

Trabalho de Física III

Resumo

Neste trabalho, abordarei os princípios fundamentais do funcionamento do motor BLDC (Brushless DC Motor, ou Motor de Corrente Contínua sem Escova). Diferentemente dos motores DC tradicionais, o BLDC utiliza um sistema eletrônico para a comutação da corrente, em vez de comutadores mecânicos, resultando em maior eficiência e promovendo a vida útil do equipamento.

1 Introdução

Os motores BLDC (Brushless DC) são amplamente utilizados em sistemas que exigem alta rotação e baixo desgaste mecânico, como na fabricação de drones e furadeiras, atuando na conversão de energia elétrica em energia mecânica. Para compreender os conceitos físicos que regem seu funcionamento, é importante, inicialmente, analisar sua versão mais simples: o motor DC (motor de corrente contínua). A principal diferença entre eles está no método de comutação da corrente, tema que será detalhado ao longo deste trabalho.

2 Componentes Motor CC

Ao observar um motor DC, a primeira parte visível é a sua **carcaça**, responsável por fornecer suporte estrutural ao conjunto. No centro, encontra-se o **eixo**, uma barra concêntrica ao motor que se estende em um dos lados e realiza transferência da energia mecânica. Já na outra extremidade localizam-se os dois **terminais** destinados à alimentação elétrica.

Removendo a carcaça, é possível identificar dois ímãs que compõem o **estator**, a parte que fica parada, ímãs permanentes que definem os polos norte e sul magnéticos. Centralizado ao conjunto podemos ver novamente o eixo que está acoplado ao **rotor**, a parte do motor que efetivamente gira, formado por vários discos eletricamente isolados entre si, geralmente em formato de "T". Nos braços do rotor, estão enroladas as **bobinas**, responsáveis por conduzir a corrente elétrica proveniente da bateria. À medida que a corrente percorre as bobinas é possível controlar a velocidade e rotação do motor.

As extremidades das bobinas são conectadas ao **comutador**, um anel segmentado composto por placas dispostas concentricamente ao redor do eixo, essas placas são eletricamente isoladas entre si e do próprio eixo. Ao observar o lado interno da tampa que sustenta os terminais, encontram-se as **escovas** e seus respectivos **braços**. O comutador é posicionado entre as duas escovas, que fazem contato com seus segmentos para completar o circuito elétrico. O fluxo do circuito ocorre da seguinte forma:

Terminal (Positivo ou Negativo) → Braço da Escova → Escova → Comutador → Bobina
Bobina → Comutador → Outra Escova → Outro Braço da Escova → Terminal Oposto

3 Princípios físicos por trás do motor CC

Ao analisarmos um circuito simples e conectarmos os terminais em uma bateria, uma corrente de elétrons fluirá pelo fio do terminal negativo para o positivo, mesmo se criarmos um caminho temporário, eles o seguirão enquanto estiver disponível. Em uma situação qualquer os elétrons passaram pelo fio gerando um campo eletromagnético ao redor do fio, que pode ser descrito como:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (1)$$

Contudo este campo ainda é muito fraco para nossa aplicação nos motores DC e BLDC, por isso os fios são enrolados em formato de bobina através do rotor. Cada fio cria um campo eletromagnético e juntos combinam suas linhas de campo paralelas em um campo magnético muito maior gerando assim um solenoide, ou seja, uma bobina muito longa com campo magnético em seu interior tendendo à uniformidade. Então podemos criar um campo magnético que age como um ímã permanente, exceto que com esse tipo conseguimos desligar e ligar o campo agora sendo descrito por:

$$B = \frac{n \cdot \mu_0 \cdot I}{L} \quad (2)$$

Para melhor compreensão do fenômeno da rotação vamos considerar um motor simplificado em que os ímãs norte e sul concentram um campo magnético através do centro. No centro, encontramos o eixo. Fixado ao eixo, temos o rotor. Enroladas ao redor do rotor, temos a bobina. Conectando a bobina, temos o comutador. Fornecendo energia ao comutador, temos as escovas e os braços das escovas. Em seguida, temos a fonte de alimentação.

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \rightarrow \vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (3)$$

De modo a entender como as forças atuaram precisamos separar as bobinas desse nosso motor simplificado em duas metades, (IMAGEM EM ANEXO). Na metade esquerda, a corrente convencional flui para longe de nós, resultando em uma força para baixo segundo a Lei de Lorentz [equação 3]. Na metade direita, a corrente flui em nossa direção, gerando uma força para cima. Dessa forma, as forças em sentidos opostos criam um torque que faz a bobina girar.

Entretanto, existe um desafio: à medida que a bobina gira, ela pode se alinhar com o campo magnético dos ímãs do estator, o que faz com que as forças se cancelem e a rotação pare. Para evitar esse travamento, o motor utiliza o comutador, cuja principal função é inverter automaticamente o sentido da corrente elétrica nas bobinas sempre que a bobina passar pela posição de alinhamento com o campo magnético. Essa inversão garante que a força resultante continue favorecendo a rotação, impedindo o travamento do motor.

Assim, o comutador assegura que o fluxo de corrente seja alterado no momento exato para manter a geração de torque na direção desejada, além de que quanto mais conjuntos de bobinas tivermos, mais suave será a rotação. Portanto, normalmente encontramos pelo menos 3 conjuntos de bobinas em um motor para garantir a rotação suave. Cada bobina está conectada a duas placas comutadoras, placas eletricamente isoladas entre si, exceto pelo fato de

serem conectadas através das bobinas. Assim, as escovas se esfregam contra as placas do comutador podendo ligar as bobinas duas a duas nos terminais. Dessa forma criamos um motor simples.

Vale a pena observar que as seções do estator são formadas por chapas finas isoladas eletricamente umas das outras, com o objetivo de reduzir as Correntes de Foucault, também conhecidas como correntes parasitas, que são as correntes elétricas induzidas dentro de um material condutor, quando sujeito a um campo magnético variável. Conforme a Lei de Lenz, a magnitude e sentido dessa corrente se opõe à variação do campo que a provoca, formando polos magnéticos que geram forças que efetivamente se opõem ao movimento do material condutor dentro do campo magnético, realizando a frenagem do motor. A equação de Maxwell-Faraday é uma generalização da lei de Faraday.

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \tilde{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad (4)$$

4 Motor BLDC

Quando comparamos Motor BLDC com o Motor DC podemos notar que ambos têm ímãs na parte interna da carcaça e bobinas de cobre no centro. Contudo, enquanto os motores DC têm as escovas que se esfregam ao comutador utilizando blocos de carbono, os motores BLDC não as possuem, isso se deve ao design que permite as bobinas permanecerem estacionárias e a carcaça rotacionar, como não há escovas, quase não há atrito. Este motor utiliza três fios, cada fio representa uma fase e as fases duas a duas ligam os 3 conjuntos de bobinas no interior do motor como na (IMAGEM EM ANEXO), por sua vez as bobinas são ligadas ao controlador eletrônico de velocidade, que tem como única função substituir o comutador, para alternar a corrente, de acordo com os sinais que recebe do controlador externo.

Assim como era no motor DC, quando um conjunto de bobina é energizado cria os campos eletromagnéticos que interagem com os ímãs permanentes no rotor que causa a rotação. O controlador irá receber um sinal eletrônico indicando a ordem em que cada bobina será energizada além do sentido da corrente e sua magnitude, provocando um campo eletromagnético rotativo de seis fases. Para que o controlador possa interpretar o sentido de rotação do motor, ele utiliza da corrente induzida pelos ímãs laterais nas bobinas não energizadas que é enviada de volta para o controlador, essa corrente é conhecida como CEM de volta. Ele utiliza desse padrão para determinar a orientação do rotor.

5 Recíproca Verdadeira

Até então eu estava analisando a corrente elétrica alternada gerando um campo eletromagnético, fica como ideia para um próximo trabalho fazer a análise inversa, ou seja, "Qual a rotação mínima do eixo para que seja possível transformar a energia mecânica para energia elétrica.

⁰Os Modelos de Inteligência Artificial só foram utilizados para verificação ortográfica e eventuais dúvidas relativas ao LaTeX

¹As ditas "IA's" não foram utilizadas para validação dos fenômenos físicos descritos no documento

Referências

- Evans, P. (2023a). Como funciona um motor eléctrico: Motor cc explicado [vídeo]. <https://www.youtube.com/watch?v=xOMIXjivDDk>. YouTube, publicado em 24 jul. 2023. Acesso em: 06 jul. 2025.
- Evans, P. (2023b). Motor sem escovas: como funcionam bldc esc pwm [vídeo]. https://www.youtube.com/watch?v=6pSi5Vb_SPU. YouTube, publicado em 16 abr. 2023. Acesso em: 06 jul. 2025.
- Helerbrock, R. (2025). A indução eletromagnética. <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/a-inducao-eletromagnetica.htm>. Acesso em: 08 jul. 2025.
- Kurniawan, D. (2024). Pepadun journal template. <https://pt.overleaf.com/latex/templates/pepadun-journal-template/snyrwnkqcpyh>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- Miguel Bertelli (2025). Campo magnético: o que é, fórmulas e exercícios. <https://querobolsa.com.br/enem/fisica/campo-magnetico>. Acesso em: 08 jul. 2025.

Appendices

A Uso de IA Claude 4.0 Soneto

Toda interação com o modelo está registrado no histórico de conversa. Devido ao documento está muito longo optei por deixar essas interações no site oficial do modelo e disponibilizar o acesso através do link:

<https://www.perplexity.ai/search/lt-apendicies-secoes-XNQBHvyTcC.XS0I7rG3tQ>

B Motor BLDC

C Motor DC