

Análisis aerodinámico de aerogeneradores de eje vertical Darrieus

Aerodynamic Analysis of Darrieus Vertical-Axis Wind Turbines

✉ Ariel Mulet-Méndez¹* and ✉ Efraín Navarro-Hernández²

¹Empresa Metal-Mecánica Varona, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba. E-mail: muletmendez@gmail.com

²Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" - CUJAE,
Facultad de Mecánica, Marianao, La Habana. Cuba. E-mail: efrainh@mecanica.cujae.edu.cu

*Autor para correspondencia: muletmendez@gmail.com

RESUMEN: Las turbinas eólicas de eje vertical poseen características que las hacen ideales para aplicaciones rurales y urbanas; a baja altura y con bajas velocidades del viento. Surge así la idea de desarrollar turbinas eólicas verticales en Cuba. Sin embargo, no se cuenta con una tecnología autóctona estructurada para la concepción, diseño, fabricación e instalación de turbinas eólicas verticales. Por esto se plantea el problema científico: "Como contribuir a la elaboración de una tecnología autóctona para la fabricación de turbinas eólicas verticales". Este trabajo se realiza con la finalidad de "Analizar la aerodinámica en el diseño de turbinas eólicas verticales de baja potencia". Basado en el estudio de los referentes, se eligió diseñar una turbina Darrieus tipo H. Para evaluar el rendimiento de las turbinas se empleó como herramienta software Qblade v0.96 soportada en la simulación DMS. Los resultados alcanzados en la investigación determinan potencias nominales de hasta 1.1-1.4 kW conforme a los diseños de rotores propuestos.

Palabras clave: Turbinas eólicas verticales, Double Multiple Streamtube (DMS), energía eólica.

ABSTRACT: Vertical-axis wind turbines (VAWTs) have characteristics that make them ideal for rural and urban applications, especially at low heights and under low wind speed conditions. This led to the idea of developing VAWTs using indigenous technology in Cuba. However, there is currently no established local technology for the conception, design, manufacture, and installation of such systems. This research was conducted with the objective of analyzing the aerodynamics involved in the design of low-power Darrieus-type vertical-axis wind turbines. Based on a review of relevant literature, a Darrieus H-type turbine was selected for design and performance evaluation using the QBlade v0.96 software, which applies the Double Multiple Streamtube (DMS) simulation model. The results obtained from the study indicate nominal power outputs ranging from 1.1 to 1.4 kW, depending on the proposed rotor configurations.

Keywords: Vertical Wind Turbines, Double Multiple Streamtube (DMS), Wind Power.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global acelerado provocado por la acción del hombre con la emisión excesiva de gases de efecto invernadero a la atmósfera de la tierra (Meneses-Ruiz et al., 2018). La emisión de gases de efecto invernadero es producida en parte por la quema de combustibles fósiles derivados del petróleo (Meneses-Ruiz et al., 2018). Cerca de un 86% de las emisiones de dióxido de carbono en el mundo vienen de la quema de combustibles fósiles para la producción de energía y materiales (SE: Banco Mundial, 2023). Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial. Según Elzinga (2023) casi 675 millones de habitantes siguen sin tener electricidad en todo el mundo. Alrededor de 2300 millones

de personas dependen de combustibles y tecnologías tradicionales contaminantes para cocinar sus alimentos (SE: Banco Mundial, 2023). La tecnología de energía eólica puede convertirse en un cambio transformador para muchos países en desarrollo en particular, las turbinas eólicas de eje vertical que poseen características que las hacen ideales para aplicaciones rurales y urbanas; a baja altura y con bajas velocidades del viento Damota (2022). Surge entonces la idea de que el desarrollo de turbinas eólicas verticales con tecnología autóctona en Cuba, puede tributar a la autonomía energética en diferentes sectores de la sociedad. A raíz del decreto ley 345 sobre la aplicación de la energía renovable (GOC-Cuba, 2019). La Empresa Metal-Mecánica Varona trabaja en el desarrollo de pequeños aerogeneradores, proyecto recién iniciado,

Recibido: 17/01/2025

Aceptado: 01/07/2025

Conflictos de intereses: Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Author contributions: **Conceptualization:** A. Mulet. **Data curation:** A. Mulet, E. Navarro. **Formal Analysis:** A. Mulet, E. Navarro. **Investigation:** A. Mulet, E. Navarro. **Methodology:** A. Mulet. **Software:** A. Mulet, E. Navarro. **Supervision:** A. Mulet, E. Navarro. **Validation:** A. Mulet, E. Navarro. **Visualization:** A. Mulet, E. Navarro. **Writing - original draft:** A. Mulet, E. Navarro. **Writing - review & editing:** A. Mulet, E. Navarro.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



en el 2024 (Anexo 1). Para alcanzar dicho objetivo se cuenta con la asesoría permanente de especialistas de la Facultad de Ingeniería Mecánica en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). El objetivo principal de este trabajo es, evaluar el diseño de las turbinas eólicas verticales Darrieus por medio de la simulación asistida por computadora con el fin de analizar su desempeño durante su funcionamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Nomenclatura

- a: área de barrido.
- c: cuerda.
- σ : solidez
- C_d : coeficiente de arrastre.
- C_t : coeficiente de sustentación.
- C_m : coeficiente de momento.
- C_p : coeficiente de potencia.
- d: diámetro del rotor.
- F_d : fuerza de arrastre.
- F_t : fuerza de sustentación.
- h: altura del rotor.
- P: potencia de la turbina.
- P_d : potencia disponible.
- v: velocidad del viento.
- α : ángulo de ataque.
- ρ : densidad del aire.
- ω : velocidad angular.
- RAR: la razón de aspecto del rotor.
- RAA: la razón de aspecto del aspa.
- TSR: tip speed ratio.

Materiales

- Qblade v0.96
- Meteoblue
- Inventor 2023
- Calculadora EPA

Metodología

La metodología establecida para la obtención del diseño del rotor se muestra en la Figura 1 y se describe a continuación.

Requerimientos de diseño

Para iniciar con el diseño se debe realizar una investigación de campo definiendo la zona y condiciones de trabajo de la turbina eólica. En primer lugar,

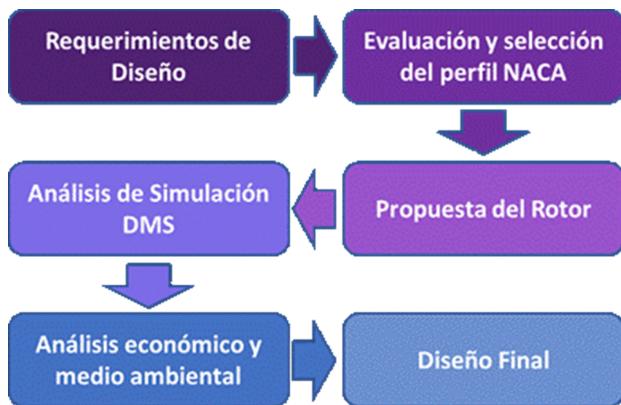


Figura 1. Metodología del diseño del rotor.

se tomó como ubicación de referencia la provincia de La Habana, en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). Su ubicación está situada aproximadamente a una altura de 57 m.s.n.m. según Bader *et al.* (2025), lo que proporciona una densidad del fluido de trabajo de 1,173 kg/m³ (Méndez, 2023). Además de esta se deben tener presentes otras características que muestren los parámetros climáticos en la ciudad de La Habana a los que estarán sometidos los prototipos durante su funcionamiento que se presentan en la Tabla 1. Estas medidas son de enero a diciembre de los últimos 30 años de los datos perteneciente a la estación meteorológica Meteoblue en Basilea (Bader *et al.*, 2025).

Tabla 1. Parámetros climáticos promedio en La Habana.

| Dato anual | Promedio |
|-------------------------------|----------|
| Temp. Máx. diaria media °C | 29,67 |
| Temp. Mín. diaria media °C | 20,33 |
| Temp. Media días calurosos °C | 32,50 |
| Temp. Media noches frío °C | 16,58 |
| Precipitación total (mm) | 38,33 |

Evaluación y selección del perfil NACA

Los perfiles NACA son una serie de perfiles que fueron creados por la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), la cual fue una agencia federal de Estados Unidos fundada el 3 de marzo de 1915 (Jankovsky *et al.*, 2025). La Figura 2 resume las principales partes de un perfil aerodinámico.



Figura 2. Partes de un perfil aerodinámico.

Al momento de seleccionar un perfil adecuado se decidió utilizar perfiles aerodinámicos ya construidos y altamente probados para poder obtener información fácilmente y no realizar los ensayos requeridos al crear un perfil con desarrollo propio.

Los perfiles de la línea NACA son cientos, pero solamente se consideraron tres. Estos son NACA 0018, NACA 4412 y NACA 61300. Ver [Figura 3](#) a continuación.

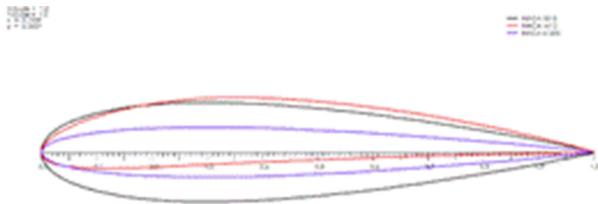


Figura 3. Perfiles NACA sometidos a estudios.

Qblade, es un software de código libre que utiliza Xfoil/Xfri5 lo que ayuda al usuario a diseñar rápidamente un perfil y calcular su desempeño, para luego integrarlo directamente a un diseño de rotor de turbina eólica y simularlo.

El primer paso consiste en efectuar una simulación para obtener los coeficientes C_l , C_d y C_m de los perfiles en un barrido de ángulos de ataque entre $\alpha = -10^\circ$ y $\alpha = +20^\circ$. Los resultados se muestran en la [Figura 4](#).

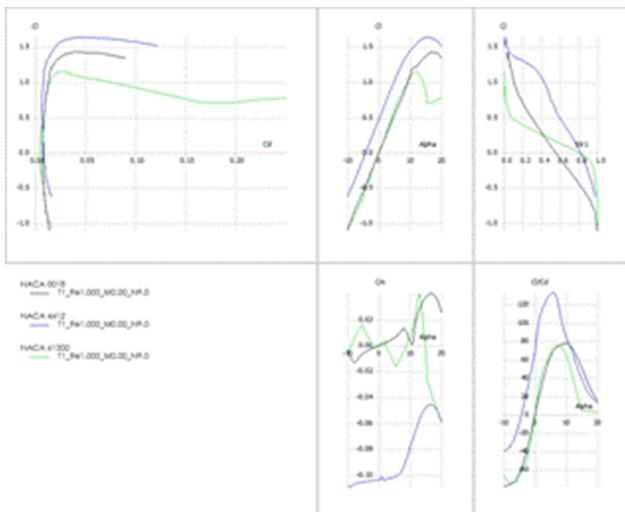


Figura 4. Simulación polar NACA, $Re=100000$.

Según los resultados obtenidos mostrados en la [Figura 4](#). Los perfiles NACA 4412 ofrecen las mejores eficiencias aerodinámicas (C_l / C_d) en comparación a los otros perfiles estudiados.

Ahora es necesario transformar las coordenadas de polares a 360° .

En este proyecto no se implementó el sistema de control de pitch dinámico con sus actuadores (se tendrá un pitch fijo a 0°) por lo que conviene tener un NACA que ofrezca una alta eficiencia aerodinámica en un mayor intervalo de ángulo de ataque.

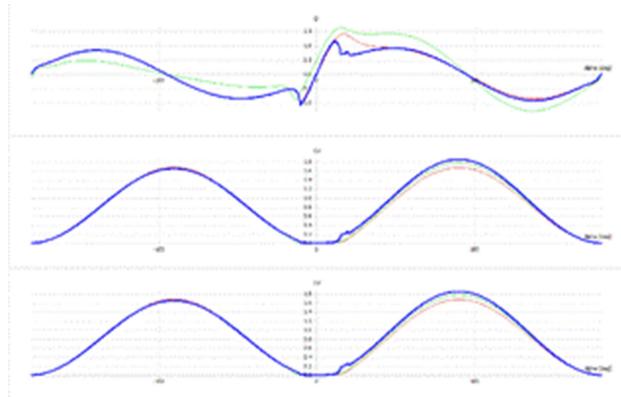


Figura 5. Coeficientes aerodinámicos en 360° .

Propuesta del rotor

La solidez del rotor se puede interpretar como la relación entre el área geométrica de la pala y el área barrida por el rotor:

$$\text{solidez} = \sigma = \frac{\text{Área de las palas}}{\text{Área del rotor}} = \frac{n \cdot c}{\pi \cdot D} \quad (1)$$

Del valor de la solidez dependen directamente la velocidad específica del rotor y el coeficiente de potencia, las turbinas de alta solidez producen un torque alto a bajas velocidades (solidez hasta de 0,8) y las turbinas de baja solidez producen menor torque, pero mayor velocidad, que es lo deseable para rotores de generación eléctrica ([Quintero, 2016](#)). Se debe tratar de seleccionar este parámetro entre valores comprendidos entre 0,1 y 0,25 ([Bernardo, 2018](#)).

La turbina; a un mayor número de aspas el torque sobre el eje es más constante y reduce la fatiga. Además, permite que el arranque de la turbina no esté limitado a posiciones específicas de alto torque. Pero es necesario tener en cuenta que el número de aspas afecta significativamente la solidez del rotor ([Quintero, 2016](#)).

La razón de aspecto del rotor relaciona la altura de las aspas con el diámetro del rotor. El incremento en este valor, aumenta la velocidad angular del eje, haciendo así más eficiente la generación de energía ([Quintero, 2016](#)).

$$RAR = \frac{H}{2R} \quad (2)$$

La razón de aspecto del aspa relaciona la altura de las aspas y su cuerda. Entre más largas sean las aspas del rotor más se atenúan las pérdidas generadas por los vórtices en los extremos del ala, por consiguiente, el aumento en la razón de aspecto del aspa aumenta la eficiencia de la turbina ([Quintero, 2016](#)). Al reducir la relación de aspecto empeora el rendimiento de la pala del aerogenerador. En el caso de VAWT con álabes rectos es recomendable el uso de palas largas y delgadas con una relación de aspecto de aspa elevada ([Bernardo, 2018](#)).

$$RAA = \frac{H}{c} \quad (3)$$

A continuación, se presentan las especificaciones propuestas de diseño del rotor que se utilizará durante las pruebas para este proyecto:

Tabla 2. Especificaciones de diseño del rotor.

| Parámetro Rotor | |
|-----------------|------|
| D (m) | 2 |
| H (m) | 2 |
| A (m^2) | 4 |
| n (-) | 4 |
| c (m) | 0,2 |
| σ (-) | 0,51 |
| RAR (-) | 1 |
| RAA (-) | 10 |

En la siguiente imagen Figura 6 se presenta el diseño preliminar del rotor.

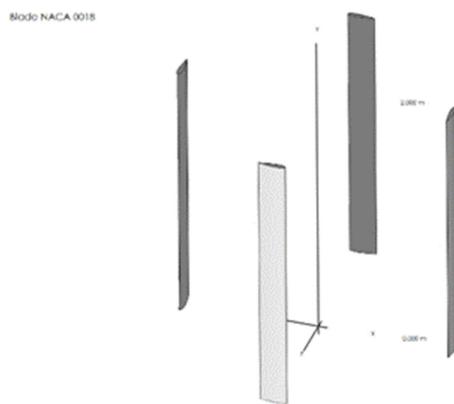


Figura 6. Diseño preliminar del rotor.

Análisis de simulación DMS

Las simulaciones se basan en el cálculo del modelo **Double Multiple Streamtube (DMS)**. Este modelo fue desarrollado por Ion Paraschivoiu para el análisis de motores Darrieus. Se trata de una derivación avanzada de la teoría del disco actuador que se fusiona con la teoría BEM (Blade Element Momentum) (Jankovsky *et al.*, 2025).

Rotor DMS Simulation

Para cada tipo de rotor existe un rango de C_p , este también se puede definir como la potencia obtenida sobre la potencia eólica disponible (Fraire, 2020).

$$C_p = \frac{P}{\rho d} \quad (4)$$

Una manera más útil para determinar la eficiencia del aerogenerador es utilizar la relación de velocidad tangencial (TSR) (Fraire, 2020).

$$TSR = \lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (5)$$

A la hora de calcular una estimación del C_p del proyecto se ve que este se encuentra directamente relacionado con TSR (λ).

Para hallar el C_p los parámetros de simulación establecidos son:

$$v=5,69 \text{ m/s}$$

$$\rho=1,173 \text{ kg/m}^3$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestra en la Figura 7 los resultados de las simulaciones de los motores por el método DMS.

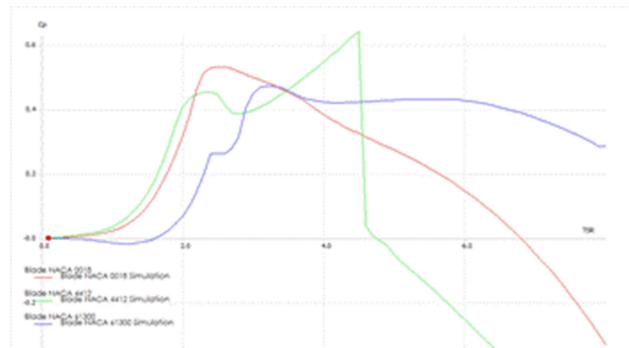


Figura 7. C_p vs TSR.

Analizando los resultados obtenidos en la simulación **Rotor DMS Simulation**, para una velocidad de viento constante de 5,69 m/s. Se puede apreciar el amplio rango de trabajo, siendo de gran beneficio debido a que, para una velocidad de viento dada, posee una amplia variedad de velocidades de rotación; o viceversa para una velocidad de rotación dada, tendrá un mayor intervalo de velocidades de vientos; donde la turbina es capaz de aprovechar de gran manera la energía del viento.

La turbina con el perfil NACA 4412 resulta ser el de mayor coeficiente de potencia debido a su alto coeficiente de sustentación en comparación con los otros perfiles, pero a su vez presenta la menor amplitud de TSR. La turbina NACA 0018 presenta resultados equilibrados de C_p y amplio rango de TSR, su línea es limpia debido a su perfil simétrico. La turbina con el perfil NACA 61300 presenta el C_p más bajo en el rango 1-2 de TSR, pero a su vez es el perfil de mayor amplitud de TSR y en comparación a los otros es el que mantiene por encima de 0,4 de C_p gran parte de su línea.

Si se representa el coeficiente de par en función de la TSR, se obtiene la curva característica de la Figura 8.

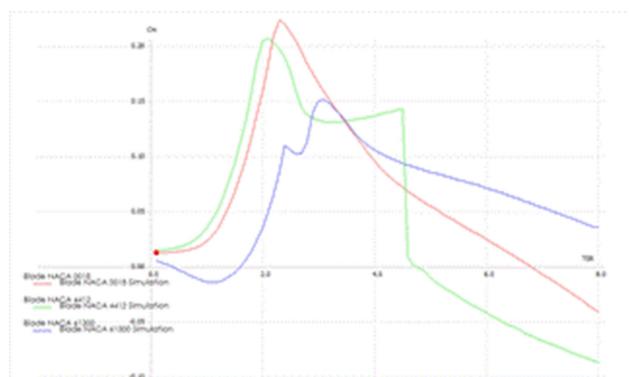


Figura 8. Curva característica del C_m vs TSR.

En la Figura 8 se puede apreciar la variación del momento producido por el aerogenerador en función de su velocidad de giro.

Generalmente en los aerogeneradores H-Darrieus, una de las desventajas que tienen es que en ocasiones necesitan un par de arranque elevado producto al tener valores del coeficiente de par negativos para TSR próximas a cero. Sin embargo, a la vista de los resultados obtenidos en la simulación de estos perfiles configurados para las dimensiones del rotor en la sección antes mencionada, esta característica no se cumple por lo que representa buenos resultados a la hora de romper la inercia e iniciar el movimiento de giro.

Multi Parameter DMS Simulation

En esta simulación es posible escoger el rango de simulación del rotor, es decir, valores máximos, mínimos e incrementos de velocidad de viento, velocidad de rotación

y ángulo de paso. Pueden obtenerse valores de potencia frente a velocidad de viento o frente a régimen de giro, muy útiles para caracterizar las turbinas de cara a la producción energética (Barragán, 2015).

A continuación, se muestra en la [Figura 9](#) las velocidades de viento configurada de 1-10 m/s.

A continuación, se muestra en las [Figuras 10, 11 y 12](#) la simulación Multi Parámetro DMS de potencia con relación a las min-1 del NACA 0018, 4412 y 61300 respectivamente.

Analizando los resultados obtenidos en la simulación **Multi Parameter DMS Simulation**, para una variedad de velocidades de viento comprendido entre 1-10 m/s y un rango de 100 -400 min-1.

A continuación, se muestra en las [Tablas 3, 4 y 5](#) los resultados de las simulaciones de los NACA 0018, NACA 4412 Y NACA 61300 en ese orden respectivamente.

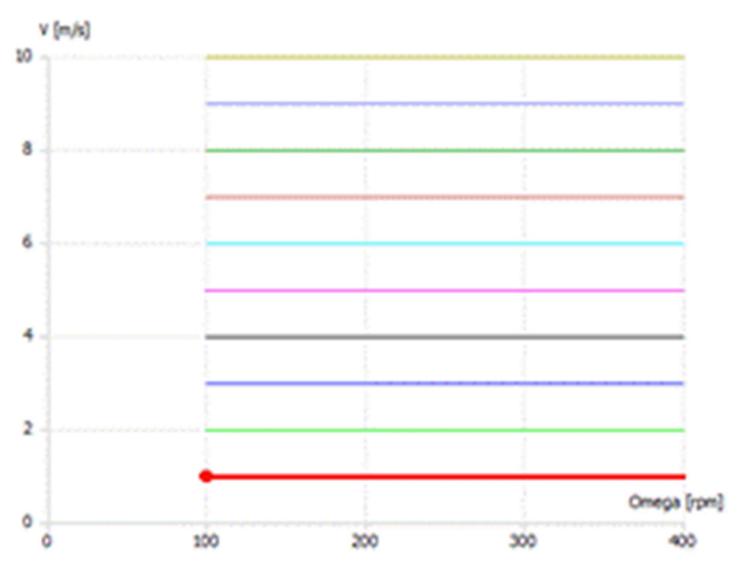


Figura 9. Velocidad de viento y las min-1.

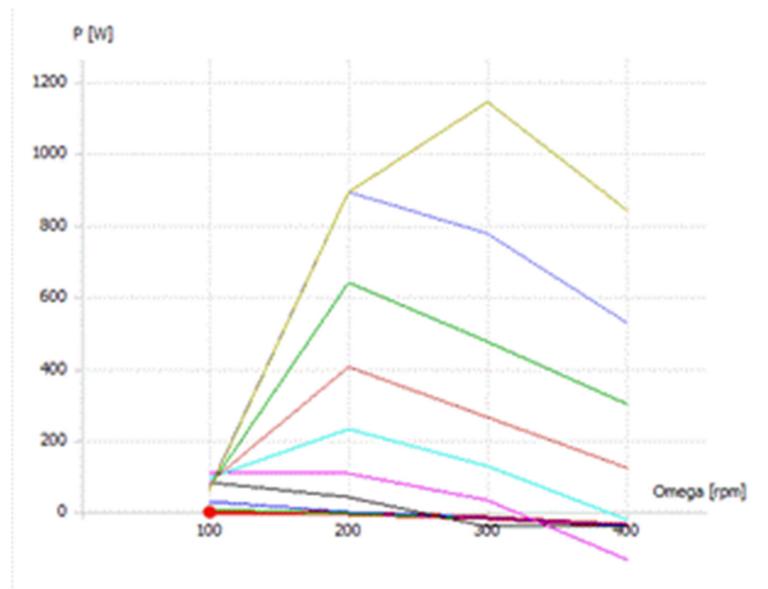


Figura 10. Potencia generada de la turbina perfil NACA 0018.

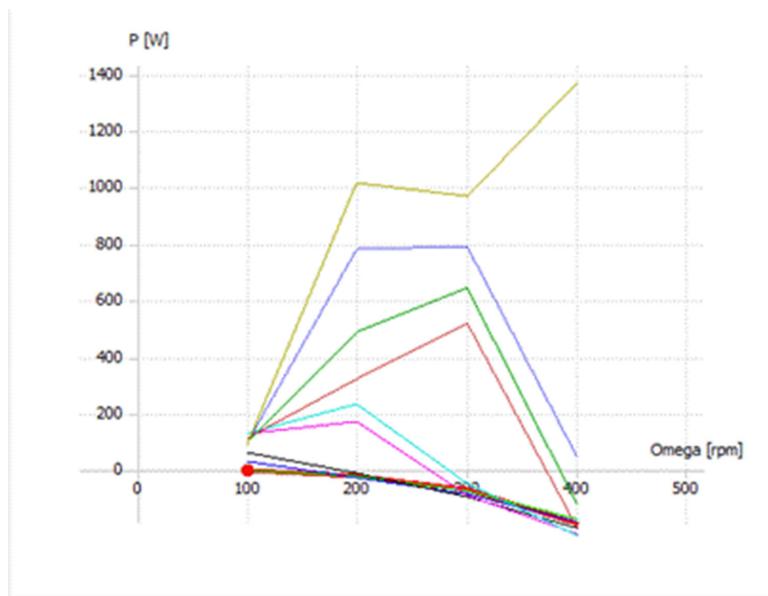


Figura 11. Potencia generada de la turbina perfil NACA 4412.

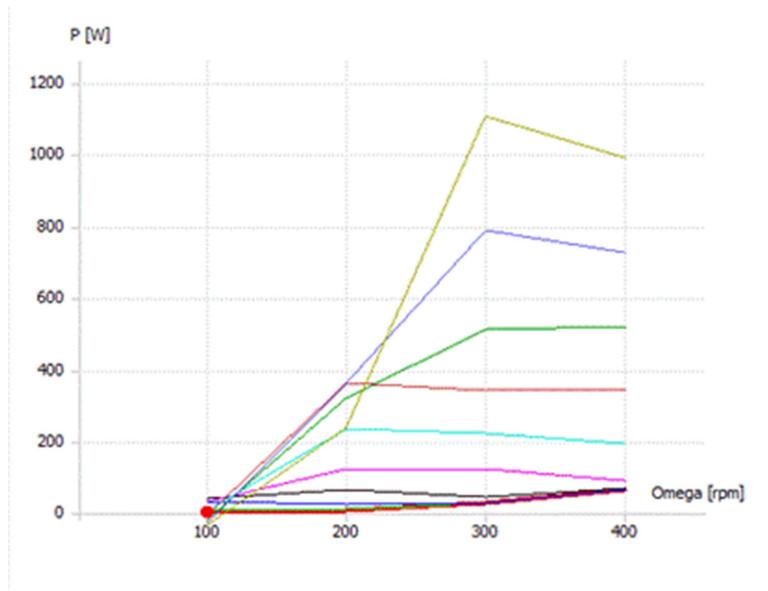


Figura 12. Potencia generada de la turbina perfil NACA 61300.

Se puede apreciar en las gráficas como la turbina con el perfil NACA 4412 produce mayor potencia máxima en comparación a las turbinas NACA 0018 y NACA 61300 siendo esta ultima la de menor producción. Se podría descartar la NACA 61300 si solo se valorara el punto antes mencionado, pero si se desea una turbina que trabaje a un régimen de viento determinado, se debería escoger aquella turbina que produzca la máxima potencia a dicho régimen.

La cantidad de energía que puede generar una turbina eólica depende mucho de las características del viento. Por lo tanto, antes de instalar un aerogenerador es conveniente conocer el potencial eólico en el lugar de emplazamiento. Este parámetro es fundamental en la toma de decisión sobre qué aerogenerador seleccionar.

En La Habana por ejemplo la media de velocidad del viento mínimo ronda por 3,33 m/s con una desviación

estándar del 0,53 m/s (16%), la media de la velocidad del viento es de 4,84 m/s y la velocidad del viento máxima es de unos 6,37 m/s con una desviación estándar del 0,59 m/s (9%) (Méndez, 2023).

Conociendo esto, se puede observar en las Tablas 3, 4 y 5 que las turbinas con perfiles NACA 0018 y NACA 4412 a valores entre 1 y 3 m/s de velocidad de vientos, ambos rotores no desarrollan casi potencia. Es a partir de 4 m/s a bajas revoluciones de 100 y 200 min⁻¹ que producen una potencia importante. Es para valores por encima de los 4 m/s cuando la potencia de las turbinas comienza a producir de forma notable hasta alcanzar los 1,1 y 1,36 kW. Sin embargo, para el caso del rotor NACA 61300 es capaz de generar potencia en velocidades bajas de vientos como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 3. Resultados Blade NACA 0018 Simulación.

| Blade NACA 0018 Simulación | | | | | |
|----------------------------|-------|----------|---------|----------|----------|
| v (m/s) | min-1 | P [W] | v (m/s) | min-1 | P [W] |
| 1 | 100 | -0,63646 | 2 | 100 | 4,64799 |
| | 200 | -5,09827 | 200 | -5,09166 | |
| | 300 | -17,2447 | 300 | -17,0402 | |
| | 400 | -40,8948 | 400 | -40,7862 | |
| 3 | 100 | 28,7128 | 4 | 100 | 79,5447 |
| | 200 | -2,70256 | 200 | 37,1839 | |
| | 300 | -17,1844 | 300 | -42,1842 | |
| | 400 | -39,9081 | 400 | -40,7333 | |
| 5 | 100 | 111,217 | 6 | 100 | 94,0231 |
| | 200 | 105,044 | | 200 | 229,702 |
| | 300 | 29,372 | | 300 | 125,496 |
| | 400 | -135,319 | | 400 | -21,6205 |
| 7 | 100 | 79,7104 | 8 | 100 | 69,8496 |
| | 200 | 401,254 | | 200 | 636,358 |
| | 300 | 263,349 | | 300 | 473,65 |
| | 400 | 120,955 | | 400 | 297,472 |
| 9 | 100 | 63,0677 | 10 | 100 | 61,2419 |
| | 200 | 887,046 | | 200 | 889,737 |
| | 300 | 775,246 | | 300 | 1142,59 |
| | 400 | 525,78 | | 400 | 840,353 |

Tabla 4. Resultados Blade NACA 4412 Simulación.

| Blade NACA 4412 Simulación | | | | | |
|----------------------------|-------|----------|---------|---------|---------|
| v (m/s) | min-1 | P [W] | v (m/s) | min-1 | P [W] |
| 1 | 100 | -3,18588 | 2 | 100 | -1,8432 |
| | 200 | -21,6937 | 200 | -25,487 | |
| | 300 | -70,2326 | 300 | -76,044 | |
| | 400 | -189,615 | 400 | -173,55 | |
| 3 | 100 | 29,1418 | 4 | 100 | 61,1209 |
| | 200 | -29,2681 | 200 | -14,746 | |
| | 300 | -86,0186 | 300 | -98,933 | |
| | 400 | -185,46 | 400 | -203,9 | |
| 5 | 100 | 126,776 | 6 | 100 | 126,19 |
| | 200 | 170,616 | | 200 | 233,134 |
| | 300 | -91,5401 | | 300 | -49,767 |
| | 400 | -227,688 | | 400 | -234,15 |
| 7 | 100 | 110,646 | 8 | 100 | 100,369 |
| | 200 | 318,869 | | 200 | 488,967 |
| | 300 | 516,228 | | 300 | 640,671 |
| | 400 | -199,036 | | 400 | -117,97 |
| 9 | 100 | 95,3748 | 10 | 100 | 93,364 |
| | 200 | 776,099 | | 200 | 1014,21 |
| | 300 | 786,828 | | 300 | 966,108 |
| | 400 | 49,1511 | | 400 | 1364,92 |

Tabla 5. Resultados Blade NACA 61300 Simulación.

| Blade NACA 61300 Simulación | | | | | |
|-----------------------------|-------|----------|---------|---------|---------|
| v (m/s) | min-1 | P [W] | v (m/s) | min-1 | P [W] |
| 1 | 100 | 1,04084 | 2 | 100 | 8,10093 |
| | 200 | 7,91343 | 200 | 8,32672 | |
| | 300 | 26,6527 | 300 | 26,8777 | |
| | 400 | 63,1607 | 400 | 63,3074 | |
| 3 | 100 | 29,0583 | 4 | 100 | 39,9098 |
| | 200 | 23,7601 | 200 | 64,8074 | |
| | 300 | 28,1027 | 300 | 42,6056 | |
| | 400 | 63,9384 | 400 | 66,6138 | |
| 5 | 100 | 29,5547 | 6 | 100 | 8,24862 |
| | 200 | 123,491 | 200 | 232,467 | |
| | 300 | 122,485 | 300 | 218,725 | |
| | 400 | 87,1254 | 400 | 190,081 | |
| 7 | 100 | -7,07141 | 8 | 100 | -19,022 |
| | 200 | 359,973 | 200 | 319,278 | |
| | 300 | 339,362 | 300 | 509,953 | |
| | 400 | 344,77 | 400 | 518,459 | |
| 9 | 100 | -27,888 | 10 | 100 | -34,049 |
| | 200 | 362,926 | 200 | 236,437 | |
| | 300 | 784,575 | 300 | 1104,13 | |
| | 400 | 724,76 | 400 | 987,928 | |

Finalmente, en vista a los resultados mostrados anteriormente, se puede afirmar que la mejor opción de las turbinas mostradas en el presente trabajo, corresponde al rotor NACA 61300 considerando su potencia con respecto a los demás, para velocidades por debajo del punto de diseño, lo cual puede ser útil en una región donde las condiciones de viento sean variables.

Valoración económica y aporte social

Valoración económica

Para efectos de cálculo, el presente modelo de evaluación técnica y económica de Proyectos de Energía Eólica de pequeña escala. Según las velocidades de vientos 1-10 m/s a continuación en las Tablas 6, 7 y 8 se muestra la potencia de generación eléctrica por la turbina.

Tabla 6. Potencia energética entregada de 1-3 m/s.

| Velocidad del viento (m/s) | 1 | 2 | 3 |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| Potencia Útil (W) | 63,16 | 63,31 | 63,94 |
| Potencia (W/día) | 1515,86 | 1519,38 | 1534,52 |
| Potencia en (kW/día) | 1,52 | 1,52 | 1,53 |
| Potencia (kW/mes) | 45,48 | 45,58 | 46,04 |
| Potencia (kW/año) | 545,71 | 546,98 | 552,43 |
| Precio unitario kWh=\$ | 15,02 | 15,05 | 15,18 |
| Precio unitario anual kWh=\$ | 180,18 | 180,58 | 182,16 |

Tabla 7. Potencia energética entregada de 4-6 m/s.

| Velocidad del viento (m/s) | 4 | 5 | 6 |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| Potencia Útil (W) | 66,61 | 123,49 | 232,47 |
| Potencia (W/día) | 1598,73 | 2963,78 | 5579,21 |
| Potencia en (kW/día) | 1,60 | 2,96 | 5,58 |
| Potencia (kW/mes) | 47,96 | 88,91 | 167,38 |
| Potencia (kW/año) | 575,54 | 1066,96 | 2008,51 |
| Precio unitario kWh=\$ | 15,84 | 29,34 | 111,38 |
| Precio unitario anual kWh=\$ | 190,08 | 352,04 | 1336,58 |

Tabla 8. Potencia energética entregada de 7-10 m/s.

| Velocidad del viento (m/s) | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------------|---------|----------|----------|----------|
| Potencia Útil (W) | 359,97 | 518,46 | 784,58 | 1104,13 |
| Potencia (W/día) | 8639,35 | 12443,02 | 18829,80 | 26499,12 |
| Potencia en (kW/día) | 8,64 | 12,44 | 18,83 | 26,50 |
| Potencia (kW/mes) | 259,18 | 373,29 | 564,89 | 794,97 |
| Potencia (kW/año) | 3110,17 | 4479,49 | 6778,73 | 9539,68 |
| Precio unitario kWh=\$ | 308,60 | 747,50 | 2128,08 | 4331,75 |
| Precio unitario anual kWh=\$ | 3703,20 | 8970,00 | 25536,96 | 51981,00 |

Análisis medioambiental

Está demostrado que la tecnología eólica en la actualidad es muy necesaria; pero según estudios realizados, en muchos países no se ha tenido en cuenta el empoderamiento social, pues han faltado acciones dirigidas a la educación de las personas. En el caso de Cuba, no estamos exentos de esa problemática y es necesario demostrar la importancia del aprovechamiento de la energía eólica basada en las turbinas verticales (Meneses-Ruiz *et al.*, 2018).

Se introdujeron los datos de la potencia nominal en la calculadora de equivalencia de gases de efecto invernadero EPA

Environmental Protection Agency (EPA) kWh evitados (EPA, 2024)

Esta perspectiva se centra en la cantidad de energía que no se necesita generar a partir de fuentes contaminantes, como los combustibles fósiles, gracias a la energía producida por la turbina eólica (Tablas 9, 10, 11 y 12).

Tabla 9. kWh equivalente en CO₂ Fuente: EPA (2024).

| | |
|------------------------------------|--------|
| kWh evitados | 1,1 |
| Equivalente de CO ₂ (t) | 0,0008 |

Tabla 10. Este equivalente de emisiones de CO₂ Fuente: EPA (2024)

| | |
|--|--------|
| Galones de gasolina consumidos | 0,086 |
| Galones de diésel consumidos | 0,075 |
| Libras de carbón quemado | 0,861 |
| Uso energético en el hogar durante un año | 0,0001 |
| Uso doméstico de la electricidad durante un año | 0,0001 |
| Bariles de petróleo consumidos | 0,002 |
| Cilindros de propano usados para barbacoas en el hogar | 0,035 |
| Cantidad de teléfonos inteligentes cargados | 93,5 |

Tabla 11. Este equivalente de las emisiones de efecto invernadero evitadas Fuente: EPA (2024).

| | |
|--|--------|
| Toneladas de residuos reciclados en vez de ser eliminados en vertederos | 0,0003 |
| Bolsas de basura de residuos recicladas en vez de ser eliminadas en vertederos | 0,033 |
| Plántulas de árboles urbanos crecidas durante 10 años | 0,013 |

CONCLUSIONES

En este trabajo se expuso el análisis de tres turbinas con perfiles NACA 0018, NACA 4412 y NACA 61300, para velocidades del viento de (1-10) m/s y un diámetro del rotor de 2 m. Estos parámetros fueron escogidos para estudiar el aprovechamiento de la energía eólica en zonas con bajas velocidades del viento.

Se analizaron solo turbinas de 4 palas y se realizaron las simulaciones con el programa QBlade y se constató que las turbinas estudiadas poseen una potencia máxima similar; pero al observar sus curvas características se determinó que la turbina con el perfil NACA 61300 representaba la mejor opción.

Analizando los resultados de las Tablas 6, 7 y 8 se pudo asumir que el producto satisface las necesidades energéticas de una vivienda del sector residencial.

Con la turbina de perfil NACA 61300 se ofrece una opción viable para el óptimo aprovechamiento de la energía eólica en zonas urbanas y rurales con bajos parámetros del viento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BADER, N.; ZURFLUH, N.; SHIN, J.; SCHLÖGL, S.: “Meteoblue City Climate Model (mCCM): High-resolution Modeling for Urban Heatwave Management”, En: 105th Annual AMS Meeting 2025, vol. 105, p. 452735, 2025. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/la-habana_cuba_3553478
- BARRAGÁN, J.M.: Diseño y optimización de una mini-turbina eólica mediante técnicas numéricas, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), Tesis de grado, 2015.
- BERNARDO, R.S.: Estudio aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical mediante técnicas de cálculo CFD, Universidad Politécnica de Madrid, España, TFG. Tesis de Grado en Ingeniería Mecánica, Madrid, España, 2018.
- DAMOTA, B.J.: Perfil de pala de turbina eólica de eje vertical de diseño bioinspirado: estudio comparativo y optimización mediante modelo CFD parametrizado, Universidad Politécnica de Madrid, España, Tesis de grado, Madrid, España, 2022.
- ELZINGA, S. F.: United Nations. Papel de los combustibles fosiles en un sistema energético sostenible, Crónica ONU, 2023. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los>

combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible

EPA: Environmental Protection Agency (EPA), Inst. Environmental Protection Agency (EPA), Codes Disposal Operation, 2024.

FRAIRE, D. J.: Diseño de un aerogenerador de eje vertical para uso urbano de 3 kW, Villa María, 2020.

GOC-CUBA: "Decreto No. 345/2019. Consejo de Estado de la República de Cuba", Gaceta Oficial de la República de Cuba (GOG-2019-1064-095), 2019. ISSN: 0864-0793, e-ISSN: 1682-7511, <https://www.gacetaoficial.gob.cu/es/decreto-ley-345-de-2019-de-consejo-estado>

JANKOVSKY, A.; NAWASH, N.; MÉNDEZ, J.: NASA Electric Aircraft Testbed (NEAT) Summary of Capabilities Version 3.0, July 2024, Inst. National Aeronautics and Space Administration, USA, 2025.

MÉNDEZ, A.M.: Contribución desde el diseño, a la tecnología cubana para producción de Aerogeneradores de Eje Vertical, Inst. Universidad Tecnológica de la Habana «José Antonio Echaverría», Mecánica Aplicada, La Habana, Cuba, 2023.

MENESES-RUIZ, E.; ROIG-RASSI, A.; PAZ, E.; ALONSO, D.; ALVARADO, J.: "Factores de emisión de CO, CO₂, NO_x y SO₂ para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba", Revista Cubana de Meteorología, 24(1): 1-9, 2018, ISSN: 2664-0880.

QUINTERO, S. Z.: Pruebas de rendimiento de una turbina eólica de eje vertical con perfiles aerodinámicos curvados. Bogotá D.C., 2016.

SE: BANCO MUNDIAL: "BIRF AIF IFC MIGA CIADI, Grupo Banco Mundial energy overview", BIRF AIF IFC MIGA CIADI, 2023, Disponible en: <https://www.banco-mundial.org/es/topic/energy/overview>

Anexo 1. Ensamblaje General de la turbina eólica vertical VAWT tipo.

