



Proposta de ensaio laboratorial de Geradores Síncronos de Ímã Permanente no ensino de energia eólica

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6335

Autores: VICTOR CESAR PACHECO PAIVA, MARCUS VINICIUS ARAÚJO FERNANDES

Resumo: Este trabalho propõe um ensaio laboratorial de Geradores Síncronos de Ímã Permanente (PMSG) para o ensino de energia eólica, seguindo a norma IEEE Std 1812TM-2014. A iniciativa visa suprir a demanda por profissionais qualificados para a expansão eólica offshore no Brasil, onde PMSGs são predominantes. O experimento utiliza um aerogerador de 500W acionado por motor de indução e envolve medições de integridade, ensaios de estado estacionário (circuito aberto e curto-circuito) e análise transitória, com uso de termógrafo, multímetro e controlador de aquisição de dados. A abordagem de Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) permite aos alunos modelar a PMSG, comparar com modelos convencionais e desenvolver competências práticas. Os resultados incluem um roteiro didático e a caracterização de parâmetros da máquina. Futuramente, pretende-se avaliar o impacto pedagógico e expandir os ensaios.

Palavras-chave: Energia eólica offshore, Gerador Síncrono de Ímã Permanente (PMSG), Ensino de engenharia, Energia eólica offshore, Gerador Síncrono de Ímã Permanente (PMSG), Ensino de engenharia

Proposta de ensaio laboratorial de Geradores Síncronos de Ímã Permanente no ensino de energia eólica

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica tem se consolidado como um dos pilares da transição energética global, impulsionada pelo crescimento acelerado de sua capacidade instalada. O Brasil, devido à sua extensa costa e à regularidade dos ventos no Nordeste (com velocidades médias em torno de 9 m/s), possui um grande potencial para a exploração *offshore*, em consonância com o Plano Nacional de Energia 2050, que prevê a ampliação de fontes renováveis na matriz elétrica nacional (EPE, 2020).

Os parques eólicos podem ser instalados em terra ou no mar. Tradicionalmente, as maiores usinas *onshore* foram estabelecidas em regiões montanhosas, aproveitando custos mais baixos de construção e manutenção, além da proximidade às redes de transmissão. Por outro lado, a expansão dos parques *offshore* tem ocorrido em áreas costeiras com pouca disponibilidade de terrenos adequados em terra, principalmente em países europeus, devido a velocidades de vento mais elevadas e constantes e a um impacto ambiental (emissões sonoras e visuais) substancialmente menor em alto mar (IBAMA, 2019). Apesar de os custos com fundações e extensos cabos de transmissão serem maiores em ambientes *offshore*, a energia gerada, que aumenta com o cubo da velocidade do vento, justifica a instalação de turbinas de vários *megawatts* nestas condições.

Os aerogeradores *offshore* modernos empregam diretamente geradores síncronos de ímã permanente (*Permanent Magnet Synchronous Generator* - PMSG), eliminando caixas de engrenagens e reduzindo custos de manutenção, sendo acoplados a conversores de potência e transformadores para transmissão em alta tensão (POLINDER E OUTROS, 2011). Cerca de 95% da capacidade eólica mundial já opera dessa forma, o que reforça a viabilidade dessa tecnologia para o Brasil, especialmente para atender às demandas de indústrias e projetos *Power-to-X*, e com isso, os PMSG vêm ganhando destaque nos parques eólicos *offshore*, representando mais de 70% das instalações recentes na Europa (GWEC, 2023). Essa tendência está associada à necessidade de maximizar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais em ambientes marítimos profundos. No Brasil, essa questão é particularmente relevante, visto que cerca de 80% do potencial eólico *offshore* nacional encontra-se em áreas com profundidades superiores a 50 metros.

Com a expansão dos empreendimentos eólicos *offshore* no Brasil, consolidam-se oportunidades na nova fronteira eólica, o que intensifica a demanda por profissionais qualificados para atuar nesse setor (FERREIRA, 2022). O Brasil, com seu vasto litoral e potencial técnico estimado em mais de 700 GW para eólica *offshore*, tem a chance de se posicionar como referência na formação de excelência para essa nova fronteira eólica. Para tanto, é essencial que as instituições acadêmicas implementem estratégias educacionais voltadas especificamente para o ensino e a pesquisa em eólica *offshore*.

No contexto da formação em engenharia, os primeiros contatos dos estudantes com os fundamentos dos aerogeradores ocorrem nas disciplinas introdutórias relacionadas ao ensino das máquinas elétricas rotativas. Esses componentes curriculares fornecem bases complementares sobre máquinas rotativas, sendo essenciais para a compreensão de geradores síncronos e assíncronos, além das tecnologias mais avançadas, como os geradores de ímãs permanentes.

Diante desse contexto, a consolidação do ensino de máquinas elétricas deve incluir metodologias que permitam a aplicação prática dos conceitos teóricos, preparando os futuros profissionais para os desafios das tecnologias emergentes. Assim, este trabalho propõe um

experimento didático envolvendo o ensaio de uma máquina elétrica de ímã permanente de pequeno porte. O objetivo é modelar esse tipo de gerador e compará-lo com os modelos convencionais (síncronos e assíncronos) de geradores, proporcionando aos estudantes um aprendizado mais aprofundado e alinhado às demandas atuais do setor elétrico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Aprendizado Baseado em Problemas (PBL) fundamenta-se em teorias construtivistas, experiência prática e socioconstrutivismo, com inspiração em autores como Dewey, Piaget e Rogers (SAVIN-BADEN, 2000). Sua primeira aplicação sistematizada deu-se na Universidade McMaster, na década de 1960, originalmente na área médica, e depois expandiu-se a diversos cursos, incluindo Engenharia, onde também é chamado de “aprendizagem baseada em projetos” (BARROWS; TAMBLYN, 1980; HMELO-SILVER, 2004).

2.1. Metodologias ativas de ensino.

O Aprendizado Baseado em Problemas (PBL) fundamenta-se em teorias construtivistas, experiência prática e socioconstrutivismo, com inspiração em autores como Dewey, Piaget e Rogers (SAVIN-BADEN, 2000). Sua primeira aplicação sistematizada deu-se na Universidade McMaster, na década de 1960, originalmente na área médica, e depois expandiu-se a diversos cursos, incluindo Engenharia, onde também é chamado de “aprendizagem baseada em projetos” (BARROWS; TAMBLYN, 1980; HMELO-SILVER, 2004).

No modelo PBL, o ponto de partida é um problema real ou simulado que exige dos alunos pesquisa autônoma, trabalho em equipe e reflexão crítica, mobilizando conhecimento contextualizado para a resolução (HMELO-SILVER, 2004). Em Engenharia, por vezes adota-se modelo híbrido (combina aulas expositivas e PBL) ou multimodal (vários problemas ao longo do curso), resultando em artefatos concretos como protótipos ou planilhas de cálculo. Essa abordagem aumenta engajamento, retenção de conteúdo e desenvolve competências interpessoais, ainda que demande mais tempo, infraestrutura e capacitação docente para elaboração de problemas e avaliação de processos (SAVIN-BADEN, 2000).

Como exemplo no ensino de Geração Eólica, Rocha, Rodrigues e Figueiredo (2024) ilustram o uso de PBL na elaboração de um “Guia de Projetos” e planilha em Excel que acompanham todo o ciclo de resolução, demonstrando como a teoria se vincula diretamente à prática profissional. Esse caso ressalta que, apesar dos desafios de recursos e avaliação, o PBL prepara estudantes para demandas reais do setor de Engenharia.

2.2. Geração eólica e PMSG

Os parques eólicos terrestres brasileiros utilizam predominantemente geradores de indução duplamente alimentados (DFIGs) acoplados a caixas de engrenagens, tecnologia amplamente empregada devido ao seu menor custo inicial e à operação flexível em velocidades de vento moderadas (entre 6 e 8 m/s) (CARVALHO et al., 2020). As principais características desse sistema incluem o uso de caixas de engrenagens, responsáveis por aumentar a velocidade do rotor para adequá-la ao gerador. No entanto, essa configuração apresenta desvantagens, como perdas mecânicas de aproximadamente 3% e a necessidade de manutenção frequente (SILVA, 2021).

O Estudo de Viabilidade Técnica de Parques Eólicos no Nordeste realizado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica indica que os DFIGs representam cerca de 80% das turbinas instaladas no Nordeste, com fatores de capacidade entre 35% e 40% (CEPEL, 2022). No

entanto, sua dependência de escovas e anéis coletores limita a vida útil em ambientes sujeitos a altos índices de poeira, como os característicos do sertão nordestino.

As máquinas elétricas de corrente alternada de ímã permanente são síncronas polifásicas, cujo rotor contém ímãs permanentes. Elas podem ser analisadas utilizando técnicas convencionais de modelagem de máquinas síncronas, assumindo corrente de campo constante e determinando as indutâncias a partir da permeabilidade efetiva do rotor com ímãs (CAIXETA, 2014). Uma das principais vantagens dessas máquinas é a baixa dissipação de energia no rotor, já que os ímãs geram fluxo magnético sem perdas adicionais. Como consequência, a eficiência energética é superior, tornando sua aplicação cada vez mais relevante. Contudo, algumas limitações devem ser consideradas, como o custo elevado dos materiais magnéticos, a diminuição da densidade de fluxo residual com o aumento da temperatura e os desafios associados ao controle e à proteção devido à excitatriz constante.

Os parques eólicos offshore exigem tecnologias altamente robustas e confiáveis, uma vez que estão sujeitos a desafios ambientais severos, como a corrosão devido à exposição à água salgada e o acesso restrito para manutenção. Diante desse cenário, os geradores síncronos de ímã permanente (PMSGs) representam a solução tecnológica mais adequada no setor eólico offshore. Sua adoção vem crescendo devido à baixa taxa de falhas, à eliminação de componentes de desgaste – como caixas de engrenagens –, à redução de peso e à menor necessidade de manutenção. Além disso, os PMSGs operam com menor emissão de ruídos em baixas velocidades e não requerem fonte externa para a magnetização do rotor, o que simplifica o sistema e reduz custos.

Para garantir que as características dessas máquinas sejam conhecidas, faz-se necessária a realização de ensaios padronizados que assegurem a caracterização completa de seus parâmetros elétricos e mecânicos. Nesse contexto, o IEEE Std 1812™-2014 estabelece diretrizes abrangentes para ensaios de máquinas síncronas de ímã permanente (PMSG), definindo procedimentos para verificações de integridade (medição de resistência, sequência de fases, testes de isolamento e inspeção de magnetos), ensaios de estado estacionário (circuito aberto, curto-circuito e carga) e ensaios transitórios (teste de retardação e curto-circuito súbito), além de especificar métodos para avaliação de perdas magnéticas, de atrito e de vento, determinação de eficiência, curva de torque-velocidade e capacidade térmica (IEEE, 2014, cláusulas 3–6). Para suportar esses ensaios, a norma adota um circuito elétrico equivalente por fase, que pode ser observado na Figura 1, constituído por uma fonte de tensão induzida (E)

$$E = j\omega_e \phi_{IP} \quad (1)$$

em série com a resistência de armadura (R_s) e a reatância síncrona (X_s),

$$X_s = j\omega_e L_s \quad (2)$$

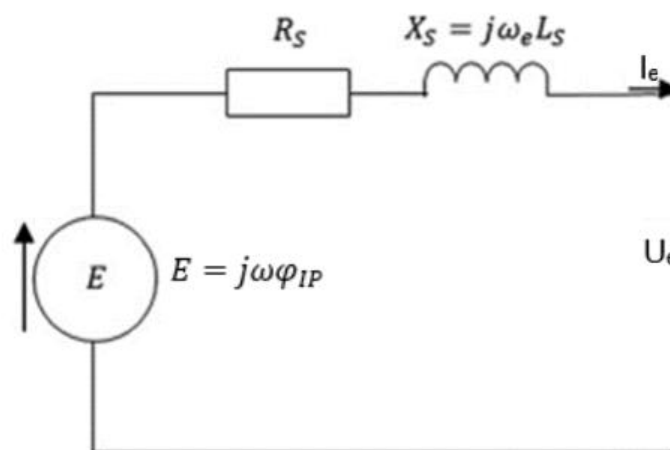
onde U_e e I_e representam, respectivamente, a tensão terminal e a corrente de armadura (IEEE, 2014). Esse modelo permite relacionar diretamente ensaios de circuito aberto (para obtenção de E e perdas a vazio) e de curto-circuito (para determinação de R_s), bem como estimar a corrente de curto-circuito (I_{cc})

$$I_{cc} = \frac{E}{X_s} \quad (3)$$

para planejar ensaios de carga e transitórios, assegurando a caracterização completa dos parâmetros críticos de projeto e operação de PMSGs em aplicações eólicas. Para viabilizar a

adoção e a inovação contínua dessas tecnologias, é essencial que engenheiros dominem os modelos matemáticos precisos dessas máquinas. A realização de ensaios experimentais permite aos estudantes compreenderem a relação entre os parâmetros construtivos e o desempenho operacional, validar simulações computacionais por meio de dados experimentais e desenvolver estratégias avançadas de controle. A construção dessa base teórico-prática desde as etapas iniciais da graduação não apenas capacita profissionais para implementar soluções offshore, mas também impulsiona a inovação em um setor estratégico para o Brasil, e a sinergia entre academia e indústria, mediada por metodologias de análise e experimentação, pode ser decisiva para consolidar a soberania energética nacional.

Figura 1 - Circuito elétrico equivalente por fase de uma máquina elétrica de ímã permanente.



Fonte: Adaptado de IEEE Std 1812™-2014.

3 MÉTODO

Com o objetivo de promover o ensino-aprendizagem do conteúdo proposto, emprega-se uma atividade prática (*hands-on*) com uma PMSG contextualizada na energia eólica, em comparação a outras máquinas geradoras convencionais. O desafio central é o desconhecimento prévio do modelo interno da máquina disponível e para superá-lo, o método consiste em realizar um ensaio experimental em uma máquina síncrona de ímã permanente (PMSG) de pequeno porte, seguindo as diretrizes do IEEE Std 1812™-2014. O sistema é composto por um aerogerador i-500 do fabricante ISTA BREEZE com potência nominal de 500W e tensão de operação de 12 VCA, além de um motor de indução trifásico de 1,5 CV, 4 polos e tensão de 220/380 VCA, que atua como acionador mecânico para simular a rotação do eixo da turbina eólica. Esse arranjo permite reproduzir, em escala reduzida, os princípios operacionais das turbinas eólicas offshore, viabilizando a análise de parâmetros críticos, como eficiência, perdas térmicas e comportamento dinâmico.

Durante a realização dos ensaios, diferentes instrumentos são empregados para garantir medições precisas e confiáveis. O termógrafo é utilizado para monitoramento da distribuição de temperatura no rotor e no estator, permitindo a avaliação das perdas térmicas. O multímetro digital possibilita a medição das resistências de enrolamento e do isolamento do gerador. A aquisição de dados de tensão, corrente e potência ativa/reactiva é realizada por meio do controlador PFW01, configurado como wattímetro. Para o controle da velocidade de rotação do motor de indução, utiliza-se o inversor de frequência CFW300, permitindo simular diferentes condições operacionais do aerogerador. Como medida de segurança, disjuntores tripolares são empregados, garantindo conformidade com a Norma Regulamentadora NR-12, que estabelece diretrizes para a segurança em máquinas e equipamentos industriais.

A execução do ensaio reforça os conceitos teóricos abordados nas Disciplinas introdutórias as máquinas elétricas rotativas, permitindo que os alunos compreendam a relação entre os parâmetros construtivos e o desempenho operacional das máquinas elétricas. Os dados experimentais obtidos são comparados com modelos matemáticos, incluindo equações de torque e tensão induzida, possibilitando a validação da precisão dos modelos teóricos e contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de controle e otimização dessas máquinas.

4 RESULTADOS

Como resultado deste trabalho foi desenvolvido um roteiro didático para ensaios em máquinas de ímã permanente, precedido pela construção de fluxogramas compostos por etapas e observações que orientam o passo a passo dos ensaios a fim de estruturar de forma progressiva e que permita que os discentes caracterizem parâmetros críticos dos geradores síncronos de ímã permanente (PMSG) e consolidem conhecimentos técnicos essenciais para aplicações em projetos eólicos.

Inicialmente, a análise da condição e integridade da máquina envolve a medição da resistência de armadura, permitindo verificar a continuidade dos enrolamentos e determinar a resistência média em corrente contínua, fundamental para a modelagem do circuito equivalente. Em complemento, o ensaio de sequência de fase assegura a correta conexão das fases do gerador, prevenindo problemas como rotação inversa e vibrações excessivas que podem comprometer a eficiência e a segurança operacional.

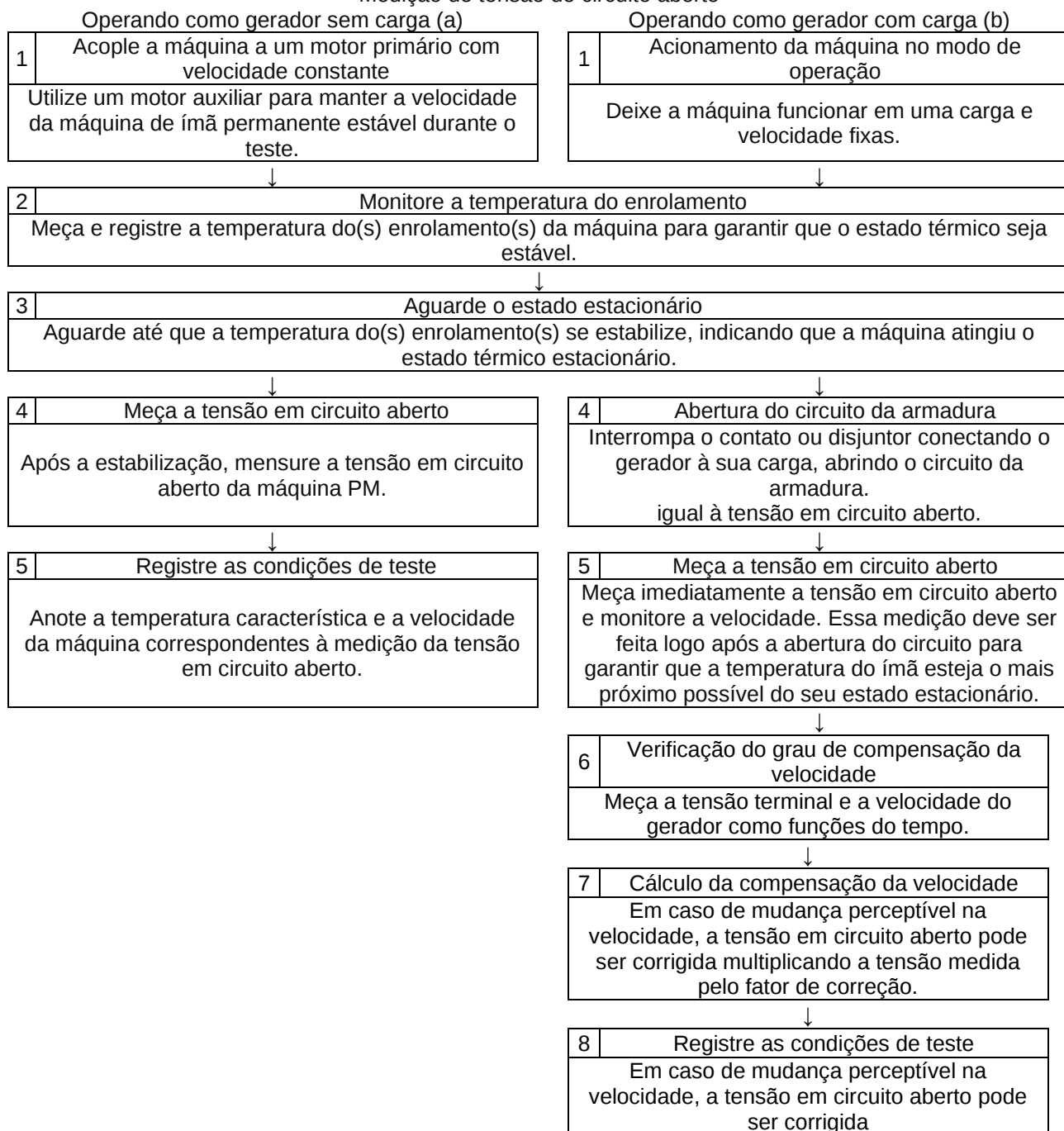
Na sequência, os ensaios voltados para o desempenho em regime permanente fornecem uma compreensão detalhada do comportamento da máquina sob condições normais de operação. A curva de magnetização é obtida a partir do ensaio de circuito aberto, que pode ser observado com detalhes na Figura 2, permitindo correlacionar a tensão induzida com a velocidade angular. Ainda no ensaio de circuito aberto, é possível identificar perdas associadas ao atrito e à ventilação a partir dos passos vistos nas Figuras 3 e 4.

O comportamento dinâmico da máquina é explorado a partir da análise da resposta a perturbações transitórias. Nesse contexto, a medição do momento de inércia, realizada por meio da desaceleração livre, permite estimar as perdas em função da velocidade angular e compreender a estabilidade do sistema em condições operacionais variáveis. Esses parâmetros são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de controle dinâmico em turbinas eólicas, contribuindo para maior eficiência e confiabilidade no longo prazo.

A síntese dos resultados experimentais inclui a resistência de armadura, a reatância síncrona, as perdas por atrito e ventilação e as perdas no núcleo, permitindo a construção de um modelo elétrico-mecânico completo da máquina. Esse modelo não apenas viabiliza simulações avançadas, mas também orienta estratégias de otimização para sistemas eólicos *offshore*, promovendo inovação tecnológica e aprimoramento da formação acadêmica na área.

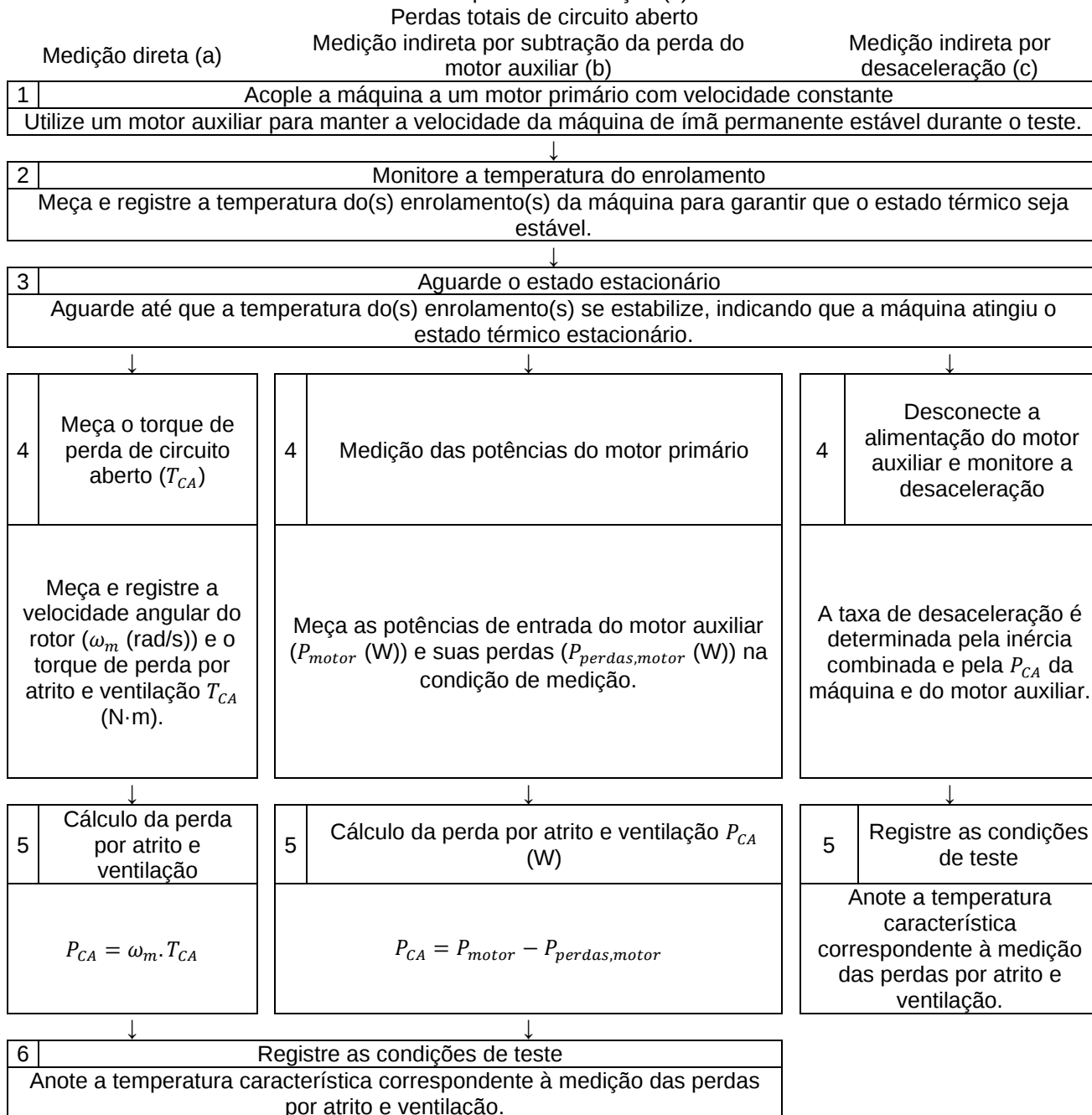
Figura 2 - Fluxograma para teste de tensão de circuito aberto para uma máquina de ímã permanente operando como gerador sem carga (a) e com carga (b).

Medição de tensão de circuito aberto



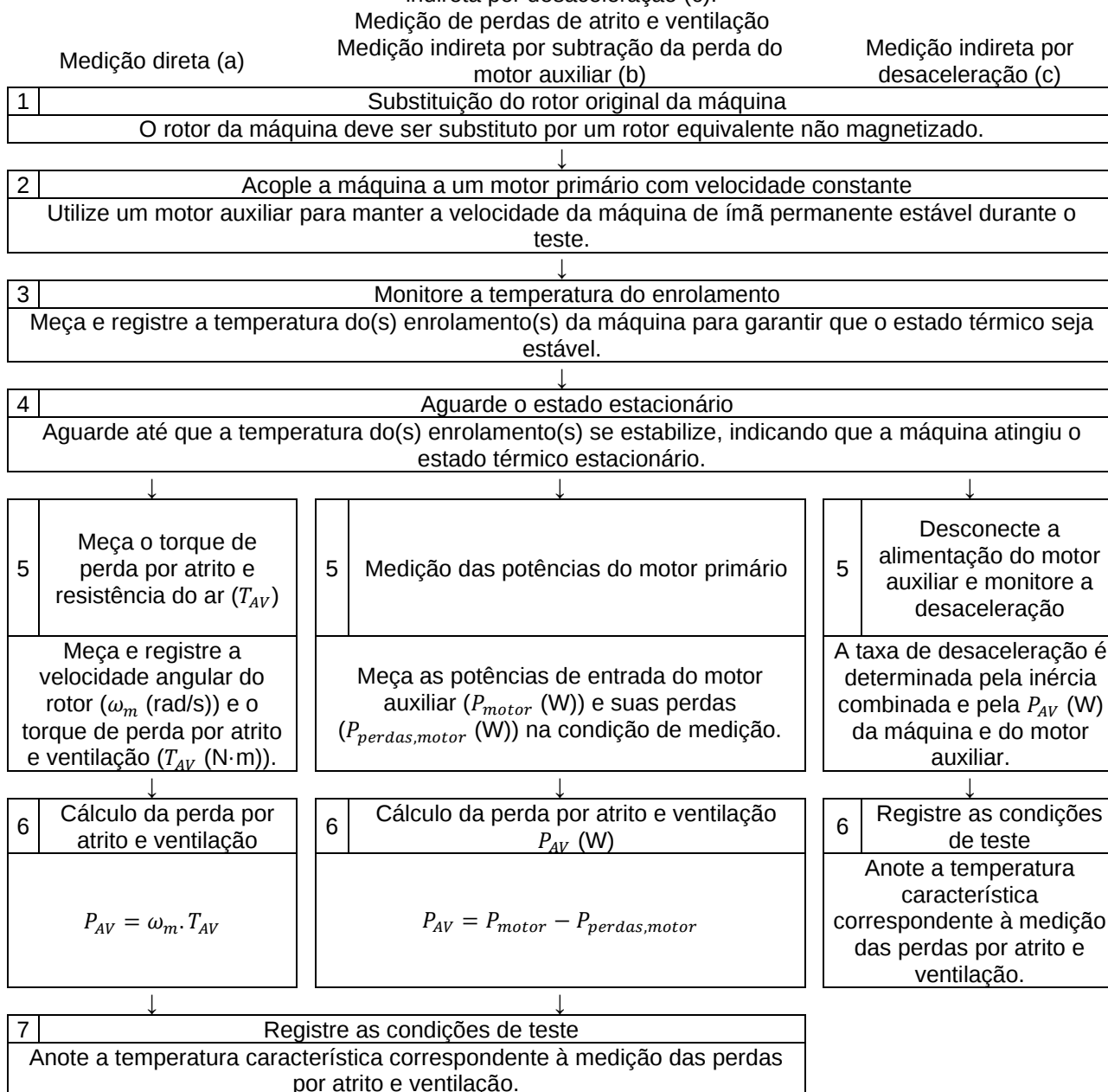
Fonte: Adaptado pelos autores de Padrão IEEE 1812 (2014).

Figura 3 - Fluxograma para medição de perdas totais de circuito aberto (P_{CA}) para uma máquina de ímã permanente por medição direta (a), medição indireta por subtração da perda do motor auxiliar (b) e medição indireta por desaceleração (c).



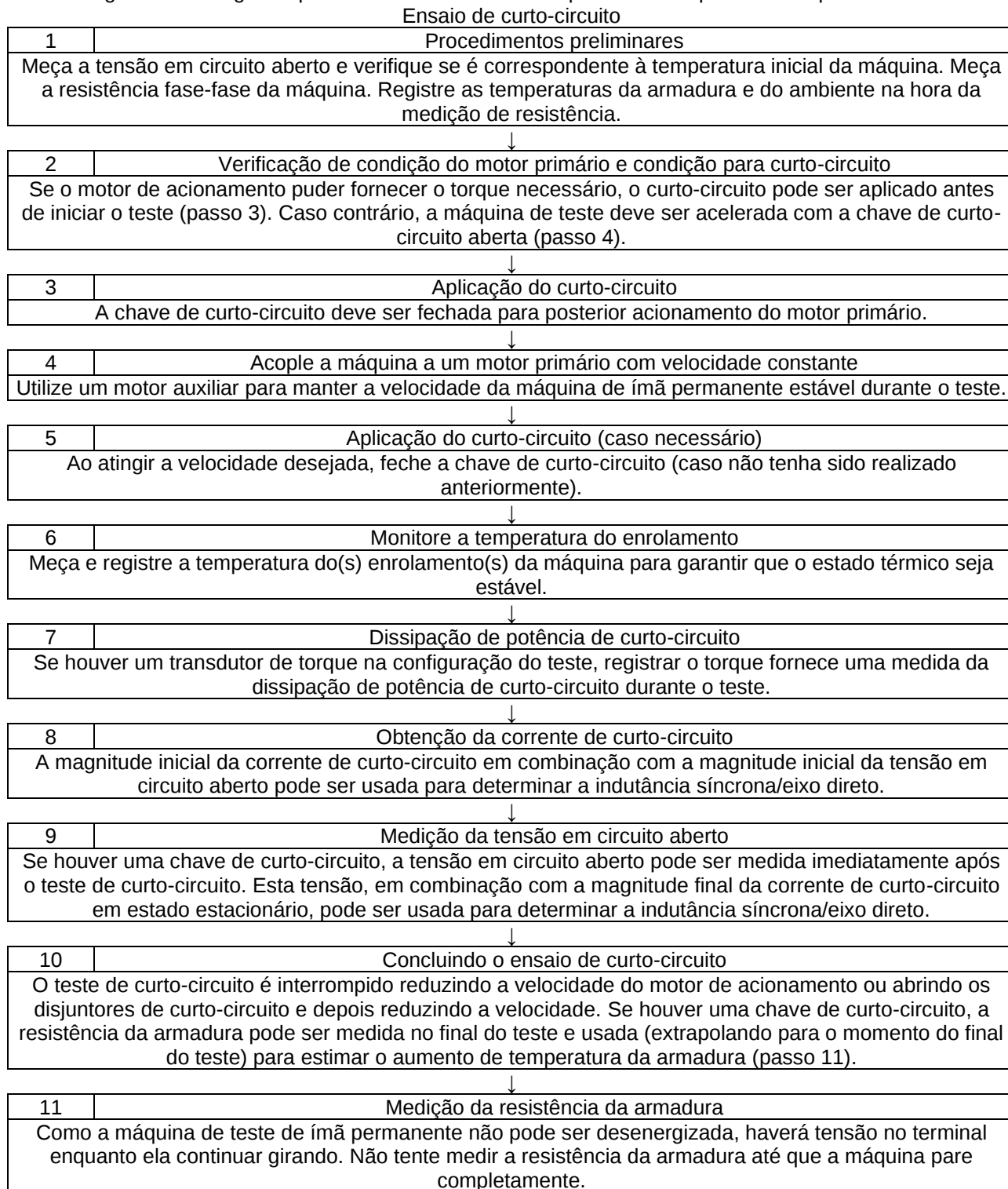
Fonte: Adaptado pelos autores de Padrão IEEE 1812 (2014).

Figura 4 - Fluxograma para medição de perdas por atrito e ventilação (P_{AV}) para uma máquina de ímã permanente por medição direta (a), medição indireta por subtração da perda do motor auxiliar (b) e medição indireta por desaceleração (c).



Fonte: Adaptado pelos autores de Padrão IEEE 1812 (2014).

Figura 5 - Fluxograma para ensaio de curto-circuito para uma máquina de ímã permanente.



Fonte: Adaptado pelos autores de Padrão IEEE 1812 (2014).

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O método proposto segue os princípios do Aprendizado Baseado em Problemas (PBL), pois parte da necessidade real de caracterizar uma máquina de ímã permanente desconhecida para mobilizar conhecimentos teóricos e práticos. Nesse cenário, os alunos planejam e executam ensaios de circuito aberto, curto-circuito e análise de desempenho de uma PMSG, integrando modelagem matemática e aplicações em turbinas eólicas offshore.

Durante essas atividades, eles pesquisam procedimentos de ensaio, dividem tarefas em equipe e refletem criticamente sobre discrepâncias entre teoria e resultados experimentais, desenvolvendo autonomia, comunicação e pensamento crítico, competências valorizadas pela indústria eólica contemporânea (HMELO-SILVER, 2004; SAVIN-BADEN, 2000; ROCHA; RODRIGUES; FIGUEIREDO, 2024). A prática experimental não apenas facilita a assimilação de conceitos complexos, mas também aproxima os estudantes dos desafios reais do setor, mostrando na prática a relação entre fenômenos eletromagnéticos e eficiência energética.

Como continuidade, pretende-se avaliar a efetividade desse roteiro na formação de futuros engenheiros: serão utilizados indicadores qualitativos e quantitativos (como percepções dos alunos e desempenho acadêmico) em disciplinas que introduzem máquinas elétricas rotativas. Em etapas posteriores, outros roteiros abordarão a curva de potência em função da velocidade do vento, correlacionando resultados teóricos e experimentais, além do desenvolvimento e validação de um modelo computacional da máquina com base nos dados de ensaio. Essa abordagem integrada, ao articular ambientes físico e virtual de aprendizagem, visa consolidar o processo de ensino-aprendizagem e preparar os alunos para desafios concretos na indústria eólica.

REFERÊNCIAS

BARROWS, H. S.; TAMBLYN, R. M. **Problem-Based Learning: An Approach to Medical Education**. New York: Springer, 1980.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Roadmap Eólico Offshore Brasil**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://tinyurl.com/4rane78y>. Acesso em: 25 fev. 2025.

CAIXETA, D. A. **Modelagem e análise dinâmica de um sistema de conversão de energia eólica com gerador síncrono de ímã permanente via plataforma ATP**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. DOI: 10.14393/ufu.te.2014.123.

CARVALHO, R. et al. **Wind Energy in Brazil: Current Status and Future Perspectives**. Renewable Energy, v. 158, p. 628–640, 2020.

CEPEL. **Estudo de Viabilidade Técnica de Parques Eólicos no Nordeste**. Relatório Técnico RT-345, 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://tinyurl.com/3ht96ew5>. Acesso em: 1 jun. 2025.

FERREIRA, W. C. **Eólica Offshore: nova fronteira energética que o Brasil está prestes a alcançar**. Ensaio Energético, 08 ago. 2022. Disponível em: <https://tinyurl.com/4uehhv6v>. Acesso em: 31 mai. 2025.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global Wind Report 2023**. Bruxelas: GWEC, 2023. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

HMELO-SILVER, C. E. **Problem-Based Learning: What and how do students learn?** Educational Psychology Review, v. 16, n. 3, p. 235–266, 2004. Disponível em: <https://tinyurl.com/25269pak>. Acesso em: 23 mai. 2025.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). **Avaliação de Impacto Ambiental de Complexos Eólicos Offshore**. Relatório Técnico, 2019. Disponível em: <https://tinyurl.com/ycys78ab>. Acesso em: 22 mai. 2025.

IEEE. IEEE Std 1812™-2014: **IEEE Trial-Use Guide for Testing Permanent Magnet Machines**. New York: IEEE, 2014.

POLINDER, H.; PIJL, F. F. A.; DE VILDER, G. J.; TAVNER, P. J. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 21, n. 3, p. 725–733, set. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2006.875476>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ROCHA, A. V.; RODRIGUES, K. C.; FIGUEIREDO, F. A. **Aprendizagem baseada em projetos aplicada à disciplina de geração eólica: um estudo de caso**. Revista de Ensino de Engenharia, v. 43, 2024. Disponível em: <https://tinyurl.com/4cubrude>. Acesso em: 11 mai. 2025.

SAVIN-BADEN, M. **Problem-based learning in higher education: untold stories**. Londres: Society for Research into Higher Education; Open University Press, 2000.

SILVA, J. P. **Análise de perdas em geradores de indução para aplicações eólicas**. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

Proposal for a Laboratory Experiment on Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSGs) in Offshore Wind Energy Education

Abstract: *This paper proposes a laboratory experiment for Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) for wind energy education, following the IEEE Std 1812™-2014 standard. The initiative aims to meet the demand for qualified professionals for offshore wind expansion in Brazil, where PMSGs are predominant. The experiment uses a 500W wind turbine driven by an induction motor and involves integrity measurements, steady-state tests (open-circuit and short-circuit), and transient analysis, using a thermograph, multimeter, and data acquisition controller. The Problem-Based Learning (PBL) approach allows students to model the PMSG, compare it with conventional models, and develop practical skills. The results include an instructional guide and the characterization of machine parameters. Future work intends to evaluate the pedagogical impact and expand the tests.*

Keywords: Offshore wind energy; Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG); Problem-based learning (PBL).

