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

Energia eólica e conversão eletromecânica: princípios de funcionamento dos aerogeradores

Wind energy and electromechanical conversion: operating principles of wind turbines
Energía eólica y conversión electromecánica: principios de funcionamiento de los aerogeneradores

Lucas Emanuel Almeida Barboza

Resumo:
A transição para uma matriz energética de baixo carbono tem impulsionado a expansão da energia eólica globalmente. O presente artigo apresenta uma revisão bibliográfica qualitativa com o objetivo de analisar os princípios de funcionamento dos aerogeradores, destacando os processos de conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica. A metodologia fundamenta-se em uma revisão integrativa da literatura, abordando as obras clássicas de engenharia de energia e publicações recentes sobre tecnologias de geração. Os resultados indicam que a eficiência do sistema depende da integração harmoniosa entre a aerodinâmica das pás, os componentes mecânicos de transmissão e o gerador elétrico, respeitando os limites físicos de extração de energia. Conclui-se que o domínio desses princípios é essencial para a otimização de projetos eólicos, suportando inovações como turbinas direct drive e sistemas offshore, que garantem maior confiabilidade operacional e rentabilidade.

Palavras-chave:
Energia eólica. Aerogeradores. Conversão eletromecânica. Limite de Betz. Geração renovável.

Abstract:
The transition to a low-carbon energy mix has driven the expansion of wind energy worldwide. This article presents a qualitative literature review aimed at analyzing the operating principles of wind turbines, highlighting the processes that convert the kinetic energy of wind into electrical energy. The methodology is based on an integrative literature review covering classic works in energy engineering and recent publications on generation technologies. The results indicate that system efficiency depends on the harmonious integration of blade aerodynamics, mechanical transmission components, and the electrical generator, while respecting the physical limits of energy extraction. It is concluded that mastery of these principles is essential for optimizing wind projects and supporting innovations such as direct-drive turbines and offshore systems, which ensure greater operational reliability and profitability.

Keywords:
Wind energy. Wind turbines. Electromechanical conversion. Betz limit. Renewable generation.

Resumen:
La transición hacia una matriz energética baja en carbono ha impulsado la expansión de la energía eólica a nivel mundial. Este artículo presenta una revisión bibliográfica cualitativa cuyo objetivo es analizar los principios de funcionamiento de los aerogeneradores, destacando los procesos de conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica. La metodología se fundamenta en una revisión integradora de la literatura que abarca obras clásicas de ingeniería energética y publicaciones recientes sobre tecnologías de generación. Los resultados indican que la eficiencia del sistema depende de la integración armoniosa entre la aerodinámica de las palas, los componentes mecánicos de transmisión y el generador eléctrico, respetando los límites físicos de extracción de energía. Se concluye que el dominio de estos principios es esencial para optimizar los proyectos eólicos y respaldar innovaciones como las turbinas de

accionamiento directo y los sistemas marinos, que garantizan mayor confiabilidad operativa y rentabilidad.

Palabras clave:
Energía eólica. Aerogeneradores. Conversión electromecánica. Límite de Betz. Generación renovable.

1. Introdução

O aquecimento global e a necessidade urgente de descarbonização das economias posicionaram a energia eólica como um dos pilares centrais na transição da matriz energética mundial. Diferente das fontes fósseis, a geração eólica aproveita um recurso inesgotável e limpo, mas que apresenta desafios inerentes devido à sua natureza intermitente e estocástica (TOLMASQUIM, 2016). Nesse cenário, o aerogerador atua como a tecnologia protagonista, não sendo apenas uma estrutura mecânica, mas um sistema complexo de conversão de energia que integra disciplinas de aerodinâmica, mecânica e eletromagnetismo (BURTON et al., 2011). O objetivo deste estudo é analisar os princípios fundamentais de funcionamento dos aerogeradores modernos de eixo horizontal, detalhando os subsistemas que viabilizam a captura do vento e sua transformação em eletricidade pronta para ser injetada na rede elétrica.

2. Marco teórico

2.1. A conversão de energia cinética e o Limite de Betz

O princípio fundamental de um aerogerador baseia-se na extração da energia cinética presente nas massas de ar em movimento. Quando o vento entra em contato com as pás do rotor, a diferença de pressão gerada pela geometria do perfil aerodinâmico (força de sustentação ou lift) cria um torque que faz o eixo girar (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2010). A literatura clássica estabelece que existe um limite físico rigoroso para essa conversão. O físico Albert Betz demonstrou em 1919 que nenhum aerogerador pode extrair mais de 59,3% da energia cinética do vento que atravessa a área varrida pelo rotor. Esse teto teórico, conhecido como Limite de Betz, é a principal referência de eficiência aerodinâmica, orientando o design das pás modernas para alcançar coeficientes de potência (Cp) que se aproximem da marca dos 50% em condições reais (BURTON et al., 2011).

2.2. Subsistemas eletromecânicos principais

A conversão efetiva da energia mecânica de rotação em energia elétrica ocorre no interior da nacele, o compartimento localizado no topo da torre. Conforme Pinto (2013), o sistema tradicional é composto por:

- Rotor e eixo de baixa rotação: capta o vento e gira a velocidades relativamente baixas (geralmente entre 10 e 20 rpm).
- Caixa multiplicadora (gearbox): acoplada ao eixo do rotor, tem a função de ampliar a velocidade de rotação para os níveis exigidos pelo gerador (frequentemente acima de 1.500 rpm).
- Gerador elétrico: transforma a energia mecânica recebida do eixo de alta rotação em energia elétrica, utilizando princípios de indução eletromagnética.

3. Material e método

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, desenvolvida por meio de uma revisão integrativa da literatura. O método permitiu a síntese de múltiplos estudos acadêmicos para proporcionar uma compreensão clara do funcionamento eletromecânico das turbinas eólicas. A coleta de dados foi realizada em bases científicas e bibliotecas universitárias virtuais, abrangendo livros de referência em engenharia de energias renováveis e artigos publicados entre 2010 e 2024. A análise seguiu a técnica de análise de conteúdo estrutural, categorizando os achados nos princípios aerodinâmicos e na configuração dos componentes internos.

4. Resultados e discussão

A análise da literatura revela que o funcionamento de um aerogerador não é apenas uma questão de tamanho, mas de refinada sincronia eletromecânica. A caixa multiplicadora (gearbox) historicamente foi o padrão da indústria para adequar as rotações do rotor ao gerador. No entanto, os resultados mostram que esta peça é o calcanhar de Aquiles do sistema, sendo responsável pela maior parte das falhas mecânicas e custos de manutenção (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2010). Como resposta a esse gargalo tecnológico, a discussão atual na literatura aponta para a crescente adoção de aerogeradores Direct Drive (acionamento direto). Nestes sistemas, a caixa multiplicadora é eliminada e substituída por geradores

síncronos de ímãs permanentes e de múltiplos polos, que operam eficientemente nas mesmas baixas rotações do rotor (TOLMASQUIM, 2016). Observou-se que essa simplificação mecânica eleva a disponibilidade da máquina e reduz paradas corretivas, sendo uma estratégia crucial, especialmente no ambiente offshore, onde a manutenção é complexa e custosa.

5. Considerações finais

O estudo atingiu o objetivo proposto ao demonstrar que os princípios de funcionamento dos aerogeradores repousam na interação precisa entre aerodinâmica restrita pelo Limite de Betz e a eficiência dos subsistemas eletromecânicos. Conclui-se que a evolução dessas máquinas deixou de focar apenas na captura de vento para priorizar a confiabilidade e a redução do custo nivelado de energia (LCOE). Como contribuição, este artigo sistematizou os componentes operacionais das turbinas, destacando a transição para sistemas sem caixa multiplicadora. Para trabalhos futuros, sugere-se a investigação dos impactos da fadiga dos materiais compósitos usados nas pás gigantes modernas e o papel dos sistemas de controle (Pitch e Yaw) na maximização da energia em tempos de condições meteorológicas extremas.

Referências

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

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, 2013.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016.