



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
LICENCIATURA EM CIÊNCIAS: MATEMÁTICA E FÍSICA

Motores elétricos com ímãs permanentes: ensaio teórico de seu potencial como fonte de energia renovável

Horley Monteiro Pacheco

Itacoatiara – AM
Dezembro de 2025

Horley Monteiro Pacheco

Motores elétricos com ímãs permanentes: ensaio teórico de seu potencial como fonte de energia renovável

Monografia de Graduação apresentada ao Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do grau de licenciado em Ciências: Matemática e Física.

Orientador

Prof. Dilcelino de Souza Bruce

Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia - ICET

Itacoatiara-AM

Dezembro de 2025

Monografia de Graduação sob o título *Motores elétricos com ímãs permanentes: ensaio teórico de seu potencial como fonte de energia renovável* apresentada por Horley Monteiro Pacheco e aceita pelo Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, sendo aprovada por todos os membros da banca examinadora abaixo especificada:



Prof. Me. Dilcelino de Souza Bruce
Orientador
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Me. Paulo Tavares
Co-orientador
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dr. Aurélio Izuka Zanelato
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dr. Fernando Fulgencio Leon Avila
Universidade Federal do Amazonas

Itacoatiara-AM, 10 de Dezembro de 2025

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo incentivo, à minha esposa e ao meu filho, por serem minha maior motivação e a todos que me apoiaram e acreditaram em mim. Este trabalho representa a conquista da minha graduação.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para concluir mais esta etapa da minha vida acadêmica.

Ao meus pais, Raimunda Venina Monteiro e Sebastião de Oliveira Pacheco, pelo apoio e por sempre acreditarem no meu potencial.

À minha esposa Rayssa de Oliveira dos Santos e ao meu filho Pedro Arthur Pacheco, que foram minha maior motivação e fonte de inspiração durante toda a jornada.

Ao meu orientador e co-orientador, Dilcelino de Souza Bruce e Paulo Tavares, pela orientação, paciência, disponibilidade e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do curso de Licenciatura em Ciências Matemática e Física, pela dedicação, pelos ensinamentos e pelo exemplo de compromisso com a educação.

Aos meus amigos que fiz na UFAM, em especial Raimundo Carlos Braz, Geraldo Lira, Helen Rebouças, Eliane Neta, Darley Batista e Renier Coelho, pela amizade, incentivo e colaborações constantes ao longo desta caminhada acadêmica.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta conquista se tornasse possível, deixo aqui minha mais sincera gratidão.

"O aprendizado nunca esgota a mente."

Leonardo da Vinci

Motores elétricos em ímãs permanentes: ensaio teórico de seu potencial como fonte de energia renovável

Autor: Horley Monteiro Pacheco

Orientador: Prof. Me. Dilcelino de Souza Bruce

RESUMO

Este trabalho apresenta um ensaio teórico sobre o potencial dos motores com ímãs permanentes como alternativa para geração de energia renovável. Por meio de revisão bibliográfica, analisaram-se fundamentos do eletromagnetismo, propriedades dos ímãs permanentes, aplicações dos motores síncronos (PMSM) e impactos socioambientais. Os resultados indicam que os PMSM apresentam alta eficiência e densidade de potência, constituindo tecnologia estratégica para mobilidade elétrica e microgeração. Contudo, sua sustentabilidade enfrenta o paradoxo da dependência de terras raras, cuja extração gera impactos ambientais significativos. O estudo também rejeita propostas de motores autossustentáveis por violarem leis termodinâmicas e destaca o potencial pedagógico do tema para o ensino de Física.

Palavras-chave: motores de ímãs permanentes, eficiência energética, terras raras, sustentabilidade, ensino de Física.

Permanent Magnet Electric Motors: A Theoretical Essay on Their Potential as a Renewable Energy Source

Author: Horley Monteiro Pacheco
Advisor: Prof. Me. Dilcelino de Souza Bruce

ABSTRACT

This study presents a theoretical essay on the potential of permanent magnet motors as an alternative for renewable energy generation. Through a bibliographic review, the fundamentals of electromagnetism, the properties of permanent magnets, the applications of synchronous motors (PMSM), and their socio-environmental impacts were analyzed. The results indicate that PMSMs exhibit high efficiency and power density, making them a strategic technology for electric mobility and distributed generation. However, their sustainability faces the paradox of dependence on rare earth elements, whose extraction causes significant environmental impacts. The study also rejects proposals of self-sustaining motors for violating thermodynamic laws and highlights the pedagogical potential of the topic for Physics education.

Keywords: permanent magnet motors, energy efficiency, rare earth elements, sustainability, Physics education.

Lista de abreviaturas e siglas

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

ICET – Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia

PMSM - Permanent Magnet Synchronous Machines

NdFeB – Neodímio-Ferro-Boro

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

Scielo – Scientific Electronic Library Online (Biblioteca Eletrônica Científica Online)

Lista de símbolos

ε Força eletromotriz induzida (Lei de Faraday)

ϕ_B Fluxo magnético

τ Torque eletromagnético

Φ Fluxo magnético total no motor

I corrente elétrica

k constante geométrica do motor

B_r Remanência magnética

H_c Coercitividade

BH_{max} Produto energético máximo

Sumário

1 Introdução	13
1.1 Definição do problema	14
1.2 Objetivos	14
1.3 Organização do trabalho	15
2 Embasamento Teórico	16
2.1 Fundamentos do Eletromagnetismo	16
2.2 Propriedades e desafios dos ímãs permanentes	18
2.3 Tecnologias e aplicações dos Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM)	19
2.4 Análise crítica de motores magnéticos não convencionais	21
2.5 Análise do ciclo de vida e impactos socioambientais dos materiais magnéticos	22
2.6 O motor magnético como ferramenta pedagógica para o ensino de Física e o letramento científico	24
3 Delineamento Metodológico	26
3.1 Caracterização da pesquisa	26
3.2 Procedimentos para a construção dos dados	26
3.3 Fundamentos de validade e rigor científico	27
3.4 Limitações do estudo	28
4 Análise e Discussão	29
4.1 Fronteiras Físicas: Eficiência de conversão versus Geração de Energia	29
4.2 A materialização do potencial tecnológico em aplicações sustentáveis	30
4.3 O paradoxo da sustentabilidade: tensões na cadeia produtiva	30
4.4 A dimensão formativa: o motor como artefato pedagógico	31
4.5 Síntese crítica e implicações	31
5 Resultados e reflexões	33

5.1 Teses centrais emergentes da revisão teórica	33
5.2 Implicações para a sustentabilidade e inovação tecnológica	34
5.3 Originalidade e contribuições da pesquisa	34
5.4 Síntese conclusiva e perspectiva futuras	35
6 Considerações finais	36
Referências	38

1 Introdução

Nas últimas décadas, a busca por fontes alternativas de energia tem se intensificado, entre outros motivos, pelo agravamento das mudanças climáticas, pela crise energética global e pela necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Nesse contexto, as energias renováveis surgem como estratégia para a construção de uma matriz energética mais sustentável e resiliente. A geração distribuída, a microgeração e as tecnologias limpas são cada vez mais discutidas em meio acadêmico, industrial e social, por combinarem inovação tecnológica com benefícios ambientais e socioeconômicos.

Entre as diversas alternativas para a geração de energia limpa, o estudo de motores elétricos baseados em ímãs permanentes têm ganhado destaque. Diversos trabalhos apontam que os motores síncronos de ímãs permanentes apresentam vantagens sobre as máquinas de indução, especialmente quanto à eficiência energética, à robustez e à densidade de potência (GIERAS, 2009; ZHAO et al., 2022). Essas características justificam sua ampla aplicação em turbinas eólicas, veículos elétricos e sistemas de microgeração.

Ao mesmo tempo, surgem propostas não convencionais que dizem ser possível construir motores magnéticos autossustentáveis, capazes de manter movimento contínuo sem o uso de uma fonte externa de energia. Modelos como os de Muammer Yildiz e Perendev ganharam notoriedade fora do meio acadêmico, embora não possuam comprovação científica. Essa discussão mostra o interesse por tecnologias alternativas e a necessidade de avaliá-las criticamente com base nos princípios fundamentais da Física, especialmente nas leis de conservação de energia.

O tema também apresenta relevância ambiental e educacional. A utilização de ímãs permanentes de terras raras, como neodímio, está associada a impactos ambientais significativos relacionados à mineração e ao descarte inadequado desses materiais (BINNEMANS et al., 2013). Ao mesmo tempo, o estudo de motores magnéticos pode contribuir para o ensino de Física, aproximando conceitos abstratos de eletromagnetismo das suas aplicações práticas e estimulando uma aprendizagem significativa (AUSUBEL, 1963; BECK, 2016).

Assim, este trabalho apresenta um ensaio teórico sobre o potencial dos motores de ímãs permanentes como alternativa de geração de energia renovável, considerando aspectos físicos, tecnológicos, ambientais e educacionais. A pesquisa baseia-se em revisão bibliográfica sistemática, reunindo e analisando criticamente publicações e propostas técnicas para sistematizar o conhecimento e subsidiar reflexões futuras.

1.1 Definição do problema

O problema central investigado neste estudo reside na viabilidade teórica de motores com ímãs permanentes como alternativa de geração de energia limpa. Embora haja evidências da eficiência de motores síncronos em certas aplicações, ainda existem dúvidas sobre seus limites físicos, econômicos e ambientais, especialmente diante de propostas que prometem independência total de fontes energéticas externas. A questão que se coloca é: até que ponto os motores magnéticos podem ser uma solução sustentável e confiável para a geração de energia renovável?

1.2 Objetivos

Objetivo geral: Produzir um ensaio teórico acerca do potencial dos motores com ímãs permanentes como fonte alternativa de energia renovável.

Objetivos específicos:

- Levantar e analisar publicações científicas e técnicas sobre motores magnéticos;
- Compreender e apresentar os fundamentos físicos relacionados ao eletromagnetismo aplicados a ímãs permanentes;
- Avaliar a viabilidade teórica de motores magnéticos como fonte de energia limpa, com base em propostas como as de Yildiz e Perendev;
- Discutir os impactos tecnológicos, ambientais e educacionais relacionados à utilização desses motores.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos. O primeiro constitui a introdução, responsável por contextualizar o tema e sua relevância atual, além de orientar a leitura do estudo desenvolvido. Esta parte inicial foi dividida em três sessões: inicialmente é apresentado o problema investigado, em seguida são descritos os objetivos da pesquisa e, por último, é exposta a forma como o trabalho foi organizado.

O capítulo 2, foi dedicado o embasamento teórico desenvolvido a partir de quatro eixos principais: os fundamentos do eletromagnetismo, as propriedades dos ímãs permanentes, as tecnologias e aplicações para os PMSM (Motores Síncronos de Ímãs Permanentes) e uma análise crítica das propostas não convencionais de motores magnéticos.

O capítulo 3 abordou a metodologia, descrevendo o caráter qualitativo da pesquisa que sustentou o ensaio teórico. Foram descritos os procedimentos de revisão bibliográfica, os critérios de seleção e análise do corpus documental, bem como os pilares de rigor científico que validaram a investigação, reconheceram suas limitações conceituais.

O capítulo 4 desenvolveu a análise e discussão dos resultados, explorando os limites físicos da tecnologia, suas aplicações práticas, os paradoxos socioambientais, o potencial pedagógico e uma síntese integradora dessas perspectivas.

O capítulo 5 consolidou os resultados da pesquisa, analisou suas implicações para a sustentabilidade e inovação, destacou as contribuições do estudo e as perspectivas futuras de pesquisa, encerrando a discussão teórica. Por fim, foram apresentadas as considerações finais.

2 Embasamento Teórico

2.1 Fundamentos do Eletromagnetismo

O princípio de funcionamento das máquinas elétricas, incluindo motores e geradores, tem como base o eletromagnetismo, o ramo da Física que descreve a interação mútua entre campos elétricos e magnéticos. A conversão entre energia elétrica e mecânica - seja para gerar eletricidade ou produzir movimento - segue princípios estabelecidos por cientistas como Michael Faraday, James Clerk Maxwell e Heinrich Lenz. O fenômeno que possibilita essa conversão é a indução eletromagnética, descoberta que explica como a variação de campos magnéticos pode criar corrente elétrica e vice-versa.

Um dos pilares conceituais é a lei da Indução de Faraday, que afirma que a variação temporal de um fluxo magnético (Φ_B) através de um circuito fechado induz uma força eletromotriz (ε). Essa relação é expressa matematicamente como

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

O sinal negativo corresponde à Lei de Lenz, que define o sentido da corrente induzida.

Este princípio é a base do efeito gerador: ao variar o fluxo magnético (por exemplo, girando uma bobina em um campo magnético), uma tensão é induzida. Já o efeito motor surge da Força de Lorentz, que descreve a força (F) exercida sobre um condutor de comprimento (L), percorrida por uma corrente (I), imerso em um campo magnético (B). A interação entre a corrente e o campo gera um torque, responsável pelo movimento.

As Equações de Maxwell descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos. Entre elas, a lei de Ampère-Maxwell é particularmente essencial para o projeto de máquinas elétricas, pois ela relaciona a circulação de um campo magnético à corrente elétrica que o origina. Essa corrente cria seu próprio campo, que interage com outros campos magnéticos no motor, produzindo torque. De forma resumida, a magnitude do torque eletromagnético (τ) resulta da interação entre fluxo magnético e corrente, conforme a expressão:

$$\tau = k \cdot \Phi \cdot I$$

Nesta relação, τ é o torque, Φ é o fluxo magnético estabelecido na máquina e I a corrente nos condutores do rotor (ou estator), e k uma constante de projeto que depende da geometria e dos materiais da máquina.

Nos motores com ímãs permanentes (MIP), o fluxo magnético (Φ) é estabelecido por materiais magnéticos de alto desempenho, como os de neodímio-ferro-boro (NdFeB), que se caracterizam por possuírem:

- valores elevados de remanência magnética (B_r), tipicamente entre 1,0 e 1,4 Tesla;
- alta coercitividade (H_c), geralmente acima de 800 kA/m;
- alto produto energético máximo ($(BH)_{max}$), da ordem de 30 a 55 MGOe.

Estas propriedades, significativamente superiores às dos ímãs convencionais de ferrite, dispensam a necessidade de uma corrente de excitação para criar campo. Como aponta Umans (2014), a ausência de um enrolamento de excitação elimina as perdas Joule associadas, resultando em maior eficiência energética e maior densidade de potência, definida como razão entre a potência mecânica de saída e o volume ou massa do motor, o que permite construções mais compactas e leves..

Conforme salienta Fowler (2009), a conversão de energia em máquinas é governada por essa interação fundamental. Nos MIPs, o torque rotacional resulta da interação entre o campo magnético estacionário gerado pelos ímãs do rotor e o campo magnético girante produzido pela corrente alternada nas bobinas do estator. Embora o princípio seja direto, a otimização desse processo exige projetos de engenharia cuidadosos para maximizar a eficiência e minimizar perdas, um desafio especialmente relevante em aplicações que demandam controle preciso em baixas rotações.

A relevância desses conceitos transcende a engenharia. Autores como Nussenzveig (1997) ressaltam que a compreensão destes princípios é essencial para a formação científica, pois conecta a teoria eletromagnética com fenômenos tecnológicos observáveis no cotidiano. Portanto, o estudo dos fundamentos eletromagnéticos não apenas constitui a base teórica para o desenvolvimento de tecnologias como os motores de ímãs permanentes, mas também serve como uma ferramenta para explorar seus limites e possibilidades futuras.

2.2 Propriedades e desafios dos ímãs permanentes

Os ímãs permanentes são materiais que se distinguem pela capacidade de manter um campo magnético estável e intenso na ausência de uma fonte de energia externa. Essa propriedade, crucial para a eficiência dos motores discutidos na seção anterior, origina-se da sua estrutura microscópica. Em materiais ferromagnéticos, os domínios magnéticos (pequenas regiões onde os momentos magnéticos atômicos estão alinhados) permanecem orientados mesmo após a remoção do campo magnetizante externo.

O desempenho de um ímã permanente é quantificado por meio de parâmetros extraídos de sua curva de histerese, um gráfico que descreve a resposta do material a um campo magnético externo. As propriedades fundamentais incluem:

- Remanência (B_r): representa a densidade de fluxo magnético que o material retém quando o campo externo é removido ($H = 0$). Uma alta remanência indica a capacidade de manter um campo magnético forte sem alimentação externa.
- Coercitividade (H_c): mede a intensidade do campo magnético reverso necessário para desmagnetizar completamente o material (reduzir $B = 0$). Uma alta coercitividade é sinônimo de resistência à desmagnetização, uma característica vital para motores elétricos, onde ímãs estão sujeitos a campos magnéticos opostos, correntes parasitas e variação de temperatura.
- Produto de Energia Máximo ($(BH)_{max}$): Considerando a principal figura de mérito, o $(BH)_{max}$ indica a máxima densidade de energia magnética que o ímã pode armazenar. Graficamente, corresponde à área do maior retângulo que pode ser inscrito no segundo quadrante da curva de histerese. Ímãs com alto $(BH)_{max}$ permitem o desenvolvimento de motores mais compactos, leves e potentes, pois podem realizar mais trabalho magnético em um dado volume.

Os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) destacam-se entre os materiais com propriedades magnéticas superiores. Introduzidos comercialmente na década de 1980, eles oferecem o mais alto produto de energia do mercado, revolucionando setores como eletrônica de consumo, a indústria automotiva (especialmente em veículos elétricos) e a geração de energia renovável (turbinas eólicas). Como apontam Herlach e Miura (2003), seu desempenho magnético é vastamente superior ao de

ímãs tradicionais, como os de ferrite ou samário-cobalto.

Contudo, o alto desempenho dos ímãs de NdFeB traz consigo desafios ambientais e geopolíticos complexos. Sua fabricação depende de elementos de terras raras, como o neodímio e o disprósio (usado para aumentar a coercitividade em altas temperaturas). A mineração e o refino desses elementos concentram-se em poucos países, especialmente na China, gerando uma forte dependência econômica e vulnerabilidade nas cadeias de suprimentos globais. Além disso, o processo extrativo acarreta severos impactos ambientais, incluindo a contaminação de solos e águas por resíduos tóxicos e um elevado consumo energético (BINNEMANS et al., 2013).

Diante desse cenário, a reciclagem e a economia circular surgem como estratégias para mitigar os impactos. Pesquisas como a de Jin et al. (2018) demonstram a viabilidade técnica e os benefícios ambientais da recuperação de ímãs de produtos em fim de vida, como motores de veículos elétricos. De forma complementar, Sprecher et al. (2014) defendem a transição para um modelo de economia circular, no qual o design de produtos facilita a desmontagem e o reprocessamento de ímãs, reduzindo a demanda pela mineração primária.

Portanto, embora as propriedades físicas dos ímãs permanentes justifiquem seu papel central nas tecnologias de conversão de energia, uma avaliação completa de sua aplicabilidade deve adotar uma perspectiva sistêmica. É fundamental equilibrar a busca por eficiência magnética com os impactos socioeconômicos e ambientais de seu ciclo de vida, desde a extração até o descarte, para garantir a real sustentabilidade das tecnologias que deles dependem.

2.3 Tecnologias e aplicações dos Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM)

Os motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) firmaram-se como uma tecnologia de ponta na conversão eletromecânica de energia, em razão de sua eficiência elevada e grande densidade de potência. Seu diferencial está no rotor, que utiliza ímãs permanentes de alta performance para criar o campo magnético. Essa configuração elimina a necessidade de um circuito de excitação elétrica, eliminando as perdas por efeito Joule (I^2R) associadas, o que resulta em menor aquecimento e

maior rendimento energético quando comparado a motores de indução convencionais (GIERAS, 2009).

Conforme aponta Umans (2014), essa concepção construtiva não só eleva a eficiência, mas também permite a construção de máquinas mais compactas e leves para uma mesma potência. A ausência de escovas e outros elementos de contato elétrico no rotor aumenta a robustez, a vida útil e reduz drasticamente a necessidade de manutenção, tornando os PMSM particularmente adequados para aplicações de alta confiabilidade.

O impacto dessa tecnologia é observado em vários setores estratégicos. No setor automotivo, os PMSM são a escolha predominante para a tração de veículos elétricos e híbridos, oferecendo alto torque em baixas rotações e uma resposta dinâmica rápida, fatores cruciais para o desempenho veicular (JAHNS; SOONG, 1996).

De forma análoga, em sistemas de geração de energia renovável, sua robustez e eficiência os tornam ideais para turbinas eólicas de acionamento direto, especialmente em pequena e média escala (ZHAO et al., 2022). Além disso, em sistemas de microgeração para comunidades isoladas, a combinação de PMSM com fontes hidráulicas ou eólicas oferece uma solução autônoma e de baixo custo operacional (MESQUITA et al., 2017).

Os avanços mais recentes em PMSM concentram-se na otimização da topologia magnética, com o objetivo de aumentar a densidade de torque e reduzir perdas, como *cogging torque* (torque de relutância) (ZHAO et al., 2022). Ao mesmo tempo, o aprimoramento dos sistemas de controle eletrônico, baseados em microprocessadores e algoritmos sofisticados, permite ajustar com precisão a frequência e a tensão, ampliando o desempenho e a versatilidade dos motores em diferentes modos de operação (VLACHOU et al., 2024).

Apesar de suas vantagens, os PMSM enfrentam desafios. O alto custo e a instabilidade no mercado de ímãs de terras raras, somados à dependência geopolítica de sua cadeia de produção, impõem barreiras econômicas. Além disso, como a coercitividade dos ímãs diminui com o aumento da temperatura, o superaquecimento pode causar desmagnetização parcial e irreversível, prejudicando o desempenho do motor. Essa limitação exige um projeto térmico criterioso e sistemas de refrigeração

eficientes.

Em suma, os PMSM representam uma tecnologia consolidada e promissora para a transição energética e a eletrificação da mobilidade. Contudo, sua expansão está condicionada à superação de gargalos relacionados ao custo, à sustentabilidade dos materiais magnéticos e à gestão térmica, temas que demandam contínua investigação e desenvolvimento.

2.4 Análise crítica de motores magnéticos não convencionais

Embora os motores eletromagnéticos sejam amplamente estudados e consolidados cientificamente, de vez em quando aparecem propostas que afirmam ser possível criar motores autossustentáveis. Tais dispositivos, chamados de “motores de energia livre” ou *overunity machines*, prometem um funcionamento perpétuo baseado apenas na interação de campos magnéticos estáticos de ímãs permanentes, sem precisar de uma fonte de energia externa. Exemplos como os projetos de Muammer Yildiz e o motor Perendev ficaram conhecidos por alegar rotação contínua obtida por arranjos específicos de ímãs no estator e no rotor.

No entanto, a ideia por trás desses dispositivos entra em conflito com os princípios fundamentais da Física. Alegar que um motor pode funcionar continuamente sem consumir energia externa viola a Primeira Lei da Termodinâmica (Princípio da Conservação da Energia). Além disso, imaginar um sistema que opere indefinidamente sem perdas ou degradação contraria a Segunda Lei da Termodinâmica, segundo a qual todo processo real em um sistema isolado resulta no aumento da entropia total. Em outras palavras, um motor autossustentável seria, em essência, um móvel perpétuo de segunda espécie, cuja existência é fisicamente impossível.

A análise da literatura associada a essas propostas revela uma ausência de rigor científico. Weinand-Diez e Weinand (2020) observam que a maioria desses projetos carece de documentação técnica revisada por pares, sendo divulgada por meio de patentes sem avaliação criteriosa, vídeos demonstrativos e relatos informais. A falta de validação independente e de resultados que possam ser reproduzidos coloca essas propostas no campo da pseudociência.

Do ponto de vista físico, ainda que certas configurações de ímãs possam gerar movimento inicial ao converter energia potencial magnética em energia cinética, o sistema inevitavelmente atinge um ponto de equilíbrio ou cessa o movimento devido a perdas dissipadas. Conforme destacam Vlachou et al. (2024), a energia é continuamente dissipada por atrito, resistência do ar, perdas por histerese no material e, crucialmente, pela indução de correntes parasitas (correntes de Foucault), que convertem parte da energia mecânica do sistema em calor através do efeito Joule. Sem um fluxo contínuo de energia para compensar essas perdas, a parada é inevitável.

Portanto, analisar criticamente essas iniciativas é importante por dois motivos principais. Primeiro, essa análise ajuda a distinguir o que é ciência do que é pseudociência, combatendo a desinformação tecnológica e fortalecendo a educação científica. Por outro lado, o estudo destaca o papel essencial do método científico — baseado em modelos matemáticos coerentes e em evidências experimentais — como base para o avanço do conhecimento

Em síntese, ainda que as propostas de motores magnéticos autossustentáveis atraiam atenção por prometerem energia ilimitada, elas carecem de fundamento teórico e de validação experimental. O exame crítico desses casos não apenas reafirma os limites impostos pelas leis naturais, como também valoriza os esforços de pesquisa genuína voltados ao desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis dentro dos parâmetros científicos consolidados.

2.5 Análise do ciclo de vida e impactos socioambientais dos materiais magnéticos

O uso cada vez mais comum de motores com ímãs permanentes, embora traga ganhos em eficiência energética, levanta um paradoxo em termos de sustentabilidade. A avaliação de longo prazo dessa tecnologia não deve se limitar ao seu bom desempenho técnico, mas precisa considerar de forma criteriosa os impactos ambientais e sociais ligados à extração, ao processamento e ao descarte de seus materiais magnéticos.

Os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB), amplamente utilizados em motores

de alto desempenho, dependem de elementos de terras raras. No entanto, a produção desses materiais está associada a graves impactos ambientais. Como apontam Binnemans et al. (2013), as etapas de mineração e processamento geram passivos ambientais expressivos, como a contaminação do solo e da água por efluentes tóxicos, além da liberação de partículas radioativas em áreas de extração intensiva.

Para além da dimensão ambiental, a hegemonia produtiva de poucos países, com destaque para a China, cria uma estrutura de dependência econômica e de riscos estratégicos para a cadeia de suprimentos global. Essa concentração geográfica impõe barreiras de custo e acesso a insumos importantes, podendo limitar a disseminação de tecnologias de energia limpa em nações em desenvolvimento.

Sob a ótica da Análise de Ciclo de Vida (ACV), a fase de fabricação dos ímãs também apresenta desafios, dado o seu elevado consumo energético. Nesse cenário, a reciclagem surge como uma estratégia fundamental. Sprecher et al. (2014) e Jin et al. (2018) demonstram que a recuperação de terras raras de produtos em fim de vida é uma alternativa promissora para reduzir a dependência da mineração primária e diminuir a pegada de carbono do processo produtivo. Técnicas avançadas, como a reciclagem *magnet-to-magnet* em ciclo fechado, permitem reaproveitar o material magnético de motores descartados na produção de novos ímãs, com mínima perda de desempenho e potencial para reduzir o impacto ambiental em até 80% (JIN et al., 2018).

A transição para um modelo de economia circular é, portanto, fundamental. Essa perspectiva propõe que os materiais sejam projetados para ter maior durabilidade e possibilidade de reutilização, retornando ao ciclo produtivo ao final de sua vida útil. No entanto, enfrentar esses desafios vai além das soluções tecnológicas, requer também políticas públicas e marcos regulatórios que incentivem práticas industriais sustentáveis e estimulem a pesquisa em materiais alternativos. Avanços na engenharia de materiais, como o desenvolvimento de ligas magnéticas com menor teor de terras raras ou completamente isentas delas, representam uma fronteira de pesquisa estratégica (VLACHOU et al. 2024).

Conclui-se, portanto, que avaliar os motores apenas pela sua eficiência energética é insuficiente. Para que essa tecnologia seja realmente sustentável, é necessário adotar uma visão ampla e integrada, que considere todo o ciclo de vida do

produto e combine inovação em materiais, gestão ambiental responsável e os princípios da economia circular.

2.6 O motor magnético como ferramenta pedagógica para o ensino de Física e o letramento científico

O ensino de Física frequentemente enfrenta o desafio de conciliar o formalismo teórico e a vivência empírica dos estudantes, uma dificuldade histórica que pode limitar a construção de um aprendizado profundo e significativo. Nesse contexto, o estudo de artefatos tecnológicos, como os motores de ímãs permanentes, apresenta-se como uma oportunidade pedagógica para transpor essa barreira, conectando os conceitos abstratos do eletromagnetismo de aplicações práticas, especialmente em temas de relevância social, como a sustentabilidade energética.

A Teoria da Aprendizagem Significativa, proposta por Ausubel (1963), oferece uma importante base teórica para essa abordagem. Ela propõe que aprendemos melhor quando conseguimos relacionar o que é novo com o que já sabemos, ou seja, quando o novo conhecimento se conecta de forma sólida aos conceitos que já fazem parte da nossa compreensão. A exploração de um motor magnético em sala de aula funciona como um “organizador prévio”, permitindo que fenômenos como campo magnético, indução eletromagnética e Força de Lorentz sejam assimilados de maneira contextualizada e interdisciplinar, e não como meras formulações matemáticas.

O papel do educador, como destaca Beck (2016), é o de arquiteto de situações-problema que despertem a curiosidade e estimulem a investigação. O uso de motores com ímãs de neodímio, por exemplo, pode favorecer o engajamento dos estudantes, tornando o aprendizado um processo mais ativo e participativo. Mesmo experimentos simples, realizados com materiais de baixo custo, são capazes de oferecer demonstrações visualmente marcantes dos princípios físicos em funcionamento.

Do ponto de vista metodológico, essa temática favorece a adoção de estratégias didáticas de caráter investigativo. Atividades como a construção de protótipos, a medição de campos magnéticos ou a análise crítica de conteúdos de desinformação científica — por exemplo, vídeos que tratam de motores de “energia

livre” — estimulam o raciocínio hipotético-dedutivo e fortalecem o letramento científico e tecnológico. Tais práticas ajudam os estudantes a desenvolver a capacidade de distinguir entre afirmações fundamentadas em evidências e aquelas sem base empírica (SILVA; SCHIRLO, 2014).

Além disso, a relevância desse tema ultrapassa o espaço escolar formal, podendo ser explorada em projetos de extensão universitária e em feiras de ciências. Dessa forma, cumpre-se a função social da universidade de promover o diálogo entre a academia e a comunidade. Essas iniciativas são fundamentais para a formação de futuros professores com uma visão integrada das relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente (CTSA).

Portanto, estudar os motores de ímãs permanentes vai além do aspecto técnico, trata-se também de uma oportunidade pedagógica para ensinar física de forma mais prática e conectada com o cotidiano. Com essa abordagem, o professor assume o papel de mediador entre o conhecimento científico e os desafios atuais da sociedade, ajudando a formar alunos que veem a ciência como uma ferramenta transformadora, capaz de compreender e resolver problemas reais.

3 Delineamento Metodológico

Este estudo foi planejado para investigar, de forma crítica, o papel dos motores de ímãs permanentes dentro do campo das energias renováveis. Para isso, foi adotada uma metodologia que combina pesquisa qualitativa de caráter exploratório e analítico com um ensaio teórico, ambos baseados em revisão bibliográfica. Essa combinação permite analisar o tema por diferentes ângulos, contemplando seus aspectos físicos, tecnológicos, socioambientais e pedagógicos.

3.1 Caracterização da pesquisa

A presente investigação classifica-se como exploratória, pois, segundo Gil (2018), busca ampliar a compreensão de um problema de investigação, tornando-o mais explícito e possibilitando o surgimento de novas interpretações teóricas. A sua natureza é predominantemente qualitativa, centrada na interpretação de conceitos, a análise de princípios e a articulação de argumentos, em oposição ao cálculo de variáveis ou à experimentação em ambiente laboratorial.

Adotou-se o ensaio teórico como formato discursivo, por ser o método que melhor se adequa à construção de uma argumentação original e crítica. Essa abordagem vai além da simples descrição de ideias, permitindo ao pesquisador dialogar com a literatura, questionar saberes consolidados, identificar controvérsias e propor novas interpretações sobre o tema em estudo.

3.2 Procedimentos para a construção dos dados

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica, organizada em etapas conforme descrito a seguir:

- **Levantamento do corpus documental:** realizado entre agosto e outubro de 2025, o levantamento abrangeu publicações indexadas nas bases de dados Scielo, Google Acadêmico, IEEE Xplore e Science Direct. A busca foi orientada pelos descritores motores de ímã permanente, motores síncronos, terras raras, sustentabilidade energética e ensino de eletromagnetismo;

- **Crêterios de sele o e constitui o do corpus:** o corpus da pesquisa foi constituído por artigos científicos revisados por pares, livros técnicos, teses e disserta es, com recorte temporal de 1990 a 2025. Fontes não acad micas, como as relativas às propostas de Yildiz e Perendev, foram incluídas apenas como objeto de análise crítica, dada sua relevância cultural no debate sobre o tema;
- **Síntese crítico-interpretativa:** o material selecionado foi submetido a uma leitura aprofundada, com o objetivo de extrair, interpretar e confrontar os argumentos centrais de cada obra. Esta etapa envolveu a codifica o e a categoriza o temática dos dados, permitindo identificar convergências, divergências e lacunas na literatura;
- **Síntese e reda o:** por fim, os resultados da análise foram integrados na reda o do ensaio teórico, onde os dados bibliográficos servem como alicerce para uma discussão articulada e propositiva sobre as potencialidades e os desafios dos motores de  ms permanentes.

3.3 Fundamentos de validade e rigor científico

O rigor científico desta pesquisa baseia-se em dois pilares: sele o das fontes e a consistência da análise. A credibilidade do trabalho foi garantida pelo uso de materiais reconhecidos pela área acadêmica e pela correta cita o de todas as referências, conforme as normas da ABNT (NBR 6023:2018).

Como princípio analítico, utilizou-se a triangula o teórica, confrontando as perspectivas de diferentes autores e campos do saber (Física, Engenharia, Ciências Ambientais e Educa o) para conferir maior profundidade às interpreta es. Esta estratégia foi particularmente importante para a análise crítica das propostas não convencionais de motores, pois permitiu uma demarca o clara entre ciência e pseudociência.

3.4 Limitações do estudo

Reconhece-se que, em virtude de sua natureza teórica, o presente estudo não contempla a validação empírica por meio de experimentação. As conclusões são, portanto, restritas ao âmbito conceitual e bibliográfico. Contudo, essa limitação é compensada pela profundidade da revisão de literatura realizada, que oferece uma visão atual sobre o tema, alcançando os objetivos exploratórios a que se propõe.

4 Análise e Discussão

Neste capítulo, são apresentados e discutidos de forma crítica os dados levantados, conectando os vários aspectos que envolvem os motores de ímãs permanentes. O objetivo é ir além da simples descrição e construir uma visão integrada do tema, relacionando os princípios físicos da tecnologia com suas aplicações, desafios ambientais e potencial educativo.

4.1 Fronteiras Físicas: Eficiência de conversão versus Geração de Energia

A análise da literatura confirma que a principal vantagem dos motores de ímãs permanentes reside em sua elevada eficiência de conversão energética. Ao eliminar as perdas ôhmicas do circuito de excitação do rotor, essa tecnologia otimiza a transformação de energia elétrica em trabalho mecânico, o que garante maior densidade de potência e uma superior relação torque/volume (GIERAS, 2009; UMANS, 2014). Esse atributo os posiciona como solução de ponta para aplicações que demandam alto rendimento, como a mobilidade elétrica e a microgeração.

Entretanto, é importante esclarecer um ponto essencial: os motores de ímãs permanentes funcionam como conversores de energia, não como fontes que a produzem. A ideia de um motor magnético que se mantém em funcionamento de forma autônoma, usando apenas a força dos ímãs, viola as leis básicas da termodinâmica, especialmente o princípio da conservação da energia. Como observam Weinand-Diez e Weinand (2020), a falta de provas experimentais sólidas confirma o caráter pseudocientífico dessas propostas.

Assim, o potencial real dessa tecnologia está em tornar mais eficiente a conversão de energia que vem de uma fonte externa. O campo magnético permanente impulsiona o funcionamento do motor, mas não gera energia por si só. Dentro desses limites estabelecidos pela física, abre-se um espaço amplo para a inovação tecnológica.

4.2 A materialização do potencial tecnológico em aplicações sustentáveis

Depois de esclarecer o equívoco da geração autônoma, o foco passa a ser as aplicações reais que demonstram o potencial dos motores de ímãs permanentes (PMSM). Os avanços recentes na ciência dos materiais, na otimização de topologias magnéticas e nos sistemas de controle eletrônico (ZHAO et al., 2022; VLACHOU et al., 2024) têm refinado ainda mais seu desempenho, tornando-os peças fundamentais na transição para fontes de energia mais limpas e eficientes.

Em sistemas de geração distribuída, como em aerogeradores de pequeno porte ou microcentrais hidrelétricas, a robustez e a baixa exigência de manutenção dos PMSM são diferenciais estratégicos. A análise de Mesquita et al. (2017) sobre aplicações em contextos remotos, como em comunidades amazônicas, ilustra como a confiabilidade da tecnologia pode ser um fator de resiliência e autonomia energética.

No setor da mobilidade elétrica, a eficiência dos PMSM permite que os veículos percorram distâncias maiores e exijam menor demanda sobre infraestrutura de recarga, ajudando a reduzir a emissão de gases que causam o efeito estufa. Essa tecnologia não é um fim em si mesma, mas uma ferramenta essencial para alcançar as metas mundiais de redução de emissões de gases do efeito estufa.

4.3 O paradoxo da sustentabilidade: tensões na cadeia produtiva

A materialização desse potencial tecnológico revela, contudo, uma profunda tensão entre a eficiência operacional e a sustentabilidade do ciclo de vida dos materiais. Os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB), amplamente usados nos motores, ligam essa tecnologia “verde” a uma cadeia produtiva com sérios impactos ambientais e questões geopolíticas. A forte dependência das terras raras, extraídas de forma agressiva e concentradas em poucas regiões do mundo, é o principal paradoxo que precisa ser enfrentado (BINNEMANS et al., 2013).

A degradação de ecossistemas e a geração de resíduos tóxicos no processo extrativo podem, em uma análise de ciclo de vida completo, erodir a parte dos benefícios ambientais conquistados na fase de uso do motor. Diante disso, a

economia circular, materializada em processos de reciclagem *magnet-to-magnet* (JIN et al., 2018; SPRECHER et al., 2014), deixa de ser uma alternativa para se tornar uma condição necessária para a sustentabilidade de longo prazo da tecnologia.

No plano socioeconômico, a difusão da microgeração baseada em PMSM pode, por outro lado, promover um modelo de transição energética justa e descentralizada. Ao viabilizar projetos comunitários de baixo custo, a tecnologia tem o potencial de ampliar o acesso à eletricidade, fomentar economias locais e reduzir desigualdades, especialmente em regiões historicamente marginalizadas do sistema energético convencional.

4.4 A dimensão formativa: o motor como artefato pedagógico

Para além de sua função técnica, o estudo dos motores magnéticos indicam uma relevância pedagógica. O tema serve como um recurso didático que conecta o formalismo do eletromagnetismo a fenômenos concretos do mundo contemporâneo, promovendo a Aprendizagem Significativa descrita por Ausubel (1963).

A análise de seu funcionamento permite explorar um vasto leque de conceitos físicos. Mais do que isso, o debate em torno das propostas de energia livre representa uma oportunidade para o desenvolvimento do pensamento crítico e do letramento científico. Conforme sugerem Silva e Schirlo (2014), quando o professor conduz os alunos na análise crítica dessas ideias, ele ajuda a desenvolver uma “imunidade epistêmica” contra a desinformação, ensinando a reconhecer o que pode ser testado cientificamente e o que pertence ao campo da pseudociência.

Portanto, o estudo vai além do conteúdo tradicional de Física, ampliando-se para uma reflexão sobre as relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Essa abordagem ajuda os estudantes a compreender melhor os desafios energéticos atuais e a participar de forma consciente nas decisões que afetam o futuro do planeta.

4.5 Síntese crítica e implicações

Os resultados da análise mostram que os motores de ímãs permanentes são uma tecnologia avançada e essencial para o futuro energético. Graças à sua alta

eficiência, eles têm papel decisivo em áreas como a mobilidade elétrica e a geração de energia local, contribuindo de forma direta para diminuir o uso de combustíveis fósseis.

Apesar dos avanços, a sustentabilidade dessa tecnologia ainda depende da resolução dos problemas ligados à extração e ao fornecimento das terras raras. É urgente investir em reciclagem e na criação de novos materiais que reduzam essa dependência. Além disso, ao analisar propostas sem base científica, reforça-se que a verdadeira inovação só é possível quando guiada pelo rigor e pela comprovação científica.

Por fim, a exploração de seu potencial pedagógico evidencia que essa tecnologia pode servir não apenas para impulsionar máquinas, mas também para inspirar o pensamento crítico e o aprendizado. O desafio que se impõe para o futuro é o de unir o avanço tecnológico à responsabilidade ambiental e ao compromisso com a ciência, tornando essa inovação verdadeiramente sustentável em todos os aspectos.

5 Resultados e reflexões

O presente estudo teve como objetivo realizar uma análise crítica e abrangente sobre os motores de ímãs permanentes, examinando sua viabilidade enquanto tecnologia compatível com os princípios das energias renováveis. Encerrando a trajetória teórica desenvolvida, este capítulo apresenta uma síntese dos resultados alcançados, das reflexões que deles decorrem e das implicações do trabalho para futuras investigações e aplicações nos campos da tecnologia, da sustentabilidade e da educação.

5.1 Teses centrais emergentes da revisão teórica

Com base na revisão da literatura, o estudo organizou-se em torno de quatro ideias-chave que orientam a presente discussão:

1. Superioridade tecnológica condicional: os motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) representam o estado da arte em eficiência de conversão eletromecânica, conforme validado por autores como Gieras (2009), Umans (2014) e Zhao et al. (2022). Sua alta densidade de potência e robustez os qualificam como tecnologia-chave para a descarbonização.
2. O paradoxo socioambiental das terras raras: o desempenho dos PMSM é indissociável dos ímãs de NdFeB, cuja produtiva impõe um paradoxo “a busca por uma solução energética limpa depende de um processo de mineração com severos passivos ambientais e de uma geopolítica de recursos complexa (BINNEMANS et al., 2013).
3. A refutação categórica da pseudociência: as propostas de motores magnéticos autossustentáveis foram categoricamente refutadas pela análise à luz das leis da termodinâmica. Tais propostas carecem de qualquer validação empírica e configuram-se como desinformação tecnológica.
4. Potencialidade pedagógica transversal: o tema dos motores magnéticos revelou-se um artefato pedagógico de grande valor, capaz de mediar a aprendizagem significativa de conceitos complexos de Física e de promover o letramento científico e o pensamento crítico (AUSUBEL, 1963; SILVA; SCHIRLO, 2014).

5.2 Implicações para a sustentabilidade e inovação tecnológica

A principal reflexão que se extrai deste estudo é a necessidade de uma mudança de paradigma na avaliação de tecnologias energéticas: é preciso ir além da métrica de eficiência operacional e adotar uma perspectiva sistêmica baseada na Análise de Ciclo de Vida. A verdadeira sustentabilidade de uma tecnologia não se define apenas por seu desempenho, mas pela integridade ambiental e social de toda a sua cadeia de valor.

Nesse contexto, o desenvolvimento de novas rotas de reciclagem de ímãs e a consolidação de práticas baseadas na economia circular deixam de ser alternativas opcionais e passam a constituir vetores estratégicos para a viabilidade de longo prazo dos PMSM. O desenvolvimento de ligas magnéticas com menor dependência de terras raras críticas (VLACHOU et al., 2024) é uma fronteira de pesquisa decisiva que une eficiência e responsabilidade socioambiental.

Socialmente, a tecnologia também pode ajudar a tornar a energia mais democrática, permitindo que comunidades produzam sua própria eletricidade por meio da microgeração. Para que isso aconteça, é necessário criar políticas públicas que incentivem tanto o uso da tecnologia quanto sua implementação em projetos que combatam desigualdades.

5.3 Originalidade e contribuições da pesquisa

A contribuição central deste trabalho está em criar um diálogo entre diferentes áreas do conhecimento, muitas vezes estudadas separadamente: Física, Engenharia de Materiais, Ciências Ambientais e Pedagogia. Ao analisar a literatura de forma crítica, o estudo oferece uma visão que pode ser útil tanto para cientistas quanto para educadores.

No campo educacional, a pesquisa avança ao propor um roteiro teórico-metodológico para o uso do tema em sala de aula, demonstrando como um objeto técnico pode ser mobilizado para o desenvolvimento de competências cognitivas e cidadãs, como o pensamento crítico e a consciência socioambiental.

5.4 Síntese conclusiva e perspectiva futuras

Em suma, os motores de ímãs permanentes representam uma promessa real para a transição energética, mas uma promessa condicional. Seu potencial somente se converterá em legado sustentável se os desafios de sua cadeia produtiva forem enfrentados com inovação tecnológica, regulação ambiental e cooperação internacional. A análise teórica reitera que a bússola para o futuro energético não aponta para soluções mágicas que violam as leis da natureza, mas para o aprimoramento inteligente e ético das tecnologias que dominamos.

Assim, este estudo se encerra apontando para novas agendas de pesquisa: (i) a realização de Análises de Ciclo de Vida comparativas para novas ligas magnéticas com baixo teor de terras raras; (ii) o desenvolvimento de materiais didáticos e sequências de ensino-aprendizagem baseadas nos princípios aqui discutidos; e (iii) a análise de políticas públicas capazes de fomentar uma cadeia de reciclagem de ímãs em escala industrial no Brasil. O motor magnético, emblemático em suas tensões e potencialidades, nos ensina que a verdadeira inovação caminha sobre o tripé do rigor científico, da responsabilidade ambiental e da educação crítica.

6 Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo analisar de forma teórica e crítica o potencial dos motores elétricos de ímãs permanentes como alternativa para gerar energia renovável. Utilizando uma revisão bibliográfica e um ensaio teórico, foram examinadas as dimensões física, tecnológica, ambiental e pedagógica dessa tecnologia.

Os resultados indicam que os motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) são uma tecnologia madura e eficiente na conversão eletromecânica de energia. Sua alta eficiência, robustez e densidade de potência os tornam fundamentais para a eletrificação do transporte e para o crescimento da geração distribuída, alinhando-se aos objetivos globais de transição energética.

Contudo, a investigação revelou que a sustentabilidade dessa tecnologia é condicional. A dependência de ímãs de terras raras, como o neodímio, impõe um paradoxo socioambiental: o avanço de uma tecnologia verde está atrelado a uma cadeia produtiva com significativos passivos ambientais e vulnerabilidades geopolíticas. Fica evidente, portanto, que a evolução dos motores magnéticos deve ser acompanhada de políticas de reciclagem, dos princípios da economia circular e de investimentos contínuos na pesquisa de materiais magnéticos alternativos.

Adicionalmente, a análise crítica das propostas não convencionais de motores autossustentáveis, como as de Yildiz e Perendev, demonstrou sua incompatibilidade com os princípios fundamentais da Física. A carência de respaldo científico e empírico dessas ideias reforça o papel insubstituível da educação científica e do pensamento crítico como pilares contra a desinformação tecnológica.

A dimensão pedagógica do estudo revelou-se muito promissora. Discutir motores de ímãs permanentes permite aos estudantes conectar conceitos de eletromagnetismo, energia e sustentabilidade com situações práticas, promovendo não apenas a aprendizagem significativa, mas também a reflexão sobre como a ciência influencia a sociedade.

Considera-se plenamente alcançado o objetivo geral de produzir um ensaio teórico sobre o potencial dos motores com ímãs permanentes, bem como os objetivos

específicos de analisar publicações científicas, compreender os fundamentos físicos, avaliar a viabilidade teórica e discutir os impactos tecnológicos, ambientais e educacionais. Dessa forma, este trabalho contribui em três frentes diferentes: na científica, ao sistematizar e integrar conhecimentos sobre uma tecnologia energética chave; na ambiental, ao problematizar o ciclo de vida dos materiais e apontar para soluções sustentáveis; e na educacional, ao mostrar que o tema pode ser usado como recurso didático relevante para a formação de cidadãos e professores mais críticos e reflexivos.

Como perspectivas futuras, recomenda-se avançar da análise teórica para investigações empíricas, por meio de pesquisas experimentais e projetos de extensão que avaliem o desempenho e a viabilidade dos PMSM em contextos regionais específicos, como comunidades isoladas na Amazônia. Além disso, sugere-se aprofundar estudos na fronteira dos materiais magnéticos, visando desenvolver alternativas às terras raras que conciliem alto desempenho e responsabilidade ambiental.

Em síntese, este trabalho demonstrou que a tecnologia dos motores elétricos com ímãs permanentes detém um potencial para impulsionar um futuro energético mais limpo, desde que seu desenvolvimento seja guiado por princípios científicos sólidos e pela ética ambiental. Portanto, unir ciência, tecnologia e educação aparece como o caminho mais seguro para construir um futuro em que a energia seja usada de forma eficiente, a sociedade seja mais justa e o meio ambiente esteja protegido.

Referências

- AUSUBEL, David P. **The psychology of meaningful verbal learning**. New York: Grune and Stratton, 1963.
- BECK, C. John Dewey: **Teoria e Prática no Ensino. Andragogia Brasil**. 2016. Disponível em: <https://andragogiabrasil.com.br/john-dewey/>. Acesso em: 03 ago. 2025.
- BINNEMANS, K. et al. **Recycling of rare earths: a critical review**. Journal of Cleaner Production, v. 51, p. 1–22, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>. Acesso em: 03 ago. 2025.
- CANAL MIXR, BLENDING IDEAS. **Yildiz Magnet Motor Event, Izmir with speaker dr. Jorge Duarte**. Youtube, 21 de dez de 2022. Disponível em: <https://youtu.be/M0UFRim6r3I?si=gVLTpabWI-ASOhZ>. Acesso em: 03 de ago. de 2025.
- FOWLER, R. **Fundamentos de Eletricidade: Corrente Alternada e Instrumentos de Medição**. 7 ed. AMGH Editora, v. 2, 2009. 274 p. (Série Tekne).
- GIERAS, J. F. **Permanent magnet motors technology: Design and Applications**. 3. ed. CRC Press, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/244989418_PERMANENT_MAGNET_MOTOR_TECHNOLOGY_DESIGN_AND_APPLICATIONS. Acesso: 03 de ago. de 2025.
- GUEDES, M. H. **Mudanças Climáticas!**. 1 ed. Clube de Autores, 2015. 179 p.
- HERLACH, F. ; MIURA, N. **High Magnetic Fields: Science and Technology. World Scientific**, v. 3, 2003. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=UE1hDQAAQBAJ>. Acesso em: 03 de ago. de 2025.
- JAHNS, T. M.; SOONG, W. L. **Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 43, n. 2, p. 321–330, 1996.
- JIN, Hongyue et al. **Life cycle assessment of neodymium-iron-boron magnet-to-magnet recycling for electric vehicle motors**. Environmental science & technology, v. 52, n. 6, p. 3796-3802, 2018.
- MESQUITA, R. F.; BRAGA, et al. **Desenvolvimento de um motor de passo com núcleo do rotor e estator a partir da liga sinterizada Fe-50% Ni**. Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015. v. 38, 2017. Disponível em: <https://www.cbcmmetalforming.com/publicacoes/2017/desenvolvimento%20de%20um%20motor.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Eletromagnetismo**. 5 ed. São Paulo: Blucher, v. 3, 1997.

SILVA, S. R.; SCHIRLO, A. C.. **Teoria da aprendizagem significativa de Ausubel: reflexões para o ensino de física ante a nova realidade social.** *Imagens da Educação*, v. 4, n. 1, p. 36-42, 2014.

SPRECHER, B. et al. **Life cycle inventory of the production of rare earths and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets.** *Environmental science & technology*, v. 48, n. 7, p. 3951-3958, 2014.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley.** 7. ed. AMGH, 2014.

VLACHOU, V. I. et al. **Overview on permanent magnet motor trends and developments.** *Energies*, v. 17, n. 2, p. 538, 2024.

WEINAND-DIEZ, P; WEINAND, S. **Freie Energie Magnetmotor selber bauen: Mit dem Premium 3D Modell im Buch.** 32 ed. Epubli, p. 181, 2020..

ZHAO, X. ; KOU, B. ; HUANG, C. ; ZHANG, L. **Optimization Design and Performance Analysis of a Reverse-Salient Permanent Magnet Synchronous Motor.** *Machines*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/machines10030204>. Acesso em: 03 de ago. de 2025.