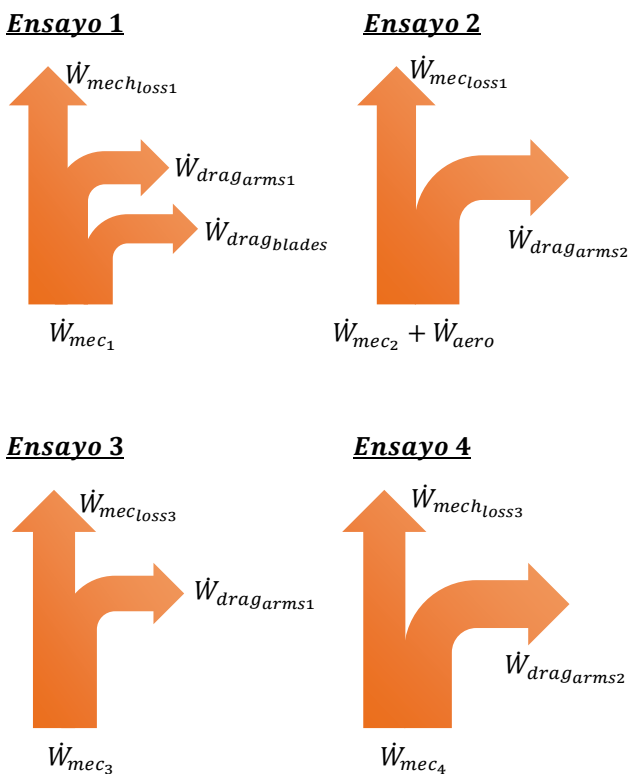


Figura 4: Balances energéticos aplicados a los diferentes ensayos.

Los balances de la *Figura 4* se realizan considerando que la velocidad de giro es constante e igual entre cada punto de cada ensayo.

No obstante, en la práctica esto se traduce en la medida de una cantidad importante de puntos y su posterior ajuste mediante modelo matemático. Se ajustan únicamente los datos de los ensayos 1, 3 y 4 y se utiliza para los cálculos las velocidades del ensayo 2 (el ensayo donde hay potencia aerodinámica). El motivo de esta forma de proceder es que los ensayos 1, 3 y 4 responden a modelos físicos relativamente

simples, ya que consisten en un motor eléctrico moviendo una carga a velocidad constante. Como consecuencia, sus ajustes tienen un coeficiente de determinación R^2 muy cercano a la unidad (0.9999).

La potencia mecánica suministrada por el motor eléctrico es el producto de la velocidad de giro ω y el par útil T . El par útil a su vez es función de la constante de par característica del motor eléctrico k_t , la intensidad eléctrica I y un par de fricción en el motor. Sin embargo, este par de fricción suele ser despreciable, y aunque no lo fuera, la forma de las ecuaciones hace que este término se anule, por lo que no se considera en este análisis.

$$\dot{W}_{mec_n} = \omega \cdot k_t \cdot I_n \quad (8)$$

Así es que desglosando los términos de la expresión y simplificando (4):

$$\dot{W}_{aero} = \omega \cdot k_t \cdot (I_1 - I_2 + I_4 - I_3) - \dot{W}_{dragblades} \quad (9)$$

El último término es el correspondiente al arrastre viscoso en las palas. Considerando una sección diferencial y aplicando la longitud de la pala, el término del arrastre aerodinámico tendrá la siguiente forma:

$$\dot{W}_{dragblades} = Z \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D(Re_c) \cdot c \cdot L \cdot (\omega \cdot R)^3 \quad (10)$$

Donde Z es el número de palas, ρ es la densidad del aire, c es la cuerda del perfil, L la longitud de la pala, R el radio de la turbina y $C_D(Re_c)$ es el coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds. En los resultados presentados se ha utilizado una extrapolación de los coeficientes de arrastre encontrados en la bibliografía (*Javafoil, Rfoil, Xfoil, Clasens* [13]) (*Figura 5*), ya que no se han encontrado suficientes datos a Reynolds tan bajos ($10^4 - 10^5$).

Este aspecto se podría mejorar notablemente mediante la obtención experimental de los coeficientes de arrastre del perfil utilizando una balanza [14]. Una de las limitaciones de este procedimiento es que no considera la interacción aerodinámica con las estelas de las palas anteriores o la del eje.

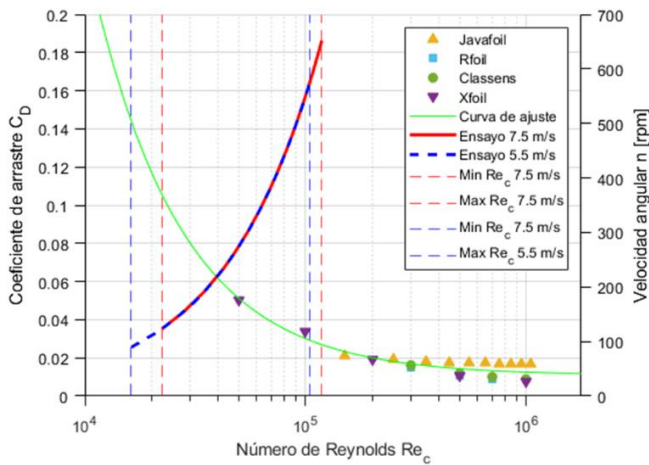


Figura 5: Rango del número de Reynolds en función de la velocidad angular de cada experimento (eje de la derecha) y extrapolación de los coeficientes de arrastre en función del número de Reynolds de varias fuentes de la bibliografía (eje de la izquierda).

En las ecuaciones anteriores, los balances energéticos están planteados de forma instantánea. Sin embargo, dado que el ángulo de ataque es continuamente variable y que hay fenómenos oscilatorios como vibraciones, es necesario integrar estas medidas instantáneas durante un periodo de tiempo suficientemente largo para que la medida sea correcta. Como se trata de medidas discretas, la integral se traduce en una media aritmética, de manera que en la expresión (9) no se trata de valores instantáneos de intensidad de corriente sino de valores promediados.

Una vez conocida la potencia aerodinámica para unas vueltas y una velocidad de viento concretas, el cálculo del par es trivial. Si se dispusiera de instrumentación con la suficiente frecuencia de adquisición, esta metodología permitiría también observar la evolución del par con la posición angular.

Para evaluar la fiabilidad y funcionalidad de esta metodología se han realizado ensayos con dos velocidades de viento diferentes, 5.5 m/s y 7.5 m/s. Estas velocidades están en el rango típico de velocidades medias del viento en entornos urbanos. Además, la elección también responde a un criterio de seguridad. Al tratarse de un ensayo a escala las fuerzas centrífugas (que dependen cuadráticamente de la velocidad de giro) son muy considerables. Aumentar la

velocidad del viento hace que haya que aumentar la velocidad de giro de forma lineal para alcanzar las velocidades específicas requeridas.

RESULTADOS

En la Figura 6 se pueden observar los rangos de par y potencia aerodinámica y las velocidades angulares que se manejan en estos ensayos.

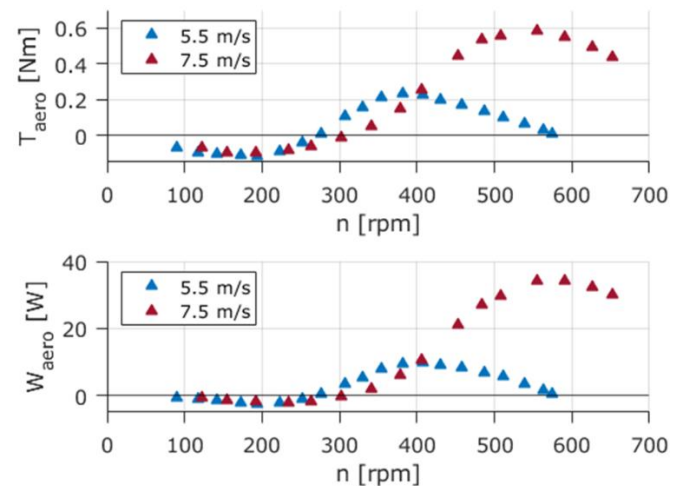


Figura 6: Par y potencia aerodinámica frente a velocidad angular en los dos ensayos realizados.

Como se explicaba anteriormente, se trata magnitudes muy pequeñas e incluso negativas en algunos puntos, lo que dificulta enormemente la medida mediante los métodos convencionales. Como se puede apreciar también en la Figura 6, la metodología desarrollada permite una caracterización profunda de las prestaciones, incluso en las zonas donde la turbina no produce energía. El buen control que se tiene de la velocidad de giro gracias a la utilización del elemento activo (motor eléctrico), permite además obtener mayor número de puntos que con las metodologías convencionales, sin incurrir en largos tiempos de ensayo.

Como se comentaba anteriormente, una de las aplicaciones más directas de esta metodología es la validación de modelos analíticos y simulaciones CFD ya que se centra únicamente en la potencia aerodinámica de las palas. En la Figura 7 se representa la potencia



aerodinámica adimensionalizada frente a la velocidad específica. En esta figura se incluyen los resultados de un modelo analítico y una simulación CFD que se desarrollaron en etapas previas de la investigación [15].

El modelo analítico consiste en un modelo de doble disco actuador y múltiples tubos de corriente (DMST), mientras que el CFD es un modelo 2D RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) con modelización de la turbulencia k-omega.

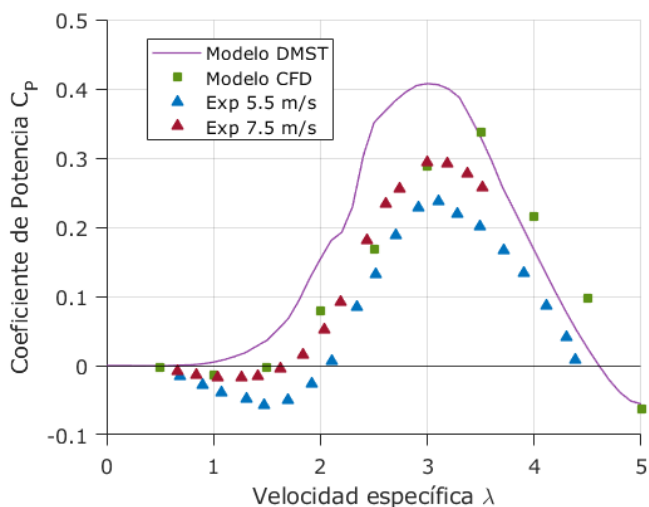


Figura 7: Coeficiente de potencia frente a velocidad específica en los dos ensayos realizados, comparados con los resultados del modelo analítico y las simulaciones CFD.

Como se puede apreciar, en general ambos modelos reproducen bastante bien la tendencia de los resultados experimentales.

Como es habitual en los modelos analíticos, el modelo DMST desarrollado sobreestima el coeficiente de potencia. No obstante, este modelo ubica con bastante precisión la zona de máximo rendimiento. En cuanto a los resultados de las simulaciones CFD, estos se ajustan especialmente bien a la curva del ensayo de 7.5 m/s, lo cual resulta lógico, dado que la simulación se realizó con esa misma velocidad del viento. En cuanto al máximo, es probable que falte un punto intermedio entre $\lambda = 3$ y $\lambda = 3.5$ que no se ha simulado. Al igual que sucedía con el modelo analítico, los resultados de la simulación CFD también sobreestiman ligeramente el coeficiente de potencia.

Es necesario mencionar que los resultados experimentales presentados corresponden a ensayos en túnel de viento con cámara cerrada, para los cuales el factor de bloqueo se encuentra en torno al 37%, por lo que sería pertinente aplicar algún tipo de corrección por bloqueo. No obstante, aunque existen correcciones para el ensayo de objetos, perfiles aerodinámicos y propulsores [16,17], turbinas HAWT [18] o incluso Savonius [19], aún no se han desarrollado correcciones probadas para este tipo de VAWT [20]. En cualquier caso, el efecto esperable de estas correlaciones sería un ligero desplazamiento de las curvas hacia abajo y hacia la izquierda.

En cuanto a los resultados experimentales, se observa cierta diferencia entre los resultados del ensayo de 7.5 m/s y el de 5.5 m/s, que probablemente se deba a la influencia del número de Reynolds en los coeficientes de arrastre y sustentación. Este fenómeno es bastante común en este tipo de ensayos y se puede apreciar por ejemplo en los resultados experimentales de *Bravo et al.* [21].

La incertidumbre en la medida del coeficiente de potencia es creciente con la velocidad específica y se encuentra en un rango del 1% al 15%. La principal fuente de incertidumbre son los coeficientes de arrastre de los perfiles.

Con el fin de demostrar la fiabilidad de los resultados obtenidos, se ha realizado una búsqueda bibliográfica de resultados experimentales de turbinas VAWT similares a la ensayada. En la *Figura 8* se comparan los resultados obtenidos con los de cinco autores diferentes [3,22–25].

Para poder realizar la comparación adecuadamente, se han incluido las principales características de las turbinas que los autores utilizan en sus ensayos, así como las condiciones del ensayo. Las curvas se identifican por las tres primeras letras del apellido del autor principal del artículo de donde se han extraído (Santamaría en el caso de los resultados de este trabajo). En esta figura se han representado los resultados de forma continua para permitir una mejor visualización, ya que la representación de tantos

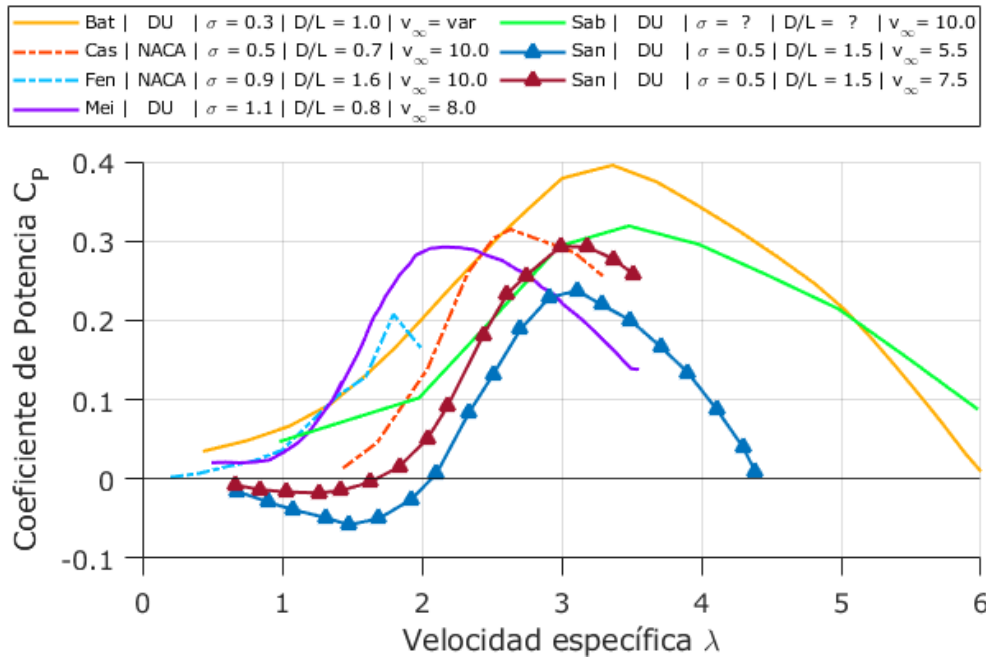


Figura 8: Resultados obtenidos comparados con los resultados de turbinas similares de distintos autores.

sets de puntos discretos resultaría en una nube de puntos difícilmente discernible. No obstante, en la representación de los datos obtenidos en el presente trabajo se han mantenido los marcadores para facilitar su identificación.

Resulta particularmente interesante la similitud en la forma de la curva entre los resultados obtenidos y los de la turbina de *Yi et al.* [24]. Dicha turbina tiene el mismo perfil aerodinámico y aproximadamente el doble de solidez, por lo que es natural que arranque antes y alcance antes el máximo, igual que sucede cuando comparamos entre ellos los resultados de *Feng et al.* [23] y *Castelli et al.* [3] cuyas turbinas tienen el mismo perfil y se ensayaron a la misma velocidad, pero difieren en la solidez.

También resulta especialmente interesante la comparación con la turbina de *Castelli et al.* [3], la cual tiene la misma solidez, pero diferente perfil aerodinámico y se ensayó a una velocidad ligeramente superior.

En el caso de la turbina de *Battisiti et al.* [22] dado que su solidez está más cerca de la óptima tiene sentido que sus resultados de coeficiente de potencia sean mayores y el máximo se alcance a una mayor velocidad

específica. Además, esta turbina se ensayó con velocidad del viento variable, por lo que los efectos del número de Reynolds dificultan la comparación.

Finalmente, en el caso de *Sabaefard et al.* [25], no se dispone de información sobre la mayoría de características de la turbina. Sin embargo, su curva presenta bastante similitud con la de *Battisiti et al.* [22], por lo que es probable que aplique el mismo razonamiento.

Por tanto, tras el análisis realizado, se puede afirmar que los resultados obtenidos coinciden con los resultados previsibles para una turbina de estas características y concuerdan con los resultados de la bibliografía.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de una innovadora metodología para la caracterización de prestaciones de turbinas de eje vertical (VAWT) en túneles de viento.

Dicha metodología presenta ventajas relevantes frente a las convencionales, siendo capaz de obtener una profunda caracterización,



y un gran número de puntos, sin incurrir en largos tiempos de ensayo. Además, los costes de infraestructura e instrumentación son moderados, ya que la utilización de un elemento activo permite solucionar los problemas derivados de la escala, y no se necesitan instrumentos de medida de alto coste como pueden ser los torquímetros.

Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de esta metodología para la validación de modelos analíticos y CFD y resulta especialmente interesante porque permite aislar los efectos de elementos secundarios como la estructura o los brazos.

Asimismo, los resultados obtenidos coinciden con los resultados previsibles para una turbina de estas características y concuerdan con los resultados de la bibliografía, permitiendo validar la metodología desarrollada.

Resultados aún más fiables se podrían obtener si los coeficientes de arrastre fueran determinados experimentalmente, en lugar de ser extrapolados a partir de los encontrados en la bibliografía.

También podría resultar interesante el desarrollo de algún tipo de corrección por el efecto de bloqueo para turbinas VAWT, debido a la configuración cerrada del ensayo y su posterior aplicación a los resultados presentados.

Para obtener una validación adicional de la metodología, podrían contrastarse los resultados obtenidos con la medida de un torquímetro.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer al anterior *Ministerio de Economía Industria y Competitividad de España* por su papel como financiador de la investigación, ya que esta se ha realizado dentro del marco del proyecto del Plan Nacional "Desarrollo y Construcción de Turbinas Eólicas de Eje Vertical Para Entornos Urbanos (DEVTURB)", Ref. ENE 2017-89965.

Asimismo, se desea agradecer las ayudas del Principado de Asturias para apoyar las

actividades que desarrollan sus grupos de investigación, Ref. GRUPIN IDI/2018/000205.

El autor también desea agradecer su apoyo y colaboración a los miembros del equipo de investigación de dicho proyecto, encabezado por los investigadores principales *Katia Argüelles* y *Jesús Fernández*, y compuesto por los investigadores: *Mónica Galdo*, *José González*, *Andrés Meana*, *Bruno Pereiras* y *Sandra Velarde* (tutora de este trabajo).

NOMENCLATURA

c	Cuerda de la pala [m]
C_D	Coficiente de arrastre
C_P	Coficiente de potencia $\left(\frac{2 \dot{W}_{aero}}{\rho L D v_{\infty}^3}\right)$
D	Diámetro de la turbina [m]
I_n	Intensidad eléctrica en el motor [A]
k_t	Constante de par $\left[\frac{Nm}{A}\right]$
L	Longitud de las palas [m]
n	Velocidad de giro [rpm]
n_i	Velocidad de giro objetivo [rpm]
n_o	Velocidad de giro nominal [rpm]
R	Radio de la turbina [m]
Re_c	Número de Reynolds en la pala
T	Par útil del motor [Nm]
T_{aero}	Par aerodinámico [Nm]
T_{req}	Par requerido por la carga [Nm]
T_{stall}	Par de bloqueo [Nm]
V_{nom}	Voltaje nominal del motor [V]
V_{rated}	Voltaje impuesto [V]
V_{∞}	Velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$
\dot{W}_{aero}	Potencia aerodinámica obtenida [W]
$\dot{W}_{dragarms_n}$	Potencia disipada en los brazos [W]
$\dot{W}_{dragblades}$	Potencia disipada en las palas [W]
\dot{W}_{mec_n}	Potencia mecánica suministrada [W]
$\dot{W}_{mec_{loss_n}}$	Perdidas mecánicas [W]



Z	Número de palas
λ	Velocidad específica $\left(\frac{\omega R}{v_\infty}\right)$
ρ	Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
σ	Solidez $\left(\frac{Zc}{R}\right)$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Balduzzi F, Bianchini A, Carnevale EA, Ferrari L, Magnani S. Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building. *Appl Energy* 2012;97:921-9. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.008>.
- [2] Liu J, Lin H, Zhang J. Review on the technical perspectives and commercial viability of vertical axis wind turbines. *Ocean Eng* 2019;182:608-26. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.086>.
- [3] Castelli MR, Ardizzon G, Battisti L, Benini E, Pavesi G. Modeling strategy and numerical validation for a Darrieus vertical axis micro-wind turbine. *ASME Int Mech Eng Congr Expo Proc* 2010;7:409-18. <https://doi.org/10.1115/IMECE2010-39548>.
- [4] Mertens S, Van Kuik G, Van Bussel G. Performance of an H-Darrieus in the skewed flow on a roof. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2003;125:433-40. <https://doi.org/10.1115/1.1629309>.
- [5] Du L, Ingram G, Dominy RG. Time-accurate blade surface static pressure behaviour on a rotating H-Darrieus wind turbine. *Wind Energy* 2019;22:563-75. <https://doi.org/10.1002/we.2307>.
- [6] Fortunato B, Camporeale SM, Torresi M, De Fazio D, Giordani M. Experimental Results of a Vertical Axis Wind Turbine. *ASME 2010 10th Bienn Conf Eng Syst Des Anal Vol 1* 2010:307-18. <https://doi.org/10.1115/ESDA2010-25251>.
- [7] Howell R, Qin N, Edwards J, Durrani N. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renew Energy* 2010;35:412-22. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>.
- [8] Meana-Fernández A. Optimized design of aerodynamic airfoils for vertical axis wind turbines. PhD Progr Energy Process Control Univ Oviedo 2019.
- [9] Fujisawa N, Shibuya S. Observations of dynamic stall on turbine blades. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2001;89:201-14. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(00\)00062-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(00)00062-3).
- [10] Simão Ferreira C, Van Kuik G, Van Bussel G, Scarano F. Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine. *Exp Fluids* 2009;46:97-108. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0543-z>.
- [11] Edwards JM, Angelo Danao L, Howell RJ. Novel Experimental Power Curve Determination and Computational Methods for the Performance Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. *J Sol Energy Eng* 2012;134:031008. <https://doi.org/10.1115/1.4006196>.
- [12] Araya DB, Dabiri JO. A comparison of wake measurements in motor-driven and flow-driven turbine experiments. *Exp Fluids* 2015;56:1-15. <https://doi.org/10.1007/s00348-015-2022-7>.
- [13] Claessens MC. The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines. Masters Thesis 2006:1-137.
- [14] Ebuzeme CU, Quadri ZA, Noah OO, Ogedengbe EOB, Eguma C. Performance evaluation of an aerodynamic blade model on a bottom-mounted force balance system. *AIAA Propuls Energy Forum Expo 2019* 2019:1-11. <https://doi.org/10.2514/6.2019-4160>.
- [15] Meana-Fernández A, Solís-Gallego I, Fernández Oro JM, Argüelles Díaz KM, Velarde-Suárez S. Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs. *Energy* 2018;147:504-17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.0>



- 1.062.
- [16] Glauert H. Wind Tunnel Interference on Wings, Bodies and Airserews. Aeronaut Res Comm Reports Memo 1933.
- [17] E. C. Maskell. A Theory of the Blockage Effects on, Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel. Reports Memo 1963.
- [18] Sørensen JN, Shen WZ, Mikkelsen R. Wall correction model for wind tunnels with open test section. *AIAA J* 2006;44:1890-4. <https://doi.org/10.2514/1.15656>.
- [19] Alexander AJ, Holownia BP. Wind tunnel tests on a savonius rotor. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1978;3:343-51. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(78\)90037-5](https://doi.org/10.1016/0167-6105(78)90037-5).
- [20] Dossena V, Persico G, Paradiso B, Battisti L, Dell'Anna S, Brighenti A, et al. An experimental study of the aerodynamics and performance of a vertical axis wind turbine in a confined and unconfined environment. *J Energy Resour Technol Trans ASME* 2015;137. <https://doi.org/10.1115/1.4030448>.
- [21] Bravo R, Tullis S, Ziada S. Performance testing of a small vertical-axis wind turbine. *21st Can Congr Appl Mech CANCAM 2007*:2-3.
- [22] Battisti L, Brighenti A, Benini E, Castelli MR. Analysis of Different Blade Architectures on small VAWT Performance. *J Phys Conf Ser* 2016;753. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/753/6/062009>.
- [23] Feng F, Zhao S, Qu C, Bai Y, Zhang Y, Li Y. Research on Aerodynamic Characteristics of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine with S Series Airfoils. *Int J Rotating Mach* 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8350243>.
- [24] Yi M, Jianjun Q, Yan L. Airfoil Design for Vertical Axis Wind Turbine Operating at Variable Tip Speed Ratios. *Open Mech Eng J* 2015;9:1007-16. <https://doi.org/10.2174/1874155X01509011007>.
- [25] Sabaeifard P, Razzaghi H, Forouzandeh A. Determination of Vertical Axis Wind

Turbines Optimal Configuration through CFD Simulations. *2012 Int Conf Futur Environ Energy 2012*;28:109-13.