



Prospecção científica sobre a modelagem matemática de micro aerogeradores

Scientific prospecting about mathematical modeling of micro wind turbines

Roberto Padilha Rovani¹, Bruna Alves de Souza Holanda², Filipe Marangoni³, Juan Libalde Nascimento⁴, Evandro André Konopatzki⁵

RESUMO

A modelagem matemática e simulação desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de aerogeradores de 60 W, melhorando a eficiência da geração de energia eólica em pequena escala. Este estudo prospectivo investiga o estado da arte dos aerogeradores e justifica a aplicação da modelagem matemática e simulação para caracterização da conversão eólica e previsão da geração eólica. Foi realizada uma análise nas bases de dados SCIELO e SCOPUS, com as palavras-chave aerogeradores, eficiência energética, energia eólica, ventos variáveis, modelagem, resultando inicialmente em 3.155 artigos. Após seleção rigorosa, 54 artigos foram identificados para leitura completa. A análise destes mostraram que a modelagem matemática envolve a criação de equações que descrevem o comportamento do aerogerador em diferentes condições de vento, considerando a geometria das pás, eficiência do gerador e resposta dinâmica do sistema. Essas equações são numericamente resolvidas para otimização de parâmetros. A simulação utiliza softwares especializados para representar o funcionamento do aerogerador, economizando tempo e recursos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável de aerogeradores e aumentando a eficiência da energia eólica em geração descentralizada, especialmente em locais remotos.

PALAVRAS-CHAVE: eficiência energética; ventos variáveis; modelagem.

ABSTRACT

Mathematical modeling and simulation play a pivotal role in the development of 60 W wind turbines, enhancing the efficiency of small-scale wind energy generation. This prospective study explores the state of the art in wind turbines and justifies the application of mathematical modeling and simulation for wind conversion characterization and wind generation prediction. An analysis was conducted on the SCIELO and SCOPUS databases using the keywords wind turbines, energy efficiency, wind energy, variable winds, modeling, initially yielding 3,155 articles. Following a rigorous selection process, 54 articles were identified for full review. Analysis of these articles revealed that mathematical modeling entails creating equations that describe the behavior of wind turbines under different wind conditions, taking into account blade geometry, wind generator efficiency, and system dynamic response. These equations are numerically solved to optimize parameters. Simulation employs specialized software to represent wind turbine operation, saving time and resources,

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira - Paraná, Brasi. E-mail: robertorovani@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 3548310821597211.

² Bolsista PIBIT do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Júnior (CNPq) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira Paraná, Brasi. E-mail: holanda@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes 4698775976586168.

³ Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica - Medianeira. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil. E-mail: filipemarangoni@utfpr.edu.br. ID Lattes: 0637440868208985

⁴ Bolsista PIBIC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira Paraná, Brasi. E-mail: libaldenascimento@hotmail.com. ID Lattes 7969680985613360.

⁵ Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica - Medianeira. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil. E-mail: eakonopatzki@utfpr.edu.br. ID Lattes: 2271391188375487



contributing to the sustainable development of wind turbines, and enhancing wind energy efficiency in decentralized generation, particularly in remote locations.

KEYWORDS: energy efficiency; variable winds; modeling.

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia renovável é essencial para mitigar os desafios impostos pelo aquecimento global e garantir um suprimento estável de eletricidade. Nesse contexto, a energia eólica desempenha um papel fundamental, aproveitando a energia cinética dos ventos para gerar eletricidade de maneira sustentável. Para otimizar a geração eólica, é imperativo compreender e aprimorar a modelagem matemática aplicada às simulações e previsões desse processo.

O objetivo deste estudo foi realizar uma prospecção de artigos científicos que abordam a aplicação da modelagem matemática na simulação e previsão da geração eólica. Para alcançar essa meta, foram prospectadas as pesquisas científicas nos últimos anos, a fim de identificar tendências, avanços e lacunas na literatura atual. Esta revisão sistemática tem como intuito fornecer uma visão abrangente das abordagens matemáticas utilizadas na modelagem da geração eólica e destacar seu impacto no aprimoramento das previsões e na otimização das operações de parques eólicos. A hipótese desse estudo é caracterizar matematicamente o micro aerogerador existente no laboratório LEFAPE para propor (futuramente) melhorias no seu sistema de controle e funcionamento.

Para tanto, estabelece-se a importância da energia eólica, no âmbito da modelagem matemática avançada juntamente com a abordagem científica, para implantar melhorias de eficiência e controle adequadas ao aerogerador presente no laboratório, para que o mesmo atinja maior estabilidade na transformação de energia mecânica em elétrica, geração de energia mais eficiente em termos quantitativos e desempenho como um todo com sistemas de controle avançados e mitigação de perdas para diferentes situações de local, época e estação do ano e clima.

2. METODOLOGIA

Os ventos são altamente variáveis e influenciados por uma série de fatores, como topografia, clima e características geográficas. Portanto, a modelagem matemática desempenha um papel crucial na compreensão dessas complexidades. A revisão identificará os principais métodos matemáticos empregados para representar o comportamento dos ventos e sua interação com os aerogeradores.

Para extrair as informações necessárias provenientes dos estudos presentes nas bases de dados científicos SCIELO e SCOPUS, foram realizadas buscas com as palavras-chave combinadas, nas línguas portuguesa e inglesa: Aerogeradores; eficiência energética; energia eólica; modelagem matemática; e ventos variáveis, encontrando 3.155 artigos científicos sobre o tema.

Posteriormente, foram realizados comparativos dos títulos dos trabalhos para com as pesquisas realizadas no laboratório, bem como a análise de modelagens matemáticas

avançadas que atendam às necessidades das especificidades destes estudos, selecionando 129 artigos.

Ao final, foi feito um alinhamento do compilado realizando uma leitura dos resumos destes artigos e a validação da correlação existente entre os estudos e a potencial contribuição dos mesmos na pesquisa de enfoque, resultando em 54 artigos diretamente relacionados com os objetivos deste trabalho. Por fim, a partir da leitura completa dos artigos foi possível extrair informações objetivas para o estudo de 16 deles, como demonstra a Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Fluxo metodológico da pesquisa do trabalho



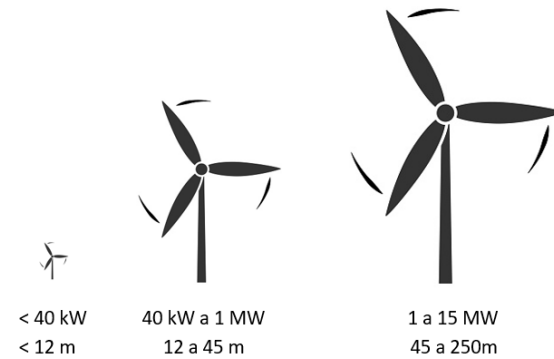
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3. RESULTADOS E DISCUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a busca por fontes de energia renovável têm impulsionado o desenvolvimento e a pesquisa em tecnologias de geração de energia limpa. Nesse cenário, a energia eólica desempenha um papel crucial, oferecendo uma fonte de energia sustentável e abundante (SMITH, 2020). Os aerogeradores, são dispositivos que convertem a energia cinética do vento em eletricidade, diversificam a matriz energética e prometem reduzir das emissões de gases de efeito estufa (BOYLE, 2012). No entanto, a eficiência e o desempenho desses sistemas dependem da compreensão de seu funcionamento, o que é possível por meio da modelagem matemática e simulação (KIRK-DAVIDOFF, 2008).

Os microaerogeradores são exemplos de tecnologia de geração eólica de pequena escala que pode ser implementada em diversas aplicações, desde fornecimento de energia a locais remotos até sistemas de monitoramento ambiental (WANG, 2011). No entanto, o tamanho reduzido desses dispositivos, explicitado na Figura 2 a seguir, torna imperativo otimizar seu desempenho para garantir que a energia gerada seja suficiente para atender às necessidades específicas de cada aplicação (MILLER, 2010).

Figura 2 – Comparativo de tamanho de aerogeradores de pequena, média e grande potência



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Para otimizar seu design e maximizar sua eficiência, é essencial criar modelos matemáticos que descrevam de maneira precisa e abrangente o comportamento do aerogerador em resposta às condições do vento. Isso para realização de testes virtuais detalhados que economizam tempo e recursos (SAIDUR, 2011).

A energia eólica é uma forma limpa e renovável de geração de eletricidade que se baseia na conversão da energia cinética do vento em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. Os aerogeradores são responsáveis por capturar a energia do vento e transformá-la em eletricidade pronta para ser usada nas unidades consumidoras (ARCHER, 2005).

A modelagem matemática pode ser usada para compreensão do funcionamento dos aerogeradores. Ela envolve a criação de equações e modelos que descrevem o comportamento do sistema em diferentes condições de vento, levando em consideração uma série de variáveis, como a geometria das pás do rotor, a eficiência do gerador eólico e as características do vento local (LUO, 2012).

Para Luo (2012), no caso dos microaerogeradores, a modelagem matemática permite prever a relação entre a corrente elétrica gerada, a tensão elétrica e a rotação do rotor. Essa relação é essencial para determinar a eficiência do sistema e a capacidade de fornecer energia de forma estável e confiável. Um dos principais objetivos da simulação é a otimização do design buscando a máxima transferência de potência eólica para elétrica.

Nesse sentido, a simulação é uma extensão natural da modelagem matemática e desempenha um papel fundamental na validação dos modelos e na otimização dos aerogeradores. Com a simulação, é possível criar um ambiente virtual que replica as condições do mundo real, permitindo testar o funcionamento do sistema em diferentes cenários de vento e carga (HODGE, 2012).

No contexto da relação entre corrente e tensão elétrica e a rotação do rotor, a simulação pode apresentar modelos representativos da intensidade de corrente elétrica e de tensão elétrica à medida que a velocidade do vento aumenta ou diminui. A realização de testes virtuais se torna uma vantagem significativa, pois elimina a necessidade de construir protótipos físicos, que podem ser caros e demorados de se produzir (HODGE,



2012). Além da capacidade de exploração de diversos cenários, que poderiam ser impraticáveis em ambiente laboratorial ou real.

Um dos aspectos buscados na revisão foi a relação entre a corrente elétrica e a rotação do rotor em microaerogeradores. Nesse aspecto, a corrente elétrica gerada pelo aerogerador está diretamente relacionada à velocidade do vento, à área varrida pelas pás do rotor e à eficiência do gerador eólico (SUMPER, 2010). No entanto, essa relação não é linear e o aerogerador possui limitações em termos de rotação máxima. Já a tensão elétrica é dependente do sistema motriz escolhido, sendo alternado ou contínuo deve possuir componentes periféricos (como os as caixas de acoplamento ou os conversores CC-CA) para garantia da sua estabilidade operacional. Ambos devem ser controlados para que haja a máxima potência transferida pelo sistema aerogerador (HODGE, 2012).

As simulações no setor eólico devem ser capazes de controlar as condições de vento para validação estatística das correlações entre as variáveis analisadas. O tubo de Venturi permite observar como o aerogerador responde a diferentes (e controladas) velocidades de vento (SAIDUR, 2011).

Além disso, a simulação permite identificar pontos de operação ideais para o aerogerador (MILLIGAN, 2010). Apontando regiões de máxima eficiência energética e aportando base para estudos de estimação de geração de energia e apoiando estudos de planejamento energético.

Com base nos resultados das simulações, é possível realizar ajustes no design dos microaerogeradores como alterações na geometria das pás do rotor ou na configuração do controlador gerador eólico (LUO, 2012).

Do ponto de vista econômico, a otimização do design do aerogerador - por meio da modelagem matemática e simulação - pode reduzir os custos de produção e manutenção, tornando a energia eólica mais acessível e competitiva em comparação com fontes de energia tradicionais (FRERIS, 2008).

4. CONCLUSÃO

A relação entre a corrente elétrica, a tensão elétrica e a rotação do rotor em aerogeradores de 60 W maximizam a eficiência e a confiabilidade desses sistemas de geração de energia (eólica) de pequena escala. A modelagem matemática e a simulação desempenham um papel fundamental na compreensão e na validação dessa relação, permitindo ajustes no design do aerogerador para otimizar seu desempenho.

À medida que a transição para fontes de energia renovável se torna cada vez mais importante, a modelagem matemática, a simulação e a otimização tornam-se fundamentais para o planejamento da operação energética.

Recomendam-se como trabalhos futuros, a construção de modelos para simular ajustes nas pás e sustentação do rotor, além da implantação de um sistema de controle eletrônico, realizando testes, dentro e fora do laboratório a partir da inserção de um analisador de corrente a fim de realizar a medição de tensão e corrente e a coleta da visualização do sinal elétrico em forma de onda para verificar sua estabilidade e desempenho, a fim de validar as alterações realizadas no projeto original do aerogerador.



Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio de natureza financeira além dos colegas do Laboratório de eficiência, fontes alternativas e processamento de energia (LEFAPE) da UTFPR-MD pelo companheirismo.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

SMITH, J.; JOHNSON, A. Renewable Energy Technologies. Cambridge University Press, 2020.

BOYLE, G. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. Oxford University Press, 2012.

KIRK-DAVIDOFF, D. B.; KEITH, D. W. On the climate impact of small-scale wind power. Environmental Research Letters, v. 3, n. 4, 2008.

WANG, L.; INFELD, D. A review of small wind turbines in distributed power generation systems. Energy and Buildings, v. 43, n. 11, p. 2282-2290, 2011.

SAIDUR, R.; RAHIM, N. A.; ISLAM, M. R. Assessment of energy potential and power generation from wind energy in Malaysia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 6, p. 3117-3125, 2011.

MILLER, L. M.; WATSON, J. P. An assessment of small wind energy potential in Indiana. Renewable Energy, v. 35, n. 5, p. 1073-1081, 2010.

ARCHER, C. L.; JACOBSON, M. Z. Evaluation of global wind power. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 110, n. D12, 2005.

HANSEN, M. H.; PAULSEN, U. S.; PEDERSEN, A. S. Modeling and simulation of wind turbines for distributed control. Control Engineering Practice, v. 43, p. 1-10, 2015.

LUO, N.; WANG, T. Modeling and simulation of wind energy system based on PMSG and two-mass model. In: Proceedings of the 2012 American Control Conference (ACC), 2012, p. 3750-3755.

HODGE, B. M.; LEW, D.; MILLIGAN, M.; POTTER, B. K. Variable generation, integration, and system operational aspects. IEEE Transactions on Power Systems, v. 27, n. 3, p. 1140-1151, 2012.

SUMPER, A.; GOMIS-BELLMUNT, O. Wind energy systems: Optimising design and construction for safe and reliable operation. Woodhead Publishing, 2010.

MILLIGAN, M. R.; ELA, E. Wind energy and ancillary services. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 25, n. 2, p. 688-696, 2010.