

Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo





Main wind tunnels in wind energy research around the world

Gustavo Richmond-Navarro¹, Emanuel Fallas-Hernández²,
José Alejandro Padilla-Barrientos³, Maximino Jiménez-Ceciliano⁴

Fecha de recepción: 13 de junio de 2021
Fecha de aprobación: 6 de octubre de 2021

Fallas-Hernández, E; Padilla-Barrientos, J.A; Richmond-Navarro, G; Jiménez-Ceciliano, M. Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo⁵. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 178-194.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5711>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: g-richmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: efallashdez@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2159-0375>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: japadilla99@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5423-6807>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: maxjimenez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7222-9961>
- 5 Los autores aquí firmantes están de acuerdo con la versión final de este documento y hacen constar que la conceptualización, preparación y corrección del artículo se realizó según la siguiente distribución: GRN 60%; EFH 20%; JAPB 10%; MJC 10%

Palabras clave

Túnel de viento; energía eólica; turbina de eje horizontal; turbina de eje vertical; estela; perfil aerodinámico.

Resumen

Se presenta una revisión de literatura de los túneles de viento con mayor relevancia en la investigación sobre energía eólica. Se realizó una búsqueda sistemática en la base de datos de Web of Science (WoS) en la que se obtuvieron 93 artículos que fueron filtrados para el periodo 2016-2020 y mediante distintos criterios de relevancia. Los artículos permitieron identificar 34 túneles alrededor del mundo. Se seleccionaron los ocho túneles de viento con mayor volumen de publicación y se presentan los estudios realizados en estos. Los principales temas encontrados en la revisión tratan sobre turbinas de eje horizontal y vertical, estelas, perfiles aerodinámicos y recurso eólico. Esta revisión tiene como objetivo servir de referencia para los investigadores en energía eólica que requieren realizar experimentos en túneles de viento.

Keywords

Wind tunnel; wind energy; horizontal-axis wind turbine (HAWT); vertical-axis wind turbine (VAWT); wake; airfoil.

Abstract

A literature review about the most relevant wind tunnels in wind energy research is presented. A systematic search was carried in the Web of Science (WoS) database in which 93 papers were filtered by year from 2016 to 2020 and different relevance criteria. From the papers, 34 different wind tunnels were identified around the world. The eight tunnels with the most publications were selected and the research carried in them is presented. The main topics found are research in horizontal wind turbines (HAWT), vertical wind turbines (VAWT), turbine wake, airfoils and wind resource. This review has the objective to serve as a reference guide to researchers in wind energy that require to do experimentation in a wind tunnel.

Introducción

Los túneles de viento son herramientas de investigación para el estudio del paso de aire a través de objetos, estos aparatos cobran mucha relevancia dentro de la investigación de la mecánica de fluidos [1]. Los túneles de viento se desempeñan en múltiples áreas de la ingeniería como el diseño de aeronaves, automóviles, edificios, puentes, intercambiadores de calor entre muchas otras [2,3].

Una de las aplicaciones en las que se utilizan los túneles de viento es en la investigación sobre energía eólica. Este estudio ha incrementado su relevancia gracias al aumento de la producción total de energía eólica alrededor del mundo, la cual es una de las alternativas para los gobiernos que buscan diversificar su producción de energía y reducir su emisión de CO₂ [4]. La investigación en energía eólica permite mejorar la tecnología existente de turbinas, aumentando su eficiencia y minimizando problemas existentes como la contaminación sónica [5]. Los experimentos en túneles de viento permiten determinar de forma experimental, entre otras cosas, las características aerodinámicas de las turbinas eólicas de forma efectiva, rápida y menos costosa respecto a la experimentación en escala completa [6].

Un túnel de viento está conformado por tres partes principales: la sección de pruebas, la sección de contracción y la sección de difusión [1]. De acuerdo con la configuración del túnel estas secciones pueden formar un circuito cerrado o abierto. Los túneles de viento se pueden clasificar de acuerdo con su velocidad de operación (subsónica, transónica o supersónica), tipo de flujo (uniforme o con capa límite) y por el tipo de sección de pruebas (abierta o cerrada).

El diseño de túneles de viento y experimentos dentro de los túneles ha sido un tema ampliamente tratado, para el cual existe documentación clásica como [7] y [8]. Es común que en universidades se realice el desarrollo de túneles de viento a medida de las necesidades de cada laboratorio y del presupuesto disponible [1,2,3,9].

La existencia de una gran variedad de túneles de viento en diversas instituciones de investigación genera una gran oportunidad para los investigadores en energía eólica a realizar colaboraciones con universidades y laboratorios que ya cuentan con el equipo que es requerido. Sin embargo, no existe una revisión donde se identifiquen los distintos túneles de viento que se utilizan en la investigación de energía eólica, sus características y las líneas de investigación que se desarrollan en estos. Por esta razón, el objetivo de este artículo es resumir los principales túneles de viento que se utilizan para realizar investigación en energía eólica orientada a turbinas eólicas. De esta forma las personas investigadoras contarán con una referencia para encontrar túneles que les permitan avanzar con su trabajo.

Metodología

Revisión sistemática

Para realizar la revisión de literatura se utilizó la herramienta de Web of Science (WoS). En el sitio se realizó una búsqueda usando los términos “WIND TUNNEL” AND (“WIND TURBINE” OR “WIND ENERGY”) en documentos de tipo artículo de revista, publicados en el periodo 2016-2020, en la base de datos *Science Citation Index Expanded*. A partir de esta búsqueda se obtuvieron 492 artículos.

La búsqueda fue refinada mediante un filtro de acuerdo con la categoría de WoS, donde se seleccionaron los artículos correspondientes a las categorías “*Energy Fuels*”, “*Mechanics*”, “*Green Sustainable Science Technology*”, “*Thermodynamics*”, “*Engineering Mechanical*”, “*Engineering Multidisciplinary*” e “*Instruments Instrumentation*”. Este filtro redujo los resultados a 419 artículos.

Posteriormente, se buscó tomar las publicaciones de las revistas que divulgan mayor cantidad de artículos en el tema de energía eólica. De esta forma se seleccionaron los artículos correspondientes a las revistas que contribuyeran con cinco o más resultados a la búsqueda. Este filtro redujo los resultados a 317 artículos.

Finalmente, con el objetivo de enfocar los artículos hacia los túneles de viento más importantes en la investigación, se realizó un filtro de acuerdo con la organización afiliada al artículo. De esta forma, se seleccionaron los artículos que corresponden a organizaciones que contribuyeron con cinco o más resultados a la búsqueda. Un total de 149 artículos resultaron de este filtro y estos constituyeron el material que fue procesado para identificar los túneles de viento.

Procesado de resultados

A partir del insumo de los 149 artículos encontrados se comenzó una revisión sobre el texto completo para identificar la temática principal de cada artículo y el túnel de viento utilizado para obtener resultados experimentales. Este procesado llevó a descartar 23 artículos donde no se obtenían resultados experimentales en un túnel de viento, 10 artículos que no trataban la temática de energía eólica enfocada en turbinas y 23 artículos para los cuales la institución donde se realiza esta investigación no tiene acceso. Este procesado permitió identificar 93 artículos que cumplen todos los criterios establecidos.

En los artículos estudiados se utilizaron un total de 34 túneles de viento distintos, en la sección de resultados se presentará un resumen de los túneles de viento identificados y los principales temas que se investigan en estos. Se profundizará en la investigación realizada en los 8 túneles de viento que aparecieron cinco o más veces en los artículos estudiados.

Resultados

La búsqueda en base de datos que se llevó a cabo dio lugar a 93 artículos que cumplen con los requisitos mencionados en la sección de metodología. En la figura 1 se muestra un histograma que resume los ejes temáticos encontrados en esas publicaciones. El tema de turbinas de eje vertical fue el de mayor prevalencia, seguido por turbinas de eje horizontal y el estudio de modelos de estelas en turbinas eólicas.

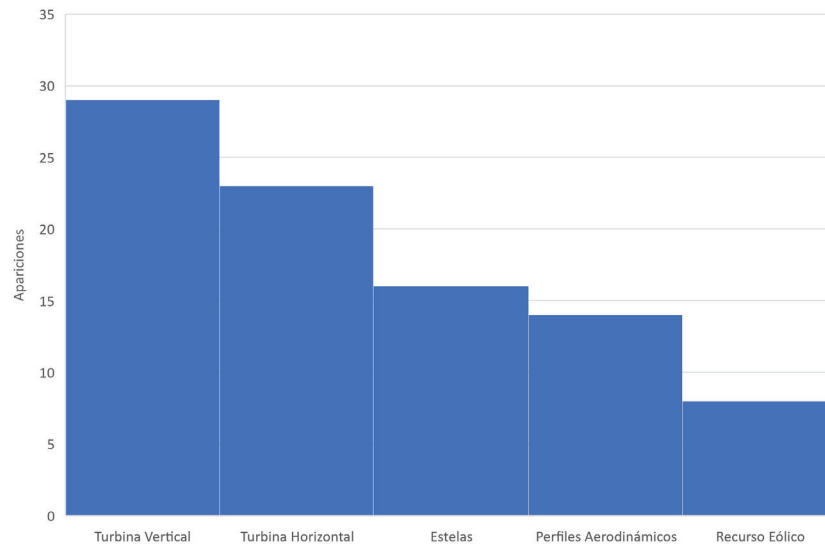


Figura 1. Temáticas tratadas en los artículos analizados.

En el cuadro 1 se muestra un resumen de los túneles de viento más importantes que fueron identificados a partir de la metodología. Se puede destacar que dentro de los túneles identificados existe variedad, ya que se identifican túneles de flujo uniforme y de capa límite, además de túneles de gran escala y de pequeña escala.

Cuadro 1. Principales túneles de viento identificados y sus características.

Instalación	Apariciones*	Tipo de túnel	Tamaño sección de pruebas	Velocidad Máxima	Referencia
Mie University	17	Sección Abierta	Diámetro: 3.6 m Largo: 4.5 m	30 m/s	[10]
Politecnico di Milano	7	Flujo Uniforme y Capa límite	Sección 1: 4 x 4 m Largo: 6 m Sección 2: 14 x 4 m Largo: 36 m	Sección 1: 55 m/s Sección 2: 15 m/s	[6,11]
Kyushu University	7	Capa límite	3.6 x 2 m Largo: 15 m	30 m/s	[12]
Tsinghua University	7	Flujo Uniforme	1.5 x 1.5 m Largo: 2.2 m	10 m/s	[13]
Hong Kong University of Science and Technology	6	Flujo Uniforme	Sección 1: 3 x 2 m Largo: 21 m Sección 2: 5 x 4 m Largo: 41 m	Sección 1: 10 m/s Sección 2: 7.8 m/s	[14,15]
Harbin Institute of Technology	5	Flujo Uniforme	Sección 1: 4 x 3 m Largo: 25 m Sección 2: 6 x 3.6 m Largo: 50 m	Sección 1: 50 m/s Sección 2: 30 m/s	[16]
Mie University	5	Flujo Uniforme	0.65 x 0.65 m Largo: 2 m	52 m/s	[17]
St. Anthony Falls Laboratory	5	Capa límite	1.7 x 1.7 m Largo: 16 m	6 m/s	[18]

* En cuántas publicaciones aparece dentro del grupo de artículos seleccionado.

El resto de los túneles relevantes que corresponden con los criterios descritos en la metodología, pero que no aparecen en cinco o más de los artículos seleccionados, se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Otros túneles de viento relevantes.

Instalación	Apariciones	Referencia
Iowa State University	3	[19]
City University of Hong Kong	3	[20]
ABRI, National Cheng Kung University	3	[21]
DAA, National Cheng Kung University	3	[22]
North China Electric Power University	3	[23]
Portland State University	2	[24]
Ruhr-Universität Bochum	2	[25]
Technion Flow Control Lab	2	[26]
TU Delft	2	[27]
Beijing University of Aeronautics & Astronautics	1	[28]
China Aerodynamic Research and Development Center	1	[29]
IET, Chinese Academy of Sciences	1	[30]
Inter-University Research Centre on Building Aerodynamics and Wind Engineering	1	[31]
Technical University of Denmark	1	[6]
Huazhong University of Science and Technology	1	[32]
Iowa State University, Icing Wind Tunnel	1	[33]
WiST Lab, Iowa State University	1	[34]
Von Karman Institute	1	[35]
Department of Engineering Science, National Cheng Kung University	1	[36]
Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO)	1	[37]
Politecnico di Milano, "Sergio De Ponte" Wind Tunnel	1	[38]
Kyushu University, Open Circuit Wind Tunnel	1	[39]
TU Delft, Open Jet Facility	1	[40]
University of Liege	1	[41]
University of Oldenburg	1	[42]
Vrije Universiteit Brussel	1	[35]

Revisión de la investigación en los túneles principales

Túnel de viento de sección abierta, Mie University

En este túnel de viento de 400 kW, de sección abierta y con dimensiones de 3.6 m de diámetro y 4.5 m de largo en la sección de pruebas, se ha utilizado un sistema de LDV (*laser doppler velocimetry*) para la medición del flujo en los perfiles aerodinámicos de turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT), especialmente, durante el fenómeno de fatiga dinámica. Se determinó que la capa límite disminuye al acercarse al borde de ataque, pero aumenta rápidamente a partir de la mitad de la cuerda [43], dándose la separación del flujo al haber recorrido entre el 90-100% de la cuerda [44]. Además, se han hecho estudios respecto al *pitch* del aspa. En ellos se determinó, utilizando sensores de presión en el aspa y por medio de simulación, que para una turbina eólica de eje vertical (VAWT), de aspas rectas, con el perfil NACA0021, el *pitch* no afecta el

coeficiente de potencia al comparar los resultados con una turbina de eje vertical convencional [45]. No obstante, sí afecta el coeficiente de torque y la distribución de presiones, debido a que cuando las aspas están en la región aguas arriba, la diferencia de presión entre las caras del aspa es máxima para un ángulo de *pitch* de 6° , ángulo en el cual también es posible alcanzar el máximo coeficiente de torque [45]. En el mismo ámbito, se demostró con una balanza de seis ejes que, para una turbina eólica flotante fuera de la costa con flujo diagonal, la amplitud de la variación en un sistema cíclico para control del *pitch*, no afecta el coeficiente de potencia ni el coeficiente de empuje [46]. En la figura 2 se muestra un esquema del túnel.

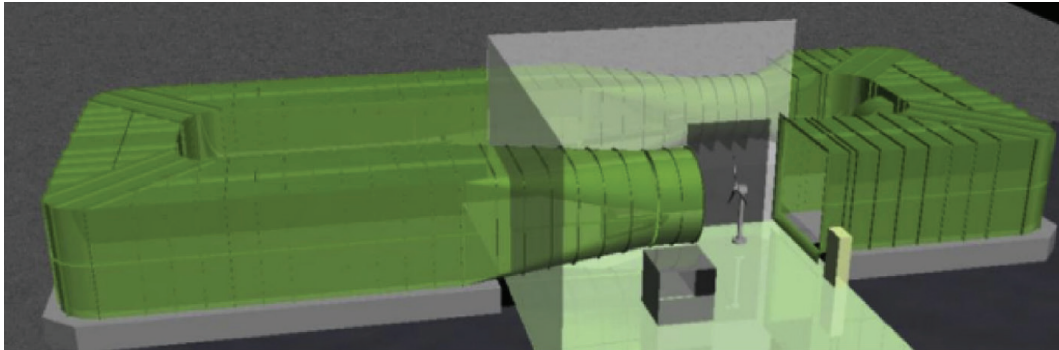


Figura 2. Esquema del túnel de viento de sección abierta de la Universidad de Mie. Fuente: [43]

Túnel de viento Politecnico di Milano

Este túnel de viento, mostrado en la figura 3, es de 1.4 MW con sección de prueba de 3.84 m de alto y 4 m de ancho, se ha enfocado en la prueba de diversas VAWT, con diámetros entre 0.5 m y 3 m. Se utilizaron sensores de presión para caracterizar la estela que producen las turbinas, donde se determinó que dos VAWT separadas horizontalmente 1.2 o 1.3 veces su diámetro y con una configuración donde las turbinas giran a favor del viento que fluye entre ellas, producen una estela similar a la de una VAWT aislada [47]. Por otra parte, si se separan 1.3 diámetros, pero giran en contra del viento que fluye en el espacio entre ellas, las estelas se fusionan en una sola más estrecha en comparación con la que produce una turbina aislada. Otra investigación utilizó un sistema de visión y un análisis modal (*Operational modal Analysis*) para estudiar las vibraciones en una VAWT. La frecuencia de los modos se comparó con datos medidos por acelerómetros y galgas extensiométricas, más una simulación en el software HAWC2 [48]. Los tres resultados fueron similares, excepto en el modo 4, donde el error entre métodos llegó hasta 16.18%. Otro estudio en el túnel comparó una turbina del tipo H-Darrieus y otra del tipo Troposkien, demostrando que ambas formas producen el mismo empuje, pero la segunda genera más potencia si el flujo supera los 6.5 m/s [49]. Además, la Troposkien elimina rápidamente los torbellinos en la región de la punta, mientras que la turbina H-Darrieus, mantiene torbellinos continuamente. Finalmente, la investigación en [50] se enfocó en detallar el proceso de diseño de una VAWT con perfil NACA0021 y con control individual del *pitch* (VAWT-IPC), esto con el objetivo de utilizarla en investigaciones posteriores para la verificación de datos teóricos.

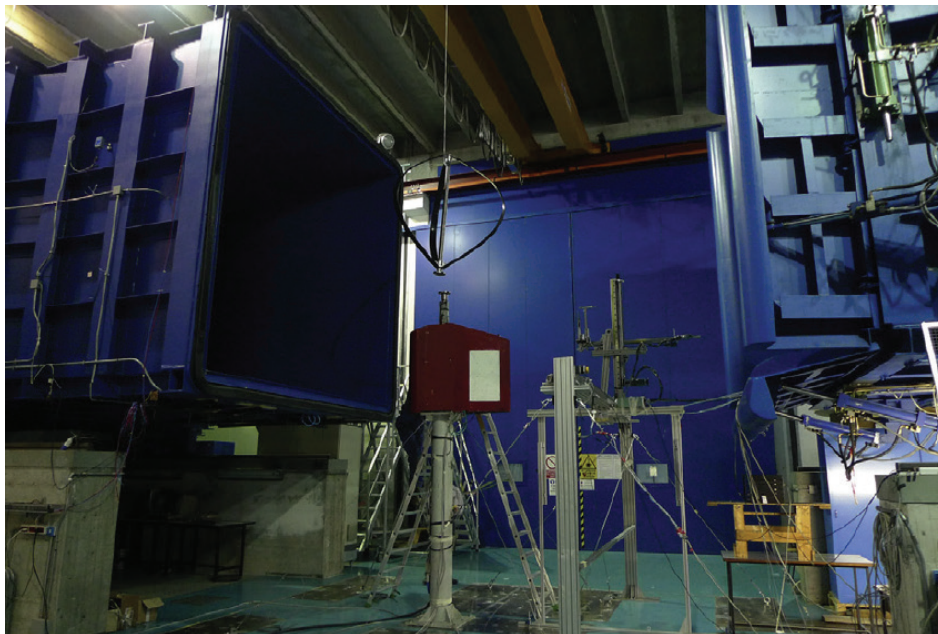


Figura 3. Túnel de viento del Politécnico di Milano. Fuente: [49].

Túnel de viento Kyushu University

Este túnel de capa límite de 264 kW y con 3.6 m de ancho, 2 m de alto y 15 m de largo en la zona de pruebas (en la figura 4 se muestran más características) se ha utilizado en diversas investigaciones enfocadas en los concentradores de flujo tipo *Wind Lens*. En [51] se utilizaron álabes estabilizadores de vórtices y diferentes geometrías de borde en una WLT (*Wind Lens turbine*), con el objetivo de aumentar la potencia de la turbina. Al utilizar 6 álabes y un *Wind Lens* del tipo Ci10 (borde circular), se aumentó la potencia en 3.8%, por otra parte, al utilizar un lente dodecagonal y sin álabes estabilizadores, se aumentó la potencia en 1.5%. También, se experimentó colocando tres WLT en una configuración SBS (*side by side* en inglés), una triangular a 60° y otra triangular a 90°, determinando que la configuración SBS genera 12% más potencia en comparación a sumar tres WLT individuales [52].

En el mismo ámbito, en [53] se utilizó un anemómetro de hilo caliente junto a un mecanismo móvil, con el objetivo de estudiar el efecto del *Wind Lens* en flujo turbulento. Se determinó que el *Wind Lens* CiiB5 aumentó la velocidad del viento en al menos 20%, al tener 5% de intensidad de turbulencia y que el porcentaje se incrementa al aumentar la intensidad de turbulencia. Por otra parte, en [54] se desarrolló y se puso a prueba experimentalmente, un modelo matemático para analizar turbinas de eje horizontal con el rotor aguas debajo de la torre (*Downwind*). Los cálculos teóricos de la velocidad del viento y el empuje del rotor tuvieron una precisión de 30% en comparación a los resultados experimentales, porcentaje mayor al que se obtiene si se utilizara el método clásico de BEM (*Blade Element Momentum*). Por último, el túnel fue utilizado para validar un simulador por LES (*Large Eddy Simulation*), el cual se aplicó para simular cómo es afectada la estela de una HAWT en función del perfil de velocidades del flujo de entrada [55]. Se determinó que la estela tiene el mismo comportamiento sin importar el perfil del flujo de entrada.

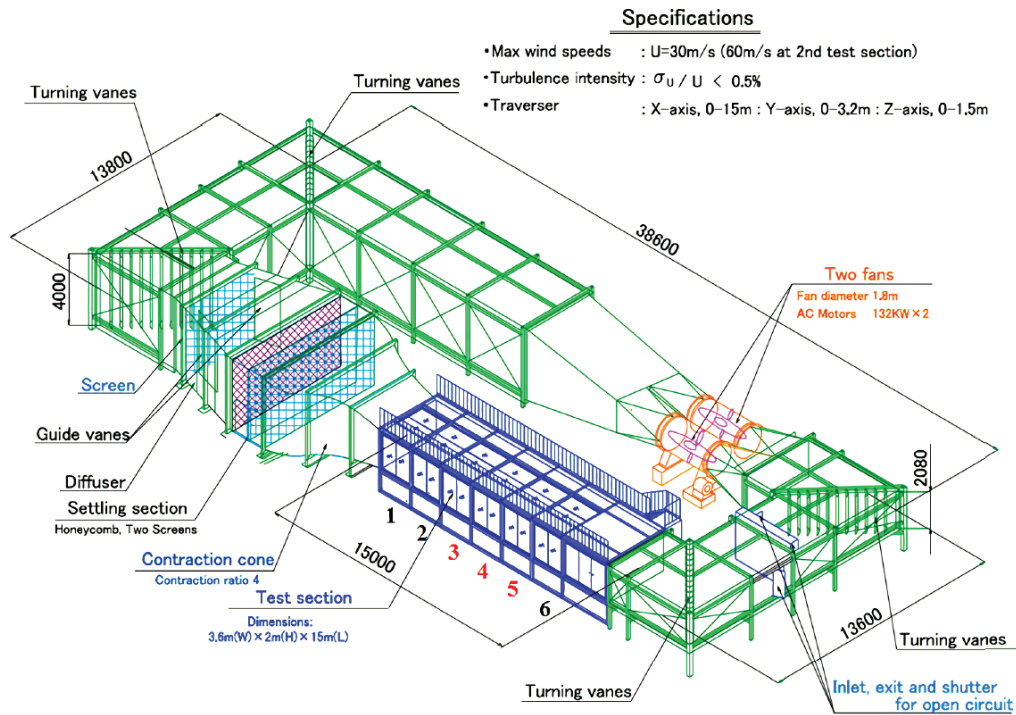


Figura 4. Túnel de viento de la Universidad de Kyushu. Fuente: [55].

Túnel de viento Tsinghua University

El túnel del laboratorio de la Universidad de Tsinghua, mostrado en la figura 5, es de 44 kW, de circuito abierto, 2 m de largo y 1.5 m de ancho y alto en la sección de pruebas. Este se ha utilizado para experimentar con diseños originales de diferentes turbinas. En [56] se determinó que para una HAWT con perfil NACA0012 y rotor plegable, el coeficiente de potencia es máximo cuando el ángulo de plegado es de 25°, y se reduce en un 72.8% si el ángulo es de 0°. Este mismo diseño reduce en 24.1% la carga flexionante en las aspas de la turbina, cálculo que fue basado en un modelo mejorado del método BEM. Por otra parte, se determinó que para una VAWT con perfil NACA0015 de aspas rectas y rotor plegable, el coeficiente de potencia es máximo cuando el ángulo de plegado es de 8°, pero es 62.5% menor a 2° y 59% menor a 13° [57]. Además, en [58] se experimentó con una VAWT a la cual se le agregaron aspas secundarias móviles, de tal manera que la turbina pudiera variar entre el tipo Savonius y H-Darrieus, permitiendo que esta se autoinicie. Los resultados demostraron gráficamente que el diseño propuesto obtiene un mayor coeficiente de potencia y posee mejor control de potencia en comparación con la turbina H-Darrieus convencional. En [59] se aplicó una distribución normal asimétrica (*Skew-normal distribution*) para construir un modelo matemático que predijera la distribución de velocidades en la estela de una HAWT en condiciones de desalineamiento respecto a la dirección del flujo (*Yawed conditions*). Al obtener datos experimentales con una HAWT de dos aspas con perfil S826, y al compararlos con tres modelos teóricos diferentes, se concluyó que el modelo propuesto obtiene los porcentajes de error más bajos, especialmente, cuando se aplican ángulos de yaw altos.

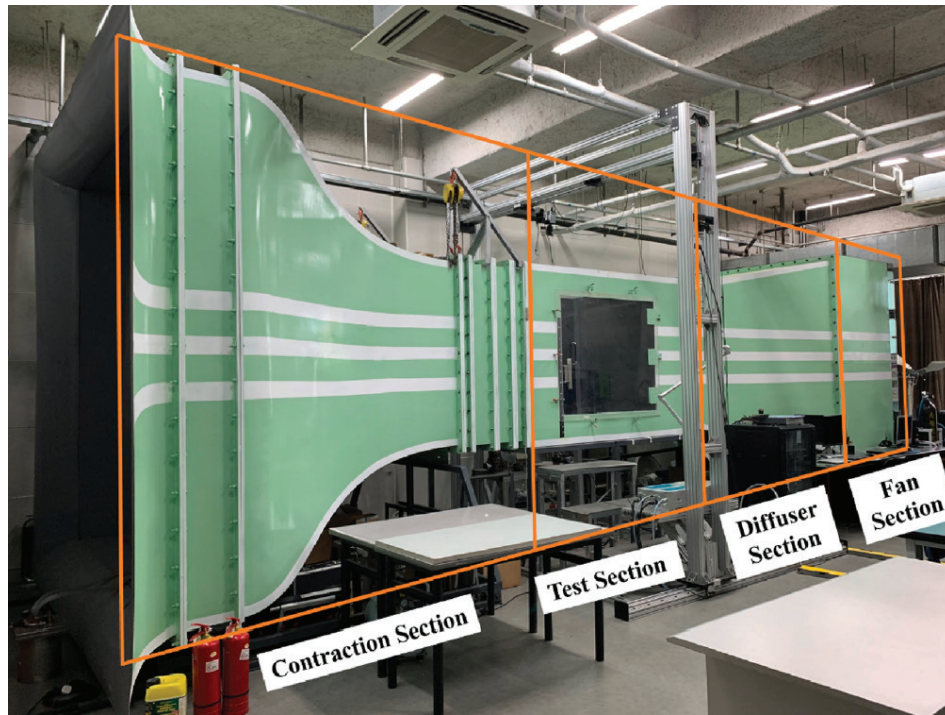


Figura 5. Túnel de viento de la Universidad de Tsinghua. Fuente: [58].

Túnel de viento Hong Kong University of Science and Technology

Este túnel de viento mostrado en la figura 6, posee dos secciones de prueba cuyas medidas se indican en el Cuadro 1. En él se han realizado varias pruebas en una VAWT de tres aspas rectas, con perfil NACA0018, una longitud de aspa de 1 metro y con un rotor de alta solidez. En [60] se utilizaron datos experimentales para comprarlos con una simulación por LES. Se determinó que la simulación predice correctamente el flujo en la zona aguas arriba, pero no lo logra en la zona aguas abajo, especialmente porque entre más solidez tiene la turbina, existen más vórtices que complican el flujo y aumentan la dificultad de realizar la simulación numérica. Además, se desarrolló un modelo híbrido de DMST (*Double-disk multiple steam-tube*) basado en coeficientes dinámicos de la fuerza aerodinámica, los cuales se determinan de forma experimental con el objetivo de analizar los ángulos de *pitch* de la turbina descrita anteriormente [61]. La investigación concluyó que estos coeficientes son consistentes a bajas TSR (*Tip speed ratio*), y que el modelo se puede utilizar para calcular los ángulos óptimos de *pitch*. Este mismo modelo fue aplicado para desarrollar una expresión que describiera el ángulo óptimo de *pitch* en función del ángulo azimutal [62]. Luego, se implementó un sistema de control de *pitch* que utiliza esta función en la misma turbina, aumentando el coeficiente de potencia en 78.6% y 45.4% en comparación a cuando el ángulo es de 0° y cuando la función del ángulo es sinusoidal. Estudiando una turbina de otro tipo, en [14] se analiza el efecto de la estela de una HAWT de tres aspas sobre otra turbina aguas abajo, ambas con un diámetro de 360mm. Mediante el uso de sensores de presión y un sistema PIV (*Particle image velocimetry*), se determinó que la potencia generada por la turbina aguas abajo disminuye debido a bajas velocidades y turbulencias en la estela, pero al aumentar la distancia entre turbinas, la potencia aumenta gradualmente.



Figura 6. Interior del túnel de viento en la *Hong Kong University of Science and Technology*. Fuente: [14].

Túnel de viento Harbin Institute of Technology

Como se indica en el cuadro 1, este túnel posee dos secciones de prueba y en una de ellas, el túnel se combina con un canal de olas (ver figura 7), por lo que se han realizado investigaciones diversas respecto a recurso eólico y su relación con el recurso marítimo. En [63] se estudian las características de los flujos de aire sobre edificios altos con techo plano, concluyéndose que entre mayor es la razón de altura-profundidad y ancho-profundidad del edificio, mayor es el factor de amplificación de la energía del flujo. También, en [64] se analizó por medio de sensores de posición, acelerómetros y válvulas extensiométricas, el rendimiento estructural de una turbina eólica empotrada en arena. Se determinó que, a largo plazo, la frecuencia natural de la turbina aumenta y la tasa de amortiguamiento disminuye, lo que afecta la amplitud de la respuesta estructural y también aumenta la deformación acumulada. En el campo de las turbinas eólicas marinas (*offshore*), se determinó con sensores de presión, que la estela que produce la plataforma no debe ignorarse [65]. La estela de la plataforma afecta la de la turbina y genera una distribución de déficit de velocidad diferente a la distribución Gaussiana de la turbina aislada, por lo que se propuso un modelo matemático para explicarla. Este modelo aún requiere una mayor profundidad en su interpretación física. Por último, en [66] se integra una turbina eólica marina del tipo TLP (*tension leg platform*) y un generador mareomotriz, para formar un sistema llamado TWWC (*Tension leg platform-Wind turbine-Wave Energy converter-Combination*). Utilizando un modelo numérico y datos experimentales, se concluyó que el modelo teórico predice correctamente la respuesta dinámica del sistema y, a velocidad del viento nominal, la potencia de la turbina es la principal contribución al conjunto TWWC.



Figura 7. Túnel de viento y canal de olas del *Harbin Institute of Technology*. Fuente: [65].

Túnel de viento tipo Göttingen Mie University

El túnel de viento tipo Göttingen de la Universidad de Mie, mostrado en la figura 8, es de 55 kW y posee una sección de prueba cuadrada de 0.65 m. En [17] se analizó experimental y numéricamente una VAWT de aspas rectas, en particular, durante el fenómeno de fatiga dinámica. Se determinó que al tener TSR menores a 1.6, la separación del flujo se observa desde el borde de ataque hasta el borde de salida, sin embargo, para TSR superiores, el rango de ángulos azimutales que ocasionan la separación del flujo se hace más estrecho. Dos investigaciones utilizaron sensores de presión en las aspas de una turbina con el objetivo de analizar el comportamiento de un perfil aerodinámico propio, denominado UMY02-T01-26 [67,68]. En [67] se determinó que si $Re = 0.5 \times 10^5$ y se utiliza una cinta en el aspa para generar una capa límite turbulenta, el coeficiente de sustentación es mayor para ángulos de ataque entre 0° y 13° , en comparación a si no se colocara la cinta. Además, bajo el fenómeno de pérdida dinámica y con $Re = 1.5 \times 10^5$, el flujo se separa al cubrir más del 10% de la cuerda en la dirección de aumento del ángulo de ataque [68]. Dejando a un lado las turbinas y los perfiles aerodinámicos, en [69] se estudia el flujo de aire a través de colinas en 2D, ambas con una altura de $H = 50$ mm, pero una con un ancho de H y otra con ancho $2H$. Utilizando un sistema PIV, se determinó que al subir la colina el flujo aumenta su velocidad hasta separarse en la cima, donde luego se obtuvo que la zona de recirculación en la colina de H de ancho es aproximadamente 80% más grande que la que se genera en la colina de $2H$ de ancho.

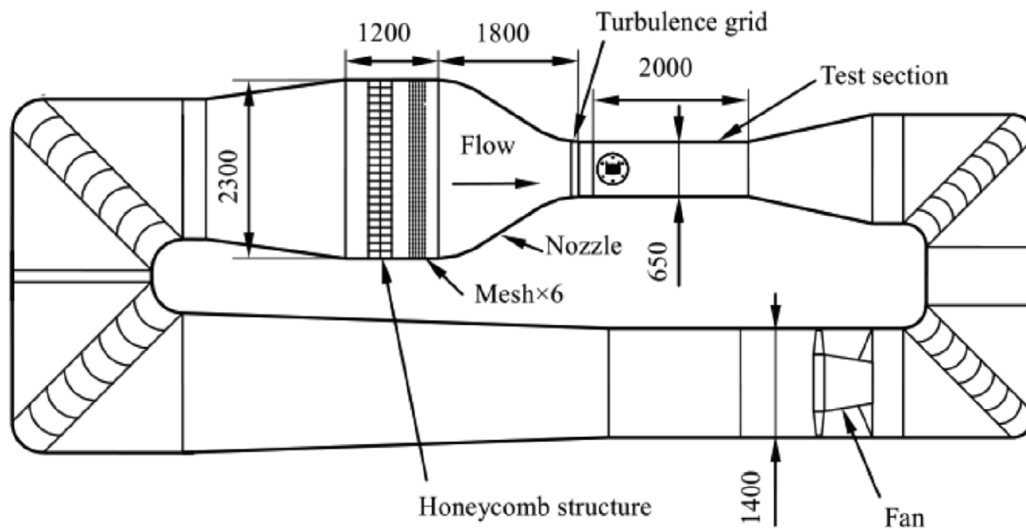


Figura 8. Esquema del túnel de viento tipo Göttingen de la Universidad de Mie, acotado en mm. Fuente: [68].

Túnel de viento St. Anthony Falls Laboratory

En este túnel con sección de prueba cuadrada de 1.7 m de lado y de circuito cerrado, se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas en las estelas que generan las turbinas eólicas. En [70] se comparan las estelas que produce una HAWT cuando posee manejo activo (rotor impulsado por un servomotor) o cuando posee manejo pasivo (rotor impulsado únicamente por el flujo de aire) en los experimentos de túnel de viento. Utilizando un anemómetro de hilo caliente, se concluyó que la velocidad promedio de la estela es bastante similar en ambos casos. También, se desarrolló y validó un modelo matemático en 3D para analizar la estela de una o varias turbinas [71] El modelo se validó al utilizar dos arreglos geométricos de 30 turbinas, determinando la velocidad de la estela con un error máximo de 22%, siendo el modelo mucho más preciso en las primeras hileras de la configuración. En el mismo ámbito, en [18] se analizan 5 arreglos de HAWT con perfil S826 y con un diámetro de 0.2 m, con el objetivo de observar el efecto de las estelas. El estudio determinó que al utilizar tres turbinas y al colocar la segunda alejada de la línea que une las otras dos, en al menos un diámetro, la potencia normalizada total aumenta en 20.41%, comparado a si las tres estuvieran alineadas. Fuera de la temática de las estelas, en [72] se tomaron mediciones en una turbina Clipper Liberty C96 de 2.5 MW, y también se construyó un modelo a escala para tomar las mismas medidas en el túnel de viento. Estas mediciones se realizaron con el objetivo de predecir el rendimiento de la turbina basándose en la velocidad de entrada. Ambas mediciones determinaron que, para predecir la potencia de salida, es óptimo utilizar la velocidad medida a una altura de aproximadamente 1.3 veces la altura al centro del rotor, debido a que esta posee mayor correlación con la potencia. En la figura 9 se muestra el interior del túnel.



Figura 9. Prueba de dos HAWT en el túnel del *St. Anthony Falls Laboratory*. Fuente: [18].

Comentarios finales

Mediante la revisión de literatura realizada en este artículo, se analizaron las publicaciones recientes de ocho túneles de viento de alta relevancia en la investigación en energía eólica. El principal tema de estudio en los distintos túneles de viento consiste en mediciones experimentales del desempeño de turbinas de eje horizontal y vertical (52 apariciones). Respecto a este tema, la Universidad de Mie tiene la mayor cantidad de publicaciones, ya que suma 16 artículos entre sus dos túneles de viento (sección abierta y tipo Göttingen).

En la mayoría de los túneles estudiados se encontraron artículos para las distintas temáticas en energía eólica. Excepciones a esto se pueden ver en el túnel del Politecnico di Milano que se concentra principalmente en el estudio de turbinas verticales, y con el túnel de la Universidad de Kyushu donde la mayoría de la investigación se centra en el estudio de turbinas con *wind lens*.

El catálogo de túneles de viento presentado en este artículo puede ser usado como punto de partida para ampliar la red de contactos de las personas que investigan en energía eólica, pues muestra la diversidad en tamaños, tipos y temas de investigación que se desarrollan en diferentes latitudes, alrededor de todo el planeta. Esto favorecerá eventualmente posibles colaboraciones internacionales sobre el tema de investigación en energía eólica.

Referencias

- [1] J. K. Calautit, H. N. Chaudhry, B. R. Hughes, and L. F. Sim, "A validated design methodology for a closed-loop subsonic wind tunnel," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 125, pp. 180–194, 2014, doi: 10.1016/j.jweia.2013.12.010.
- [2] O. D. Almeida, F. C. De Miranda, O. F. Neto, and F. G. Saad, "Low Subsonic Wind Tunnel – Design and Construction," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 10, feb 2018, doi: 10.5028/jatm.v10.716.
- [3] J. G. Monge Gapper, "Dimensionado y construcción de un túnel de viento de baja velocidad," *Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 16, pp. 45–54, 2006, doi: 10.15517/RING.V16I2.665.

- [4] K. Dai, A. Bergot, C. Liang, W. N. Xiang, and Z. Huang, "Environmental issues associated with wind energy – A review," *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 911–921, mar 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.10.074.
- [5] M. S. Nazir, A. J. Mahdi, M. Bilal, H. M. Sohail, N. Ali, and H. M. Iqbal, "Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm – A review," *Science of The Total Environment*, vol. 683, pp. 436–444, sep 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.274.
- [6] I. Bayati, M. Belloli, L. Bernini, and A. Zasso, "Aerodynamic design methodology for wind tunnel tests of wind turbine rotors," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 167, pp. 217–227, aug 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.05.004.
- [7] J. B. Barlow, W. H. Rae, and A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiley & Sons, Ltd, 3rd ed., 1999.
- [8] P. Bradshaw and R. Pankhurst, "The design of low-speed wind tunnels," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 5, pp. 1–69, jan 1964, doi: 10.1016/0376-0421(64)90003-X.
- [9] S. Jara Romero and D. Millacáriz González, *Diseño y Construcción de un Túnel de Viento con Fines Académicos para el Estudio de Flujos Externos*. PhD thesis, Universidad Tecnológica Metropolitana, 2018.
- [10] Q. Li et al., "Study on power performance for straight-bladed vertical axis wind turbine by field and wind tunnel test," *Renewable Energy*, vol. 90, pp. 291–300, may 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.01.002.
- [11] L. Battisti et al., "Wind tunnel testing of the DeepWind demonstrator in design and tilted operating conditions," *Energy*, vol. 111, pp. 484–497, sep 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.05.080.
- [12] U. Gölttenbott, Y. Ohya, S. Yoshida, and P. Jamieson, "Aerodynamic interaction of diffuser augmented wind turbines in multi-rotor systems," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 25–34, nov 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.05.014.
- [13] W. Xie, P. Zeng, and L. Lei, "Wind tunnel testing and improved blade element momentum method for umbrella-type rotor of horizontal axis wind turbine," *Energy*, vol. 119, pp. 334–350, jan 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.051.
- [14] H. Tang, K. M. Lam, K. M. Shum, and Y. Li, "Wake Effect of a Horizontal Axis Wind Turbine on the Performance of a Downstream Turbine," *Energies*, vol. 12, p. 2395, jun 2019, doi: 10.3390/en12122395.
- [15] Y. X. Peng, Y. L. Xu, S. Zhan, and K. M. Shum, "High-solidity straight-bladed vertical axis wind turbine: Aerodynamic force measurements," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 184, pp. 34–48, jan 2019, doi: 10.1016/j.jweia.2018.11.005.
- [16] D. W. Wekesa, C. Wang, Y. Wei, and W. Zhu, "Experimental and numerical study of turbulence effect on aerodynamic performance of a small-scale vertical axis wind turbine," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 157, pp. 1–14, oct 2016, doi: 10.1016/j.jweia.2016.07.018.
- [17] Q. Li, T. Maeda, Y. Kamada, Y. Hiromori, A. Nakai, and T. Kasuya, "Study on stall behavior of a straight-bladed vertical axis wind turbine with numerical and experimental investigations," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 164, pp. 1–12, may 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.02.005.
- [18] B. Dou, M. Guala, P. Zeng, and L. Lei, "Experimental investigation of the power performance of a minimal wind turbine array in an atmospheric boundary layer wind tunnel," *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 906–919, sep 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.06.056.
- [19] Z. Wang, A. Ozbay, W. Tian, and H. Hu, "An experimental study on the aerodynamic performances and wake characteristics of an innovative dual-rotor wind turbine," *Energy*, vol. 147, pp. 94–109, mar 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.020.
- [20] H. Peng and H. Lam, "Turbulence effects on the wake characteristics and aerodynamic performance of a straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel tests and large eddy simulations," *Energy*, vol. 109, pp. 557–568, aug 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.04.100.
- [21] M. H. Lee, Y. Shiah, and C. J. Bai, "Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 149, pp. 17–29, feb 2016, doi: 10.1016/j.jweia.2015.12.002.
- [22] W. C. Wang, J. J. Wang, and W. T. Chong, "The effects of unsteady wind on the performances of a newly developed cross-axis wind turbine: A wind tunnel study," *Renewable Energy*, vol. 131, pp. 644–659, feb 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.061.
- [23] X. Li, K. Yang, and X. Wang, "Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Vortex Generator Height on Vortex Characteristics and Airfoil Aerodynamic Performance," *Energies*, vol. 12, p. 959, mar 2019, doi: 10.3390/en12050959.

- [24] S. Rockel, J. Peinke, M. Hölling, and R. B. Cal, "Wake to wake interaction of floating wind turbine models in free pitch motion: An eddy viscosity and mixing length approach," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 666–676, jan2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.012.
- [25] G. Vita, A. Šarkić-Glumac, H. Hemida, S. Salvadori, and C. Baniotopoulos, "On the Wind Energy Resource above High-Rise Buildings," *Energies*, vol. 13, p. 3641, jul 2020, doi: 10.3390/en13143641.
- [26] H. F. Müller-Vahl, C. N. Nayeri, C. O. Paschereit, and D. Greenblatt, "Dynamic stall control via adaptive blowing," *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 47–64, nov 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.05.053.
- [27] D. Baldacchino, C. Ferreira, D. D. Tavernier, W. Timmer, and G. J. W. van Bussel, "Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil," *Wind Energy*, vol. 21, pp. 745–765, sep 2018, doi: 10.1002/we.2191.
- [28] L. Zhang, X. Li, S. Li, J. Bai, and J. Xu, "Unstable aerodynamic performance of a very thick wind turbine airfoil CAS-W1-450," *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 1112–1120, mar 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.086.
- [29] Q. Li, Z. Shu, and F. Chen, "Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation," *Applied Energy*, vol. 165, pp. 777–788, mar 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.114.
- [30] G. Wang, L. Zhang, and W. Z. Shen, "LES simulation and experimental validation of the unsteady aerodynamics of blunt wind turbine airfoils," *Energy*, vol. 158, pp. 911–923, sep 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.093.
- [31] H. Kozmar, D. Allori, G. Bartoli, and C. Borri, "Wind characteristics in wind farms situated on a hilly terrain," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 174, pp. 404–410, mar 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.01.008.
- [32] J. Ye et al., "Effects of divergent angle on the flow behaviors in low speed wind accelerating ducts," *Renewable Energy*, vol. 152, pp. 1292–1301, jun 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.068.
- [33] L. Gao, Y. Liu, L. Ma, and H. Hu, "A hybrid strategy combining minimized leading-edge electric-heating and superhydro-/ice-phobic surface coating for wind turbine icing mitigation," *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 943–956, sep 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.112.
- [34] A. Downey, S. Laflamme, and F. Ubertini, "Experimental wind tunnel study of a smart sensing skin for condition evaluation of a wind turbine blade," *Smart Materials and Structures*, vol. 26, p. 125005, dec 2017, doi: 10.1088/1361-665X/aa9349.
- [35] A. Vergaerde, T. De Troyer, A. Carbó Molina, L. Standaert, and M. Runacres, "Design, manufacturing and validation of a vertical-axis wind turbine setup for wind tunnel tests," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 193, p. 103949, oct 2019, doi: 10.1016/j.jweia.2019.103949.
- [36] Y. T. Wu, C. Y. Lin, and C. M. Hsu, "An Experimental Investigation of Wake Characteristics and Power Generation Efficiency of a Small Wind Turbine under Different Tip Speed Ratios," *Energies*, vol. 13, p. 2113, apr 2020, doi: 10.3390/en13082113.
- [37] M. Ge, Y. Wu, Y. Liu, and X. I. Yang, "A two-dimensional Jensen model with a Gaussian-shaped velocity deficit," *Renewable Energy*, vol. 141, pp. 46–56, oct 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.127.
- [38] G. Tomasini, D. Tarsitano, and S. Giappino, "A centimetre-scale bi-directional wind turbine for energy harvesting applications: design and experimental tests," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, p. 105048, oct 2019, doi: 10.1088/1361-665X/ab38f7.
- [39] T. Uchida and K. Sugitani, "Numerical and Experimental Study of Topographic Speed-Up Effects in Complex Terrain," *Energies*, vol. 13, p. 3896, jul 2020, doi: 10.3390/en13153896.
- [40] N. Chrysochoidis-Antsos, A. V. Amoros, G. J. van Bussel, S. M. Mertens, and A. J. van Wijk, "Wind resource characteristics and energy yield for micro wind turbines integrated on noise barriers – An experimental study," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 203, p. 104206, aug 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104206.
- [41] G. Vita, H. Hemida, T. Andrienne, and C. Baniotopoulos, "The effect of the integral length scale of turbulence on a wind turbine aerofoil," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 204, p. 104235, sep 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104235.
- [42] S. Rockel, J. Peinke, M. Hölling, and R. B. Cal, "Dynamic wake development of a floating wind turbine in free pitch motion subjected to turbulent in flow generated with an active grid," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 1–16, nov 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.05.016.
- [43] Q. Li et al., "Laser Doppler Velocimetry (LDV) measurements of airfoil surface flow on a Horizontal Axis Wind Turbine in boundary layer," *Energy*, vol. 183, pp. 341–357, sep 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.150.
- [44] Q. Li et al., "Experimental investigations of airfoil surface flow of a horizontal axis wind turbine with LDV measurements," *Energy*, vol. 191, p. 116558, jan 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116558.

- [45] Y. Yang, Z. Guo, Q. Song, Y. Zhang, and Q. Li, "Effect of Blade Pitch Angle on the Aerodynamic Characteristics of a Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine Based on Experiments and Simulations," *Energies*, vol. 11, p. 1514, jun 2018, doi: 10.3390/en11061514.
- [46] L. Q. Sang, M. Takao, Y. Kamada, and Q. Li, "Experimental investigation of the cyclic pitch control on a horizontal axis wind turbine in diagonal in flow wind condition," *Energy*, vol. 134, pp. 269–278, sep 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.042.
- [47] A. Vergaerde et al., "Experimental characterization of the wake behind paired vertical-axis wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 206, p. 104353, nov 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104353.
- [48] N. Najafi and U. S. Paulsen, "Operational modal analysis on a VAWT in a large wind tunnel using stereo vision technique," *Energy*, vol. 125, pp. 405–416, apr 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.133.
- [49] L. Battisti et al., "Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures," *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 425–444, sep 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.098.
- [50] I. Bayati, S. Foletti, D. Tarsitano, and M. Belloli, "A reference open data vertical axis wind turbine, with individual pitch control, for code validation purposes," *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 711–720, jan 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.08.090.
- [51] K. Watanabe, Y. Ohya, and T. Uchida, "Power Output Enhancement of a Ducted Wind Turbine by Stabilizing Vortices around the Duct," *Energies*, vol. 12, p. 3171, aug 2019, doi: 10.3390/en12163171.
- [52] K. Watanabe and Y. Ohya, "Multirotor Systems Using Three Shrouded Wind Turbines for Power Output Increase," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 141, may 2019, doi: 10.1115/1.4042971.
- [53] G. Richmond-Navarro, P. Casanova-Treto, and F. Hernández-Castro, "Effect of a wind lens diffuser on turbulent flow," *Uniciencia*, vol. 35, pp. 1–18, jul 2021, doi: 10.15359/ru.35-2.7.
- [54] S. Yoshida, K. Fujii, M. Hamasaki, and A. Takada, "Effect of Rotor Thrust on the Average Tower Drag of Downwind Turbines," *Energies*, vol. 12, p. 227, jan 2019, doi: 10.3390/en12020227.
- [55] T. Uchida, "Effects of Inflow Shear on Wake Characteristics of Wind-Turbines over Flat Terrain," *Energies*, vol. 13, p. 3745, jul 2020, doi: 10.3390/en13143745.
- [56] H. Meng, Z. Ma, B. Dou, P. Zeng, and L. Lei, "Investigation on the performance of a novel forward-folding rotor used in a downwind horizontal-axis turbine," *Energy*, vol. 190, p. 116384, jan 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116384.
- [57] J. Guo, P. Zeng, and L. Lei, "Performance of a straight-bladed vertical axis wind turbine with inclined pitch axes by wind tunnel experiments," *Energy*, vol. 174, pp. 553–561, may 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.177.
- [58] H. Su, B. Dou, T. Qu, P. Zeng, and L. Lei, "Experimental investigation of a novel vertical axis wind turbine with pitching and self-starting function," *Energy Conversion and Management*, vol. 217, p. 113012, aug 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113012.
- [59] B. Dou, M. Guala, L. Lei, and P. Zeng, "Wake model for horizontal-axis wind and hydrokinetic turbines in yawed conditions," *Applied Energy*, vol. 242, pp. 1383–1395, may 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.164.
- [60] Y. X. Peng, Y. L. Xu, S. Zhu, and C. Li, "High-solidity straight-bladed vertical axis wind turbine: Numerical simulation and validation," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 193, p. 103960, oct2019, doi: 10.1016/j.jweia.2019.103960.
- [61] Y. X. Peng, Y. L. Xu, and S. Zhan, "A hybrid DMST model for pitch optimization and performance assessment of high-solidity straight-bladed vertical axis wind turbines," *Applied Energy*, vol. 250, pp. 215–228, sep 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.127.
- [62] Y. L. Xu, Y. X. Peng, and S. Zhan, "Optimal blade pitch function and control device for high-solidity straight-bladed vertical axis wind turbines," *Applied Energy*, vol. 242, pp. 1613–1625, may 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.151.
- [63] H. Peng, S. Dai, K. Lin, G. Hu, and H. Liu, "Experimental investigation of wind characteristics and wind energy potential over rooftops: Effects of building parameters," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 205, p. 104304, oct 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104304.
- [64] K. Lin, S. Xiao, A. Zhou, and H. Liu, "Experimental study on long-term performance of monopile-supported wind turbines (MWTs) in sand by using wind tunnel," *Renewable Energy*, vol. 159, pp. 1199–1214, oct 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.06.034.
- [65] X. L. Xiong, P. Lyu, W. L. Chen, and H. Li, "Self-similarity in the wake of a semi-submersible offshore wind turbine considering the interaction with the wake of supporting platform," *Renewable Energy*, vol. 156, pp. 328–341, aug 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.071.

- [66] N. Ren, Z. Ma, B. Shan, D. Ning, and J. Ou, "Experimental and numerical study of dynamic responses of a new combined TLP type floating wind turbine and a wave energy converter under operational conditions," *Renewable Energy*, vol. 151, pp. 966–974, may 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.11.095.
- [67] Q. Li, Y. Kamada, T. Maeda, and Y. Nishida, "Experimental investigations of boundary layer impact on the airfoil aerodynamic forces of Horizontal Axis Wind Turbine in turbulent inflows," *Energy*, vol. 135, pp. 799–810, sep 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.174.
- [68] Q. Li, Y. Kamada, T. Maeda, J. Murata, and Y. Nishida, "Effect of turbulent inflows on airfoil performance for a Horizontal Axis Wind Turbine at low Reynolds numbers (Part II: Dynamic pressure measurement)," *Energy*, vol. 112, pp. 574–587, oct 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.126.
- [69] Y. Kamada, Q. Li, T. Maeda, and K. Yamada, "Wind tunnel experimental investigation of flow field around two-dimensional single hill models," *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 1107–1118, jun 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.083.
- [70] B. Dou, Z. Yang, M. Guala, T. Qu, L. Lei, and P. Zeng, "Comparison of Different Driving Modes for the Wind Turbine Wake in Wind Tunnels," *Energies*, vol. 13, p. 1915, apr 2020, doi: 10.3390/en13081915.
- [71] H. Sun and H. Yang, "Numerical investigation of the average wind speed of a single wind turbine and development of a novel three-dimensional multiple wind turbine wake model," *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 192–203, mar2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.122.
- [72] K. B. Howard and M. Guala, "Upwind preview to a horizontal axis wind turbine: a wind tunnel and field-scale study," *Wind Energy*, vol. 19, pp. 1371–1389, aug 2016, doi: 10.1002/we.1901.