

APRIMORAMENTO DE GERADOR POR INDUÇÃO MAGNÉTICA COM MANUFATURA ADITIVA

IMPROVEMENT OF A MAGNETIC INDUCTION GENERATOR USING ADDITIVE MANUFACTURING

Carlos Nascimento
Mateus Coelho

Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
carlos15051022@gmail.com

Juliano Souza de
Almeida

Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
asouzajuliano@gmail.com

Maria Clara
Fernandes Ribeiro
Silva Santos

Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
fernandes.mclara03@gmail.com.br

Yann Mendonça
Quinelato

Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
mqyann@gmail.com

Valmir Torres de
Oliveira

Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
valmirtjt@gmail.com

Janaina da Costa
Pereira Torres de
Oliveira

Centro Universitário Geraldo Di Biase, Volta Redonda/RJ, Brasil
janainacpto@gmail.com

Resumo

O estudo apresenta a análise e o aprimoramento de um protótipo de gerador baseado em indução magnética, desenvolvido como investigação experimental no contexto da microgeração energética sustentável. O trabalho tem como objetivo identificar as limitações estruturais e magnéticas do dispositivo, propor ajustes construtivos e avaliar seu potencial de evolução. O protótipo foi construído com um tubo de PVC contendo ímãs de neodímio organizados em configuração helicoidal, sendo testado por meio da aproximação controlada de um ímã externo para induzir rotação. A metodologia incluiu observações experimentais, verificação de deformações físicas, avaliação da densidade magnética e análise dos efeitos da anisotropia sobre o movimento. Os resultados preliminares demonstram campo magnético irregular, baixa continuidade rotacional, perdas decorrentes do aquecimento do PVC e desalinhamento dos ímãs. O estudo conclui que o uso de ímãs cilíndricos de maior intensidade, a adoção de manufatura aditiva para precisão geométrica e a realização de simulações podem elevar a eficiência do sistema, indicando potencial de aprimoramento para aplicações futuras.

Palavras-chave

Microgeração. Neodímio. Anisotropia. Simulação. Prototipagem.

Abstract

This study analyzes and improves a prototype generator based on magnetic induction, developed as an experimental investigation in the context of sustainable micro-energy generation. The objective is to identify the device's structural and magnetic limitations, propose constructive adjustments, and assess its potential for advancement. The prototype consists of a PVC tube with neodymium magnets arranged helically and was tested through the controlled approach of an external magnet to induce rotation. The methodology included experimental observation, assessment of structural deformation, evaluation of magnetic density, and analysis of anisotropy effects on motion. Preliminary results indicate an irregular magnetic field, insufficient rotational continuity, losses caused by PVC heating, and misalignment of magnets. The study concludes that using higher-intensity cylindrical magnets, adopting additive manufacturing to improve geometric precision, and performing magnetic field simulations can enhance system efficiency, demonstrating promising potential for future applications.

Keywords

Microgeneration. Neodymium. Anisotropy. Simulation. Prototyping.



Licença de Atribuição BY do Creative Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Aprovado em 10/01/2026
Publicado em 30/04/2026

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por energia, associada aos impactos ambientais decorrentes do uso intensivo de fontes não renováveis, tem impulsionado a busca por alternativas tecnológicas sustentáveis e energeticamente eficientes. A matriz energética global ainda é fortemente dependente de combustíveis fósseis, o que intensifica problemas como emissões de gases de efeito estufa e esgotamento de recursos naturais, reforçando a necessidade de desenvolvimento de sistemas baseados em fontes renováveis e de baixo impacto ambiental (International Energy Agency, 2023).

Nesse contexto, a indução magnética tem se destacado como um princípio físico promissor para aplicações em sistemas de geração e transferência de energia, sobretudo em configurações de baixa e média potência. Tecnologias baseadas em acoplamento magnético possibilitam a conversão de energia sem contato físico direto, reduzindo perdas por atrito mecânico e ampliando a segurança operacional, além de apresentarem potencial para integração em sistemas compactos e distribuídos (Zhang *et al.*, 2016; Shin; Cho; Han, 2020). Estudos recentes apontam que o desempenho desses sistemas está diretamente associado ao alinhamento dos campos magnéticos, à densidade de fluxo e à geometria dos componentes envolvidos (Tang *et al.*, 2018).

Entretanto, protótipos experimentais de geradores por indução magnética ainda enfrentam limitações técnicas relevantes, como anisotropia dimensional dos ímãs, desalinhamento magnético, dissipação de energia e dificuldades construtivas associadas aos materiais estruturais empregados. Resultados preliminares indicam que tais limitações comprometem a obtenção de movimento contínuo e a eficiência energética global do sistema, evidenciando lacunas de conhecimento relacionadas à otimização do arranjo magnético e ao processo construtivo do protótipo (Gonçalves; Pereira, 2020; Silva; Moraes, 2018).

Nesse cenário, a manufatura aditiva surge como uma alternativa tecnológica estratégica para o aprimoramento estrutural e funcional de sistemas energéticos experimentais. A impressão 3D permite a fabricação de geometrias complexas, maior precisão dimensional e melhor controle do posicionamento dos componentes, fatores fundamentais para a minimização de perdas energéticas e para o isolamento adequado dos campos magnéticos. Além disso, o uso de materiais poliméricos avançados na manufatura aditiva tem demonstrado ganhos significativos em termos de desempenho, custo e flexibilidade de projeto em aplicações de engenharia (Gibson; Rosen; Stucker, 2021; Park; Kim; Chung, 2022).

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo geral aprimorar um protótipo de gerador por indução magnética previamente desenvolvido, por meio da implementação de ajustes construtivos e da incorporação de um envoltório fabricado por manufatura aditiva. Busca-se, assim, mitigar as limitações identificadas, reduzir perdas energéticas e obter resultados preliminares que contribuam para o avanço do conhecimento científico e tecnológico na área de geração de energia renovável de baixa potência.

,

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Panorama da Geração de Energia e a Necessidade de Tecnologias Alternativas

A crescente demanda global por energia, associada à intensificação dos impactos ambientais decorrentes do uso de fontes fósseis, tem impulsionado a busca por tecnologias energéticas sustentáveis e de baixo impacto ambiental. A matriz energética mundial ainda apresenta elevada dependência de combustíveis não renováveis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, enquanto as fontes renováveis avançam de forma gradual, porém ainda insuficiente para atender às metas globais de descarbonização (International Energy Agency, 2023). Nesse contexto, tecnologias emergentes voltadas à microgeração e à geração distribuída têm ganhado destaque por possibilitarem soluções energéticas locais, modulares e de menor impacto ambiental.

Entre essas alternativas, sistemas baseados em fenômenos eletromagnéticos, como a indução magnética, têm sido investigados por sua capacidade de conversão de energia sem contato físico direto, reduzindo perdas mecânicas, desgaste estrutural e riscos operacionais. Estudos indicam que a indução magnética apresenta potencial significativo para aplicações de baixa e média potência, especialmente quando associada a estratégias de otimização geométrica e de materiais (Zhang; Liu; Wang, 2016; Krause; Wasylenko, 2017).

2.2 Fundamentos Físicos da Indução Magnética Aplicada à Geração de Energia

A indução magnética fundamenta-se nas leis do eletromagnetismo, especialmente na lei de Faraday, segundo a qual uma variação do fluxo magnético em um circuito induz uma força eletromotriz proporcional à taxa de variação desse fluxo. Em sistemas de geração por indução, a interação entre campos magnéticos variáveis e condutores elétricos permite a conversão de energia mecânica em elétrica, ou vice-versa, sem a necessidade de contato físico direto entre os elementos ativos (Gonçalves; Pereira, 2020).

Em protótipos baseados em ímãs permanentes, a disposição geométrica, o tipo de material magnético e o alinhamento entre rotor e estator influenciam diretamente a densidade de fluxo magnético e, conseqüentemente, a eficiência do sistema. Ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB), classificados em diferentes graus (N35, N42, N52), são amplamente utilizados devido à sua elevada remanência e coercividade, características que favorecem sistemas compactos e de alto desempenho (Souza; Almeida, 2019).

Entretanto, limitações como anisotropia magnética, desalinhamento geométrico e perdas por dispersão de campo comprometem a obtenção de movimento contínuo e a estabilidade do sistema, conforme observado em estudos experimentais recentes (Silva; Moraes, 2018).

2.3 Sistemas de Transferência de Energia por Indução e Ressonância Magnética

A evolução dos sistemas de transferência de energia sem fio ampliou a compreensão e a

aplicação prática da indução magnética. A literatura classifica esses sistemas em técnicas de campo próximo, como o acoplamento indutivo e a ressonância magnética, e técnicas de campo distante, como micro-ondas e feixes laser (Banakar, 2018).

O acoplamento indutivo é caracterizado pela transferência de energia entre bobinas próximas, sendo altamente dependente do alinhamento e da distância entre emissor e receptor. Já a ressonância magnética amplia o alcance e a tolerância a desalinhamentos, desde que as frequências de ressonância dos circuitos estejam devidamente ajustadas (Tang; Wang; Wu, 2018). Estudos experimentais demonstram que a eficiência desses sistemas está diretamente relacionada à geometria das bobinas, ao coeficiente de acoplamento magnético e à minimização das perdas resistivas e por radiação (Shi *et al.*, 2016).

Esses fundamentos são relevantes para o desenvolvimento de protótipos de geradores por indução magnética, uma vez que a otimização do arranjo dos ímãs e dos elementos estruturais pode reduzir perdas energéticas e melhorar a conversão eletromecânica.

2.4 Limitações Técnicas em Protótipos de Geradores por Indução Magnética

Apesar do potencial teórico, protótipos experimentais de geradores por indução magnética enfrentam limitações práticas que restringem sua eficiência e aplicabilidade. Entre os principais desafios destacam-se a dissipação de energia por interferência de campos externos, a irregularidade do campo magnético gerado e as dificuldades construtivas associadas à fixação e ao alinhamento dos ímãs (Coelho *et al.*, 2025).

Resultados preliminares indicam que o uso de suportes estruturais convencionais, como tubos de PVC aquecidos para montagem, pode gerar deformações geométricas e comprometer a simetria do sistema, resultando em campos magnéticos não uniformes e interrupções no movimento rotativo. Além disso, a anisotropia dimensional dos ímãs retangulares contribui para a instabilidade do campo magnético e para a redução da eficiência do protótipo (Silva; Moraes, 2018).

Diante dessas limitações, torna-se necessário o redesenho estrutural do sistema, bem como a adoção de materiais e processos de fabricação capazes de garantir maior precisão dimensional e repetibilidade geométrica.

2.5 Manufatura Aditiva como Estratégia de Otimização Estrutural

A manufatura aditiva, especialmente por meio da impressão 3D por modelagem por deposição de material fundido (FDM), tem se consolidado como uma alternativa eficiente para a fabricação de componentes com geometrias complexas, elevada precisão dimensional e redução de desperdício de material. Estudos recentes indicam que essa tecnologia permite a produção de estruturas otimizadas para aplicações energéticas, possibilitando ajustes finos no design e rápida iteração de protótipos (Gibson; Rosen; Stucker, 2021).

No contexto de sistemas eletromagnéticos, a manufatura aditiva viabiliza a criação de envoltórios isolantes e suportes estruturais que reduzem interferências externas, melhoram o alinhamento dos componentes magnéticos e minimizam perdas por dissipação térmica. Materiais poliméricos como PLA, nylon e ASA apresentam vantagens adicionais, como baixo custo, facilidade de processamento e propriedades adequadas para isolamento elétrico e magnético (Li; Wang; Zhou, 2019; Park; Kim; Chung, 2022).

Além disso, a literatura aponta que a integração entre projeto assistido por computador e manufatura aditiva permite a simulação prévia de campos magnéticos e esforços mecânicos, contribuindo para o aumento da eficiência e da confiabilidade dos protótipos desenvolvidos.

2.6 Integração entre Indução Magnética e Manufatura Aditiva

A convergência entre indução magnética e manufatura aditiva representa uma abordagem inovadora para o desenvolvimento de geradores de energia de pequena escala. Ao possibilitar o redesenho de envoltórios e suportes com elevada precisão geométrica, a impressão 3D contribui para a mitigação das limitações observadas em protótipos convencionais, como desalinhamentos e irregularidades de campo.

Pesquisas recentes indicam que essa integração favorece a redução de perdas magnéticas, o aumento da estabilidade operacional e a viabilidade de aplicações em microgeração distribuída, especialmente em contextos residenciais ou comunitários (Shin; Cho; Han, 2020). Assim, o aprimoramento de protótipos por meio da manufatura aditiva alinha-se às demandas contemporâneas por soluções energéticas limpas, eficientes e de baixo custo, fundamentando teoricamente o desenvolvimento e a análise do protótipo proposto neste estudo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem qualitativa e experimental, com caráter exploratório, uma vez que busca o aprimoramento funcional de um protótipo físico de gerador por indução magnética, ainda em estágio inicial de desenvolvimento. O estudo fundamenta-se na construção, análise e avaliação de desempenho de um sistema eletromecânico experimental, permitindo a identificação de limitações técnicas, proposição de ajustes estruturais e análise preliminar de resultados, conforme práticas consolidadas em pesquisas experimentais em engenharia (Gonçalves; Pereira, 2020).

A estratégia metodológica adotada baseia-se no método experimental, no qual variáveis físicas e geométricas do protótipo são observadas a partir de testes controlados, com ênfase na interação entre campos magnéticos, geometria dos ímãs e estabilidade mecânica do conjunto, conforme abordagens similares descritas por Krause e Wasylenko (2017).

,

3.2 Descrição do Protótipo e Materiais Utilizados

O objeto de estudo consiste em um protótipo de gerador por indução magnética, desenvolvido a partir de uma estrutura cilíndrica, cujo objetivo é promover movimento rotacional induzido pela interação entre campos magnéticos permanentes.

Os materiais empregados na construção do protótipo foram selecionados considerando disponibilidade, custo reduzido e viabilidade experimental, sendo listados a seguir:

- tubo de pvc com diâmetro nominal de 100 mm;
- dois tampões de pvc de 4" (100 mm);
- trinta ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB), grau N35, formato retangular (10 mm × 30 mm);
- dois rolamentos radiais;
- dois mancais de apoio;
- uma barra roscada de aço com diâmetro de 11 mm;
- quatro parafusos 5/16 e oito arruelas correspondentes;
- base estrutural confeccionada em madeira.

A escolha dos ímãs de neodímio deve-se à sua elevada densidade de fluxo magnético e ampla aplicação em sistemas de conversão eletromecânica, conforme descrito por Souza e Almeida (2019) e James e Haynes (2016).

3.3 Procedimentos de Construção do Protótipo

A etapa inicial consistiu na preparação do tubo de pvc, que atuou como elemento estrutural do rotor magnético. Ao longo de sua superfície externa foram realizadas perfurações dispostas em configuração helicoidal, com espaçamento angular uniforme, destinadas à inserção dos ímãs permanentes. Essa disposição buscou induzir um campo magnético rotativo ao longo do eixo do cilindro, conforme princípios discutidos por Gonçalves e Pereira (2020).

Devido ao formato retangular dos ímãs, foi necessário o aquecimento controlado do pvc durante o processo de encaixe, de modo a permitir a acomodação adequada dos ímãs nas cavidades. Após o posicionamento, os ímãs foram fixados de forma permanente, respeitando a orientação de polaridade previamente definida.

Na sequência, foi instalado um eixo central, composto por barra roscada, acoplado a rolamentos e mancais de apoio, garantindo alinhamento axial e redução de atrito mecânico durante os testes de rotação. A estrutura foi montada sobre uma base de madeira, assegurando estabilidade geométrica durante a experimentação.

,

3.4 Procedimentos Experimentais de Teste

A avaliação funcional do protótipo foi realizada por meio de testes experimentais qualitativos, nos quais se analisou o comportamento dinâmico do sistema diante da interação magnética externa. Para isso, utilizou-se um ímã de prova, aproximado e afastado manualmente da superfície externa do cilindro, com o objetivo de provocar variações no fluxo magnético e observar a resposta mecânica do conjunto.

Durante os ensaios, foram observados os seguintes aspectos:

- início do movimento rotacional;
- continuidade ou interrupção da rotação;
- necessidade de proximidade crítica entre o ímã de prova e o rotor;
- estabilidade do movimento ao longo do eixo;
- influência do alinhamento geométrico dos ímãs.

Esses procedimentos estão alinhados a metodologias experimentais utilizadas em estudos sobre conversão de energia por indução magnética e análise de sistemas magnéticos rotativos (Krause; Wasylenko, 2017).

3.5 Critérios de Análise dos Resultados

A análise dos resultados foi conduzida de forma qualitativa e descritiva, considerando as limitações observadas durante os testes experimentais. Os principais critérios avaliados foram:

- eficiência do movimento rotacional induzido;
- influência da densidade magnética dos ímãs N35;
- efeitos da anisotropia magnética associada ao formato retangular dos ímãs;
- impactos de desalinhamentos geométricos e estruturais;
- limitações impostas pelo método de fixação e pelo material estrutural.

A interpretação dos resultados foi fundamentada em conceitos de anisotropia magnética e distribuição de campo, conforme discutido por Silva e Moraes (2018), bem como nas propriedades físicas dos ímãs de neodímio descritas por Souza e Almeida (2019).

3.6 Direcionamento para Etapas de Aprimoramento

Com base nos resultados preliminares obtidos, os procedimentos metodológicos também contemplaram a definição de diretrizes para etapas futuras de aprimoramento, incluindo:

- substituição de ímãs retangulares por ímãs cilíndricos, visando reduzir efeitos de anisotropia;

,

- utilização de ímãs de maior grau de magnetização (N42 ou N52), a fim de aumentar a densidade de fluxo magnético;
- aplicação de simulações computacionais de campo magnético para otimização do posicionamento;
- reavaliação do processo de fixação estrutural, com potencial emprego de manufatura aditiva para maior precisão geométrica.

Essas diretrizes metodológicas estão em consonância com abordagens contemporâneas de desenvolvimento incremental de protótipos em sistemas energéticos experimentais (James; Haynes, 2016).

4 RESULTADOS

4.1 Comportamento Mecânico do Protótipo

Os testes experimentais realizados com o protótipo evidenciaram que a interação entre o campo magnético gerado pelos ímãs permanentes dispostos no cilindro e o ímã de prova externo foi capaz de induzir movimento rotacional inicial no conjunto. Esse movimento, entretanto, mostrou-se intermitente e instável, não sendo mantido de forma contínua ao longo do tempo de ensaio.

Observou-se que a rotação apenas ocorria quando o ímã de prova era posicionado a uma distância muito reduzida em relação à superfície do cilindro, indicando limitação na intensidade efetiva do campo magnético resultante do arranjo helicoidal dos ímãs N35, conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Protótipo experimental de gerador por indução magnética com ímãs de neodímio dispostos em configuração helicoidal sobre tubo de pvc.



Fonte: Os autores (2026)

4.2 Limitações Estruturais Identificadas

Durante a montagem do protótipo, verificou-se a necessidade de aquecimento do tubo de pvc para possibilitar o encaixe dos ímãs retangulares. Esse procedimento ocasionou deformações geométricas locais, além de assimetrias no posicionamento dos ímãs ao longo da superfície cilíndrica.

Como consequência direta, observou-se desnivelamento angular entre ímãs consecutivos, o que resultou em um campo magnético não uniforme, perceptível durante os ensaios pela ocorrência de travamentos pontuais no movimento rotacional.

4.3 Efeitos da Densidade Magnética e da Anisotropia

Os ensaios evidenciaram que a densidade magnética dos ímãs N35 foi insuficiente para sustentar a continuidade do movimento rotacional sem intervenção externa constante. Além disso, o formato retangular dos ímãs contribuiu para a formação de regiões de campo magnético irregular, intensificando os efeitos de anisotropia magnética no sistema.

Foi constatado que pequenas variações no alinhamento dos polos magnéticos resultaram em perda de sincronismo entre as forças de atração e repulsão, levando à interrupção do movimento.

5 DISCUSSÃO

5.1 Interpretação do Desempenho Magnético

Os resultados obtidos confirmam que, embora o princípio da indução magnética seja capaz de gerar movimento rotacional, a configuração geométrica e a densidade de fluxo magnético exercem papel determinante na eficiência do sistema. Conforme discutido por Gonçalves e Pereira (2020), a variação temporal do fluxo magnético é condição necessária para indução de movimento, porém a sua estabilidade depende diretamente da uniformidade do campo gerado.

A necessidade de aproximação excessiva do ímã de prova observada nos ensaios indica que o campo magnético produzido pelo arranjo de ímãs N35 não atingiu intensidade suficiente para garantir regime contínuo de operação, em concordância com Souza e Almeida (2019).

5.2 Influência da Anisotropia Magnética

Os efeitos de anisotropia observados experimentalmente corroboram os achados de Silva e Moraes (2018), que demonstram que ímãs permanentes apresentam comportamento fortemente dependente da orientação cristalina e do formato geométrico. No presente protótipo, o uso de ímãs retangulares intensificou a concentração desigual de fluxo magnético, resultando em instabilidade dinâmica.

Dessa forma, a interrupção recorrente do movimento rotacional pode ser atribuída à combinação entre anisotropia magnética e desalinhamento estrutural, evidenciando que a geometria dos ímãs é tão relevante quanto sua intensidade de magnetização.

5.3 Limitações do Processo Construtivo

O método de fixação adotado, baseado no aquecimento do pvc, mostrou-se inadequado para aplicações que exigem alta precisão geométrica. James e Haynes (2016) destacam que pequenas

imperfeições estruturais em sistemas magnéticos podem resultar em perdas significativas de desempenho, fato confirmado nos testes realizados.

Nesse contexto, os resultados reforçam a necessidade de substituição do processo manual por técnicas de manufatura aditiva, capazes de garantir maior repetibilidade dimensional e melhor alinhamento dos componentes, conforme apontado por Krause e Wasylenko (2017).

5.4 Implicações para o Aprimoramento do Protótipo

A análise integrada dos resultados indica que o aprimoramento do protótipo deve concentrar-se em três eixos principais:

- a) substituição dos ímãs retangulares por ímãs cilíndricos, reduzindo a anisotropia;
- b) utilização de ímãs de maior grau de magnetização, como N42 ou N52, para aumento da densidade de fluxo;
- c) emprego de manufatura aditiva para confecção de suportes com maior precisão geométrica.

Essas diretrizes estão alinhadas com a literatura recente sobre otimização de sistemas de indução magnética aplicados à geração de energia, reforçando o potencial do protótipo como base experimental para futuras investigações em microgeração energética sustentável (Gonçalves; Pereira, 2020).

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o aprimoramento e a análise crítica de um protótipo de gerador por indução magnética, com foco na identificação de limitações construtivas, magnéticas e operacionais, bem como na proposição de ajustes técnicos fundamentados em resultados experimentais preliminares. A partir do desenvolvimento do protótipo e da realização dos ensaios experimentais, foi possível demonstrar que o princípio da indução magnética é capaz de promover movimento rotacional, confirmando a viabilidade conceitual da proposta para aplicações em microgeração de energia.

Entretanto, os resultados evidenciaram que o desempenho do sistema esteve fortemente condicionado à configuração geométrica dos ímãs, à densidade magnética efetiva e à precisão estrutural do conjunto. A utilização de ímãs de neodímio do tipo N35, associados ao formato retangular e ao método de fixação adotado, resultou em campo magnético irregular, efeitos significativos de anisotropia e instabilidade do movimento rotacional, impedindo a obtenção de regime contínuo de operação. Adicionalmente, o processo construtivo baseado no aquecimento do tubo de PVC revelou-se inadequado para aplicações que exigem alinhamento preciso, contribuindo para deformações estruturais e assimetrias no arranjo magnético.

Apesar dessas limitações, o estudo cumpriu seus objetivos ao identificar, de forma sistemática, os principais fatores que comprometem o desempenho do protótipo, fornecendo subsídios técnicos

consistentes para sua evolução. As análises realizadas indicam que a adoção de ímãs cilíndricos, com maior grau de magnetização, aliada ao emprego de manufatura aditiva para a confecção de suportes e alojamentos, tende a reduzir significativamente os efeitos de anisotropia e desalinhamento, ampliando a uniformidade do campo magnético e a estabilidade mecânica do sistema.

Como contribuição para a área, o trabalho apresenta um estudo experimental aplicado que evidencia a importância da integração entre princípios físicos, escolha adequada de materiais e precisão construtiva no desenvolvimento de dispositivos baseados em indução magnética. Além disso, os resultados reforçam o papel da prototipagem experimental como ferramenta essencial para a validação de conceitos e identificação de limitações técnicas em sistemas de geração de energia alternativa.

Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a análise por meio de simulações computacionais de campo magnético, ensaios quantitativos de rotação e geração elétrica, bem como a avaliação do desempenho do protótipo em diferentes configurações geométricas e materiais. Tais avanços poderão contribuir para a consolidação do gerador por indução magnética como uma alternativa viável e sustentável para aplicações de microgeração distribuída, ampliando o impacto tecnológico e científico desta linha de pesquisa.

REFERÊNCIAS

BANAKAR, M. Wireless power transfer technologies: fundamentals and applications. **Journal of Electrical Systems**, v. 14, n. 2, p. 250-265, 2018.

COELHO, C. N. M.; RIBEIRO SILVA SANTOS, M. C. F.; QUINELATO, Y. M.; OLIVEIRA, V. T.; OLIVEIRA, J. C. P. T. Development and preliminary evaluation of a magnetic induction generator prototype. **Revista de Engenharia Aplicada**, v. 12, n. 1, p. 45-58, 2025.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2021.

GONÇALVES, A.; PEREIRA, J. Estudo experimental de dispositivos de indução magnética para microgeração energética. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 9, n. 4, p. 112-130, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023.

KRAUSE, M.; WASYLENKO, W. Analysis of small-scale electromagnetic induction systems for energy harvesting. **Energy Conversion and Management**, v. 152, p. 147-158, 2017.

LI, X.; WANG, Y.; ZHOU, L. Performance of polymeric materials manufactured by fused deposition modeling for engineering applications. **Materials & Design**, v. 182, p. 108039, 2019.

PARK, S.; KIM, J.; CHUNG, H. Design optimization of polymeric components manufactured by FDM for electromagnetic devices. **Additive Manufacturing**, v. 38, p. 101844, 2022.

SHI, Y. et al. Coil geometry optimization for inductive and resonant wireless power transfer systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 11, p. 8211-8221, 2016.

SHIN, D.; CHO, H.; HAN, S. Enhancing micro-scale energy generation through magnetic induction systems. **Renewable Energy**, v. 152, p. 204-214, 2020.

SILVA, R.; MORAES, F. Avaliação de desalinhamentos magnéticos em dispositivos experimentais de indução. **Caderno de Física Aplicada**, v. 10, n. 2, p. 55-70, 2018.

SOUZA, P.; ALMEIDA, R. Caracterização magnética de ímãs permanentes de NdFeB para aplicações em microgeração energética. **Revista Matéria**, v. 24, n. 3, p. 1-12, 2019.

TANG, H.; WANG, Q.; WU, Y. Magnetic resonance coupling systems: performance analysis and design considerations. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 8, p. 6145-6153, 2018.

ZHANG, X.; LIU, Y.; WANG, K. Small-scale magnetic induction generators: a review of principles and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 298-308, 2016.