



Evaluación del coeficiente de potencia con esquemas DMST para rotores Darrieus con perfiles biomimetizados

Power coefficient evaluation with DMST schemes for Darrieus rotors with biomimetic airfoils

Sánchez-Pozos Miriam

Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

Correo: msanchezpo@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6528-5524>

López-Rebollar Boris Miguel

Universidad Autónoma del Estado de México

Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua

Correo: bmllopezr@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6914-0787>

Palacios-González J. Cuauhtémoc

Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

Correo: jcpalaciosg@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1876-6226>

Marín-Aguilar Julio Cesar

Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

Correo: jcmarina@uaemex.mx

<https://orcid.org/0009-0005-3500-2326>

Resumen

La eficiencia aerodinámica de los aerogeneradores de eje vertical, especialmente del tipo Darrieus, es transcendente para maximizar su rendimiento energético. Este estudio evalúa perfiles aerodinámicos NACA0018 orientado en la implementación de protuberancias biomimetizadas en el borde de ataque, inspiradas en las aletas dorsales de la ballena jorobada, conocidas por sus maniobras hidrodinámicas destacadas. Se recurrió a dos metodologías basadas en la teoría del Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST, por sus siglas en inglés). Se examinó y comparó el desempeño para rotores tripala rectos (tipo H). Se modificó el perfil aerodinámico con una función cosenoidal en el borde frontal y se realizaron simulaciones numéricas con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para determinar los coeficientes de arrastre y sustentación de los álabes individuales. Posteriormente, se aplicó la teoría del DMST para estimar los coeficientes de potencia (C_p) y evaluar la eficiencia del rotor. Los resultados mostraron variaciones en los C_p al emplear los dos esquemas DMST, destacándose diferencias apreciables en las gráficas $C_p - TSR$. Un método simplifica el modelado del flujo y ajusta el factor de inducción axial de manera menos rigurosa, resultando en estimaciones mayores del C_p . El otro método ofrece estimaciones más conservadoras y probablemente más precisas debido a una determinación más exhaustiva del factor de inducción axial. Aunque ambas metodologías presentan un patrón de comportamiento coherente en general, se identificaron diferencias sutiles cuando el TSR supera el 0.75, haciéndose notables cuando el TSR sobrepasa 1.75 con variaciones que alcanzan y superan 18 %. Estos hallazgos fomentan el avance en la comprensión y aplicación práctica de los métodos DMST en la aerodinámica de aeroturbinas, proporcionando conocimientos valiosos para futuras investigaciones y desarrollos en este campo.

Descriptores: Turbina Darrieus, ballena jorobada, tubérculo, CFD, simulación, DMST.

Abstract

The aerodynamic efficiency of vertical axis wind turbines, especially of the Darrieus type, is important to maximize their energy performance. This study evaluates NACA0018 aerodynamic profiles focused on the implementation of biomimetic tubercles on the leading edge, inspired by the dorsal fins of the humpback whale, known for their outstanding hydrodynamic maneuvers. Using two methodologies based on the Double Multiple Stream Tube (DMST) theory, the performance of straight-bladed (H-type) rotors was examined and compared. The aerodynamic profile was modified with a cosine function on the leading edge, and numerical simulations were performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) to determine the drag and lift coefficients of the individual blades. Subsequently, DMST theory was applied to estimate the power coefficients (C_p) and evaluate the rotor's efficiency. The results showed variations in C_p when using the two DMST schemes, with appreciable differences in the $C_p - TSR$ graphs. One method simplifies the flow modeling and adjusts the axial induction factor less rigorously, resulting in higher C_p estimates. The other method provides more conservative and probably more accurate estimates due to a more thorough determination of the axial induction factor. Although both methodologies present a generally consistent behavior pattern, subtle differences were identified when the TSR exceeds 0.75, becoming noticeable when the TSR surpasses 1.75, with variations reaching and exceeding 18 %. These findings promote advancements in the understanding and practical application of DMST methods in wind turbine aerodynamics, providing valuable understanding for future research and developments in this field.

Keywords: Darrieus turbine, humpback whale, tubercle, CFD, simulation, DMST.

INTRODUCCIÓN

La aerodinámica de los aerogeneradores de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés) ha avanzado notablemente, especialmente en el uso del modelo de Tubo Doble de Corriente Múltiple (DMST, acrónimo en inglés), reconocido por su bajo costo computacional, robustez y simplicidad (Moghimi & Motawej, 2020). El DMST divide el flujo en tubos adyacentes, cada uno con dos actuadores en tándem, uno corriente arriba y otro corriente abajo, permitiendo capturar condiciones cambiantes en los álabes y las diferencias del flujo entre las mitades frontal y posterior del rotor (Vu & Pham, 2020). No obstante, el modelo no considera ciertos efectos de flujo, como la expansión de los tubos, la interacción estela-álabe y la influencia de la mitad trasera del rotor sobre la delantera (Roy *et al.*, 2021). A pesar de estas limitaciones, el DMST sigue siendo una herramienta popular para el diseño de VAWT debido a su precisión en la predicción de parámetros promedio.

Diversos estudios han demostrado la eficacia del DMST en configuraciones VAWT. Dabachi *et al.* (2020), aplicaron el DMST en simulaciones de aeroturbinas flotantes Darrieus tipo H, evaluando factores críticos como la solidez de la turbina y el número de álabes. Moghimi & Motawej (2020) desarrollaron un modelo DMST para comparar el rendimiento de las turbinas eólicas Darrieus & Gorlov, mostrando una mayor eficiencia en la Gorlov. Ghiasi *et al.* (2022) evaluaron el impacto de variables como solidez, longitud de cuerda, número de álabes y relación de aspecto en el rendimiento de rotores Darrieus tipo H a bajos números de Reynolds, revelando cómo estos parámetros influyen en el desempeño. Asimismo, Vu & Pham (2020) incorporaron al DMST correcciones de estela y pérdida dinámica para investigar el rendimiento aerodinámico del VAWT tipo H. Destacan la relevancia de comparar métodos DMST para evaluar el efecto de modificaciones aerodinámicas en álabes de VAWT de baja potencia.

El uso de tubérculos inspirados en las aletas de la ballena jorobada en el borde de ataque de perfiles NACA ha mostrado mejoras aerodinámicas. Hrynuik & Bohl (2020) examinaron cómo estas protuberancias mejoraron la gestión de vórtices y separación del flujo en cambios significativos del ángulo de ataque. Açikel *et al.* (2022) identificaron que los tubérculos en el perfil NACA0012 reducían la separación del flujo, aumentando el rendimiento del álabe. Gopinathan & Ralphin (2023), concluyeron que las protuberancias en perfiles NACA0015 y NACA4415, mediante análisis numéricos y experimentales, optimizan la relación sustentación/arrastre antes del estancamiento y mejoran el rendimiento al incrementar la transferencia de momento en

regiones críticas de pérdida dinámica. Emam *et al.* (2021), y Khedr *et al.* (2021) analizaron el perfil S1223 y observaron que las protuberancias mejoran la sustentación y controlan el estancamiento en ángulos de ataque elevados, sin un aumento proporcional en el arrastre.

En rotores Darrieus H, Du *et al.* (2020), lograron un mejor autoarranque con álabes NACA0021 modificados con tubérculos sinusoidales en el borde de ataque. Mishra *et al.* (2022) confirmaron que las protuberancias con simulaciones numéricas y pruebas experimentales en álabes NACA0018, ofrecen ventajas en condiciones de baja velocidad del viento y ángulos de ataque elevados, donde el riesgo de estancamiento es crítico.

La selección de álabes es fundamental en el diseño de VAWT, ya que influye directamente en la eficiencia de captura de energía. El perfil simétrico NACA0018 destaca en turbinas Darrieus tipo H por su robustez y estabilidad ante fluctuaciones en la dirección del viento. Rogowski *et al.* (2021) señalaron que el 0018 supera en eficiencia a perfiles como el 0012, 0015 y 0021 a bajas y moderadas velocidades de viento. Rhenals *et al.* (2023) confirmaron su rendimiento óptimo en bajas velocidades, con una mejor relación sustentación/arrastre en comparación con los perfiles 0021 y 0025. Bozorgi & Zarei (2024) observaron que el perfil 0018 mantiene un equilibrio entre el coeficiente de potencia y la reducción de ruido, haciéndolo adecuado para aerogeneradores urbanos. Debido a su mayor grosor, el perfil 0018 es menos propenso a pérdidas súbitas de sustentación, ya que la separación de la capa límite ocurre de manera más gradual en comparación con perfiles delgados (Torabi, 2022). En conjunto, su rendimiento aerodinámico y adaptabilidad a condiciones de viento turbulento lo convierten en una opción adecuada para aeroturbinas Darrieus.

El análisis de álabes biomiméticos inspirados en la naturaleza, como las aletas de ballenas jorobadas, es una línea prometedora en la ingeniería de aeroturbinas. Estas adaptaciones pueden mejorar la eficiencia aerodinámica, y el modelo DMST es una herramienta analítica útil para evaluar su rendimiento en aplicaciones VAWT, superando las limitaciones de las teorías de *momentum* tradicionales (Ayati *et al.*, 2019).

Para evaluar y comparar la eficiencia de los perfiles aerodinámicos propuestos, se seleccionaron dos referencias clave como base teórica y metodológica. La primera, de Saber *et al.* (2018), aplicaron un modelo DMST modificado para predecir el rendimiento de rotores verticales rectos mediante ajustes en la modelación del flujo múltiple. La segunda, de Meana *et al.* (2018), realizaron un análisis numérico del rendimiento de aeroturbinas de eje vertical, proponiendo diseños óptimos tras una amplia exploración de parámetros.

El objetivo de este artículo fue explorar y comparar las dos metodologías antes mencionadas, aplicadas a perfiles NACA0018, modificados en el borde de ataque con una estructura bioinspirada en la aleta de la ballena jorobada, buscando mejorar la eficiencia aerodinámica en aeroturbinas Darrieus rectas. Por medio de simulaciones numéricas para determinar los coeficientes de sustentación y arrastre se utilizaron los esquemas DMST para calcular y comparar la eficiencia de ambos métodos, analizando las diferencias en los coeficientes de potencia en función de la relación de velocidad en la punta (TSR). Este enfoque permitió examinar las ventajas y limitaciones de cada método, ofreciendo alternativas para el diseño de álabes en rotores Darrieus tipo H.

DESARROLLO

MODIFICACIONES DEL BORDE DE ATAQUE

El perfil NACA0018 fue seleccionado por sus características simétricas y su uso frecuente en aerogeneradores de eje vertical, dada su robustez y eficiencia aerodinámica (Song *et al.*, 2020). Este perfil equilibra sustentación y arrastre, siendo idóneo para mejorar la eficiencia en aeroturbinas de baja potencia (Michna & Rogowski, 2022). Para potenciar estas propiedades, se introdujeron modificaciones en el borde de ataque inspiradas en las aletas de ballenas jorobadas. Chen *et al.* (2021). demostraron que estas adaptaciones pueden incrementar la eficiencia al fortalecer la sustentación y reducir el arrastre, especialmente bajo condiciones de flujo turbulento y números de Reynolds bajos.

La transformación del álabes comenzó obteniendo las coordenadas geométricas del perfil en AirfoilTools (2023), un recurso en línea para perfiles aerodinámicos. Estos datos se prepararon en un archivo digital y se importaron al software ANSYS-SpaceClaim® (Figura 1a), donde la envergadura (H) se definió en 0.5 m.

Para integrar la biomimética en el borde de ataque, se reconocieron tres parámetros clave: cuerda promedio ($\bar{c}$), amplitud (A) y longitud de onda (λ), como se muestra en la Figura 1c. Estos ajustes se implementaron mediante una función cosenoidal (Ecuación 1), siguiendo el modelo propuesto por Chen *et al.* (2020). Estas modificaciones se justifican por su capacidad para generar recirculaciones y estabilizar el campo de presión, reduciendo fluctuaciones y desprendimiento de flujo a números de Reynolds bajos, lo cual mejora el control del flujo y disminuye las pérdidas por arrastre en el álabes (Gepner & Floryan, 2023).

$$c(z) = \bar{c} - A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \quad (1)$$

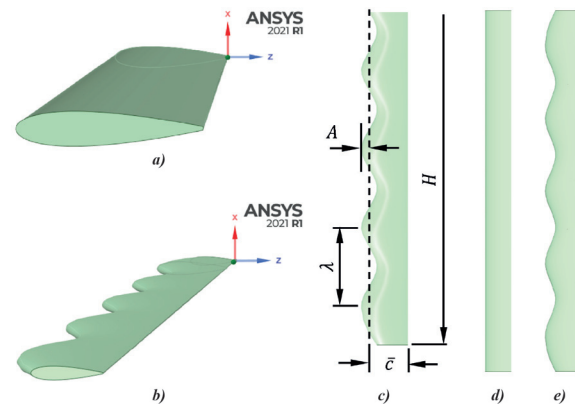


Figura 1. a) Representación tridimensional del perfil NACA0018; b) transformación del perfil con el contorno cosenoidal ($A/\bar{c} = 0.2$, $\lambda/\bar{c} = 4$); c) parámetros geométricos en el borde de ataque con protuberancias biomiméticas; d) álabes sin modificar; e) perfil con función cosenoidal adoptada ($A/\bar{c} = 0.2$, $\lambda/\bar{c} = 4$)

La Tabla 1 detalla las configuraciones evaluadas en las simulaciones numéricas. Las relaciones $A/\bar{c}$ y $\lambda/\bar{c}$ permiten una comparación estandarizada entre las distintas geometrías, facilitando el análisis del impacto de las proporciones relativas en las propiedades aerodinámicas del álabes. La Figura 1b ilustra una de las propuestas, mostrando cómo se incorporan las adaptaciones biomiméticas al perfil. Las Figuras 1d-e ofrecen una comparación visual entre los álabes con y sin tubérculos, respectivamente. El perfil original presenta un borde de ataque liso, mientras que el álabes modificado muestra un borde ondulado con modulaciones cosenoidales de amplitud y longitud de onda mencionadas.

Tabla 1. Parámetros de diseño para las configuraciones de álabes biomiméticos

$\bar{c}$ [m]	H [m]	A [m]	λ [m]	$A/\bar{c}$ [-]	$\lambda/\bar{c}$ [-]
0.025	0.5	0.0125, 0.0025, 0.005	0.025, 0.05, 0.1	0.05, 0.1, 0.2	1, 2, 4

DOMINIO COMPUTACIONAL

Se empleó un bloque rectangular para el dominio computacional, facilitando la implementación de condiciones de flujo uniforme en la entrada y presión atmosférica en la salida, replicando un entorno de flujo libre alrededor del perfil aerodinámico en un túnel de viento, ideal para futuras validaciones experimentales. En la dirección longitudinal, el dominio se extendió a $5\bar{c}$ para permitir que el flujo se desarrolle adecuadamente antes de interactuar con el álabes y que la estela se disipe de forma realista detrás del álabes. En la dirección transversal, se extendió a $2\bar{c}$ para evitar interferencias en los bordes laterales, garantizando condiciones de flujo libre. El álabes se colocó a una distancia de $1\bar{c}$ desde

la frontera de entrada hasta su borde de ataque. La Figura 2 esboza un esquema de estas dimensiones.

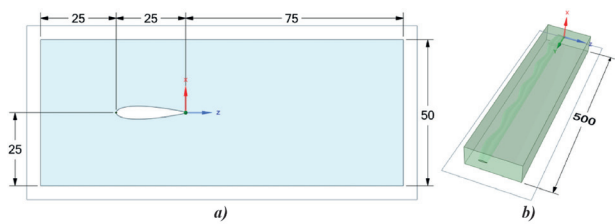


Figura 2. Configuración espacial del modelo computacional del perfil NACA0018 (medidas en milímetros): a) corte transversal y b) vista tridimensional

CONDICIONES DE FRONTERA

La Tabla 2 resume las condiciones de frontera designadas, especificando la superficie correspondiente, el tipo de condición aplicada y los parámetros relevantes. Las Figuras 3a y b, muestran la disposición espacial de estas condiciones dentro del dominio computacional.

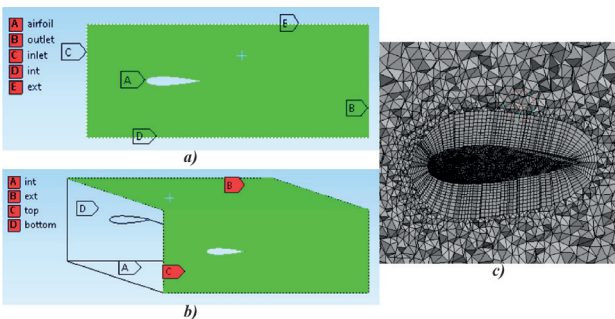


Figura 3. Esquema del dominio computacional con las condiciones de frontera; a) vista lateral bidimensional; b) vista tridimensional; c) malla no estructurada con refinamiento cerca del perfil (hexaedros) y los elementos tetraédricos en el resto del dominio

GENERACIÓN DE LA MALLA

Es un paso crítico en la simulación CFD, que afecta directamente los resultados. Se utilizó una combinación de elementos hexaédricos cerca del álabe y tetraédricos en el resto del dominio, propiciando la adaptación a formas irregulares y permitiendo refinamientos locales en áreas con gradientes significativos. El tamaño global de la malla se eligió para equilibrar la resolución de fenómenos de flujo clave y los recursos computacionales. La malla se extendió de forma que permitiera una transición suave alrededor del álabe hacia las fronteras del dominio. En la región cercana al perfil, se empleó una malla más densa, aplicando el valor adimensional del espesor de la capa límite (y^+) cercano a 1 para resolver la subcapa viscosa, lo cual permite la captura de gradientes de velocidad y presión en estas regiones críticas. Para ello, se implementaron capas de resolución (o inflación) con una configuración específica de los parámetros y_{H^+} , N y G (Tabla 3). El análisis de sensibilidad se realizó con simulaciones a distintas densidades de malla, hasta encontrar un punto donde las variaciones en el tamaño de los elementos no afectaran significativamente los resultados. La malla final, con más de 7×10^6 elementos, garantizó una buena convergencia en los coeficientes de sustentación y arrastre. La Tabla 3 sintetiza los parámetros clave de la malla, mientras que la Figura 3c refleja la implementación de estos controles.

PARÁMETROS DEL SOLUCIONADOR

Para realizar las simulaciones numéricas en la evaluación del desempeño de perfiles aerodinámicos, es fundamental la adecuada disposición de los parámetros del solucionador en ANSYS-Fluent. La Tabla 4 resume

Tabla 2. Condiciones de frontera dentro del dominio computacional

Superficie del dominio	Tipo de condición	Parámetros para especificar
inlet	Velocidad de entrada	1.7 m/s
		Intensidad de la turbulencia (I) = 0.3 %
		Viscosidad turbulenta (μ_t) = 5
outlet	Presión de salida	0 Pa (man)
		Intensidad de la turbulencia (I) = 5 %
		Viscosidad turbulenta (μ_t) = 10
int	Simetría	Sin fricción lateral
ext		
top		
bottom		
airfoil	Pared	No deslizamiento

Tabla 3. Controles de malla adoptados en las simulaciones

Dimensionamientos globales			Observaciones
Parámetro		Valor	Con esta configuración, la calidad de la malla (álabe liso con $\alpha = 0^\circ$) tuvo las siguientes métricas:
Elemento		3.5 mm	
Tasa de crecimiento		1.1	
Máximo		3.5 mm	
Simplificación (Defeature)		0.1 mm	
Curvatura mínima		0.2 mm	Calidad Ortogonal:
Dimensionamientos locales			
Parámetro		Valor	Mín.: 0.1036
Tamaño de cara	Elemento	0.5 mm	Máx.: 0.9981
	Capturar curvatura	Si	Prom.: 0.7553
Capas de resolución (o de inflación)	Altura de la primera capa (y_H)	0.256 mm	σ : 0.1443
	Capas máximas (N)	11	Según el espectro de calidad recomendado por ANSYS (2015), esta malla puede considerarse de buena a muy buena
	Tasa de crecimiento (G)	1.07	

estos elementos seleccionados para capturar lo más cercano posible las condiciones físicas del sistema y garantizar la confiabilidad de los resultados.

APLICACIÓN DEL DMST

El modelo Tubo Doble de Corriente Múltiple (Double Multiple Stream Tube, DMST) es una herramienta para analizar el rendimiento aerodinámico de rotores Darrieus (Jang *et al.*, 2021), que permite calcular con preci-

sión los coeficientes de potencia (C_p) mediante una perspectiva que contempla múltiples tubos de flujo en ambas mitades de la aeroturbina (corrientes arriba y abajo), ofreciendo predicciones de eficiencia energética aceptables. Al combinar el análisis de flujo computacional (CFD) con el DMST, es posible evaluar cómo las modificaciones afectan los coeficientes C_L y C_D en una amplia gama de ángulos de ataque, generando datos que reflejan el comportamiento del rotor bajo diversas condiciones operativas. Esta metodología híbrida no

Tabla 4. Parámetros del solucionador en el software CFD

Elemento	Conformación
Modelo de turbulencia	SST $k - \omega$
Verificación de número de Reynolds bajo	Activada para régimen laminar y poco turbulento (low-Re)
Velocidad del flujo (V_∞)	1.7 m/s
Densidad del aire (ρ)	0.92 kg/m ³
Viscosidad absoluta del aire (μ)	1.79 $\times 10^{-5}$ Pa·s
Número de Reynolds (Re)	2184 (régimen laminar, $Re < 5 \times 10^5$)
Número de Mach (Ma)	0.00496 (< 0.3)
Condición de flujo	Incompresible (flujo subsónico)
Esquema de discretización	Segundo orden para todas las variables de flujo
Método de resolución de presión y velocidad	Método acoplado
Método para el cálculo de gradientes	Mínimos cuadrados basado en celdas
Umbral de residuales	1 $\times 10^{-3}$ para variables de flujo, 1 $\times 10^{-6}$ para continuidad
Monitores de convergencia	Coefficientes de arrastre (C_D) y sustentación (C_L), tasa de flujo de masa, promedios ponderados por área y masa (campo de velocidad, y^+ y energía cinética turbulenta (k))
Iteraciones para estado estacionario	Cerca de 300 iteraciones

solo optimiza el tiempo de cálculo del C_p , sino que también ayuda a identificar condiciones que maximizan la eficiencia energética (Bangga *et al.*, 2019).

En el análisis aerodinámico de aerogeneradores Darrieus, diversos estudios han evolucionado el DMST con variantes que mejoran su precisión. Para este estudio, fueron implementados dos procedimientos DMST para analizar los rotores. El primero, adaptado de Saber *et al.* (2018), que hicieron la estimación del C_p mediante ajustes en el cálculo de la velocidad inducida del aire, revisando críticamente las suposiciones tradicionales del DMST a partir de observaciones experimentales y numéricas. El segundo, de Meana *et al.* (2018), quienes realizaron una evaluación paramétrica de variables aerodinámicas y geométricas para identificar configuraciones de álabes y condiciones de funcionamiento ideales.

Los procedimientos DMST empleados se condensan en los diagramas de flujo de la Figura 4a y b. Las variables, en ambos métodos, incluyen las dos mitades del rotor y comprenden: factores de inducción axial (a, a' , u_1, u'_1, u_2, u'_2); velocidades inducidas (V_r, V'_r, V_1, V_2), re-

lativas (V_r, V'_r, W_1, W_2) y de equilibrio ($V_e = V'_e$, en la mitad del rotor); ángulos de ataque ($\alpha, \alpha', \alpha_1, \alpha_2$); coeficientes de fuerza normal ($C_n, C'_n, C_{N1}, C_{N2}$) y tangencial ($C_t, C'_t, C_{T1}, C_{T2}$) del álabes individual; coeficientes de empujes basados en el *momentum* del elemento de pala y del disco actuador (C_{T-BEM}, C_{T-Mom}); factores de arrastre del disco actuador (f_{up}, f_{dw}); pares de torsión instantáneo (Q_i), de una sección del perfil (T_{S1}, T_{S2}), de un solo álabes (T_{B1}, T_{B2}), de cada mitad del rotor (T_1, T_2) y promedio de la aeroturbina (Q_{avg}); potencias parciales (P_1, P_2) y total (P) de la turbina; y los coeficientes de momento (C_Q) y de potencia (C_p). Las ecuaciones que relacionan estas variables en cada método se detallan en los anexos.

El método DMST es un proceso iterativo para modelar la interacción entre el rotor y el flujo de aire incidente. Aunque cada variante de DMST puede diferir en su implementación específica, existen ciertos factores fundamentales en la operación de la aeroturbina. La Tabla 5 resume estos factores relevantes para ambos estudios, mientras que la Figura 5 representa un esquema de las variables implicadas.

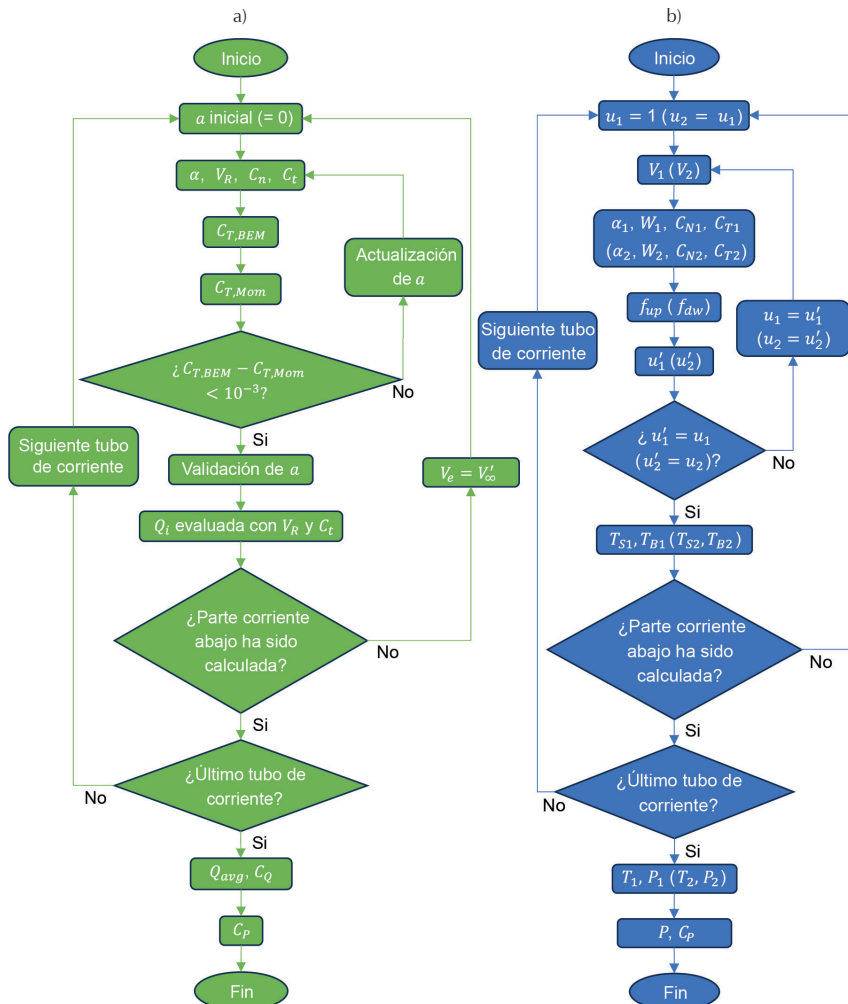


Figura 4. Diagramas de flujo de los modelos DMST utilizados en el estudio: a) modelo de Saber *et al.* (2018); b) modelo de Meana *et al.* (2018). Los subíndices 1 y 2 corresponden a las partes de los tubos de flujo corriente arriba y corriente abajo, respectivamente

Tabla 5. Condiciones de operación del rotor para su implementación en los diferentes métodos DMST

Radio del rotor (R)[m]	Número de álabes en la aeroturbina (B)[-]	Altura o envergadura del rotor (H)[m]	Incremento angular azimutal ($\Delta\theta$)[°]	Elementos verticales de tamaño (ΔH) (N_s)[-]	Tubos de corriente, sin dividir (N_i o m)[-]	Velocidad del flujo (V_∞)[m/s]
0.2	3	0.5	20	1	9	1.7

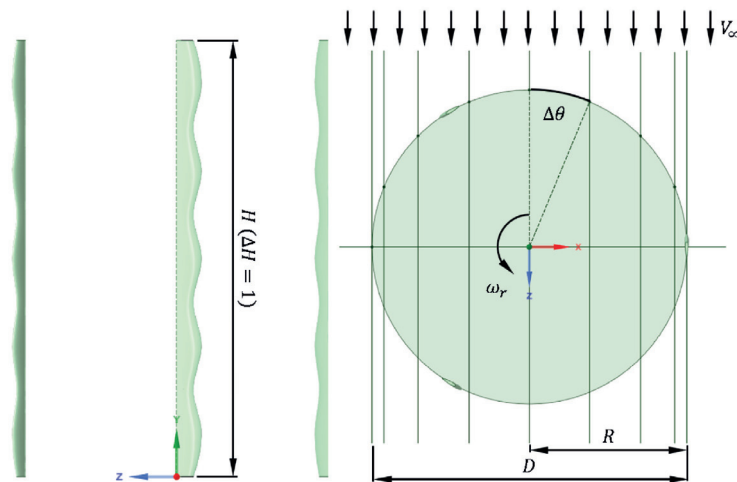


Figura 5. Representación de los parámetros esenciales para los métodos DMST: a) vista lateral del rotor mostrando el número de álabes ($B = 3$), la altura del rotor (H) y la división de vertical (ΔH); b) vista superior de la aeroturbina indicando velocidad de la corriente libre (V_∞), velocidad angular del rotor (ω_r), número de tubos de corriente ($m = 9$), incremento angular azimutal entre cada tubo ($\Delta\theta = 20^\circ$), radio (R) y diámetro (D) de la aeroturbina

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

COMPARACIÓN DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS

Los coeficientes de arrastre (C_D) y sustentación (C_L) son indicadores del rendimiento aerodinámico de los álabes en aeroturbinas. Analizar cómo estos coeficientes varían con el ángulo de ataque (α) permite evaluar y optimizar los diseños del perfil para mejorar la eficiencia del rotor. Las simulaciones registraron la variación de C_D y C_L mediante la rotación de los perfiles en incrementos de 20° y, en los intervalos de $[0^\circ, 20^\circ]$ y $[340^\circ, 360^\circ]$, en pasos más finos de 5° .

La Figura 6 indica que los perfiles siguen tendencias similares en la variación del C_D respecto a α , aunque con diferencias significativas en ciertos rangos angulares. La configuración $A/\bar{c} = 0.2$, $\lambda/\bar{c} = 4$ destacó por sus valores más bajos del C_D en los intervalos de $[60^\circ, 120^\circ]$ y $[240^\circ, 300^\circ]$, sugiriendo una ventaja aerodinámica en estos rangos. Esto es particularmente relevante para aerogeneradores de eje vertical, donde el rotor se enfrenta a un amplio rango de ángulos de ataque durante su rotación.

La Figura 7 presenta las gráficas $C_L - \alpha$ para los diferentes perfiles, mostrando patrones similares a los observados en C_D . En particular, las configuraciones $A/\bar{c} = 0.05$, $\lambda/\bar{c} = 4$ y $A/\bar{c} = 0.2$, $\lambda/\bar{c} = 4$ exhibieron comportamientos similares en los intervalos de $[60^\circ, 120^\circ]$ y $[240^\circ, 300^\circ]$, lo que sugiere que combinaciones de protuberan-

cias con amplitud baja a moderada y longitud de onda alta pueden optimizar la sustentación sin aumentar significativamente el arrastre.

Las tendencias generales de los coeficientes C_D y C_L fueron consistentes entre los perfiles examinados; aunque las diferencias fueron moderadas, podrían influir en la potencia generada. Ajustes planificados cuidadosamente en los álabes pueden, por tanto, mejorar considerablemente la eficiencia de aeroturbinas verticales de baja potencia a largo plazo.

La investigación de Espada (2011) sobre la morfología de las aletas ventrales de la ballena jorobada reveló que, en ensayos en túneles de viento, un perfil NACA4415 con tubérculos experimentó una pérdida de sustentación gradual frente a uno liso, reduciendo el riesgo de pérdida dinámica repentina en ángulos de ataque altos ($> 15^\circ$). Este hallazgo sugiere que, en aplicaciones que requieren estabilidad en estos ángulos críticos, los tubérculos con longitud de onda corta y amplitud moderada son más efectivos. En cambio, tubérculos de mayor amplitud suavizan la pérdida dinámica, aunque disminuyen ligeramente el coeficiente máximo de sustentación. Aunque Espada (2011) trabajó con un perfil y números de Reynolds distintos respecto al modelo aquí estudiado, los efectos observados en la reducción de la pérdida dinámica son comparables, lo que refuerza la importancia de la configuración geométrica óptima del álabes en su desempeño (Figura 7).

COMPARACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE POTENCIA

La evaluación de los coeficientes de potencia (C_p) de las turbinas Darrieus rectas, usando tanto álabes estándar como modificados, se realizó con los esquemas DMST propuestos, variando la relación de velocidad en la punta (TSR , por sus siglas en inglés). Esto permite ana-

lizar cómo distintas geometrías de perfil afectan la eficiencia de los rotores. Las Figuras 8 y 9 ilustran los valores de los C_p obtenidos para aeroturbinas con y sin protuberancias, de acuerdo con los procedimientos descritos en ambos estudios. Las gráficas muestran patrones de comportamiento similares en la variación del C_p para cada configuración de perfil.

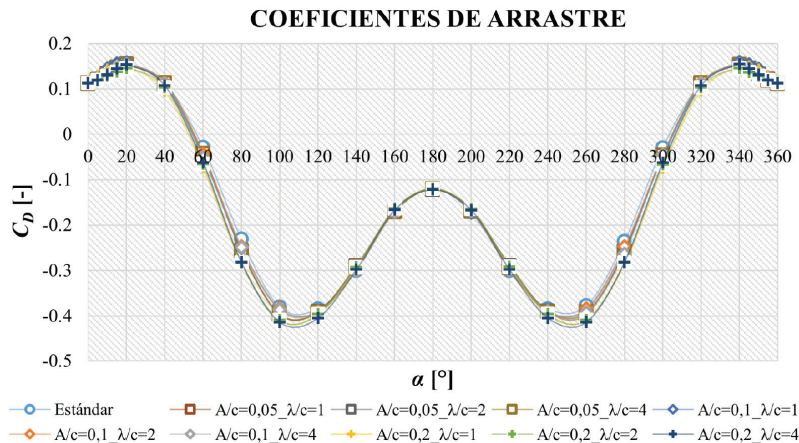


Figura 6. Coeficientes de arrastre respecto al ángulo de ataque obtenidos en las simulaciones

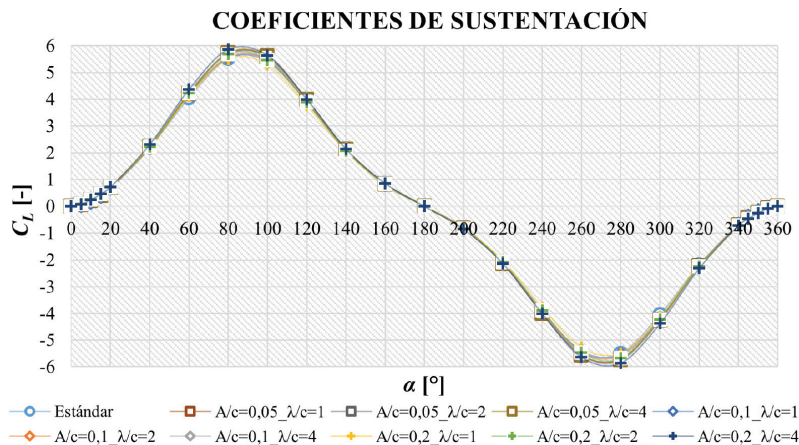


Figura 7. Coeficientes de sustentación en relación con el ángulo de ataque obtenidos en las simulaciones

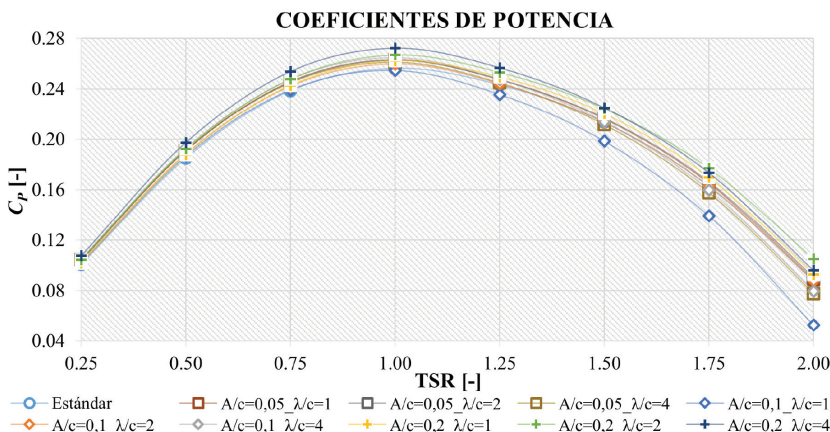


Figura 8. Visualización comparativa de las gráficas $C_p - TSR$ según las distintas configuraciones de rotores, siguiendo la metodología de Saber et al. (2018)

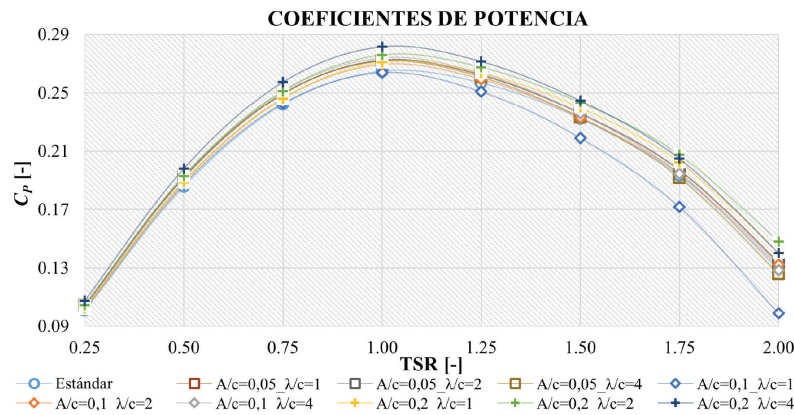


Figura 9. Conjunto de curvas de $C_p - TSR$ que ilustran las diferencias entre el rendimiento de las aeroturbinas, conforme al estudio de Meana *et al.* (2018)

Al profundizar en las geometrías de los álabes se observa un patrón claro de optimización del rendimiento aerodinámico. Específicamente, la configuración geométrica del tubérculo $A/\bar{c} = 0.2$ $\lambda/\bar{c} = 4$ es la más eficaz, mientras que la menos favorable es $A/\bar{c} = 0.1$ $\lambda/\bar{c} = 1$. Esta distinción en rendimiento (gráficamente) se refleja consistentemente en ambos esquemas (Figura 10). La superioridad de la configuración con mayor amplitud y longitud de onda destaca la ventaja aerodinámica de adaptar el perfil de los álabes para replicar características naturales.

Sin embargo, al comparar las aeroturbinas con álabes sin modificar y aquellas con desempeño mejorado (Figura 11) revelaron diferencias en las gráficas del C_p cuando la TSR supera 0.75. Específicamente, el método de Meana *et al.* (2018) tiende a ofrecer estimaciones más elevadas del C_p comparado con el análisis de Saber *et al.* (2018) al cruzar este umbral, lo cual sugiere que las variaciones en las técnicas de cálculo pueden resultar en valoraciones más optimistas de la eficiencia energética en determinadas condiciones. Tales diferencias subrayan la importancia de un análisis crítico y validación exhaustiva de los modelos de predicción aerodinámica,

especialmente al informar decisiones de diseño y mejoras en aeroturbinas.

Para una visión detallada de las diferencias en los coeficientes C_p obtenidos con ambos métodos, la Tabla 6 muestra el error relativo en el C_p para valores de TSR que van de 0.25 a 2.00, abarcando configuraciones geométricas de tubérculos caracterizadas por los parámetros $A/\bar{c}$ (0.05 a 0.2) y $\lambda/\bar{c}$ (1 a 4). Usando el enfoque de Saber *et al.* (2018) como referencia, se ve que en el rango de la TSR entre 0.25 y 0.75 los errores relativos son mínimos (menos de 2 %) para todas las configuraciones, indicando coherencia entre ambos métodos en condiciones de relaciones de velocidad baja. Esto refleja una fuerte correlación entre los esquemas en el extremo inferior del rango de la TSR .

A medida que aumenta la TSR , el error relativo entre los métodos crece, volviéndose notable alrededor de 1.50. En el rango de 1.75 a 2.00, los errores relativos son relevantes, especialmente para la configuración $A/\bar{c} = 0.1$ $\lambda/\bar{c} = 1$, donde las diferencias alcanzan hasta un 87.5 %. Esto indica una tendencia del esquema de Meana *et al.* (2018) a suministrar valores más altos del C_p en comparación con el enfoque de Saber *et al.* (2018) particularmente en condiciones de velocidad rotacional elevada.

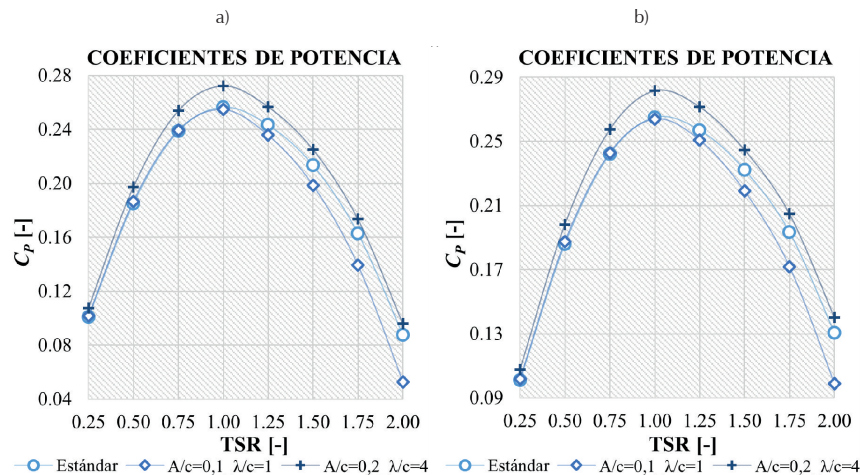


Figura 10. Comparación de curvas del C_p entre aeroturbinas seleccionadas por su rendimiento (alto: $A/\bar{c} = 0.2$ $\lambda/\bar{c} = 4$; bajo: $A/\bar{c} = 0.1$ $\lambda/\bar{c} = 1$) y la configuración sin modificar: a) método de Saber *et al.* (2018); b) método de Meana *et al.* (2018)

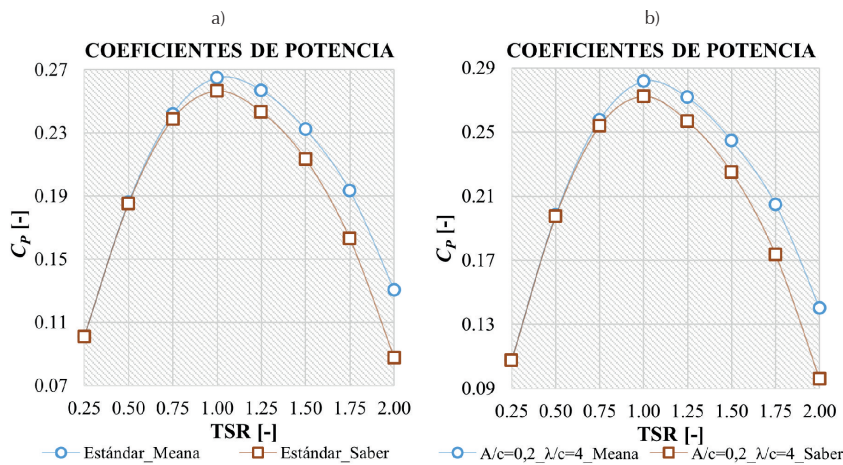


Figura 11. Comparación de las curvas del C_p de las turbinas eólicas según los métodos de Meana *et al.* (2018) y Saber *et al.* (2018): a) perfiles sin modificar; b) perfiles modificados

Los resultados de la Tabla 6 enfatizan la relevancia de elegir cuidadosamente el método de cálculo del C_p al diseñar y evaluar el rendimiento de rotores Darrieus a lo largo de un amplio rango de la TSR . Esta comparación sugiere que la elección de metodologías para estimar eficiencias debe basarse en una comprensión clara de su precisión dentro del rango específico de condiciones de funcionamiento.

La predisposición a valores del C_p mayores identificadas en el método de Meana *et al.* (2018) podría deberse a las diferencias en las metodologías y premisas de cada modelo, especialmente en los criterios para definir el factor de inducción axial en cada fase de los tubos de corriente. Las simplificaciones del modelo de Meana *et al.* (2018) pueden conducir a valores más altos del C_p , especialmente en TSR elevados, donde el flujo es más complejo y menos ideal. En contraste, el enfoque más detallado de Saber *et al.* (2018) proporciona estimaciones más conservadoras, pero probablemente más precisas. Es importante tener en cuenta estas diferencias al

evaluar el rendimiento energético, especialmente en las fases de diseño y mejora de aeroturbinas. Una estimación precisa del desempeño es fundamental para desarrollar soluciones efectivas y eficientes.

CONCLUSIONES

Este estudio comparó los coeficientes aerodinámicos y de potencia de aeroturbinas Darrieus H de baja potencia, con álabes estándar y modificados, empleando los métodos DMST de Saber *et al.* (2018) y Meana *et al.* (2018). La incorporación de protuberancias en los álabes mejoró el rendimiento aerodinámico al reducir el arrastre y aumentar la sustentación, reduciendo la separación de flujo en ángulos de ataque elevados.

La configuración geométrica $A/\bar{c} = 0.2$, $\lambda/\bar{c} = 4$ mostró el mejor desempeño en el C_p , mientras $A/\bar{c} = 0.1$, $\lambda/\bar{c} = 1$ tuvo el más bajo, resaltando la importancia de una selección precisa de parámetros de diseño. Para la TSR superior a 1.50, el método de Meana *et al.* (2018)

Tabla 6. Comparativa de los errores relativos expresados en porcentaje de los coeficientes de potencia obtenidos mediante el método de Meana *et al.* (2018), en comparación con los valores referenciales obtenidos del esquema de Saber *et al.* (2018)

Parámetros geométricos de los tubérculos											
TSR	$A/\bar{c}$	Liso	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
	$\lambda/\bar{c}$	Liso	1	2	4	1	2	4	1	2	4
	0.25	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
	0.50	0.5	0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
	0.75	1.4	1.5	1.7	1.9	1.5	1.6	1.5	1.4	1.5	1.5
	1.00	3.3	3.6	3.7	4.1	3.6	3.8	3.5	3.3	3.4	3.5
	1.25	5.6	6.1	5.9	6.6	6.4	6.2	6.5	5.7	5.7	5.8
	1.50	8.8	9.1	8.7	10.2	10.3	9.2	10.3	8.9	8.5	8.8
	1.75	18.7	19.3	18.3	21.7	23.4	19.2	21.9	19.2	17.3	18.1
	2.00	49.0	51.1	47.5	62.5	87.5	50.5	61.4	51.3	41.0	45.9

tiende a ofrecer valores del C_p mayores que el de Saber *et al.* (2018) indicando la necesidad de un enfoque crítico en la elección de metodologías para predecir el desempeño de la aeroturbina. En conjunto, estos resultados destacan el potencial de las adaptaciones geométricas pasivas biomiméticas para mejorar la eficiencia del rotor de eje vertical.

REFERENCIAS

- Açikel, H. H., Tosun, M., Genç, M. S., & Koca, K. (2022). Numerical investigation on NACA0012 airfoil with tubercular structure. EPJ Web of Conferences, 269, 01001. Recuperado de <http://doi:10.1051/epjconf/202226901001>
- Airfoil Tools. (2023). Airfoil tools website. Recuperado el 16 enero de 2023 de <http://airfoiltools.com/>
- ANSYS Inc. (2015). Lecture 7: Mesh quality & advanced topics. Recuperado el 28 julio de 2023 de https://featips.com/wp-content/uploads/2021/05/Mesh-Intro_16.0_L07_Mesh_Quality_and_Advanced_Topics.pdf
- Ayati, A. A., Steiros, K., Miller, M. A., Duvvuri, S., & Hultmark, M. (2019). A double-multiple streamtube model for vertical axis wind turbines of arbitrary rotor loading. *Wind Energy Science*, 4(4), 653-662. <http://doi:10.5194/wes-4-653-2019>
- Bangga, G., Dessoky, A., Lutz, T., & Krämer, E. (2019). Improved double-multiple-streamtube approach for H-Darrieus vertical axis wind turbine computations. *Energy*, 182, 673-688. <http://doi:10.1016/j.energy.2019.06.083>
- Bozorgi, A., & Zarei, M. J. (2024). Effect of blade thickness on noise pollution of H-type Darrieus wind turbines: A numerical study. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 15(1), 56-66. <http://doi:10.5829/IJEE.2024.15.01.06>
- Chen, S., Liu, Y., Han, C., Yan, S., & Hong, Z. (2021). Numerical investigation of turbine blades with leading-edge tubercles in uniform current. *Water*, 13(16), 2205. <http://doi:10.3390/w13162205>
- Chen, W., Qiao, W., & Wei, Z. (2020). Aerodynamic performance and wake development of airfoils with wavy leading edges. *Aerospace Science and Technology*, 106, 106216. <http://doi:10.1016/j.ast.2020.106216>
- Dabachi, M. A., Rahmouni, A., Rusu, E., & Bouksour, O. (2020). Aerodynamic simulations for floating darrieus-type wind turbines with three-stage rotors. *Inventions*, 5(2), 18. <http://doi:10.3390/inventions5020018>
- Du, L., Dominy, R. G., & Ingram, G. (2020). Experimental investigation of the performance of H-Darrieus wind turbines with tubercle leading edge blades. American Society of Mechanical Engineers. *Wind Energy*, 12. <https://doi.org/10.1115/GT2020-14156>
- Emam, A., Wahba, E. M., & Adam, I. G. (2021). Experimental investigation for the influences of bio-inspired tubercles length on aerodynamic performance of highly cambered airfoils in low-re transient-flow regime. In 2021 6th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (IC-MERR) 77-82. IEEE. Recuperado de <http://doi:10.1109/ICMERR54363.2021.9680824>
- Espada, D. R. (2011). *Aerodynamic assessment of humpback whale ventral fin shapes*. Terrassa.
- Gepner, S. W., & Floryan, J. M. (2023). Flow dynamics in sinusoidal channels at moderate Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 972, A22. <http://doi:10.1017/jfm.2023.719>
- Ghiasi, P., Najafi, G., Ghobadian, B., Jafari, A., & Mazlan, M. (2022). Analytical study of the impact of solidity, chord length, number of blades, aspect ratio and airfoil type on H-Rotor Darrieus wind turbine performance at low reynolds number. *Sustainability*, 14(5), 2623. <http://doi:10.3390/su14052623>
- Gopinathan, V. T., & Ralphin-Rose, J. B. (2023). Aerodynamic performance characterization of bio-inspired wings with leading edge tubercles at low Reynolds number. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G. *Journal of Aerospace Engineering*, 237(3), 561-586. <http://doi:10.1177/09544100221103737>
- Hryniuk, J. T., & Bohl, D. G. (2020). The effects of leading-edge tubercles on dynamic stall. *Journal of Fluid Mechanics*, 893, A5. <http://doi:10.1017/JFM.2020.216>
- Jang, H., Hwang, Y., Paek, I., & Lim, S. (2021). Performance evaluation and validation of h-darrieus small vertical axis wind turbine. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(6), 1687-1697. <http://doi:10.1007/s40684-021-00316-9>
- Meana, A., Solís, I., Fernández, J. M., Argüelles, K. M., & Velarde, S. (2018). Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs. *Energy*, 147, 504-517. <http://doi:10.1016/j.energy.2018.01.062>
- Michna, J., & Rogowski, K. (2022). Numerical study of the effect of the reynolds number and the turbulence intensity on the performance of the NACA 0018 airfoil at the low reynolds number regime. *Processes*, 10(5), 1004. <http://doi:10.3390/pr10051004>
- Mishra, N., Prakash, P., Gupta, A. S., Dawar, J., Kumar, A., & Mishra, S. (2022). Numerical and experimental investigations on a bio-inspired design of Darrieus vertical axis wind turbine blades with leading edge tubercles, 211-224. <http://doi:10.4018/978-1-7998-8561-0.ch010>
- Moghim, M., & Motawej, H. (2020). Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100616. <http://doi:10.1016/j.seta.2019.100616>
- Rhenals, J. D., D., O., G.-Vidal, L., Martínez, A., & M.-Mendoza, J. (2023). Fluid dynamic design of a vertical axis wind turbine rotor under low wind speed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 18(18), 2088-2093. <http://doi:10.59018/0923256>
- Rogowski, K., Królak, G., & Bangga, G. (2021). Numerical study on the aerodynamic characteristics of the NACA 0018 airfoil at low reynolds number for darrieus wind turbines using the

- transition SST Model. *Processes*, 9(3), 477. <http://doi:10.3390/pr9030477>
- Roy, L., Kincaid, K., Mahmud, R., & MacPhee, D. W. (2021). Double-multiple streamtube analysis of a flexible vertical axis wind turbine. *Fluids*, 6(3), 118. <http://doi:10.3390/fluids6030118>
- Saber, E., Afify, R., & Elgamel, H. (2018). Performance of SB-VAWT using a modified double multiple streamtube model. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 3099-3110. <http://doi:10.1016/j.aej.2018.07.009>
- Song, C., Wu, G., Zhu, W., & Zhang, X. (2020). Study on aerodynamic characteristics of darrieus vertical axis wind turbines with different airfoil maximum thicknesses through computational fluid dynamics. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(2), 689-698. <http://doi:10.1007/s13369-019-04127-8>
- Torabi, F. (2022). Basics of aerodynamics. In *Fundamentals of wind farm aerodynamic layout design*, 77-109. Elsevier. Recuperado de <http://doi:10.1016/B978-0-12-823016-9.00009-7>
- Vu, A. N., & Pham, N. S. (2020). Double multiple stream tube theory coupled with dynamic stall and wake correction for aerodynamic investigation of vertical axis wind turbine. *Science and Technology Development Journal*, 23(4), 771-780. <http://doi:10.32508/stdj.v23i4.2396>

Cómo citar:

Sánchez-Pozos, M., López-Rebollar, B. M., Palacios-González, J. C., & Marín-Aguilar, J. C. (2025). Evaluación del coeficiente de potencia con esquemas DMST para rotores Darrieus con perfiles biomimetizados. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(01), 1-12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.1.004>