



DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR BLDC COM ESTRUTURA IMPRESSA EM 3D PARA APLICAÇÕES DIDÁTICAS EM ENGENHARIA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6024

Autores: LUCAS MEDEIROS CARNEIRO COSTA, APOLO DE LIMA SILVA, DEIVID LYEDSON ALCANTARA RIBEIRO, MARIA DA CONCEIÇÃO ZELO BARBOSA PATRÍCIO, JURY FERREIRA DE ARAÚJO, GABRIEL BARBOSA DO NASCIMENTO, ALVARO DE MEDEIROS MACIEL

Resumo: A demanda por abordagens práticas na educação em engenharia destaca a necessidade de tecnologias acessíveis em salas de aula. Máquinas elétricas tradicionais, devido aos seus projetos fechados, limitam o aprendizado prático e frequentemente exigem versões educacionais de alto custo. Este estudo apresenta um protótipo didático de motor Brushless DC (BLDC) com estrutura impressa em 3D para apoiar o ensino de Conversão de Energia por meio da Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL). O protótipo foi projetado, construído e testado utilizando ímãs de neodímio, enrolamentos de cobre e controle via ESC e sinais PWM. Testes experimentais mostraram velocidades de rotação de 4000 a 14000 RPM e geração de tensão com rotação manual. Os resultados confirmam o potencial do protótipo para reforçar conceitos como eletromagnetismo e controle de máquinas elétricas, promovendo a aprendizagem ativa na Engenharia Elétrica.

Palavras-chave: Motor Brushless, Impressão 3D, Educação em Engenharia

DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR BLDC COM ESTRUTURA IMPRESSA EM 3D PARA APLICAÇÕES DIDÁTICAS EM ENGENHARIA

1 INTRODUÇÃO

A compreensão dos princípios de conversão de energia é essencial para a formação de engenheiros eletricitas, uma vez que diversos dispositivos e sistemas elétricos dependem da transformação eficiente de energia elétrica em energia mecânica, ou do processo inverso. Isso inclui desde motores elétricos e geradores síncronos, a conversores de energia de ondas e sistema de armazenamento de energia por volante (Boldea, 2017; Bouhrim et al., 2024; Samineni et al., 2006). Porém, a sua aprendizagem ainda enfrenta desafios significativos nas instituições de ensino superior, especialmente quando o conteúdo é tratado de forma predominantemente teórica.

O distanciamento do funcionamento real e teórico se amplia diante a uma estrutura laboratorial insuficiente, mesmo com a presença de recursos didáticos como motores com carcaça aberta, painéis *quick-release* ou bancadas educativas. Muitas vezes, essas estruturas podem formar laboratórios “cookbook”, restringindo a capacidade de entendimento substancial na resolução de problemas práticos ao oferecer experimentos predefinidos e caminhos de aprendizagem estreitos (MALICKY; HUANG; LORD, 2006). Esse cenário se agrava na total ausência de qualquer equipamento laboratorial educativo para a área de conversão de energia, cenário comum em diferentes instituições devido ao custo elevado, que inviabiliza a manutenção de laboratórios devidamente equipados para o ensino e aprendizagem (ROCHA et al., 2013).

Contudo, há alternativas modernas que podem mitigar os impactos da infraestrutura limitada. Entre elas, podem ser citadas as metodologias ativas, como a aprendizagem baseada em Projeto (PjBL — *Project-Based Learning*), que associadas à tecnologias de prototipagem de baixo custo, como a impressão 3D, oferecem alternativa para o desenvolvimento profissional consciente (CHONG et al., 2018). Ao permitir que os estudantes idealizem e construam seus próprios dispositivos, essa abordagem aproxima o estudante da prática real da engenharia, proporcionando uma sensação de realização e abrindo espaço para o desenvolvimento de *soft-skills* (MALICKY; HUANG; LORD, 2006).

Considerando as especificidades e particularidades de cada discente em seus diversos contextos escolares, a inovação educacional com o uso de tecnologias digitais como Arduino e impressoras 3D representa uma ação pedagógica necessária na reformulação do processo de ensino-aprendizagem (Nunes et al., 2015). A impressão 3D, especificamente, tem se mostrado uma ferramenta promissora no ambiente acadêmico por possibilitar a prototipagem rápida de componentes mecânicos e estruturais, permitindo a criação de sistemas reais, como fontes de alimentação, conversores, sensores e motores, com baixo custo e alto potencial didático.

Neste contexto, propõe-se o desenvolvimento de um motor de corrente contínua sem escovas (*Brushless Direct Current* - BLDC) com estrutura produzida por impressão 3D, como alternativa prática e acessível para apoiar o ensino de disciplinas como Conversão de Energia e Máquinas Elétricas. Esses motores vêm ganhando espaço em aplicações industriais, e estima-se que, até 2030, podem se tornar umas das máquinas mais predominantes para transmissão de energia, substituindo o de indução (MOHANRAJ et al., 2022). O projeto visa fornecer aos discentes uma experiência concreta de construção,

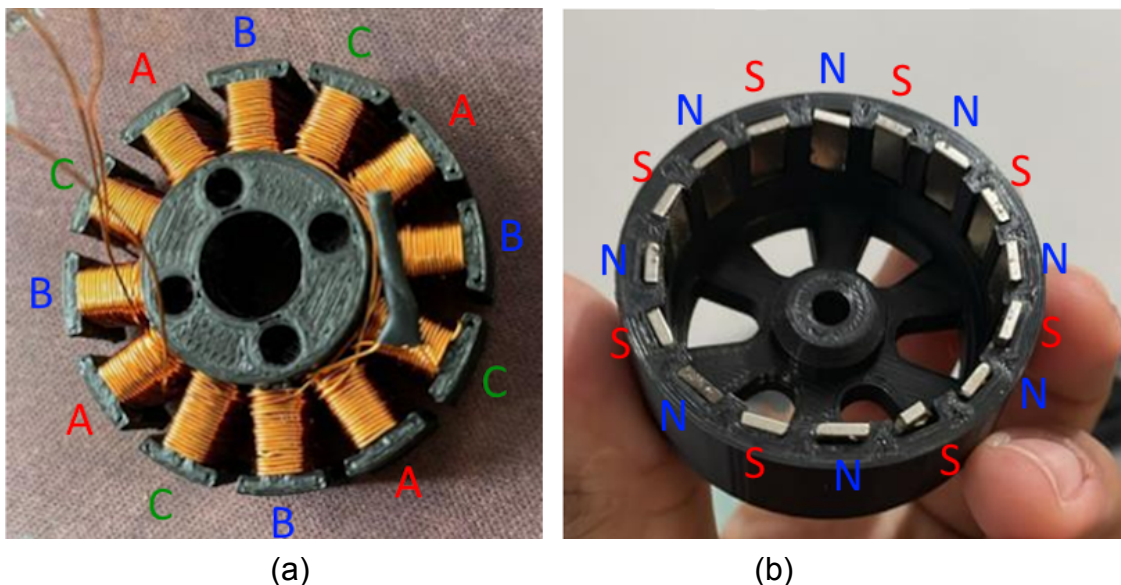
montagem e análise de um motor elétrico real, promovendo a integração entre teoria e prática, e contribuindo para a formação técnica e investigativa dos futuros engenheiros eletricitistas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Motor de Corrente Contínua sem Escovas (BLDC - *Brushless DC Motor*)

Os motores de corrente contínua sem escovas são máquinas síncronas de ímãs permanentes. No seu estator, três conjuntos de bobinas A,B e C, responsáveis por gerar um campo magnético girante, são distribuídas a 120°, conforme visto na Figura 1. No rotor, ímãs são posicionados com polarização alternada, estabelecendo um campo magnético fixo. Podem ser de rotor interno ou externo, com motores BLDC de rotor externo produzindo maior torque (MOHANRAJ, 2022). A Figura 1 mostra o esquema estrutural do motor BLDC de rotor externo do presente estudo.

Figura 1 – Esquema Estrutural do Motor. (a) Estator (enrolamentos A,B e C). (b) Rotor de motor BLDC de rotor externo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

O seu princípio de funcionamento baseia-se na interação entre os dois campos. O campo girante é gerado a partir da comutação eletrônica de um controlador que energiza as bobinas em uma sequência específica. Já o campo fixo é normalmente estabelecido a partir de ímãs de terras raras como neodímio, organizados de forma a impedir o seu alinhamento com o campo do estator. Seguindo as sequências de fase ABC ou CBA, à medida que o campo magnético rotativo no estator muda de posição, os ímãs do rotor são atraídos e repelidos, fazendo com que o rotor gire e, assim, produza movimento.

O movimento do motor é dado por uma velocidade síncrona (N_s) em rotações por minuto (RPM), definida pela equação

$$N_s = \frac{120.f}{p} \quad (1)$$

sendo f a frequência elétrica em *hertz* aplicada ao motor e p o número de pares de pólos presente no mesmo, respectivamente.

As características e vantagens dos motores BLDC são amplamente reconhecidas na literatura. Esses motores são conhecidos por sua maior eficiência em comparação com os motores DC convencionais, podendo alcançar eficácias de até 90% ou mais (VAN NIEKERK, 2015). Isso ocorre tendo em vista a sua operação sem escovas, que elimina o atrito e reduz significativamente a necessidade de manutenção, além de sua maior relação torque-massa (ABBASS; ALI, 2024).

As aplicações típicas de motores BLDC são diversas, abrangendo desde veículos elétricos e drones até sistemas de automação industrial. A sua versatilidade e eficiência têm impulsionado seu uso em setores como robótica, onde o controle preciso e a operação silenciosa são essenciais (MING CHENG et al., 2011). A combinação dessas características torna os motores BLDC uma escolha preferencial em ambientes onde desempenho e confiabilidade são críticos.

2.2 Modulação por Largura de Pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*)

Diferente de motores DC com escovas ou de indução, motores BLDC necessitam de um controle eletrônico para o seu funcionamento. Para isso, recursos como a modulação por largura de pulso (PWM) são utilizados.

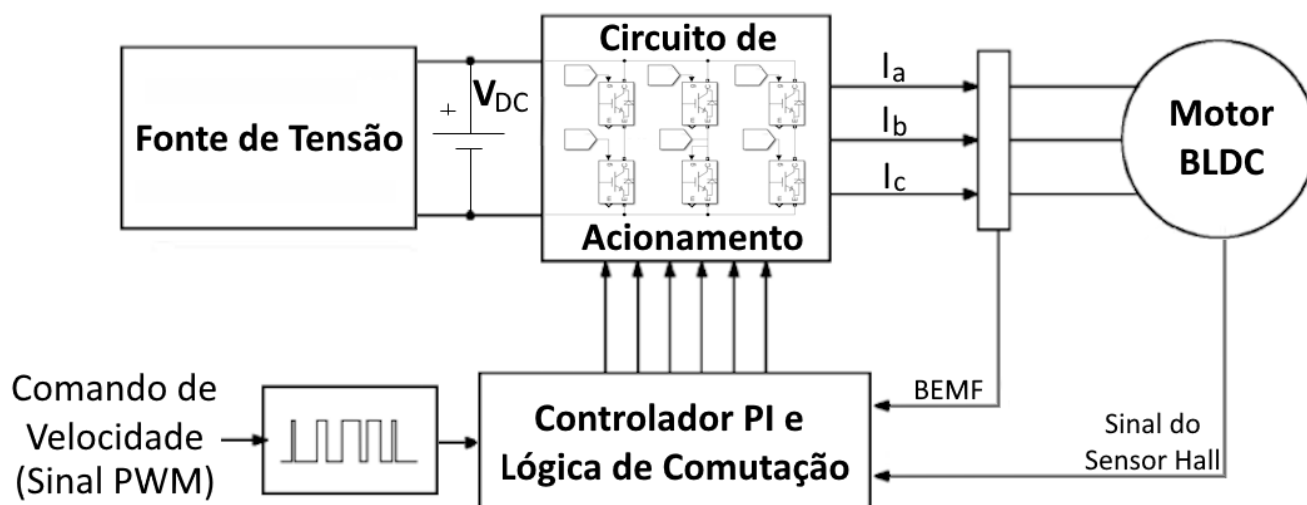
A PWM consiste na variação entre os estados lógicos '1' e '0' de um sinal elétrico retangular com ciclo de trabalho (*duty cycle*) variável. Ao variar o ciclo de trabalho do sinal PWM, é possível controlar a tensão média aplicada a uma carga. Essa variação pode ser feita por um microcontrolador ou testador de servo.

Em motores BLDC, PWM é utilizada para informar ao controlador qual velocidade estabelecer. A velocidade do motor também pode ser medida em tempo real, e a partir da diferença com o valor de velocidade esperado, é possível diminuir o erro ajustando dinamicamente o ciclo de trabalho (ARJUN et al., 2016).

2.3 Controlador Eletrônico de Velocidade (ESC - *Electronic Speed Controller*)

O ESC (Controlador Eletrônico de Velocidade) é um dispositivo usado para regular a velocidade de motores BLDC, controlando a energia fornecida e comutando as bobinas do estator. A comutação é feita por meio de um circuito de chaveamento composto de transistores de potência em uma ponte inversora (SATHYAN et al., 2009). Embora a sequência de comutação possa ser pré-definida, para se ter máximo desempenho, a posição e velocidade do rotor são medidas e fornecidas ao controlador. Essa medição pode ser feita por meio de sensores Hall, codificadores de eixo ou pelo monitoramento da força contraeletromotriz (*back electromotive force* – *back EMF* ou BEMF). (ARJUN et al., 2016; STMicroelectronics, 2007). Abaixo tem-se o esquema completo da estrutura interna de uma ESC genérica.

Figura 2 – Controlador eletrônico de velocidade em malha fechada.



Fonte: SATHYAN et al., 2009; ARJUN et al., 2016 e STMicroelectronics, 2007.

Métodos de controle em malha aberta são menos robustos a interferências, degradação de componentes e falhas. De forma a manter uma velocidade estável, sensores Hall podem ser instalados perto do rotor do motor para fechar a malha, fornecendo a posição em tempo real (HAO et al., 2021). Porém, a maior parte dos fabricantes de ESCs utilizam a comutação sem sensores para altas velocidades (TRAUTMANN, 2019). Nesses sistemas a posição e velocidade são medidas por meio do monitoramento do cruzamento de zero da BEMF, simplificando o controlador e diminuindo custos (ARJUN et al., 2016).

Uma das desvantagens de ESC sem sensor é a sua péssima performance em baixas velocidades. A baixa amplitude da BEMF torna a sua partida menos estável e confiável (HAO et al., 2021). Porém, em altas velocidades, estima-se maior amplitude da BEMF, permitindo o melhor controle da comutação do motor e proporcionando desempenho superior se comparado a sincronização com sensores. De forma a ganhar as vantagens de ambos, algumas ESCs empregam sistemas híbridos (TRAUTMANN, 2019).

As ESCs modernas também incluem recursos para proteção, como detecção de sobrecarga, sobretemperatura e limitadores de corrente, além de recursos de telemetria para o monitoramento do desempenho em tempo real.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para aproveitar o potencial do uso da impressão 3D no contexto educacional, propôs-se o desenvolvimento de um protótipo funcional de motor BLDC, com o objetivo de auxiliar no ensino dos princípios de conversão de energia. Esse tipo de abordagem prática visa proporcionar aos alunos uma compreensão mais concreta dos fenômenos físicos e dos componentes envolvidos no funcionamento de máquinas elétricas. Na Tabela 1, estão listados os materiais utilizados na construção do protótipo, incluindo componentes impressos em 3D, elementos mecânicos e eletrônicos essenciais para o seu funcionamento.

Tabela 1 - Materiais Utilizados para Construção do Protótipo.

Descrição	Quantidade
Haste metálica de 5 mm de diâmetro	1
M5 Die	1
Parafuso M3	8
Inserto de Latão M3	8
Ímãs Neodímio N32	16
Rolamento MR95ZZ	4
Bornes	5
Eixo	1
Base do Motor	1
Base do Estator	1
Estator	1
Rotor	1
Testador de Servo	1
ESC para motor BLDC com conector Xt60	1
Caixa Base	1

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 3 mostra o resultado final do desenvolvimento do motor BLDC de corrente contínua. O modelo do motor e sua montagem seguiram as etapas disponibilizadas em (THINGIVERSE.COM, 2025), adaptadas em cinco partes: eixo, base do motor, base do estator, estator e rotor. Enquanto a base e a estrutura foram desenvolvidas utilizando um *software* de modelagem 3D.

Figura 3 – Protótipo Final.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Na Figura 1 é ilustrado a montagem do estator e rotor do protótipo. O estator foi projetado com 12 bobinas, cada uma formada por 20 voltas de fio de cobre esmaltado com diâmetro de 0,32 mm (AWG 28). Essas bobinas estão dispostas de forma a criar um campo magnético rotativo quando a corrente é aplicada. O enrolamento foi feito com atenção à uniformidade das voltas, garantindo a eficiência do campo gerado. As bobinas foram agrupadas em três conjuntos de quatro, formando as três fases do motor BLDC, necessárias

para o controle trifásico. Enquanto o rotor foi construído utilizando 16 ímãs permanentes de neodímio N32, cada um com dimensões de 1 cm x 0,5 cm x 2 cm. Esses ímãs foram dispostos alternadamente com seus pólos norte e sul expostos, de forma a maximizar a interação com o campo magnético gerado pelas bobinas do estator. A configuração 16/2, ou seja, 16 ímãs e 8 pares de polos, foi escolhida para garantir um torque contínuo e suave ao longo da rotação.

Além do rotor e do estator, o motor foi estruturado com uma haste metálica de 5 mm de diâmetro, M5 Die (para rosqueamento da haste), 4 rolamentos MR95ZZ (9 mm x 5 mm x 3 mm), 4 insertos de latão M3 e 4 parafusos M3. Para o acionamento e controle do motor, foi utilizada uma fonte de tensão variável entre 6 V e 15 V. O controle das bobinas foi realizado por uma (ESC), já o acionamento das bobinas conforme o sinal de PWM, foi gerado por um testador de servo motor, com tensão de operação entre 4,8 V (*Volts*) e 6 V, oferecendo três modos de operação. O testador garantiu o controle preciso da velocidade e do comportamento do motor, variando o ciclo de trabalho do sinal PWM enviado ao ESC. A ligação das bobinas ao ESC seguiu a sequência trifásica padrão ABC, em que cada conjunto de bobinas é acionado ciclicamente para gerar o campo magnético rotativo que movimenta o rotor.

Por fim, foi utilizada uma caixa de suporte projetada com compartimentos e furos adequados para a fixação dos componentes eletrônicos e do motor. A estrutura foi confeccionada para proporcionar um suporte estável para os testes e medições do motor, ao mesmo tempo em que mantém os componentes organizados e acessíveis. Como visto na Figura 3, na parte superior da caixa há pinos de conexão para alimentação elétrica e para o gerador, facilitando a ligação de cabos e sondas. Esses pinos são utilizados para conectar o motor BLDC ao controlador e à fonte de alimentação, garantindo que o circuito receba a energia e os sinais de controle corretamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Objetivando analisar o funcionamento de um motor brushless desenvolvido com impressão 3D, foi realizada uma prática experimental que permitiu observar o comportamento rotacional e a tensão gerada durante a operação. A medição da rotação foi realizada utilizando um sensor óptico acoplado ao eixo do motor, permitindo registrar a velocidade de giro em RPM, conforme mostrado na Figura 4. Observou-se que a rotação aumenta proporcionalmente à tensão de alimentação aplicada, controlada pelo testador de servo, evidenciando a resposta do motor ao controle de tensão, o que é coerente com o princípio de funcionamento de motores DC sem escovas. Nesse cenário, foram realizados testes de rotação mínima, em que o motor, com o menor valor possível sem desligar pelo testador, obteve uma velocidade de 4000 *RPM* e, no valor máximo, atingiu até 14000 *RPM*. Nessas condições, a corrente medida foi de 0,22 A na rotação mínima e de 3 A na rotação máxima, sendo esse o limite de fornecimento da fonte de bancada utilizada nos testes. Essa característica torna possível aplicar o motor em aplicações didáticas que envolvem controle de velocidade e análise de resposta dinâmica.

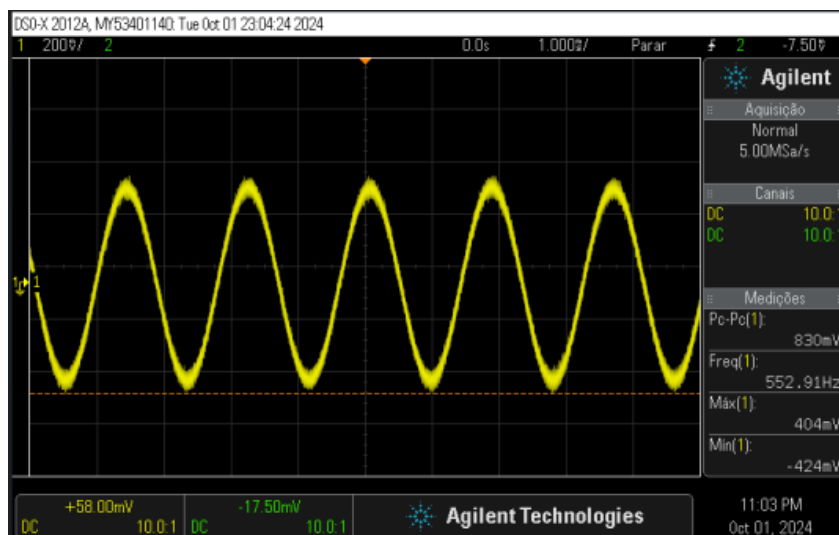
Figura 4 – Medição das Rotações por Minuto (RPM) do Motor.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Na Figura 5 é apresentada a tensão gerada pelo motor *brushless* operando como gerador. O experimento foi conduzido fazendo o rotor girar manualmente e medindo a tensão nos terminais das bobinas. A tensão induzida segue os princípios das Leis de Faraday e Lenz, convertendo a energia mecânica de sua rotação em energia elétrica, sendo possível observar a variação da tensão e frequência em função da velocidade de rotação.

Figura 5 - Exibição da Tensão Gerada do Motor.



Fonte: Elaboração própria (2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada a criação de um motor BLDC com o uso de impressora 3D, abordando de forma prática conceitos fundamentais de conversão de energia. Através do motor construído e dos experimentos realizados, observa-se uma

contribuição significativa para o ensino-aprendizagem de máquinas elétricas, permitindo a visualização direta da Lei de Faraday e da Lei de Lenz, por meio da tensão induzida e do funcionamento do motor. Essa abordagem prática pode despertar maior interesse dos alunos e facilitar o entendimento de temas como eletromagnetismo, acionamentos e princípios de funcionamento de motores, sendo especialmente útil em disciplinas como Máquinas Elétricas, Conversão de Energia e Eletromagnetismo.

Como continuação do trabalho, pretende-se aplicar os experimentos em ambiente de sala de aula, reforçando a compreensão teórica com práticas acessíveis e eficientes, promovendo uma aprendizagem mais efetiva e envolvente.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, do Campus João Pessoa, e ao PETEE-IFPB (Programa de Educação Tutorial de Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba), pelo apoio técnico e financeiro.

REFERÊNCIAS

ABBASS, Kareem A.; ALI, Amer M. **A Hybrid Analysis of Brushless DC Motor**. Journal of Engineering and Sustainable Development, Baghdad, Iraq, v. 28, n. 4, p. 499–506, 2024.

ARJUN, V. N. et al. **Speed control of a BLDC motor using PWM control technique**. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering (IJIREICE), v. 4, n. 6, p. –, jun. 2016.

BOLDEA, I. **Electric generators and motors: An overview**. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, v. 1, n. 1, p. 3–14, 2017.

BOUHRIM, H. et al. **Ocean Wave Energy Conversion: A Review**. Journal of Marine Science and Engineering, v. 12, n. 11, 2024.

CHENG, Ming et al. **Overview of Stator-Permanent Magnet Brushless Machines**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 58, n. 11, p. 1–15, nov. 2011.

CHONG, Siewhui; PAN, Guan-Ting; CHIN, Jitkai; SHOW, Pau Loke; YANG, Thomas Chung Kuang; HUANG, Chao-Ming. **Integration of 3D printing and Industry 4.0 into engineering teaching**. Sustainability, v. 10, n. 11, p. 3960, 2018.

HAO, J.; GUO, H.; LI, Y.; KONG, W.; QU, R. **A Closed-Loop Starting Method of Sensorless Brushless DC Motor**. In: IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), p. 1–5, 2021.

MALICKY, David; HUANG, Ming Z.; LORD, Susan M. **Problem, project, inquiry, or subject-based pedagogies: what to do?** In: Proceedings of the American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, 2006.

MOHANRAJ, D. et al. **A review of BLDC motor: state of art, advanced control techniques, and applications**. IEEE Access, v. 10, p. 54833–54869, 2022.

NUNES, João; CHAVES, João. **Tecnologias digitais na educação superior: a analítica da aprendizagem e a didática**. 2015.

ROCHA, D. C. et al. **Desenvolvimento de uma plataforma auxiliar para ensino de máquinas elétricas empregando realidade virtual**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO (SBIE). [S.I.]: Comissão Especial de Informática na Educação, 2013.

SAMINENI, S. et al. **Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for Voltage sag correction**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 42, n. 1, p. 42–52, 2006.

SATHYAN, A. et al. **An FPGA-Based Novel Digital PWM Control Scheme for BLDC Motor Drives**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 8, p. 3040–3049, ago. 2009.

STMicroelectronics. **Sensorless BLDC motor control and BEMF sampling methods with ST7MC** (Application Note AN1946). 2007.

THINGIVERSE.COM. **Brushless DC Motor | DIY BLDC Motor** by Vally544. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:6619676>. Acesso em: 18 abr. 2025.

TRAUTMANN, R. **Sensorless vs Sensorless Brushless Motor Applications**. Disponível em: <https://www.radiocontrolinfo.com/sensored-vs-sensorless-brushless-motor-applications>. Acesso em: 18 abr. 2025.

VAN NIEKERK, Daniel et al. **Brushless direct current motor efficiency characterization**. ACEMP-OPTIM-ELECTROMOTION, Anais [...], [S.I.], p. 226–231, 2015.

DEVELOPMENT OF A BLDC MOTOR WITH 3D-PRINTED STRUCTURE FOR DIDACTIC APPLICATIONS IN ENGINEERING

Abstract: *The demand for practical approaches in engineering education highlights the need for accessible technologies in classrooms. Traditional electrical machines, due to their closed designs, limit hands-on learning and often require costly educational versions. This study presents a didactic prototype of a Brushless DC (BLDC) motor with a 3D-printed structure to support Energy Conversion teaching through Project-Based Learning (PjBL). The prototype was designed, built, and tested using neodymium magnets, copper windings, and control via ESC and PWM signals. Experimental tests showed rotational speeds from 4000 to 14000 RPM and voltage generation with manual rotation. Results confirm the prototype's potential to reinforce concepts like electromagnetism and electric machine control, fostering active learning in Electrical Engineering.*

Keywords: *Motor Brushless, 3D Printing, Engineering Education.*

