

## Avaliação de desempenho de um microgerador

### Performance evaluation of a generator

#### RESUMO

William Kenji Pires Kamimura  
[williamkamimura@alunos.utfpr.edu.br](mailto:williamkamimura@alunos.utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Ednei Luiz Miotto  
[edneimiotto@utfpr.edu.br](mailto:edneimiotto@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Gerson Filippini  
[gfilippini@utfpr.edu.br](mailto:gfilippini@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento da curva de tensão de saída de um microgerador de ímãs permanentes com relação a variação da velocidade. Para isso, uma bancada de testes foi preparada para a realização de ensaios de laboratório neste microgerador de ímãs permanentes. Para simular a variação da velocidade, o microgerador foi acoplado a um motor de indução trifásico acionado por um conversor de potência que permitiu variar sua velocidade e com isso analisar o comportamento da tensão de saída do dispositivo para diferentes velocidades. Todos os ensaios realizados foram feitos sem carga conectada à saída do gerador. Os resultados obtidos apontaram alguns problemas construtivos no dispositivo que deverão ser solucionados através de um novo protótipo. Porém, as curvas de tensão de saída demonstram possibilidades de aplicação deste microgerador para atendimento de pequenas cargas isoladas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia limpa. Energia eólica. Fontes renováveis de energia. Geração distribuída.

#### ABSTRACT

This work evaluates the behavior of the output voltage curve of a permanent magnet microgenerator in relation to the variation speed. For this, a test bench was prepared for the laboratory tests of this permanent magnet micro-generator. To simulate the variation speed, the micro-generator was coupled to a three-phase induction motor driven by a power converter that allowed varying its speed and thereby analyzing the behavior of the device's output voltage for different speeds. All tests were carried out without load connected to the generator output. The results obtained pointed out some constructive problems in the device that should be solved through a new prototype. However, the output voltage curves show possibilities application of this microgenerator to serve small isolated loads.

**KEYWORDS:** Clean energy. Wind energy. Renewable energy sources. Distributed generation.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Crescimento da economia, aumento do poder de consumo e o desenvolvimento de novas tecnologias são exemplos de fatores que estão intimamente relacionados com o aumento do consumo de energia elétrica. Para tanto, é preciso garantir o atendimento dessa demanda crescente de forma segura, confiável e economicamente viável. Soma-se a isso a necessidade de considerar as restrições ambientais, os impactos sociais e financeiros, que são cada vez mais importantes na tomada de decisão para construção de novos empreendimentos no setor de energia e corroboram com a necessidade de investimento e desenvolvimento de novos modelos e tecnologias voltadas a exploração de recursos renováveis como alternativas para ampliar a matriz energética no Brasil e no mundo (GELLER, 2003).

Apresentando-se como a principal alternativa de substituição das fontes de origem fósseis e esgotáveis (carvão mineral, petróleo e gás natural) na geração de energia elétrica, as fontes renováveis vêm ganhando espaço na diversificação das matrizes energéticas em diversos países (BAZZO, 2017). Outro fator de incentivo a substituição das fontes fósseis por fontes renováveis e menos poluentes são os apelos cada vez maiores e mais frequentes de organizações sociais e da sociedade civil organizada para a redução da emissão de gases que contribuem com o aquecimento global e provocam importantes alterações climáticas. A assinatura do protocolo de Kyoto (UNITED NATIONS, 1998) é um dos exemplos de ações que visam estabelecer, através de acordos firmados entre os países que integram a Convenção de Mudanças Climáticas das Nações Unidas, metas para redução de emissão de gases poluentes que afetam o aquecimento global.

Neste contexto, a energia eólica se apresenta como uma excelente opção de fonte renovável para produção de energia elétrica, podendo ser utilizada de forma isolada ou conectada ao sistema elétrico de potência (SEP). O setor de energia eólica apresentou um crescimento notável, aumentando em 25 vezes a capacidade instalada entre os anos 2000 e 2015, passando de 17,4 para 432,88GW. (BAZZO, 2017; GWEC, 2015). Esta tendência de crescimento deve continuar, impulsionada pelas políticas ambientais e pelo desenvolvimento tecnológico do setor, que vêm reduzindo os custos de produção da energia eólica e tornando-a mais competitiva. No Brasil o planejamento de expansão do setor, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério das Minas e Energia, no decênio 2014 a 2024 pretende-se saltar de uma capacidade instalada de 5 GW para 24 GW, o que representaria 11,6% de participação da energia eólica na matriz energética brasileira (EPE, 2015).

Diante deste cenário bastante promissor, este trabalho busca ampliar os horizontes de pesquisa com foco na inserção de microgeradores eólicos de baixo custo e fácil instalação atuando possivelmente como fontes de geração distribuída (GD) interligadas ao SEP ou atuando de modo isolado. Assim, este trabalho apresenta os resultados dos ensaios realizados em um microgerador de ímãs permanentes. Esta primeira etapa da pesquisa realizou ensaios em um protótipo de baixo custo e pequena escala existente no Laboratório de Máquinas Elétricas do curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus de Toledo e se resumem ao levantamento das curvas de tensão de saída em circuito aberto deste microgerador operando em diferentes regimes de velocidade. Uma bancada para a realização dos ensaios foi desenvolvida de

modo a simular a variação do vento, e desta forma, a turbina eólica foi substituída por um acoplamento mecânico a um motor de indução trifásico (MIT) acionado por um conversor de frequência trifásico. Os resultados obtidos durante os ensaios apontaram a necessidade de adequações ao protótipo como poderá ser visto em detalhes na seção dedicada a discussão dos resultados e conclusões.

### OBJETIVOS GERAIS

Como objetivo geral este trabalho apresenta as curvas da característica tensão x velocidade em circuito aberto de um microgerador de ímãs permanentes.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

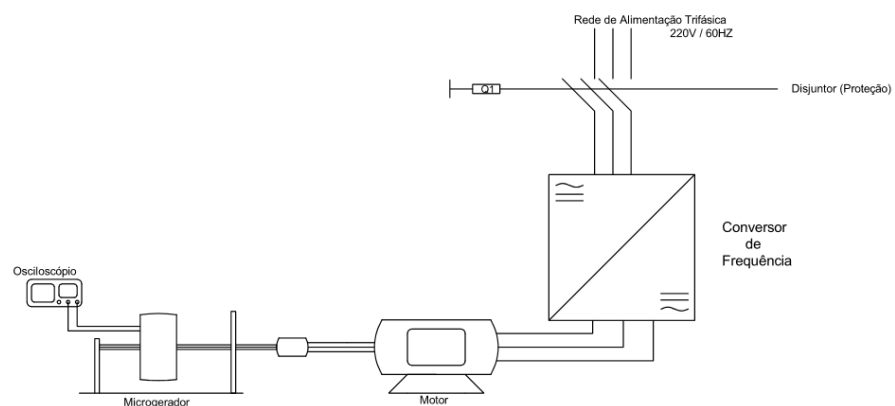
- realizar ensaios de bancada com um protótipo para um microgerador eólico de ímãs permanentes;
- Levantamento de curvas tensão a vazio para diferentes velocidades;
- Análise do comportamento eletromagnético do microgerador com a variação de velocidade.

### MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados: a) a bancada de testes construída para os ensaios do microgerador de ímãs permanentes; b) as características dos ímãs utilizados; c) as características construtivas do microgerador; d) relato dos problemas encontrados durante os ensaios realizados.

Na Figura 1 é apresentada a bancada de testes implementada para a realização dos ensaios propostos nesta primeira fase da pesquisa. O objetivo dos ensaios foi obtenção das curvas características de tensão a vazio para diferentes velocidades de regime permanente do microgerador. Para simular a variação da velocidade, o microgerador foi acoplado mecanicamente a um MIT de dois polos, alimentado eletricamente por um conversor de frequência utilizado para variar a rotação no eixo do microgerador.

Figura 1 – Bancada de testes

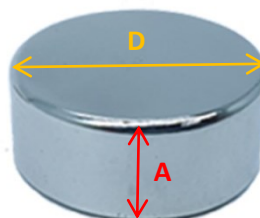


Fonte: própria do autor (2020)

Os dados de tensão de saída do microgerador foram amostrados em um voltímetro digital modelo ET-2231 da Minipa, e em um osciloscópio da Agilent Technologies modelo DSO3102A - 100MHz.

No protótipo do microgerador foram utilizados vinte ímãs de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) revestido externamente por uma camada de Níquel para aumentar sua resistência a corrosão. Estes ímãs tem um formato de disco com 12mm de diâmetro e 5mm de altura, conforme mostrado na Figura 2. O tipo de ímã utilizado é um N35, ou seja, trata-se de um NdFeB com produto energético próximo a 35 MGO e uma resistência a temperatura de 80°C. Mais detalhes técnicos sobre a característica magnética deste ímã são apresentados na Tabela 1, enquanto as características físicas e térmicas são apresentadas na Tabela 2.

Figura 2 – Ímã de NdFeB – N35



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 1 – Característica magnéticas do NdFeB - N35

Tipo	Remanência (Br)	Força Coercitiva (Hc)	Produto Energético Máximo (BH max)
	G	Oe	MGOe
N35	11400/11800	>10800	33.0/36.0

Fonte: Elaborado a partir de dados da Teslaimas (2020).

Tabela 2 – Característica físicas e térmicas do NdFeB - N35

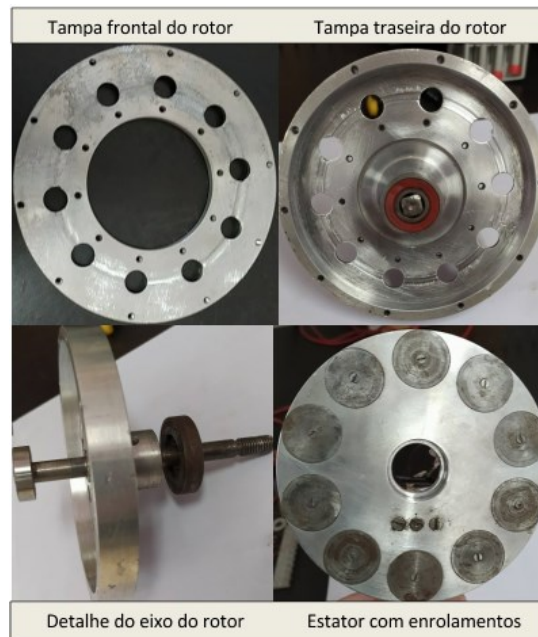
Tipo	Densidade	Temperatura máxima de trabalho	Coeficiente de temperatura	
	g/cm <sup>3</sup>	°C	Br % / °C	Hc % / °C
N35	7.4	80	-0.12	-0.6

Fonte: Elaborado a parti de dados da Teslaimas (2020).

Na Figura 3 são apresentados alguns aspectos construtivos do microgerador de ímãs permanentes analisado neste trabalho. Antes é necessário salientar que não fez parte do escopo desta pesquisa o projeto de dimensionamento elétrico, magnético e mecânico deste microgerador, pois trata-se de um equipamento que já se encontrava disponível no laboratório de máquinas elétricas do curso de engenharia eletrônica da UTFPR campus Toledo. Desta forma, os pesquisadores trataram de dar condições de funcionamento ao equipamento e através da bancada de teste construída para realização dos ensaios no microgerador, foi possível levantar as curvas de tensão a vazio para diferentes velocidades de rotação. O microgerador pode ser dividido em três partes básicas:

- a) Estator fabricado em alumínio usinado onde estão alojados dez conjuntos de enrolamentos de cobre independentes e isolados eletricamente entre si e da massa do microgerador. Estes enrolamentos são enrolados entorno de um núcleo ferromagnético de qualidade magnética desconhecida pelos pesquisadores;
- b) Eixo fabricado em aço usinado com a função de promover a transferência de torque entre a máquina primária (MIT) e o rotor do microgerador através de um acoplamento mecânico flexível;
- c) Rotor fabricado em alumínio e dividido em duas peças onde estão distribuídos vinte ímãs de NdFeB em formato de disco, dez em cada face do rotor. As duas partes do rotor são unidas por parafusos e os ímãs são encaixados sob pressão em pequenos nichos usinados na superfície das duas tampas que compõem o rotor. Os ímãs são distribuídos de modo a maximizar o fluxo no interior do enrolamento.

Figura 3 – Detalhes microgerador de ímãs permanentes



Fonte: Autoria própria (2020).

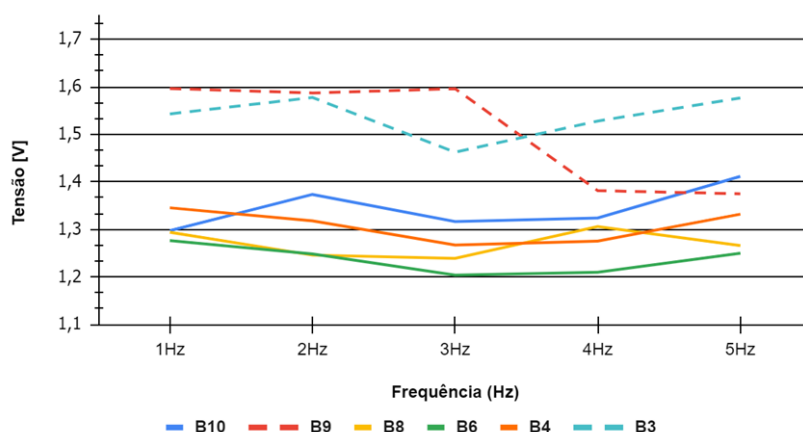
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados alguns resultados preliminares dos ensaios realizados no microgerador de ímãs permanentes avaliado. Na Figura 4 é apresentado o perfil de tensão para cinco diferentes velocidades de rotação ajustadas no conversor de frequência utilizado para acionar o MIT. Embora o estator seja composto por dez enrolamentos, quatro deles apresentaram problemas durante os ensaios, e tiveram seus resultados desconsiderados. Desta forma, os resultados obtidos são para os seis enrolamentos denominados, B10, B9, B8, B6, B4 e B3 respectivamente. As velocidades testadas, em rotações por minuto (RPM), no eixo do microgerador correspondem a diferentes frequências de acionamento do MIT. Em ordem crescente, as velocidades ensaiadas foram de, 48 RPM, 115 RPM, 174 RPM, 234 RPM e 292 RPM respectivamente.

Pela análise da Figura 4 pode-se concluir que de foram gerais, para o microgerador avaliado, a variação da velocidade não contribui de forma efetiva para a elevação da amplitude da tensão de saída, pelo contrário, em alguns enrolamentos houve uma redução dessa amplitude. Os enrolamentos B10, B8, B6 e B4 tiveram comportamento muito semelhante e suas tensões de saída ficaram dentro da faixa de 1,2V a 1,4V para o range de velocidades testadas. Os enrolamentos B9 e B6 apresentaram comportamento semelhante entre si, mas diferente dos anteriores, apresentando uma tensão de saída variando dentro da faixa de 1,4V a 1,6V. Os ensaios foram feitos em circuito aberto e os procedimentos e equipamentos de medição das tensões foram os mesmos para todos os enrolamentos.

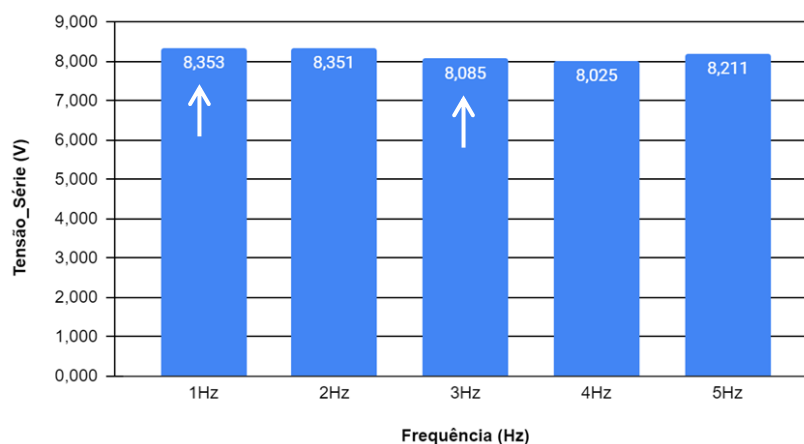
Um segundo ensaio foi realizado ligando os seis enrolamentos em série de forma a obter a soma das tensões de saída produzidas individualmente. Este resultado é apresentado na Figura 5. Para este caso observa-se que a tensão total de saída variou aproximadamente 4.1% com a variação da velocidade, sendo a amplitude mínima e máxima registradas de 8.025V e 8.353V, respectivamente.

Figura 4 – Curvas de Tensão x Velocidade para cada enrolamento



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 5 – Amplitude da Tensão x Velocidade – enrolamentos ligados em série



Fonte: Autoria própria (2020).

Levando em consideração que apenas seis enrolamentos deste microgerador foram considerados (enrolamentos B1, B2, B5 e B7 apresentaram problemas técnicos), conclui-se que a tensão de saída poderia atingir valor superior a 12V caso os dez enrolamentos estivessem ligados em série. Os enrolamentos defeituosos apresentavam problemas relacionados ao rompimento interno do condutor da bobina ou enrolamento em curto-circuito com a massa. Salienta-se que tais enrolamentos defeituosos não puderam ser substituídos a tempo para a realização de novos ensaios.

Por fim é importante salientar que o microgerador de ímãs permanentes avaliado se trata de um equipamento que foi disponibilizado pronto e sem dados a respeito de seu projeto, mecânico e magnético, bem como não havia dados de ensaios coletados anteriormente que permitissem fazer comparações. Desta forma, os autores se propuseram a estudar o equipamento e a realizar ensaios preliminares que pudessem levar a conclusões sobre problemas construtivos e possíveis melhorias no atual protótipo, bem como ter subsídio para propor o projeto e construção de novos protótipos de baixo custo para microgeradores de energia elétrica. Concluiu-se que, embora os materiais utilizados na construção dos circuitos elétrico e magnético não fossem os mais adequados para o propósito, impactando diretamente na redução da eficiência do microgerador, observou-se através dos ensaios realizados quais melhorias no projeto construtivo do microgerador ocasionariam melhorias na sua eficiência a ponto de torna-lo aplicável para o atendimento de pequenas cargas isoladas.

## CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o desempenho de um microgerador de ímãs permanentes. Uma bancada de testes foi construída para a realização de ensaios, que possibilitaram analisar as curvas de tensão de saída em circuito aberto para este microgerador considerando a variação de velocidade. Os resultados demonstraram a necessidade de algumas modificações construtivas no dispositivo com o objetivo de otimizar a produção de energia elétrica. Melhorias na qualidade do material ferromagnético empregado e no dimensionamento dos enrolamentos seriam essenciais. Por fim, concluiu-se que apesar dos problemas encontrados, na qualidade do material ferromagnético empregado e no dimensionamento dos enrolamentos, este microgerador tem grande potencial de aplicação, por exemplo, em sistemas isolados atendendo a pequenas cargas consumidoras. Neste sentido, os autores propõem o avanço das pesquisas e a implementação de novos protótipos, com projetos mecânico e magnético mais otimizados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UTFPR pelo apoio a realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

BAZZO, T. P. M. **Projeto ótimo multidisciplinar de geradores síncronos de imãs permanentes para aerogeradores considerando a curva de ocorrência do vento.** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em:

<<https://www.researchgate.net/publication/315805026>> Acesso em: 23 jul. 2020

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**, 2015. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2024>>

Acesso em: 23 jul. 2020

GELLER, H. S. **Revolução energética: políticas para um futuro sustentável.** 1 edição. Tradução: Maria Vidal Barbosa, Rio de Janeiro: Editora Relume Dumará/USAid, 2003.

GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report: annual Market update.** 2015. Disponível em: <<https://gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2015-annual-market-update/>> Acesso em: 23 jul. 2020

TESLA PRODUTOS MAGNÉTICOS. **Imã de Neodímio, característica magnéticas, físicas e térmicas.** Disponível em: <<https://teslaimas.com.br/imas-de-neodimio/>> Acesso em: 24 jul. 2020

UNITED NATIONS. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.** CHANGE, U. N. F. C. O. C. Kyoto 1998. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>> Acesso em: 24 jul. 2020