RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 15/08/2026 | aceito: 18/08/2026 | publicação: 21/08/2026

Fundamentos de aerodinámica de aerogeneradores: principios de sustentación y eficiencia en rotores eólicos

Fundamentos em aerodinâmica de aerogeradores: princípios de sustentação e eficiência em rotores eólicos

Fundamentals of wind-turbine aerodynamics: lift principles and efficiency in wind rotors

Lucas Emanuel Almeida Barboza

Resumen:
La extracción eficiente de la energía cinética del viento mediante un aerogenerador es fundamentalmente un desafío aerodinámico. Este artículo presenta una revisión bibliográfica cualitativa cuyo objetivo es analizar los fundamentos de aerodinámica aplicados a los rotores eólicos, con énfasis en las fuerzas de sustentación y arrastre. La metodología se fundamenta en una revisión integradora de la literatura que aborda obras clásicas de ingeniería aeronáutica adaptadas al sector eólico y publicaciones recientes sobre diseño de palas. Los resultados indican que el desempeño de una turbina eólica de eje horizontal está determinado por la geometría de sus perfiles aerodinámicos y por la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento (Tip Speed Ratio - TSR). Se concluye que maximizar la relación sustentación-arrastre es esencial para aumentar el coeficiente de potencia e influye directamente en la viabilidad y el costo de la energía generada.

Palabras clave:
Aerodinámica. Aerogeneradores. Perfil aerodinámico. Fuerza de sustentación. Arrastre.

Resumo:
A extração eficiente da energia cinética dos ventos por um aerogerador é fundamentalmente um desafio aerodinâmico. O presente artigo apresenta uma revisão bibliográfica qualitativa com o objetivo de analisar os fundamentos de aerodinâmica aplicados aos rotores eólicos, com ênfase nas forças de sustentação e arrasto. A metodologia fundamenta-se em uma revisão integrativa da literatura, abordando obras clássicas de engenharia aeronáutica adaptadas para o setor eólico e publicações recentes sobre design de pás. Os resultados indicam que o desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal é ditado pela geometria de seus perfis aerodinâmicos (airfoils) e pela relação entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento (Tip Speed Ratio - TSR). Conclui-se que a maximização da razão sustentação-arrasto é essencial para o aumento do coeficiente de potência, influenciando diretamente a viabilidade e o custo da energia gerada.

Palavras-chave:
Aerodinâmica. Aerogeradores. Perfil aerodinâmico. Força de sustentação. Arrasto.

Abstract:
Efficient extraction of wind kinetic energy by a wind turbine is fundamentally an aerodynamic challenge. This article presents a qualitative literature review aimed at analyzing the aerodynamic fundamentals applied to wind rotors, with emphasis on lift and drag forces. The methodology is based on an integrative literature review that covers classic works of aeronautical engineering adapted to the wind sector and recent publications on blade design. The results indicate that the performance of a horizontal-axis wind turbine is dictated by the geometry of its airfoils and by the relationship between blade-tip speed and wind speed (tip-speed ratio - TSR). It is concluded that maximizing the lift-to-drag ratio is essential to increasing the power coefficient and directly affects the feasibility and cost of the energy generated.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 15/08/2026 | aceito: 18/08/2026 | publicação: 21/08/2026

Keywords:
Aerodynamics. Wind turbines. Airfoil. Lift force. Drag.

1. Introducción

El rotor de un aerogenerador moderno actúa como interfaz primaria entre el fluido en movimiento (viento) y el sistema mecánico de generación. A diferencia de las antiguas ruedas de viento o de los molinos basados en la fuerza de arrastre, los aerogeneradores contemporáneos de eje horizontal operan con principios muy similares a los de las alas de una aeronave y buscan la máxima eficiencia de extracción de energía (HANSEN, 2015). El diseño de palas constituye uno de los campos más complejos y reservados de la ingeniería eólica, pues pequeñas optimizaciones superficiales pueden generar ganancias significativas de energía durante décadas de operación (BURTON et al., 2011). En este contexto, el objetivo del estudio es revisar los principios fundamentales de aerodinámica aplicados a los aerogeneradores y detallar cómo la interacción fluido-estructura produce par y permite controlar la potencia.

2. Marco teórico

2.1. Fuerzas aerodinámicas: sustentación (Lift) y arrastre (Drag)

Cuando el flujo de aire atraviesa el perfil aerodinámico (sección transversal) de una pala de aerogenerador, se divide en dos trayectorias: el intradós (cara inferior) y el extradós (cara superior curva). En la formulación clásica basada en el principio de Bernoulli, la curvatura superior acelera el flujo de aire y reduce la presión estática sobre dicha cara. La diferencia de presión entre las caras inferior y superior genera una fuerza resultante perpendicular al flujo, denominada fuerza de sustentación o lift (ANDERSON, 2011). Paralelamente, la fricción del aire con la superficie de la pala y la estela turbulenta dejada por el perfil generan una fuerza paralela a la dirección del flujo, conocida como fuerza de arrastre o drag. En aerogeneradores de alto rendimiento, el diseño aerodinámico busca maximizar la sustentación, que genera el par útil, y minimizar el arrastre tanto como sea posible (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2010).

2.2. Relación de velocidad de punta (Tip Speed Ratio - TSR)

La interacción aerodinámica de un rotor eólico no depende solamente de la velocidad del viento libre, sino también de la velocidad de rotación de la propia pala. Este equilibrio se cuantifica mediante la relación de velocidad de punta (TSR - Tip Speed Ratio), que relaciona la velocidad tangencial de la punta de la pala con la velocidad del viento incidente (PINTO, 2013). Si el rotor gira muy lentamente (TSR bajo), la mayor parte del viento pasa libremente entre las palas sin interactuar aerodinámicamente. Si gira demasiado rápido (TSR alto), las palas actúan como una pared sólida, bloquean el flujo y generan turbulencia severa. Por lo tanto, existe un TSR óptimo para cada geometría de rotor que maximiza el coeficiente de potencia aerodinámica (HANSEN, 2015).

3. Materiales y método

La investigación consiste en un estudio de revisión integradora de la literatura con enfoque cualitativo. La base teórica se construyó mediante la selección de libros de texto sobre aerodinámica general e ingeniería eólica, complementada con artículos científicos que discuten la evolución de los perfiles aerodinámicos y comprenden publicaciones entre 2010 y 2024. El método de análisis documental se centró en aislar los fenómenos físicos que rigen la conversión de energía, categorizándolos en procesos de generación de par y mecanismos aerodinámicos de limitación de potencia.

4. Resultados y discusión

Los hallazgos de la literatura revelan que la aerodinámica moderna de los aerogeneradores pasó de utilizar perfiles aeronáuticos tradicionales, como los de la serie NACA, a perfiles desarrollados específicamente para las condiciones operativas de las turbinas, que enfrentan mayores niveles de turbulencia y trabajan con ángulos de ataque variables (BURTON et al., 2011). Un tema operativo relevante es el fenómeno de pérdida o stall. Cuando el ángulo de ataque del viento respecto de la pala alcanza un valor crítico, el flujo de aire se separa del extradós, lo que hace caer drásticamente la sustentación y aumentar el arrastre (ANDERSON, 2011). Históricamente, las turbinas utilizaban la pérdida aerodinámica pasiva como medida de seguridad para frenar el rotor con vientos extremos. Sin embargo, la literatura actual destaca el predominio del control de paso (Pitch), en el que motores giran la pala

alrededor de su eje y modifican dinámicamente el ángulo de ataque para mantener la eficiencia aerodinámica o inducir el frenado de forma controlada.

5. Consideraciones finales

El estudio concluye que la aerodinámica es la ciencia fundamental para el rendimiento de los aerogeneradores y la responsable directa de la eficiencia con la que el viento se transforma en movimiento mecánico. El refinamiento de las fuerzas de sustentación y la gestión optimizada de la relación de velocidad de punta (TSR) son parámetros críticos para maximizar la extracción de energía. Como contribución, el artículo sintetiza la transición de los conceptos aerodinámicos puros hacia su aplicación práctica en el control de potencia. Para futuros trabajos se sugiere investigar la aeroelasticidad - cómo la deformación física de palas gigantes bajo cargas extremas de viento afecta su aerodinámica -, un desafío creciente en el diseño de turbinas modernas cuyas palas ya superan los 100 metros de longitud.

Referencias

ANDERSON, John D. Fundamentals of Aerodynamics. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2011.

BURTON, Tony et al. Wind Energy Handbook. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

HANSEN, Martin O. L. Aerodynamics of Wind Turbines. 3. ed. London: Routledge, 2015.

MANWELL, James F.; MCGOWAN, Jon G.; ROGERS, Anthony L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.

PINTO, Milton de Oliveira. Fundamentos de Energia Eólica. Rio de Janeiro: LTC, 2012.