EVOLUÇÃO CONSTRUTIVA E OTIMIZAÇÃO DE DESEMPENHO DE CONJUNTO ATUADOR PARA ROBÔS MÓVEIS

Matheus Henrique Finkler, Aureo Guilherme Dobrikopf, Douglas Wildgrube Bertol

INTRODUÇÃO

O avanço da robótica mundial depende fortemente do desenvolvimento de conjuntos atuadores eficientes e de baixo custo. No entanto, a produção brasileira nessa área ainda é limitada, o que gera uma forte dependência de peças importadas. Atualmente, esse mercado é dominado pela China, que possui grande capacidade de produção em escala e custos reduzidos, consolidando-se como a principal fornecedora de motores e atuadores de precisão (MCKINSEY & COMPANY, 2026).

Esse domínio torna o processo de compra mais caro e demorado para o Brasil, especialmente na importação de pequenas quantidades destinadas a pesquisas e à criação de protótipos. Diante desse cenário, é fundamental incentivar projetos que busquem desenvolver essas tecnologias no cenário nacional.

Com esse objetivo, a presente proposta visa o desenvolvimento de um motor *brushless* DC (BLDC) para atuadores robóticos, a ser conduzido nas instalações do Laboratório MOBILAB. A iniciativa busca facilitar o acesso a essas peças, apoiar o andamento de novas pesquisas e garantir uma reposição mais ágil para os sistemas robóticos já operantes no laboratório.

DESENVOLVIMENTO

A análise do protótipo anterior identificou desalinhamento concêntrico entre rotor e estator, o que gerava variações no entreferro (*airgap*) e travamentos mecânicos. Para solucionar essa instabilidade, a arquitetura foi reprojetada em software CAD com a implementação de um sistema de mancais composto por três rolamentos, conforme ilustrado na vista explodida da Figura 1. A modificação conferiu rigidez estrutural ao conjunto, assegurando a constância do entreferro e a estabilidade de rotação.

O estator e o rotor de 18 polos magnéticos foram fabricados via impressão 3D em PETG, polímero selecionado pela adesão entre camadas e rigidez mecânica superior ao PLA da versão anterior, suportando os esforços de cisalhamento dos ímãs de neodímio. O enrolamento foi executado manualmente na topologia Estrela (Y), adotando 30 espiras por ranhura com fio de cobre AWG 27. As resistências terminais medidas de 6.5 Ω (fase-neutro) e 13.2 Ω (fase-fase) confirmaram a precisão do processo de fabricação das bobinas e a ausência de curtos-circuitos internos.

A fase experimental realizou-se em bancada de ensaios a vazio, utilizando uma furadeira acoplada ao eixo para impor rotação mecânica contínua, enquanto um tacômetro digital e um osciloscópio registraram a cinemática e a força contra eletromotriz (Back-EMF). Devido às limitações térmicas do estator em PETG, o escopo dos testes práticos foi estritamente restrito à determinação da constante de velocidade (Kv) e de tensão correspondente, postergando o levantamento da curva de torque e ensaios sob carga para iterações com materiais de maior resistência térmica.

RESULTADOS

A avaliação validou a integridade do conjunto impresso, com ensaios de bancada estritamente restritos à medição da constante de velocidade (Kv). A rotação imposta de 1587 RPM (26.45 Hz) gerou uma frequência elétrica senoidal de 233.84 Hz, confirmando empiricamente a construção magnética do rotor com 9 pares de polos. O perfil limpo da onda capturada no osciloscópio, apresentada na Figura 2, comprovou a eficácia do sistema de três rolamentos em manter o entreferro rígido e constante.

A tensão de pico (Vp) medida entre fases foi de 32.00 V, o que determinou a constante de velocidade do atuador:

$$k_v = \frac{1587\ \text{RPM}}{32.00\ \text{V}} \cong 49.6\ \text{RPM/V}.$$

Por conversão direta, obteve-se a constante de força contra eletromotriz de aproximadamente 0.192 V/(rad/s). A partir desta métrica, a constante de torque (Kt) foi estimada teoricamente em 0.192 Nm/A. Considerando as limitações de dissipação de calor do fio AWG 27 e da estrutura em polímero, assumindo uma corrente nominal de segurança de 1.0 A, o torque contínuo máximo do atuador foi estimado em 0.19 Nm. Esses parâmetros atestam o sucesso construtivo do hardware e cumprem a caracterização eletromecânica delimitada para esta fase do projeto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do atuador validou a impressão 3D para a prototipagem de motores elétricos no MOBILAB. A inclusão do sistema de três rolamentos solucionou o desalinhamento mecânico da versão anterior, garantindo um entreferro rígido e a geração de uma onda senoidal perfeitamente simétrica.

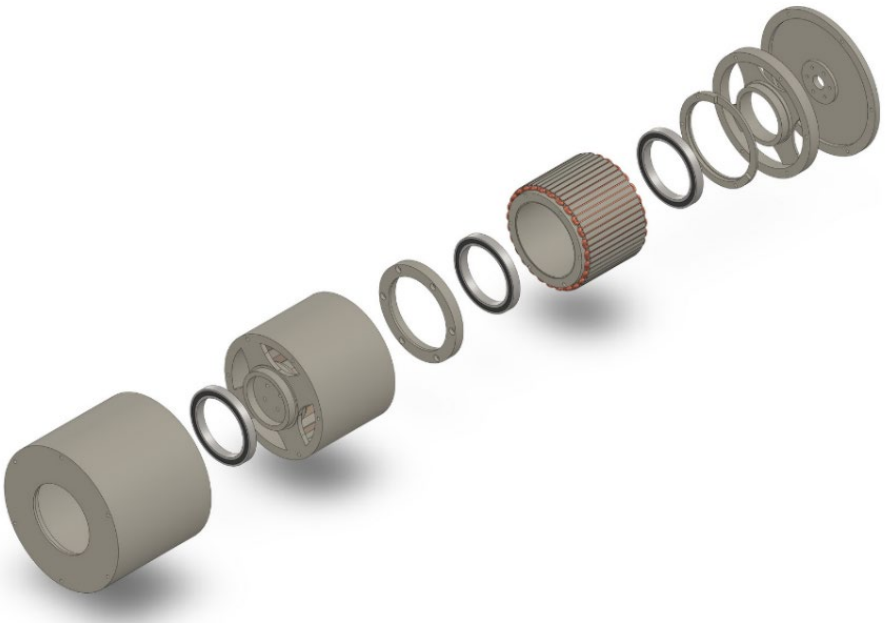
O protótipo apresentou parâmetros eletromagnéticos satisfatórios, destacando-se a constante Kv de 49.6 RPM/V. No entanto, a alta resistência elétrica de 6.5 Ω nas bobinas gera um acentuado aquecimento por efeito Joule. Devido ao baixo limite térmico do PETG, os testes experimentais desta etapa precisaram ser estritamente restritos à medição a vazio, evitando a deformação do estator.

Como desdobramentos futuros imediatos, o conjunto será refeito utilizando poliamida com fibra de carbono (PPA-CF), material que suportará testes reais de torque e condição de estol com o rotor bloqueado. Por fim, a pesquisa avançará para a usinagem de um núcleo de aço silício utilizando uma fresadora CNC Carvera, eliminando o gargalo térmico e habilitando o motor para aplicações robóticas que exigem alta densidade de torque.

Palavras-chave: motor *brushless*; impressão 3D; atuador *coreless*; caracterização eletromecânica.

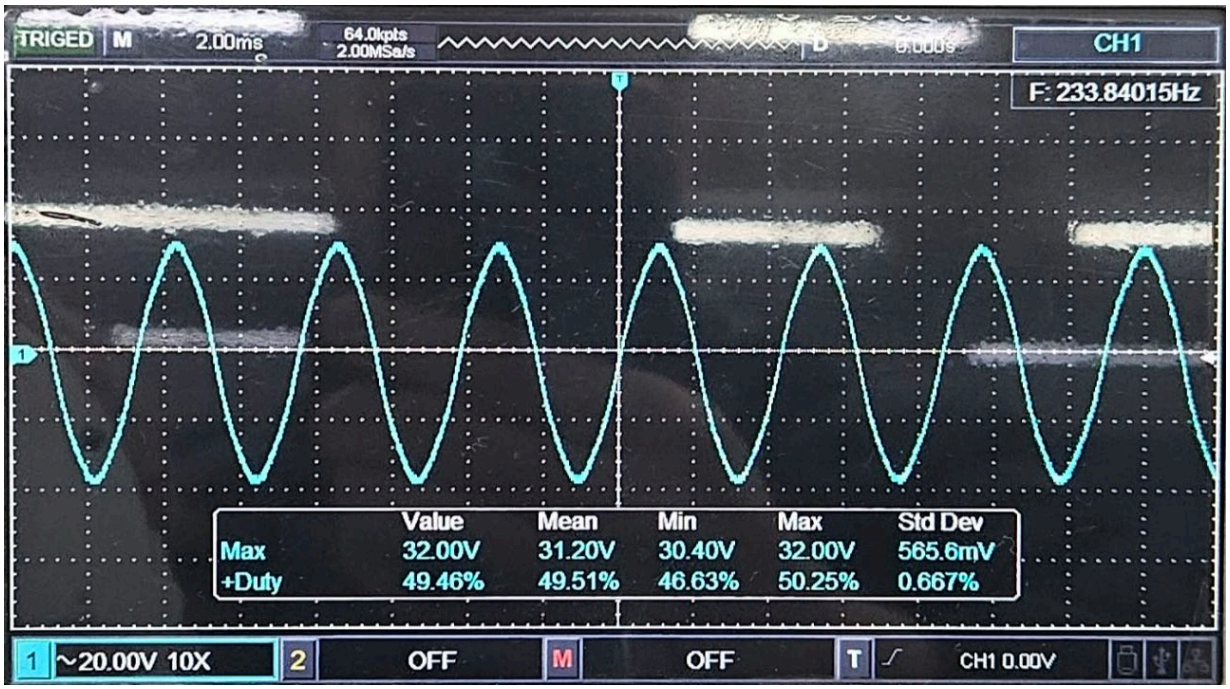
ANEXOS

Figura 1. *Vista explodida do modelo CAD do motor.*



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 2. *Captura do osciloscópio exibindo a forma de onda da força contra eletromotriz a vazio.*



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MCKINSEY & COMPANY. **Turning humanoid supply chain constraints into billion-dollar wins**. Nova York: McKinsey & Company, abr. 2026. Disponível em relatórios da indústria. Acesso em: 2 set. 2026.

HANSELMAN, Duane C. **Brushless Permanent Magnet Motor Design**. 2. ed. Lebanon, OH: Magna Physics Publishing, 2003.