



Desenvolvimento de um bobinador CNC didático fundamentado em aprendizagem baseada em problemas para bobinamento de geradores eólicos

Vinícius Linhares Martins | vinicius.lm2009@aluno.ifsc.edu.br¹
Andrei Leandro Morsch Franco | andrei.franco@ifsc.edu.br²

Edital 04/2024/PROPI – Fluxo Contínuo
Trabalho de Pesquisa

DT 4 - Inovação Tecnológica, Processos Produtivos e Futuro das Tecnologias

Resumo:

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um protótipo de bobinador de comando numérico computacional (CNC) de baixo custo, projetado para o bobinamento de enrolamentos de geradores eólicos e de transformadores de pequeno porte. A motivação reside na carência de equipamentos didáticos acessíveis que permitam a construção prática de geradores eólicos de ímãs permanentes (PMSG). A metodologia adotada fundamentou-se na Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL), integrando estudantes na resolução de desafios reais de engenharia e automação. O sistema foi construído utilizando a plataforma Arduino MEGA 2560, placa RAMPS 1.4c e *firmware* Marlin 2.0, a qual incorpora componentes de hardware reutilizados e peças produzidas via impressão 3D. Os resultados demonstram que o equipamento é capaz de realizar o bobinamento automatizado com repetibilidade. Além do êxito técnico, o projeto evidenciou a indissociabilidade entre ensino e pesquisa, por meio da promoção da sustentabilidade. Para tanto, foi considerada a economia circular para sugerir, aos alunos, o exercício profissional consequente. O protótipo é replicável em laboratórios de ensino técnico, oferecendo uma solução robusta para a prototipagem de geradores eólicos ou transformadores de até 1000 VA.

Palavras-chave: bobinador cnc; aprendizagem baseada em problemas; geradores eólicos; arduino; sustentabilidade.

Introdução

A transição energética global tem impulsionado a demanda por profissionais qualificados em energia eólica. No contexto brasileiro, o ensino técnico enfrenta o desafio de alinhar currículos teóricos com práticas laboratoriais contemporâneas. No Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Campus Araranguá, identificou-se uma lacuna na infraestrutura didática voltada à construção de geradores eólicos de pequena escala, especificamente no bobinamento de estatores para geradores de ímãs permanentes (PMSG).

¹ Estudante do curso do Curso Técnico Integrado em Eletromecânica do IFSC.

² Servidor Araranguá / Instalações e Acionamentos do IFSC.

O bobinamento manual, embora pedagogicamente válido em estágios iniciais, apresenta limitações severas de precisão, uniformidade e tempo de execução, fatores que frequentemente desmotivam o engajamento discente em projetos de maior complexidade. Diante dessa problemática, emerge a necessidade de desenvolver soluções que unam automação industrial ao ambiente acadêmico, conciliando rigor técnico e acessibilidade orçamentária. A proposta deste trabalho é um bobinador CNC didático que, além de automatizar a produção de bobinas, sirva como objeto de estudo interdisciplinar, integrando conhecimentos de máquinas elétricas, eletrônica, mecânica e programação.

Para viabilizar o projeto sob restrições orçamentárias, adotou-se uma abordagem de baixo custo, com utilização de materiais que seriam descartados inadequadamente — como partes de móveis e componentes eletrônicos —, alinhando-se aos princípios da economia circular e reforçando o papel institucional na promoção de tecnologias limpas. A Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) constitui o fio condutor pedagógico: ao posicionar o estudante como protagonista no desenvolvimento de uma máquina CNC funcional, estimula-se o pensamento crítico e a resolução de problemas complexos. O objetivo deste artigo é detalhar os procedimentos técnicos e metodológicos empregados, discutindo seus impactos no processo de ensino-aprendizagem e na produção de componentes para geradores eólicos de pequena escala.

Fundamentação teórica

A tecnologia CNC revolucionou a manufatura ao permitir que comandos programados controlem ferramentas com precisão micrométrica. A democratização do hardware e software de código aberto viabilizou máquinas CNC de pequeno porte para fins educacionais e de prototipagem. Segundo Barik *et al.* (2023), máquinas mini-CNC portáteis e de baixo custo facilitam o acesso de estudantes a conceitos de manufatura avançada sem investimentos vultosos.

No âmbito pedagógico, essa integração tecnológica deve ser acompanhada por metodologias ativas. A PBL apresenta-se como estratégia eficaz para o desenvolvimento de competências técnicas e socioemocionais: Scheffel e Motta (2022) destacam que ela permite aos alunos desenvolver raciocínio lógico de forma contextualizada, fundamental para a formação de técnicos capazes de inovar em mercado em constante transformação.

Do ponto de vista técnico, o bobinamento exige controle preciso da tensão do fio e da uniformidade das camadas. Blanc *et al.* (2015) discutem que o controle dinâmico da tensão em aplicações de alta velocidade envolve sistemas de malha fechada e algoritmos sofisticados, princípios essenciais para a evolução do protótipo. A sustentabilidade na construção de máquinas CNC por meio da reutilização de resíduos eletrônicos também é documentada: Cardoso Júnior *et al.* (2020) demonstram resultados satisfatórios com componentes descartados, enquanto Veeramony e Osman Zahid (2022) propõem controladores customizáveis para máquinas modulares adaptáveis a diferentes bitolas de fio. Por fim, Ilahi *et al.* (2023) ressaltam que a automação do bobinamento resulta em ganhos de produtividade e qualidade, e que a uniformidade das bobinas impacta diretamente na eficiência dos geradores eólicos.

Procedimentos metodológicos

A PBL é uma metodologia ativa centrada no estudante, na qual o ensino-aprendizagem é deflagrado por um problema real e contextualizado. Diferente dos métodos tradicionais, em que a teoria precede a aplicação, a PBL inverte essa lógica, posicionando o desafio técnico como motor para a busca autônoma de conhecimento. Conforme Scheffel e Motta (2022), "o PBL fomenta o pensamento computacional, a cultura digital e a capacidade de análise crítica, integrando teoria e prática de forma significativa e multidisciplinar". No âmbito deste projeto, a construção do bobinador CNC atuou como problema central, exigindo a integração de múltiplos saberes em uma solução tangível.

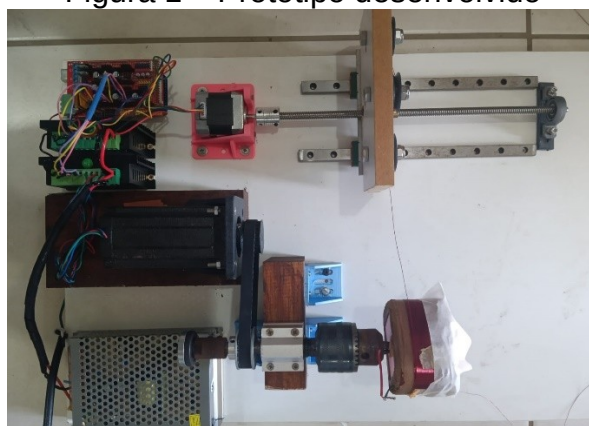
O desenvolvimento partiu da identificação de uma lacuna tecnológica e pedagógica nos laboratórios do IFSC. A questão-problema foi formalizada como: "Como construir uma plataforma CNC didática de baixo custo, replicável e modular, que facilite a aprendizagem integrada de mecânica, eletromecânica e automação na fabricação de componentes para geradores eólicos?". Essa provocação orientou as fases de pesquisa, projeto e construção, estabelecendo correlação direta com as unidades curriculares do curso e objetivando a transposição consistente da teoria para a prática.

Resultados e discussões

O sistema adotou arquitetura de dois eixos: o eixo X (transversal) distribui uniformemente o fio ao longo do carretel, enquanto o eixo rotacional (mandril) executa o bobinamento. O controle é realizado por um Arduino MEGA 2560 acoplado a uma *shield* RAMPS 1.4c. Para o acionamento dos motores NEMA 23 (rotacional) e NEMA 17 (transversal) foram utilizados *drivers* TB6600. A estrutura mecânica combina matérias reaproveitados de móveis, guias lineares, rolamentos, elementos de fixação com peças fabricadas em impressora 3D com filamento PLA convencional e compósito com fibra de carbono (CF), assegurando resistência e leveza, com aproveitamento de sobras de carretéis de filamento.

O software baseou-se no *firmware* Marlin 2.0, configurado para as cinemáticas específicas do bobinador. O código de controle (G-Code) foi gerado manualmente, traduzindo parâmetros como número de espiras, largura da bobina e bitola do fio em movimentos coordenados entre os eixos, o que confere versatilidade para diferentes projetos de geradores. O tensionamento mecânico por fricção foi adotado em detrimento de sistemas digitais com algoritmos PID, como sugerido por Gu *et al.* (2020), para preservar a simplicidade e o baixo custo do protótipo. O processo de montagem e ajuste funcionou como laboratório vivo, expondo o estudante a problemas reais de alinhamento, interferências e parametrização de *drivers*. A figura 1 ilustra protótipo desenvolvido.

Figura 1 – Protótipo desenvolvido



Fonte: Os autores (2026).

A uniformidade do bobinamento destacou-se como resultado relevante: o controle coordenado do eixo de distribuição garantiu deposição adjacente das camadas, sem

sobreposições ou lacunas, resultando em fator de preenchimento superior ao obtido manualmente e assegurando características elétricas homogêneas entre as fases do gerador. Contudo, identificou-se que a variação da tensão do fio em altas velocidades ainda é passível de aprimoramento. Conforme Zhao, Zhao e Zeng (2020), a estabilidade da tensão no enrolamento de estatores é fundamental para evitar deformações no fio esmaltado. A implementação de controle ativo, como o proposto por Huang *et al.* (2020) para transformadores, constitui evolução natural do projeto e foi incorporada como novo problema-PBL para abordagens subsequentes.

Considerações finais

O bobinador CNC didático cumpriu os objetivos propostos, consolidando-se como solução técnica viável e pedagogicamente rica para o ensino de eletromecânica orientado por energias renováveis e automação. A metodologia PBL permitiu que o estudante enfrentasse desafios reais da área técnica — da mecânica de precisão à programação embarcada —, resultando em formação mais sólida e alinhada às demandas da indústria. A utilização de hardware de código aberto e materiais reutilizados demonstrou que restrições orçamentárias podem ser catalisadoras de criatividade e responsabilidade socioambiental. O protótipo é uma plataforma de experimentação contínua, aprimorável por turmas futuras.

Como trabalhos futuros, vislumbra-se a implementação de controle de tensão em malha fechada com sensores de carga e algoritmos PID, o desenvolvimento de um Gêmeo Digital (Digital Twin), conforme Petru *et al.* (2025), e a criação de software CAM dedicado ao bobinamento, ampliando o uso do equipamento para outras ações, como, por exemplo, cursos e projetos de extensão.

Referência ao fomento recebido

O projeto foi desenvolvido no âmbito do Edital Universal 04/2024 – PROPPI. Sem fomento.

Referências

BARIK, Bikram Bihari; MAHANTY, Arindam; MAJUMDER, Soumyadeep Datta; ROY GOSWAMI, Arindam. Fabrication of Cost-effective Three-axis portable mini-CNC milling Machine. **Materials Today: Proceedings**, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.012.



BLANC, Florian Sell-Le; FLEISCHER, Jurgen; SCHMITT, Matthias; UNGER, Marcel; HAGEDORN, Jurgen. Analysis of wire tension control principles for highly dynamic applications in coil winding.

2015 5TH INTERNATIONAL ELECTRIC DRIVES PRODUCTION CONFERENCE (EDPC), 2015. DOI: 10.1109/EDPC.2015.7323202.

CARDOSO JÚNIOR, Edinaldo; OBANA, Fernando; MARINHO, Max; SPEROTTO, Lucas; SILVA, Sara. REM-CNC Router - CNC multifuncional Fresa e Laser de baixo custo construída reutilizando equipamentos de informática e lixo eletrônico. **ANAIS DA VIII ESCOLA REGIONAL DE INFORMÁTICA DE GOIÁS (ERI-GO 2020)**, 2020. DOI: 10.5753/erigo.2020.13860.

GU, Zhewei; ZENG, Sheng; ZHAO, Kaijie; SONG, Chenliang. Fully-digital tension control system with PID algorithm for winding ultra-fine enameled wires. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 892, n. 1, p. 012064, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/892/1/012064.

HUANG, Haixiang; XU, Jiazhong; SUN, Kewei; DENG, Liwei; HUANG, Cheng. Design and Analysis of Tension Control System for Transformer Insulation Layer Winding. **IEEE Access**, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2995591.

ILAH, Novita Asma; MUSYAFIQ, Afrizal Abdi; PURWIYANTO; RAHMAT, Saepul; PRIMA DEWI, Riyani; PURNATA, Hendi. Performance Process of Coil Winding Machine Based on Accuracy and Speed for Water Pump Motor. **Jurnal Nasional Teknik Elektro**, p. 13–19, 2023. DOI: 10.25077/jnte.v12n3.1101.2023.

PETRU, Claudiu-Damian; MORARIU, Fineas; BREAZ, Radu-Eugen; CRENGANIȘ, Mihai; RACZ, Sever-Gabriel; GÎRJOB, Claudia-Emilia; BÂRSAN, Alexandru; BIRIȘ, Cristina-Maria. Development of a Small CNC Machining Center for Physical Implementation and a Digital Twin. **Applied Sciences**, v. 15, n. 10, p. 5549, 2025. DOI: 10.3390/app15105549.

SCHEFFEL, Erica J. S.; MOTTA, Claudia L. R. Desenvolvimento das competências de Computação dispostas na BNCC a partir da Aprendizagem Baseada em Problemas com alunos do ensino fundamental. **ANAIS DO XXXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO (SBIE 2022)**, 2022. DOI: 10.5753/sbie.2022.224777.

VEERAMONY, Jagathesvaran; OSMAN ZAHID, Muhammed Nafis. A Customizable Controller for 3 Axis Modular CNC Machine. **Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology**, v. 6, n. 2, p. 55–62, 2022. DOI: 10.15282/jmmst.v6i2.8567.

ZHAO, Kaijie; ZHAO, Liangliang; ZENG, Sheng. Research on the Control System of Winding Tension of Strip Stator. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1637, n. 1, p. 012113, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1637/1/012113.