

DISEÑO Y ANÁLISIS AERODINÁMICO DE LA TURBINA HÍBRIDA SAVONIUS-DARRIEUS MEDIANTE MODELADO CFD

SAVONIUS-DARRIEUS AERODYNAMIC DESIGN AND ANALYSIS OF HYBRID TURBINE USING CFD MODELING

Anton-Guzman Tabata E.¹, Román-Doval Ramón², Torres-Jimenez Donaldo³,
Montejo-Alvaro Fernando⁴, Gomez-Sanchez Alejandro⁵

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i2.401>

¹Tecnológico Nacional de México /Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, tabata@itvalletla.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0001-1949-5619>

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, romand@cinvestav.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2495-1719>

³Tecnológico Nacional de México /Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, donaldo.tj@itvalletla.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0002-7500-6346>

⁴Tecnológico Nacional de México /Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, fernando.ma@itvalletla.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9381-7025>

⁵Tecnológico Nacional de México /Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, alejandro.gs@itvalletla.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-9047-4805>

Resumen – La transición a fuentes de energía renovables es crucial para abordar los desafíos climáticos globales, y la energía eólica emerge como una solución viable y rentable. Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) ofrecen ventajas sobre las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) tradicionales, particularmente en su capacidad para aprovechar el viento desde múltiples direcciones y operar eficientemente a alturas más bajas. Este estudio se centra en el diseño y análisis aerodinámico de una turbina eólica híbrida Savonius-Darrieus, que combina la capacidad de arranque automático del rotor Savonius con el rendimiento aerodinámico de alta eficiencia del rotor Darrieus. Se utilizaron simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) realizadas en ANSYS Fluent para analizar el rendimiento aerodinámico de varias modificaciones de diseño en condiciones estacionarias. Se aplicaron tres modificaciones al rotor Savonius para optimizar su eficiencia operativa, incluyendo la extensión de los extremos de las palas, alteraciones en la separación de las palas y la introducción del giro de las palas. Los resultados indican un aumento del 12,6% en el par y un aumento del 11,74% en el C_p para los modelos modificados en comparación con la configuración original, especialmente a bajas velocidades de viento (1-10 m/s). Para la turbina Darrieus, la selección y optimización del perfil aerodinámico se realizó utilizando QBLADE, centrándose en varios perfiles aerodinámicos del Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica (NACA), el ancho de la cuerda de la pala y la relación de velocidad de punta (TSR). El perfil NACA 4412 seleccionado demostró características superiores de relación sustentación-resistencia, lo que lo hace ideal para la integración en el sistema híbrido. Los resultados de la simulación proporcionan información sobre las

distribuciones de velocidad, los contornos de presión y las formaciones de estela, destacando áreas para una mayor optimización. El diseño de la turbina híbrida es prometedor para mejorar la eficiencia de la captura de energía al tiempo que aborda las limitaciones de autoarranque de los rotores Darrieus convencionales. Este estudio concluye que la turbina híbrida Savonius-Darrieus ofrece un enfoque equilibrado para la generación de energía eólica, aprovechando las fortalezas complementarias de ambos tipos de rotor.

Palabras Clave-- Savonius-Darrieus, Dinámica de fluidos computacional, Rendimiento aerodinámico, Energía renovable.

Abstract -- The transition to renewable energy sources is crucial to addressing global climate challenges, with wind energy emerging as a viable and cost-effective solution. Vertical-axis wind turbines (VAWTs) offer advantages over traditional horizontal-axis wind turbines (HAWTs), particularly in their ability to harness wind from multiple directions and operate efficiently at lower heights. This study focuses on the design and aerodynamic analysis of a hybrid Savonius-Darrieus wind turbine, combining the self-starting capability of the Savonius rotor with the high-efficiency aerodynamic performance of the Darrieus rotor. It used computational Fluid Dynamics (CFD) simulations conducted in ANSYS Fluent to analyze the aerodynamic performance of various design modifications at stationary conditions. Three modifications were applied to the Savonius rotor to optimize its operational efficiency, including the extension of blade ends, alterations in blade separation, and the introduction of blade twist. Results indicate a 12.6% increase in torque and C_p increase at 11.74 % for

the modified models compared to the original configuration, particularly at low wind speeds (1-10 m/s). For the Darrieus turbine, aerodynamic profile selection and optimization were performed using QBLADE, focusing on various National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) airfoils, blade chord width, and tip speed ratio (TSR). The selected NACA 4412 profile demonstrated superior lift-to-drag ratio characteristics, making it ideal for integration into the hybrid system. Simulation results provide insights into velocity distributions, pressure contours, and wake formations, highlighting areas for further optimization. The hybrid turbine design shows promise in improving energy capture efficiency while addressing the self-starting limitations of conventional Darrieus rotors. This study concludes that the hybrid Savonius-Darrieus turbine offers a balanced approach to wind energy generation, leveraging the complementary strengths of both rotor types.

Key words-- Savonius-Darrieus, Computational Fluid Dynamics, Aerodynamic Performance, Renewable Energy.

INTRODUCCIÓN

La transición a fuentes de energía limpia se ha convertido en una prioridad mundial a medida que los impactos del cambio climático se hacen cada vez más evidentes. Entre las diversas tecnologías de energía renovable, la energía eólica destaca como una solución líder debido a su capacidad para generar electricidad sin emitir gases de efecto invernadero [1-4]. Además, la energía eólica suele ser más rentable que otras fuentes de energía renovables, como la energía solar.

Los sistemas de energía eólica convierten la energía cinética del viento en electricidad mediante turbinas. Las turbinas eólicas se clasifican en dos tipos, según su eje de rotación: turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) y turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) [5-7]. Las HAWT son el tipo de turbina eólica más utilizado. Estos sistemas cuentan con palas que giran alrededor de un eje horizontal y se montan en torres altas para alcanzar velocidades de viento más altas. Este diseño facilita la captura eficiente de energía y ha sido objeto de una extensa investigación y desarrollo. Sin embargo, a pesar de su alta eficiencia, las HAWT presentan ciertas limitaciones, como la necesidad de una orientación activa hacia el viento y mayores requisitos de mantenimiento debido a sus complejos sistemas mecánicos [6, 7]. En cambio, las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT), cuyas palas giran sobre un eje vertical, ofrecen ventajas distintivas. Estas turbinas pueden captar el viento desde cualquier dirección, eliminando la necesidad de mecanismos de orientación que requieren las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) [8]. Además, las

VAWT pueden instalarse más cerca del suelo, lo que reduce el coste y la complejidad de las estructuras de soporte. Entre los diversos diseños de VAWT, los rotores Savonius y Darrieus destacan por sus ventajas únicas en diferentes condiciones de viento.

El rotor Savonius es especialmente valorado por su simplicidad y eficacia en entornos de baja velocidad del viento, donde su diseño permite una captación eficiente del viento y un fácil mantenimiento [9]. Esto lo hace especialmente adecuado para aplicaciones en zonas con velocidades de viento variables o bajas. Por otro lado, el rotor Darrieus, caracterizado por su diseño aerodinámico, presenta un rendimiento superior a velocidades de viento medias, ofreciendo mayor eficiencia y potencia [10]. Estos dos tipos de rotor ejemplifican la versatilidad y adaptabilidad de las VAWT, adaptándose a una amplia gama de requisitos operativos y condiciones ambientales. Durante la última década, se han logrado avances sustanciales en la optimización de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT), con especial atención a los rotores Savonius y Darrieus. Los rotores Savonius, que funcionan con base en fuerzas de arrastre, han experimentado mejoras de diseño, como la optimización de las formas de las palas y las relaciones de solapamiento, para optimizar su rendimiento en entornos de viento bajo [11-13]. Estos avances, validados mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y estudios experimentales, han demostrado mejoras significativas en el rendimiento [14-17]. Por el contrario, los rotores Darrieus, que dependen de las fuerzas de sustentación, se han optimizado mediante la implementación de palas curvas y diseños avanzados de perfil aerodinámico. Estas mejoras han resultado en una mayor eficiencia de captura de energía. Sin embargo, los rotores Darrieus aún enfrentan desafíos, como una capacidad de arranque automático deficiente y mayores costos de fabricación.

Cada tipo de rotor presenta ventajas y limitaciones específicas. Los rotores Savonius son simples, rentables y eficaces en condiciones de viento bajo; sin embargo, son menos eficientes debido a su diseño basado en el arrastre [14,15]. Por el contrario, los rotores Darrieus son más eficientes a velocidades de viento más altas, pero enfrentan desafíos como una capacidad de autoarranque deficiente y una mayor complejidad de diseño [14,17]. En este contexto, los sistemas híbridos que combinan ambos tipos de rotores se han convertido en una solución óptima, aprovechando las ventajas del autoarranque de los rotores Savonius y la eficiencia de los rotores Darrieus. Estudios de Pallotta et al. (2019) [18] y Chagini et al. (2023) [19] destacan el rendimiento y el rango operativo mejorados de estas configuraciones híbridas, lo que las convierte en una opción versátil para sistemas de energía renovable. En resumen, los sistemas híbridos Savonius-Darrieus

representan un enfoque prometedor para aprovechar las ventajas complementarias de ambos diseños, abordando las limitaciones de los rotores individuales y proporcionando una solución más amplia y eficiente para la generación de energía eólica.

El presente estudio busca maximizar el par generado a velocidades de viento bajas a medias (6 m/s) mediante análisis estacionario. El perfil del rotor Savonius se diseñará con diversas modificaciones en el perfil de ataque del viento, mientras que el perfil del rotor Darrieus incorporará un perfil aerodinámico NACA seleccionado, adaptado a las condiciones de operación del sistema híbrido bajo diferentes números de Reynolds. El objetivo es mejorar el rendimiento operativo, en particular el par, mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con Fluent ANSYS para el rendimiento de la turbina Savonius y Qblade para la turbina Darrieus.

DESARROLLO

Selección de la geometría de las palas

Las turbinas Savonius son relativamente sencillas de fabricar y ofrecen ventajas significativas, como la capacidad de operar en entornos con velocidades de viento bajas, un alto par de arranque, aceptación omnidireccional del viento, bajos niveles de ruido y menor desgaste de sus componentes móviles [20]. Estas características las convierten en una opción adecuada para aplicaciones en condiciones de viento reducido. No obstante, presentan limitaciones en su eficiencia general y pueden enfrentar dificultades durante el arranque [21]. En este trabajo se considera un diseño de turbina híbrida Savonius-Darrieus, ampliamente documentado en la literatura, que incorpora un rotor Savonius de dos cangilones montado concéntricamente dentro de una turbina Darrieus de tres palas como se observa en la Figura 1. No obstante, el enfoque de este estudio se centra inicialmente en el diseño y análisis individual de ambos tipos de rotores, con énfasis particular en el desempeño durante el arranque bajo condiciones de viento bajo a medio.



Figura 1. Una turbina típica de Savonius-Darrieus.

El diseño se fundamenta en parámetros geométricos y operativos extraídos de estudios previos, tales como la relación diámetro-altura, la separación entre palas y el uso de perfiles curvos o torcidos. El objetivo es optimizar tanto el rendimiento operativo continuo como el comportamiento durante el arranque en simulaciones estacionarias. Para ello, se desarrollaron y analizaron múltiples configuraciones geométricas mediante simulaciones numéricas, con la intención de integrar finalmente un rotor Savonius optimizado dentro de una configuración Darrieus, conformando una turbina híbrida eficiente.

El modelo inicial se evaluó utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar parámetros como la distribución de presión y la energía cinética de la turbulencia. Los resultados permitieron identificar zonas de alta presión y regiones de estancamiento que afectaban negativamente el desempeño aerodinámico de la turbina. Esto condujo a una serie de ajustes geométricos orientados a optimizar su funcionamiento. En la Figura 2a, los contornos de presión revelan áreas con potencial de mejora mediante la modificación del perfil del álabe y su orientación, incrementando así el par de arranque. Por su parte, la Figura 2b muestra una región de separación interna donde se incrementa la energía cinética de la turbulencia, fenómeno que reduce la eficiencia general del sistema. Este comportamiento sugiere oportunidades de rediseño estructural para minimizar pérdidas energéticas.

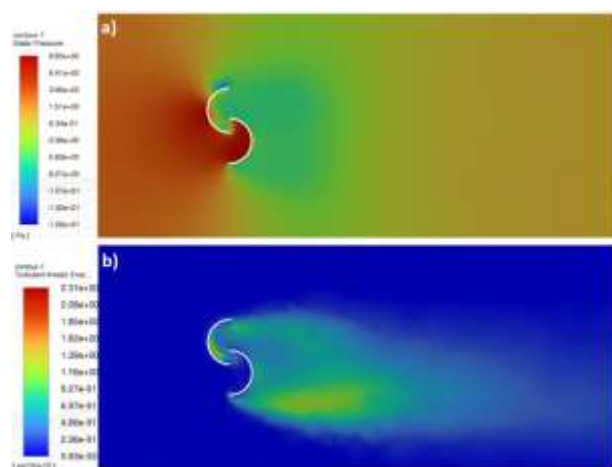


Figura 2. Modelo de simulación de turbina mediante dinámica de fluidos computacional, a 3 m/s a) distribución de presión de los álabes y b) distribución de energía cinética de turbulencia de los álabes.

El modelo original se simuló mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar la presión y la energía cinética de la turbulencia. Los resultados identificaron regiones de alta presión y zonas de estancamiento que podrían afectar negativamente el rendimiento de la turbina, lo que obligó a realizar modificaciones de diseño posteriores. En la Figura 2a, los contornos de presión revelan áreas donde se puede aprovechar una mayor superficie de contacto modificando el perfil del álabes y su rotación para aumentar el par en el álabes delantero. Por el contrario, en la región de separación interna que se muestra en la Figura 2b, se observa un aumento de la energía cinética de la turbulencia, lo que reduce la eficiencia. Esto representa una oportunidad para proponer diseños alternativos que aborden estas ineficiencias.

El diseño geométrico de los modelos se llevó a cabo utilizando el software SolidWorks, donde se propusieron tres configuraciones distintas de turbinas Savonius. Estas variantes fueron evaluadas posteriormente mediante simulaciones CFD en el entorno ANSYS Fluent. El objetivo principal de este análisis fue identificar la configuración geométrica más favorable en términos de producción de par durante la fase de arranque.

Turbina Savonius

El diseño geométrico de la turbina Savonius se fundamentó en parámetros críticos reportados por diversos autores, tales como la relación entre el diámetro y la altura del rotor, la separación entre álabes, el espesor del perfil y las dimensiones generales del conjunto rotacional. Los elementos de la Tabla 1 fueron seleccionados con base en directrices empíricas y estudios de optimización disponibles en la literatura especializada [22, 23].

El objetivo de este diseño fue garantizar un par de arranque elevado, así como condiciones favorables de operación en regímenes de velocidad de viento baja a media, considerando que la turbina Savonius desempeñará un papel fundamental dentro del conjunto híbrido como sistema auxiliar de arranque en la configuración final Savonius–Darrieus. Las dimensiones propuestas permiten una integración adecuada con el rotor Darrieus, tanto en términos estructurales como aerodinámicos, manteniendo el equilibrio entre eficiencia y simplicidad constructiva. Además, se evaluaron configuraciones geométricas alternativas con el fin de identificar el diseño con mejor desempeño aerodinámico. Las simulaciones CFD correspondientes permitieron observar el comportamiento del flujo alrededor de los cangilones, particularmente en zonas de recirculación, generación de vórtices y puntos de alta presión que impactan directamente el torque generado.

Tabla 1. Parámetros geométricos de la turbina Savonius original.

Parámetro	Valor
Altura	40 cm
Palas	2
Separación entre palas	1/6 diameter
Radio interna de la pala	5.83 cm
Diámetro	20 cm
Área interna de la pala	733.04 mm ²

Las simulaciones se llevaron a cabo para velocidades de viento entre 1 y 10 m/s, considerando un flujo incidente perpendicular al eje de rotación de la turbina. Se utilizó el modelo estándar de turbulencia $k-\epsilon$ (k -epsilon), ampliamente validado para este tipo de aplicaciones, y se asumieron condiciones ambientales estándar a nivel del mar (presión atmosférica de 101325 Pa y temperatura de 298 K). La malla generada para el dominio fluido fue refinada en las zonas cercanas al rotor para capturar con mayor precisión los gradientes de presión y velocidad. La Figura 3 muestra las principales características geométricas de la turbina.

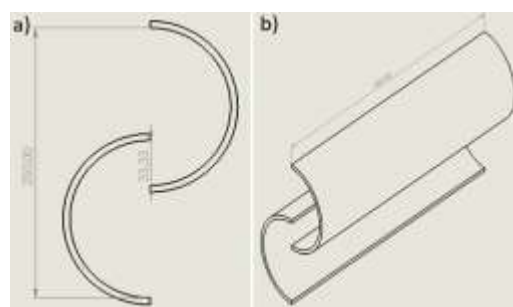


Figura 3. Modelo original de la turbina Savonius, a) vista superior y b) vista lateral.

Primera modificación de Savonius (MOD 1)

Esta modificación implica añadir un segmento recto tangente a los extremos de los álabes de la turbina, manteniendo constantes la separación entre álabes (e), la altura de los álabes (H) y el área interna de los álabes. El objetivo principal de esta primera modificación de la turbina Savonius original es extender los extremos de los álabes para aumentar la presión dentro de la turbina y, por consiguiente, el par generado. Sin embargo, a pesar de esta modificación, el área de la turbina debe mantenerse constante para garantizar que, en la fase de fabricación, la turbina modificada utilice la misma cantidad de material que el modelo original. Para lograr la extensión deseada, se añade un segmento recto (L), tangente a la forma semicircular de cada álabe, como se muestra en la Figura 4.

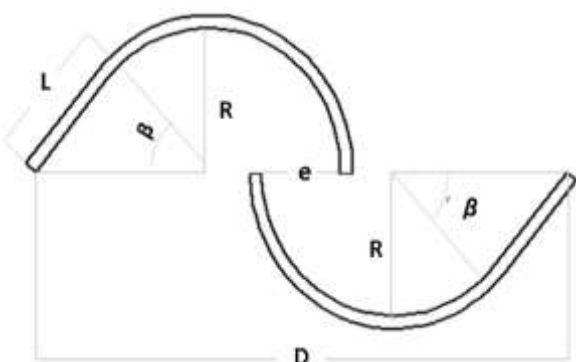


Figura 4. Vista superior y parámetros de la turbina Savonius Modificada.

Para mantener un área constante y evitar alterar significativamente el tamaño de la turbina, la separación entre las palas (e) y la altura de la pala (H) se mantuvo sin cambios. En consecuencia, la mayor modificación ocurrió en el segmento recto (L) y el radio de cada pala (R). Para lograr esto, se relacionaron las longitudes de las palas (que deben ser iguales para ambas palas), tanto en la turbina original (πR) como en las palas modificadas (Segmento Curvo + Segmento Recto).

A través de una serie de relaciones matemáticas y geométricas, se derivó la siguiente fórmula como se muestra en la ecuación 1, que permite la determinación tanto de los valores del radio de cada pala (R) como de la longitud del segmento recto (L) con base en el ángulo de inclinación de la pala modificada (es decir, el alargamiento de los extremos).

$$A = (\pi - \beta)R + R \tan(\beta) \quad \text{Ec. (1)}$$

El área de las palas de la turbina Savonius se calcula mediante $A = \pi RH$, donde A representa el área, R el radio de las palas y H la altura. En la turbina original, el área de cada pala es de 733 cm^2 . Este valor se mantiene constante en todos los modelos modificados, a pesar de los cambios

introducidos por la adición del segmento recto (Tabla 2) y el perfil geométrico (Tabla 3).

Tabla 2. Características de los modelos de turbinas Savonius (MOD 1).

Modelo	Radio de Pala (R)	Segmento recto	Angulo del Segmento recto (β)	Diámetro (D)
Original	5.8333 cm	0.000 cm	0°	20 cm
MOD 1A	5.8220 cm	1.560 cm	15°	20.36 cm
MOD 1B	5.7352 cm	3.311 cm	30°	21.38 cm
MOD 1C	5.4604 cm	5.460 cm	45°	23.03 cm
MOD 1D	4.7893 cm	8.295 cm	60°	25.4 cm
MOD 1E	3.2933 cm	12.291 cm	75°	28.7 cm

Para garantizar la consistencia del área, se ajusta el radio R de cada pala mediante la fórmula derivada. Con base en esta fórmula matemática y el gráfico presentado anteriormente, se han diseñado los modelos que se describen en las siguientes tablas.

Tabla 3. Geometría generada en SolidWorks para la primera modificación (MOD 1).

Original	MOD 1A	MOD 1B
MOD 1C	MOD 1D	MOD 1E

Segunda Modificación de Savonius (MOD 2)

La segunda modificación consiste en modificar la separación entre los perfiles internos de la turbina (Tabla 5). Se implementaron cuatro modificaciones en el modelo que obtuvo los mejores resultados en la sección anterior (MOD 1), como se muestra en la tabla 4 y 5.

Tabla 4. Modelos de turbinas Savonius (MOD 2).

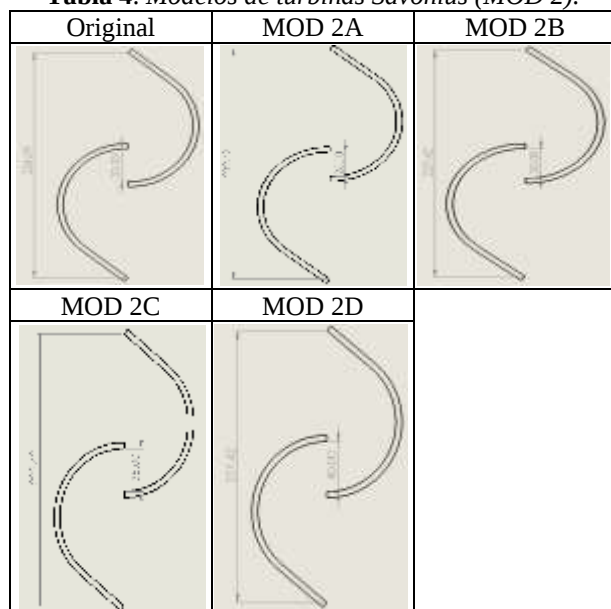


Tabla 5. Características de las turbinas Savonius (Segunda modificación).

Modelo	Espacio entre palas (cm)
MOD 2A	2.5
MOD 2B	3
MOD 2C	3.5
MOD 2D	4

Tercera Modificación de Savonius (MOD 3)

La modificación implica la torsión del perfil como se muestra en la Figura 5. Esto garantiza que, desde una perspectiva de fabricación, todos los modelos modificados requerirían la misma área de ataque que el diseño original.

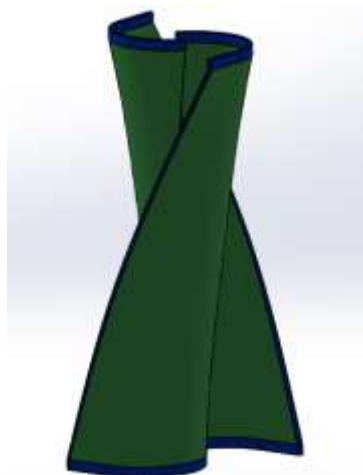


Figura 5. Tercera modificación del giro del perfil.

Turbina Darrieus

El diseño de la turbina Darrieus requiere una cuidadosa consideración de diversos factores para optimizar su rendimiento aerodinámico. Esta sección presenta un análisis de los perfiles aerodinámicos del NACA (Comité Asesor Nacional de Aeronáutica), junto con cálculos para el ancho de cuerda y la determinación del giro y el radio de las palas necesarios para el funcionamiento óptimo de la turbina híbrida con velocidades de flujo de aire de arranque bajas a medias.

Para la turbina Darrieus, se seleccionaron los perfiles aerodinámicos NACA 0012, 0015, 0018, 0021, 2415, 4412 y 4418 para su evaluación, con base en la literatura [24, 25, 26], específicamente para estos modelos híbridos con velocidades de flujo de aire de arranque bajas a medias.

Longitud de la cuerda

To determine the appropriate chord length for the blades of the Darrieus turbine, factors such as the airfoil profile, radius, and height were considered, as defined by the following formula:

$$\text{Longitud de cuerda} = \text{Radio} \times 0.15 \quad \text{Ec. (2)}$$

Este cálculo, verificado mediante simulaciones QBLADE, arrojó inicialmente un valor de 4,5 cm. Sin embargo, los resultados de la simulación sugieren que la longitud de cuerda debería estar entre 4 y 6 cm, ya que la turbina presenta un rango de TSR más amplio con estos valores. Dado que la turbina Darrieus se integrará en una configuración híbrida con una turbina Savonius, la literatura sugiere que se debe optimizar el ancho de cuerda para minimizar la resistencia aerodinámica, mejorando así el rendimiento de la turbina Savonius durante el arranque y en condiciones de viento bajo. Por lo tanto, se recomiendan longitudes de cuerda ligeramente menores en comparación con las que se utilizan habitualmente para una turbina Darrieus independiente.

Rotor Darrieus: radio, altura, número de palas y giro de las palas

Los cuatro parámetros para el diseño de la turbina se seleccionaron con base en hallazgos de la literatura [18, 27], que sugieren las siguientes directrices: Para los modelos híbridos, la relación de radio entre las turbinas Savonius y Darrieus debe ser de 1:3, lo que resulta en un radio de turbina Darrieus de 30 cm. La altura de la turbina Darrieus debe ser tres veces su radio. Se ha logrado una eficiencia óptima con una configuración de turbina de 3 palas. Una torsión de 90° en las palas de una turbina Darrieus puede mejorar la suavidad del flujo en el rango de TSR medio-alto.

Ataque en ángulo

La determinación del ángulo de ataque se basa directamente en los resultados obtenidos mediante simulaciones de perfiles realizadas en QBLADE. Se observó que los valores del ángulo de ataque de los perfiles varían según el número de Reynolds al que se simulan.

El número de Reynolds (Re) se calculó mediante la ecuación (2):

$$Re = \rho \cdot V \cdot l \cdot \mu = V \cdot l \cdot \nu \quad \text{Ec. (3)}$$

donde ρ representa la densidad del aire, V es la velocidad del aire, l es el ancho de la cuerda (0,2 m), μ es la viscosidad dinámica del aire y ν es la viscosidad cinemática del aire, con un valor de $1,5111 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Ecuaciones gobernantes

El rendimiento del aerogenerador de eje vertical Savonius modificado se analizó computacionalmente mediante un solucionador de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de volumen finito, implementado en ANSYS Fluent. El proceso físico se modeló matemáticamente con base en las ecuaciones que rigen el proceso en la forma conservativa de las ecuaciones de Navier-Stokes, formuladas para un flujo incompresible con viscosidad constante. Estas ecuaciones se expresan en forma de diferencias finitas, como se muestra en las ecuaciones (4) y (5).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}_r) + \rho(2\vec{\omega} \vec{V}_r + \vec{\omega} \vec{\omega} r) = -\nabla P_s + \rho \vec{g} + \nabla(\tau) \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\tau = \mu[(\nabla \vec{V}_r + \nabla \vec{V}_r^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{V}_r I] \quad \text{Ec. (5)}$$

En este estudio se empleó el modelo estándar de turbulencia $k-\epsilon$, un modelo de dos ecuaciones ampliamente utilizado. Este modelo es especialmente adecuado para flujos con esquinas agudas y bordes rectos o curvos, como los que se encuentran en las palas de turbinas, ya que incorpora funciones de pared derivadas de la ley de la pared. La capacidad de la turbina para captar el viento se cuantifica mediante el coeficiente de momento (C_m) y el coeficiente de potencia (C_p) [9, 28, 29]. El coeficiente de momento (C_m) representa la relación entre el par producido por la turbina y el par disponible en el viento. De forma similar, el coeficiente de potencia (C_p) se define como la relación entre la potencia extraída por la turbina y la potencia total disponible en el viento que pasa por el área proyectada de la turbina. Las ecuaciones para C_m y C_p se presentan en las ecuaciones (6, 7):

$$C_m = \frac{T}{0.5 \rho V^2 A R} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$C_p = TSR \times C_m \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde ρ representa la densidad del aire, R es el radio del rotor y A es el área proyectada de la turbina. T denota el par (momento) de la turbina y P representa la potencia de salida de la turbina. La TSR (relación de velocidad de punta) [30-33] es la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento de entrada. En la ecuación (8), la TSR se expresa matemáticamente como:

$$TSR = \frac{\text{Speedtip}}{\text{Input Speed}} = \omega d/V \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde Speedtip es la velocidad de punta o velocidad periférica del rotor (m/s); ω es la velocidad angular del rotor (1/s); d es el diámetro de las mitades del cilindro del rotor (m), y V es la velocidad del viento (m/s). El coeficiente de par o C_t se define como la relación entre el par real desarrollado por el rotor (T) y el par teórico disponible en el viento (T_w), según la ecuación (9):

$$C_t = \frac{T}{T_w} = \frac{4T}{\rho A_s d V^2} \quad \text{Ec. (9)}$$

donde ρ es la densidad del aire (1,225 kg/m³); T es el par (Nm), y A_s es el área barrida de las palas (m²), calculada como sigue en la ecuación (10):

$$A_s = \text{Altura} \times \text{Diámetro del Rotor} \quad \text{Ec. (10)}$$

El coeficiente de potencia de un aerogenerador (C_p) es la relación entre la potencia máxima obtenida del viento (P_t) y la potencia total disponible del viento (P_a) según la ecuación (11):

$$C_p = \frac{P_t}{P_a} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad \text{Ec. (11)}$$

donde la potencia máxima del aerogenerador se determina en la ecuación (12)

$$P_t = T \omega \text{ (Watt)} \quad \text{Ec. (12)}$$

Relación entre el coeficiente de potencia C_p y el ratio de velocidad de punta TSR o λ como efecto de la solidez del rendimiento del aerogenerador.

Modelos CAD y condiciones de contorno

El diseño geométrico creado en SolidWorks se importó a ANSYS para la configuración de la simulación, con especial atención a garantizar la compatibilidad y la precisión. El proceso de importación de geometría de SolidWorks a ANSYS se describe brevemente a

continuación: 1) guardar la geometría de SolidWorks en un formato de archivo compatible, como IGES o PARASOLID; 2) utilizar la función "Importar geometría" para cargar el archivo guardado en el menú de ANSYS Workbench; 3) configurar las opciones y ajustes adecuados durante el proceso de importación; 4) preparar y reparar la geometría en ANSYS para corregir posibles errores de exportación.

En esta simulación 3D-CFD, se utilizó el software comercial ANSYS Fluent. Se adoptó un enfoque de estado estacionario para modelar la física del problema. Se aplicó una condición de contorno de entrada de velocidad a la cara de la sección de entrada, mientras que la zona de salida del dominio de volumen se definió como una condición de salida de presión. Las caras restantes del dominio computacional se trataron como condiciones de contorno de simetría, ya que su distancia a la turbina garantizaba un impacto insignificante en los resultados. Para esta simulación, se seleccionó un esquema de doble precisión y se aplicó discretización espacial de segundo orden a barlovento a las ecuaciones de presión, momento y turbulencia. Las simulaciones se realizaron en condiciones de malla estacionaria utilizando el modelo de turbulencia k-epsilon estándar, asumiendo condiciones atmosféricas estándar. La velocidad del viento de entrada se ajustó en un rango de 1 a 10 m/s, y la presión de salida se ajustó a 0 Pa. Los criterios de convergencia se establecieron en un residuo de 1×10^{-5} , con un máximo de 1000 iteraciones.

El proceso de mallado se realizó con ANSYS Meshing, con una densidad de malla refinada aplicada a las superficies cóncavas y convexas de los álabes de la turbina para garantizar la precisión y la convergencia de la solución. La simulación asumió condiciones de flujo incompresible en estado estacionario. Se aplicaron condiciones de contorno de simetría a las superficies superior e inferior, que representan las paredes laterales del túnel de viento, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones de control de volumen alrededor del modelo de turbina Savonius.

Frente	Trasero	Lados	Superior-Inferior
300 cm	1000 cm	200 cm	100 cm

Las palas de la turbina se ajustaron a las condiciones de pared estándar y los modelos se simularon con rotación constante para representar las condiciones de arranque a velocidades de viento bajas a medias.

Las características de la malla se definieron cuidadosamente para garantizar la precisión y la convergencia en la simulación. El tamaño del elemento se estableció en 10 mm, iniciado desde el ensamblaje activo, con un suavizado alto y una transición lenta. La longitud

mínima del borde se especificó en 1,07 mm. Para el inflado, se habilitó el inflado automático y se seleccionó una opción de transición suave con una relación de transición de 0,77, un máximo de 10 capas y una tasa de crecimiento de 1,2, utilizando el algoritmo de inflado "Pre". La malla final consistió en aproximadamente 800.000 nodos y 500.000 elementos. El análisis Fluent de la turbina eólica híbrida de eje vertical (VAHWT) se realizó en ANSYS Fluent bajo velocidades aerodinámicas variables de 1 a 10 m/s, lo que garantizó una evaluación robusta del rendimiento de la turbina.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados del análisis CFD de las turbinas Savonius modificadas, junto con una comparación con la turbina Savonius original. Además, se describen las características recomendadas para la turbina Darrieus y el modelo híbrido Savonius-Darrieus, con el objetivo de identificar el rendimiento óptimo para cada modelo individualmente.

Turbina Savonius

Del volumen de control mostrado en la figura 6a, con dimensiones de 60 cm de alto, 61 cm de ancho y 142 cm de largo, el mallado se realizó en Ansys, como se muestra en la figura 6b, con un orden de elementos lineal de 886434 nodos y 4794510 elementos, con tamaños de elementos en el volumen de control de 20 mm y 1,5 mm cerca de la región de las aspas de Savonius.

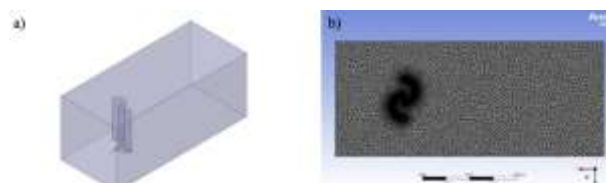


Figura 6. Características de la turbina Savonius original; a) Volumen de control, b) Malla de volumen.

Las simulaciones realizadas en ANSYS Fluent proporcionaron información detallada sobre el comportamiento aerodinámico de la turbina Savonius, incluyendo la distribución de presión, las curvas de velocidad y la generación de par. La Figura 7 ilustra las velocidades, que van desde 0 m/s hasta 5,57 m/s, destacando la interacción entre el flujo de aire y la turbina. Cabe destacar que se observa una reducción significativa de la velocidad en la parte delantera de la turbina debido a la intercepción del viento. Se forma una región de estela detrás de la turbina, caracterizada por zonas de baja velocidad que indican separación del flujo y disipación de energía. Las zonas de aceleración lateral (representadas en verde y amarillo) muestran cómo el flujo se desvía alrededor de las palas, facilitando el movimiento de rotación.

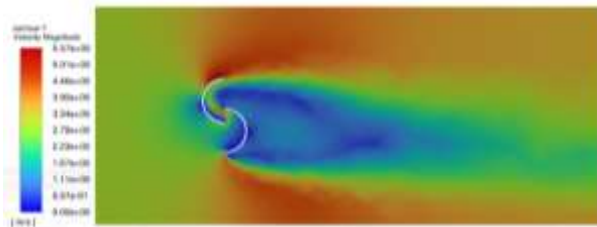


Figura 7. Gradiente de velocidad en ANSYS Fluent (turbina Savonius original).

En términos de rendimiento aerodinámico, la región de estela detrás de la turbina muestra las pérdidas de energía típicas de las turbinas Savonius, que son menos eficientes aerodinámicamente en comparación con otros diseños, como la Darrieus. A pesar de ello, las palas curvas generan diferenciales de presión que impulsan el par rotacional. Los resultados de la simulación coinciden con el comportamiento esperado de una turbina Savonius y ofrecen información valiosa sobre posibles modificaciones de diseño para mejorar la captura de energía y minimizar las pérdidas aerodinámicas.

Primera modificación de Avonius (MOD 1)

La Figura 8 presenta la variación del par generado (Newton-metros) en función del ángulo externo del álabe (en grados) en la turbina Savonius modificada. Los resultados indican un aumento constante del par hasta un ángulo óptimo de 40°, a partir del cual comienza a disminuir. Este comportamiento sugiere que las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el álabe se maximizan en este ángulo, lo que mejora la captura de energía. Sin embargo, en ángulos superiores a 40°, un aumento de la resistencia aerodinámica puede contrarrestar los beneficios, reduciendo la eficiencia general.

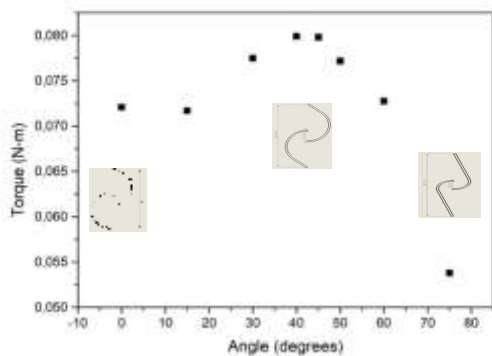


Figura 8. Relación entre el par y el ángulo externo de la pala de la turbina Savonius modificada a 3 m/s.

Este comportamiento es coherente con los principios aerodinámicos que rigen las turbinas Savonius, donde el ángulo de las palas desempeña un papel crucial a la hora de influir en las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la turbina. Los resultados sugieren que la turbina

modificada alcanza la generación de par máximo con un ángulo de pala de 40°. Esta condición óptima resulta especialmente ventajosa para el aprovechamiento de la energía eólica durante las operaciones de arranque, donde maximizar el par es esencial para un rendimiento eficiente de la turbina. El gráfico ofrece información valiosa sobre las características de rendimiento de la turbina modificada. La relación observada entre el par y el ángulo de las palas destaca la importancia de la geometría de las palas y su influencia en la eficiencia. El rendimiento máximo a 40° indica que este ángulo debería priorizarse en los esfuerzos de optimización del diseño para mejorar la captura de energía y la eficiencia general de la turbina.

Segunda Modificación de Savonius (MOD 2)

La Figura 9 examina el impacto de la variación de la separación de las palas en el par generado. Los resultados muestran que aumentar la separación de las palas mejora el par hasta cierto umbral, a partir del cual el rendimiento comienza a degradarse. Esta tendencia sugiere que el espaciado de las palas desempeña un papel fundamental en la optimización de la interacción entre el flujo de viento y la estructura de la turbina.

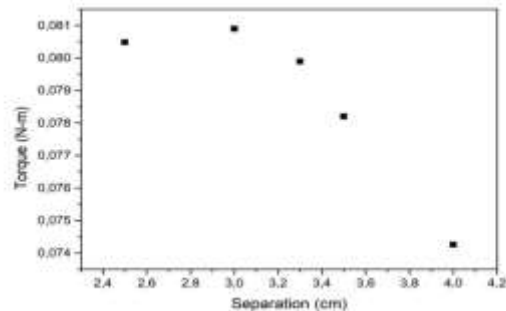


Figura 9. Par generado con diferentes separaciones de cuchillas.

La separación óptima de las palas garantiza un equilibrio entre la eficiencia aerodinámica y la estabilidad mecánica. Una separación excesiva puede provocar una transferencia de energía ineficiente, ya que puede pasar más aire a través de la turbina sin aprovecharse eficazmente. Por otro lado, una separación insuficiente puede provocar un aumento de la turbulencia y pérdidas de energía. Los hallazgos enfatizan la importancia de un rango de separación de palas validado experimentalmente para diferentes condiciones de viento.

Este modelo se simuló con velocidades de viento entrantes de 1 a 10 m/s para obtener distribuciones de presión, velocidad y par cuando el viento incide perpendicularmente sobre la turbina. La Tabla 7 presenta los valores de par obtenidos del análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) realizado tanto en el

modelo original (OM) como en los modelos modificados (M1-2) en el mismo rango de velocidad del viento de 1 a 10 m/s, bajo las condiciones de contorno especificadas previamente.

Tabla 7. Comparación del par generado por la turbina original y las turbinas modificadas.

Velocidad de viento (m/s)	Torque (Nm) OM	Torque (Nm) M1-2	%
1	0.00178305	0.002	12.2%
2	0.00720821	0.00809042	12.2%
3	0.0162682	0.01821297	12.0%
4	0.02896821	0.03237664	11.8%
5	0.04533428	0.05059608	11.6%
6	0.06230613	0.07288592	17.0%
7	0.08879838	0.09923683	11.8%
8	0.11562856	0.12962911	12.1%
9	0.14624226	0.16406252	12.2%
10	0.18051243	0.203728	12.9%

De esta forma obtenemos un incremento medio del 12,6% en el par generado por las turbinas Savonius MOD1 y MOD2 respecto al original en el instante en el que el viento incide perpendicularmente sobre las turbinas.

Tercera Modificación de Savonius (MOD 3)

La figura 10 muestra la influencia del ángulo de rotación de las palas con respect al torque generado. Los resultados revelan que el par de torsión fluctúa a medida que la pala gira, alcanzando un máximo antes de disminuir gradualmente. Este comportamiento cíclico sugiere que el ángulo de rotación óptimo maximiza la extracción de energía en posiciones específicas dentro del ciclo operativo de la turbina.

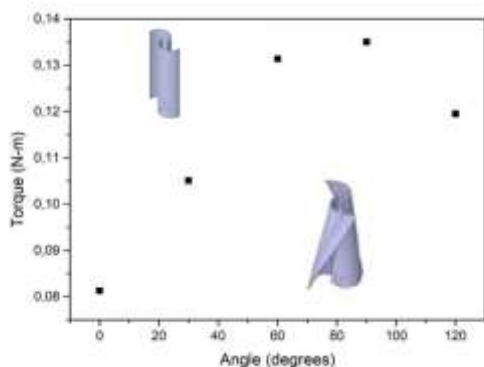


Figura 10. Cuchilla de torsión Savonius y par (Nm).

A ángulos de rotación más bajos, cuando la pala se posiciona en ángulos más favorables respecto al viento, se observa un aumento del par. Es importante destacar que la superficie expuesta al flujo de aire se mantiene constante en todos los modelos. El gráfico indica la

presencia de un ángulo óptimo en el que se alcanza el par máximo. En este punto, la configuración de la pala con respecto al flujo de viento maximiza la fuerza aerodinámica, maximizando así la potencia extraída. Más allá de este ángulo óptimo, el par comienza a disminuir debido a la posición menos favorable de la pala respecto al viento, lo que reduce la fuerza aerodinámica y, en consecuencia, el par generado, lo que aumenta los efectos de turbulencia.

Estos efectos de turbulencia deben considerarse al evaluar el rendimiento de la turbina en condiciones reales. En conclusión, el gráfico ofrece información valiosa sobre la relación entre el ángulo de giro de la pala y el par producido en una turbina Savonius. Estos datos pueden aprovecharse para optimizar el diseño de la turbina y mejorar su eficiencia en la generación de energía eólica. La Figura 11 ilustra la variación del par generado por una turbina Savonius en función del ángulo de rotación de la turbina, considerando dos posiciones iniciales del álabe: 0° y 90° para la turbina original y la modificada, respectivamente. El eje x representa el ángulo de rotación (en grados), que denota la posición angular del álabe de la turbina con respecto a una posición de referencia, mientras que los valores de par (N·m) se muestran en el eje y. Las curvas para ambas posiciones iniciales (0° y 90°) presentan un comportamiento periódico, lo que indica que el par generado por la turbina varía cíclicamente a medida que el álabe gira. Cabe destacar que las curvas de par para 0° y 90° están desfasadas, lo que sugiere que el par máximo se alcanza en diferentes posiciones angulares del álabe.

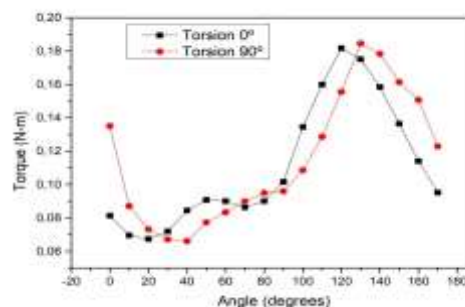


Figura 11. Comparación del par para las posiciones iniciales de la cuchilla de 0° (original) y 90° (modificaciones) a 3 m/s.

En la posición de 0°, la curva muestra un máximo cerca de 120°, lo que indica que la pala capta la mayor cantidad de energía eólica y genera el par máximo en este ángulo. De igual forma, para la posición de 90°, la curva también presenta un máximo local, pero en un ángulo ligeramente diferente de aproximadamente 130°. Con una torsión de 90°, el par presenta un aumento promedio del 3% en comparación con la torsión de 0°, según lo calculado a

partir de la curva. Esto confirma que la posición inicial de la pala influye significativamente en la generación de par.

Los resultados se basan en una velocidad del viento de 3 m/s. La forma y el perfil de las palas tienen un impacto sustancial en el rendimiento de la turbina, ya que pequeñas variaciones en su geometría pueden provocar cambios significativos en la curva de par. Además, la turbulencia del viento puede afectar la generación de par, y estos factores deben considerarse al evaluar el rendimiento de la turbina en condiciones reales. El gráfico proporciona información valiosa sobre el comportamiento de una turbina Savonius en función del ángulo de rotación de la pala. Estos hallazgos pueden utilizarse para optimizar el diseño de la turbina y mejorar su eficiencia en la generación de energía eólica. La presión, la velocidad y la turbulencia en ambas turbinas Savonius se muestran en las figuras 12, 13 y 14. En las figuras 12a-b, ambas imágenes muestran una distribución de presión diferente, con zonas de alta presión en la parte frontal del rotor (donde el viento impacta directamente) y zonas de baja presión en la parte posterior. El diseño modificado de la turbina parece tener varias ventajas sobre el diseño original en cuanto a la distribución de la presión.

La región de alta presión más pronunciada en la cara cóncava del álabe que avanza sugiere que el diseño modificado genera un par positivo mayor, lo que podría resultar en una mayor potencia de salida. Las regiones de baja presión menos intensas en la cara convexa del álabe que avanza y en el álabe que regresa indican una reducción de la fuerza de arrastre, lo que podría mejorar la eficiencia de la turbina. La presión alrededor del rotor varía a medida que gira, lo que representa las variaciones de par en la Figura 11 y 12.

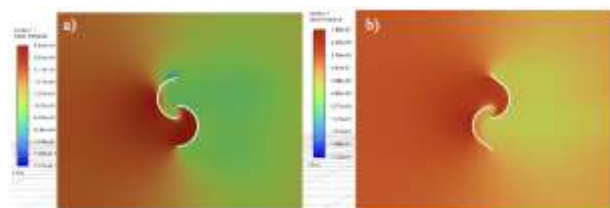


Figura 12. Presión de convección en a) turbina original, y b) turbina modificada.

La velocidad del flujo de aire observada en la figura 13 muestra la formación de una estela detrás del rotor. La región de alta velocidad más pronunciada en el lado cóncavo del álabe de avance sugiere que el diseño modificado logra una mayor aceleración del flujo, mientras que las regiones de baja velocidad menos intensas en el lado convexo del álabe de avance y en el álabe de retorno indican una reducción en la separación y

recirculación del flujo, lo que podría mejorar la eficiencia de la turbina.

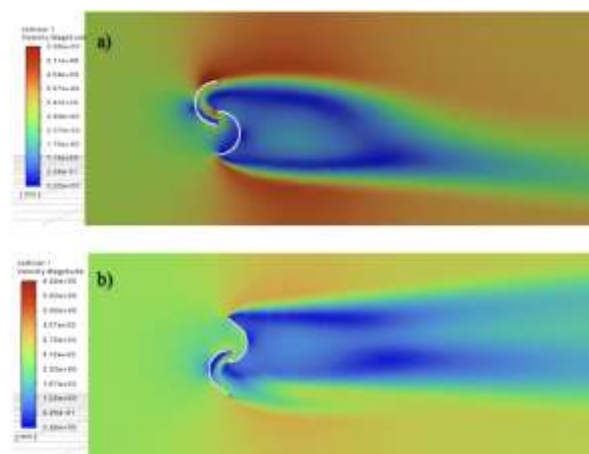


Figura 13. Velocidad de rotación en a) turbina original y b) turbina modificada.

El diseño modificado parece lograr una mayor aceleración del flujo, reducir la separación del flujo y lograr una mayor diferencia de velocidad entre los lados cóncavo y convexo del álabe en avance. Estas mejoras podrían contribuir a una mayor eficiencia general y potencia de salida de la turbina.

La figura 14 muestra los contornos de la energía cinética turbulenta (ECT). La distribución más uniforme de la ECT en el diseño modificado sugiere que genera una turbulencia menos intensa, lo que podría resultar en menores emisiones de ruido y una menor tensión mecánica en la turbina. La ECT menos intensa en la región de estela del diseño modificado (figura 14b) indica una reducción en la disipación de energía turbulenta, lo que podría contribuir a una mayor eficiencia general de la turbina.

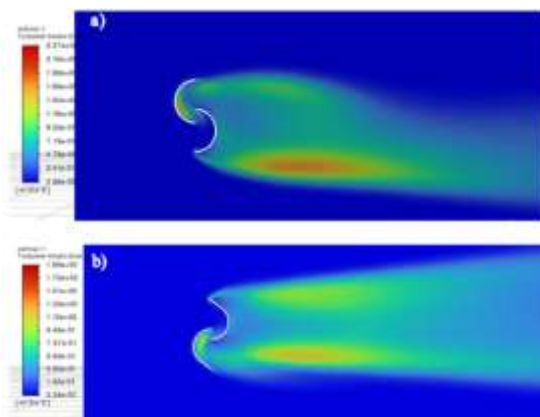


Figura 14. Perfil de velocidad y turbulencia a 3 m/s en a) diseño original y b) diseño modificado.

Las modificaciones realizadas al diseño, como el cambio de la apertura externa del perfil, la separación interna entre las palas y la torsión del perfil, probablemente influyeron en el flujo de aire alrededor de la turbina, mejorando así su eficiencia. Las modificaciones realizadas al diseño, como el cambio de la apertura externa del perfil, la separación interna entre las palas y la torsión del perfil de las palas, probablemente influyeron en el flujo de aire alrededor de la turbina, mejorando así su eficiencia. Sería necesario un análisis más profundo de datos adicionales y una simulación dinámica para comprender plenamente el impacto de las modificaciones de diseño en el rendimiento general de la turbina.

El diseño real de las turbinas en condiciones reales puede diferir de los resultados de la simulación debido a factores como la turbulencia del viento, las tolerancias de fabricación y las condiciones ambientales.

Turbina Darrieus

Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones en QBLADE y las recomendaciones de modelos Savonius-Darrieus encontradas en la literatura revisada, se establecen las siguientes características para la turbina Darrieus en la tabla 8 y 9. La visualización de la turbina Darrieus y Savonius-Darrieus se muestran en las tablas 8 y 10 respectivamente.

Tabla 8. Visualización final de la turbina Darrieus.

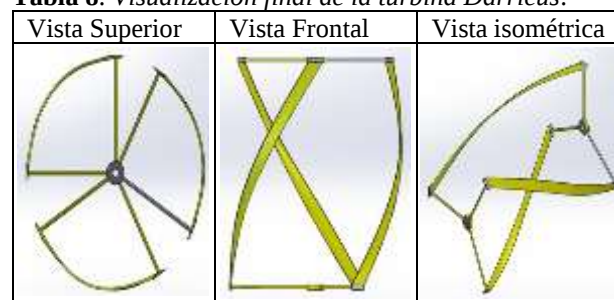
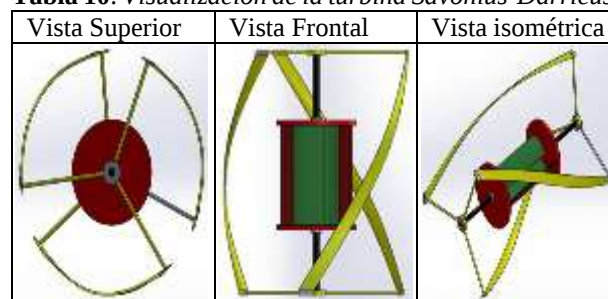


Tabla 9. Parámetros geométricos de la turbina Darrieus.

Parámetro	Valor
Perfil Aerodinámico	NACA 4412
Ancho de cuerda	5 cm
Radio	30 cm
Número de Palas	3
Altura	90 cm
Torsión	90°

En el caso de la fabricación de la turbina Darrieus se utilizaron simulaciones QBLADE de perfiles aerodinámicos y el empleo de SolidWorks para el modelado 3D.

Tabla 10. Visualización de la turbina Savonius-Darrieus.



Análisis de perfiles aerodinámicos, ancho de cuerda, torsión de palas, radio, altura y número de palas del rotor Darrieus

Se realizó un análisis de seis perfiles aerodinámicos mediante el software QBLADE. La selección de los perfiles se basó en la relación sustentación-resistencia, evaluada con diferentes números de Reynolds. Los resultados se presentan en la Figura 15.

La Figura 15 demuestra que la relación Cl/Cd aumenta con el número de Reynolds, lo que indica que los perfiles aerodinámicos se vuelven más eficientes a medida que aumenta el número de Reynolds, debido a la mayor relación sustentación-resistencia.

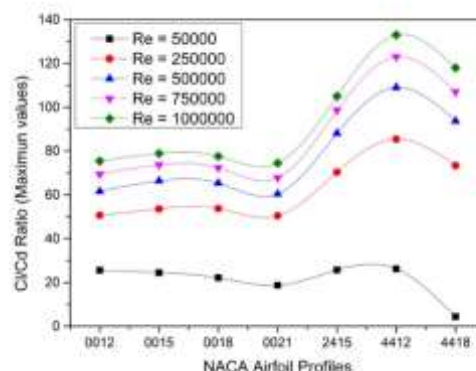


Figura 15. Relación Cl/Cd de los perfiles aerodinámicos a diferentes valores de Reynolds.

Entre los perfiles, los perfiles aerodinámicos 4412 y 4418 exhiben los valores más altos de relación Cl/Cd , particularmente en números de Reynolds más altos (750.000 y 1.000.000). Esto sugiere que estos perfiles se desempeñan de manera más eficiente en condiciones de flujo turbulento. Por el contrario, en números de Reynolds más bajos (50.000), la relación Cl/Cd es significativamente menor, lo que implica una eficiencia aerodinámica reducida en condiciones de flujo laminar o a velocidades más bajas. Los perfiles 0012, 0015, 0018 y 0021 muestran una tendencia similar, con un aumento gradual en la relación Cl/Cd a medida que aumenta el número de Reynolds; Sin embargo, no alcanzan los valores máximos observados para los perfiles 4412 y 4418.

4418. Estos hallazgos son cruciales para la selección de perfiles aerodinámicos en aplicaciones donde la maximización de la eficiencia y el rendimiento aerodinámico es prioritaria.

Para determinar el ancho de cuerda óptimo para los álabes de la turbina, se consideraron factores como el perfil aerodinámico, el radio y la altura. Los resultados de la simulación QBLADE indicaron que el ancho de cuerda ideal es de 4 a 6 cm, como se muestra en la figura 16. Se observa un mayor rango de TSR operativo para aquellos con un ancho de cuerda de 3, 4 y 5 cm.

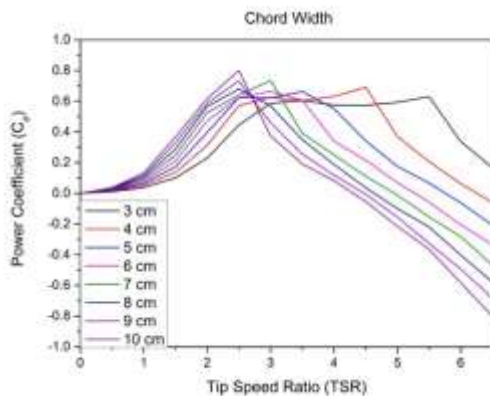


Figura 16. Curvas del coeficiente de potencia (C_p) en función de la TSR para diferentes longitudes de cuerda.

La Figura 17 muestra el perfil NACA 4412 con la relación sustentación-resistencia (C_l/C_d) para obtener el ángulo de ataque. El gráfico muestra que el perfil NACA 4412 alcanza su máxima relación C_l/C_d con un ángulo de ataque de aproximadamente 5 grados.

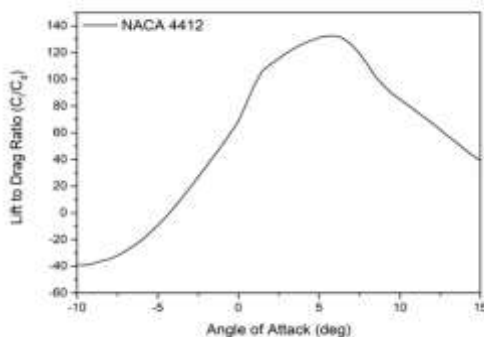


Figura 17. C_l/C_d con respecto al ángulo de ataque del perfil aerodinámico NACA 4412.

En resumen, podemos establecer los siguientes puntos:

1. Para los modelos híbridos, la relación de radio entre las turbinas Savonius y Darrieus debe ser de 1:3, lo que resulta en una turbina Darrieus con un radio de 30 cm [6,7].

2. La altura de la turbina Darrieus es tres veces su radio [6,7].

3. La máxima eficiencia se logra con turbinas Darrieus de tres álabes [6].

Con base en los dos modelos presentados en las secciones anteriores, el ensamblaje de la turbina Savonius final y la turbina Darrieus final se realizó mediante el software SolidWorks para crear un único modelo híbrido, tal y como se muestra en la tabla 10. Este modelo integrado está diseñado para probarse en campo o mediante simulaciones dinámicas para evaluar el comportamiento y el rendimiento potencial de esta nueva alternativa energética.

El primer análisis busca estudiar el efecto de la variación de la posición de la ranura en el rendimiento inicial de la turbina (es decir, análisis estacionario). Específicamente, la posición de la ranura se define como un porcentaje de la cuerda de la pala, y los análisis estáticos se realizan variando la posición angular del rotor de 0° a 180° . De los resultados mostrados en la Figura 3, se puede inferir que la presencia de la ranura, para posiciones inferiores al 40%, mejora el rendimiento del par de arranque de la turbina en comparación con la configuración estándar.

CONCLUSIONES

El estudio optimizó con éxito los diseños de las turbinas Savonius y Darrieus para mejorar su rendimiento. La extensión de los extremos de las palas y el ajuste de su separación aumentaron significativamente la generación de par, especialmente a bajas velocidades de viento (1-10 m/s). La turbina Savonius modificada mostró un aumento promedio del 12,6 % en el par en comparación con la configuración original. Optimizar el ángulo de giro de las palas puede mejorar aún más el rendimiento de la turbina. El estudio identificó un ángulo óptimo que maximiza la generación de par, mejorando la eficiencia de la captura de energía. La posición inicial de las palas influye significativamente en la generación de par. El análisis mostró que una torsión de 90° resultó en un aumento promedio del 3 % en el par en comparación con la torsión de 0° .

Las modificaciones realizadas al diseño de Savonius en el modelo final han mejorado el rendimiento con una TSR superior a 0,8. Sin embargo, el rendimiento con una TSR inferior a 0,7 podría ser similar. Sería necesario un análisis más profundo de datos adicionales para comprender completamente el impacto de las modificaciones de diseño en el rendimiento general de la turbina. El perfil aerodinámico NACA 4412 presentó una relación sustentación-resistencia superior, lo que lo convierte en la opción ideal para el sistema híbrido. El estudio estableció los parámetros óptimos para la turbina Darrieus, incluyendo el ancho de cuerda, la torsión de las

palas, el radio, la altura y el número de palas, basándose en los resultados de la simulación y las recomendaciones bibliográficas.

Se requieren investigaciones adicionales, incluyendo pruebas de campo o simulaciones dinámicas, para evaluar completamente la interacción entre los rotores Savonius y Darrieus en la configuración híbrida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen y agradecen el financiamiento recibido por el Tecnológico Nacional de México a través del proyecto titulado “Diseño y fabricación de una turbina eólica de eje vertical Savonius-Darrieus”, con clave 20999.24-P.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Höök M, Tang X. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy*. 2013;52:797-809.
- [2] Barthelmie RJ, Pryor SC. Potential contribution of wind energy to climate change mitigation. *Nat Clim Chang*. 2014;4:684-8.
- [3] Barthelmie RJ, Pryor SC. Climate Change Mitigation Potential of Wind Energy. *Climate*. 2021;9:136.
- [4] Solaun K, Cerdá E. Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Energy*. 2019;116:109415.
- [5] Kara T, Sahin AD. Implications of Climate Change on Wind Energy Potential. *Sustainability*. 2023;15:14822.
- [6] Deda Altan B, Gungor A. Enhancing the Performance of Savonius Wind Turbines with Wind Router. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng*. 2023;47:989-99.
- [7] Saikot MMH, Rahman M, Hosen MA, et al. Savonius Wind Turbine Performance Comparison with One and Two Porous Deflectors: A CFD Study. *Flow Turbulence Combust*. 2023;111:1227-51.
- [8] Pope K, Dincer I, Naterer GF. Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines. *Renew Energy*. 2010;35:2102-13.
- [9] Lee HM, Oh J Kwon. Performance improvement of horizontal axis wind turbines by aerodynamic shape optimization including aeroelastic deformation. *Renew Energy*. 2020;147:2128-40.
- [10] Mohammad Al-R, Mohamed A, Gomaa R. Comparison between horizontal and vertical axis wind turbine. *Int J Appl Power Eng*. 2023;12:13-23.
- [11] Kumar R, Raahemifar K, Fung AS. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018;89:281-91.
- [12] Hand B, Kelly G, Cashman A. Aerodynamic design and performance parameters of a lift-type vertical axis wind turbine: A comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2021;139:110699.
- [13] Song XW, Cao KY, Chen ZR, Shen K. Design Optimization of Savonius Rotors: An Overview. *Appl Mech Mater*. 2011;58-60:827-8.
- [14] Im H, Kim B. Power Performance Analysis Based on Savonius Wind Turbine Blade Design and Layout Optimization through Rotor Wake Flow Analysis. *Energies*. 2022;15:9500.
- [15] Deb B, Gupta R, Misra RD. Performance analysis of a helical savonius rotor without shaft at 45° twist angle using CFD. *J Urban Environ Eng*. 2013;7:126-33.
- [16] Mauro S, Brusca S, Lanzafame R, Messina M. CFD modeling of a ducted Savonius wind turbine for the evaluation of the blockage effects on rotor performance. *Renew Energy*. 2019;141:28-39.
- [17] Sharma S, Sharma RK. Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation. *Energy Convers Manag*. 2016;127:43-54.
- [18] Roshan A, Sagharichi A, Maghrebi MJ. Nondimensional Parameters’ Effects on Hybrid Darrieus–Savonius Wind Turbine Performance. *J Energy Resour Technol*. 2020;142:011202.
- [19] Pallotta A, Pietrogiaconi D, Romano GP. HYBRI – A combined Savonius-Darrieus wind turbine: Performances and flow fields. *Energy*. 2019;191:116433.
- [20] Chegini S, Asadbeigi M, Ghafoorian F, Mehrpooya M. An investigation into the self-starting of darrieus-savonius hybrid wind turbine and performance enhancement through innovative deflectors: A CFD approach. *Ocean Eng*. 2023;287:115910.
- [21] Akwa JV, Antonio VH, Prisco Petry A. A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renew Sustain Energy Rev*. 2012;16:3054-64.
- [22] Al-Ghriybah M, Lagum AA. Enhancing the Aerodynamic Performance of the Savonius Wind Turbine by Utilizing Quarter Elliptical Supplementary Blades. *Flow Turbulence Combust*. 2024;112:491-508.
- [23] Fernando MSU K, Modi VJ. A numerical analysis of the unsteady flow past a Savonius wind turbine. *J Wind Eng Ind Aerodyn*. 1989;32:303-27.
- [24] Nakajima M, Iio S, Ikeda T. Performance of Savonius rotor for environmentally friendly hydraulic turbine. *J Fluid Sci Technol*. 2008;3:420-9.
- [25] Santoso E, Awika IS, Ariwiyono N. Experimental Study Influence of High Fin on Naca Airfoil 0018 On Performance Of H-Type Darrieus Wind Turbine. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2023;1265:012015.
- [26] Soetanto MF, Sugianto S, Hartono B. Numerical Study of Aerodynamic Characteristics of Airflow Around NACA 0012 and NACA 4412 Airfoils at Re= 170000. *Int J Appl Technol Res*. 2023;4:46-51.
- [27] Meana-Fernández A, Fontán-Díaz R, García-Martínez J, García-Rodríguez T, Fernández-Gamiz U. Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs. *Energy*. 2018;147:504-17.

- [28] Saad AS, Ahmed M. Effect of Twist Angle on the Performance of Darrieus Vertical Axis Wind Turbines. En: Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air; 2022 Jun 13-17; Rotterdam, Países Bajos. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2022. p. 86137.
- [29] Hassanzadeh R, Mohammadnejad M. Effects of inward and outward overlap ratios on the two-blade Savonius type of vertical axis wind turbine performance. Int J Green Energy. 2019;16:1485-96.
- [30] Jia R, Cao Z, Chen X, Liu Y. Optimal design of Savonius wind turbine blade based on support vector regression surrogate model and modified flower pollination algorithm. Energy Convers Manag. 2022;270:116247.
- [31] Kamoji MA, Kedare SB, Prabhu SV. Experimental investigation on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor. Int J Energy Res. 2008;32:877-95.
- [32] Mohamed MH, Ibrahim AK, Zaydan A. Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. Energy Convers Manag. 2011;52:236-42.
- [33] Biswas A, Gupta R, Sharma KK. Experimental investigation of overlap and Blockage effects on Three-Buckets Savonius Rotors. J Wind Energy. 2007;31:363-8.

Tabla de Roles de Contribución

Rol	Autor(es)
Conceptualización Metodología Administración del Proyecto	Tabata E. Anton Guzman, Alejandro Sanchez-Gomez
Curación de Datos	Alejandro Sanchez-Gomez, Donaldo Torres-Jimenez
Validación	Tabata E. Anton-Guzman, Fernando Montejo-Alvarado
Visualización	Ramón Román-Doval
Redacción, revisión y edición	Alejandro Sanchez-Gomez, Donaldo Torres-Jimenez
Recursos	Fernando Montejo-Alvarado



Esta obra está bajo
una licencia internacional
Creative Commons Atribución 4.0.