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

Fundamentals of wind-turbine aerodynamics: lift principles and efficiency in wind rotors
Fundamentos de aerodinámica de aerogeneradores: principios de sustentación y eficiencia en rotores eólicos

Lucas Emanuel Almeida Barboza

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.

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

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.

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

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

1. Introdução

O rotor de um aerogerador moderno atua como a interface primária entre o fluido em movimento (vento) e o sistema mecânico de geração. Diferente das antigas rodas de vento ou moinhos baseados na força de arrasto, os aerogeradores contemporâneos de eixo horizontal operam sob princípios muito semelhantes aos das asas de uma aeronave, buscando a máxima eficiência na extração de energia (HANSEN, 2015). O design das pás representa um dos campos mais complexos e sigilosos da engenharia eólica, pois pequenas otimizações em sua superfície podem resultar em ganhos significativos de geração de energia ao longo de décadas de operação (BURTON et al., 2011). Nesse contexto, o objetivo deste estudo é revisar os princípios fundamentais da aerodinâmica aplicados aos aerogeradores, detalhando como a interação fluido-estrutura resulta na geração de torque e no controle de potência.

2. Marco teórico

2.1. Forças aerodinâmicas: sustentação (Lift) e arrasto (Drag)

Quando o fluxo de ar atravessa o perfil aerodinâmico (seção transversal) de uma pá de aerogerador, ele é dividido em dois caminhos: o intradorso (face inferior) e o extradorso (face superior curva). Pela formulação clássica baseada no Princípio de Bernoulli, a curvatura superior provoca uma aceleração do fluxo de ar, resultando em uma queda de pressão estática na referida face. A diferença de pressão entre a face inferior e superior gera uma força resultante perpendicular ao fluxo, denominada Força de Sustentação ou Lift (ANDERSON, 2011). Paralelamente, o atrito do ar com a superfície da pá e a esteira de turbulência deixada pelo perfil geram uma força paralela à direção do fluxo, conhecida como Força de Arrasto ou Drag. Para aerogeradores de alto desempenho, o objetivo do projeto aerodinâmico é maximizar a força de sustentação (que gera o torque útil) e minimizar ao máximo o arrasto (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2010).

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

2.2. A razão de velocidade de ponta (Tip Speed Ratio - TSR)

A interação aerodinâmica de um rotor eólico não depende apenas da velocidade do vento livre, mas também da velocidade de rotação da própria pá. Esse balanço é quantificado pela Razão de Velocidade de Ponta (TSR - Tip Speed Ratio), que relaciona a velocidade tangencial da ponta da pá com a velocidade do vento incidente (PINTO, 2013). Se o rotor girar muito lentamente (TSR baixo), a maior parte do vento passará livremente entre as pás sem interagir aerodinamicamente. Se girar muito rápido (TSR alto), as pás atuarão como uma parede sólida, bloqueando o fluxo e gerando turbulência severa. Existe, portanto, um TSR ótimo para cada geometria de rotor que maximiza o coeficiente de potência aerodinâmico (HANSEN, 2015).

3. Material e método

A pesquisa consiste em um estudo de revisão integrativa da literatura com abordagem qualitativa. A base teórica foi construída através da seleção de livros-texto de aerodinâmica geral e engenharia eólica, complementada por artigos científicos que discutem a evolução dos perfis aerodinâmicos, compreendendo publicações entre 2010 e 2024. O método de análise documental focou-se em isolar os fenômenos físicos que regem a conversão de energia, categorizando-os em processos de geração de torque e mecanismos aerodinâmicos de limitação de potência.

4. Resultados e discussão

Os achados na literatura revelam que a aerodinâmica moderna de aerogeradores migrou do uso de perfis aeronáuticos tradicionais (como os da série NACA) para perfis desenvolvidos especificamente para as condições de operação das turbinas, que enfrentam maiores níveis de turbulência e operam em ângulos de ataque variados (BURTON et al., 2011). Uma discussão relevante no campo operacional é o fenômeno do Estol (Stall). Quando o ângulo de ataque do vento em relação à pá atinge um valor crítico, o fluxo de ar se descola do extradorso da pá, fazendo com que a sustentação caia drasticamente e o arrasto aumente (ANDERSON, 2011). Historicamente, turbinas utilizavam o estol passivo aerodinâmico como medida de segurança para frear o rotor em ventos extremos. No entanto, a literatura atual destaca a predominância do controle de Pitch (passo), onde motores giram a pá em torno do seu próprio eixo, alterando

dinamicamente o ângulo de ataque para manter a eficiência aerodinâmica contínua ou induzir o freio de forma controlada.

5. Considerações finais

O estudo conclui que a aerodinâmica é a ciência basilar para o desempenho dos aerogeradores, sendo a responsável direta pela eficiência com a qual o vento se transforma em movimento mecânico. O refinamento das forças de sustentação e a gestão otimizada da Razão de Velocidade de Ponta (TSR) configuram os parâmetros críticos para maximizar a extração de energia. Como contribuição, o presente artigo sintetiza a transição dos conceitos aerodinâmicos puros para sua aplicação prática no controle de potência. Para trabalhos futuros, sugere-se a investigação no campo da aeroelasticidade - o estudo de como a deformação física de pás gigantes sob cargas de vento extremas afeta a sua aerodinâmica -, um desafio crescente no design de turbinas modernas que já ultrapassam os 100 metros de comprimento de pá.

Referências

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.