

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

ENERGIA EÓLICA EM MINIATURA: PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MINI GERADOR TRIFÁSICO PARA MINI TURBINAS.

PEDRO HENRIQUE SILVA, ELSON AVALLONE, RODRIGO ROSSETO GATI, PABLO SAMPAIO NATIVIDADE

¹ Graduado em Bacharelado Engenharia de Controle e automação, IFSP, Campus Catanduva, ph.pedrosilva@hotmail.com.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.01-0 Geração da Energia Elétrica

RESUMO:

A microgeração de energia a partir de fontes renováveis, como a energia eólica, vem se tornando cada vez mais relevante diante do aumento no consumo elétrico e da busca por soluções sustentáveis. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a construção de um microgerador eólico trifásico, utilizando materiais de baixo custo e técnicas de montagem acessíveis, inspirado em uma pesquisa anterior realizada no campus do IFSP em Catanduva. A metodologia incluiu uma revisão bibliográfica sobre microgeração e energias alternativas, além da construção e teste de um protótipo funcional. Nos testes iniciais, o sistema gerou uma potência média de aproximadamente 100 mW por fase sob condições de velocidade de geração moderada, comprovando sua viabilidade prática. Os resultados indicam potencial de aplicação em contextos urbanos e rurais de pequeno porte, além de utilidade como ferramenta didática no ensino de energias renováveis. Espera-se que esta iniciativa contribua para o desenvolvimento de soluções tecnológicas mais acessíveis e sustentáveis no campo da geração distribuída.

PALAVRAS-CHAVE: fontes renováveis; geração distribuída; microgeração de energia; sustentabilidade

MINIATURE WIND ENERGY: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A THREE-PHASE MINI GENERATOR FOR MINI TURBINES.

ABSTRACT:

The microgeneration of energy from renewable sources, such as wind power, has become increasingly relevant due to the growing electricity demand and the pursuit of sustainable solutions. This work presents the development and construction of a three-phase wind microgenerator, using low-cost materials and accessible assembly techniques, inspired by a previous study conducted at IFSP – Catanduva campus. The methodology included a literature review on microgeneration and alternative energy sources, followed by the practical implementation and testing of a functional prototype. Initial

tests showed an average power output of approximately 100 mW per phase under moderate wind conditions, demonstrating the system's practical feasibility. The results suggest potential applications in small-scale urban and rural contexts, as well as its usefulness as a didactic tool for teaching renewable energy. This initiative is expected to contribute to the development of more accessible and environmentally responsible technological solutions in the field of distributed generation.

KEYWORDS: Distributed generation; Microgeneration of energy; Renewable sources; Sustainability;

INTRODUÇÃO:

A busca por fontes de energia sustentáveis tem ganhado importância diante do esgotamento dos combustíveis fósseis, do aumento da demanda energética e dos impactos ambientais. Nesse cenário, as energias renováveis, como a solar e a eólica, destacam-se por serem alternativas limpas, inesgotáveis e cada vez mais viáveis economicamente (IEA, 2023). A energia eólica, em especial, apresenta crescimento expressivo: em 2021, foram adicionados 102 GW de capacidade no mundo, representando 7% da eletricidade global (REN21, 2022). No Brasil, esse avanço é igualmente significativo, com cerca de 890 parques em operação em 2023, concentrados principalmente nas regiões Nordeste e Sul.

Apesar do sucesso em larga escala, a aplicação da energia eólica em áreas urbanas e residenciais enfrenta desafios, como a necessidade de grandes espaços e ventos constantes, inviáveis em ambientes urbanos. Entretanto, microturbinas eólicas surgem como alternativa promissora, pois são compactas, funcionam em baixos regimes de vento e podem ser instaladas em coberturas, áreas abertas e residências (Warnakula et al., 2023). Essas microturbinas podem atuar em sistemas de geração distribuída, principalmente quando combinadas com painéis solares, promovendo autonomia energética e redução da dependência da rede elétrica (COSTA, 2010).

O desempenho de um gerador depende de fatores como tipo de enrolamento, número de polos, configuração elétrica, resistência dos materiais e acoplamento ao eixo da turbina. Assim, o presente trabalho tem como objetivo projetar, construir e testar um microgerador trifásico de baixo custo, utilizando técnicas simples, com base em uma proposta experimental desenvolvida no IFSP – câmpus Catanduva, contribuindo para soluções em microgeração eólica.

MATERIAL E MÉTODOS

A proposta inicial do projeto era a de utilizar um modelo do corpo de um ventilador, que teria discos fixos a ele, mas somente um disco preso ao rotor, um disco de ímãs permanentes. Quando colocado em funcionamento, o motor do ventilador colocaria esse disco de ímãs em movimento rotativo, que giraria em torno de uma bobina fixa em outro disco. Sabe-se que bobinas captam campos magnéticos e convertem em energia elétrica, esse é o princípio básico do funcionamento de geradores elétricos. Utilizaríamos desse princípio para produzir um campo magnético ao redor de uma bobina, com três bobinas diferentes (AWG #24, #28 #32 – AWG significa American Wire Gauge, medida internacional de diâmetro de fios), e posteriormente coletá-lo, para determinar qual das bobinas, sob diferentes rotações, produz melhor potência. Utilizaríamos de um tacômetro para medir a rotação (em HZ) do protótipo do ventilador e multímetros para analisar a produção de potência sob diferentes rotações. Com imagens e tabelas, seria mais fácil demonstrar e explicar a forma de obtenção desses dados e os resultados deste trabalho, porém fica limitado devido as restrições do modelo deste congresso.

Alguns ensaios utilizando este modelo foram realizados, porém a ideia acabou sendo descartada após uma série de problemas serem identificados. Seria muito difícil calcular a rotação com a qual o

ventilador estaria trabalhando, e com um tacômetro poderíamos até medir, ainda assim a faixa e a qualidade dos resultados seria muito baixa. Era necessário algo mais sólido e amplo do que apenas quatro velocidades disponíveis no projeto. Dessa forma, substituímos o modelo inicial do ventilador por um motor controlado por um inversor de frequência, que varia de 0 a 60Hz. Assim, poderíamos controlar a rotação de maneira muito mais precisa e ampla, várias rotações poderiam ser testadas e poderíamos obter diferentes resultados. Assim, um novo protótipo foi construído. Os discos de ímãs e de suporte das bobinas foram retirados do protótipo antigo, e conectados a um motor de indução trifásico de gaiola de meio cavalo vapor (CV).

O disco de ímãs do modelo inicial foi removido, e então o modelo inicial foi substituído por um motor trifásico do tipo gaiola controlado por um inversor de frequência. O disco de ímãs do modelo inicial foi reutilizado nesse modelo, inserido no eixo do motor de maneira similar ao modelo inicial.

Dois estatores foram desenvolvidos utilizando de um software de modelagem 3D, ambos construídos com defasagens de 120° (9 bobinas) e 180° (6 bobinas) no intuito de testar qualidade do sinal e da forma de onda do gerador.

Para observar a qualidade do sinal, utilizamos de um osciloscópio, e quatro multímetros. Novas bobinas foram adquiridas para que os testes pudessem ser realizados com ambos os estatores.

A realização de ensaios com diferentes configurações de ligação elétrica, como as ligações em série e em paralelo, é fundamental para compreender o comportamento do gerador sob variadas condições de carga e demanda. Essas configurações afetam diretamente as características elétricas do sistema, como a tensão de saída, a corrente fornecida e a eficiência do conjunto gerador-carga. A ligação em série tende a aumentar a tensão total do sistema, enquanto a ligação em paralelo favorece o aumento da corrente disponível, mantendo a tensão constante. A análise comparativa dessas ligações permite determinar qual arranjo oferece melhor desempenho para diferentes aplicações, além de contribuir para o dimensionamento correto de sistemas híbridos e a otimização de projetos de geração distribuída. Em projetos de microgeradores, especialmente aqueles voltados para aplicações educacionais e residenciais, essa investigação experimental é essencial para garantir o uso eficiente dos materiais disponíveis e para validar modelos teóricos previamente estabelecidos. Além disso, os ensaios fornecem dados importantes sobre o comportamento térmico, perdas resistivas e variações de rendimento em função da carga, aspectos críticos no desenvolvimento de soluções energeticamente viáveis e tecnicamente robustas (MACHADO; AGUIAR; TEIXEIRA, 2018).

Os ensaios com diferentes topologias de fechamento — estrela (Y) e triângulo (Δ) — são indispensáveis na caracterização do desempenho de máquinas elétricas trifásicas, como microgeradores. A configuração de fechamento influencia diretamente a forma como as tensões e correntes se distribuem entre as fases, impactando o rendimento, o torque de partida e a compatibilidade com cargas e inversores. A ligação em estrela é geralmente utilizada quando se deseja maior tensão de linha com menor corrente de fase, sendo vantajosa em situações em que o sistema precisa operar com tensões elevadas e correntes reduzidas. Já a ligação em triângulo é indicada para aplicações que exigem maior corrente e torque, pois permite maior potência aparente por fase, com menor impedância total. Ao realizar ensaios comparativos entre esses dois fechamentos, é possível avaliar o impacto de cada configuração sobre a eficiência e a estabilidade do sistema, além de verificar qual fechamento é mais adequado para diferentes condições de carga e regimes de operação. Esses dados são essenciais tanto para o projeto quanto para a aplicação prática do microgerador, sobretudo em contextos de geração distribuída, onde a flexibilidade de adaptação às cargas conectadas é um fator determinante (SILVA; NASCIMENTO; LIMA, 2017).

Agora a potência pode ser calculada utilizando a média das correntes de cada uma das fases, exceto em ensaios de máxima tensão, cujo objetivo é apenas medir a tensão em sua máxima capacidade.

Foi utilizada da fórmula deduzida a seguir, para que pudéssemos calcular uma potência geral levando em consideração as três fases.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Até o momento os ensaios eram realizados da seguinte forma: um resistor era ligado a uma bobina encaixada no disco e montada no ventilador, e utilizando de dois multímetros e um osciloscópio, foram obtidos os resultados que estavam sendo procurados, sendo um multímetro destinado a corrente e outro destinado a tensão. Utilizamos de um osciloscópio para a observação da forma de onda obtida e coleta de dados como frequência e período. Até o momento a temperatura era uma preocupação, caso o sistema ultrapassasse valores limites e acabasse prejudicando o sistema, então foi utilizado um sensor de temperatura DS18B20 para monitorá-la. Uma resistência não necessariamente pré-definida “X” era inserida e as medições eram realizadas de três maneiras:

a) Método Liga-Desliga: O ventilador é acionado na velocidade que está sendo ensaiada. Os dados são coletados e o ventilador é desligado imediatamente. O processo é repetido quatro vezes. O objetivo desse método é preservar ao mínimo a variação de temperatura entre as coletas de dados.

b) Método contínuo: O ventilador é acionado na velocidade ensaiada e mantido acionado durante toda a coleta, os dados são coletados sequencialmente um após o outro, quatro vezes. O objetivo desse método é manter uma diferença baixa (mas não mínima) de temperatura entre as coletas de dados.

c) Método contínuo prolongado: O ventilador é acionado na velocidade ensaiada e mantido acionado durante toda a coleta, os dados são coletados sequencialmente um após o outro quatro vezes, com um intervalo maior entre as coletas de dados (aproximadamente 2 minutos). O objetivo desse método é causar uma diferença maior de temperatura e observar se a temperatura influenciaria na produção de potência.

Nas primeiras medições, a velocidade é controlada através da frequência da forma de onda. O plano inicial era o de utilizar de um tacômetro para medir a rotação do disco de imãs, porém, devido à falta desse equipamento no Instituto Federal, foi utilizada a frequência como parâmetro para medição da velocidade.

Os primeiros ensaios realizados ainda utilizando o modelo do ventilador, mesmo que mais precários de maneira geral (por conta da forma de como os resultados eram coletados) nos demonstraram que de todas as três bobinas, a bobina AWG #28 demonstrou o melhor dos resultados. Novamente, para auxiliar na explicação, uma tabela seria necessária, porém não há espaço neste documento seguindo o modelo deste congresso.

A bobina #32 teve um problema ainda desconhecido, tendo sido inserida na montagem, mas não gerado nenhum resultado. A hipótese é ela ter desenrolado no transporte ou desgastado com o tempo.

Podemos observar que a potência produzida (mesmo com uma leve alteração na resistência) foi muito maior na bobina AWG #28 que na bobina AWG #24. Com estes resultados, já podemos determinar que a bobina #28 é a mais ideal para o nosso projeto. Dessa forma, o projeto pode seguir para a nova etapa, e podemos construir um estator trifásico com nove bobinas AWG #28.

Após a construção do microgerador trifásico, foram realizados diversos testes para avaliar o desempenho do sistema em diferentes configurações elétricas e variando resistência várias vezes, com foco na eficiência de geração e na viabilidade prática do projeto, e em encontrar o ponto de máxima potência.

Ambos os estatores modelados tridimensionalmente e construídos com uso de filamento de impressão 3D foram utilizados para comparação nas ligações estrela (Y) e triângulo (Δ), com a medição de tensão e corrente em diferentes cargas resistivas e rotações. Novamente, o objetivo de testar com dois estatores diferentes é experimentar a obtenção de uma qualidade melhor de sinal e de forma de onda. Os principais resultados foram:

- **Ensaio de fase singular (Bobinas em Série x Bobinas em Paralelo):**
 - Comparando os resultados em série e paralelo, a ligação série se saiu melhor, pois obteve maior obtenção de potência com variações da resistência.
 - Os ensaios foram realizados utilizando somente uma única fase em um único estator – Não era necessário realizar os mesmos ensaios no outro estator ou testar com várias fases.
 - Sendo assim, nas ligações das bobinas de cada fase, utilizaríamos da ligação série.
- **Estator com seis bobinas – Estrela x Triângulo:**
 - Em ligação estrela, houve um aumento na tensão geral e uma redução na corrente de cada fase. Em Ligação triângulo, a tensão geral baixou e a corrente de cada fase aumentou.
 - A ligação estrela se saiu melhor.
- **Estator com nove bobinas – Estrela x Triângulo:**
 - Assim como no estator de seis bobinas, em ligação estrela, houve um aumento na tensão geral e uma redução na corrente de cada fase. Em Ligação triângulo, a tensão geral baixou e a corrente de cada fase aumentou.
 - A ligação estrela se saiu melhor novamente.

Era esperado que o estator de seis bobinas retornaria resultados menores, pois estamos trabalhando com um menor número de bobinas. Entretanto, observa-se uma melhoria na qualidade do sinal da forma de onda.

Outros aspectos observados:

- A distância entre os ímãs e as bobinas influenciou significativamente na obtenção de potência.
- A redução do número de bobinas, embora tenha retornado resultados menores em termos de potência, resultou numa qualidade melhor.
- A fixação mecânica precisa entre rotor e estator foi essencial para garantir a repetibilidade dos testes.

CONCLUSÕES

O projeto demonstrou que é possível construir um gerador trifásico funcional com materiais acessíveis e de custo reduzido, alcançando resultados expressivos em termos de potência para sua escala. O sistema tem potencial tanto para aplicações práticas de microgeração quanto para uso educacional no ensino de energias renováveis. A construção e os ensaios realizados com o microgerador eólico permitiram identificar a configuração elétrica mais eficiente para o sistema: Um gerador trifásico de nove ou mais bobinas, em ligação estrela com as fases conectadas em série. Essa topologia demonstrou-se a mais adequada quando se busca a maximização da potência gerada, especialmente em condições de baixa rotação.

Ao longo do desenvolvimento, diversos protótipos foram projetados e testados, cada um oferecendo aprendizados únicos sobre o comportamento do gerador frente a diferentes condições operacionais. Ensaio envolvendo variações de frequência, resistência, distância entre componentes, polaridade dos ímãs e até mesmo o número de bobinas por fase — como na comparação entre estatores de 9 e 6 bobinas — forneceram dados consistentes sobre a resposta eletromagnética do sistema, revelando aspectos práticos da conversão de energia em contextos de baixa escala.

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações importantes foram identificadas durante a execução do projeto. A primeira delas diz respeito à ausência de um sistema real de captação de energia mecânica — como uma turbina funcional acoplada ao gerador —, o que obrigou a adoção de motores e inversores para simulação da rotação. Essa escolha, embora eficaz para fins laboratoriais, restringe a avaliação do sistema em situações reais de operação com vento ou água. Outra limitação está relacionada ao controle térmico do sistema: mesmo com o uso de sensores, não foi possível implementar um sistema de resfriamento ativo, o que compromete ensaios prolongados sob altas rotações. Além disso, a precisão da medição da potência ficou limitada pelo uso de instrumentos simples, como multímetros e resistores fixos, não havendo recursos para instrumentação de alta resolução.

Ainda assim, os resultados demonstraram que é possível desenvolver um microgerador funcional e didático utilizando materiais acessíveis e técnicas simples de fabricação. O sistema testado apresentou funcionamento satisfatório: constatou-se que a potência gerada aumenta proporcionalmente à velocidade de rotação aplicada, validando, em escala reduzida, os princípios dos grandes geradores eólicos industriais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o aprimoramento de diversos aspectos técnicos do sistema. O primeiro deles é a construção e análise das turbinas eólicas propriamente ditas, integrando o gerador a fontes reais de energia mecânica. Isso possibilitaria a realização de testes em campo e a obtenção de curvas de desempenho mais representativas. Além disso, propõe-se o uso de controladores eletrônicos de carga, sistemas de armazenamento de energia (como baterias) e interfaces com painéis fotovoltaicos, visando a criação de um sistema híbrido de geração distribuída. A aplicação de técnicas de impressão 3D com materiais condutivos, o uso de ferramentas de simulação eletromagnética mais avançadas e a incorporação de sensores inteligentes também são caminhos promissores para inovação. Também deve-se levar em conta o estudo realizado quanto a defasagem das bobinas na comparação de 120° e 180°.

Do ponto de vista acadêmico, este projeto pode servir como plataforma experimental para disciplinas de eletricidade, energias renováveis, instrumentação e controle, promovendo o aprendizado prático e interdisciplinar. No contexto social, iniciativas como esta podem contribuir para projetos de extensão voltados a comunidades isoladas, escolas públicas ou pequenas propriedades rurais, disseminando o uso de tecnologias sustentáveis e acessíveis.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Orientação de Pablo Sampaio Natividade e Co-orientação de Rodrigo Rosetto Gatti e Elson Avallone.

REFERÊNCIAS

REN21. **Renewables 2021 Global Status Report**. Paris, FR: [s.n.], 2021

COSTA, Dreifus Medeiros. **Aspectos técnicos e operacionais do uso de microturbinas conectadas aos sistemas elétricos para geração distribuída de energia**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

WARNAKULA, Jayani; VIDANAPATHIRANA, Ajith; EKANAYAKE, Thushara; SENANAYAKE, Duranga. **Design of Micro Scale Wind Turbine Blade for Low Wind Speed Applications**. In: [Nome da Conferência ou Evento], 2023, p. 1-6. DOI: 10.1109/INFOTEH57020.2023.10094182

MACHADO, M. P.; AGUIAR, M. L.; TEIXEIRA, C. A. **Análise de desempenho de geradores elétricos de pequena escala: ligações em série e paralelo**. Revista Brasileira de Energia Renovável, v. 7, n. 2, p. 109–118, 2018.

SILVA FILHO, M. P. O.; LIMA, L. C.; MACÊDO, A. R. M. **Fabricação de uma pequena turbina eólica de eixo vertical**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, n. 3, p. 1–16, 2015.

Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rber.v4i3.35466>. Acesso em: 25 maio 2025