

Tratamento experimental do protótipo de um motor de corrente contínua

Experimental treatment of the prototype of DC motor

Tratamiento experimental del prototipo de um motor DC

Recebido: 18/02/2020 | Revisado: 02/03/2020 | Aceito: 08/03/2020 | Publicado: 20/03/2020

Antonio Marques dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-0710>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Brasil

E-mail: antoniomarques.santos@ifma.edu.br

Erikson Alves de Sousa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Brasil

E-mail: erikson.alves18@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4903-858X>

Resumo

Esse trabalho tem como objetivo apresentar os resultados do estudo analítico e experimental do protótipo de um motor de corrente contínua desenvolvido experimentalmente. Esse motor tem como princípio da ação motora, as forças repulsoras entre ímãs ou eletroímãs. Teve como base fundamental para análise das forças, campo e torque atuante no rotor as leis da magnetostática, tais como a Lei de Ampère e a Lei de Biot Savart, além de conceitos relacionados ao princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua. Para modelagem do experimento utilizou-se o software SketchUp, uma ferramenta que permite a construção de modelos geométricos, modelos físicos e por fim, um protótipo, permitindo dar um posicionamento estratégico as bobinas, rotor e estator, tendo como objetivo principal da modelagem, apresentar um experimento com características de um motor elétrico e que sua estrutura apresente semelhança com as exemplificações feitas em livros didáticos. Na construção do protótipo foi utilizado elementos de baixo custo, aproveitando componentes de equipamentos descartados. Os resultados obtidos através dos estudos analíticos e testes experimentais permite visualizar um adequado funcionamento do protótipo, possibilitando sem muitas complicações visualizar diversos tópicos abordados no curso de física e engenharia, tais como, campos magnéticos gerado por bobinas, força magnética, torque em uma espira, força magnética em um fio percorrido por corrente, velocidade de um rotor

composto por bobinas imerso em um campo magnético e momento dipolar, além de sua estrutura permitir chegar a resultados matemáticos acerca de seu funcionamento, usando princípios básicos do eletromagnetismo..

Palavras-chave: Motor CC; Bobina; Campo Magnético. .

Abstract

This work aims to present the results of the analytical and experimental study of a prototype of a DC motor developed experimentally. This motor has the principle of motor action, the repulsive forces between magnets or electromagnets. It had as a fundamental basis for analysis of the forces, field and torque acting on the rotor the laws of the magnetostatic, such as the Law of Ampère and the Law of Biot Savart, as well as concepts related to the principle of operation of a DC motor. For the modeling of the experiment the software SketchUp, a tool that allows the construction of geometric models, physical models and finally, a prototype, allowing a strategic positioning of the coils, rotor and stator, with the main objective of the modeling, to present an experiment with characteristics of an electric motor and that its structure bears similarity with the exemplifications made in didactic books. In the construction of the prototype was used elements of low cost, taking advantage of components of discarded equipment. The results obtained through the analytical studies and experimental tests allow to visualize an adequate functioning of the prototype, allowing without many complications to see several topics covered in the course of physics and engineering, such as magnetic fields generated by coils, magnetic force, torque in a loop, magnetic force in a wire traveled by current, speed of a rotor composed of coils immersed in a magnetic field and dipole moment, in addition to its structure allow to arrive at mathematical results about its operation, using basic principles of electromagnetism.

.Keywords: DC Motor; Coil; Magnetic Field.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo presentar los resultados del estudio analítico y experimental del prototipo de un motor DC desarrollado experimentalmente. Este motor tiene como principio de acción motora, las fuerzas repulsivas entre imanes o electroimanes. Los fundamentos de las leyes magnetostáticas, como la Ley de Ampère y la Ley de Bio Savart, se basaron fundamentalmente en el análisis de las fuerzas, el campo y el par que actúan sobre el rotor, además de conceptos relacionados con el principio de funcionamiento de un motor de CC. Para modelar el experimento, se utilizó el software SketchUp, una herramienta que

permite la construcción de modelos geométricos, modelos físicos y, finalmente, um prototipo, que permite que las bobinas el rotor y el estator se posicionen estratégicamente, com el objetivo principal de modelar presentar. Um experimento com las características de um motor eléctrico y que su estrutura es similar a los ejemplos realizados em los libros de texto. En la construcción del prototipo, se utilizaron elementos de bajo costo, aprovechando los componentes del equipo desechado. Los resultados obtenidos a través de estudios analíticos y pruebas experimentales permiten visualizar um funcionamiento adecuado del prototipo, permitiendo sin luchas complicaciones visualizar vários temas cubiertos em el curso de la física y ingeniería, tales como campos magnéticos generados por bobinas, fuerza magnética, torque em um bucle, fuerza magnética em um cable corrido por corriente, velocidad de un rotor compuesto por bobinas inmersas em um campo magnético y momento dipolar, además de su estructura que permite alcanzar resultados matemáticos sobre su funcionamiento, utilizando principios básicos de electromagnetismo.

.Palabras clave: Motor DC. Bobina. Campo Magnético

1. Introdução

Dispositivos que convertem energia mecânica em energia eléctrica de rotação são chamados de motores eléctricos e boa parte do trabalho do mundo é realizada por esses dispositivos, cada um desenvolvido de acordo com sua aplicação e especificidade. É indiscutível a importância dos motores para as atividades cotidianas do ser humano, envolvendo desde trabalhos domésticos, como o uso de uma batedeira, até motores de grandes indústrias.

O motor eléctrico tornou-se um dos mais notórios inventos do homem ao longo do seu desenvolvimento tecnológico. Investimentos em pesquisas vem ganhando espaço entre os pesquisadores da área, e desde sua invenção vêm sofrendo adaptações de acordo com as necessidades da humanidade.

O esgotamento das fontes não renováveis de energia e a preocupação com o meio ambiente vem se tornando uma preocupação mundial, assim o estudo de processos de geração de energia também vem ganhando espaço entre os pesquisadores, tendo como objetivo final a substituição dos métodos de geração de energia convencional que utiliza materiais que agridem o meio ambiente, por escolhas energéticas que priorizem a manutenção de sistemas ecológicos. (Turrini,1993) afirma que,

São exatamente essas escolhas energéticas em nível industrial a influir profundamente sobre o sistema ecológico do nosso planeta que pode levá-lo a um estado de desordem e de morte. Por isso a atenção deve se concentrar sobre essas escolhas, para que sejam o mais possível respeitosas da ordem e do ritmo da natureza.

Porque dentro de um contexto ecológico o motor elétrico tem papel fundamental? Simples, o motor elétrico usa energia elétrica, uma fonte de energia limpa e eficiente, fácil de ser transmitida a longas distâncias e fácil de ser controlada. Um motor elétrico não requer ventilação constante nem combustível na forma que é exigida por um motor de combustão interna. Assim, o motor elétrico é muito apropriado para uso em ambientes onde não são desejáveis poluentes associados com combustão.

Como consequência a ampliação dos estudos dos motores elétricos, a atuação do campo magnético nessas máquinas vem sendo discutido cada vez mais por físicos, engenheiros, inventores e curiosos da área. As aplicações dos campos magnéticos e das forças magnéticas são incontáveis e mudam a cada ano. Durante várias décadas, a indústria do entretenimento usou fitas magnéticas para gravar sons e imagens. Embora atualmente fitas de áudio e vídeo tenham caído em desuso, a indústria ainda precisa dos ímãs que controlam os CD players e os DVD players; os alto-falantes dos aparelhos de rádio e televisão, dos computadores e dos telefones celulares também utilizam ímãs. Um carro moderno vem equipado com dezenas de ímãs que são usados no sistema de ignição, no motor de arranque e também para acionar componente, como vidros elétricos, limpadores de para-brisas e tetos solares. Muitas companhias de portas e trancas automáticas também trabalham com ímãs. Na verdade, estamos cercados por ímãs, conseqüentemente por campos magnéticos.

A energia mecânica gerada através de motores elétricos acionados por ímãs permanentes, tem proporcionado diversas discussões no meio acadêmico, observadas desde patentes até em vídeos, fóruns e blogs.

Dentro do meio acadêmico existe uma grande variedade de experimentos que pode apresentar para os alunos de graduação, todos os conteúdos necessários para o entendimento de um motor elétrico, uma vez que o experimento é um instrumento capaz de construir um conhecimento mais próximo de sua realidade, além de ser facilitador de conhecimentos aprofundados quando relacionados aos conhecimentos prévios, aproximando a realidade com o conhecimento científico, (Cunha, 2002) e (Campus, et al.,2012) afirma que:

As atividades experimentais permitem aos alunos o contato com o objeto concreto, tirando-os da zona de equilíbrio e colocando-os em zona de conflito, construindo mais conhecimentos e posteriormente retornando a zona de equilíbrio.

Mesmo a maior parte dos experimentos que envolvem campos magnéticos apresentando simplicidade na sua geometria e confecção, estudantes da área mostram dificuldades para determinar seus princípios de funcionamento, no caso dos experimentos que se assemelham ao motor elétrico, os estudantes apresentam dificuldades para determinar os elementos fundamentais para seu funcionamento, tais como as direções e os sentidos das forças responsáveis pelo torque no rotor.

Várias formas e modelos de motores elétricos são apresentadas em meio a documentos de patentes oficiais, além de artigos e experimentos que utilizam o campo magnético como único meio gerador de força para produzir energia mecânica. Estudos bibliográficos foram feitos visando desenvolver um protótipo com função giratória que se assemelhe ao motor elétrico, e através do mesmo identificar quais os fundamentos do seu funcionamento.

2. Metodologia

Com o passar dos anos, a humanidade tem evoluído de forma significativa no estudo e desenvolvimento das ciências, isso graças a pessoas que dedicaram a vida a entender como o mundo funciona, os confortos que hoje estão disponíveis a sociedade, se deve a grandes descobertas científicas, sendo a pesquisa científica de fundamental importância para o aperfeiçoamento de tecnologias, uma vez que proporciona aprimoramento do meio social como benefício para o ser humano, com esse aspecto a pesquisa científica deve estar presente no cotidiano escolar, pois a pesquisa, mesmo em campos óbvios e já estudados podem trazer benefícios admiráveis ao ser humano. A forma mais adequada de trabalhar a pesquisa, seja no ensino básico ou superior é através da experimentação. Sobre as vantagens da atividade experimental (Gaspar, 2009), afirma que

A primeira vantagem que se dá no decorrer de uma atividade experimental é o fato de o aluno conseguir interpretar melhor as informações. O modo prático possibilita ao aluno relacionar o

conhecimento científico com aspectos de sua vivência, facilitando assim a elaboração de significados dos conteúdos ministrados. A segunda vantagem é a interação social mais rica, devido à quantidade de informações a serem discutidas, estimulando a curiosidade do aluno e questionamentos importantes. Como terceira vantagem, vemos que a participação do aluno em atividades experimentais é quase unânime.

Dentro do campo da pesquisa tecnológica é imprescindível o estudo dos motores elétricos, que com o passar dos anos vem se tornando o coração da maioria das máquinas modernas, assim é torna-se necessário o estudo de seus princípios de funcionamento, desde a, construção até as aplicações.

Diante das características do trabalho, pode-se classificar a presente pesquisa quanto a forma da abordagem do problema, em qualitativa de caráter experimental, segundo (Gil, 2002)

A pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Após um estudo detalhado de cada componente do motor elétrico, foi elaborado uma modelagem do experimento proposto em um ambiente 3D, procurando priorizar a simplicidade do experimento e a utilização de materiais de fácil acesso. Para modelagem foi o utilizado o software SketchUp, descrevendo cada elemento do experimento e sua respectiva posição.

Como um dos objetivos desse trabalho é apresentar simplicidade no protótipo do motor elétrico CC, assim foi dispensado alguns componentes desnecessários para o funcionamento do experimento, e alguns foram acoplados aos outros, de forma a facilitar o entendimento e o estudo analítico do mesmo.

Todos os motores elétricos de corrente contínua ou alternada tem uma carcaça construída normalmente de um material robusto para dar sustentação e proteção. O material varia de motor para motor, equipamentos para uso doméstico a carcaça é apenas um sustentáculo para o estator. Ambientes em que o motor ficará exposto a atmosferas agressivas

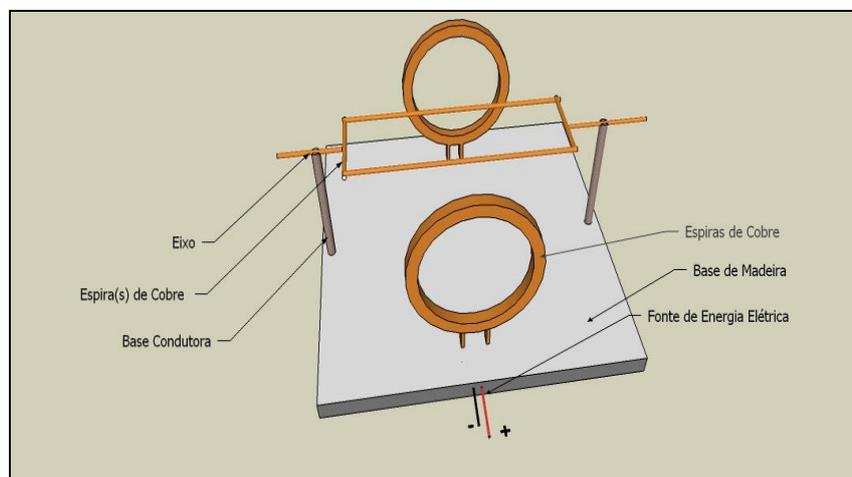
ou mesmo explosivas, a proteção mecânica não basta, vedações e pintura diferenciada são usadas de modo a tornar a carcaça resistente às agressões que encontrará. Para o experimento não foi utilizado uma carcaça fechada por alguns motivos, primeiramente o experimento vai trabalhar com baixas tensões, não oferecendo riscos fatais aos que o manipulam, segundo que a carcaça fechada dificultaria a análise dos princípios de funcionamento, então foi usado simplesmente uma base de madeira para acoplar os demais componentes.

Com o descarte da carcaça fechada, não teríamos suporte para o estator, desse modo foi proposto uma base condutora que pudesse ser acoplado o eixo.

O eixo é normalmente feito de aço-carbono tratado termicamente para ser resistente e suportar os esforços mecânicos da carga a ser acionada. É também sobre a sua estrutura que é montado todo o resto do rotor. Assim foi modelado um dispositivo que pudesse dispor das bobinas, alternador e rotor, que será referenciado apenas de rotor.

O estator tem a função de produzir um campo magnético fixo, pode ser constituído por ímãs ou eletroímãs, nesse projeto pretende-se construir um estator usando eletroímãs, posicionados nas laterais do experimento de forma a gerar um fluxo magnético quando percorrido por corrente. A modelagem completa do experimento pode ser analisada na figura 1.

Figura 1. Modelagem 3D do experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor

Todos os componentes descritos na figura 1, foram desenvolvidos com base nos fundamentos teóricos dos componentes de um motor elétrico de CC industrial. Foram dispensados nessa modelagem alguns itens, tais como, enrolamento do interpolar, núcleo da armadura, enrolamento da armadura, núcleo polar, escovas e o enrolamento polar. Pois esses componentes não interferiram nos princípios de funcionamento do protótipo.

Com os elementos em suas respectivas posições teóricas, os alunos procuraram montar o experimento assim como estava previsto no projeto.

Para a base do experimento foi utilizado duas bases de MDF, com furos em sua estrutura que possibilitam a fixação da base condutora e a passagem dos fios de alimentação. A segunda base do eixo e dos demais componentes foi confeccionada com um fio de cobre de 20mm, atendendo com o que estava previsto na modelagem. A base de MDF e a condutora podem ser vistas nas figuras 2 e 3.

Figura 2. Base condutora.



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Figura 3. Base de MDF.



Fonte: Arquivo pessoal do autor

A confecção do rotor foi a parte mais delicada do projeto, pois além de termos três dispositivos acoplados em apenas um componente, foi necessário cuidado para que as bobinas tivessem forma retangular com $65\text{mm} \times 85\text{mm}$, obedecendo a simetria de um quadrilátero. Para a bobina foram enroladas 10 espiras de fio esmaltado $0,50\text{ mm}$, deixando 10mm de fio para formar o eixo que será acoplado na base condutora. O comutador é o dispositivo que representa o elo entre a fonte de alimentação e o rotor do motor, sua confecção não dispõe de nenhuma configuração complicada, simplesmente retirou parte do esmalte do fio de uma das laterais que compõe o eixo, assim que o mesmo começa a girar, o comutador mostra-se equivalente ao utilizados em motores CC industrializados. O rotor pode ser visto na figura 4.

Figura 4. Rotor do Protótipo.



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Apesar de simples o dispositivo acima atende com os requisitos dos dispositivos que o compõe, a iniciativa de acoplar três dispositivos em apenas um, foi para simplificar o dispositivo e utilizar a menor quantidade de materiais possível. A confecção de uma bobina retangular tem como objetivo simplificar o estudo analítico nos tópicos seguintes, no caso de uma bobina circular ou elíptica o experimento funcionaria e também seria possível fazer o estudo analítico.

O estator é a parte do motor que se mantém fixo à carcaça e tem por função conduzir o fluxo magnético, pode-se utilizar bobinas ou ímãs para construção de estatores, nesse projeto foi utilizado duas bobinas circulares posicionadas nas laterais do experimento, separadas por uma distância de **90 mm**, confeccionadas com de raio **40mm** composta por **30** espiras de fio esmaltado **0,80 mm**.

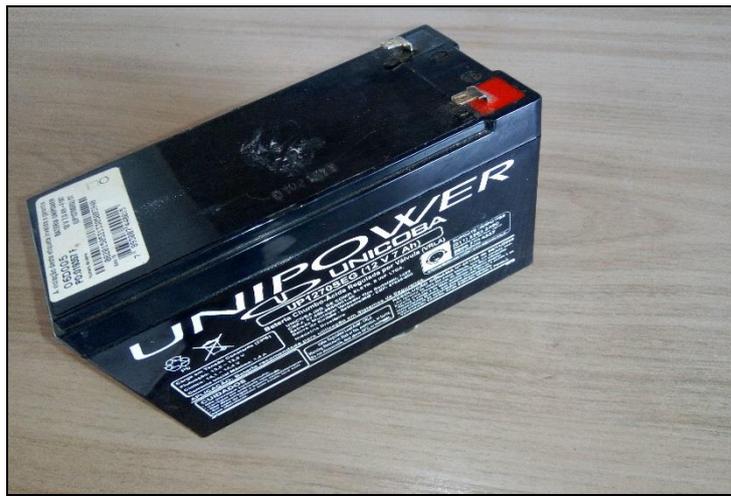
Figura 5. Bobinas utilizadas no estator



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Todo motor elétrico precisa de uma fonte de alimentação, os motores de CC normalmente são alimentados por fontes com níveis de 24 V/CC ou 12 V/CC. No projeto foi utilizado uma bateria estacionaria Unipower aproveitada de um nobreak, tendo em suas configurações uma tensão de saída de 12V\CC e uma amperagem de 7Ah. A bateria utilizada pode ser vista na figura 6.

Figura 6. Bateria estacionaria 12V

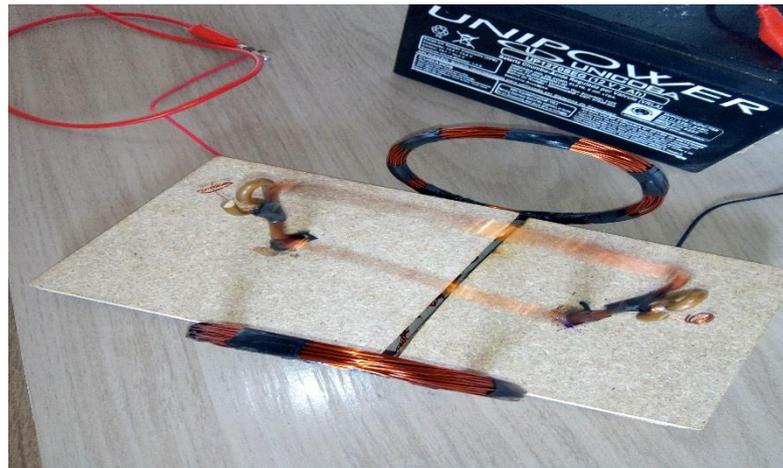


Fonte: Arquivo pessoal do autor

Detalhes construção e funcionamento referente a bateria não serão discutidos, por não ser objetivo do trabalho. Para alimentação do motor elétrico poderia ser utilizado outra fonte de alimentação cuja tenção de saída seja 12-24 volts. Assim estudaremos nos próximos tópicos simplesmente o efeito que essa tenção causa ao ser conectada a bateria nos polos do motor elétrico.

Com base no modelo 3D do experimento os estudantes envolvidos no projeto, procuraram montar o experimento como sugere a modelagem. Dispondo de todos os componentes e após ajustes, o protótipo do motor elétrico de CC teve êxito, assim, os envolvidos no projeto procuraram estudar os princípios de funcionamento e expor nos próximos capítulos um estudo analítico do mesmo, dando ênfase a tópicos relacionado a física. A montagem e o funcionamento do experimento pode ser observado na figura 28.

Figura 7. Protótipo do motor elétrico de CC, montado e funcionando



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Os testes experimentais mostraram-se bem promissores, oferecendo um protótipo simples e um material de grande valor experimental apresentando simplicidade na sua estrutura e funcionamento, além intrigar inúmeros conceitos relacionados a física e a engenharia, podendo ser feitos estudos direcionados.

3. Resultados e Discursões

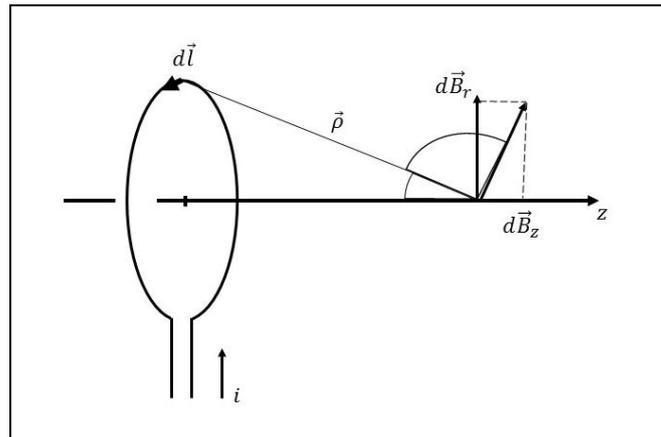
Este capítulo destina-se a descrição experimental e analítica dos princípios de funcionamento do protótipo do motor elétrico. Embora alguns detalhes tenham sido omitidos, é possível analisar diversos fenômenos como torque, velocidade do rotor, força magnética e momento dipolar magnético da bobina.

CAMPO MAGNÉTICO GERADO PELO ESTATOR

O funcionamento do motor elétrico de CC só é possível graças ao campo magnético submetido as bobinas do rotor, esse campo magnético é gerado pelas bobinas posicionadas nas laterais do experimento. Trona-se necessário o estudo do campo magnético gerado pelo estator do protótipo do motor elétrico de CC.

Primeiramente, formularemos uma equação do campo magnético em função da distância entre as bobinas. Para facilitar a solução observe a figura 8, que descreve o comportamento do campo magnético na configuração do protótipo.

Figura 8. Esquema da bobina circular percorrida por corrente.



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Em um caso genérico, temos duas bobinas circulares planas separadas por uma distância a , cada uma contendo N quantidades de espiras, com a corrente fluindo nas duas com o mesmo sentido. O cálculo do campo magnético produzido por uma espira circular percorrida por uma corrente i pode ser feita usando a Lei de Bio-Savart, que pode ser escrita da seguinte forma.

$$d\vec{B} = \frac{I}{4\pi} \frac{\mu_0 d\vec{l}}{R^2 + Z^2} \quad (1)$$

As componentes $d\vec{B}_r$ se anulam, assim o campo magnético na direção radial é nulo.

$$dB_r = 0 \quad (2)$$

O campo resultante será apenas na direção de z , dado por

$$B = B_z = \frac{I\mu_0}{2} \frac{R^2}{(R^2 + Z^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$\vec{B} = \frac{I\mu_0}{2R} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (4)$$

Para o valor do campo magnético de uma bobina com N espiras, é obtido a equação 4 pelo número de espiras. O campo na mediana da distância entre as bobinas é expresso por

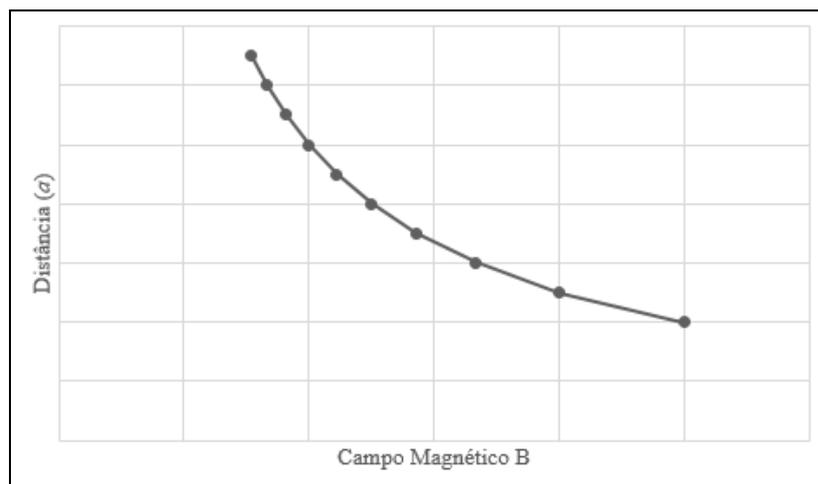
$$B = \frac{I\mu_0 N}{2R} \left\{ \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{z - a/2}{R}\right)^2\right]} + \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{z + a/2}{R}\right)^2\right]} \right\} \quad (5)$$

No estudo de caso do protótipo, as bobinas têm dimensões definidas, assim teoricamente, o campo magnético gerado pelo estator é dado por

$$B \simeq 3,66 \times 10^{-4} N/A.m \quad (6)$$

Analisando a equação 6 podemos observar a relação do campo magnético e a distância entre as bobinas, é possível concluir que são grandezas inversamente proporcionais. O gráfico do campo em função da distância entre as bobinas pode ser visto na figura 1.

Figura 9. Gráfico do campo em função da distância entre as bobinas.



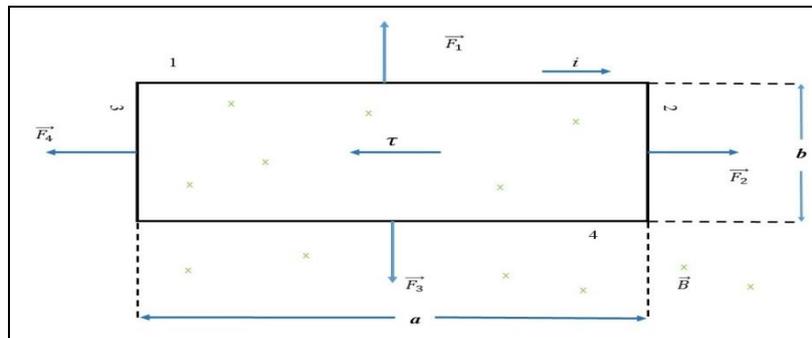
Fonte: Arquivo pessoal do autor

TORQUE QUE AGE SOBRE A BOBINA

O campo magnético gerado pelo estator causa sobre a bobina do motor elétrico um torque, quando a mesma é percorrida por corrente.

A figura 8 descreve uma única bobina semelhante à do protótipo, com dimensões a e b imersa em um campo magnético uniforme \vec{B} e percorrida por uma corrente i . Observando figura é possível identificar as forças atuantes na bobina. A posição da bobina foi estratégica, de forma que os lados 1 e 3 encontrar-se sempre perpendicular ao campo magnético, consequentemente os lados 2 e 4 formam um ângulo diferente de 90° com o campo.

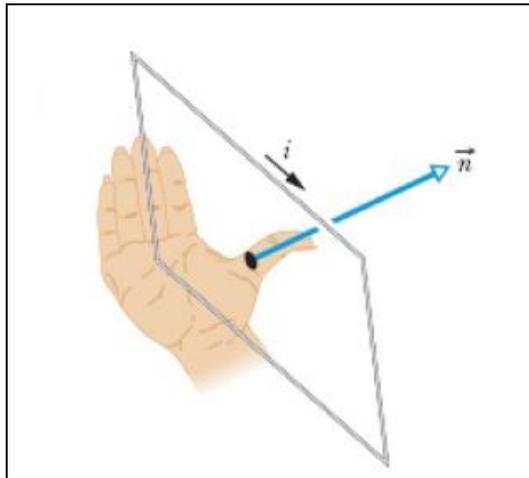
Figura 10. Visão bidimensional da bobina.



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Para definirmos a orientação da bobina em relação ao campo magnético, será definido um vetor normal \vec{n} sendo perpendicular ao plano da espira. Por meio da regra da mão direita é possível determinar a direção do vetor normal, quando os dedos da mão direita apontam na direção da corrente em um plano da espira, o polegar estendido aponta na direção do vetor normal, como mostra a figura 11.

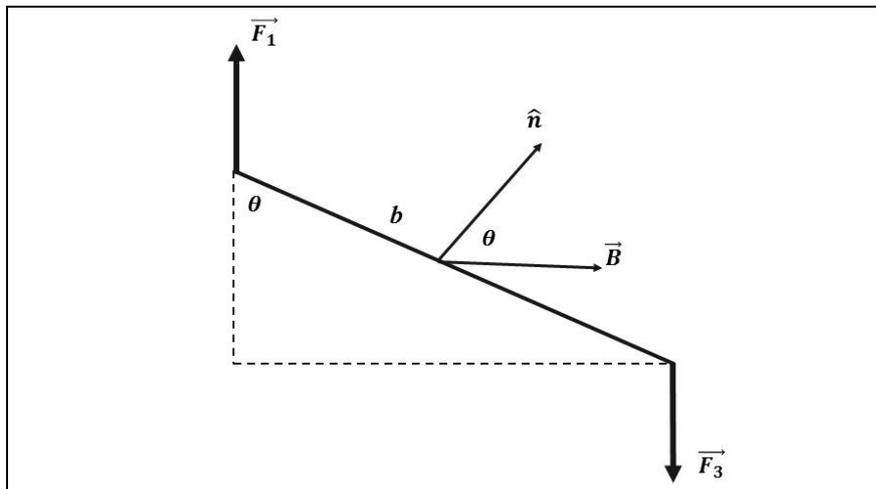
Figura 11. Regra da mão direita para identificação do vetor normal.



Fonte: HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. (2009) Fundamentos de física. Rio de Janeiro.

A força total que age na espira é a soma vetorial das forças que age sobre os quatro lados. No caso do lado 2, o vetor \vec{L} da equação 1.16 aponta na direção da corrente e tem módulo b . O ângulo entre \vec{L} e \vec{B} para o lado 2 é $90^\circ - \theta$. Observe a figura 12.

Figura 12. Vista lateral da espira.



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Assim o módulo da força \vec{F}_2 que age sobre o lado 2 é

$$F_2 = ibB (\text{sen } \theta - 90^\circ) \quad (7)$$

$$F_2 = ibB \cos \theta \quad (8)$$

Por simetria a força que age no lado 4 tem o mesmo módulo da força que age sobre o lado 2 e tem sentido oposto, assim

$$F_2 + F_4 = 0 \quad (9)$$

Podemos observar por meio da figura 12 que as forças F_2 e F_4 estão aplicadas ao longo de uma reta que coincide com o eixo de rotação da espira, conseqüentemente o torque $\tau_{2,4}$ produzido por essas forças também é zero.

A soma das forças que agem nos lados 1 e 3 é diferente de zero, pois nesse caso o vetor \vec{L} da equação 9 é perpendicular ao campo magnético. Assim, o módulo da força F_1 independe de θ , e dado por

$$F_1 = iaB \quad (10)$$

A soma das forças que agem nos lados 1 e 3, tem o mesmo módulo mais observando a figura 12 elas não estão aplicadas ao longo mesma reta, assim o torque associado a elas é diferente de zero.

O torque tende a fazer a espira girar em um sentido de forma que o vetor normal se alinhe com direção ao campo magnético. Sabendo que o torque é dado por

$$\tau = F \cdot r \cdot \text{sen } \theta \quad (11)$$

Onde τ é o torque, r é a distância da força aplicada até o ponto fixo, F é a força aplicada e θ é ângulo entre a força e o braço da alavanca. Nesse caso a alavanca tem o braço $b/2$, assim o torque produzido pelas forças 1 e 3 é dado por

$$\tau_{1,3} = 2F_1 \frac{b}{2} \text{sen } \theta \quad (12)$$

$$\tau_{1,3} = F_1 b \text{sen } \theta \quad (13)$$

$$\tau_{1,3} = iaBb \text{sen } \theta \quad (14)$$

Para cálculo de uma bobina com N espiras, como é o caso do motor elétrico CC, o módulo do torque total que age sobre a bobina é

$$\tau = N iab B \text{sen } \theta \quad (15)$$

Escrevendo a equação 15, supondo a área A da bobina dada por (ab) , temos

$$\tau = N iA B \text{sen } \theta \quad (16)$$

Na bobina protótipo do motor de corrente CC, a corrente conduzida é invertida quando o vetor normal está prestes a se alinhar com o campo magnético, para que o torque continue a fazer a bobina girar. Essa inversão é feita pela i .

Como mencionado na metodologia, a forma que a geométrica da bobina é opcional, como exemplo, caso tivéssemos uma bobina circular com área πr^2 , o torque seria dado por

$$\tau = Ni \pi r^2 B \text{sen } \theta \quad (17)$$

No caso do experimento proposto o torque produzido utiliza-se dos parâmetros estabelecidos na metodologia, como número de espiras, corrente, área e campo magnético, de forma que o torque máximo exercido pelas forças atuante na bobina é

$$\tau \simeq 1,41 \times 10^{-4} N.m \quad (18)$$

MOMENTO DIPOLAR MAGNÉTICO

Analisando o comportamento da bobina imersa no campo magnético e percorrida por corrente, foi possível identificar um toque associado ao movimento do rotor. Assim podemos perceber que a bobina se comporta como um ímã em forma de barra, conseqüente a isso, dizemos que a bobina tem as características de um dipolo magnético, sendo possível associar um momento dipolar magnético $\vec{\mu}$ à bobina. O módulo do momento dipolar magnético será dado por

$$\mu = NiA \quad (19)$$

Onde:

$N \rightarrow$ Número de espiras da bobina

$i \rightarrow$ Corrente na bobina

$A \rightarrow$ Área das espiras das bobinas

O módulo do momento magnético no protótipo do motor elétrico de corrente contínua tem valor numérico igual a

$$\mu \simeq 0,0386 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad (20)$$

A direção do vetor $\vec{\mu}$ tem a mesma direção do vetor normal, definido na formulação do torque, assim podemos usar a mesma regra da mão direita. Associando as equações 15 e 18 podemos obter a seguinte expressão

$$\tau = \mu B \text{ sen } \theta \quad (21)$$

Podendo ser escrito na forma vetorial

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (22)$$

Os resultados referentes ao campo magnético, torque e momento magnéticos, apresentam resultados teóricos, por não considerar fatores relevantes para resultados reais, como, resistência das bobinas, caminho percorrido pela corrente e perdas na corrente elétrica.

VELOCIDADE DO ROTOR

A velocidade de rotação do rotor é dada pelo número de rotação do eixo com relação ao eixo, expressa em unidades de rotação por minuto (rpm). Algumas conclusões teóricas podem ser feitas, como exemplo a redução no campo magnético \vec{B} provoca um acréscimo em sua velocidade, conseqüentemente o aumento no campo provoca uma diminuição na velocidade do motor. Esse comportamento pode ser observado na figura 13.

Além de contextos teóricos, podemos chegar a essa conclusão analisando a equação 2, e com algumas manipulações algébricas pode ser reescrita como

$$n = \frac{V}{k \cdot \phi} \quad (23)$$

Sendo:

V → Tensão de entrada na armadura da bobina

ϕ → Fluxo do campo magnético

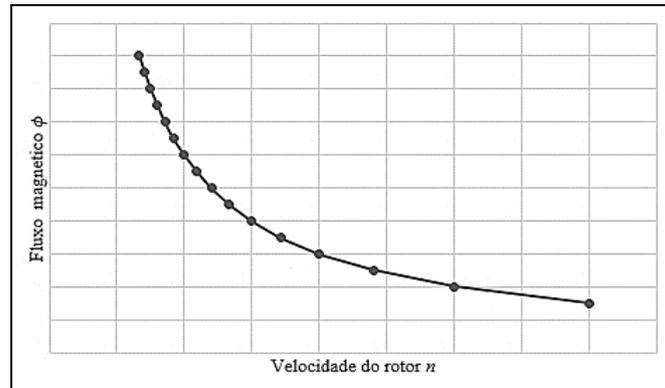
n → Velocidade do rotor

Onde k é uma constante que varia de motor para motor, os detalhes relacionados a constante não serão aprofundados devido à ausência de alguns componentes relacionado ao motor de corrente contínua industrial.

Para mudança da velocidade do rotor, emprega-se uma forma conveniente de controlar a velocidade, simplesmente variando o fluxo do campo através do ajuste da resistência no circuito do enrolamento de campo.

Por não ser um dos objetivos do trabalho, não foi construído um controlador de velocidade, contudo foi desenvolvido no software Microsoft Excel um gráfico que mostra a velocidade n em função do fluxo de campo magnético ϕ .

Figura 13. Gráfico da velocidade do rotor em função do fluxo do campo magnético



Fonte: Arquivo pessoal do autor

4. Conclusão

O presente trabalho buscou trazer aos estudantes de graduação, seja eles de física, engenharia e outras áreas de formação, um experimento de baixo custo onde os mesmos consigam identificar tópicos estudados no curso de eletromagnetismo. Apesar da simplicidade do experimento desenvolvido, foi possível estudar, definir e observar diversos fenômenos físicos, tais como campos magnéticos gerado por bobinas, força magnética, torque em uma espira, força magnética em um fio percorrido por corrente, velocidade de um rotor composto por bobinas imerso em um campo magnético, momento dipolar de uma espira percorrida por corrente, além de outros elementos aqui não citados.

O experimento descreve de forma satisfatória o funcionamento de um motor elétrico, trazendo principalmente aos alunos de engenharia mecânica, a oportunidade de observar os componentes do mesmo, vistos antes apenas em livros didáticos com demonstrações bem grosseiras.

Apesar de complexo os componentes e funcionamento de um motor elétrico de CC, o protótipo revela um funcionamento simples e uma visão ampla dos componentes. Além de apresentar um estudo experimental detalhado, esse trabalho proporciona um material bibliográfico simples para os interessados em conhecimento analítico acerca dos motores elétricos de corrente contínua.

A utilização de uma bobina retangular foi conveniente visto que a maioria dos livros didáticos usam tal simetria para abordam conceitos relacionados ao motor elétrico de corrente continua, contudo, a disposição da bobina é opcional, existe no mercado motores elétricos

com os mais variados tipos de bobinas. Para um melhor aproveitamento, poderíamos ter usado uma bobina circular, onde melhor se aplica ao dispositivo e apresenta menor resistência para girar.

Inicialmente o projeto pretendia utilizar um ímã de ferrite como estator, por vez o estator formado por bobinas circulares, abririam o campo de discussões sobre campo magnético gerado por uma espira percorrida por corrente, quanto a quantidade de bobinas e posições, podem ser ajustadas para melhor funcionamento do dispositivo, assim como a tensão para acionar o experimento.

Procurou-se utilizar uma linguagem elementar nos resultados e discussões, uma vez que o objetivo não era trazer aos leitores demonstrações complexas do funcionamento de um motor elétrico, mais sim definições e demonstrações simples. Forneceu-se aqui uma explicação do movimento rotacional pelo rotor de um motor elétrico pela aplicação de forças magnéticas, geradas a partir de eletroímãs, enfatizando reflexões que pretendem contribuir para educadores, alunos, pesquisadores e interessados em geral. Apresentando resultados que possam contribuir para o avanço tecnológico, valorizando sempre a simplicidade fundamental no universo, a energia.

Sendo o responsável pelo projeto alunos e professores de licenciatura plena em física, pretende-se aplicar o experimento em sala de aula, para fins didáticos, apresentado os resultados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

Roberto A. Alécio. (2011). *Estudo Analítico/Experimental de um Protótipo de Rotor Magneto* (Dissertação). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

William D. Callister. (2007). *Materials Science and Engineering: an introduction*. New York: John Wiley e Sons Inc.

B.S.Campos; S.A. Fernandes; A.C.P.B. Ragni; N.F. Sousa. (2017,12). Física para Crianças: abordando conceitos físicos a partir de situações problema. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 34(1).

Stephen J. Chapman. (2013). *Fundamentos de Maquinas Elétricas*. Porto Alegre: AMGH.

Charlie S. Gonçalves. (2006). *Montagem e Construção de um Magnetômetro a Efeito Kerr Magneto-Óptico* (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Alberto Gaspar. (2003). *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. São Paulo: Ática.

Antonio Gil. (2002). *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. São Paulo: Atlas.

Giuseppe G.M. Gozzi; Terra M. S. PAREDE. (2011). *Eletrônica: Máquinas e instalações elétricas*. São Paulo: Fundação Padre Anchieta.

J. Griffiths. (2011). *Eletrodinâmica*. São Paulo: Pearson Addison Wesley.

David Halliday; Robert Resnik; Jearl Walker. (2013). *Fundamentos de Física: Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC.

Kleber D. Machado. (2002). *Teoria do Eletromagnetismo*. Ponta Grossa: UEPG.

Alfonso Martignoni. (1970). *Máquinas Elétricas de Corrente Contínua*. Ponta Grossa: Editora Globo.

M. Herch Nussenzveig. (1997). *Curso de Física Básica: Eletromagnetismo*. São Paulo: Edgard Blucher.

João G.S. Oliveira. (2009). *Materiais usados na construção de motores elétricos*. Porto Alegre.

Ângelo F. Padilha. (1997). *Materiais de Engenharia: Microestruturas e Propriedades*. São Paulo: Salmeron C. Gomes Editora.

John R. Reitz; Frederick J. Milford; Robert W. Chisty. (1982). *Fundamentos da Teoria eletromagnética*. Rio de Janeiro: Editora Campus LTDA.

Sousa, E., Wellington, B., & Antonio, S. (2017). Estudo dos Princípios de Funcionamento de um Motor Elétrico Através de um Experimento Magnético de Baixo Custo. In *Encontro Internacional de Jovens Investigadores*. Fortaleza: Realize.

Sousa, E., Brasil, W., Antonio, S., & Silva, J. (2016). Estudo do potencial eólico e Estimativa da potência energética no Município de São João dos Patos – Ma. In *SBPC*. Porto Seguro: SBPC

Paul Tipler; Gene Mosca. (2009) *Física para Cientistas e Engenheiros, volume: Eletricidade e Eletromagnetismo, Óptica*. Rio de Janeiro: LTC.

Eurico Turrini. (1993). *O Caminho do Sol: O Uso da Energia Solar*. Petrópolis - RJ: Vozes.

Gileno J. V. Villar. (2006). *Geradores e Motores CC: Máquinas de Corrente Contínua*. Mossoró - RN.

Hugh D. Young; Roger. A. Freedman. (2009). *Física III: Eletromagnetismo*. São Paulo: Pearson Addison Wesley.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Antonio Marques dos Santos – 60%

Erikson Alves de Sousa – 40%