

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE TORQUE EN UN AEROGENERADOR SAVONIUS PARA VALIDACIÓN DE DISEÑO

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF TORQUE IN A SAVONIUS WIND TURBINE FOR DESIGN VALIDATION

PONZONI, Lucio¹

GANIELE, María Julieta²

MEREL, Alex³

ALLES, Yesica⁴

GAUTO, Ariel⁵

Ponzoni, L., Ganiele, M. J., Merel A., Alles, Y., Gauto, A. (2025). Análisis experimental de torque en un aerogenerador savonius para validación de diseño. *Revista INNOVA, Revista argentina de Ciencia y Tecnología*, 15.

RESUMEN

Este trabajo presenta la caracterización del comportamiento de un aerogenerador Savonius de baja potencia, desarrollado por el Grupo AeroMat, a partir de la medición de su rendimiento en términos de torque. Con este propósito, se diseñó y construyó un banco de ensayos que permite evaluar aerogeneradores en condiciones controladas. El sistema experimental integra un generador de viento mediante ventilación forzada, controlado por un variador de frecuencia, y un dispositivo de medición de torque compuesto por un dinamómetro digital, un brazo de palanca y un resorte calibrado.

¹ Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF); Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA); Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Argentina / investigacionaeromat@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0002-0414-1535>

² Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina / mariajulietaganiele@cnea.gob.ar / <https://orcid.org/0000-0002-2702-3013>

³ Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Argentina / alumerel@gmail.com

⁴ Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), Argentina / yesica.alles@gmail.com

⁵ Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Argentina / a.ariel.gauto@gmail.com

Las pruebas se realizaron variando tanto la velocidad del flujo de aire como el ángulo, a fin de analizar la respuesta del rotor en distintos escenarios operativos. Esta caracterización permitió validar el diseño, ajustar parámetros clave y fortalecer su aplicación en contextos rurales.

Los resultados mostraron que el torque generado alcanzó su valor máximo de 2.42 N.m a 45° de ángulo de ataque, disminuyendo notablemente a 90° (0.75 N.m), información clave para la optimización aerodinámica del dispositivo.

PALABRAS CLAVE

Aerogenerador/ Torque/ Variador de frecuencias/ Ángulo de ataque/ Energía eólica

ABSTRACT

This work presents the characterization of the performance of a low-power Savonius wind turbine developed by the AeroMat Group, based on the measurement of its torque output. To achieve this, a test bench was designed and built to evaluate wind turbines under controlled conditions. The experimental setup includes a forced-air wind generator, regulated by a frequency inverter, and a torque measurement system composed of a digital dynamometer, a lever arm, and a calibrated spring.

Tests were conducted by varying both the air flow velocity and the rotor angle, in order to analyze its response under different operating scenarios. This characterization enabled validation of the proposed design, fine-tuning of key parameters, and strengthened its potential application in rural contexts.

The results showed that the maximum torque output reached 2.42 N.m at a 45° angle of attack, decreasing significantly to 0.75 N.m at 90°, providing key data for the aerodynamic optimization of the device.

KEY WORDS

Wind turbine/ Torque/ Frequency inverter/ Angle of Attack/ Wind energy

CONTEXTO

El presente trabajo se desarrolló en el marco de un proyecto financiado a través del programa Proyectos de Tecnología para la Innovación Social (PTIS) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCyT).

La iniciativa fue coordinada por el Grupo AeroMat en beneficio de la Escuela Primaria N°8 Almafuerte y el Municipio de Guaminí, con el apoyo técnico de diversas instituciones, entre ellas la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF), la Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) y el Centro Educativo para la Producción Total N°6 (CEPT N°6).

El objetivo general del proyecto fue desarrollar y validar tecnologías adaptadas a entornos rurales, promoviendo soluciones energéticas sostenibles mediante la integración de sistemas de generación eólica de baja potencia.

INTRODUCCIÓN

La energía eólica se ha consolidado como una de las principales alternativas para diversificar la matriz energética nacional, contribuyendo a un desarrollo sostenible, a la mitigación del cambio climático y a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles (IRENA, 2021). En Argentina, el aprovechamiento de la energía eólica no solo se impulsa en grandes parques, sino también mediante el desarrollo de aerogeneradores de baja potencia destinados a abastecer comunidades rurales y zonas aisladas. En particular, los beneficios de este tipo de tecnologías aplicadas en escuelas rurales sin acceso a la red eléctrica han sido ampliamente documentados en diversos estudios (Gamboa & Bravo, 2017).

Dentro de este marco, los aerogeneradores de eje vertical tipo Savonius ofrecen una alternativa accesible y robusta. Su capacidad para operar eficazmente a bajas velocidades de viento y su bajo mantenimiento los convierte en una solución ideal para entornos rurales, donde se busca asegurar un suministro eléctrico confiable y autónomo (Akwa, Vielmo & Petry, 2012).

Con el objetivo de caracterizar el desempeño del aerogenerador Savonius diseñado por el grupo AeroMat, Figura 1, se llevó adelante una experiencia centrada en la medición del torque generado bajo diferentes condiciones de viento. Para ello, se construyó un banco de ensayos que integra un sistema de generación de viento mediante ventilación forzada, un variador de frecuencia y un dinamómetro digital para la medición de fuerza.

Esta caracterización resulta fundamental para validar el diseño, optimizar su eficiencia aerodinámica y asegurar su adecuada implementación en proyectos de electrificación rural, como el previsto en una escuela del partido de Guaminí. De este modo, el presente trabajo contribuye al desarrollo tecnológico local y al fortalecimiento de estrategias de acceso equitativo y sostenible a la energía.



Figura 1 - Aerogenerador Savonius grupo AeroMat.
Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó previamente, este trabajo se basa en la medición del torque, que es la fuerza requerida para generar un movimiento de rotación (Sears & Zemansky, 2009), y se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$M = F \times D \quad (1)$$

Dicha ecuación muestra el producto vectorial entre la fuerza ejercida sobre un punto (F), y la distancia entre el punto de aplicación de esa fuerza y el eje de rotación (D).

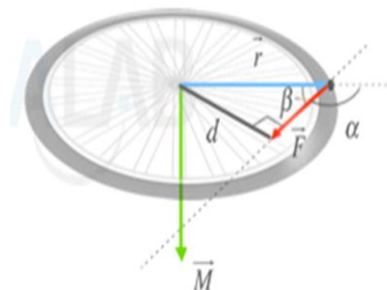


Figura 2 - Esquema del momento generado sobre una rueda, por el producto vectorial de los vectores F y r.

Fuente: (Fisicalab, s.f.)

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue obtener una caracterización precisa del comportamiento de un aerogenerador Savonius desarrollado por el Grupo AeroMat, mediante la medición de su rendimiento en términos de torque. Esta caracterización permitió validar el diseño propuesto y ajustar los parámetros operativos, con miras a su instalación en una escuela rural del Partido de Guaminí.

METODOLOGÍA

Banco de ensayos para evaluación de aerogeneradores

Para medir el momento estático desarrollado por el aerogenerador a distintas velocidades de viento y en diferentes posiciones del rotor, se mecanizó la polea del eje para incorporar en ella una varilla de acero inoxidable. Esta varilla actúa como brazo de palanca y está sujeta a un dinamómetro.

Este mecanismo frena al rotor, generando un par de la misma magnitud pero en sentido opuesto al producido por la acción del viento sobre el rotor. De esta manera, se obtiene el torque estático midiendo la tensión generada en el dinamómetro y conociendo la distancia al eje del rotor.

Sistema generación de viento

Ventilador

Para el sistema de generación de viento, encargado de simular las condiciones de viento a las que se encuentra sometido el aerogenerador, se utilizó un ventilador axial industrial, Figura 3. Este ventilador permite recrear flujos de aire controlados y uniformes, fundamentales para realizar ensayos precisos en un entorno de laboratorio. Las características técnicas del ventilador axial empleado en el sistema se encuentran detalladas en la Tabla 1.

Marca	Davica
Modelo	R63TAT
Tipo	Axial
Potencia (W)	906
RPM	940 - 1130
Diámetro (mm)	630
Corriente (Amp.)	1.48 - 1.65
Frecuencia (Hz)	50 - 60
N° de paletas	4
Caudal (m3/h)	10870 - 12915



Tabla 1: Características del ventilador industrial utilizado (DAVICA, 2025).

Figura 3 - Ventilador industrial utilizado. Fuente: elaboración propia.

Diseño y Construcción del soporte para el ventilador

Para permitir que el ventilador se pueda ajustar según el área de barrido del aerogenerador, se desarrolló un soporte utilizando diseño CAD en SolidWorks, tal como se observa en la Figura 4.

Este soporte tiene la capacidad de modificar la altura a la que se encuentra ubicado el ventilador, permitiendo su ajuste en intervalos de 15 cm. Esta flexibilidad facilita la alineación precisa del ventilador con el aerogenerador, asegurando que las pruebas se realicen bajo condiciones controladas y representativas del flujo de viento al que estará expuesto el aerogenerador en un entorno real.

El diseño de dicho soporte fue pensado de tal forma que el centro de gravedad sea lo más bajo posible, para lograr una mayor estabilidad.

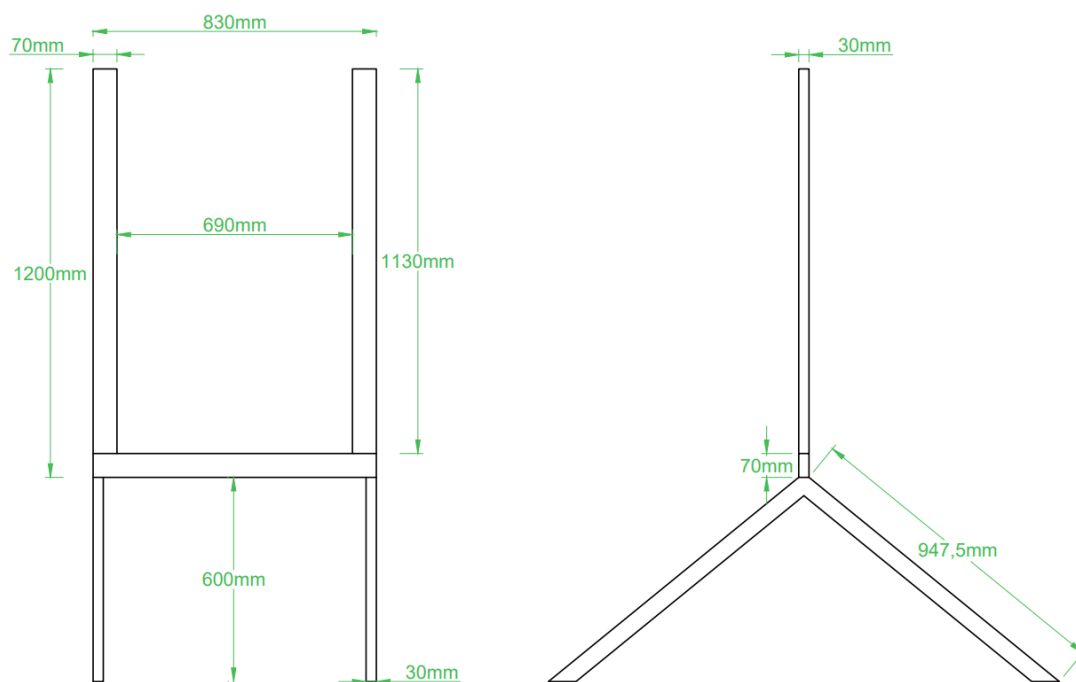


Figura 4 - Esquema del soporte en las vistas frontal y lateral, con sus respectivas medidas.
Fuente: elaboración propia.

Construcción soporte

A continuación, se presentan imágenes que documentan el proceso de construcción del soporte, desde las primeras etapas hasta su estado final.

El trabajo incluyó el corte de perfiles de hierro utilizando una sierra sensible Metabo CS 14-15, así como el corte de refuerzos de duraluminio con una guillotina a pedal. Posteriormente, se procedió al armado de la estructura, empleando bulones para la unión de los distintos componentes, lo que permitió asegurar una correcta alineación, firmeza y estabilidad del conjunto. Tal como se observa en la Figura 5.



Figura 5 - Proceso construcción soporte ventilador.
Fuente: elaboración propia.



Figura 6 - Soporte del ventilador armado. Fuente: elaboración propia.

Variador de frecuencias

Para poder regular la velocidad del viento, se utilizó un variador de frecuencias, desarrollado por el grupo AeroMat, Figura 7, el cual es un dispositivo electrónico que se encuentra entre la fuente de alimentación, y el motor eléctrico, y sirve para regular la velocidad de los motores eléctricos, como el del ventilador industrial utilizado en este caso.



Figura 7 - Variador de frecuencias utilizado.
Fuente: elaboración propia.

En base a las distintas frecuencias utilizadas para hacer las pruebas, se armó la Tabla 2 con las velocidades del viento promedio para cada frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Velocidad promedio (m/s)
3	0.00
10	1.35
20	2.18
30	3.14
40	3.89
45	4.32
50	4.63

Tabla 2 - Velocidad promedio del viento para cada una de las frecuencias utilizadas para medir el torque del aerogenerador.
Fuente: elaboración propia.

Montaje y procedimiento de medición

Dinamómetro

Para realizar las mediciones de fuerzas, se utilizó el dinamómetro digital AMF-10 (Figura 8). En la Tabla 3 se presentan las características de este equipo, incluyendo su rango de medición, precisión y resolución.

Marca	AMF
Modelo	10
Máximo valor de carga	10 N (1 kg)
Valor de división de carga	0.01N (0.001kg)
Exactitud	±1%
Tipo de mediciones	Empuje
Tipo de dinamómetro	Digital
Tipo de escala del dinamómetro	Simple



Tabla 3 - Características del dinamómetro digital utilizado

Figura 8 - Dinamómetro AMF-10

Sistema generación de viento

Para realizar los ensayos, se colocó el aerogenerador a una distancia de 2,5 metros del ventilador, Figura 9, de manera que el flujo de aire cubriera toda la superficie del aerogenerador de la forma más uniforme posible.



Figura 9 - Sistema generación de viento
Fuente: elaboración propia.

Se utilizó el anemómetro digital Uni-T modelo UT363S para medir la velocidad del viento a la altura del aerogenerador durante los ensayos, Figura 10, y se fueron registrando las velocidades promedio.



Figura 10 - Anemómetro digital Uni-T modelo UT363S
Fuente: elaboración propia.

Sistema medición de torque

En la Figura 11, se puede observar el sistema medición de torque , desarrollado a partir de las

consideraciones expuestas en el presente informe, con el fin de medir el par generado durante las pruebas.

Para las pruebas, se empleó un resorte comercial F-18, cuya selección se fundamentó en su coeficiente de elasticidad más estable y en su capacidad de proporcionar mediciones más precisas y controladas de la fuerza aplicada, en comparación con otras alternativas.

La longitud del brazo de palanca utilizada fue de 40,5 cm, permitiendo realizar las mediciones dentro del rango operativo adecuado del dinamómetro digital AMF-10.

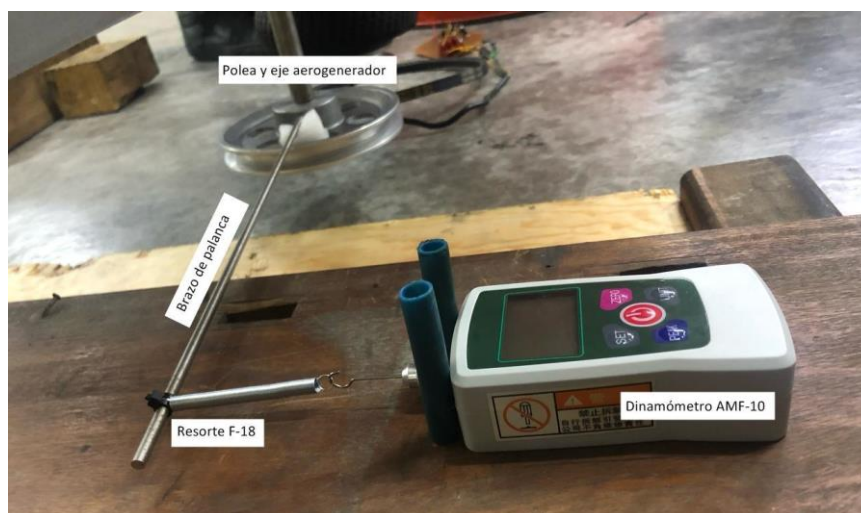


Figura 11- Sistema medición torque estático.
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, con el sistema ya armado, se efectuaron las mediciones con el dinamómetro. Estas mediciones se realizaron para distintas velocidades del viento generadas por el ventilador, variando las frecuencias de acuerdo a la Tabla 2, y para diferentes ángulos de ataque del Savonius, abarcando los ángulos de 0° , 45° , 90° , 135° y 180° .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos obtenidos en los ensayos, y sabiendo que el brazo de palanca mide 0.375 m, se calculó el torque del aerogenerador con la Ecuación 1.

Los resultados obtenidos para los distintos ángulos ensayados se muestran en las Tablas 4, 5, 6, 7 y 8.

Aerogenerador a un ángulo de 0°			
Frecuencia (Hz)	Dinamómetro pico (N)	Vel. Prom. (m/s)	Torque (Nm)
3.00	0.00	0.00	0.00
10.00	0.20	1.15	0.08
20.00	01.01	2.20	0.38
30.00	1.96	2.80	0.73
40.00	3.84	3.70	1.44
45.00	3.47	4.30	1.30
50.00	4.54	4.40	1.70

Tabla 4 - Resultados aerogenerador a un ángulo de 0°.
Fuente: elaboración propia.

Aerogenerador a un ángulo de 45°			
Frecuencia (Hz)	Dinamómetro pico (N)	Vel. Prom. (m/s)	Torque (Nm)
3.00	0.00	0.00	0.00
10.00	0.00	1.32	0.00
20.00	0.91	2.15	0.34
30.00	2.97	3.15	1.11
40.00	5.59	3.97	2.09
45.00	6.46	4.20	2.42

Tabla 5 - Resultados aerogenerador a un ángulo de 45°.
Fuente: elaboración propia.

Aerogenerador a un ángulo de 90°			
Frecuencia (Hz)	Dinamómetro pico (N)	Vel. Prom. (m/s)	Torque (Nm)
3.00	0.00	0.00	0.00

10.00	0.00	1.53	0.00
20.00	0.23	2.20	0.09
30.00	0.49	3.33	0.18
40.00	01.01	3.70	0.38
45.00	1.99	4.22	0.75
50.00	1.92	4.35	0.72

Tabla 6 - Resultados aerogenerador a un ángulo de 90°.
Fuente: elaboración propia.

Aerogenerador a un ángulo de 135°			
Frecuencia (Hz)	Dinamómetro pico (N)	Vel. Prom. (m/s)	Torque (Nm)
3.00	0.00	0.00	0.00
10.00	0.05	1.26	0.02
20.00	0.52	2.30	0.19
30.00	01.07	3.40	0.40
40.00	1.70	4.34	0.64
45.00	1.91	4.80	0.72
50.00	2.71	5.30	1.02

Tabla 7 - Resultados aerogenerador a un ángulo de 135°.
Fuente: elaboración propia.

Aerogenerador a un ángulo de 180°			
Frecuencia (Hz)	Dinamómetro pico (N)	Vel. Prom. (m/s)	Torque (Nm)
3.00	0.00	0.00	0.00
10.00	0.22	1.51	0.08
20.00	0.92	02.05	0.35
30.00	1.18	3.00	0.44

40.00	2.47	3.76	0.93
45.00	3.47	04.08	1.30
50.00	3.20	4.48	1.20

Tabla 8 - Resultados aerogenerador a un ángulo de 180°.

Fuente: elaboración propia.

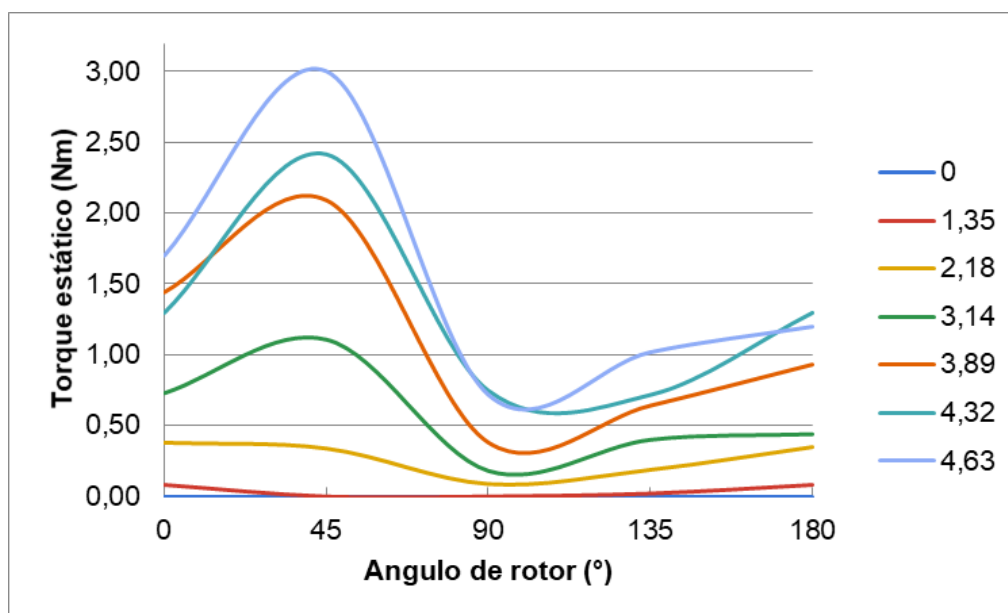


Gráfico 1 - Variación del torque estático en función del ángulo del rotor, para distintas velocidades del viento.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten validar experimentalmente el comportamiento teórico del aerogenerador Savonius, en concordancia con lo reportado en la bibliografía especializada (Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P., 2012). El sistema de medición desarrollado, así como las condiciones experimentales del ensayo, resultaron adecuados para caracterizar el rendimiento del rotor.

En particular, se identificó al ángulo de 45° como la configuración óptima de operación. A nivel teórico, este ángulo favorece una interacción eficiente del flujo de aire con las palas, generando una diferencia de presiones significativa entre ambas caras de cada pala, lo que maximiza la producción de torque. Esta hipótesis fue corroborada experimentalmente: la tabla 5 muestra un valor máximo de torque de 2,42 N·m a una velocidad de viento de 4,20 m/s, y el Gráfico 1 refleja este comportamiento con un máximo claro en la curva correspondiente al ángulo de 45°. Además,

la comparación con las tablas 4, 6, 7 y 8 evidencia que los torques medidos en otros ángulos son significativamente menores.

En contraste, el ángulo de 90° representa la condición menos eficiente. En esta posición, las palas se encuentran perpendiculares al flujo de aire, lo que reduce casi por completo la diferencia de presiones entre sus caras, disminuyendo la fuerza de arrastre que impulsa la rotación del rotor. Esta disminución se refleja en la tabla 6, donde se registró un torque máximo de sólo 0,75 N·m para una velocidad de 4,22 m/s, así como en el Gráfico 1, donde se observa un mínimo en la curva correspondiente a dicho ángulo.

En resumen, el estudio confirma que el ángulo de 45° proporciona la mayor eficiencia aerodinámica en términos de generación de torque, mientras que los 90° resultan ineficaces para la conversión de energía eólica en energía mecánica, representando una reducción de más del 75% en el rendimiento. Estos resultados refuerzan la validez del diseño y su potencial aplicación en contextos rurales, como parte de soluciones tecnológicas accesibles y sustentables.

A modo de mejorar el banco de pruebas armado, se piensa como futuro trabajo incorporar un segundo ventilador al soporte. Esto permitiría aumentar el área de trabajo y simular condiciones de viento más intensas.

BIBLIOGRAFÍA

A review on the performance of Savonius wind turbines. Akwa, J. V., Vielmo, H. A. y Petry, A. P. s.l. : Elsevier, 2012, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, págs. 3054-3064.

Gamboa, C., & Bravo, N. (2017). *Implementación de energías renovables en escuelas rurales: un enfoque de desarrollo sustentable*. *Revista Iberoamericana de Energía*, 11(1), 45–56.

DAVICA. (2025). *Ficha técnica del ventilador axial modelo R63TAT*.
<http://www.davica.com.ar/ventiladores-axiales-630.html>

Fiscalab. (s.f.). *Momento de una fuerza*. <https://www.fiscalab.com/apartado/momento-fuerza>

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *World energy transitions outlook: 1.5°C pathway*. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>

Sears, S. F., & Zemansky, Z. M. (2009). *University Physics*. Pearson Education.

Fecha de recepción: 12/05/2025

Fecha de aceptación: 10/06/2025