

Análise de harmônicos em um microgerador *brushless* com rotor de ímãs permanentes inclinados

Ednei Luiz Miotto^{[1]*}, Fernando Antônio Brandalise^[2], Alberto Yoshihiro Nakano^[3]

^[1] edneimiotto@utfpr.edu.br. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Paraná, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9179-6208>

^[2] fernandobrandalise@alunos.utfpr.edu.br. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Paraná, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8795-1958>

^[3] nakano@utfpr.edu.br. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, Paraná, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3757-1427>

* autor correspondente

Resumo

O consumo global de combustíveis fósseis é um fator que contribui para a geração de gases de efeito estufa e eventos climáticos extremos, como secas, inundações, incêndios florestais e ondas de calor em todo o mundo. Embora o mundo ainda precise do petróleo como fonte de energia, é importante olhar para o futuro e tentar reduzir seu consumo. Uma maneira é priorizar a produção de energia elétrica através de fontes limpas e renováveis, visto que há uma tendência de usá-la para atividades cotidianas, desde o preparo de alimentos até o transporte veicular. Exemplos dessas fontes são eólica, hidráulica e solar, mas este estudo se concentra naquelas que dependem de máquinas rotativas, baseadas em ímãs permanentes, cuja construção e aspectos dinâmicos podem influenciar no seu desempenho. Assim, este artigo investiga os efeitos relacionados à inclinação de ímãs permanentes de neodímio alojados no rotor de um microgerador trifásico, sem escovas e de fluxo radial. A análise dos dados coletados durante os ensaios realizados no microgerador demonstram a influência direta da inclinação relativa desses ímãs na distorção harmônica total no sinal de tensão trifásica de saída do dispositivo, o que tem como consequência o impacto direto em um dos parâmetros de análise da qualidade de energia elétrica propostos pela ANEEL.

Palavras-chave: combustíveis fósseis; distorção harmônica total; energia renovável; ímãs permanentes; microgerador *brushless*.

Harmonic analysis of a brushless microgenerator with a rotor having a tilted configuration of permanent magnets

Abstract

Global consumption of fossil fuels is a factor that contributes to greenhouse gases and extreme weather events such as droughts, floods, wildfires, and heatwaves around the world. Although the world still needs oil as an energy source, it is important to look ahead and aim to reduce its consumption. One way is to focus on electricity from clean and renewable sources since there is a tendency to use it for daily activities, from cooking to transportation. Examples of such sources are wind, hydraulic, and solar; but this study will center on those dependent on rotating machines, based on permanent magnets, whose construction and dynamic aspects can influence their performance. Then, this article investigates the effects related to the inclination of neodymium permanent magnets housed in the rotor of a three-phase, brushless, radial flux microgenerator. The analysis of the data collected during the tests on the microgenerator demonstrates the direct influence of the relative inclination of these magnets on the total harmonic distortion in the device's three-phase output voltage signal, which consequently has a direct impact on one of the parameters for analyzing the quality of electrical energy proposed by ANEEL.

Keywords: *brushless microgenerator; fossil fuels; permanent magnets; renewable energy; total harmonic distortion.*

1 Introdução

O gerador síncrono é o dispositivo mais empregado na geração de energia elétrica ao redor do mundo. Este tipo de máquina é uma realização física dos conceitos de conversão eletromecânica de energia. Tais máquinas são empregadas, por exemplo, em sistemas de geração hidráulica, eólica e térmica de energia elétrica, ativo essencial para o desenvolvimento e progresso humano. Dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2025) projeta que o consumo global de eletricidade crescerá a uma taxa de cerca de 4% ao ano até 2027, impulsionado pela expansão de data centers, eletrificação do transporte e aumento do uso de ar-condicionado. As economias emergentes e em desenvolvimento, especialmente China e Índia, são as principais responsáveis por esse aumento, que também se reflete no crescimento da demanda pela indústria. Portanto, a melhor compreensão dos fundamentos associados à conversão de energia permite projetar e desenvolver geradores cada vez mais eficientes e adequados à produção de energia elétrica.

Contudo, é fundamental que a energia elétrica entregue aos consumidores atenda a padrões bem definidos de qualidade, o que permitirá o correto funcionamento de dispositivos e equipamentos ligados à rede de alimentação. Cada país tem seus próprios organismos responsáveis pela definição e fiscalização destes padrões de qualidade da energia distribuída, e, no caso do Brasil, o órgão responsável é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020). A manutenção de padrões de qualidade evita, entre outras coisas, o mau funcionamento e redução da vida útil de equipamentos elétricos, surgimentos de distúrbios elétricos na rede causando erros lógicos em circuitos integrados, surgimento de ressonância, desempenho abaixo do esperado para motores elétricos, aumento de perdas em transformadores e redução da vida útil de capacitores (Arrillaga; Watson, 2003).

Um problema relevante em sistemas de energia elétrica é a presença e influência de componentes harmônicos. Elas são motivo de estudo e preocupação de pesquisadores da área elétrica, pois surgem durante o condicionamento do sinal da energia gerada em alguns sistemas que utilizam fontes renováveis, e precisam ser tratadas antes da sua injeção na rede de transmissão ou distribuição de energia. Desse modo, sistemas de controle para o tratamento e redução de harmônicos tem sido foco de diversos trabalhos (Elkholy; El-Hameed; El-Fergany, 2018; Eroğlu *et al.*, 2021; Moeed Amjad; Salam, 2014; Paris; Carnielutti; Martins, 2023). Por outro lado, apesar da atenção dada aos harmônicos gerados pelo processo de condicionamento de energia, há poucos estudos relacionados aos harmônicos produzidos no processo de geração de energia elétrica por máquinas rotativas, principalmente em micro ou em pequenos geradores que utilizam ímãs permanentes. Cabe salientar, que no caso da energia solar, a geração inicial dá-se em corrente contínua e posteriormente é convertida para corrente alternada em uma frequência padronizada por meio do uso de conversores eletrônicos de frequência, não sendo utilizado a máquina síncrona durante o processo.

Em especial, nos microgeradores de ímãs permanentes sem escova, objeto de estudo neste trabalho, a presença de harmônicos na geração de energia está relacionada a aspectos construtivos do microgerador. Ou seja, o projeto da estrutura do rotor e estator, a disposição dos enrolamentos de armadura nas ranhuras da estrutura ferromagnética do estator, a disposição dos ímãs no estator ou no rotor da máquina, as características dos materiais empregados na sua construção, entre outros aspectos técnicos, podem influenciar a forma do sinal de saída da tensão gerada. Por forma do sinal, entende-se que este deva ser um sinal perfeitamente senoidal com frequência e amplitude estáveis.

Desta forma, uma vez tomados os cuidados necessários durante a fase de projeto e construção da máquina, é possível controlar e reduzir a presença de componentes harmônicos causados pelo próprio gerador em seu sinal de saída. Entretanto, devido ao tempo e ao custo elevado para o projeto e desenvolvimento de geradores síncronos, muitas vezes a simulação de modelos ou a criação de protótipos em escala reduzida são o caminho mais viável para estudos que permitem observar, e antecipar problemas que poderiam ocorrer no projeto final em escala real (Gul; Gao; Lenwari, 2020; Hua; Zhu; Xu, 2020; Nikbakhsh; Izadfar; Beromi, 2017).

Em Brandalise, Miotto e Nakano (2024) foi desenvolvida uma bancada didática para a realização de estudos de conversão de energia que utiliza um microgerador *brushless* de ímãs permanentes construído a partir do reaproveitamento de componentes de um motor de indução trifásico (MIT). Para este fim, novos enrolamentos trifásicos de armadura foram instalados no núcleo

ferromagnético reutilizado, e um novo rotor foi projetado e fabricado para alojar os blocos de neodímio, responsáveis pela produção de fluxo magnético no microgerador. A bancada é composta ainda por uma máquina primária — um motor de indução trifásico — acoplada ao eixo do microgerador, que simula a força motriz externa, tendo sua velocidade controlada por meio de um conversor de frequência. No contexto educacional, como ferramenta de ensino aplicada a cursos de graduação em engenharia, a bancada permite a simulação de condições normais e anormais de operação, incluindo a inserção controlada de falhas, com o objetivo de avaliar a perda de eficiência do microgerador. Diversos ensaios foram realizados e os resultados apresentados neste trabalho, abrangendo desde a análise das perdas — no cobre, no ferro, por atrito e ventilação — e do *cogging* torque até o estudo dos efeitos e da influência do desalinhamento entre o gerador e a máquina primária. Entretanto, o artigo não apresentava detalhes construtivos sobre o rotor de ímãs permanentes utilizado no protótipo do microgerador, tampouco resultados relacionados à qualidade do sinal de tensão gerado na saída do dispositivo ensaiado ou a relação deste com a inclinação dos ímãs do rotor.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo detalhar a construção de um rotor equipado com ímãs permanentes de neodímio e analisar sua influência na qualidade do sinal de energia elétrica gerado, avaliada por meio da distorção harmônica total (THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*). Esse parâmetro é amplamente empregado na quantificação da contribuição das componentes harmônicas em relação à componente fundamental do sinal elétrico. Diferentemente do que é comumente observado na literatura, na qual a máquina elétrica é projetada e construída de forma integral, este trabalho propõe a apresentação de informações complementares sobre um microgerador concebido e adaptado a partir do reaproveitamento de materiais considerados sucata, do emprego de técnicas de baixo custo para a fabricação do rotor e, por fim, da utilização da THD como métrica para a avaliação da qualidade do sinal elétrico gerado.

A Seção 2 apresenta o conceito de THD conforme estabelecido na literatura especializada, além de descrever de forma detalhada a construção do rotor utilizado no protótipo experimental. A Seção 3 descreve a configuração experimental adotada neste estudo. Na Seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para a tensão de saída do microgerador, analisados nos domínios do tempo e da frequência. Por fim, a Seção 5 reúne as conclusões do trabalho e indica possíveis direcionamentos para investigações futuras.

2 Referencial teórico

Nesta seção, apresenta-se o conceito de distorção harmônica, o qual é discutido à luz das componentes harmônicas presentes na tensão de saída do microgerador *brushless* analisado neste trabalho. Adicionalmente, são apresentados, de forma detalhada, os aspectos relacionados ao projeto e à construção do rotor com ímãs permanentes inclinados.

2.1 Distorção harmônica

Harmônicos representam múltiplos inteiros da frequência fundamental de um sinal. Um exemplo clássico da presença de harmônicos é tratado no estudo da música onde a cada oitava musical dobra-se a frequência da nota musical. Diferentemente das frequências harmônicas presentes no contexto musical, a intensidade e presença de harmônicos no sistema elétrico de energia podem prejudicar o funcionamento adequado de diversos equipamentos aplicados nas indústrias e residenciais projetados para operarem dentro de padrões elétricos bem definidos. Harmônicos podem ser intrínsecos ao processo de geração, serem resultantes de relações não lineares no processo transmissão e distribuição, ou podem surgir no consumo de energia quando há a presença de cargas não lineares como ocorrem em processos de chaveamento (Arrillaga; Watson, 2003).

Uma forma de quantificar a influência das harmônicas na rede elétrica é pelo cálculo da THD (Sivaraman; Sharmeela, 2021) que tem por objetivo verificar a influência das potências das componentes harmônicas em relação a potência da componente fundamental. Quanto menor o valor de THD, menor será a contribuição das harmônicas no conteúdo espectral do sinal e, conseqüentemente, melhor será a condição da componente fundamental gerada em relação ao sinal ideal. A THD é definida como a razão entre a somatória da potência das componentes harmônicas e a potência da componente fundamental, expressa pela Equação 1:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{+\infty} V_i^2}{V_1^2}} \times 100 \quad (1)$$

em porcentagem, sendo que V_i representa as componentes harmônicas e V_1 a componente fundamental, respectivamente.

Reforça-se que o THD é usado neste trabalho para quantificar a influência de componentes harmônicos na geração do sinal de energia em relação ao caso ideal, na qual se espera exclusivamente a presença da componente fundamental.

2.2 Gerador *brushless* de ímãs permanentes

Em Brandalise, Miotto e Nakano (2024) foram apresentados os detalhes de uma banca de teste didática construída para estudo de conversão de energia utilizando um microgerador *brushless* de ímãs permanentes de fluxo radial. Naquele trabalho também foi abordada a realização de diversos ensaios simulando diferentes condições de trabalho para o qual o microgerador foi submetido, porém, em nenhum dos ensaios foi discutido ou verificado a qualidade do perfil harmônico do seu sinal de saída.

O microgerador desenvolvido para aquela bancada de testes, utilizou partes de um antigo motor de indução trifásico (MIT) fora de uso que possuía originalmente uma potência nominal de 1 CV (736 Watts), 4 polos, e um núcleo ferromagnético do estator com 24 ranhuras. Do motor original foram reaproveitados a carcaça, o material ferromagnético do núcleo do estator, e as tampas frontal e traseira originais do MIT. Porém, novos enrolamentos para a armadura trifásica foram projetados e construídos para este novo estudo. Cada um dos enrolamentos de fases foi subdividido em 4 pacotes de bobinas ligadas em série, sendo cada pacote de bobina, dimensionado com 36 espiras utilizando fio de cobre esmaltado classe de isolamento B (130 °C), 17 AWG, que ao final, foram inseridas uma a uma nas ranhuras do núcleo do estator reutilizado. Um novo rotor foi projetado e construído com a proposta de acomodar os blocos de ímãs neodímio em seu interior. Estes ímãs são responsáveis pela geração de fluxo magnético no interior da máquina.

O *software* SolidWorks CAD 3D foi utilizado para projetar o novo rotor utilizado no microgerador. Este foi estruturado com 8 compartimentos, onde cada compartimento recebeu dois blocos de ímãs de neodímio com grade magnética N35 (Brown; Ma; Chen, 2002). As dimensões dos blocos de neodímio utilizados são as seguintes: 10 mm de espessura, 20 mm de largura e 40 mm de comprimento. Considerando o comprimento do núcleo ferromagnético do estator, construiu-se o rotor com um comprimento de 80 mm, o suficiente para conseguir alojar 2 blocos de neodímio juntos e com o mesmo polo voltado para o entreferro que separa o rotor do estator. Dessa forma, foram empregados 16 ímãs na construção do microgerador de oito polos, os quais foram rigidamente fixados no interior do rotor por meio de gavetas para o encaixe dos blocos e de uma tampa de fechamento superior, confeccionada na mesma resina utilizada na fabricação do corpo do rotor.

É importante salientar que o rotor desenvolvido neste protótipo foi impresso em resina por manufatura aditiva, que destaca como vantagens estratégicas a facilidade de aquisição de filamentos para impressão, e versatilidade para o desenvolvimento e produção de estruturas complexas com baixo custo e menor tempo de produção. Além dessas vantagens, o rotor desenvolvido torna o protótipo mais leve e mais barato, podendo ser o rotor facilmente substituído por outros projetos, com dimensões, número de polos, ou diferentes ângulos de inclinação para os ímãs.

Em Alemi-Rostami *et al.* (2022), Faqih, Sutodjo e Wahjono (2019) e Jagiela, Mendrela e Gottipati (2013), foram discutidos resultados obtidos para geradores e motores elétricos que utilizam ímãs permanentes no rotor, e consideram diferentes ângulos de inclinação das ranhuras da estrutura ferromagnética do estator (*stator slot skew angle*). Nesses trabalhos, além de detalhar aspectos de otimização e projeto da máquina elétrica (gerador ou motor), também foi analisado a influência do ângulo de inclinação das ranhuras do estator na redução do torque de engrenamento (*cogging torque*), redução de vibrações mecânicas, redução de ruído acústico, aumento de eficiência, e redução de THD.

Entretanto, diferente dos artigos citados no parágrafo anterior, este trabalho utiliza um núcleo ferromagnético de estator cujas ranhuras não têm inclinação em relação ao eixo do rotor. Cabe lembrar que esta pesquisa utilizou partes de um MIT considerado sucata sendo que o núcleo do estator foi uma

das partes reutilizadas. Esta limitação foi superada com o projeto de um novo rotor onde os ímãs passaram a ser inclinados em relação às ranhuras do estator, o que possibilitou a análise e comparação dos mesmos aspectos e resultados discutidos em outras pesquisas citadas anteriormente (Alemi-Rostami *et al.*, 2022; Jagiela; Mendrela; Gottipati, 2013).

Desse modo, o projeto do rotor proposto neste trabalho considerou a alocação dos blocos de ímãs de neodímio com um ângulo de inclinação de $7,46^\circ$ em relação às ranhuras do estator. Na Figura 1 os blocos de neodímio estão representados por retângulos nas cores vermelha e azul para indicar, respectivamente, os polos Norte e Sul colocados de forma alternada ao longo da circunferência do rotor. Na Figura 1a, o retângulo pontilhado representa uma ranhura do estator e sua orientação em relação aos elementos magnéticos do rotor, enquanto a Figura 1b indica o valor do ângulo de inclinação entre dois conjuntos paralelos desses elementos em relação à ranhura do estator. Um dos efeitos observados da utilização de ímãs inclinados no rotor, em relação às ranhuras do estator, é a redução do *cogging* torque durante o movimento, atenuando os efeitos da interação entre o núcleo ferromagnético do estator e o material magnético do rotor (Brandalise; Miotto; Nakano, 2024).

Figura 1 – Detalhes da instalação do material magnético no rotor: (a) largura e posição de uma ranhura do estator em relação aos ímãs no rotor; (b) ângulo de inclinação dos ímãs em relação às ranhuras do estator



Fonte: elaborada pelos autores

Para o cálculo do ângulo de inclinação dos ímãs, foram considerados que o diâmetro interno do estator e o seu comprimento ferromagnético são de 80 mm. Com base nisso calcula-se a largura de cada uma das 24 ranhuras do seguinte modo:

$$L_r = \frac{C_i}{N_r} = \frac{80 \times \pi}{24} \approx 10,472 \text{ mm} \quad (2)$$

sendo L_r , C_e e N_r respectivamente, o comprimento de cada ranhura, a circunferência interna do estator, e o número de ranhuras. Considerando-se a largura de uma ranhura entre os compartimentos dos ímãs, tem-se que a tangente do ângulo de assimetria pode ser calculado por:

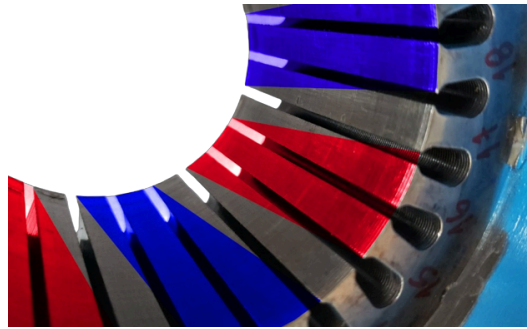
$$\tan\theta = \frac{L_r}{C} = \frac{10,472}{80} \approx 0,1309 \quad (3)$$

onde C é o comprimento radial do estator. Finalmente, o ângulo de assimetria entre as ranhuras do estator e o compartimento dos ímãs pode ser determinado por:

$$\theta = \arctan(0,1309) \approx 7,46^\circ \quad (4)$$

A inclinação de $7,46^\circ$ contribui para uma transição mais suave dos polos sobre as ranhuras durante o movimento do rotor. Na Figura 2 é possível observar esta projeção (ímãs alojados no rotor) nas cores azul e vermelho sobre o núcleo ferromagnético do estator.

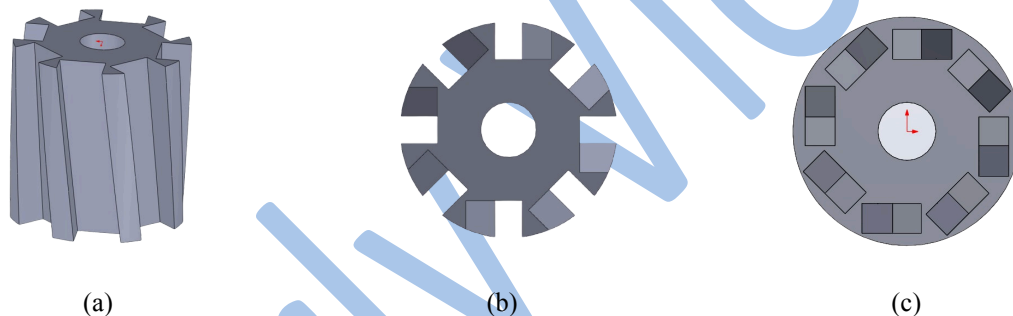
Figura 2 – Projeção dos polos sobre as ranhuras do estator



Fonte: elaborada pelos autores

A Figura 3 apresenta detalhes do projeto do rotor impresso em resina plástica. Na Figura 3a observa-se uma vista em perspectiva, com destaque para os compartimentos inclinados para alocação dos blocos de neodímio, 2 blocos por compartimento, formando 8 polos no rotor. Na Figura 3b tem-se uma vista superior do rotor, enquanto na Figura 3c é apresentada uma vista superior final do rotor após a instalação da camada final de fechamento externo, a qual tem a função de manter o material magnético fortemente preso no interior do rotor.

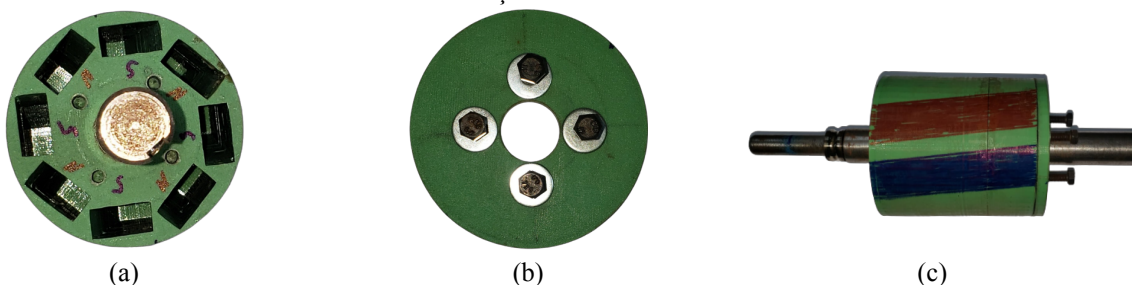
Figura 3 – Detalhes de projeto do rotor: (a) vista em perspectiva com detalhe dos compartimentos inclinados para inserção dos ímãs; (b) vista superior do rotor com os compartimentos abertos; (c) vista superior do rotor finalizado com os compartimentos fechados



Fonte: elaborada pelos autores

A Figura 4 apresenta detalhes do rotor impresso em filamento de Poliacido Láctico (PLA) por manufatura aditiva. Na Figura 4a, a vista frontal do rotor, equivalente ao projeto apresentado na Figura 3c, já com o eixo usinado em aço SAE 1045. A Figura 4b apresenta detalhes da tampa para enclausurar os blocos de neodímio no interior do rotor e, por fim, a Figura 4c mostra uma vista lateral do rotor montado com o eixo e com marcações laterais em azul e vermelho indicando a posição dos polos no seu interior. Com a finalização do rotor e instalação do seu eixo, o conjunto é finalmente inserido no interior da estrutura do estator.

Figura 4 – Rotor impresso em resina: (a) vista frontal com detalhes dos compartimentos dos ímãs; (b) vista frontal com a instalação de tampa de fechamento fixada por parafusos; (c) vista lateral com sinalizações da inclinação dos ímãs



Fonte: elaborada pelos autores

3 Configuração experimental

No presente trabalho, a bancada de testes apresentada em Brandalise, Miotto e Nakano (2024) foi mais uma vez utilizada para a realização de novos ensaios, desta vez, com o propósito exclusivo de realizar uma análise harmônica dos sinais na saída do microgerador desenvolvido.

Para a realização dos ensaios e coleta de dados, o microgerador foi acionado por uma máquina primária, representada por um motor de indução trifásico com potência de 0,75 kW, dois polos, linha W22 IR3 *Premium* da WEG, ligado na configuração delta, ou seja, para a tensão de alimentação trifásica equilibrada de 220 V entre fases. Este motor teve sua velocidade controlada por um conversor de frequência trifásico modelo CFW-500 da WEG compatível com a potência da máquina primária. A tensão gerada na saída do microgerador, com seus enrolamentos de armadura ligados na configuração estrela, foi medida utilizando-se um multímetro *True RMS* Minipa modelo ET-2517A, e visualizada utilizando-se um Osciloscópio Digital Rigol modelo DS2102A.

O ensaio realizado com o microgerador foi a vazio, ou seja, sem carga elétrica conectada à sua saída trifásica. O conversor CFW-500 foi ajustado para uma frequência de saída de 60 Hz, obtendo uma velocidade de 3579 (RPM) medida no eixo da máquina primária com um tacômetro digital modelo MDT-2245C da Minipa. Para esta velocidade de operação a frequência da tensão de saída do microgerador pode ser calculada da seguinte forma.

$$f_1 = \frac{RPM}{60} \times \frac{polos}{2} = 238,6 \text{ Hz} \quad (5)$$

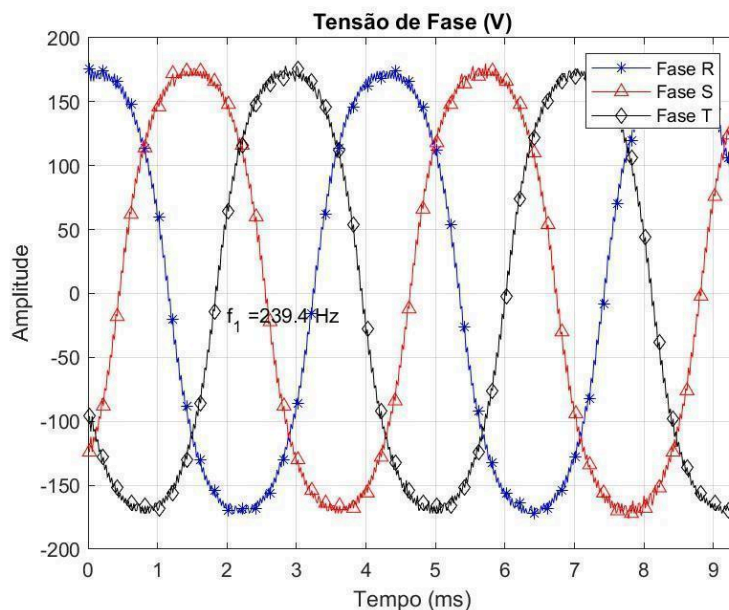
A próxima seção irá apresentar e discutir os resultados coletados neste ensaio, analisando a influência do projeto de um rotor com ímãs inclinados, no valor da THD da tensão trifásica de saída do microgerador.

4 Resultados e discussões

Antes de prosseguir com a análise dos resultados é importante ressaltar que, para análise dos efeitos da THD é necessário que se faça a distinção entre a distorção que ocorre no sinal da tensão a qual impacta na qualidade da energia fornecida aos consumidores, e a distorção harmônica no sinal da corrente elétrica resultante da utilização da rede elétrica por cargas não lineares, conversores chaveados em alta frequência entre outros dispositivos que afetam a THD (Koucher, 2021).

Na Figura 5 são apresentadas as formas de onda das tensões senoidais para as fases R, S e T do microgerador *brushless* com seus terminais de armadura trifásica ligados na configuração estrela e operando a vazio. Para a aquisição do sinal foi utilizado um osciloscópio com frequência de amostragem de 50 kHz e resolução de 12 bits/amostra. A frequência estimada da componente fundamental $f_0 = 239,4$ Hz está coerente com a frequência calculada pela Equação 5, considerando-se uma pequena variabilidade de 0,8 Hz, esperada de um ensaio experimental. Inclinando os ímãs nos compartimentos do rotor tem como objetivo um raciocínio análogo ao da inclinação das ranhuras do núcleo ferromagnético do estator. Assim, o resultado da Figura 5 apresenta uma forma de onda suave no domínio do tempo, semelhante a uma senoide sem distorções, saturação, interferências e ruídos aparentes.

Figura 5 – Tensão de fase no microgerador *brushless*

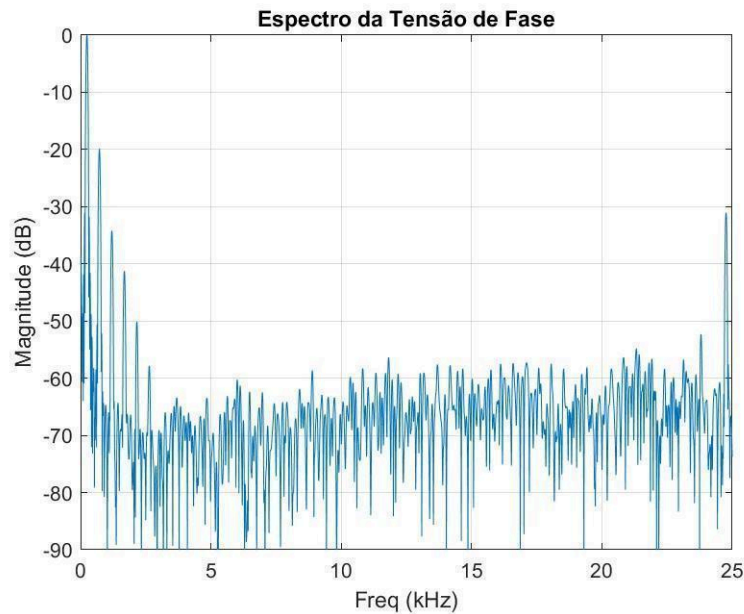


Fonte: dados da pesquisa

Em Alemi-Rostami *et al.* (2022) foi demonstrado como um projeto de um gerador onde as ranhuras do núcleo ferromagnético do estator apresentam um determinado ângulo de inclinação em relação ao eixo do rotor, pode produzir o efeito de reduzir o THD na tensão de saída. Além disso, o trabalho citado também estendeu os efeitos da inclinação das ranhuras na redução da vibração, ruído acústico e *cogging* torque durante a operação do gerador analisado. Ainda em relação a este trabalho, o sinal da tensão de saída obtido sem inclinação das ranhuras no estator possui saturações nos picos e vales, assemelhando-se à saída de um circuito ceifador/limitador e indicando a presença de harmônicos de ordem superior. Com a inclinação das ranhuras do estator, há a suavização das variações abruptas do perfil do sinal, sugerindo a redução da influência das componentes harmônicas. Em Jagiela, Mendrela e Gottipati (2013) aspectos semelhantes também foram analisados e discutidos, porém, considerando um motor de ímãs permanentes sem escovas, onde um método para obtenção de um ângulo de inclinação ótimo para as ranhuras do estator foi proposto.

Para melhor compreender as características do sinal de saída do microgerador analisado neste trabalho, optou-se por realizar uma análise em frequência em uma das fases considerando a configuração estrela. Assim, a Figura 6 apresenta o espectro em decibéis da tensão da fase R do microgerador *brushless* para uma faixa de 25 kHz. Pela análise da Figura 6 é possível observar a presença de componentes harmônicas até 3 kHz e, posteriormente, ruído entre -50 dB e -70 dB até 25 kHz. É importante salientar que foi empregado a técnica de janelamento com janela de Hann que possibilita observar o conjunto de harmônicas presentes. Em torno de 25 kHz nota-se a presença de uma componente em frequência em destaque devido a alguma interferência externa, possivelmente a frequência de chaveamento do conversor de frequência empregado no acionamento da máquina primária.

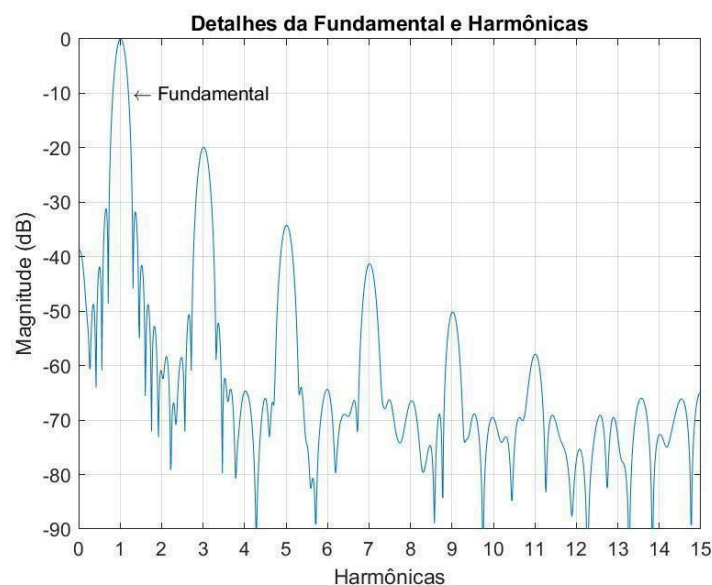
Figura 6 – Magnitude da tensão da fase R no microgerador *brushless*



Fonte: dados da pesquisa

O sinal à saída do microgerador possui componentes harmônicos de ordem inferior, sendo assim, uma análise mais detalhada foi realizada. A Figura 7 apresenta em destaque a componente fundamental seguido das componentes harmônicas. Como visto, as componentes ímpares da 3ª à 11ª se destacam no sinal gerado, sendo as responsáveis pela distorção harmônica presente no sinal. Para compreender melhor a influência das harmônicas, na Tabela 1 é apresentado as magnitudes em decibéis da componente principal e das dez primeiras frequências harmônicas. Conforme se observa, as componentes harmônicas pares não possuem contribuição significativa no sinal gerado, assim a THD pode ser estimada empregando-se apenas as componentes harmônicas ímpares. A título de curiosidade, a 3ª harmônica possui 8,87% da amplitude da componente principal.

Figura 7 – Componentes fundamental e harmônicas da tensão de fase do microgerador *brushless*



Fonte: dados da pesquisa

Tabela 1 – Magnitude da segunda à décima componente harmônica em relação à componente fundamental (V_1) em decibéis (dB)

Componentes	Decibéis (dB)
V_1	0,00
V_2	-54,59
V_3	-19,90
V_4	-64,67
V_5	-34,21
V_6	-64,33
V_7	-41,26
V_8	-66,41
V_9	-50,15
V_{10}	-69,49

Fonte: dados da pesquisa

Baseada nas magnitudes das componentes ímpares do espectro obtido do sinal à saída do microgerador, a THD calculada pela Equação 1 é igual a 10,34%. Apenas para comparação a onda quadrada possui uma THD de 48,3%.

5 Conclusões

Este trabalho analisou o desempenho de um microgerador *brushless* de ímãs permanentes e fluxo radial, com ênfase na avaliação da distorção harmônica total (THD) do sinal de tensão de saída da armadura trifásica. Para isso, foi desenvolvido um rotor fabricado por impressão tridimensional em resina polimérica, no qual foram instalados ímãs de neodímio responsáveis pela geração do fluxo magnético no interior da máquina.

Os resultados obtidos demonstraram que a inclinação do material magnético no rotor, em relação ao alinhamento das ranhuras do núcleo ferromagnético do estator, exerce influência na THD e na melhoria do perfil senoidal das tensões de saída. Tal configuração contribuiu, ainda, para a melhoria da dinâmica de funcionamento do microgerador, refletida na redução de ruído, vibração e *cogging* torque.

Embora os valores finais de THD calculados a partir dos ensaios experimentais ainda permaneçam superiores aos limites estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST-ANEEL, os resultados obtidos indicam o potencial da inclinação dos ímãs como estratégia de projeto para a mitigação da distorção harmônica em microgeradores desse tipo, constituindo uma base consistente para estudos futuros e aprimoramentos do protótipo desenvolvido.

Desse modo, diante da relevância da geração de energia a partir de fontes renováveis e limpas, aliada à crescente aplicação da microgeração distribuída, torna-se pertinente e necessária a continuidade e o aprofundamento das investigações no sentido de avaliar a influência de diferentes geometrias de rotor, tais como a alocação de ímãs paralelos entre si e alinhados ao eixo do rotor, bem como configurações com angulações otimizadas por meio de técnicas meta-heurísticas. Ademais, recomenda-se a análise do impacto do emprego de diferentes grades magnéticas de ímãs de neodímio (por exemplo, N42 e N50) na redução da distorção harmônica total (THD) e na melhoria da qualidade do sinal elétrico gerado.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Contribuições ao artigo

MIOTTO, E. L.: concepção ou delineamento do estudo/pesquisa; coleta, análise e/ou interpretação dos dados; redação inicial ou revisão substantiva do manuscrito; revisão crítica com contribuição intelectual relevante; supervisão geral do projeto ou coordenação técnica. **BRANDALISE, F. A.:** concepção ou delineamento do estudo/pesquisa; coleta, análise e/ou interpretação dos dados; redação inicial ou revisão substantiva do manuscrito; revisão crítica com contribuição intelectual relevante. **NAKANO, A. Y.:** coleta, análise e/ou interpretação dos dados; redação inicial ou revisão substantiva do manuscrito; revisão crítica com contribuição intelectual relevante. Todos os autores participaram da escrita, discussão, realizaram a leitura e aprovaram a versão final do artigo.

Referências

ALEMI-ROSTAMI, M.; REZAZADEH, G.; ALIPOUR-SARABI, R.; TAHAMI, F. Design and optimization of a large-scale permanent magnet synchronous generator. *Scientia Iranica*, v. 29, n. 1, p. 217-229, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24200/sci.2019.53569.3314>.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade da energia elétrica.** Brasília, DF: ANEEL, 2020. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodinst_modulo_8_v11.pdf. Acesso em: 8 out. 2025.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power system harmonics.** 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

BRANDALISE, F. A.; MIOTTO, E. L.; NAKANO, A. Y. Didactic test bench to study the performance of a permanent magnet brushless microgenerator. *In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION*, 15., 2024, Mar Del Plata. **Proceedings [...]**. Recife: Even3 Publicações, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29327/5433700>.

BROWN, D.; MA, B.; CHEN, Z. Developments in the processing and properties of NdFeB-type permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 248, n. 3, p. 432-440, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00334-7](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00334-7).

ELKHOLY, M. M.; EL-HAMEED, M. A.; EL-FERGANY, A. A. Harmonic analysis of hybrid renewable microgrids comprising optimal design of passive filters and uncertainties. *Electric Power Systems Research*, v. 163, Part A, p. 491-501, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.07.023>. Acesso em: 8 out. 2025.

EROĞLU, H.; CUCE, E.; CUCE, P. M.; GUL, F.; ISKENDEROĞLU, A. Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 48, p. 101566, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101566>.

FAQIH, M. R.; SUTEDJO, S.; WAHJONO, E. Design and fabrication of a radial flux permanent magnet synchronous generator. *In: 2019 INTERNATIONAL ELECTRONICS SYMPOSIUM (IES)*, 2019, Surabaya. **Proceedings [...]**. Surabaya: IEEE, 2019. p. 644-649. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELECSYM.2019.8901620>.

GUL, W.; GAO, Q.; LENWARI, W. Optimal design of a 5-MW double-stator single-rotor PMSG for offshore direct drive wind turbines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 56, n. 1, p. 216-225, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2949545>.

HUA, Y.; ZHU, H.; XU, Y. Multi-objective optimization design of bearingless permanent magnet synchronous generator. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 30, n. 4, p. 1-5, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2970661>.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity**. 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/electricity>. Acesso em: 8 out. 2025.

JAGIELA, M.; MENDRELA, E.; GOTTIPATI, P. Investigation on a choice of stator slot skew angle in brushless PM machines. **Electrical Engineering**, v. 95, p. 209-219, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-012-0252-8>.

KOUCHER, A. C. **Análise da qualidade de energia elétrica em sistemas de distribuição ativos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/229401>. Acesso em: 8 out. 2025.

MOEED AMJAD, A.; SALAM, Z. A review of soft computing methods for harmonics elimination PWM for inverters in renewable energy conversion systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 141-153, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.080>.

NIKBAKHS, A.; IZADFAR, H. R.; BEROMI, Y. A. Design and optimization of permanent magnet synchronous generator for use in hydrodynamic renewable energy by applying ACO and FEA. **IJUM Engineering Journal**, v. 18, n. 2, p. 158-176, 2017. DOI: <https://doi.org/10.31436/iiumej.v18i2.705>.

PARIS, V. J.; CARNIELUTTI, F. M.; MARTINS, D. C. Optimal energy storage management of hydro-PV hybrid microgeneration. *In*: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS FOR DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS (PEDG), 14., 2023, Shanghai. **Proceedings** [...]. Shanghai: IEEE, 2023. p. 554-562. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDG56097.2023.10215307>.

SIVARAMAN, P.; SHARMEELA, C. Chapter 2 – Power system harmonics. *In*: SANJEEVIKUMAR, P.; SHARMEELA, C.; HOLM-NIELSEN, J. B.; SIVARAMAN, P. (ed.). **Power Quality in Modern Power Systems**. London: Academic Press, 2021. p. 61-103. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823346-7.00002-5>.