

Evaluation of a Savonius vertical axis wind turbine using computational fluid dynamics

Ruiz Juarez, José Luis¹; Ortiz-Vidal, L. Enrique^{*}

¹Technological University of Peru, Lima, ruiz.juarez.jose28@gmail.com

^{*}Technological University of Peru, Lima, C30057@utp.edu.pe

Abstract– This study evaluates the aerodynamic performance of a Savonius-type vertical axis wind turbine (VAWT) using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation for application in low-wind-speed urban environments, such as the city of Lima. The research is divided into three phases: first, a three-dimensional model of the turbine is developed in Autodesk Inventor Professional® software with a rotor diameter of 0.37 m and a height of 0.37 m; second, a numerical model is established based on the literature; and third, the impact of a straight-blade configuration is comparatively analyzed against a helical-blade configuration. The finite volume method is used for the numerical model, and two domains are discretized. On one hand, the cylindrical region that rotates along with the turbine geometry; on the other hand, the stationary rectangular prismatic region. The meshes of these regions are constructed using tetrahedral and prismatic elements, respectively. The $k-\epsilon$ turbulence model and the sliding mesh technique combined with 6 degrees-of-freedom are used to capture the transient flow behavior. Air velocities from 2 m/s to 5 m/s are simulated. The results allow for quantifying the improvement in the power coefficient (C_p) and torque coefficient ($\bar{C}_t$) of the modified geometry. This work contributes a technical basis for the design of microgeneration technologies adapted to local climatic conditions of high turbulence and low kinetic energy.

Keywords– Savonius wind turbine, CFD (Computational Fluid Dynamics), Helical blades, C_p (Power coefficient), Urban microgeneration.

Evaluación de un aerogenerador de eje vertical Savonius mediante dinámica de fluidos computacional

Ruiz Juarez, José Luis¹; Ortiz-Vidal, L. Enrique^{*}

¹Universidad Tecnológica del Perú, Lima, ruiz.juarez.jose28@gmail.com

^{*}Universidad Tecnológica del Perú, Lima, C30057@utp.edu.pe

Resumen— El presente estudio evalúa el desempeño aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical (VAWT, de sus siglas en inglés Vertical Axis Wind Turbine) tipo Savonius mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) para su aplicación en entornos urbanos de baja velocidad de viento, como la ciudad de Lima. La investigación se divide en tres fases: primero, se desarrolla un modelo tridimensional de la turbina en el software Autodesk Inventor Professional® con dimensiones de diámetro de rotor 0,37 m y altura 0,37 m; segundo, se establece un modelo numérico basado en las recomendaciones reportadas en la literatura; y tercero, se analiza de forma comparativa el impacto de la configuración de álabes rectos frente a una configuración helicoidal. Para el modelo numérico se utiliza el método de volúmenes finitos y se discretizan dos dominios. Por un lado, una región cilíndrica que gira junto a la geometría móvil de la turbina; por otro lado, una región prismática rectangular estacionaria. Los mallados de estas regiones se construyen respectivamente de elementos tetrahédricos y prismáticos. Se utiliza el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ y la técnica de malla deslizante combinada con Seis Grados de Libertad para capturar el comportamiento transitorio del flujo. Se simulan velocidades de aire de 2 m/s hasta 5 m/s. Los resultados permiten cuantificar los coeficientes de potencia (C_p) y torque (C_t) para las geometrías de álabes rectos y helicoidales. Este trabajo contribuye una base técnica para el diseño de tecnologías de microgeneración adaptadas a condiciones climáticas locales de alta turbulencia y baja energía cinética.

Palabras clave— Aerogenerador Savonius, CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), Álabes Helicoidales, C_p (Coeficiente de Potencia), Microgeneración Urbana.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad global de transitar hacia sistemas energéticos sostenibles ha impulsado la investigación en tecnologías de generación renovable capaces de responder a los desafíos actuales: aumento de la demanda, variabilidad climática y reducción de emisiones contaminantes. La energía eólica, ha demostrado una capacidad probada para integrarse a sistemas eléctricos de mediana y gran escala debido a su madurez tecnológica, elevada disponibilidad y eficiencia en regiones con vientos moderados y constantes [1]-[2]. Sin embargo, esta tecnología no se ha expandido homogéneamente en entornos urbanos y periurbanos de países en desarrollo debido a restricciones económicas y operacionales asociadas principalmente a los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT, de sus siglas en inglés Horizontal Axis Wind Turbine),

los cuales requieren alturas de instalación considerables, sistemas de orientación y distancias mínimas entre turbinas que hace su implementación compleja y costosa [3]-[5]. En este contexto, se observa un creciente interés por los aerogeneradores de eje vertical (VAWT, de sus siglas en inglés Vertical Axis Wind Turbine), cuya flexibilidad de instalación, bajo nivel de ruido y adaptabilidad a flujos turbulentos los posiciona como una solución prometedora para la generación distribuida [6]-[8].

Entre las configuraciones VAWT, los aerogeneradores Savonius, basados en el principio de arrastre (que giran gracias a la fuerza del viento y recepción de su geometría concava), destacan por sus ventajas operacionales: excelente capacidad de arranque (*cut-in*) y buena integración arquitectónica en entornos urbanos [9]-[11]. De acuerdo con Alave-Vargas et al. [3], el aerogenerador Savonius supera a los modelos de sustentación (que requieran de una fuerza externa para comenzar a girar) y mixtos, como el aerogenerador Darrieus. El aerogenerador Savonius también presenta menor tamaño y bajo ruido; en contraste, presenta un coeficiente de potencia (C_p) más bajo para el caso de álabes rectos [3]. Múltiples investigaciones han centrado sus esfuerzos en modificar la geometría del aerogenerador Savonius para mejorar su comportamiento aerodinámico, computado mediante C_p , ver Tabla I.

TABLA I
MEJORAS REALIZADAS EN TURBINAS

ESTUDIO	CONTRIBUCIÓN
Saavedra y Alejos (2019) [5]	Modificación de la geometría en los álabes. De álabes rectos a helicoidal. Se obtiene un incremento de al menos 20% en el coeficiente de potencia C_p .
Hussain <i>et al.</i> (2021) [9]	Utilización de deflectores. Se aumenta el flujo que reduce el par negativo generado por las palas de retorno y aumenta el par positivo al desviar el viento ascendente hacia la pala de avance.
Zhu <i>et al.</i> (2025) [10]	Variación en las distancias radiales y los ángulos azimutales, tienen efectos significativos en la potencia de salida.
Singh y Dewan (2025) [23]	Modificación del perfil NACA a perfiles aerodinámicos más delgados mejora significativamente la eficiencia en un 12% con TSR altas.
Wenehenbun <i>et al.</i> (2015) [24]	Evaluación de la cantidad de palas, como resultado se obtiene que la turbina de 3 palas tiene un mejor rendimiento con una alta TSR.

Otras investigaciones centraron sus esfuerzos en mitigar las deficiencias aerodinámicas de la turbina Savonius mediante diversas estrategias de diseño. Los enfoques varían desde la alteración de la arquitectura básica del rotor (incluyendo el uso de álabes elípticos, cónicos o en forma de 'S') hasta la implementación de elementos externos como deflectores híbridos [13]-[14]. Mientras que algunos estudios priorizan la cantidad de álabes para estabilizar el torque, otros emplean algoritmos de optimización avanzados y técnicas de control de vórtices para maximizar el coeficiente de potencia (C_p) y reducir el impacto acústico [15]. Esta diversidad de aproximaciones geométricas subraya la sensibilidad del rendimiento de la turbina ante cambios morfológicos, justificando la necesidad de un análisis sistemático antes de su implementación física. Con relación al uso de modelo numéricos el estado del arte muestra una evolución significativa para analizar y optimizar turbinas Savonius. La Tabla II presenta las mejoras en los estudios de simulación numéricos en referencia.

TABLA II
ESTUDIOS EN TURBINAS SAVONIUS USANDO SIMULACION NUMÉRICA

ESTUDIO	CONTRIBUCIÓN
Hassan <i>et al.</i> (2019) [12]	Realiza diferentes simulaciones con distintos modelos de turbulencia, obteniendo como resultado que el modelo k- ϵ es mejor.
Kim y Cheong (2014) [13]	Usa la Aeroacústica Computacional Híbrida para reducir el ruido cambiando la geometría en forma de "S"
Maldonado <i>et al.</i> (2014) [14]	Incluye deflectores en la simulación permitiendo identificar ángulos específicos que aumentan la velocidad de entrada en un 62%, cuadruplicando la potencia captada.
Pawan y Kumar (2025) [15]	Desarrolla un modelo subrogado de Kriging que optimizó siete variables de diseño con un error de predicción de solo 0,95%.

Los estudios incluyen desde análisis del impacto del ángulo de fase entre turbinas en agrupaciones [10], [16], evaluaciones tridimensionales de flujos altamente transitorios mediante URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) [8], [17]-[19], hasta estudios de interacción fluido-estructura (FSI) orientados a mejorar la estabilidad dinámica y la transferencia de energía [7]. Se ha explorado la influencia de parámetros como el solapamiento de palas, altura, relación de aspecto, número de palas y espaciado interturbina en configuraciones múltiples, demostrando efectos de acoplamiento aerodinámico capaces de aumentar significativamente la potencia generada [10], [16], [17].

Pese a los avances tecnológicos registrados, persisten vacíos en la literatura técnica sobre el desempeño de turbinas de eje vertical en entornos de baja energía cinética [20]. La mayoría de las investigaciones se han enfocado en condiciones de flujo idealizadas, omitiendo la complejidad de escenarios en zonas urbanas con bajas velocidades de viento como la ciudad de Lima con morfología urbana heterogénea y vientos suaves entre 2 m/s y 5 m/s [21].

El uso de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite modelar fenómenos aerodinámicos complejos compensando la dificultad de acceso a túneles de viento de gran escala. Además, proporciona resolución espacial de los gradientes de velocidad y coeficientes de presión (C_p) necesaria para identificar las zonas de estancamiento que degradan la eficiencia de la turbina [7], [22]. La literatura técnica señala que el empleo de simulaciones *Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (URANS), en combinación con el modelo de turbulencia k- ϵ , es capaz de predecir con un error relativo menor del comportamiento del flujo desprendido y la formación de vórtices en el trasdós de los álabes [12], [17], [23]. La implementación de técnicas de malla deslizante (*Sliding Mesh*) resulta crítica en este contexto, ya que permite discretizar la interacción transitoria entre el dominio rotatorio y el estacionario, capturando las fluctuaciones de presión que definen el torque instantáneo [18], [19].

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el desempeño aerodinámico (C_p) de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) para condiciones urbanas de vientos suaves. Se establece un modelo tridimensional de un aerogenerador Savonius de álabes rectos. Seguidamente se modifica la geometría a álabes helicoidales. Se compara el comportamiento de ambos modelos para velocidades de viento de 2 m/s a 5 m/s.

II. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) constituye una disciplina fundamental para el análisis de sistemas aerodinámicos complejos. Se basa en la resolución de las

ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el movimiento de los fluidos, transformándolas en sistemas de ecuaciones algebraicas mediante métodos numéricos para su procesamiento computacional [25].

El comportamiento del flujo de aire alrededor de la turbina Savonius se rige por las leyes fundamentales de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Debido a la naturaleza intrínsecamente transitoria del rotor en movimiento y la formación de vórtices, se emplea el enfoque URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Este método permite resolver el campo de flujo promediando las fluctuaciones turbulentas mientras se mantiene la variación temporal de las variables medias, lo cual es esencial para evaluar la evolución del torque y la potencia

1. Conservación de la Masa (Continuidad): Para un fluido incompresible como el aire a bajas velocidades, la ecuación de continuidad se expresa de forma diferencial como [26]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

donde ρ , t y $\mathbf{u}$ representan la densidad, el tiempo y el vector velocidad del flujo, respectivamente.

2. Conservación de la Cantidad de Movimiento (*Momentum*): Este estudio utiliza la formulación de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds para flujo no estacionario URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), la cual se expresa de la siguiente forma [26]:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial (\tau_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho b_i, \quad (2)$$

Donde el término p , τ_{ij} , $x_j x_i$ y b_i representan la presión del fluido, el tensor de esfuerzos, las coordenadas espaciales y las fuerzas de cuerpo, respectivamente.

Para el estudio aerodinámico de la turbina mediante CFD, se emplea el enfoque de modelado URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) que permite capturar la naturaleza transitoria del flujo al mantener los términos de variación temporal en las ecuaciones de gobierno. Este enfoque descompone las variables del flujo en una componente media y una fluctuante, permitiendo resolver el comportamiento dinámico de los vórtices y la variación del torque en función del ángulo de giro, optimizando el costo computacional frente a modelos de mayor resolución [25]. Asimismo, para el modelado de la turbulencia en este entorno rotatorio, se utiliza el modelo k- ϵ . Este modelo es seleccionado por su robustez numérica y su probada capacidad para predecir el comportamiento del flujo en el campo lejano y asegurando la convergencia en simulaciones de carácter transitorio [12].

El dominio computacional se discretiza en pequeños volúmenes, conocido como mallado. Dos tipos de mallas ampliamente utilizadas son las tetraédricas y prismáticas. Para el estudio de aerogeneradores rotativos, se emplean siguiendo la estrategia,

1. Mallas Tetraédricas: Utilizadas principalmente en la región del rotor y zonas de geometría compleja. Su capacidad para adaptarse a superficies curvas permite capturar con fidelidad los gradientes de presión sobre los álabes Savonius [26].
2. Mallas Prismáticas: Implementadas en las zonas cercanas a las paredes (capa límite) y en el dominio estacionario. Estas estructuras permiten una mejor alineación con la dirección del flujo, reduciendo la difusión numérica y mejorando la captura de los esfuerzos cortantes [26].

Una parte integral de la simulación es el estudio de independencia de malla, que asegura que los resultados no dependan del tamaño de los elementos [27]. Una vez tenidos los elementos de la malla las ecuaciones de conservación de la física son discretizadas usando el Método de Volúmenes Finitos (FVM, de las siglas en inglés *Finite Volume Method*). Se trata del enfoque predominante en CFD debido a su naturaleza conservativa. El dominio se subdivide en volúmenes de control contiguos donde las ecuaciones se integran, asegurando que el flujo de una variable que sale de una cara sea idéntico al que entra en la celda adyacente [25]. Esta propiedad garantiza la conservación global de masa y momento, esencial para la estabilidad en flujos complejos [26].

El proceso de simulación se estructura en tres etapas técnicas secuenciales fundamentales para garantizar la fidelidad de los resultados [27].

1. Pre-procesamiento: Comprende la definición del dominio de control y la discretización espacial o generación de malla. En esta fase se seleccionan los modelos físicos y de turbulencia, y se establecen las condiciones de contorno. Es crítico asegurar una densidad de malla adecuada en zonas de altos gradientes para garantizar la captura precisa de los fenómenos físicos [27].
2. Procesamiento (Solución): Se lleva a cabo la resolución iterativa de las ecuaciones de transporte. La estabilidad y precisión de la solución dependen de la configuración de los esquemas de discretización y de los criterios de convergencia, monitoreados a través de los residuos de las variables escalares [26].
3. Post-procesamiento: Consiste en la extracción y análisis cuantitativo de los datos. Permite la visualización de contornos de presión, vectores de velocidad y la evaluación de parámetros de rendimiento como el torque y la potencia [27].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología se fundamenta en un flujo de trabajo de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE), integrando el diseño paramétrico y el análisis numérico [28]. El modelado geométrico tridimensional de la turbina se realiza mediante un entorno de diseño asistido (CAD), usando Autodesk Inventor Professional®, garantizando la geometría adecuada para la discretización espacial. Posteriormente, el dominio fluido se discretiza mediante la técnica de Volúmenes Finitos (FVM) empleando ANSYS Fluent®. Este enfoque permite transformar las ecuaciones diferenciales parciales de *Navier-Stokes* promediadas por Reynolds para flujo no estacionario URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) en un sistema de ecuaciones algebraicas, evaluando la conservación de masa y cantidad de movimiento en cada celda del dominio a lo largo del tiempo. El proceso computacional abarca desde el pre-procesamiento (generación de malla y definición de condiciones de contorno) hasta la resolución iterativa de los campos de presión y velocidad, permitiendo una caracterización detallada de la interacción entre el flujo y la geometría de la turbina Savonius.

El análisis requiere la definición de parámetros de entrada como dimensiones de la turbina, velocidad de flujo y variables de salida que permitan evaluar la eficiencia de la turbina Savonius [29]. En primer lugar, la dinámica rotacional se establece a partir de la velocidad de rotación del eje (n), expresada en RPM, la cual se transforma en velocidad angular (ω) mediante la relación:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

Para determinar el Tip Speed Ratio (TSR), el cual vincula la velocidad tangencial del rotor con la velocidad del viento incidente (V):

$$TSR = \lambda = \frac{V_{rotor}}{V} = \frac{\omega \cdot d}{V}, \quad (4)$$

donde (d) representa el diámetro del álabe individual. El TSR es el parámetro principal para establecer las condiciones de frontera de cuerpo rotatorio en las simulaciones. Por otro lado, la capacidad de extracción de energía se cuantifica comparando la potencia mecánica disponible en el eje (P_m), calculada como el producto del torque (T) y la velocidad angular:

$$P_m = T\omega. \quad (5)$$

La potencia total contenida en el flujo de aire (P_w) depende de la densidad del aire (ρ), el área proyectada del rotor (A) y el cubo de la velocidad del viento (V):

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3. \quad (6)$$

Finalmente, el desempeño global de la turbina se expresa a través del Coeficiente de Potencia (C_p), una unidad adimensional que representa la eficiencia de conversión energética:

$$C_p = \frac{P_m}{P_w}. \quad (7)$$

Complementariamente, para evaluar el comportamiento del rotor en condiciones de arranque, se calcula el Coeficiente de par estático (C_{ts}), el cual relaciona el torque generado con la presión dinámica del viento y las dimensiones geométricas del rotor (D), (H):

$$C_{ts} = \frac{4T}{\rho D^2 V^2 H}. \quad (8)$$

A. Configuración de Modelo de Álabes Rectos

Para la fase de validación, se selecciona como referencia el aerogenerador Savonius de dos álabes evaluado por Wenehenubun et al. [24]. La elección de este modelo permite establecer una línea base para asegurar la precisión de las simulaciones posteriores. El desarrollo de la geometría tridimensional se realiza como modelado sólido en Autodesk Inventor Professional®. La Fig. 1 muestra la geometría de la turbina. Se tiene un diámetro de rotor de 0,37 m con una relación D/H de 1.

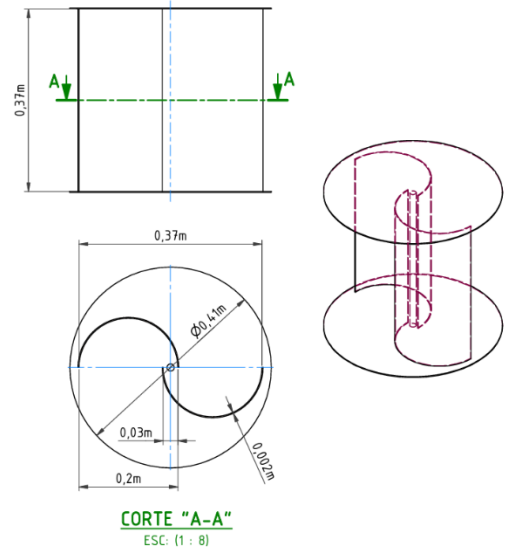


Fig. 1 Esquema de la Turbina tipo savonius. La geometría corresponde a establecida en Wenehenubun et al. [24].

La generación de la malla se realiza mediante el módulo ANSYS Meshing®, empleando una estrategia de discretización híbrida que combina diferentes tipos de formas geométricas (elementos) para balancear el costo computacional con la precisión de los resultados. El dominio divide una región estacionaria externa y una región rotatoria interna (zona del

rotor), utilizando las siguientes especificaciones técnicas, de acuerdo con recomendaciones de la literatura [12]:

- Topología de Elementos: Se aplica un método híbrido consistente en elementos prismáticos (*wedges*) en las cercanías de las superficies sólidas y elementos tetraédricos en el resto del dominio como se muestra en la Fig. 2, optimizando la ortogonalidad de la malla en zonas de alto gradiente.

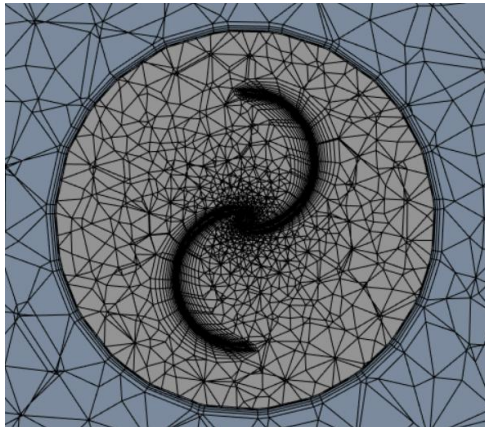


Fig. 2 Elementos tetraédricos y prismáticos en la región rotatoria.

- Tratamiento de Capa Límite (*Inflation*): Para capturar adecuadamente los efectos viscosos en la superficie exterior de los álabes, se configuran capas de inflado con una razón de crecimiento (*Growth Rate*) de 1,2 como se muestra en la Fig. 3. El espesor de la primera capa se calcula para garantizar un valor de $y^+ \approx 1$, asegurando la resolución de la subcapa viscosa bajo el modelo de turbulencia $k-\epsilon$.

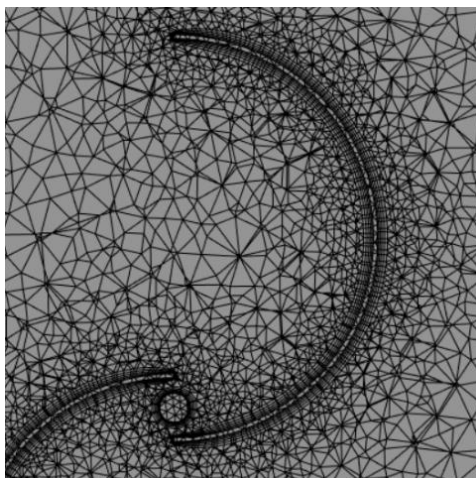


Fig. 3 Capas de inflación en la paredes de la turbina con un (*Growth Rate*) de 1,2.

- Refinamiento Local (*Sizing*): Se establece un tamaño de elemento controlado en la interfaz entre los álabes

y el fluido, así como en las estelas de desprendimiento de vórtices, para minimizar el error de truncamiento numérico.

- Control de Interfaz: Se emplea un refinamiento específico en la interfaz de malla deslizante (*Sliding Mesh*) para garantizar la continuidad del flujo y la transferencia de flujos de masa y momento entre la zona rotatoria y la estacionaria.

La simulación numérica se configura para resolver el flujo transitorio mediante un enfoque URANS, seleccionando parámetros que aseguren la estabilidad numérica y la captura de fenómenos de desprendimiento de vórtices [12], [29].

- Modelo de Turbulencia ($k-\epsilon$): Se selecciona el modelo de energía cinética de turbulencia (k) y tasa de disipación (ϵ) para el análisis de la turbina. Esta elección se fundamenta en el estudio de Hassan et al. [12], quien demuestra que este modelo ofrece una precisión superior y una mejor correlación de datos en comparación con otros modelos de turbulencia para este tipo de aplicaciones.
- Condiciones de Entrada (*Inlet*): Se establece una velocidad de flujo de 2 m/s como se muestra en la Fig. 4, correspondiente al límite inferior de los vientos medidos en la ciudad de Lima, permitiendo evaluar el desempeño de la turbina en condiciones de baja carga aerodinámica. Posterior a cada simulación se cambia la velocidad de entrada a 2,5 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 4,5 m/s y 5 m/s.

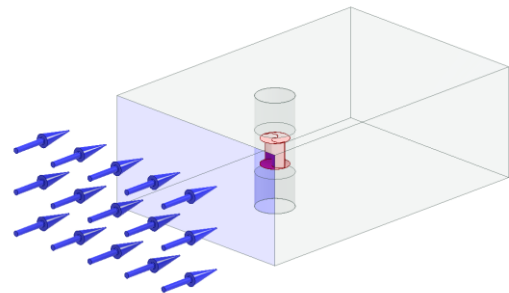


Fig. 4 Velocidad de Inlet 2 m/s

- Algoritmo de Acoplamiento Presión-Velocidad: Se emplea el esquema SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), seleccionado por su robustez y probada eficacia en el acoplamiento de las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad [30]. Este algoritmo permite obtener una solución convergente mediante un proceso iterativo de corrección de presión, siendo particularmente adecuado para configuraciones de malla complejas donde la estabilidad del cálculo es prioritaria.

- Dinámica del Rotor (6DOF): Para predecir de manera realista la velocidad de rotación del eje (n) y la consecuente velocidad angular (ω), se implementa el modelo de Seis Grados de Libertad (6DOF). Este método permite que el rotor gire en respuesta directa a las fuerzas aerodinámicas calculadas, facilitando la obtención del TSR (λ) real del sistema
- Discretización Temporal (*Transient Setup*): Para garantizar la independencia del tiempo y la estabilidad del cálculo, se define 400 pasos de tiempo (*Time Steps*) con un tamaño de paso de 0,2 s cada uno. Esta configuración permite una resolución temporal refinada, necesaria para que el modelo de Seis Grados de Libertad (6DOF) prediga con precisión la evolución de la velocidad angular (ω) y las fluctuaciones del torque mecánico (T) a lo largo de múltiples revoluciones del rotor.
- Criterios de Convergencia: Se establece 20 iteraciones máximas por paso de tiempo. Este valor, en conjunto con el esquema de acoplamiento SIMPLE, proporciona una convergencia robusta, controlada y la estabilización de los residuos de conservación de masa y cantidad de movimiento antes de avanzar al siguiente intervalo temporal.

B. Configuración de Modelo de Álabes Helicoidales

Se optimiza la turbina torciendo los álabes de manera helicoidal [5], [15], [31]. La Fig. 5 presenta la geometría de la turbina optimizada, manteniendo las dimensiones críticas del rotor, como el diámetro y la relación D/H .

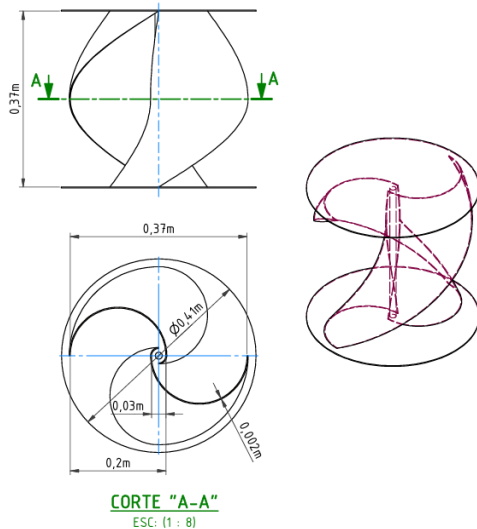


Fig. 5 Esquema de la Turbina tipo savonius con los álabes modificados, torciéndolos de forma helicoidal.

La evaluación del desempeño de la turbina con álabes modificados se realiza manteniendo la discretización del dominio para garantizar la validez comparativa y el aislamiento de variables. Este enfoque permite cuantificar con precisión el impacto de la torsión geométrica sobre la estabilidad del torque y el incremento del coeficiente de potencia (C_p).

IV. RESULTADOS

Se evalúa el comportamiento dinámico del torque mecánico mediante la extracción de datos transitorios del software ANSYS Fluent®. En las gráficas de momento (eje Y) a través del tiempo (eje X), se observa la naturaleza oscilatoria característica de los aerogeneradores Savonius como la Fig. 6, producto de la variación del ángulo de ataque de los álabes respecto al flujo incidente.

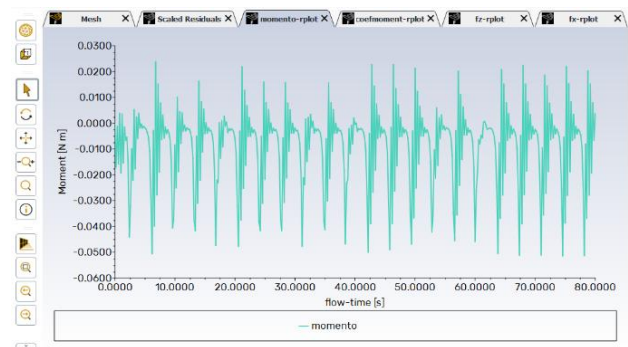


Fig. 6 Gráfico de Momento transitorio extraído de Ansys Fluent® para álabes rectos con velocidad de viento de 3 m/s.

La implementación del modelo de Seis Grados de Libertad (6DOF) resulta fundamental en este estudio, ya que permite una simulación dinámica donde el rotor gira en respuesta directa a las fuerzas aerodinámicas e inerciales calculadas en cada paso de tiempo. Esta metodología facilita la contabilización precisa de las revoluciones por minuto (RPM) reales que el sistema alcanza bajo carga y permitiendo observar el proceso de aceleración del rotor desde el reposo. En la Fig. 7 se presenta el mapa de calor de los contornos de velocidad obtenido en el tiempo transcurrido de 0,2 s. En este instante inicial de la rotación, se pueden identificar espacialmente los gradientes de velocidad y la formación de vórtices en los extremos de los álabes, así como las zonas de estancamiento de flujo que definen la eficiencia de la turbina. La visualización de este mapa de contornos permite validar cómo la transferencia de momento del fluido hacia el álabé impulsor se traduce en el movimiento rotacional.

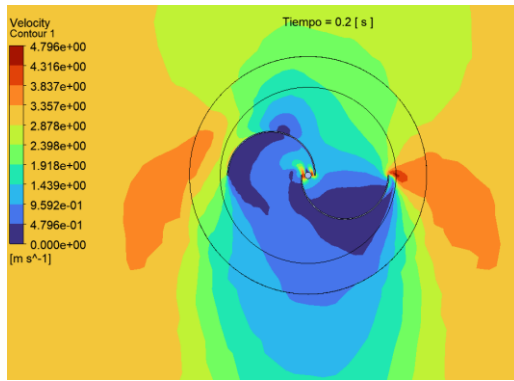


Fig. 7 Mapa de calor de velocidad transitoria en el tiempo 0,2 s extraído de Ansys Fluent® para álabes rectos con velocidad de viento de 3 m/s.

La evaluación del desempeño aerodinámico se basa en un estudio comparativo entre el modelo de referencia de álabes rectos según Wenehenubun et al. [24], y el diseño propuesto de álabes helicoidales. Se analizó el comportamiento de ambas geometrías bajo 6 condiciones de velocidad de viento: 2 m/s, 2,5 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 4,5 m/s y 5 m/s manteniendo todos los parámetros. Los resultados de esta comparativa están detallados en la Tabla III, Tabla IV y Tabla V.

TABLA III

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS DE SIMULACION NUMÉRICA PARA ÁLABES RECTOS Y ÁLABES HELICOIDALES CON INLET DE 2 M/S Y 2,5 M/S

PARÁMETRO	RECTO	HELI COIDAL	RECTO	HELI COIDAL
(V) Velocidad de viento (m/s)	2	2	2,5	2,5
(T) Torque mecánico (Nm)	0,0035	0,0107	0,0061	0,0156
(n) Velocidad de rotación de eje (RPM)	3,5	10,5	6	15
(ω) Velocidad angular de rotor (rad/s)	0,367	1,100	0,628	1,571
(V_{rotor}) Velocidad de rotor (m/s)	0,073	0,220	0,126	0,314
(P_w) Potencia del viento (W)	0,671	0,671	1,310	1,310
(P_m) Potencia mecánica (W)	0,001	0,012	0,004	0,024
(TSR) Tip speed ratio o relación de velocidad de punta	0,037	0,110	0,050	0,126
(C_p) Coeficiente de potencia	0,002	0,018	0,003	0,019
(C_{ts}) Coeficiente de par estático	0,057	0,173	0,063	0,160

TABLA IV

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS DE SIMULACION NUMÉRICA PARA ÁLABES RECTOS Y ÁLABES HELICOIDALES CON INLET DE 3 M/S Y 4 M/S

PARÁMETRO	RECTO	HELI COIDAL	RECTO	HELI COIDAL
(V) Velocidad de viento (m/s)	3	3	4	4
(T) Torque mecánico (Nm)	0,0122	0,0212	0,0277	0,0315
(n) Velocidad de rotación de eje (RPM)	8,5	20	14	30
(ω) Velocidad angular de rotor (rad/s)	0,890	2,094	1,466	3,142
(V_{rotor}) Velocidad de rotor (m/s)	0,178	0,419	0,293	0,628
(P_w) Potencia del viento (W)	2,264	2,264	5,366	5,366
(P_m) Potencia mecánica (W)	0,011	0,044	0,041	0,099
(TSR) Tip speed ratio o relación de velocidad de punta	0,059	0,140	0,073	0,157
(C_p) Coeficiente de potencia	0,005	0,020	0,008	0,018
(C_{ts}) Coeficiente de par estático	0,087	0,152	0,112	0,127

TABLA V

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS DE SIMULACION NUMÉRICA PARA ÁLABES RECTOS Y ÁLABES HELICOIDALES CON INLET DE 4,5 M/S Y 5 M/S

PARÁMETRO	RECTO	HELI COIDAL	RECTO	HELI COIDAL
(V) Velocidad de viento (m/s)	4,5	4,5	5	5
(T) Torque mecánico (Nm)	0,0431	0,0359	0,0783	0,039
(n) Velocidad de rotación de eje (RPM)	15	34	16	37
(ω) Velocidad angular de rotor (rad/s)	1,571	3,560	1,676	3,875
(V_{rotor}) Velocidad de rotor (m/s)	0,314	0,712	0,335	0,775
(P_w) Potencia del viento (W)	7,641	7,641	10,481	10,481
(P_m) Potencia mecánica (W)	0,068	0,128	0,131	0,151
(TSR) Tip speed ratio o relación de velocidad de punta	0,070	0,158	0,067	0,155
(C_p) Coeficiente de potencia	0,009	0,017	0,013	0,014
(C_{ts}) Coeficiente de par estático	0,137	0,114	0,202	0,101

En la Fig. 8 se presenta una comparativa del coeficiente de par estático (C_{ts}) entre la configuración de álabes helicoidales y álabes rectos para un rango de velocidades de viento de 2 m/s a 5 m/s. Se trazó una línea de referencia a 45° para delimitar el desempeño relativo de ambas geometrías. Los resultados

muestran que los puntos correspondientes a velocidades bajas se sitúan por encima de la línea de identidad, lo que indica un torque superior en la configuración helicoidal en estas condiciones. Este comportamiento confirma que el diseño helicoidal posee una mayor capacidad de arranque y respuesta en ambientes urbanos, donde predominan velocidades de viento bajas y flujos turbulentos.

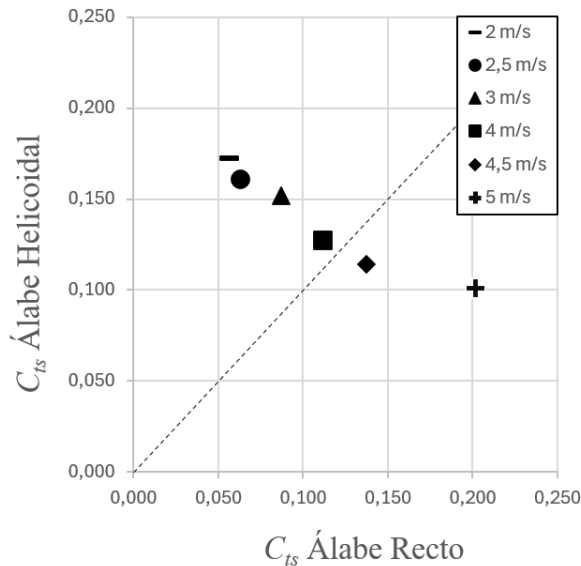


Fig. 8 Gráfico C_{ts} de Álabes Rectos y C_{ts} de Álabes Helicoidales.

La Fig. 9 muestra la evolución del coeficiente de potencia (C_p) en función de la velocidad del viento para ambos tipos de rotor. Se observa que el rotor de álabes rectos presenta un incremento monótono del C_p conforme aumenta la velocidad del viento, sugiriendo un mejor desempeño en regímenes de viento alto. Por el contrario, los álabes helicoidales muestran una tendencia cóncava, alcanzando su eficiencia máxima a una velocidad de 3 m/s. Al alcanzar los 5 m/s, los coeficientes de potencia de ambas configuraciones convergen en valores similares. Esto sugiere que, si bien la configuración de álabes helicoidales es óptima para velocidades bajas y medias, la configuración de álabes rectos recupera ventaja competitiva en regímenes de viento superiores.

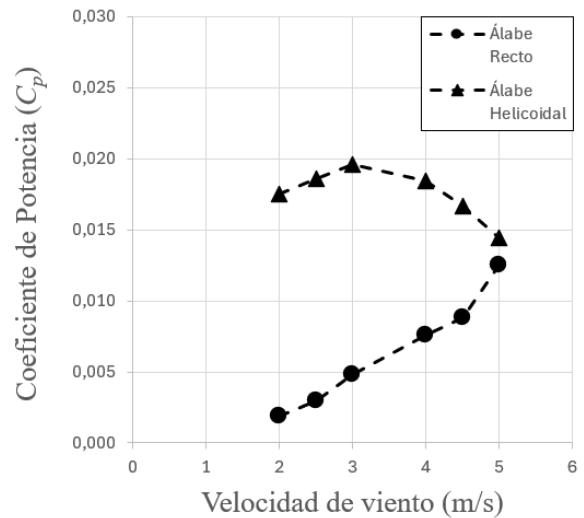


Fig. 9 Gráfico de Velocidad de Viento y C_p de Álabes Rectos y Álabes Helicoidales.

V. CONCLUSIONES

- Se determinó que la geometría de álabes helicoidales presenta un coeficiente de par estático superior en el rango de velocidades bajas (2 m/s a 3 m/s), lo que garantiza un mejor par de arranque en condiciones de viento poco constantes, típicas de entornos urbanos como la ciudad de Lima.
- Se estableció que el rotor helicoidal alcanza su punto de eficiencia máxima a los 3 m/s, mostrando un comportamiento cóncavo en su coeficiente de potencia (C_p) que lo posiciona como la opción más viable para micro-generación eólica en regímenes de baja velocidad.
- Se concluyó que, si bien el desempeño de ambos rotores tiende a ser semejantes a los 5 m/s, la configuración helicoidal es técnica y aerodinámicamente superior para las velocidades de diseño bajas, mientras que la ventaja de la configuración recta se manifiesta principalmente en regímenes de viento alto.
- Se constató mediante el análisis de los coeficientes de par que, a medida que aumenta la velocidad del viento, la diferencia en la eficiencia de captación entre ambas geometrías se reduce progresivamente. Esto indica que la ventaja aerodinámica de la torsión helicoidal es inversamente proporcional a la velocidad del viento dentro del rango estudiado, reafirmando su especialización para regímenes de viento bajo y moderado.

En conclusión, el diseño helicoidal optimiza el rendimiento de la turbina Savonius para las condiciones de viento de Lima, proporcionando no solo un mayor coeficiente de potencia, sino también un comportamiento dinámico más estable y un mejor arranque en comparación con el diseño convencional de álabes rectos.

REFERENCIAS

- [1] A. Rosato, A. Perrotta, and L. Maffei, "Commercial Small-Scale Horizontal and Vertical Wind Turbines: A Comprehensive Review of Geometry, Materials, Costs and Performance," *Energies* 2024, Vol. 17, Page 3125, vol. 17, no. 13, p. 3125, Jun. 2024, doi: 10.3390/EN17133125.
- [2] I.-M. Popescu, V.-S. Popescu, A.-G. Vasilescu, V. Constantin, and M. Avram, "STATE OF THE ART OF CONVENTIONAL WIND TURBINES DEVELOPMENT," *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, vol. 2025, 2025, doi: 10.17683/ijomam/issue19.
- [3] E. M. Alave-Vargas, R. O. Lafuente, and D. F. Sempértegui-Tapia, "ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL (Monografía)," *Revista Investigación & Desarrollo*, vol. 22, no. 1, pp. 161–172, Jul. 2022, doi: 10.23881/IDUPBO.022.1-131.
- [4] A. A. Al-Maaitah, "The design of the Banki wind turbine and its testing in real wind conditions," *Renew Energy*, vol. 3, no. 6–7, pp. 781–786, Sep. 1993, doi: 10.1016/0960-1481(93)90085-U.
- [5] A. Saavedra Chimal and R. A. Palomares, "Diseño de la geometría de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius," *MEMORIAS DEL XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, 2019.
- [6] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, and Z. Hussain, "Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 1926–1939, May 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2011.12.004.
- [7] K. Liu, M. Yu, and W. Zhu, "Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: A fluid-structure interaction study," *Renew Energy*, vol. 140, pp. 912–927, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.03.120.
- [8] M. H. Abdel-razak, M. Emam, S. Ookawara, and H. Hassan, "Study the performance of a novel design of twin hybrid Darrieus-Savonius vertical-axis wind turbines integrated with building water storage tanks: 3D optimization study," *Renew Energy*, vol. 256, p. 124024, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.RENENE.2025.124024.
- [9] A. H. Rajpar, I. Ali, A. E. Eladwi, and M. B. A. Bashir, "Recent development in the design of wind deflectors for vertical axis wind turbine: A review," *Energies* (Basel), vol. 14, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/EN14165140.
- [10] J. Zhu, G. Qian, P. Zhang, J. Zhu, and X. Sun, "Aerodynamic synergy through cooperative vortex control in Savonius turbine clusters," *Energy*, vol. 339, p. 139090, Dec. 2025, doi: 10.1016/J.ENERGY.2025.139090.
- [11] I. Siregar, S. D. Nugroho, C. Z. Pratiwi, I. Mawardi, A. Jibril, and S. Suhadi, "Experimental study the performance of a 6-bladed Savonius vertical axis wind turbine using polyvinyl chloride material," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 6, pp. 3821–3832, Dec. 2024, doi: 10.11591/EEL.V13I6.7550.
- [12] H. A. Hassan Saeed, A. M. Nagib Elmekawy y S. Z. Kassab, "Numerical study of improving Savonius turbine power coefficient by various blade shapes," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 58, pp. 429–441, abr. 2019, doi: 10.1016/j.aej.2019.03.005.
- [13] S. Kim y C. Cheong, "Numerical Analysis on the Low Noise Designs of Savonius Wind Turbines by Inducing Phase Difference in Vortex Shedding," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 38, n.º 3, pp. 269–274, mar. 2014, doi: 10.3795/KSME-A.2014.38.3.269.
- [14] R. D. Maldonado *et al.*, "Design, simulation and construction of a Savonius wind rotor for subsidized houses in Mexico," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 691–697, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.225.
- [15] P. Pawan Kumar and R. K. Singh, "CFD-based optimization of a modified Savonius rotor with hybrid upstream deflector using Kriging surrogates and FA–GWO algorithm," *Ocean Engineering*, vol. 342, p. 123016, Dec. 2025, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2025.123016.
- [16] J. Jiang *et al.*, "Performance optimization of modified Bach Savonius wind turbine clusters based on Taguchi method," *Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 121–136, Nov. 2025, doi: 10.1093/CE/ZKAF039.
- [17] A. U. Malge, S. S. Tomar, and A. Dewan, "Effect of inter turbine spacing in omnidirectional wind for Savonius cluster: a computational fluid dynamics and artificial neural network approach," *Clean Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 94–114, May 2025, doi: 10.1093/CE/ZKAE126.
- [18] W. Tian, B. Song, and Z. Mao, "Numerical investigation of wind turbines and turbine arrays on highways," *Renew Energy*, vol. 147, pp. 384–398, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.08.123.
- [19] R. W. Mahendra *et al.*, "Simulation Study of the Effect of Wind Speed and Material Type on the Mechanical Properties of Vertical Axis Wind Turbine Blades," *CFD Letters*, vol. 15, no. 12, pp. 44–59, Oct. 2023, doi: 10.37934/CFDL.15.12.4459.
- [20] R. García, A. Fernandez, A. Martinez, and M. Tamez, "DISEÑO DE HÉLICES DE AEROGENERADOR DE BAJAS VELOCIDADES DE VIENTO," *MISCELÁNEA CIENTÍFICA EN MÉXICO*, 2020, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <http://www.nl.gob.mx/servicios/mapa-de-la-calidad-del-aire>.
- [21] Ministerio de Energía y Minas (MINEM), "Atlas Eólico del Perú 2016," Dirección General de Eficiencia Energética, Lima, Perú, Inf. Téc., 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4770134-atlas-eolico-2016>
- [22] R.-G. Andrade, A.-M. Rtn Ez Reyes, A.-F. Ramírez, C.-H. Santos, and C. Daniel-Márquez García, "Simulación de Hélices de aerogenerador eólico para su optimización con software CAD," *Revista Aristas*, vol. 11, no. 19, pp. 339–344, May 2024, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: http://revistaaristas.tij.uabc.mx/index.php/revista_aristas/article/view/390
- [23] S. S. Tomar and A. Dewan, "Enhancing efficiency of hybrid vertical axis turbine: Effect of various internal and external blades, collapsed rotor and reduced internal rotor velocity," *Renew Energy*, vol. 255, p. 123791, Dec. 2025, doi: 10.1016/J.RENENE.2025.123791.
- [24] F. Wenehenubun, A. Saputra y H. Sutanto, "An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades," *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 297–304, 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.259
- [25] H. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Pearson Education, 2007.
- [26] J. H. Ferziger, M. Perić, and R. L. Street, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 4th ed. Springer Nature, 2020.
- [27] K. A. H. Al-Gburi, B. A. J. Al-quraishi, F. B. I. Alnaimi, E. S. Tan, and A. H. S. Al-Safi, "Experimental and Simulation Investigation of Performance of Scaled Model for a Rotor of a Savonius Wind Turbine," *Energies*, vol. 15, no. 23, p. 8808, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15238808.
- [28] Y. Zhou, L. Yang, M. Guo, C. Kang, and H. B. Kim, "Effect of tip speed ratio on dynamic structural characteristics of Savonius hydrokinetic rotor," *Ocean Engineering*, vol. 343, p. 123189, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2025.123189.
- [29] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba y M. H. Nasef, "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 51, no. 1, pp. 19–25, mar. 2012. doi: 10.1016/j.aej.2012.07.003
- [30] J. Blanco, J. de Dios Rodríguez, A. Couce, and M. I. Lamas, "Proposal of a Nature-Inspired Shape for a Vertical Axis Wind Turbine and Comparison of Its Performance with a Semicircular Blade Profile," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 13, p. 6198, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11136198
- [31] U. K. Saha and M. J. Rajkumar, "On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 11, pp. 1776–1788, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.08.030