



INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CAMPUS NATAL – CENTRAL / DIRETORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 10

PRODUTO EDUCACIONAL

ABORDAGEM INICIAL AO ELETROMAGNETISMO: CONCEITOS
FUNDAMENTAIS COM MOTOR BRUSHLESS

João Paulo de Lima Silva
Tibério Magno de Lima Alves

Natal/RN
2026

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: APRENDIZAGEM POR DESCOBERTA NO ENSINO DE ELETROMAGNETISMO: UMA PROPOSTA INVESTIGATIVA NO ENSINO MÉDIO COM MOTOR BRUSHLESS COMO CONTEXTO, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 10 – IFRN Natal-RN, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Sumário

1	APRESENTAÇÃO	6
2	PRODUTO EDUCACIONAL	8
2.1	Sequência Didática	9
2.1.1	Primeiro encontro	11
2.1.2	Segundo encontro	11
2.1.3	Terceiro encontro	16
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
	REFERÊNCIAS	20
	APÊNDICE A – PRINCÍPIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E CARACTERÍSTICAS DO FUNCIONAMENTO DO MOTOR <i>BRUSHLESS</i>	22
A.1	Estator	23
A.2	Rotor	23
A.3	Princípios básicos de funcionamento	24
	APÊNDICE B – TUTORIAL DE CONSTRUÇÃO DE MO- TOR <i>BRUSHLESS</i> COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO	25
B.1	Lista de materiais e ferramentas	25
B.2	Procedimento de Construção	26
B.2.1	Bobinamento	26
B.2.2	Rotor e fixação dos ímãs	26
B.2.3	Montagem mecânica	26
B.2.4	Conexão eletrônica e testes	27
B.3	Vídeos do <i>Youtube</i>	27
	APÊNDICE C – MODELO UTILIZADO DE MOTOR <i>BRUSH-</i> <i>LESS</i> : A2212 2200KV	28
	APÊNDICE D – SLIDES E FIGURAS UTILIZADAS DU- RANTE OS ENCONTROS	30
D.1	Primeiro encontro	30
D.2	Segundo encontro	31

D.3	Terceiro encontro	31
	APÊNDICE E – ATIVIDADE 1	32
	APÊNDICE F – ATIVIDADE 2	33
	APÊNDICE G – ATIVIDADE FINAL	34

1 Apresentação

O referido produto está alinhado com as competências e habilidades que os estudantes devem desenvolver segundo a Base Nacional Comum Curricular (BNCC). De modo específico, destaca-se a habilidade relacionada à competência 1 (EM13CNT107) no âmbito de Ciências da Natureza e suas Tecnologias no Ensino Médio, que afirma:

Realizar previsões qualitativas e quantitativas sobre o funcionamento de geradores, motores elétricos e seus componentes, bobinas, transformadores, pilhas, baterias e dispositivos eletrônicos, com base na análise dos processos de transformação e condução de energia envolvidos com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais, para propor ações que visem a sustentabilidade. (BRASIL, 2018, pg.555).

Além desse ponto, existe também a consonância com o eixo integrador de Ciências da Natureza e suas Tecnologias denominado *investigação e divulgação científica e tecnológica (RNCNFIS028)*, presente no Referencial Curricular do Ensino Médio Potiguar. Nele, o aluno deve compreender quais condições levam ao estabelecimento da corrente elétrica em um sistema físico, identificando grandezas relevantes para sua caracterização (BRASIL, 2021). Nesse sentido, propõe-se uma prática voltada para a aprendizagem de conteúdos, internalização de conceitos de forma eficiente, e não para a cultura de ensino voltada à testagem, na qual os alunos são treinados para dar respostas corretas em provas escritas (MOREIRA, 2021).

O motor *brushless*, ou motor BLDC (*brushless direct current*), é um motor de corrente contínua que não utiliza escovas em sua composição, diferentemente dos motores convencionais, nos quais esse componente está presente. Em motores com escovas, as bobinas localizam-se no rotor (parte girante), de modo que é necessário um contato mecânico deslizante — as escovas — para conduzir a corrente elétrica da fonte externa até as bobinas em rotação. No motor *brushless*, essa necessidade é eliminada: as bobinas estão fixas no estator, recebendo corrente diretamente do circuito externo, enquanto os ímãs permanentes estão dispostos no rotor. A comutação, isto é, a alternância sequencial de energização das bobinas, é realizada eletronicamente pelo controlador (ESC), sem desgaste mecânico, garantindo maior durabilidade, eficiência e confiabilidade ao equipamento. Cada vez mais presente em equipamentos elétricos, a tecnologia *brushless* apresenta um enorme potencial de crescimento e já atingiu velocidades altíssimas em aeromodelos com propulsão a hélice.

Este produto educacional tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma atividade investigativa a partir de uma sequência didática que permita o estudo dos mecanismos e princípios que regem o funcionamento de um motor *brushless*. A partir disso, os

estudantes terão contato com um motor *brushless*¹ em funcionamento, serão instigados a elaborar uma explicação para o seu funcionamento, munidos de conhecimentos sobre fenômenos físicos, e compreender, ao final, os princípios básicos que regem esse tipo de motor. O público-alvo será uma turma da terceira série do Ensino Médio do Curso Técnico Integrado em Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *Campus* Guarabira.

Dessa forma, ao utilizar um motor *brushless* por meio de uma prática guiada para a investigação do seu funcionamento, permitiu-se ao estudante contato direto e prático com os aspectos básicos da teoria eletromagnética, como a corrente elétrica em condutores, o campo magnético e a conservação da energia — conceitos fundamentais para a sociedade contemporânea em diversos contextos. Além disso, o trabalho fornecerá ao professor de Física uma poderosa ferramenta didático-pedagógica para enfrentar o desafio da aprendizagem de conceitos abstratos por parte dos estudantes.

¹ O modelo utilizado na prática será o A2212-2200KV. Mais detalhes no Apêndice C.

2 Produto Educacional

Alicerçado na teoria de aprendizagem de Jerome Bruner¹, validado pela concepção freiriana de superação da dicotomia existente entre teoria e prática no ensino, e sustentado pela epistemologia realista de Mario Bunge — que defende a existência objetiva e material dos fenômenos físicos como pressuposto para a investigação científica —, este produto consiste em uma sequência didática estruturada em torno da análise experimental e investigativa de um motor *brushless*. O principal objetivo é auxiliar professores por meio de uma metodologia investigativa voltada para o ensino de conceitos iniciais de eletromagnetismo, especificamente corrente elétrica, campo magnético e conservação de energia.

Nesta abordagem, a utilização de um motor *brushless* atua como um suporte cognitivo, permitindo que a manipulação e observação direta do dispositivo em funcionamento contribuam para a visualização concreta de fenômenos abstratos, facilitando a conexão imediata entre o objeto físico e os conceitos teóricos. A sequência foi planejada para desenvolver habilidades fundamentais, tais como o pensamento crítico, a formulação de hipóteses sobre o funcionamento de máquinas elétricas e a capacidade de interpretação de fenômenos físicos reais.

Alguns momentos da sequência fazem uso de recursos digitais disponíveis na internet, como simulações do PhET, vídeos demonstrativos e animações de comutação do motor. Recomenda-se que o professor, previamente à aplicação, realize o download desses materiais para uso offline, garantindo a autonomia do produto em contextos com conectividade limitada ou inexistente. A simulação do PhET pode ser baixada gratuitamente no próprio site do projeto (<https://phet.colorado.edu>), que oferece versão offline para todas as suas simulações. Para os vídeos, sugere-se o uso de ferramentas de download previamente à aula. As animações de comutação podem, alternativamente, ser substituídas por uma sequência de figuras estáticas impressas que representem as etapas da comutação trifásica, reproduzindo a mesma informação visual.

Espera-se que, após os encontros, os estudantes compreendam o princípio de funcionamento do motor e consigam explicar a interação entre correntes e campos magnéticos que gera o movimento, superando concepções de senso comum. A proposta será aplicada a uma turma da terceira série do Ensino Médio e será composta por três encontros de 1h30min (uma hora e trinta minutos) cada, realizados no laboratório de Física e em sala de aula.

¹ Jerome Seymour Bruner (1915-2016) - Psicólogo estadunidense.

2.1 Sequência Didática

A teoria de aprendizagem de Bruner fornece ao professor uma ferramenta capaz de auxiliar o estudante durante seu processo de descoberta do conhecimento, com o foco em seu protagonismo. Por meio de uma estratégia eficiente, o estudante desenvolve modelos explicativos para os fenômenos observados e, assim, constrói um conhecimento sólido.

Nesse contexto, a escolha do motor *brushless* como objeto de estudo não é aleatória; ela visa contextualizar os conceitos de eletromagnetismo de forma prática e atual, aproximando a Física do cotidiano dos estudantes. A relevância deste tema reside na presença disseminada desses dispositivos em tecnologias contemporâneas, desde *coolers* de computadores e drones até veículos elétricos. Compreender o funcionamento dessa máquina é, portanto, uma forma de fomentar o pensamento crítico e investigativo sobre o mundo tecnológico que cerca o estudante.

Para garantir o alinhamento com as diretrizes educacionais vigentes, esta sequência didática foi planejada para mobilizar competências e habilidades específicas da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, com destaque para:

- Competência Específica 1: Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia.
- Competência Específica 3: Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações.
 - Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica.

Além da citada na apresentação deste produto educacional.

Sabe-se que Física é uma ciência experimental e, como tal, seu aprendizado em nível básico requer contato com a realidade material. Essa realidade é considerada por Mário Bunge como objetiva e cognoscível à mente humana.

A avaliação será realizada de forma contínua, processual e formativa, privilegiando a análise da evolução conceitual dos estudantes ao longo da sequência didática. Serão aplicadas três atividades de escrita ao longo dos encontros. Essas produções têm o objetivo de registrar a construção gradual do modelo mental do estudante. Espera-se que, na primeira atividade, as explicações sejam baseadas no senso comum e, progressivamente, incorporem o vocabulário científico e as leis do eletromagnetismo (corrente, campo e

torque) até a explicação final do funcionamento do motor *brushless*. Também será avaliado o engajamento dos estudantes durante as situações de debate, observando-se a capacidade de formular hipóteses, a argumentação baseada em evidências observadas no experimento e a clareza na comunicação das ideias durante a mediação professor-aluno.

As principais características da sequência didática são:

- **Objetivo**

- Desenvolver uma atividade investigativa que permita o estudo dos mecanismos e princípios que regem o funcionamento de um motor *brushless*.

- **Público alvo**

- Estudantes da terceira série do Ensino Médio

- **Teoria de Aprendizagem**

- Teoria de aprendizagem por descoberta de Jerome Bruner

- **Estrutura didática**

- Três encontros de uma hora e 30 minutos cada

- **Conteúdos**

- Corrente elétrica em condutores
- Campo magnético de ímãs e bobinas
- Torque
- Conservação da energia

- **Recursos didáticos**

- Computador, projetor, pen drive
- Simuladores
- Papel A4
- Quadro branco, pincel, apagador
- Motor *brushless*

A Tabela 1 a seguir detalha o cronograma das atividades a serem realizadas.

Tabela 1 – Cronograma de atividades

Momentos	Conteúdos	Duração
Primeiro encontro: Motor <i>brushless</i>		
1º momento	Apresentação	10 minutos
2º momento	Funcionamento e características	30 minutos
3º momento	Atividade 1	30 minutos
4º momento	Socialização das respostas	20 minutos
Segundo encontro: Fenômenos eletromagnéticos		
1º momento	O que são ímãs?	10 minutos
2º momento	O que é corrente elétrica?	15 minutos
3º momento	Revisão de torque	10 minutos
4º momento	Revisão de conservação da energia	10 minutos
5º momento	Atividade 2	45 minutos
Terceiro encontro: Consolidação de aprendizagem		
1º momento	Princípios de funcionamento do motor <i>brushless</i>	30 minutos
2º momento	Dúvidas	30 minutos
3º momento	Atividade 3	30 minutos

Fonte: Autor (2025)

2.1.1 Primeiro encontro

A sequência didática iniciará com o objetivo de mostrar aos estudantes um motor *brushless* em funcionamento. O primeiro encontro será dividido em três momentos, começando com a apresentação do professor e do objeto de estudo. Inicialmente, os estudantes serão levados ao laboratório de Física do *campus* e orientados a formarem grupos de no máximo quatro integrantes. Logo após, busca-se motivá-los a compreender a importância do funcionamento do motor, destacando suas principais aplicações em dispositivos do cotidiano por meio do questionamento: “Você já pensou como funcionam os drones ou ventiladores modernos?” e assim, iniciar uma breve discussão introdutória. Nesse primeiro momento, também será explicitada a estrutura da sequência didática, detalhando o percurso das aulas e os objetivos a serem alcançados, os quais serão informados aos estudantes. Essa etapa ocorrerá nos primeiros dez minutos.

Os próximos trinta minutos serão dedicados ao estudo do motor *brushless*. O professor acionará o motor para demonstração. Após a primeira demonstração do motor em funcionamento, será exibida, por meio de slides, a composição mecânica do motor. Seus principais componentes são: o estator, onde estão localizadas as bobinas de fio de cobre; o rotor, que contém os ímãs; o controlador eletrônico e a haste de aço, responsável por permitir a rotação do rotor. Será entregue a cada grupo uma ficha ilustrativa com os nomes dos componentes para facilitar a identificação. Após orientações referentes aos

cuidados necessários, os grupos terão autonomia para manipular o motor, observá-lo em funcionamento, bem como registrar vídeos e fotografias, com o intuito de elaborar uma explicação acerca de seu princípio de operação. Cada grupo terá um tempo máximo de cinco minutos em contato com o motor. Nesta etapa, eles terão a oportunidade de desfazer as conexões que julgassem necessárias para investigação. A única restrição é a não possibilidade de abertura do motor; caso o professor julgue esse procedimento como importante, pode fazê-lo.

É de extrema importância que o professor consiga expor o máximo de detalhes possíveis sobre cada um dos componentes, sem fornecer pistas operacionais sobre o funcionamento do motor. Em seguida, cada grupo terá trinta minutos para elaborar uma explicação sobre o funcionamento do motor, atribuindo a cada componente mecânico uma tarefa necessária para que o motor funcione corretamente, sendo que não será permitido o acesso à internet durante essa atividade. A atividade² será realizada por meio da entrega de uma folha contendo todas as instruções, com o objetivo de estimular a curiosidade e reflexão dos estudantes sobre o fenômeno observado. Logo após, será o momento em que os grupos compartilharão as respostas que obtiveram na Atividade 1 com os demais, para que, assim, exista uma troca de ideias na construção da explicação do funcionamento do motor. Esta etapa terá uma duração de vinte minutos.

- **Objetivo geral**

- Visualizar um motor *brushless* em funcionamento.

- **Objetivos específicos**

- Conhecer os componentes de um motor *brushless* simples;
- Desenvolver uma explicação para o funcionamento do motor;
- Estimular a reflexão;
- Compartilhar respostas da Atividade 1 com os demais estudantes.

- **Estrutura do encontro:**

- O encontro será dividido em quatro momentos:
 - * **1º momento: Apresentação (10 minutos)**
 - Apresentação do professor e dos alunos.
 - Relevância do tema e do objeto de estudo.
 - Questionamentos pertinentes.
 - Apresentação da sequência didática.

² Esta é a Atividade 1 que consta no Apêndice D.

- Apresentação dos objetivos.
- * 2º momento: **Funcionamento e características (30 minutos)**
 - Formação de grupos de quatro estudantes.
 - Exibição do motor *brushless* em funcionamento.
 - Detalhamento dos componentes mecânicos do motor.
- * 3º momento: **Atividade 1 (30 minutos)**
 - Elaboração da explicação do funcionamento do motor utilizando papel e caneta.
- * 4º momento: **Socialização das respostas (20 minutos)**
 - Compartilhar com os demais grupos as respostas das questões da Atividade 1.
- **Recursos didáticos:**
 - Projetor
 - Computador
 - Atividade impressa
 - Motor *brushless*

2.1.2 Segundo encontro

Considerando que o objetivo desta sequência didática é proporcionar o primeiro contato com os fundamentos do eletromagnetismo, faz-se necessária a apresentação de novos conceitos, bem como a revisão de conteúdos pregressos. A etapa inicial, com duração de dez minutos, será dedicada ao estudo dos ímãs, utilizando peças de neodímio como recurso didático para sondar os conhecimentos prévios dos estudantes. O foco recairá sobre as propriedades de atração e repulsão magnéticas. Os materiais circularão entre os discentes para que possam vivenciar o fenômeno empiricamente. Ademais, um comentário breve será abordado a inexistência de monopolos magnéticos na natureza.

Em seguida, no segundo momento (quinze minutos), será explorado o conceito de corrente elétrica como movimento na mesma direção e sentido de portadores de carga elétrica. Será comentado que a corrente elétrica pode ser entendida como o fluxo de cargas ao longo do tempo (adaptando para $i = Q/\Delta t$ no contexto do Ensino Médio). O foco principal não será a conta em si, mas garantir que o estudante compreenda que a corrente é o movimento de cargas elétricas. Para explicar o que gera esse movimento e tornar o conceito de diferença de potencial (tensão) menos abstrato, usaremos uma analogia com a gravidade. Ao soltar um objeto em sala, mostramos que a diferença de altura é necessária para que haja movimento; a ideia é que o aluno perceba que, para as cargas

elétricas fluírem, também é preciso existir uma espécie de “altura” ou desnível elétrico. Com o objetivo de deixar essa noção mais visual ainda, utilizaremos uma animação do site PhET³. Após isso, o professor deve mostrar o experimento de Ørsted⁴ sobre fios condutores percorridos por corrente elétrica que geram campo magnético ao redor deles. Para isso, será utilizada uma figura por meio de um projetor, mostrando uma espécie de modelo supostamente utilizado por Ørsted em seus experimentos. O professor deverá explicar em detalhes o que mostra a figura, seus elementos e funções. Em seguida, será exibido um vídeo⁵ do experimento sendo reproduzido com equipamentos modernos.

Como se trata de uma turma da terceira série do Ensino Médio, para explorar as características do motor *brushless*, é importante fazer uma breve revisão do conceito de torque, destacando a relação com o giro em torno de um eixo fixo de um sistema físico (como gangorras, portas etc.). Utilizando a porta da sala, será solicitado uma demonstração da dificuldade de abri-la realizando força em diferentes posições: próxima ao eixo de rotação, no meio da porta e na maçaneta. Após isso, é o momento de introduzir a equação que expressa o módulo do torque $\mathfrak{T} = r \cdot F \cdot \sin(\theta)$, onde θ é o ângulo entre o braço de alavanca e a força, r é a distância em que se aplica a força e F é a força aplicada, destacando que o torque é máximo quando a força é aplicada perpendicularmente ao braço de alavanca. Este será o terceiro momento (dez minutos).

Nos próximos dez minutos (quarto momento), será realizada uma breve revisão do conceito de conservação da energia mecânica em um sistema conservativo, a fim de explorar a origem da energia cinética de rotação do motor. Como estudantes da terceira série já tiveram contato com a conservação da energia mecânica no âmbito do campo gravitacional, esse ponto será revisado. Será exibida, em um projetor, uma imagem contendo três trajetórias distintas em um campo gravitacional. O objetivo é demonstrar, através do cálculo do trabalho ($W = mgh$), que a energia despendida independe da trajetória, dependendo apenas do desnível vertical. Por fim, a discussão conectará esses princípios fundamentais ao funcionamento do motor *brushless*. Será esclarecido que, embora o motor real não seja um sistema isolado perfeito (devido a perdas térmicas e atrito), a ausência de escovas o torna significativamente mais eficiente e durável se comparado aos motores elétricos convencionais, aproximando-o mais dos ideais de conservação de energia.

No quinto e último momento (trinta minutos), será desenvolvida uma atividade com o objetivo de verificar a evolução da explicação dos estudantes sobre o funcionamento do motor *brushless*. Munidos dos conhecimentos novos e revisados, os mesmos grupos do primeiro encontro atribuirão a cada componente mecânico uma função específica, bem

³ A simulação pode ser encontrada em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/circuit-construction-kit-dc>. Recomenda-se realizar o *download* prévio da simulação para uso *offline*, opção disponível gratuitamente no próprio site do projeto.

⁴ Hans Christian Ørsted (1777 - 1851) - Físico e químico dinamarquês.

⁵ O vídeo pode ser encontrado em <https://www.youtube.com/watch?v=bjRAfNSe1E0>

como os fenômenos físicos que ocorrem para fazer o motor funcionar. Essa atividade tem o objetivo de verificar a evolução da compreensão dos estudantes sobre os fenômenos observados no motor *brushless*.

- **Objetivo geral**

- Elaborar uma explicação para o funcionamento do motor *brushless*, munidos de conhecimentos sobre os fenômenos físicos.

- **Objetivos específicos**

- Revisar os conteúdos de torque e de conservação da energia mecânica em um sistema conservativo;
- Adquirir conhecimentos introdutórios sobre corrente elétrica e campo magnético de ímãs;

- **Estrutura do encontro:**

- O encontro será dividido em cinco momentos:

- * **1º momento: O que são ímãs? (10 minutos)**

- Experimento demonstrativo com dois ímãs de neodímio.
 - Verificar atração e repulsão dos ímãs.
 - Introduzir a noção de campo magnético.

- * **2º momento: O que é corrente elétrica? (15 minutos)**

- Construir a noção de material condutor.
 - Definição de corrente elétrica como movimento ordenado de portadores de carga elétrica.
 - Exemplificação da possibilidade de movimento dos portadores de carga elétrica devido a uma diferença de potencial elétrico, fazendo analogia com o movimento em um campo gravitacional.

- * **3º momento: Revisão de torque (10 minutos)**

- Definir o torque como a medida da tendência de uma força em fazer um corpo girar em torno de um eixo fixo.
 - Explorar quantitativamente as características da equação do torque (também chamado de Momento Escalar em algumas referências), dada por: $\mathfrak{T} = r \cdot F \cdot \sin(\theta)$, onde r é o braço de alavanca (distância do ponto de rotação até o ponto de aplicação da força), F é a força aplicada e θ é o ângulo entre F e r .

- * **4º momento: Revisão de conservação da energia (10 minutos)**

- Comentar sobre as várias formas de energia, principalmente a energia de movimento e a energia elétrica.
- Discutir sobre transformação de energia e, conseqüentemente, o princípio da conservação da energia.

* 5º momento: Atividade (30 minutos)

- Com conhecimentos revisados e outros adquiridos, os estudantes farão novamente a tentativa de explicação do funcionamento do motor *brushless*.
- Explicar a função de todos os componentes mecânicos do motor, sem auxílio de conexão com a internet.

- Recursos didáticos:

- Ímãs de neodímio
- Projetor
- Computador
- Motor *brushless*
- Atividade impressa

2.1.3 Terceiro encontro

O último encontro tem como objetivo a consolidação dos conhecimentos obtidos durante toda a sequência didática. Com o motor *brushless* em mãos, é o momento para o professor ser o mais detalhista possível na explicação. Inicialmente, o professor explicará os detalhes e o passo a passo de como construir um motor *brushless* simples, esmiuçando cada detalhe e indicando onde conseguir as peças (principalmente o controlador eletrônico). Após esse procedimento, é o momento de explicar o formato físico do motor, a fim de explorar as características que contribuem para a sua otimização. Em seguida, deve ficar claro para os alunos que, se alguma conexão entre os terminais da bobina for desfeita, o motor deixa de funcionar, evidenciando a importância de se manter uma corrente elétrica. Como foi discutido no encontro anterior, a corrente elétrica é mantida pela diferença de potencial presente no controlador eletrônico.

Subseqüentemente, é o momento de explorar a importância e o papel das bobinas, que, ao serem percorridas por corrente elétrica, funcionam como ímãs. É necessário fazer um paralelo com a descoberta de Ørsted, de que fios condutores percorridos por corrente elétrica geram, ao seu redor, um campo magnético. Como as bobinas funcionam como ímãs, elas conseguem atrair os ímãs presentes no rotor e fazer o motor girar (mais detalhes sobre o funcionamento do motor *brushless* podem ser encontrados no Apêndice A). O professor deve comentar sobre o número de voltas em cada bobina e perguntar aos

estudantes se esse fato influencia ou não no giro do rotor. Outra curiosidade que pode ser explorada diz respeito à quantidade de bobinas e à relação múltipla de três presente nas entradas conectadas ao ESC. Em outras palavras, como o motor é trifásico, o professor deve levantar essa questão para que os estudantes reflitam por conta própria. Após esse momento de reflexão, é importante esclarecer que o termo “trifásico” se refere ao número de sistemas de correntes independentes e defasadas — três correntes com defasagem de 120° entre si.

Uma possível analogia para ilustrar essa situação consiste em imaginar três pessoas empurrando um carrossel em posições igualmente espaçadas por 120° . Utilizando o quadro branco, o professor pode desenhar essa cena para facilitar a compreensão. Se cada pessoa empurrar sozinha (equivalente às 3 bobinas), o movimento ocorrerá aos trancos. Já se cada uma contar com assistentes que ajudem no empurrão (6, 9, 12 bobinas), o esforço se distribui melhor e o movimento se torna mais contínuo. Deve-se deixar claro que é esse trabalho conjunto dos assistentes que garante a suavidade do movimento e que, no caso do motor brushless, as bobinas são controladas pelo ESC, que liga e desliga cada fase no momento correto para que o motor funcione adequadamente. Existem diversos GIFs e animações disponíveis na internet que ilustram como a comutação entre as bobinas ocorre⁶. Recomenda-se que o professor realize o *download* desses materiais antes da aula para garantir a aplicação independente de conexão.

O segundo momento (trinta minutos) é destinado para que os estudantes sanem quaisquer dúvidas a respeito do que foi trabalhado ao longo do tempo.

No terceiro e último momento (trinta minutos), será realizada a atividade final. Esta constará de questões pertinentes à construção de uma ideia na física, como, por exemplo, a obtenção de uma equação a partir do experimento realizado. Também haverá espaço para as impressões, positivas e/ou negativas, dos estudantes em relação à prática utilizada.

- **Objetivo geral**

- Compreender o funcionamento básico de um motor *brushless*.

- **Objetivos específicos**

- Saber construir passo a passo um motor *brushless* simples.
- Identificar a função de cada componente do motor.
- Sanar dúvidas pertinentes.
- Responder uma atividade com questões objetivas sobre os conteúdos estudados.

⁶ Um exemplo pode ser encontrado em <https://11nq.com/xORT4>. Caso não haja conexão disponível, o professor pode utilizar uma sequência de figuras estáticas que representem as seis etapas de comutação trifásica, desenhadas no quadro branco ou impressas previamente.

- **Estrutura do encontro:**

- O encontro será dividido em três momentos:

- * **1º momento: Princípios de funcionamento do motor *brushless***

- Como construir um motor *brushless* simples.
 - Explorar as características físicas do motor.
 - Conhecer o papel de cada componente do motor, bem como o princípio físico envolvido.

- * **2º momento: Dúvidas**

- Momento para que os estudantes discutam e debatam as principais dúvidas que surgiram durante a aplicação da sequência didática.

- * **3º momento: Atividade final**

- Atividade escrita contendo questões discursivas pertinentes e espaço para opinião sobre a prática didático-pedagógica.

3 Considerações Finais

O produto educacional aqui referido é resultado de pesquisas e estudos sobre práticas educacionais voltadas ao aprendizado de conceitos físicos por intermédio de objetos do cotidiano e experimentos, o que torna este trabalho relevante, visto que a Física é uma ciência experimental. Em última análise, constitui uma ferramenta que pode ser utilizada por professores no ensino de princípios físicos abstratos, como o campo magnético, a corrente elétrica e o fenômeno da indução eletromagnética. Adaptações podem ser realizadas com o objetivo de adequar a sequência à realidade de cada escola. Uma possível e interessante abordagem seria realizar uma oficina, na qual cada grupo de estudantes produza seu próprio motor *brushless* ou, caso a escola disponha de bons equipamentos de medição elétrica, realizar medições e aferições baseadas nas ferramentas teóricas da eletrônica.

Referências

- ABR Distribuidora. *Estator cancela Brushless*. n.d.a. Disponível em: <https://arbdistribuidora.com.br/categorias/acessorios-para-portoes-18/10840-estator-cancela-brushless-220v-50hz-60hz-78mm-ppa-553>. Acesso em: 31 de Agosto de 2024.
- BARBOSA, R. S.; TRISTÃO, L. G. d. O. Motor brushless dc: Análise teórica e projeto de controlador eletrônico sem a utilização de sensores. 2018.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: Ministério da Educação, 2018.
- BRASIL. *Referencial Curricular do Ensino Médio Potiguar*. Natal: SEEC-RN, 2021.
- BROWN, W. Brushless dc motor control made easy. *Microchip Technology Inc*, v. 1, 2002.
- Etonm Motor. *Outrunner vs. Inrunner: Which Brushless DC Motor Fits Your Needs?* n.d.a. Disponível em: <https://etonmmotor.com/outrunner-vs-inrunner-choosing-the-right-brushless-dc-motor/>. Acesso em: 14 de setembro de 2024.
- MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2021.
- NOLAN, D. Sensorless six-step bldc commutation. *AN4220, STMicroelectronics*, 2013.
- Saravati - Materiais Técnicos. *Motor Brushless A2212 2200KV / 6T*. n.d.a. Disponível em: https://www.saravati.com.br/motor-brushless-a2212-2200kv-6t.html?srsltid=AfmBOoqE_Nuw35rnYJ3fHVVC9tpRbyLpi80U74VD8i9uKcDqGuoAQfTW. Acesso em: 02 de Março de 2025.
- Wikimedia Commons. *File:Oersted experiment.png*. 2013. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oersted_experiment.png. Acesso em: 12 de fevereiro de 2025.
- YEDAMALE, P. Brushless dc (blde) motor fundamentals. *Microchip Technology Inc*, v. 20, n. 1, p. 3–15, 2003.

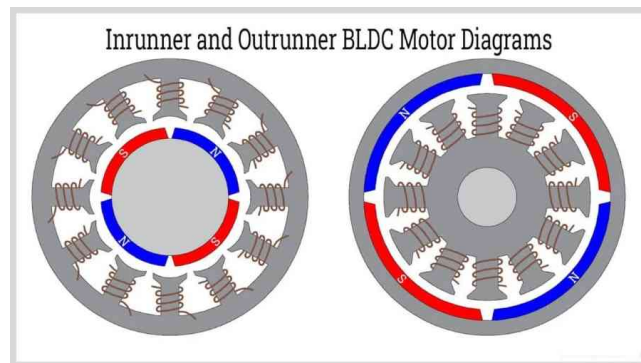
Apêndices

APÊNDICE A – Princípios físicos, mecânicos e características do funcionamento do motor *brushless*

Este apêndice tem como objetivo fornecer ao professor um conhecimento básico sobre o motor *brushless*, sem abordar detalhes específicos de eletrônica. Nos últimos anos, a popularidade desse tipo de motor tem aumentado significativamente em setores industriais de grande relevância social e econômica, como eletrodoméstico, automotivo, aeroespacial, médico e de instrumentação, entre outros. O motor *brushless*, como o nome sugere, é um motor elétrico de corrente contínua que não possui escovas em sua composição, assim, a comutação das bobinas é realizada por um controlador externo. A vantagem de se utilizar um motor *brushless* em detrimento de um motor com escovas ou um motor de indução convencional é a melhor relação entre velocidade e torque, alta resposta dinâmica, alta eficiência, longa vida útil, funcionamento silencioso e maior faixa de velocidade (YEDAMALE, 2003, p.1).

Sua composição básica é composta por um rotor e um estator. O estator é a parte fixa, onde se localizam as bobinas e o rotor é a parte girante, onde se encontram os ímãs permanentes. A figura 1 mostra um esquema simplificado desse modelo, com dois tipos possíveis de configuração, o motor *inrunner* à esquerda e o *outrunner* à direita.

Figura 1 – Esquema simplificado de motor *brushless* com estator interno



Fonte: Etonm Motor (n.d.a)

O motor *brushless* é um motor elétrico síncrono, isto é, sua frequência elétrica está associada à velocidade de rotação do rotor. Ele é alimentado através de um controlador responsável pela comutação das bobinas. Como essa comutação é realizada através de procedimentos eletrônicos, torna o processo desafiador, vista a gama de possibilidades e

complexidades. Atualmente em muitas ocasiões é utilizada a inteligência artificial para fazer esse trabalho.

A.1 Estator

O estator é a parte fixa do motor brushless, responsável por gerar um campo magnético rotativo através da corrente elétrica fornecida às bobinas, de acordo com a Lei de Ampère-Maxwell, que relaciona a corrente elétrica com o campo magnético gerado ao redor de um condutor. Esse campo interage com os ímãs permanentes do rotor, criando a força necessária para rotacioná-lo. Em motores de alta eficiência, o estator é composto de um núcleo laminado de aço e bobinas de cobre esmaltado. Ser laminado facilita a minimização de efeitos indesejáveis, como o surgimento das correntes de Foucault na estrutura do motor, perda de eficiência do fluxo de campo magnético e dificuldade de dissipação do calor. Na figura 2, temos um exemplo de um estator.

Figura 2 – Estator “cancela”



Fonte: ABR Distribuidora (n.d.a)

A.2 Rotor

É a parte móvel do motor *brushless* onde ficam localizados os ímãs permanentes. Sua principal função é girar em resposta ao campo magnético rotativo criado no estator pelas bobinas. Sua composição básica é composta por ímãs permanentes, um núcleo para a fixação dos ímãs e um eixo de rotação. Existem diversos tipos de ímãs, como os ímãs de neodímio (NdFeB), de samário-cobalto (SmCo), de ferrite (cerâmica), dentre outros. O rotor é configurado para ter polos alternados (um ímã com o polo norte na frente e outro com o sul, etc.). Isso cria um campo magnético que interage de maneira eficiente com as bobinas do estator. A figura 3 abaixo mostra seções transversais de diferentes arranjos de ímãs em um rotor.

Figura 3 – Rotor

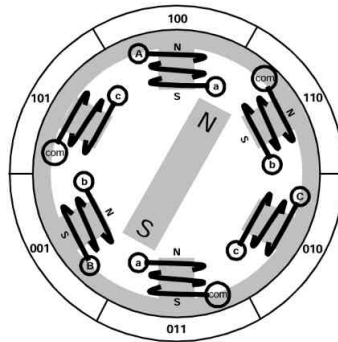


Fonte: Yedamale (2003)

A.3 Princípios básicos de funcionamento

O funcionamento do motor *brushless* é baseado na interação entre o campo magnético gerado pelas bobinas e o campo magnético dos ímãs permanentes. Para uma melhor visualização temos a figura 4, que é um diagrama simplificado.

Figura 4 – Diagrama simplificado do motor brushless



Fonte: Brown (2002)

No caso específico do diagrama acima, duas bobinas são energizadas por vez formando um campo magnético no estator, enquanto a outra bobina fica em estado flutuante. O campo magnético produzido pelas bobinas vai interagir com o campo magnético dos ímãs, produzindo um torque sobre eles. Sendo possível realizar comutações nas bobinas de maneira correta, ou seja, seguindo uma determinada sequência e no tempo adequado, é possível formar um campo magnético girante no estator. Este que será responsável por manter o rotor em giro contínuo. (NOLAN, 2013, p. 13).

Quando o rotor gira, seus ímãs permanentes criam um fluxo magnético variável através das bobinas do estator. De acordo com a Lei de Faraday-Neumann-Lenz, essa variação gera uma força eletromotriz induzida na bobina. O termo técnico para isso é *back-EMF* (Força Contra-Eletromotriz). Quando o motor *brushless* não dispõe de sensores de efeito Hall, o controlador externo utiliza a força Contra-Eletromotriz para estimar a posição do rotor e realizar a comutação necessária para a operação contínua. Para detalhes sobre o modelo matemático recomenda-se consultar Barbosa e Tristão (2018).

APÊNDICE B – Tutorial de construção de motor *brushless* com materiais de baixo custo

Este apêndice descreve o procedimento de construção de um motor *brushless* de corrente contínua caseiro, priorizando materiais de relativo acesso. O objetivo é propiciar ao professor uma alternativa à abordagem deste produto educacional, baseando-se em metodologias de “faça-você-mesmo”.

B.1 Lista de materiais e ferramentas

Para a construção de um motor trifásico com configuração sugerida de 12 ranhuras no estator e 16 polos magnéticos (12N16P), são necessários:

1. Ímãs de neodímio: 16 unidades (sugestão: 10mm x 5mm x 2mm ou similar).
2. Fio de cobre esmaltado: Diâmetro aproximado de 0,5 mm (AWG 24 ou 25). Pode ser reaproveitado de transformadores ou motores antigos.
3. Eixo metálico: Barra de aço de 5 mm de diâmetro (pode ser cortada de um eixo de impressora antiga ou ferrolho).
4. Rolamentos: 2 unidades (ex: MR95ZZ ou 608ZZ de skates, ajustando o eixo conforme necessário).
5. Estrutura do estator e rotor: Tubos de PVC, madeira ou a carcaça metálica de um motor DC escovado queimado (removendo-se o coletor e as bobinas originais).
6. Controlador (ESC): Um *Electronic Speed Controller* de 20A ou 30A e um testador de servo (ou microcontrolador Arduino) para gerar o sinal de controle.
7. Fonte de alimentação: Bateria LiPo (11.1V) ou fonte de bancada DC.
8. Cola: Adesivo instantâneo (cianoacrilato) e cola epóxi para fixação dos ímãs.

B.2 Procedimento de Construção

B.2.1 Bobinamento

A preparação do estator consiste em montar as bobinas. Se o estator utilizado for metálico (composto por lâminas de ferro reaproveitadas), o primeiro passo é garantir o isolamento das ranhuras. Para isso, recomenda-se revesti-las com papel isolante ou fita Kapton, evitando que o fio esmaltado encoste diretamente no metal e provoque curtos. Quando o estator é impresso em plástico, esse isolamento já é natural e nenhuma etapa adicional é necessária. Com o estator preparado, inicia-se o processo de enrolamento. Utiliza-se fio de cobre esmaltado de 0,5 mm e enrolam-se as bobinas sempre no mesmo sentido, seja horário ou anti-horário, para que todas produzam campos magnéticos coerentes entre si. É importante manter um padrão constante de voltas em cada ranhura para garantir o equilíbrio no funcionamento final do motor.

Para formar um motor trifásico, um estator de 12 ranhuras deve ser dividido em três grupos correspondentes às fases A, B e C. Cada fase será formada pelo enrolamento de bobinas em ranhuras separadas por intervalos regulares: a cada três ranhuras, inicia-se novamente a mesma fase. Por exemplo, ao enrolar as ranhuras 1, 4, 7 e 10, obtém-se a Fase A; o mesmo padrão é repetido para compor as fases B e C. Após o enrolamento das três fases, realiza-se o fechamento em estrela (configuração Wye). Para isso, une-se uma das extremidades de cada fase – final da Fase A, final da Fase B e final da Fase C – formando um ponto comum que atuará como neutro. Essa junção deve ser soldada e devidamente isolada. As outras três extremidades permanecem livres e funcionarão como os terminais de saída do estator, onde será conectado o controlador eletrônico de velocidade (ESC).

B.2.2 Rotor e fixação dos ímãs

O diâmetro interno do rotor deve ser devidamente calculado para acomodar os 16 ímãs com um espaçamento mínimo em relação ao estator, sem tocá-lo (aproximadamente 0,5 mm a 1 mm de folga). Feito esse dimensionamento, cole os ímãs na parede interna do rotor (ou externa, dependendo do *design*) alternando as polaridades: norte - sul - norte - sul. Para garantir que os ímãs não se soltarão quando o motor começar a girar, utilize cola epóxi para fixá-los no rotor.

B.2.3 Montagem mecânica

Inicia-se a montagem com os rolamentos sendo inseridos no centro do estator (ou na base de suporte). O eixo deve passar justo pelos rolamentos. Se necessário, faça ranhuras no eixo para anéis de retenção para evitar deslocamento axial. Em seguida, fixe o rotor solidamente ao eixo. Para garantir que o rotor gire livremente ao redor do

estator, é necessário controlar a folga axial do conjunto. Para isso, utilizam-se arruelas finas (espaçadores), posicionadas entre o rotor e os rolamentos, ou entre os rolamentos e o suporte do estator.

B.2.4 Conexão eletrônica e testes

Para o teste de funcionamento, solde conectores tipo *bullet* ou diretos, nos 3 fios que saem do estator e conecte-os às 3 saídas do ESC. A ordem dos fios determina apenas o sentido de rotação; para inverter, troque quaisquer dois fios. Conecte o cabo de sinal do ESC ao testador de servo (ou pino PWM do Arduino). Em seguida, alimente o sistema, conectando no ESC a bateria ou fonte. O motor pode precisar de um leve impulso manual se o estator não tiver núcleo de ferro (ferromagnético), pois o campo magnético inicial pode ser fraco para vencer a inércia em estatores de plástico.

B.3 Vídeos do Youtube

O tutorial descrito acima foi baseado em alguns vídeos disponíveis no YouTube. Abaixo seguem os links para cada vídeo; nos respectivos canais é possível encontrar outros tutoriais com variações de motor *brushless*. Recomenda-se que o professor realize o *download* dos vídeos previamente à aplicação, assegurando o acesso ao material mesmo em ambientes sem conexão com a internet.

- **Vídeo 1:** Making Jet Speed 50000RPM BLDC Motor Using PVC Pipe
 - <https://youtu.be/UfM2ujmw1ag?si=HkUFIFX4xF-AYoOi>
- **Vídeo 2:** Fazendo um motor sem escova poderoso a partir de um motor escovado DC - motor sem escova caseiro
 - https://www.youtube.com/watch?v=kAU_wBoUxKg
- **Vídeo 3:** Como fazer um motor sem escova potente - Super ideia para criar um motor sem escova
 - <https://www.youtube.com/watch?v=Ik-4dgXfhQ8>
- **Vídeo 4:** Making BLDC Motor | Brushless DC Motor
 - <https://www.youtube.com/watch?v=Wqr1b4mWDsE>
- **Vídeo 5:** The BLDC Motor
 - <https://www.youtube.com/shorts/Ujhx4hHET3U>

APÊNDICE C – Modelo utilizado de motor *brushless*: A2212 2200KV

O modelo escolhido para a aplicação da sequência didática é o modelo **A2212 2200KV**, amplamente utilizado em aeromodelismo, drones e outras aplicações de recreamento. Devido à sua compactação e baixa massa torna-se ideal para sistemas que requerem alta rotação, como drones de corrida e aviões elétricos de pequeno porte. O que facilita o manuseio por parte dos estudantes durante os encontros. Como seu modelo é *outrunner* (o rotor externo gira em torno do estator interno fixo), proporciona maior torque em comparação com motores *inrunner* de tamanho semelhante, o que é ideal para sistemas com hélices.

Figura 5 – Modelo A2212 2200KV



Fonte: Saravati - Materiais Técnicos (n.d.a)

Listamos abaixo algumas especificações técnicas de interesse fornecidas por Saravati - Materiais Técnicos.

- Modelo: A2212 2200KV
- Marca: OEM
- RPM/V: 2200 RPM/V
- Eficiência máxima: 80%
- Número de células: 2-3 Li-Po

- Tensão de operação: 7,4-11,1 V (2-3 Li-Po)
- Faixa de corrente para eficiência máxima: 7-16A (>75%)
- Corrente: 0,5A (10 V sem carga)
- Corrente máxima: 12A/60seg
- Resistência interna: 150 ohm
- Dimensão do estator: 22x10mm
- Diâmetro do eixo: 3mm
- Massa recomendada do modelo: 200-600g

A partir das especificações acima podemos tirar conclusões interessantes que potencializam a utilização desse modelo como prática pedagógica para a aprendizagem de elementos de Eletromagnetismo. O termo “KV” representa a constante de velocidade do motor, indicando quantas rotações por minuto (RPM) ele atinge por volt aplicado, como temos a especificação de 2200 KV, significa que a cada 1 V aplicado ele girará a aproximadamente 2200 RPM (sem hélice ou carga acoplada). Se, por exemplo, você usar uma bateria de 11.1 V (3S LiPo), o motor pode atingir aproximadamente 24.420 RPM ($2200 \cdot 11,1$). O termo A2212 significa que temos um motor *outrunner* (A) com um estator de 22 mm de diâmetro e 12 mm de altura.

APÊNDICE D – Slides e figuras utilizadas durante os encontros

D.1 Primeiro encontro

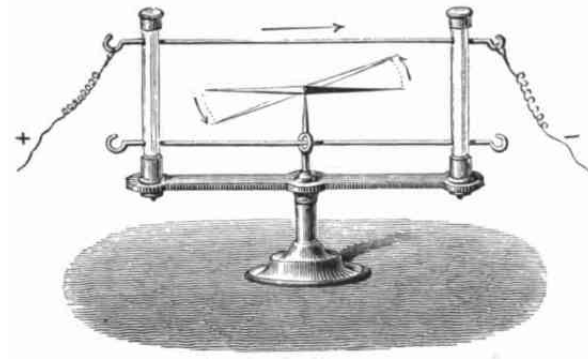
Figura 6 – Ficha ilustrativa para identificação dos componentes do motor *brushless*



Fonte: Autor (2025)

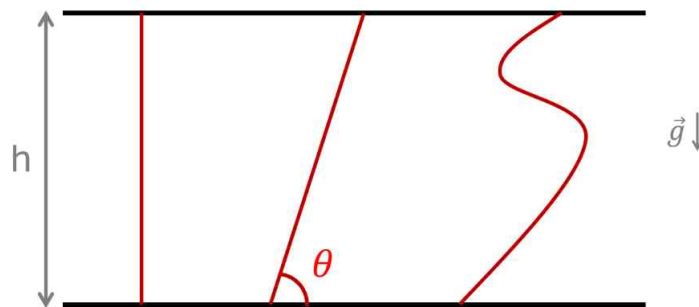
D.2 Segundo encontro

Figura 7 – Ilustração do aparato experimental utilizado por Oersted



Fonte: Wikimedia Commons (2013)

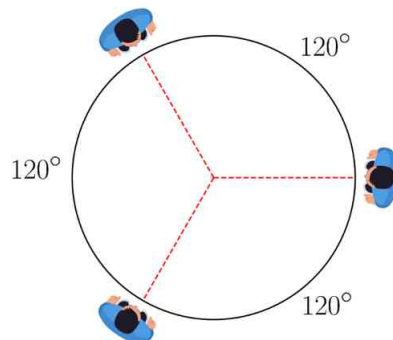
Figura 8 – Esquema de 3 trajetórias de um corpo solto em um campo gravitacional uniforme



Fonte: Autor (2025)

D.3 Terceiro encontro

Figura 9 – Analogia para o motor trifásico



Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE E – Atividade 1

COMO O MOTOR FUNCIONA?

1. Por que precisamos de ímãs? Um só não bastaria? Qual o motivo deles estarem dispostos dessa forma ao redor do eixo de rotação?
2. Para que servem os fios de cobre? A quantidade de voltas no enrolamento influencia em alguma coisa?
3. Os ímãs poderiam estar dispostos externamente? Ou seja, eles poderiam trocar de lugar com as bobinas?
4. Por que existe o controlador ESC?
5. Produza um texto descritivo sobre o funcionamento do motor, atribua a cada componente uma função e explique o funcionamento geral.

APÊNDICE F – Atividade 2

EXPLICAÇÃO DOS CONCEITOS FÍSICOS PRESENTES NO FUNCIONAMENTO DO MOTOR

1. O motor pode ser considerado um sistema conservativo? Por quê? Existe conversão de uma forma de energia em outra?
2. Existe corrente elétrica no motor? Se sim, onde está a diferença de potencial responsável por causar o movimento ordenado de portadores de carga elétrica?
3. Existe torque no motor? Se sim, onde e qual é o objeto que o causa e qual é o objeto que sofre sua ação?
4. Qual o papel do campo magnético dos ímãs?
5. Elabore um texto descritivo sobre os princípios físicos envolvidos no funcionamento do motor. No texto, relacione cada conceito físico com os seus respectivos componentes.

APÊNDICE G – Atividade final

1. Dadas as grandezas R (distância média entre as bobinas e os ímãs), I (corrente elétrica nas bobinas), B (intensidade do campo magnético gerado pelas bobinas), N (número de ímãs) e L (comprimento dos fios nas bobinas), construa uma equação que forneça a intensidade do torque ($\mathfrak{T}$) sobre os ímãs.
2. Observe o gráfico abaixo.

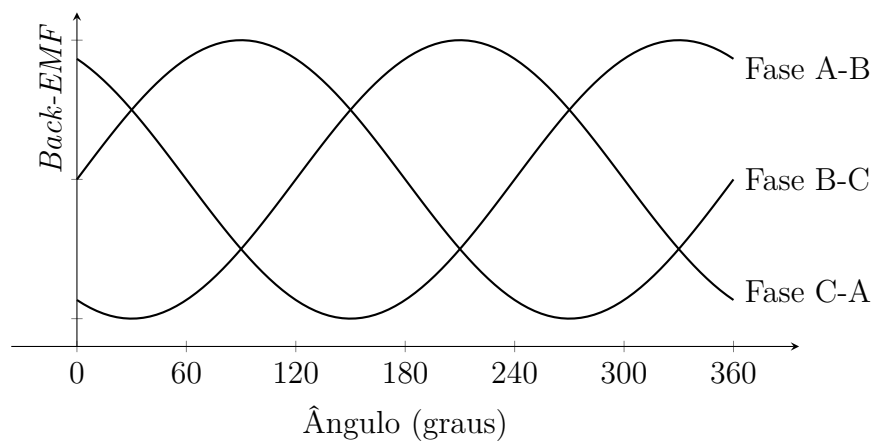
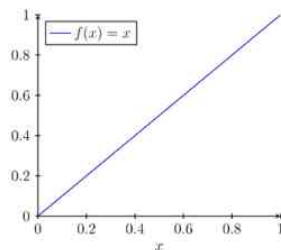
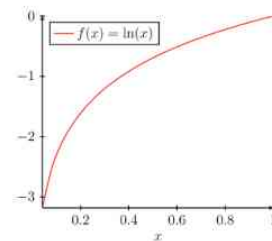


Figura 10 – Tensão gerada nas bobinas

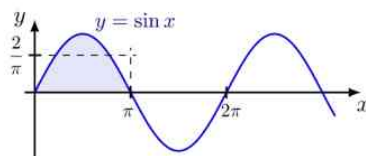
O gráfico representa um caso ideal do comportamento da tensão gerada nas bobinas devido à variação de fluxo de campo magnético provocado pelo movimento de rotação dos ímãs. Observe os gráficos abaixo de algumas funções elementares, que função você utilizaria para representar o comportamento da *Back-EMF*?



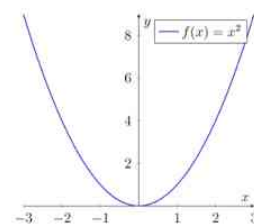
()



()



()



()

3. Sabemos que o motor *brushless* pode ser utilizado para diversas aplicações, como *drones*, ferramentas domésticas e industriais (parafusadeira, serra circular, etc), *coolers* de computador, etc. Tendo em vista seu funcionamento mecânico, você o utilizaria para a construção de qual ferramenta prática? E com qual objetivo?
4. Vimos que a corrente elétrica que atravessa as bobinas faz surgir um campo magnético ao seu redor. O efeito inverso seria possível? Ou seja, campos magnéticos poderiam gerar correntes elétricas?
5. A prática realizada despertou em você um papel mais ativo na consolidação do seu aprendizado? Você se sentiu protagonista no processo de construção de conhecimento? Justifique.
6. Este espaço é destinado à sua avaliação sobre a sequência de aulas que tivemos. Disserte brevemente sobre aspectos positivos e negativos.